



EEIST

能源创新和转型的新经济模式：

回答新问题、提出好答案

主要作者： Pete Barbrook-Johnson, Simon Sharpe, Roberto Pasqualino, Fernanda Senra de Moura, Femke Nijsee, Pim Vercoulen, Alex Clark, Cristina Peñasco, Laura Díaz Anadon, Jean-Francois Mercure, Cameron Hepburn, J. Doyne Farmer 和 Timothy M. Lenton。



目录

执行摘要	4	新经济建模应用案例分析	34	能源转型的影响		结论	
政策要点	8	全球能源转型		劳动力市场转型建模：以巴西生产率转移为例	120	案例分析结果摘要	177
导言	16	基于实证的能源技术成本预测	38	中国和煤电转型的社会影响	128	主题和经验	178
呼吁变革	16	实现快速、平稳脱碳和可持续发展的政策选择	46	国家脱碳计划		新经济模型的未来	179
兑现新经济建模的承诺	18	电力和工业部门		印度2070年净零排放的经济影响	134	附录	
本报告的受众以及阅读方法	19	中国、印度和巴西的可再生能源的必然趋势		印度经济脱碳：政策和影响	142	新经济模型的数据要求示例	180
本报告的其余内容	19	与边际定价	52	数据驱动的可持续发展目标与能源转型互动的系统映射	150	案例分析附录：最具成本效益的碳定价形式是什么？	180
解决关键的能源和气候政策问题		印度氢、氨行业耦合建模	62	中国出口的绿色复杂性和竞争力	156		
政策问题的类型	20	最具成本效益的碳定价形式是什么？中国（及一般）排放交易和碳税建模	70	金融			
我们处于政策周期的哪一阶段？	22	交通		弥合英国的绿色金融缺口：低碳电力转型及其经济影响	162		
政策问题有多明确？	23	激活中国、印度、欧洲及美国电动汽车的临界点	88	巴西可再生能源投资的退出期权	168		
什么是“新经济模型”？		农业					
“新”在哪里？	24	支持可持续农业集约化：全系统基于主体建模方法	112				
不同类型的模型	24						
如何选择和使用新经济模型？							
选择最合适的建模方法	28						
有关预测、预报和实证验证的思考	31						
如何开始使用这些方法	31						

贡献作者：案例分析作者在每个案例分析中列明
封面图片：职业流动网络。122页有全图。

关于

EEIST项目对前沿的能源创新分析进行研究，以支持政府关于低碳创新和技术变革的决策。

本项目与巴西、中国、印度、英国和欧盟的政策制定者和利益攸关方进行接触，旨在为新兴国家的经济发展做出贡献，支持全球可持续发展。

EEIST项目由埃克塞特大学牵头，汇集了来自巴西、中国、英国和欧盟的世界领先研究机构的国际团队。

参与机构包括**英国**：埃克塞特大学、牛津大学、剑桥大学、伦敦大学学院、安格利亚鲁斯金大学、剑桥计量经济学会、气候策略机构；**印度**：能源与资源研究所、世界资源研究所；**中国**：清华大学、能源研究所；**巴西**：里约热内卢联邦大学、巴西利亚大学、坎皮纳斯州立大学；**欧盟**：比萨圣安娜大学。

贡献者

EEIST由英国能源安全和净零部和儿童投资基金会（CIFF）通过英国国际发展研究署（UK Aid）共同资助。撰稿作者来自各大机构。完整的机构名单见网站www.eeist.co.uk

本报告的内容仅代表作者个人观点，不代表英国政府、CIFF、作者所属组织或任何赞助机构的观点。

致谢

作者感谢英国能源安全和净零部、儿童投资基金会（CIFF）、正交气候基金会（Quadrature Climate Foundation）和创始人誓言（Founders’ Pledge）作为EEIST项目赞助商提供的支持。我们还要感谢所有贡献出时间和专业知识来发展和更新本报告中提出的分析、概念和想法并将其出版的人，这包括但不限于：Jacqui Richards、来自EEIST伙伴国家的实践社区的个人、EEIST高级监督小组以及英国政府。



EEIST

本文介绍了EEIST项目编制的报告《能源创新和转型的新经济模式：回答新问题、提出好答案》的执行摘要和政策重点部分。

此报告还包括全球能源转型、电力和工业部门、运输、农业、转型影响、国家脱碳计划和金融的建模案例研究等内容。阅读全文请访问

<https://eeist.co.uk/eeist-reports/new-economic-models-of-energy-innovation-and-transition/>

简介

EEIST项目对前沿的能源创新分析进行研究，以支持政府关于低碳创新和技术变革的决策。

本项目与巴西、中国、印度、英国和欧盟的政策制定者和利益攸关方进行接触，旨在为新兴国家的经济发展做出贡献，支持全球可持续发展。

EEIST项目由埃克塞特大学牵头，汇集了来自巴西、中国、英国和欧盟的世界领先研究机构的国际团队。

参与机构包括**英国**：埃克塞特大学、牛津大学、剑桥大学、伦敦大学学院、安格利亚鲁斯金大学、剑桥计量经济学会、气候策略机构；**印度**：能源与资源研究所、世界资源研究所；**中国**：清华大学、能源研究所；**巴西**：里约热内卢联邦大学、巴西利亚大学、坎皮纳斯州立大学；**欧盟**：比萨圣安娜大学。

贡献者

EEIST由英国能源安全和净零部和儿童投资基金会（CIFF）通过英国国际发展研究署（UK Aid）共同资助。撰稿者来自各大机构。完整的机构名单见网站www.eeist.co.uk

本报告的内容仅代表作者个人观点，不代表英国政府、CIFF、作者所属组织或任何赞助机构的观点。

致谢

作者感谢英国能源安全和净零部、儿童投资基金会（CIFF）、正交气候基金会（Quadrature Climate Foundation）和创始人誓言（Founders’ Pledge）作为EEIST项目赞助商提供的支持。我们还要感谢所有贡献出时间和专业知识来发展和更新本报告中提出的分析、概念和想法并将其出版的人，这包括但不限于：Jacqui Richards、来自EEIST伙伴国家的实践社区的个人、EEIST高级监督小组以及英国政府。

执行摘要

本报告展示了新经济建模对研究低碳转型相关政策问题的价值。通过与政策利益相关者合作，本报告对15项来自全球、区域和国家的真实案例进行了分析，展示了新经济建模方法如何为决策者提供重要洞见，还就如何评估和选择不同的建模方法以及如何进行使用提供了指导。

新一代的经济模型能提供信息，推动能源转型的成功决策。政府使用的大多数模型都基于均衡假设，即在没有外部冲击的情况下，经济是稳定的，行为者没有理由改变战略。对于某些政策问题，这可能是一种合适的建模方法。但如果状态之间的动态变化过程很重要，这些模型就不合适了。脱碳需要经济体中每个排放行业的系统转型。在这种情况下，许多行为者有充

分的理由改变战略，新技术涌现，市场结构发生变化。尽管均衡模型仍然很有价值，例如可以回答“净零经济会怎么样？”之类的问题，但非均衡模型作为一种补充工具也很重要，特别是针对“我们如何实现目标”这样的问题。

新模型有助于制定成本效益高的脱碳政策。有一类模型对特定时间点的经济状况进行计算和比较，还有一类模型对经济变化的过程进行模拟，两者对政策问题提供的答案是不同的。本报告的案例分析介绍了一系列新模型，并就四类政策问题提出了一系列关键发现。它们采用了不同的研究方法，重点关注巴西、中国、印度和英国等四国。表A总结了主要研究结果，后面的政策要点部分提供了进一步的示例。

表A：本报告涉及的政策问题和主要结论

政策问题	主要结论
发展方向：是否应该脱碳？成本有多高？对宏观经济的影响是什么？	- 针对不同国家、使用不同方法进行的多个案例分析都表明，脱碳可能提供净就业机会，考虑到相关地区的具体经济结构，可能推动经济的整体增长。 - 提高目前设想的转型速度是更优的。 - 在某些转型情景下，可能会产生负面影响或负面成本，我们能确定这些影响可能出现的特定时间段、行业或职业，以及与其他发展目标之间的联系。
技术选择：应该专注于哪些技术？对行业的影响是怎样的？	- 政策制定者应尽量消除对零排放技术的壁垒，随着部署的扩大，这些技术的性能会提高，成本会降低，包括太阳能、风能、电解槽和电池。政策制定者应塑造市场，以加快技术创新和增长。 - 各国基于自身现状，将关注不同的技术。 - 化石燃料向其他能源转型的不同性质，会产生可预测和可管理的影响。
政策选择：哪些政策最能支持我们的目标？	- 对于实现减排和关键能源技术的创新，投资于零排放技术往往比给化石燃料定价更有效。 - 监管可以非常有效地将投资重新分配给零排放技术，加速其改进并降低成本。 - 硬性技术规定或政府采购是启动某一行业的有效政策，可以使其他政策更高效。 - 将碳定价纳入一揽子政策是有效的做法（收税比进行总量控制和碳交易的方式更加有效）。 - 政策支持的关键是时机，迟来的支持会增加不必要的锁定效应。 - 政策支持通常可以实现收入或财政中立。
政策设计：应该如何设计这项政策？	- 当财政补贴或税收水平使零排放技术成本足以与化石燃料相竞争时，其成效可能会尤为显著。 - 强制规定采用零排放技术，可能比要求提高化石燃料的效率更有效（尽管两者结合可能是最好的）。 - 如果快速减排超过了排放配额的调整，应设计排放交易方案，防止在减排上“刹车”。

新模式可以为低碳转型提供更多的洞见。除了选择技术组合或部署清洁技术的政策外，新一代模型还可以提供转型期内社会、环境和宏观经济方面的广泛洞见，有助于厘清以下问题：不同行业就业机会的增加或减少，劳动力缺少哪些技能，转型如何影响贸易平衡，以及如何取代化石燃料的税收。

新一代模型已经面世。案例分析采用多种建模方法，包括：（i）数据分析法，如系统映射和经济复杂性；（ii）宏观经济模型法，如能源-环境-经济宏观计量模型（E3ME）及其在特定行业的扩展；（iii）详细的经济系统动态模型；（iv）经过实证验证的基于主体的模型；以及（v）能源系统延伸模型。多样性的方法可以确保我们不依赖于单一类型的建模。这些方法都假设经济处于变化状态，模拟变化过程，以便政策能够理解和影响其过程。这些方法基于自下而上、结构现实、实证验证的经济模型；20或30年前这些方法刚出现时所做出的承诺正在兑现。

通过采用不同的方法，提出不同的政策问题，可以获得方法论方面的两个经验。首先，学者、分析师和政策制定者携手合作，同时共同开发合适的模型并分析真正的政策问题，具有巨大的价值；这种工作模式不断创造价值，提升使用新经济模型的能力。第二，决策者要求在模型中全面体现政策及实施，这显示了详细的政策分析和评估的巨大价值。

经济建模具有进一步改善的巨大潜力，可以从以下三方面推进：

1. **学习实践中的有效方法：**随着新建模方法的应用和完善，可以深入了解哪些方法最有效，分析师和决策者如何最好地利用这些方法、进行能力建设。

2. **开发强大的思维工具：**新经济模型的使用和经济理论的发展互相促进，尤其是关于创新和结构变化的过程，从上一份报告《制定能源转型政策的十项原则》，到可以用来思考技术和经济体系的经验法则，如反馈、指数变化、临界点等。

3. **增加创新和透明度：**随着对新经济建模需求的增长，我们希望看到新的方法论创新。模型开发及其使用的透明度和清晰度也将提高，可以扩大新方法的使用，加快模型开发的创新。

政府和国际组织可以加快新建模方法的出现和发展。政府是政策分析的最大客户；通过采购和资助新模型的开发，可以刺激学术界对这些新方法投入时间和智力资本。政府可以培训官员学习非均衡模型开发和系统映射、风险机会分析等补充分析技术，以提升自身利用新一代模型的制度能力。

本报告的主要受众包括分析师、建模人员、研究人员和学者，他们在政府、多边组织和私营部门内开展能源转型和能源及气候政策研究。本报告也能为政策团队和决策者提供价值，因为它总结了新经济模型的重要成果，并帮助读者理解为什么不同类型的分析提供了不同的洞见。



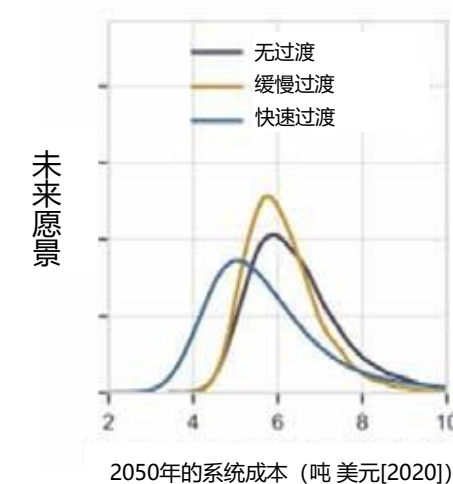
政策要点

我们从本报告的案例分析中精选了一些政策结论。本节的目的不是进行总结，而是给出一些例子，说明新经济模型具有很大潜力，能就能源创新和转型的政策问题回答新问题、提出好答案。读者可以参考案例分析，深入了解每一项分析的方法、结果、局限性和政策含义。

转型的步伐

案例研究《[基于实证的能源技术成本预测](#)》发现，快速转型到零排放的能源系统（包括电力、交通、建筑和工业的能源使用）的成本可能低于慢速转型，以全球整体而言，与“一切照旧”的情景相比，可以节省约12万亿美元（图1）。这与减排越多成本越高的传统观点截然相反。造成这种差异的原因是，此研究使用了一种更现实的表现方式，即清洁技术的成本随着其部署的增加而下降。

图1：2050年年度系统成本预测分布。

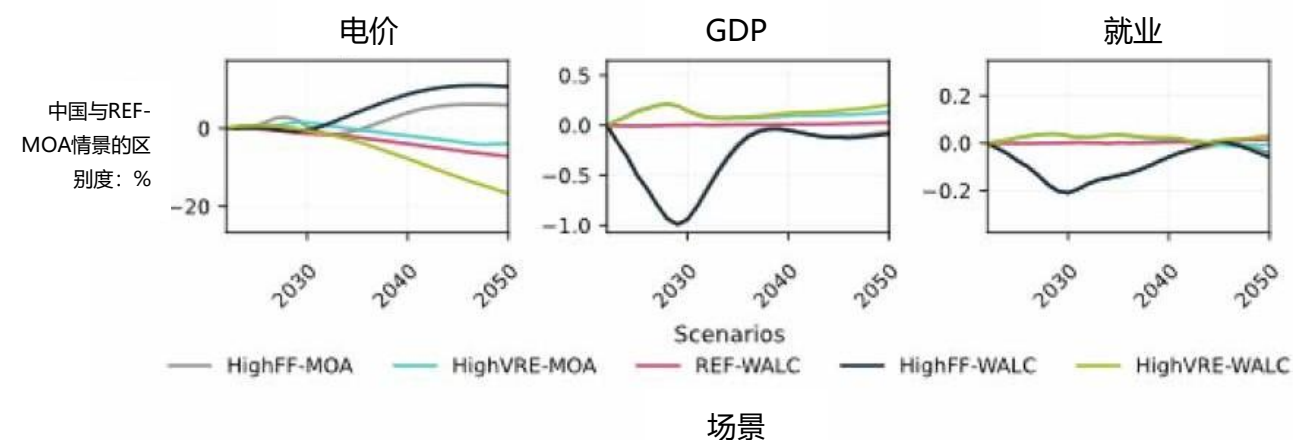


电力部门

案例分析《[势不可挡：可再生能源与边际定价](#)》表明，市场设计的选择对于实现低成本、可再生电力的机会至关重要（图2）。尽管在研究的国家中，到2030年带有储能功能的太阳能发电成本可能是煤电的一半，但如果市场价格由边际供应单

位（可能仍由化石燃料提供）决定，电价仍可能居高不下。替代的市场设计，即发电加权平均平准化成本（WALC）可能会导致较低的价格，有助于更好地促进就业和经济增长。

图2：中国电价、GDP和就业与参考情景（REF-MOA）的百分比差异比较。HighFF = 高化石燃料情景；HighVRE = 高可变可再生能源情景；REF = 参考情景；MOA = 优序法；WALC = 加权平均平准化成本。

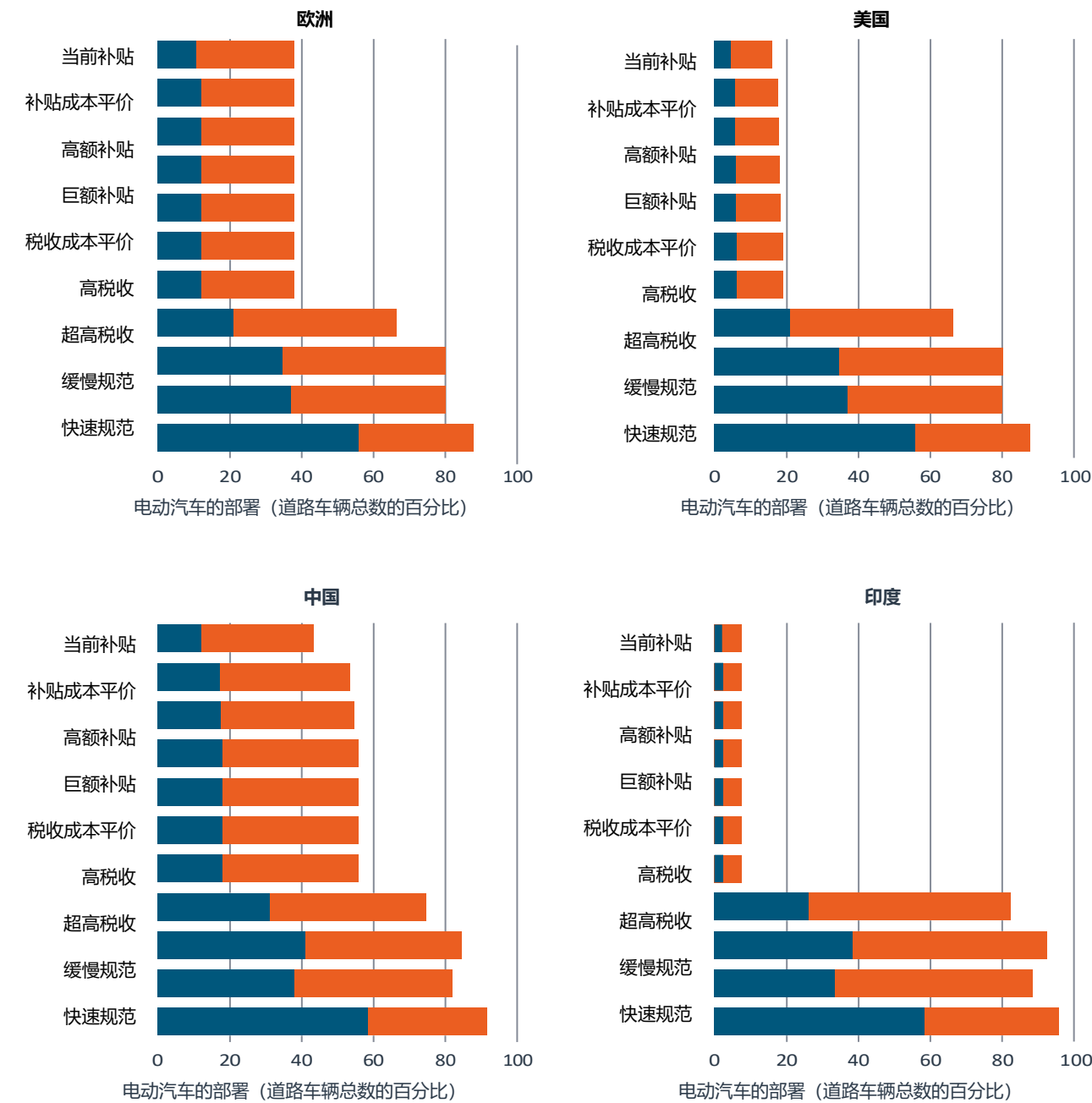


零排放车辆

案例分析《激活电动汽车的成本临界点》展示了如何使用模拟模型来比较单独或组合的政策选择。我们发现，零排放车辆硬性规定和能效法规往往可能是推动零排放车辆转型的最具成本效益的政策，补贴次之，税收则是迄今为止

成本效益最低的选项（图3）。研究还发现，同时作用于零排放车辆供给和需求的政策组合可以实现“整体大于部分之和”的效果，而其他政策组合达到的效果则低于其各部分之和。这些发现只出现在模拟可能结果而不是计算“最优”解决方案的模型中。

图3：不同政策假设下的政策激励和电动汽车部署。

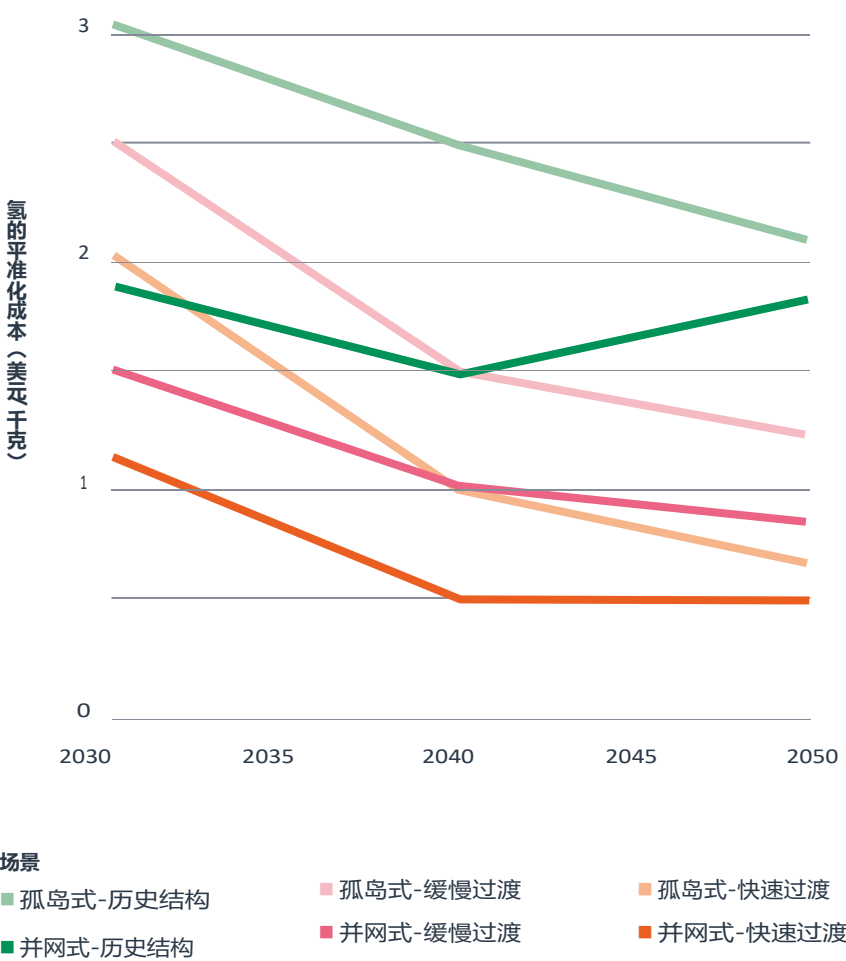


电力和工业中的氢

案例分析《印度氢、氨行业耦合建模》展示了有关基础设施政策选择带来的风险和机遇：是将氢气和氨气生产厂家连接到电网，还是将其建成仅与当地工业承购商相连的‘孤岛’电厂。研究发现，与‘孤岛’方法相比，‘并网’的方式不仅能使氢气和氨气的生产成本降低10-25%（图4），而且还能将太阳能和风能发电能力的需求减少

约200-300吉瓦，并在能源安全和电力供应对天气变化的韧性方面具有显著优势。以上发现源于该模型对电力和工业行业之间动态互动的探索：绿氢和绿氨通过提供储能和可调度电力提高电力系统的效率；较低的电力成本反过来又使绿氢和绿氨的生产成本降低。政策选择诸如如何支付氢能发电厂的并网费用，可决定出现哪种替代基础设施配置。

图4：不同情景下氢的平准化成本。



农业和土地利用

案例分析《支持可持续农业集约化》发现，在没有重大政策干预的情况下，农户之间对短期利润和市场份额的竞争可能会导致土壤退化，并对长期的粮食安全带来严重风险。研究发现，让农民更好地利用有关可持续做法的信息并鼓励他们接受新技术可以显著增加农业系统向可持续性转型的机会（图5）。重要的是，研究结果表明，如果在转型早期实施政策干预，则更有可能有效；如果太晚，技术发展的分歧可能会导致不可避免地陷入不可持续农业实践的锁定情景。这些发现之所以成为可能，是因为该模型将农民刻画为拥有多种资源和知识的经济行为者，在不确定性的情况下行事，其行为影响市场，反过来又受到市场的影响。

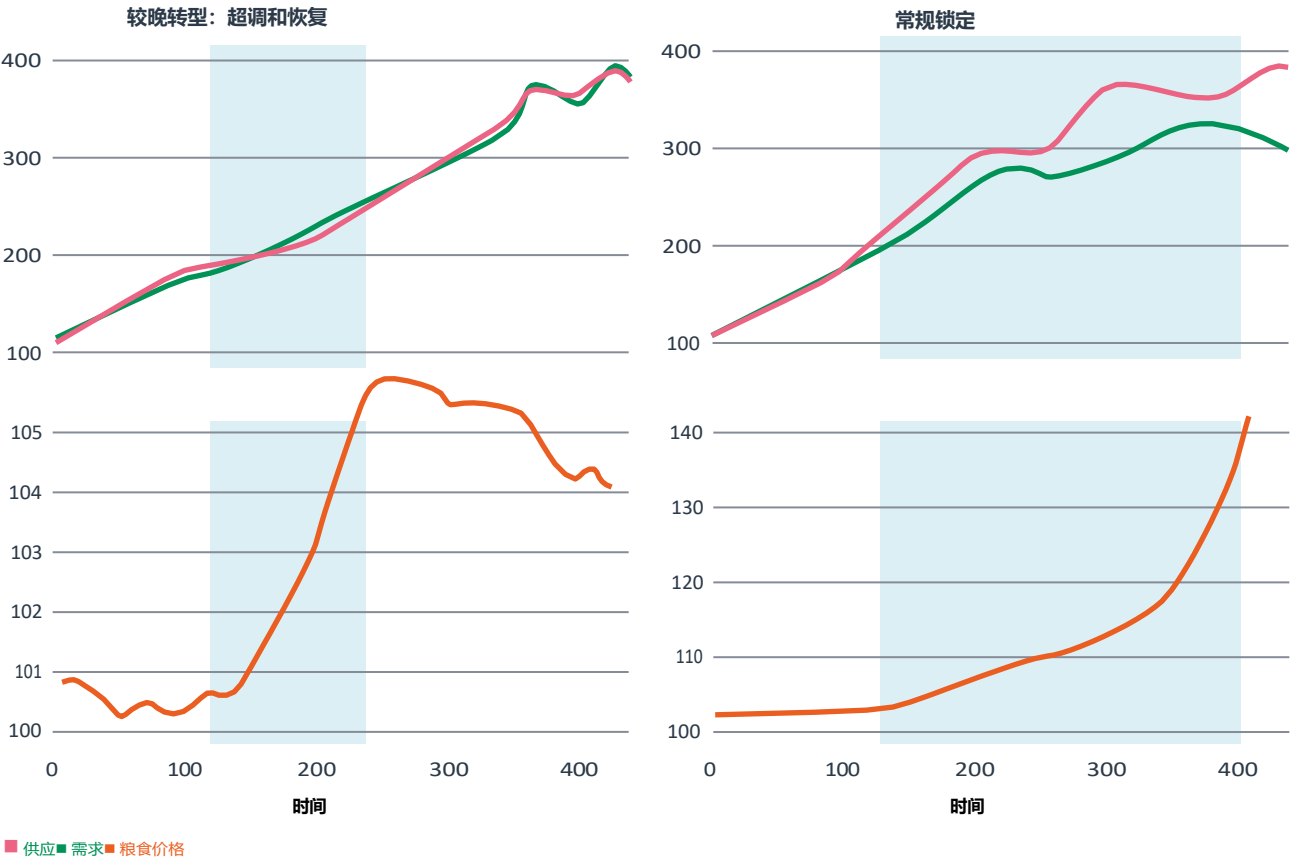


图5：模型的三次不同的单次运行，举例说明了模型中观察到的主要动态类型：向可持续农业的快速转型、超调（或较晚转型）和常规锁定。对于每次运行，总需求和总供给之间的距离以及食品价格动态都会显示出来。x轴代表模型模拟中的时间步长，y轴代表相对于初始值（设置为等于100）的变化。红色区域对应粮食短缺的时期。

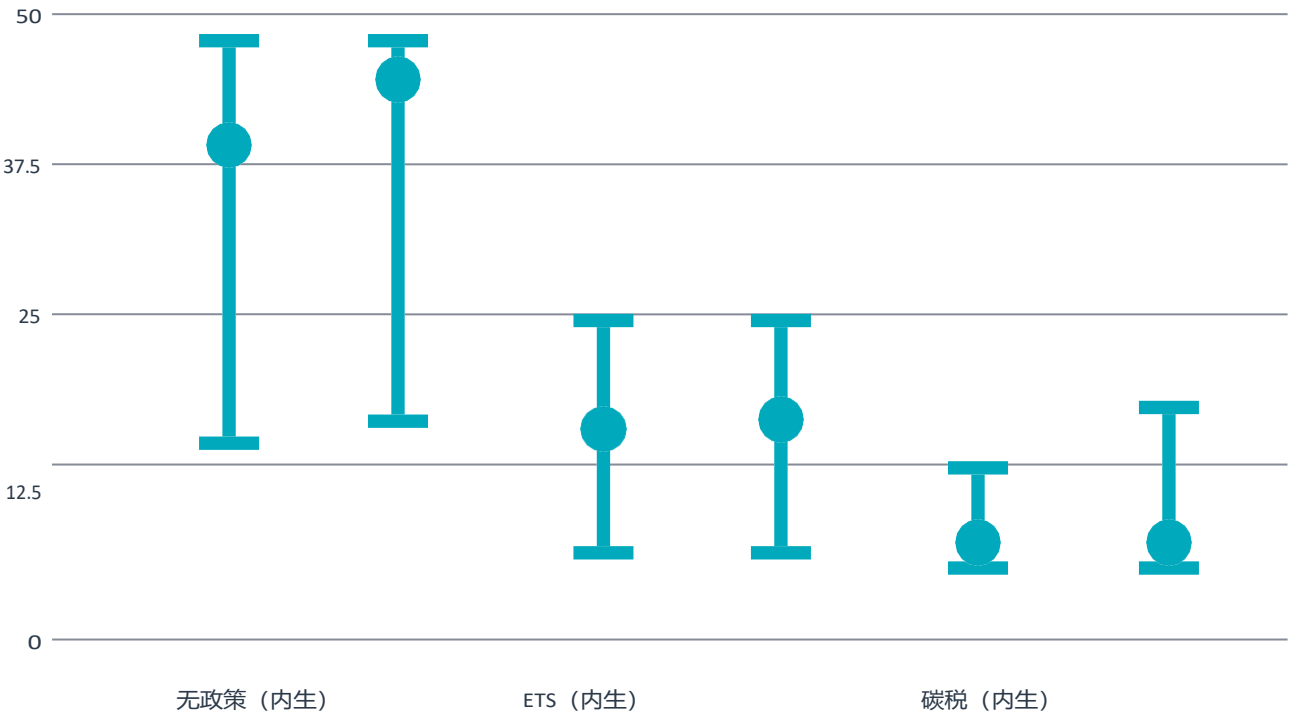
碳定价

我们在以前的报告中指出，传统观点认为碳定价是最具成本效益的脱碳方式，这取决于均衡假设而这与低碳转型涉及创新和结构变化过程的现实相悖。案例分析《实现快速、平稳脱碳和可持续增长的政策选择》从全球角度审视碳定价。研究发现，当单独作为政策工具应用时，低水平的碳定价无法实现与低于2°C控温目标一致的低碳转型，而符合这一目标的高水平碳定价可能造成经济不稳定，导致失业、破产激增和经济衰退。该

研究表明，包括补贴和监管在内的政策组合可以更有效地让经济走上可持续发展的道路。

案例分析《最具成本效益的碳定价形式是什么？》发现，与传统观点相反，两种最常见的碳定价形式—税收和排放交易计划（ETS）的成本效益并不相同。通过建模发现，在相同的碳价之下，与排放交易机制相比，税收有望实现更快的减排（图6）。这些政策选择之间的差异也在很大程度上取决于它们所适用的市场结构。以上发现是通过使用模型和技术达成的，所用的模型和技术不做均衡假设，而是探索政策、技术、公司和市场的动态互动。

图6：模拟中达到零排放的时间（显示最小值、最大值和平均值）（以年为单位）。水平条表示每个场景的多个模型运行的平均值。



¹ Diaz-Anadon et al. (2022). Ten Principles for Policymaking in the Energy Transition: Lessons from experience.

产业竞争力

案例分析《中国出口的绿色复杂性和竞争力》表明，基于贸易模式，对经济中不同产品间关系网络结构的理解，可以用来预测一个国家可能获得工业竞争力的新领域（图7）。我们发现，

中国在清洁技术方面的竞争力超过了在制造业的整体竞争力。中国近期在电动汽车出口领域变得有竞争力，有机会提升竞争力的领域包括环境监测技术。

图7：中国绿色出口产品分为当前优势(左)和潜在机会(右)。产品圈的大小表明中国目前显示的比较优势；颜色代表产品类别。

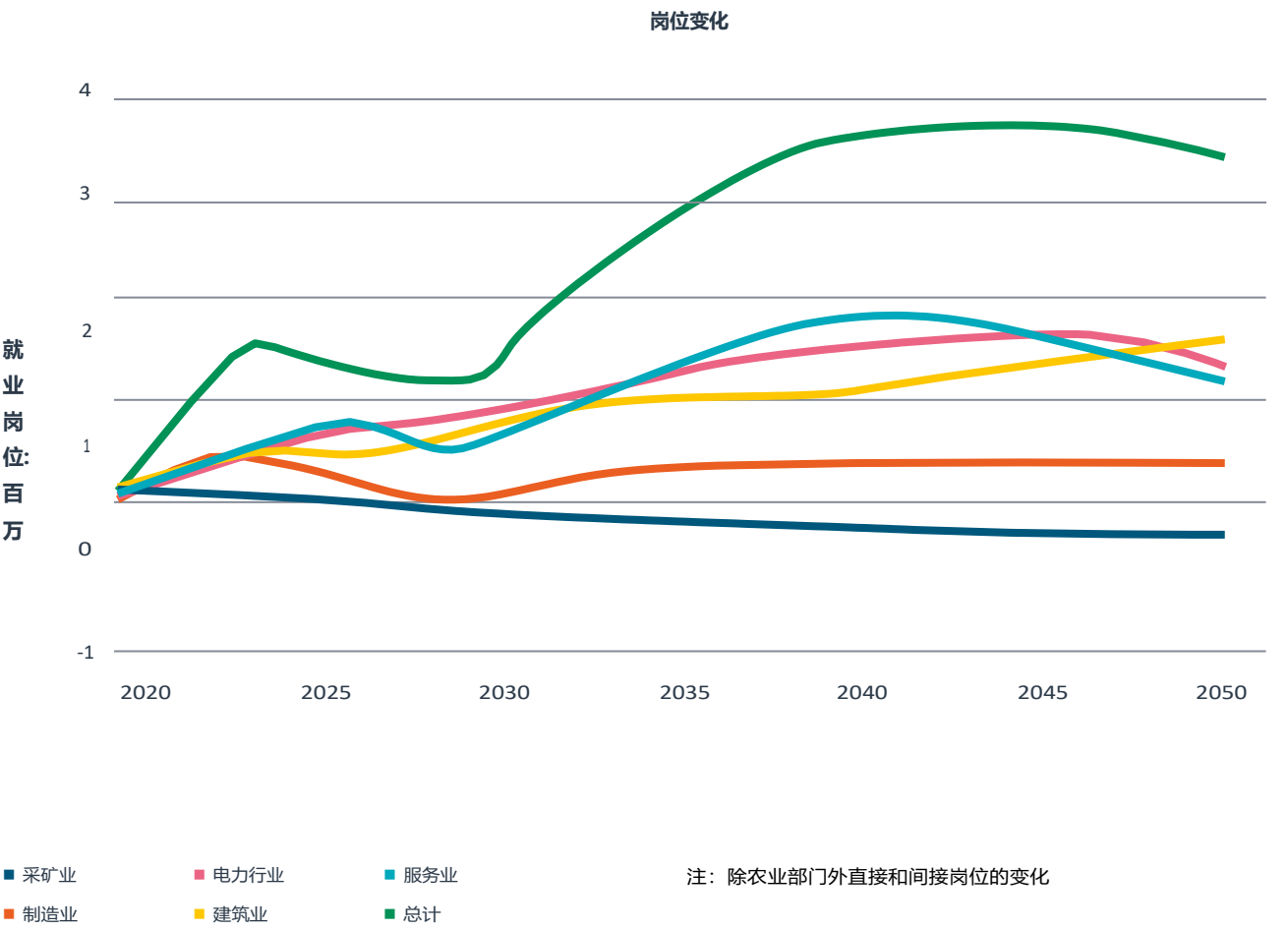


工作和技能

案例分析《印度净零排放的经济影响》和《印度经济脱碳》（图8）使用了不同的建模方法，两者都发现，与一切照旧的情况相比，低碳转型可能为整个印度创造额外的就业岗位。这一发现之所以成为可能，是因为这些模型并未假设在整个经济体中，投资以最优方式分配给资产，或者人们以最优方式被分配工作。相反，这些模型考虑了非生产性资本和失业的现实前景。虽然化石燃料行业的就业岗位大量流失，但发电、服务和建筑等行业的就业增长足以抵消这些损失。

案例分析《劳动力市场转型模型：以巴西生产力转移为例》研究人们的技能将在多大程度上决定他们从岗位流失行业转移到创造岗位的行业的能力。用这种现实的制约因素来模拟劳动力市场，可以深入了解技能差距在何处会成为低碳转型的障碍，以及在哪些领域（哪些行业）最有可能出现失业。研究发现，在巴西，在经济增长主要由农业生产率增长驱动的情景下，人们由于难以转换到新岗位而可能面临失业风险的职业数量，高于增长主要由制造业生产率驱动的情景。这些发现可以为劳动力再培训和经济发展政策提供参考。

图8：相对于参考情景，长期脱碳情景下的宏观经济结果。



导言

呼吁变革

本报告通过与全球能源转型关键国家的政策利益相关者合作，展示并证明了一系列对具体能源议题和气候政策问题进行新经济建模的价值。一段时间以来，许多研究人员、政策制定者和从业人员都在为能源转型的新经济建模提供依据。呼吁集中在以下三个关键领域：

- 1.新的气候政策评估方法。²
- 2.改进对技术和创新动态的建模。³⁴

3.改进对国家和全球范围内转型的潜在动态的建模。⁵

上述呼吁的背景是对当前分析和决策框架的具体关切，不仅包括纯技术建模论证、能源转型和如何适当建模的具体问题，还包括应如何进行政策评估和决策的广泛论证。我们试图将这些重叠和交织的问题在表1中进行总结。不同类型的模型和分析分别适用于这些问题的不同子集；没有单一的方法可以满足所有的需求。

表1：为什么要对能源转型做新的经济建模？

理论：能源转型领域	建模：概念性和技术性建模	政策：政策评估和决策
● 边际经济分析不适用于应对气候变化所要求的转型性结构变化。 ● 现有的理论、模型和决策框架假设均衡或有效的自我优化经济，且具有一个内在的偏见，即政策行动是有成本的。 ● 基于均衡的理论和模型通常既不模拟结构转型也不模拟创新，因此假设经济结构是静态的，错误地暗示只有大的价格变化才能阻止排放。 ● 我们对私营部门在转型中的作用缺乏了解，人们通常将其视作公共财政的缺口。 ● 真正的机构应该得到体现。	● 模型应在结构上切合实际（即尽可能真实地反映经济行为体之间的流通和关系）。 ● 模型应捕捉不平衡⁶和路径依赖的动态。 ● 模型应捕捉反馈循环和临界点。 ● 模型应捕捉异质性和交互作用。 ● 模型应捕捉不确定性和“肥尾”概率分布。 ● 经济决策应使用现实的个人行为（有限理性或启发式）进行建模。 ● 模型应经过实证检验，提高预测的可信度。 ● 许多现有模型使用的技术路径未得到充分检验或是随意武断的。 ● 技术动态应以内生方式建模。 ● 通常需要对分布影响进行建模。	● 决策时应考虑到不确定性、风险和机遇，不应局限于狭义的“最佳猜测”成本效益。 ● 需要考虑更广泛的政策选择，仅模拟碳价是不够的，我们需要模拟更广泛的政策组合，这些政策在现实世界中政治上具有更高的可行性，可能需要同时实施多种互补的政策。 ● 应根据政策对经济内部变化过程的可能影响（其如何影响创新和结构变化动态⁷）来评估政策，而不仅仅是基于固定时间点的预测结果。 ● 为了给政策决策提供信息，我们需要更多的概率性“预报型”模型（即模拟和预报将来的可能性，⁸⁹而不是确定“最佳”解决方案或路径的优化模型）。

以往的EEIST报告指出了如何对能源转型建模的关键信息。第一份报告《创新和转型的新经济学：评估机遇和风险》¹⁰ 概述了需要新方法的原因，使用了标准经济分析所不推荐的政策方法，认为迄今为止在低碳转型中取得的成功是

以难以预料的方式发生的，如果事前政策评估建模是为了获得更多的成功，我们需要新的方法，用新的技术来补充传统的成本效益评估，理解转型变革的风险和机遇。

² Mercure, J-F. et al. (2021). Risk-opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. Global Environmental Change 70: 102359.

³ Way, R. et al. (2022). Empirically Grounded Technology Forecasts and the Energy Transition. Joule: 6(9), 2057-2082.

⁴ Peñasco, C. et al. (2021). Underestimation of the Impacts of Decarbonisation Policies on Innovation to Create Domestic Growth Opportunities. C-EENRG Working Papers, 2021-6: 1-16.

⁵ Grubb, M. et al. (2021). The New Economics of Innovation and Transition: Evaluating Opportunities and Risks, EEIST report to COP26.

⁶ Here we are referring to disequilibrium as a property of complex systems, not the capability of models to be out of equilibrium or not.

⁷ Peñasco, C. et al. (2021). Systematic Review of The Outcomes and Trade-Offs of Ten Types of Decarbonisation Policy Instruments. Nature Climate Change 11.3: 257-265.

⁸ Meng, J. et al. (2021). Comparing Expert Elicitation and Model-Based Probabilistic Technology Cost Forecasts for the Energy Transition. Proceedings of the National Academy of Sciences 118.27: e1917165118.

⁹ Farmer, J.D, and Lafond, F. (2016). How Predictable is Technological Progress? Research Policy 45.3: 647-665. 10 <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>

¹⁰ <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>

第二份报告《能源转型政策制定的十项原则》¹¹提出了能源转型政策制定的新循证原则，认为政府使用的许多经济原则、模型和决策工具是为了在“边际”或增量变化的背景下使用而设计的，在这种背景下，技术、市场和其他经济结构相对稳定。当政策的目标和背景包括广泛的创新和结构变革时，如在能源转型中，就需要不同的原则和工具。

本报告的正文力求简洁明了，重点展示了这些新的原则和建模方法在实践中可以带来的价值，并没有深入讨论是否需要新的方法，其他研究人员已经完成了后者。例如，Farmer等人（2015）¹²概述了现有的综合评估模型分类及其经济成分。他们详细讨论了四个主要缺点：(i)这些模型如何处理不确定性 (ii) 聚集、异质性和分布影响的体现； (iii) 技术变革的代表性； (iv)缺乏气候变化对经济影响的现实损害函数。Mercure等人（2016年）¹³确定了现有优化和均衡经济模型的五个缺点：(i)规范性、基于优化的性质，(ii)过分依赖于行为主体的完全理性，(iii)无法说明行为主体之间的相互影响并捕捉相关的自我强化过程，(iv)无法表示多个解决方案和路径依赖性，以及(v)无法正确说明行为主体的异质性。此外，Mercure等人（2021年）¹⁴介绍了EEIST项目的工作，概述了成本效益分析的扩展形式，称为“成本-机会分析”，评估目标或背景为转型变化的政策选项，如低碳转型政策。他们还描述了这种类型的分析和决策支持如何需要新的经济建模。

政府间气候变化专门委员会（IPCC）也谈到了这些问题。¹⁵IPCC概述了使用早期综合评估模型进行成本效益分析的范围，更加强调使用可以捕捉动态而非静态效率的模型（即“考虑惯性、学习和各种额外的‘路径依赖’来源”¹⁶），以及使用本报告中的复杂性和系统方法。其他组织试图对气候经济模型和综合评估模型¹⁷的大型生态系统进行概述和分类，并呼吁进行不同类型的改革，如努力增加理解和参与。¹⁸

兑现新经济建模的承诺

呼吁变革比实际开发和应用新的模型、实现设想的价值（即更现实、可用和细粒度的政策建议）要容易得多。本报告通过与全球能源转型关键国家的政策利益相关方合作，努力展示和证明了一系列新经济模型在具体专题和政策问题上的价值。

本报告包含了15个新经济建模方法在巴西、中国、印度、英国和全球的应用案例分析。每个案例分析都讲述了一个近期或正在进行中的项目，项目将新经济建模运用于政策利益相关者的实时政策问题和议题。通过案例分析法，我们展示和思考建模方法、目的和背景的多样性。每个案例都解释了新的建模方式、研究结果及其政策相关性。每个案例都涉及到新的建模是否以及为何对现存问题和之前无法解决的问题提供了新见解。

因此，本报告是对其他系列报告的补充，提供了大家所呼吁的详细新经济建模和政策讨论。

本报告的受众以及阅读方法

本报告比之前的两份报告更加专业，主要面向在政府、国际组织、学术界和第三部门工作的分析师和建模者；直接、详细地呈现了新经济方法如何提供价值，能做什么以及不能做什么。本报告提供了相关政策主题的见解，并阐明了不同建模方法给出某些答案和建议的原因，希望能对政策团队有所帮助。

在进行案例分析建模的同时，我们还反思了最有前景的模型类型，思考它们之间的差异、优缺点，以及如何在工作中进行评估、选择和采用这些模型。

- **如果读者想进一步了解这些模型的作用**，建议先阅读你认为最有意义的案例分析（按国家或涉及的政策主题）。接下来，阅读不同类型模型的简介也会有所帮助。
- **如果读者考虑使用本文介绍的建模方法**，建议阅读如何上手的实践部分。

本报告不是教学手册，不会直接教读者使用模型的技术细节。我们的核心使命是提升世界各地机构使用这些建模方法的能力，展示其价值，倡导新经济建模和决策的基本理念。如果您对培训或更详细的指导感兴趣，请访问

<https://eeist.co.uk/training/>或与我们联系。¹⁹

本报告的其余内容

下一节重点关注政策问题的类型，以及新经济建模在哪些方面适用于这些问题。接下来解释“新经济建模”的确切含义，介绍模型的类型。然后通过实践来探索如何选择和开始使用新经济建模方法。本节概述了不同类型模型适用的领域，如何采用这些方法，如何克服技术和体制限制，以及如何倡导新经济建模方法。此后的一节中，我们关注案例分析建模本身。根据涉及的一系列政策主题，案例分析分为以下几类：全球能源转型、电力和工业部门、运输、农业、转型的影响、国家脱碳计划和金融。每一个案例分析都论述了建模的过程，介绍了政策背景、研究结果的相关性以及这些研究相对于以往的工作所提供的新价值。最后讨论了从整体的案例分析中我们能学到什么，并概述了我们对未来五年能源转型新经济建模的愿景。

¹¹ <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>

¹² Farmer, J.D. et al. (2015). A Third Wave in the Economics of Climate Change. *Environ Resource Econ* 62: 329–357.

¹³ Mercure, J-F. et al. (2016). Modelling Complex Systems of Heterogeneous Agents to Better Design Sustainability Transitions Policy. *Global Environmental Change* 37: 102-115.

¹⁴ Mercure, J-F. et al. (2021) Risk-opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal, *Global Environmental Change* 70: 102359.

¹⁵ Grubb, M. et al. (2022): Introduction and Framing. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla. Et al (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.003 16 Ibid. page 33

¹⁷ Nikas, A. et al. (2019). A Detailed Overview and Consistent Classification of Climate-Economy Models. In: Doukas, H. et al. (eds) *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03152-7_1.

¹⁸ Doukas, H. and Alexandros N. (2020). Decision Support Models In Climate Policy. *European Journal of Operational Research* 280.1: 1-24

¹⁹ <https://eeist.co.uk/contact/>

解决关键的能源和气候政策问题

在深入研究何为新经济建模方法及其本报告中的应用之前，需要概述不同方法适用的政策问题。理想情况下，政策问题应该是新经济建模的驱动力。政策问题允许研究人员确定一个主题和目标，进而帮助我们确定合适的方法（更多信息见下文），或方法的组合，可以提供对这些政策问题的见解，促进决策和产生影响。如果在构建或应用模型时没有将政策问题作为出发点，那么就存在一个非常严重的风险，即可能投入了大量的时间和精力，却没有产生对决策有用的工具或分析。

政策问题的类型

有效的分析通常是具体的，侧重于以下一个或所有方面：背景、部门、技术、地理和政策决策。政策决策的焦点可能在规模上有所不同，有宏观类型的问题，如“经济脱碳需要成本吗？”；也有中观层面的问题，如“我们应该关注哪些技术？”或者，“哪种政策工具最有效？”

最后，深入到微观层面的问题，如“我们应该如何设计这种具体的政策工具？”表2列出了这些广泛的政策问题、本报告中的相关案例以及适用于每个问题的建模类型。²⁰该表并未详尽列出所有类型的政策问题；还存在其他类型的问题，比如关于单个项目的微观问题，但本报告对此不作关注。

表2：政策问题的分类和新经济模型的应用

决策的性质 (即政策层次)	范围	政策问题示例	案例分析示例	适用的方法 ²¹
发展方向和速度	整个经济体	● 是否应该脱碳？ ● 脱碳需要多少成本？ ● 对宏观经济的影响是什么？ ● 逐步淘汰化石燃料会对财政和就业产生何种影响？应该如何监管？ ● 应该以怎样的速度向公路运输过渡？	● 基于实证的能源技术成本预测 ● 印度经济脱碳：政策和影响 ● 中国淘汰煤炭的经济社会后果 ● 绿色经济的复杂性和竞争力 ● 中国、印度和巴西可再生能源的必然趋势和边际定价 ● 印度净零排放的经济影响	● 预测型模型，假设经济不进行自我优化，可以从国内生产总值、就业、投资和贸易等维度评估未来的结果。 ● 考虑某个国家在新兴技术方面的竞争潜力的分析方法。
技术选择	各行业内部	● 电力行业应使用太阳能还是煤电？ ● 公路运输应该采用电动汽车、生物燃料、氢燃料电池汽车还是混合动力汽车？	● 中国、印度和巴西的可再生能源的必然趋势和边际定价 ● 基于实证的能源技术成本预测 ● 绿色经济的复杂性和竞争力	● 预测型模型，可以模拟技术的长期发展，评估技术选择的可行性和可能的影响。 ● 对技术学习率及其与净零排放目标的兼容性进行定量评估。 ● 对不同技术的优缺点进行定性和定量评估。 ● 优化模型，可以在固定时间内找到成本最低的技术组合。

²⁰ At this stage, the types of modelling are defined on broad terms. More specific types are enumerated in the later sections.

²¹ See the section ‘What are new economic models?’ for an introduction to these types of models.

决策的性质 (即政策层次)	范围	政策问题示例	案例分析示例	适用的方法 ²¹
政策选择	针对各技术/目标	- 推广太阳能应用，应使用税收、补贴、技术授权、能效法规、采购还是其他方法？ - 为推广电动汽车应用，应该采用能效法规、电动汽车硬性规定、购买激励措施、税收还是上述措施的结合？	- 印度经济脱碳：政策和影响 - 激活电动汽车的临界点	- 预测型模型，可以详细表示不同的政策类型，并可以根据实证模拟政策单独使用和组合使用的效果。 - 风险-机会分析²²（成本-效益分析的扩展形式）。
政策设计	对各项政策而言	- 清洁技术补贴政策该实施上网电价还是差价合约？ - 碳价应采取何种形式？税收还是总量管制和排放交易计划 - 电力市场的设计如何影响结果？	- 碳定价最有效的形式是什么？ - 中国、印度和巴西可再生能源的必然趋势和边际定价	- 预测型模型，可以详细表示不同的策略设计并模拟其效果。 - 定性模型，可以对政策设计的进行假设。

我们处于政策周期的哪一阶段？

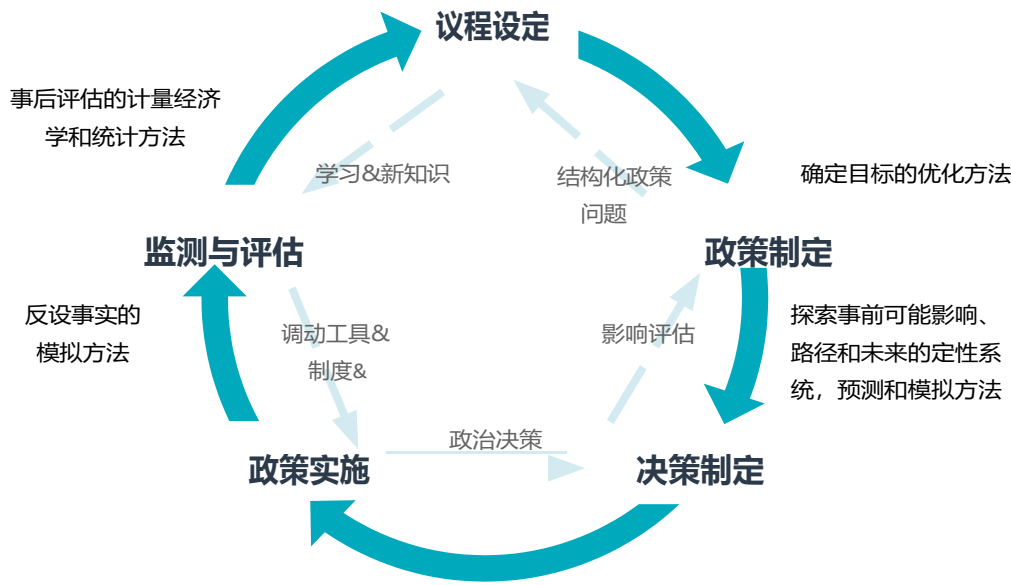
探讨政策问题的类型以及建模方法在何处产生价值的另一种方式是考虑政策周期（图9）。我们知道，政策周期是对政策制定过程中的理想化体现，有如下作用：将政策制定过程分成不同的阶段，每个阶段意味着不同类型的分析。政策周期没有很好地捕捉到支持政策的分析所具有的迭代性质；根据效用、重点和实证数据，通常会有一个持续的调整和改进过程。事实上，周期中的步骤也不一定是连续的，比如，可能有箭头将政策实施与议程设置联系起来。最后，政策周期也掩盖了政策历史和环境的重要性，在这种情况下，一些政策可以引发其他政策，或者将国家锁定在某些政策路径上。

尽管如此，政策周期有助于我们思考在哪个阶段可以使用什么类型的分析。在议程设置阶段，优化方法（我们不将其归类为新经济建模）可以发挥作用。使用这些方法来探索在一组技术约束和假设下，成本方面的最佳终点，可能有助于设定可能的范围。随着周期进入到政策制定和决策阶段，我们相信新的经济模拟方法会脱颖而出，这些方法可以预测政策行动可能导致的后果。利用这些类型的模型，可以对政策效力和影响进行有效的事前评估，还可以基于这些模型了解实现目标的可能途径，而不局限于设定目标应该是或可能是什么。优化模型根本不可能做到这一点，这不是它们的设计初衷。²¹

进入政策实施和评估阶段之后，我们开始以事后模式运作，评估政策已经产生的实际影响。在这里，计量经济学和统计学方法是最有效的，提供了所需的数据分析技术来根据真实数据评估影响。计量经济学和统计学方法可以来自新的经济学方法或已有的方法。事后评估的关键

挑战是建立一个反事实，说明如果没有政策会发生什么。在大多数情况下，对于能源政策干预来说，用控制组做实验提供反事实的方法是不可行的，也是不道德的。在这种情况下，可以选择使用新的经济预报型模型来提供反事实，类似于用事前模式评估政策情景。

图9 政策周期（改编自Mercure, 2022²³）



政策问题有多明确？

我们知道，政策过程并不像政策周期所表明的那样简单，在实践中，政策问题的表达也并不总是清晰或明确的。此外，不同的决策者群体或团队可能有不同的问题，这些问题可能会有争议。²⁵政策制定者随时都可能面临一长串的问题，但并不总是清楚哪些问题最重要，或者哪些问题最适合不同的分析方法。在这种情况下，在政策团队和分析师之间快速迭代非常有效，探索应该关注什么类型的问题以及应该如何对其建模。

系统映射²⁶在这种情况下是很有效的。依托这一方法，我们可以快速描述政策背景和政策，讨论假设，开始定性探讨问题，并与其他决策者和团体一起完成所有工作。系统映射就其自身而言是有效的，此外，与“开始一项重要的定量模型，却在中途意识到政策问题不够明确，或者建模者未能在分析中引入关键利益相关者”相比，系统映射也更加可取。在政策问题不明确的情况下，我们建议使用系统映射来进行正式分析。

²¹ See the section “What are new economic models?” for an introduction to these types of models.

²² Mercure, J-F. et al. (2021). Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. Global Environmental Change 70: 102359.

²³ Mercure, J-F. (2022). Complexity Economics for Environmental Governance. Cambridge Studies on Environment, Energy and Natural Resources Governance.

²⁴ This point is further discussed in our previous report Ten Principles for Policy Making in the Energy Transition, pages 13 and 37. <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>

²⁵ Royston, S. et al. (2023). Masters of the Machinery: The politics of economic modelling within European energy policy. Energy Policy 173, 113386

²⁶ Barbrook-Johnson, P. and Penn. A (2022). Systems Mapping: How to Build and Use Causal Models of Systems. Palgrave.



什么是“新经济模式”？

什么是“新”？

“新经济模式”可以简单地指最近开发的模型，但这里的“新”是指直接受复杂性经济学和系统思维理论和方法影响的模型。这些学科并不是全新的，但它们在越来越广泛的经济主题中的应用以及精细数据的使用（即公司层面、不同消费者、更精细的技术、更频繁的时间尺度）才刚刚开始。它们共同为我们提供了解决表1所列问题的概念框架和方法。可以开发以下模型：捕捉不平衡、路径依赖、自我强化变化和反馈循环以及临界点的模型；强调经济主体之间差异和相互作用的模型；以及允许有限理性和经验决策规则。这些可以视为对现有方法的扩展和补充，这些方法通常由均衡清算市场、代表性和同质主体以及健全知识、理性和最优决策特征的假设主导。

不同类型的模型

本报告借鉴了难以归类的不同模型。一个重要的区别是“数据”和“模型”。简单来说，“数据”是

来自现实世界指标的测量值；为研究中的具体案例提供了背景，并为真实世界现象的描述提供了一个锚点，代表了从概念角度对数据行为的解释——对这些数据未来可能表现的探索——并且通常基于特异性方法的假设。模型和数据的组合可以提供个案的分析，最重要的是，可以让模型挑战系统中的过去性能，并对某些条件下的未来行为提出预测。

我们可以将新的经济模型分为两种：一种是直接基于数据的模型（例如对现有数据上应用分析和统计方法来对未来进行推断），另一种是旨在通过动态模拟来模仿现实世界的运作（例如，相对于现实现象的运作而言，预期的结构关系具有意义），并以数据为依据，进行比较。

在大多数情况下，模型往往是两者的混合体，结合了数据分析和模拟建模的元素。然而，为了列举一系列新的经济方法，我们可以根据其制定模型结构和使用数据方面的偏好将其分为两类——见图10和表3。

图10多种新经济模型：当从左向右看时，我们从在数据中寻找结构或模式的方法移动到在模拟和测试这些数据中构建结构的方法。纵轴强调了各方法所用的假设和理论的重要性，这一重要性在目光从左向右移动时也随之增加



这两类是：

1. **在尝试开发模型结构来阐明数据之前，优先考虑分析和理解数据的模型。**这里，我们纳入“数据模型”和“非均衡宏观计量模型”，前者通常受制于静态假设（即不改变的假设，或基于时间快照的假设）分布在图9的左侧；后者尽管优先分析数据以建立正式关系，但也可以整合现实世界系统的新动态假设，与系统未来性能的非线性相联系。

2. **优先制定模型结构来解释过去事件和数据的模型。**我们一般可以称之为“动态和仿真模型”，包括动态系统建模、系统动态模型和基于主体的系列模型。这些模型的逻辑意味着，对过去数据模式的认知有助于识别因果结构（通常是难以量化的变量，例如社会行为），也可以直接从数据中获得信息（即参数化），并通过模拟（即验证）与现有时间序列进行比较。值得注意的是，所有为影响现实世界政策而构建的模型和方法都利用了现有数据。

²⁷ In an economic context, it is simplest to think of this as models not characterised by return to equilibrium states, or using market clearing assumptions.
²⁸ Path dependency is often encapsulated by stating ‘history matters’. That is, where a system has been and where it is now, constrain future directions and possibilities.
²⁹ Feedback loops, where an increase (or decrease) in one factor increases (decreases) another, which in turn increases (decreases) the original factor, create reinforcing or ‘runaway’ change.
³⁰ Owing to the proximity to a tipping point, small changes in a system or model can produce large or qualitatively different outcomes.
³¹ Any individual model may not explicitly try to include all these aspects. This can make a model unmanageable or difficult to understand, though these trade-offs are becoming less pronounced with advances in methods.

表3近一步描述了这些方法的类型，指出了每个建模方法及其优缺点。

表3：新经济模型的具体示例 ³²

类型：数据模型/分析				
名称	描述	优点	缺点	案例研究实例
系统映射	使用网络来表示和分析系统中各因素间的因果影响。通常用于利益相关者参与的活动。	直观、易用的方式表示系统中的一系列关系和影响。有助于识别政策的动态影响，例如区分自我放大和自我限制的政策。可以利用多种证据和数据来源。与构建仿真相比，资源消耗更少，但也可以为动态模型的开发提供信息。	尽管模型试图捕捉反馈和动态，但模型本身是静态的（即不探索结构如何变化，或动态如何发挥）。大型映射可能运转不灵，让人难以理解。	中国ETS和碳税定性系统图。 巴西可持续发展目标和能源转型的数据驱动系统映射。
经济复杂性	利用贸易数据和其揭示的经济结构来了解一个经济体能够发展比较优势的方向。	有助于了解一个经济体的当前状况和“邻近的可能”（即合理的产品转型路径）。可用于通报产业战略或发展战略。	提出了一国可以在哪些方面发展竞争优势，但没有说明如何发展。仅基于出口数据，因此忽略了内部消耗。	用于理解中国绿色技术出口的复杂性测度。
随机经验曲线	利用赖特和摩尔定律，根据过去的部署（或时间）和成本趋势，对能源技术成本进行预测。	对能源技术成本进行实证验证的概率预测。该方法进行了广泛的技术测试，并与专家预测方法进行比较。	目前仅在全球层面实施。无法深入了解这些变化发生的原因。	基于实证的能源技术成本预测使用这种方法，并将结果代入到一个简单的能源系统模型中。
非均衡宏观经济学-E3ME	根据历史数据模式，将不同经济变量和部门之间的关系表示为一组方程式。计量经济学模型。	可用于确定低碳转型的可能宏观经济结果。与CGE和DSGE模型不同，它不受资源优化分配和充分就业等限制性假设的约束。使用良好并记录在案。	相对聚合的模型。不适用于模拟异质个体相互作用产生的动态过程。虽然它不受限制性假设的约束，但它本身并不包括对融资可及性的限制，这在现实中是一个制约因素。严重依赖数据和数据质量。无法模拟突然的系统变化。	所有E3ME-FTT模型案例分析。

类型：动态和仿真模型				
名称	描述	优点	缺点	案例研究实例
未来技术转型（FTT）模型	使用描述技术吸收的S型曲线与Rogers-Wright综合定律的方程式。考虑到部署和成本之间的自我强化反馈，对能源技术扩散和成本进行预测。	可用于模拟和预测政策的动态效果，例如技术扩散和成本。可以测试各种政策选择，并可以显示哪些政策组合实现的效果大于其部分之和，哪些政策组合获得的效果较小。	部门间的互动有限，需求侧政策（在E3ME模型中）和供给侧政策（FTT模型中）之间的互动有限。	所有 E3ME-FTT 模型案例分析。
系统动态建模（和动态系统建模）	代示系统的多个部件和结构动力学的仿真方法。可以通过加强环和非线性关系模拟不平衡行为。可以捕捉临界点。	表示系统的非线性和非平衡聚合动态。有助于区分自我强化和自我限制的政策方法，以及确定不同部门政策之间或经济、社会和环境之间的权衡和协同作用。建立良好的共享体，围绕方法论制定规范。	聚合模型-不适合对异质主体交互产生的动态进行建模。需要预先知道所关注系统的动态结构。	印度能源转型的系统动态模型 英国绿色金融模式
基于主体的模型（ABM）	表示个体彼此之间的交互及其环境的模拟方法。可以在复杂系统中生成涌现特征。	复杂系统的“同类最佳”结构的现实表现。可以显示不同类型的消费者、公司或投资者等主体如何响应政策。可用于在事先未知的情况下发现经济系统的动态结构（识别不同经济行为体和政策相互作用产生的系统行为）。有助于了解市场设计的选择。	对数据要求高（即需要细粒度数据进行设置，需要时间序列数据进行验证），有时计算量大（即运行缓慢）。开发技术上困难且耗时（例如难以追踪突发现象的原因和后果）	劳动力市场ABM模型将劳动力模拟为在巴西劳动力市场上流动的主体。 宏观经济ABM模型用于快速、平稳脱碳和持续增长的政策选择。 中国电力部门的碳定价ABM模型。

³² Most of the case studies in this report fall neatly into one of the categories in this table or are a hybrid or combination of categories. However, one does not. Modelling Sector Coupling of Hydrogen and Ammonia in India presents a ‘complexity-extended’ traditional energy system model, which we do not give its own category here.

³³ ‘Economic complexity’ here refers to the specific stream of literature on using trade data to understand the sophistication of different national economies. It is an unhelpful term because it is so generic and often confused with ‘complexity economics’, but it is the recognised term for this work, so we use it.

³⁴ Technically, E3ME and FTT are specific models, not classes of models. However, owing to their central position in the EEIST project, and new economic modelling more broadly, we give it its own category here.

³⁵ Computable General Equilibrium and Dynamic Stochastic General Equilibrium models. We do not introduce these well-known approaches here. For an introduction see Burfisher, M. E. (2011). Introduction to Computable General Equilibrium Models. Cambridge University Press and Wickens, M. (2012). Macroeconomic Theory: A Dynamic General Equilibrium Approach. Princeton University Press.

如何选择和使用新经济模型

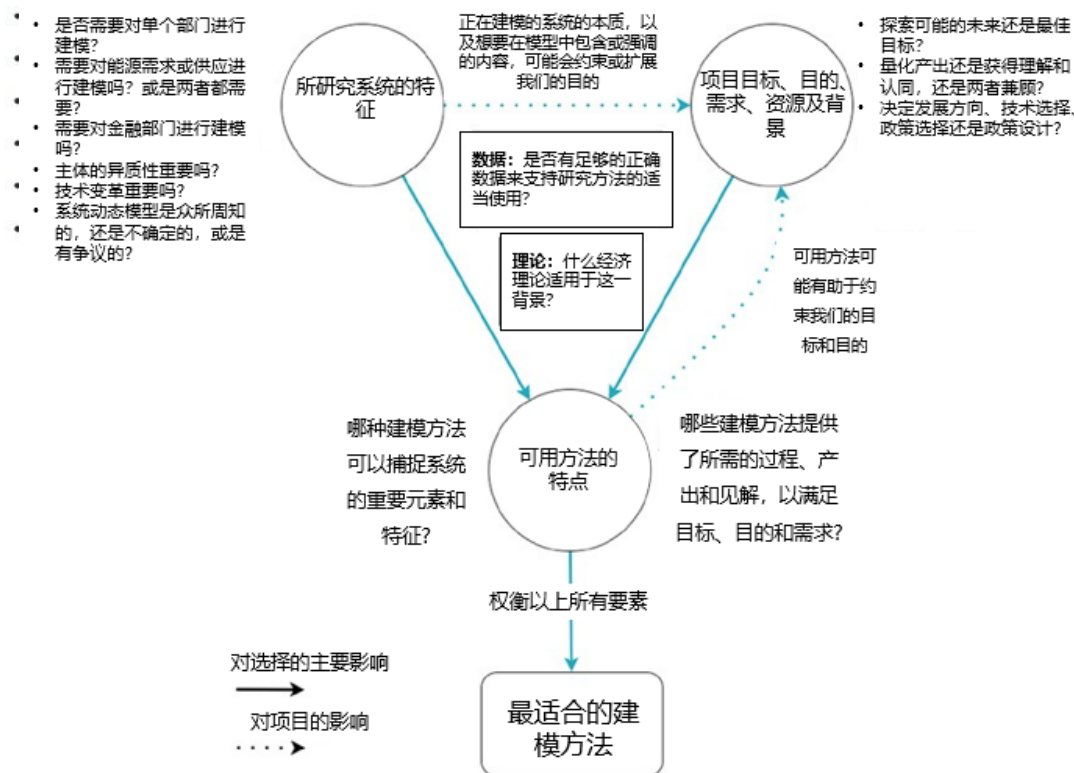
现在我们已经了解了什么是新经济模型，以及它们可以用来解决哪些类型的政策问题。在本节中，我们概述了如何开始选择方法，以及如何在实践中开始使用这些方法。这些选择需要使用所有方法，无论是否是新的，但由于我们在本报告中概述的方法不如其他方法成熟，因此值得详细思考这些问题。

选择最合适的建模方法

在选择要使用的建模方法时，很少有简单的最佳或最坏选择。考虑到特定的问题和目的，有些方法是不合适的，而在适当的选择中，会有不同背景下的利弊。诀窍在于，考虑到目的、目标、资源、可用数据和背景以及代表的经济和能源系统

的特点，找到最“合适”的方法。即使考虑到所有这些因素，也可能没有明显的选择。在时间和资源允许的情况下，部署或组合多种方法通常是有益的。这样做还有一个好处，就是可以显示出结果的稳健性，即不同方法的结果是否相同？

图11概述了项目目的、系统特性和建模方法在确定模型适当性方面的相互作用



项目目的和目标（总结见表4）： 每个项目的目的和目标可能非常不同，目的也可能随着时间的推移而变化，或被不同的参与者以不同的方式看待。尽管如此，所有能源转型建模项目的核心都需要明确各种目的的问题。例如：

1. 考虑到一些限制因素，我们是在努力确定一个理想的结束转型状态，还是想确定有助于我们实现这一目标的政策？
2. 我们更看重哪一项：（i）定量产出，（ii）得到利益相关者的理解和认同，或（iii）两者都同等？
3. 我们最感兴趣的是告知发展方向、技术选择、政策选择还是政策设计？

除了直接目的之外，还有项目资源和背景、其他利益相关者的需求和目标以及数据的可用性和质量。这些都与项目意图相互作用，以不同的方式约束或增强它。

例如，我们在政策过程中所处的阶段可能会影响选择。如果一项政策处于设计或讨论的早期阶段

我们会有更具“探索性”的目的，开启更多的选择，并尝试新方法。然而，如果一项政策设计已经确定，并且我们想对其进行详细评估，或者想了解现有政策在未来几年可能产生的影响，目标就会较狭隘，侧重于详细探索可能的未来。这将意味着我们更可能需要一种久经考验的方法。

关键资源是数据。许多建模方法对数据的要求很高，并且依赖于可用的正确数据。用于不同目的的模型的效用往往会随着我们启动和验证模型数据的数量和质量而起伏。然而，有些方法更适合在低数据背景中工作。当我们有数据时，模型的过度拟合（即生成一个模型或分析，该模型或分析与某一特定数据集对应良好，但与其他数据集不对应，或在预测中表现不佳）是新方法和传统方法的共同问题。当方法本身存在特定问题，容易过度拟合时，可能会发生上述情况。也可能发生在对潜在社会现象的理解不够充分的情况下，导致在社会和经济关系稍有不同情况下，通用性有限（或没有）。

表4：项目目标的不同方面如何决定最适合的建模方法

方面	可能的情况	最合适的方法/模型
意图与目标	探索政策可能产生的影响	自下而上或结构现实的模型，如E3ME、ABM、能源系统模型。
	最佳结果	基于过程的综合评估模型。
	理解、政策选择和认同	较简单或定性的模型，如系统映射。
	详细的政策分析	以精确和有意义的不同方式表现不同政策的模型，如FTT或很适用的ABMs。
	宽度系统行为	较简单的模型，如系统动态模型，或相对简单的能源系统模型。
时间和资金	资源需求度高	较大的模型，如E3ME或ABMs。
	资源需求度低	相对较简单的模型，如系统动态、系统映射，或已经很适合需求的大型模型。
可用数据	数据丰富	数据需求量大的模型，如应用ABMs，数据驱动的系统映射。
	数据贫乏	定性模型，如系统映射。
背景	政策周期前期	为不同的方法和不太成熟的方法提供更多空间；重视提升系统行为理解的模型。
	政策周期后期	强制使用久经考验的模型和具有定量输出的模型；更需要测试政策选择的特殊性。
	有争议的政策领域	允许质疑假设和得到认同的方法，如系统映射；重视使用一系列模型以比较不同假设的产出。

³² These are the more detailed cohort of IAMs, such as AIM-Enduse, GCAM, IMACLIM, IMAGE, MESSAGE-GLOBIOM, and REMIND. For a discussion of these models, see: Wilson, C. et al. (2021). Evaluating Process-based Integrated Assessment Models of Climate Change Mitigation. Climatic Change. 166.3.

系统特征：能源转型受到不同的经济、社会、生态和技术系统的影响，其本身也会对这些系统产生影响。我们很少要对所有系统建模，而当需要时，会对其中一些系统进行更详细的建模。根据目的以及系统特点对问题和目标的重要性，也可能想以不同的方式建模（即以不同的方法表示不同的元素，或强调某些部分较多）。在决定对能源转型的哪些方面进行建模时，应该经常问自己几组结构性问题。

1. 需要对单个机构、技术或经济部门进行建模，还是可以将其汇总？技术变革重要吗？是否需要单独考虑能源行业以外的知识或技术发展？是想用特定行业的变化来模拟情景或政策，还是想了解特定行业的影响？如果是，就包括行业，如果不是，可以简化掉。
2. 需要对能源需求和能源供应进行何种程度的建模？或者换句话说，需要何种程度上对能源系统和经济建模？我们很可能想二者选其一，当重点放在一个时，另一个可以用简单的模型。
3. 需要对金融系统建模吗？获得信贷或投资的过程在系统行为中重要吗？如果不包括金融系统，能做有用的建模吗？

对想涵盖的系统如何建模还有第二组问题：

1. 是否需要消费者对、公司和投资者等行为者之间的异质性和互动建模，或者是否可以将其行为按组别进行汇总？如果可以，或许该对其建模，如果不行，可以简化掉。

2. 对（子）系统进行内生性还是外生性建模？换言之，是否要对（子）系统的内部动态建模，以及它如何受到模型中其他因素的影响，还是可以将其简化，或将其视为静态？例如，要为技术创新建模吗？关键问题包括子系统是否有良好的数据和我们是否对它具有好的理解，子系统对研究问题或系统行为的重要性。我们可能想内生性地来表示子系统，并捕捉它和模型的其他部分间的反馈。
3. 如何建立人类行为和决策的模型：使用理性预期，还是使用有限理性、其他社会规则或决策方法？是否认为理性预期决策模型适合我们的情况，或者它是否系统性地忽略了重要的决策/动态？
4. 要捕捉系统的哪些行为特征，如路径依赖性、突发行为、技术互补性和依赖性、临界点或反馈？有没有特定概念驱动了系统中的行为，我们想详细了解？例如，路径依赖、反馈或临界点。
5. 该如何捕捉不确定性？多数情况下，“模型结构不确定性”可能比“参数不确定性”更重要，因此选择一种能够代表和结合前者的建模方法很重要。灵敏度分析就成为了探索模型结构不确定性的关键工具。

最后，我们要清楚所讨论的系统动态是众所周知的、不确定的还是有争议的。这可能会对最合适的研究方法产生影响。如果动态有争议，我们更希望使用定性或参与性的方法和利益相关者一起来解决问题。而如果动态是公认的，我们很有可能成功地使用定量模拟方法。项目目标很重要，理想情况下应该始终认识到系统动态和行为的感知状态。

有关预测、预报和实证验证的思考

多数情况下，建模者和政策制定者都有兴趣使用模型来预测政策将如何影响结果。一定要清晰理解对预测和预报的期望，用户往往对是否能或是否应该以某种方式使用模型有不同的期望。在讨论期望之前，需要定义术语，这些术语经常以不同的方式使用。所谓“预测”是指通过将世界的可能状态收窄来降低随机性。预测是关于不同状态的可能性的陈述；不一定是关于未来。例如，根据理想气体定律，在知道某一时间点的体积的情况下，可以预测给定时间点的气体容器的压力。预报则是专门对未来的预测。

实证验证指的是用许多不同的方法来测试一个模型能否给出良好的预测或预报。基于对系统机制和结构的数据或理论的理解，可以通过合理的模型设计来进行实证验证。也可以通过测试模型的输出与真实数据进行验证，以了解其预测或预报的效果。人们经常辩论这两种验证类型之间的平衡问题。

预测只有在准确的情况下才有价值。这意味着实证验证必不可少。在使用模型进行预测、检验其质量、验证了模型之后，我们才知道其是否有用。对对照明显的基准（如随机猜测）进行测试非常重要，令人惊讶的是，许多经济模型都无法战胜简单的零模型。

模型不仅仅用于预测。在很多情况下，我们可能想用模型来理解给定系统的逻辑。系统的各个部分如何影响其他部分？定性模型提供了一个很好的入门方法。但随着建模的发展，我们常常想让模型更加量化，更加可靠。实证验证的关键作用在于分辨模型是否具有现实性。即使是在声称现实的情况下，如果模型无法进行良好的预测，也应该质疑以此为基础的分析。

从这个角度来看，区分模型对样本内数据的拟合程度和对样本外数据的预测程度是很重要的。所谓“样本内”，指的是模型建立时可用的数据，用于估计其参数。相反，“样本外”指的是在建立模型时不可用的新数据。过度拟合是指模型在样本中数据拟合度好，但在样本外预测结果较差。从这个角度来看，通常情况下，越简单的模型越好，因为它需要拟合的参数更少，不太可能被过度拟合。

过度拟合不仅仅事关预测。对于政策评估，人们总是倾向于认为，与现有数据非常吻合的复杂模型更现实，因此应该提供更好的答案。然而，衡量模型现实性的标准不仅应是设计，还应是预测的质量。考虑到这一点，简单的模型往往更可靠，对于策略分析也是如此。

经济建模很难，做出精准预测需要花费大量时间和精力。不幸的是，我们经常被迫根据不充分的模型做出重要决定。我们的理念是合理地广泛测试模型，了解其准确性，管理期望值，以使用户了解模型的用途及其可靠性。

如何开始使用这些方法

我们希望各国政府、多边组织、私营部门和民间社会的经济学家、分析师和政策制定者多加利用本报告中提出的建模方法。可以利用这些方法进行大量新的及时的分析，对此的需求也在不断增长。

使用过程中可能遭遇潜在的概念、实践和体制方面的制约。我们自己和合作者都遇到了此问题，认真思考了如何克服它们，而不是按孤例来处理。在本节中，我们将仔细考虑可能存在的障碍以及如何克服它们，以应用新的经济建模，在合适的框架中产生最大的价值。



潜在制约因素：概念、实践和制度

核心的**概念约束**可能是新经济模型与现有方法直接竞争的看法。现有的经济方法在许多领域都是成功的，并因其清晰性和定量严谨性而受到推崇。相较于其他社会科学，经济学在政策制定中具有极其重要的影响力。它在培训和教育中也有一套既定的原则和工具，所以在财政部、政府部门和国际组织中有许多支持者。

重要的是选择适合特定目的和背景的经济理论、模型和决策框架。与其将不同的经济方法视为竞争者或对手，不如将其视为补充，根据我们的目的、不同方法从理论视角或作为分析工具时与当前问题的契合程度，在不同的环境下使用。

表5：对新经济模型的普遍抵制

对新经济模型的普遍抵制	如何回应并进行建设性讨论
新经济模型批评了经济学的“稻草人谬误”，许多批评已经在最近的工作中得到了解决（对于主流经济学过时的理解进行了批评）。	这是最需要回应的抵制。无论在什么具体环境或问题中，都要尝试深入挖掘，了解最近的工作是什么，以及它是否能应对新经济模型提出的批评。常见的问题之一是对单个建模项目的目的感到困惑，这让讨论变得模糊不清。明确新经济模型的目的往往与现有方法不同，这可以化解许多争论。围绕术语或概念的使用也常产生误解，因此深入挖掘和仔细比较各种方法是至关重要的第一步。这通常也是使用新方法的第一步。
现有的经济假设和框架很有价值，所以不应被抛弃。	我们并不主张放弃现有的工作，而是应选择适用于具体情况的方法。在需要或正在进行转型（如整个系统）或结构变革的情况下，基于边缘性假设（即干预措施不会影响技术能力、市场结构或广泛经济领域）的分析是不合适的。能源转型是转型变革的突出代表，在对其进行建模时，我们应该极为谨慎地使用边际方法。
新的经济模型经过良好测试，不能完全信赖。	在过去10年中，本报告中提出的复杂性经济学和系统方法已在一系列政策领域得到了很好的检验。然而，我们倡导的许多技术在能源和气候变化政策中并没有完全立足。政策显然需要在低碳转型方面取得更快的进展，目前占主导地位方法的局限性已得到充分证明，有充分的理论相信新方法将优势显著。这些方法在决策中的影响力逐步扩大，获得了更多国家政府和国际组织工作人员的支持。本报告提供了政策制定者在重要背景下使用这些方法的例子。利用新经济模型的主要组织包括：联合国、经合组织、欧盟、世界银行、中国能源研究所、世界资源研究所、英格兰银行以及英国政府的商业和能源部门。

尽管如此，倡导新经济模型的人可能会遭到一些经济学家和（更广泛的）建模者的抵制，应该准备好参与深入的对话，讨论使用这些方法的利弊，以及如何将其结合起来。在表5中，我们尝试对此进行总结，提出了若干具有潜在建设性的回应。

对于用新经济模型能达成的工作质量，**实际约束**通常比概念约束更重要。主要的实际约束往往是数据。这里介绍的建模方法，尤其是基于主体的模型（ABM），数据需求量大；也就是说，需要用大量的数据进行分析，这些数据通常是分散的、历时性的，要对其进行初始化、校准和验证。附录列举了本报告中许多案例分析的准确数据要求，希望这有助于精确理解我们所说的“数据需求量大”的含义。即使模型数据需求小，也可能需要与其他模型不同的数据，然而这些数据无法立即取得。

除了数据，新经济模型的产出可能不及机构所习惯的类型或精度（例如，对特定指标或变量的估计或图形）。然而，现有模型的某些精度可能不真实。新经济模型通常采用随机和/或系统性的方法，有利于探索不确定性，因此将提供产出的范围和估计，而不是点预测。这反过来又需要更具概率性的方法进行进一步分析。在使用一种新方法之前，要检查产出的内容及形式，并思考如何在组织工作流程中使用这些产出。

制度约束是适用于特定机构的实际约束和概念约束的组合。一些机构本身是规避风险的，可能会避免使用未经测试的方法，也会避免相比已用或充分了解的方法效率更低的方法。机构可能青睐具有广泛适用性的“多用途”模型，因为它比专业模型更容易保存和维护。对于专业模型来说，用来维护的资源 and 技能更为稀缺，要获得批准更难。

组织文化、培训和构造也可能围绕现有的方法或模型建立；基础设施架构支持现有模型的使用（例如团队结构、培训、负责部分模型的专职人员、定期报告和围绕分析时间表组织的活动）。此外，可能有许多建模工作在齐头并进，这些工作后来被整合在一起（例如，在短期、中期和长期时间范围内运行经济预测）。用新方法取代其中一环可能会导致不兼容。这可能是一个非常严重的壁垒，如果将其视为直接的替代品，任何方法都无法克服这种影响。这种情况下，多种工作并行往往是唯一的出路，但可能被视为不必要的额外工作。

如何推进？

考虑到明显的机会和潜在的限制，如何推进新经济建模方法的采用？以下是基于我们的认识

而提出的初步建议清单：

1. **小处着手，逐步提升。**利用试点研究和小型项目，专注于感兴趣的具体政策问题，展示新经济模型如何增值。这使得机构能够进行学习并逐步提升。
2. **以系统映射为切入点。**³⁷使用系统映射这种直观且易于启动的课题研究方法，分析政策问题的动向。这可以让大家看到课题的复杂性，以及如何用不同的方式思考。系统映射如果执行良好，可以（i）直接为政策提供信息，无需构建量化模型，（ii）显示为什么非均衡模型可能有用，以及（iii）迈出转向量化新经济模型的第一步。
3. **成为倡导者。**在你的机构内部和周围建立一个倡导者（或用户）联盟，将志同道合的人联系起来。实践这些方法，阐明其价值和互补性，影响现有支持者之外的人。通过试点以及与使用这些方法的外部团体合作，来累积合法性和可信度。广泛收集这些方法产生价值的例子（例如本报告）。
4. **提升能力和专业知识。**致力于转型的组织需要会使用这些方法的人才。思考他们所需的培训 and 能力建设，机构该如何提供或获取相关资源。思考如何调整招聘或采购流程，以鼓励大家对这些方法产生兴趣。
5. **提供个性化指导。**目前已经有通用指南，但针对个别组织的个性化指导也很有用。我们特别建议制定政策分析指南，区分哪些原则和工具适用于边际变化，哪些适用于非边际（包括转型）变化。

³⁷ Here, we are referring to the specific method ‘systems mapping’ (see Barbrook-Johnson, P. and Penn, A. 2022. Systems Mapping. Palgrave), but this could also apply to systems thinking more widely. For an introduction for civil servants, see <https://www.gov.uk/government/publications/systems-thinking-for-civil-servants>

新经济建模应用

本节介绍了本报告的核心贡献：收集了15个运用新经济模型的案例分析，用于分析全球和国家能源和气候政策问题。这些案例分析可以单独或结合起来进行阅读。每个案例都包含了关键点，如当前的政策主题、方法论细节、结果和影响（包括在适当情况下与其他分析的比较），但没有遵循严格的公式。每个案例都介绍了工作中涉及的政策互动。

表6列举了本报告中的所有案例分析。我们按照涉及的政策主题进行了分组：全球能源转型、电力和工业部门、运输、农业、转型的影响、国家脱碳计划和金融。

表6：案例分析概述

组别	名称	区域	政策问题	建模方法	主要发现
全球能源转型	基于实证的能源技术成本预测	全球	能源转型的成本是多少？	概率性能源技术成本预测和简单的能源系统模型	能源转型可为全球经济节省数万亿美元。
	实现快速、平稳脱碳和可持续发展的政策选择	全球	哪些气候政策方案能更好地促进和维持能源转型而不破坏经济体系和公共预算的稳定？	基于主题模型	单纯的碳定价是无效的，但化石燃料禁令、公共建设补贴和电气化标准的政策组合显示出良好的减排潜力，同时促进增长和保持宏观财政稳定。
电力和工业部门	中国、印度和巴西可再生能源的必然趋势与边际定价	巴西、中国、印度	利用可变可再生能源的障碍和电力市场的设计会如何影响未来电力系统的电价？	E3ME-FTT：电力	克服可变可再生能源（VRE）使用的障碍可能会导致电价进一步降低。与加权平均水平化成本（WALC，即预期寿命成本，而不是边际成本）大致一致的电价机制可能适应VRE的进一步使用。政策制定者的重点应该是最大限度地减少障碍，并形成适合由VRE技术主导的电力系统市场。
	印度氢、氨行业耦合建模	印度	印度绿氢和绿氨基础设施的建设能否促进向净零电网的过渡？	复杂性扩展的能源系统模型	目前的政策是有代价的，它使我们走上了将新兴的氢和氨部门与电网脱钩的道路。如果在设计系统时考虑到部门耦合，就有机会建立更有弹性、成本更低的系统。
	最具成本效益的碳定价形式是什么？	中国	中国最具成本效益的碳定价形式是什么？	定性系统映射练习和基于主体的模型	排放交易计划的设计应避免引入对排放的平衡反馈。如果没有平衡反馈，碳税将更具成本效益。电力行业的竞争（或者更准确地说，一个明确的价格信号）是让碳定价政策最有效地发挥作用的关键。

组别	名称	区域	政策问题	建模方法	主要发现
交通	激活中国、印度、欧洲和美国电动汽车的临界点	中国、印度、欧洲和美国	不论是单独的还是组合的政策，哪些在推动电动汽车转型方面最有效？就道路运输部门的成本和宏观经济后果而言，快速转型与慢速转型相比怎么样？	E3ME-FTT：运输	在主要市场，电动汽车（EV）和内燃机汽车（ICEV）之间的成本平价临界点即将到来。电动汽车补贴可以实现收入中立，只需对内燃机汽车征收少量税，即可缩小电动汽车和内燃机汽车之间的成本差距。当单独使用时，法规在推动向电动汽车转型方面比财政激励措施更具成本效益，也有助于制定高效的一揽子政策。与慢速转型相比，快速转型到电动汽车可以节省成本。向电动汽车转型对大型石油进口国的宏观经济影响可能更为积极，对大型石油出口国更为消极。
	支持可持续农业集约化：全系统ABM方法	全球	机构是否应该支持可持续集约化，哪些因素使这种干预更加紧迫？	基于主题模型	机构应该促进和激励可持续农业的发展，早期支持是最有益的。如果配套政策出台得太晚，技术差距就会拉大，从而造成锁定。
能源转型的影响	劳动力市场转型模型：以巴西生产力转移为例	巴西	不同驱动因素和排放结果的增长路径会如何影响巴西职业水平的失业率？	基于主题模型	低排放增长路径与高排放增长路径相比，面临较高失业率的职业数量较低。制造业生产率的提高与巴西国家自主贡献的目标更一致，并减少劳动力市场摩擦。
	中国及煤炭转型的社会后果	中国	中国逐步淘汰煤电对财政和就业有什么影响？	微观分析模拟模型38	摆脱煤炭的转型会带来就业和财政损失，但考虑到目前的补贴量，这很可能已经是一种财政消耗。

组别	名称	区域	政策问题	建模方法	主要发现
国家脱碳计划	印度2070年净零排放的经济影响	印度	印度到2070年实现净零排放对宏观经济有什么影响？	E3ME-FTT：电力	到2070年，太阳能将成为主导技术。向净零经济转型对印度的宏观经济产生了净正面效益。这也可能导致化石燃料相关行业的就业机会大幅减少，超过200多万个工作岗位面临风险。不过，其他行业的就业机会将增加，如发电、建筑和服务。
	印度经济脱碳：政策和影响	印度	印度经济去碳化最具影响力的政策是什么？对经济增长和就业可能产生什么影响？	系统动态模型	在创造净成本节约和实现更好的经济增长和就业成果的同时，去碳化是可能的。
	数据驱动的可持续发展目标与能源转型互动的系统映射	巴西	能源转型将为可持续发展目标带来哪些风险和机遇，如何管理它们？	系统映射（数据驱动）	出乎意料的是，风能与一系列健康、水和卫生成果相互作用。
	中国出口的绿色复杂性和竞争力	中国	各国在哪些产品上具有比较优势，能源转型如何影响这些产品？	绿色复杂性指数/经济复杂性	长期的战略性政策可以推动一国占据潜在的比较优势领域。在过去的20年里，中国成功地做到了这一点，作为绿色产品出口国，中国的崛起甚至强于其作为全球领先制造商的崛起。
金融	缩小英国的绿色金融差距	英国	英国低碳电力转型是否与旨在缩小绿色金融差距的政策的同时实施，对宏观经济有什么影响？	系统动态模型	缩小绿色金融缺口的政策方案叠加低碳电力情景，带来了共同效益，即电力系统成本和失业率的降低以及国内生产总值的增长。
	巴西可再生能源投资的退出期权	巴西	“退出路径”分析如何支持可再生能源项目的私人融资。	金融建模	个别可再生能源项目财务评估的不确定性是债权人申请退出路径的关键驱动因素，尽管巴

³⁸ Microsimulations have much in common with agent-based models, representing individual actors, but they do not typically model interactions between actors.

案例分析：

基于实证的能源技术成本预测

Rupert Way（牛津大学）、Matthew Ives（牛津大学）、Penny Mealy（世界银行/牛津大学）、J. Doyme Farmer（牛津大学）。

政策问题：能源转型的成本是多少？

区域：全球

方法：使用随机经验曲线来进行概率能源技术成本预测、建构简单的能源系统模型

关键发现：能源转型可能为全球经济节省数万亿美元，如果转型迅速，节省的资金会更多。

交流互动：这项工作范围覆盖全球，已在大量政策和合作媒体中广泛宣传。亮点包括：包含在英国政府的净零审查中，在加州能源委员会上介绍，与白宫和美国国务院官员进行探讨，并在世界各地的媒体（如英国广播公司、《亚洲时报》、《卫报》、《纽约客》、彭博社）上发表。

摘要：作者将充分验证过的预测能源技术成本的数据分析方法与简单的能源系统模型相结合，以考虑全球范围内能源转型所需的成本。与许多传统模型相比，作者发现能源转型，尤其是快速转型，可能会为全球经济节省数万亿美元。

介绍

关于如何以及何时实现全球能源系统去碳化的决定，在很大程度上受到可能成本估计的影响。由于低估了可再生能源成本的改进和部署率，大多数能源经济模型产生的能源转型方案都高估了成本。

本案例分析³⁹提出了能源技术的概率成本预测，该方法已在50多项技术的数据中进行了统计验证。使用这种方法来估计能源系统成本，我们发现快速的绿色能源转型可能会带来数万亿的净节约。即使不考虑减少气候损害或制定气候政策带来的好处，到2050年转型到净零能源系统也可能具有经济效益。这种预测成本的方法也有助于为不同行业去碳化技术的政策选择提供参考。

方法

对于正在优化成本的技术，改进率非常一致。⁴⁰对于这些技术，有两种主要的基于历史数据定量预测成本的方法。第一种是摩尔定律的广义形式，即成本作为时间的函数呈指数级下降。第二种是莱特定律，即预测成本作为累积产量的幂律而下降。我们关注莱特定律，因为它符合基本直觉，即付出的努力越多，效果越好。我们确实使用摩尔定律重复了所有的建模实验，发现定性结论是相似的。

莱特定律通常用于生成点预测，这意味着预测是经验的确切函数，没有误差估计。早期引入误差

条时并没有提供先验的函数形式，这使得样本外测试的数据要求过高。^{41 42}最近推导出了先验误差估计，将预报准确性作为历史改善率和波动率以及可用于预报的数据点数量的函数来进行预测。⁴³基于全面的回溯测试，证明该方法可以生成未来成本的可靠概率估计。这是通过选择过去和现在的参照日期来完成的，只使用当时可用的数据，对每个参考日期在未来最多20年内所有时间范围进行预报。我们使用了50种不同技术的历史数据，基于大约6000次预报，实证观察到的预报准确性与所有时间跨度上的先验估计密切吻合，最长可达20年。我们在这项工作中的主要贡献是将这种方法系统地应用于能源转型，它被称为随机经验曲线或随机莱特定律。

测试成本预报方法

为了测试随机经验曲线方法预报能源技术成本的准确性，我们将其应用于太阳能、风能、电池和聚合物电解质膜（PEM）电解器的历史数据（见图12）。使用每个预报年度之前的数据来估计参数，然后使用后续年份的观测部署数据，根据经验生成预报。对太阳能、风能和电池的预报是合理的：大多数未来价值都在95%的置信区间（CI）内，与先验误差估计一致。由于数据集少，历史波动性大，对电解槽的预测没有那么准确，但置信区间反映了出了这一点。

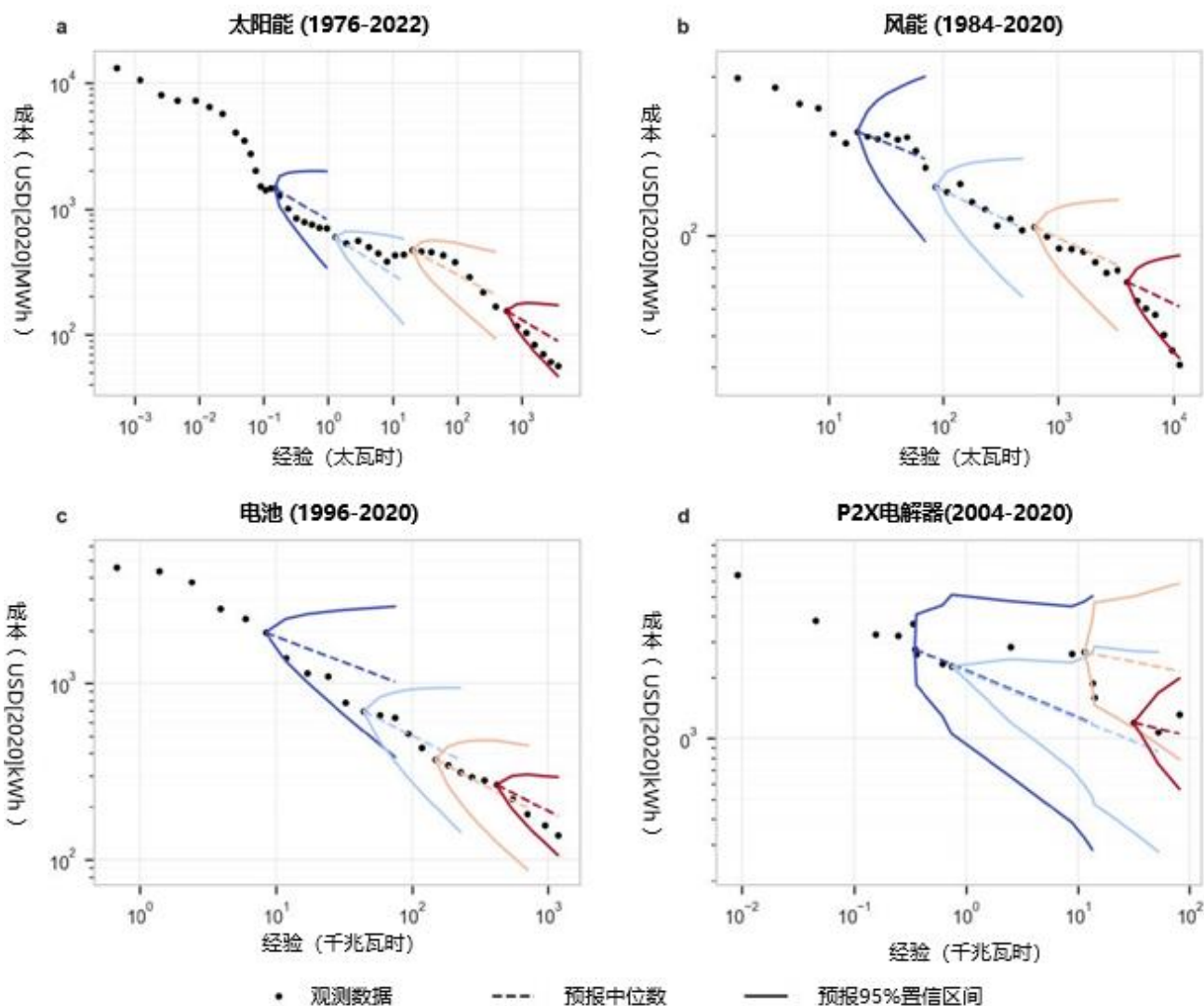
⁴⁰ Farmer, J.D and Lafond, F. (2016). How Predictable is Technological Progress? Res. Policy 45: 647-665.

⁴¹ Nagy, B. et al. (2013). Statistical Basis for Predicting Technological Progress. PLoS One, 8 (2013): Article e52669.

⁴² Alberth, S. (2008). Forecasting Technology Costs Via the Experience Curve — Myth or Magic? Technol. Forecasting Soc. Change, 75, 952-983.

⁴³ Lafond, F. et al. (2018). How Well do Experience Curves Predict Technological Progress? A method for making distributional forecasts. Technol. Forecasting Soc. Change 128 (2018): pp. 104-117.

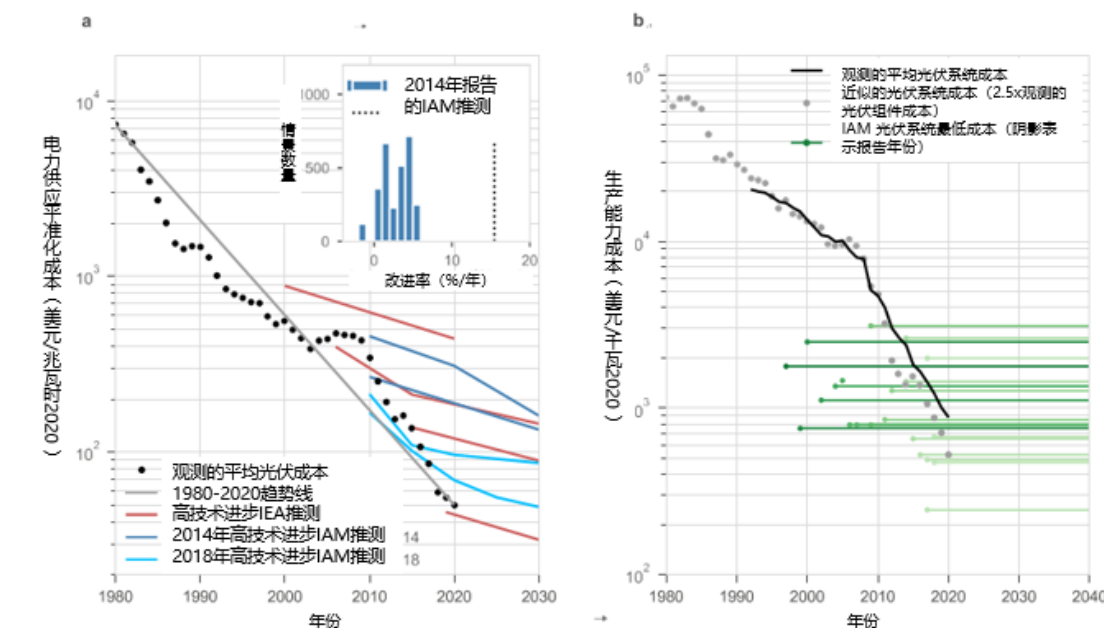
图12：随机经验曲线预测方法的历史表现。定期进行预报，使用先前的成本和部署数据来校准模型，并使用“未来”部署数据来生成预报。显示了预报中位数和95%置信区间（CIs），颜色表示预报年份，从最早（深蓝色）到最近（红色）。成本是太阳能和风能的LCOE，以及电池和电解器的容量成本。这里假定P2X电解器为PEM电解器



将这些预报的准确性与有影响力的全球能源经济模型的产出进行比较，很有启发性。综合评估模型（IAMs）用于评估政策，并在经济主体做出最佳决策的假设下，生成与给定气候目标一致的部署和成本情景。其输出通常被称为

“推测”，以表明它们并非预报。图13强调了这一点。图13A显示了国际能源署（IEA）的世界能源模型和几个IAM过去对太阳能光伏能源成本的推测，并将其与观测数据进行了比较。

图13：历史光伏成本预测和最低成本。（A）黑点显示全球平均LCOE。红线是国际能源署报告的LCOE推测；44深蓝色线是2014年报告的综合评估模型（IAM）LCOE推测；45淡蓝色线条是2018年报告的IAM推测。46 47IAM的推测起源于2010年，尽管是在随后几年完成的。所显示的推测完全是“高技术进步”的成本轨迹，来自于最积极的减缓方案，与这些模型中使用的最大预计成本削减相对应。插图将2010年至2020年光伏系统投资成本的预计复合年下降率直方图与实际发生的情况进行了比较（基于2905种可以获得数据的情景）。48（B）在各种IAM中实施的光伏系统最低成本。颜色表示最低成本报告的年份，从1997年（深绿色）到2020年（浅绿色）不等。还展示了观察到的光伏系统成本。提供了用2.5的常数因子衡量光伏组件的成本，作为参考



展示的推测与气候政策最积极、技术创新率最高的方案相对应，即关键绿色技术部署率最高、成本下降最乐观的方案。尽管如此，推测的成本一直远高于历史趋势。

这清楚地表明，将推测视为有条件的预报是个坏主意。相比之下，随机经验曲线方法产生了可靠的有条件预报，正确率未知（2010年发表的一份关于2020年太阳能成本的预报，使用莱特定律的确定性版本，确实比当时的IAM或IEA的任何推测都要准确得多）。我们在这项工作中的目标之一是说明预报对规划能源转型很有用。

莱特定律广泛用于生成IAM中的技术成本推测。然而，它通常与具体约束结合使用，如部署速率限制和最低成本，即假设成本永远不会更低的固定水平。由于IAM使用成本来确定部署（反之亦然），并且许多IAM允许完美预测，因此，为了防止由于莱特定律造成的成本急剧下降，导致关键绿色技术的部署速度超过物理或社会的合理性，限制是必要的。很难知道哪些约束是现实的，这产生了对结果产生巨大影响的特定选择。施加过强的约束可能是这些模型的推测与历史记录不符的重要原因。

⁴⁴ IEA. World Energy Outlook 2021. Technical report. International Energy Agency (2021).

⁴⁵ Riahi, K. et al. (2015). Locked into Copenhagen Pledges — Implications of Short-Term Emission Targets for the Cost and Feasibility of Long-Term Climate Goals. Technol. Forecasting Soc. Change 90 (2015): 8-23.

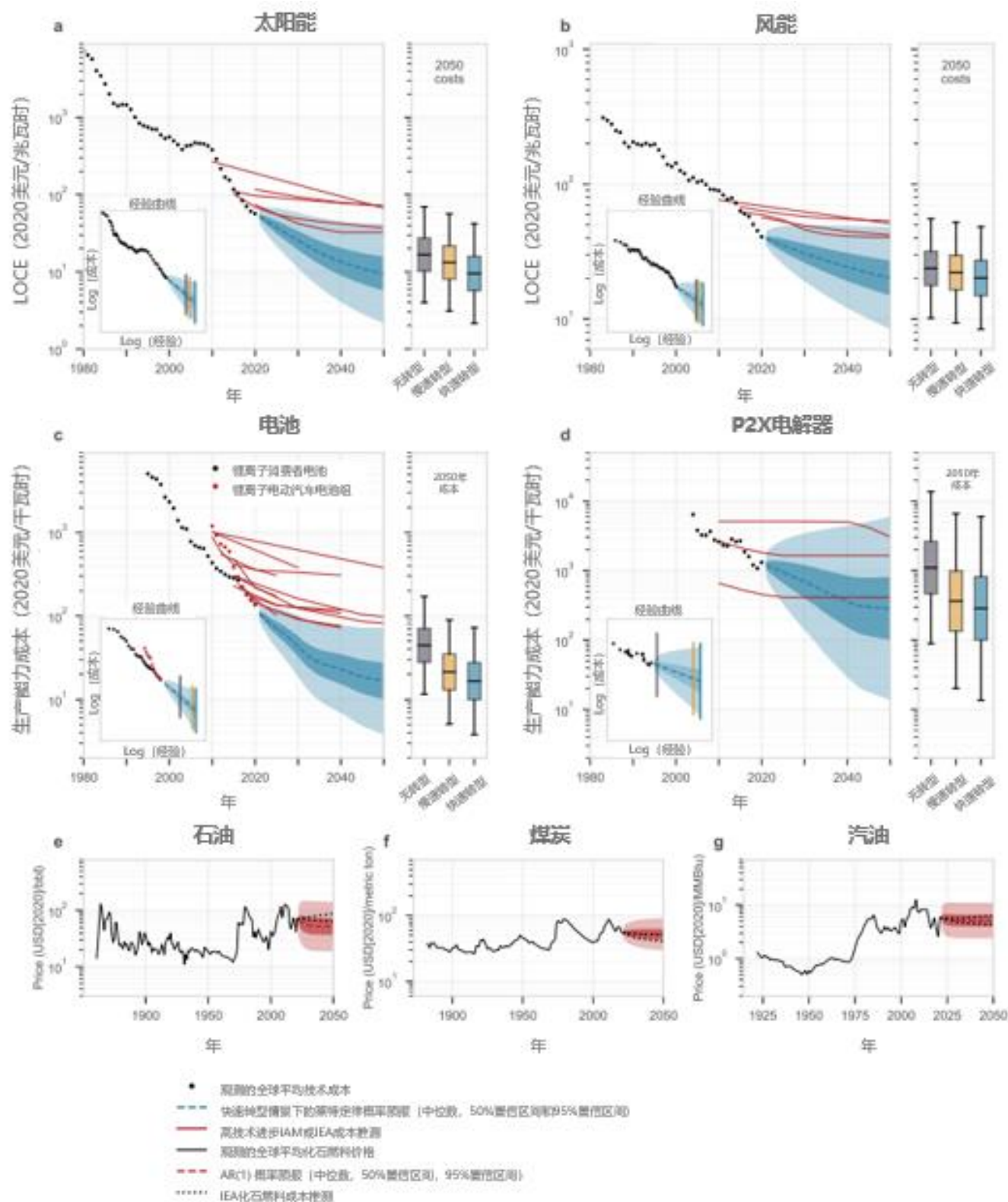
⁴⁶ Krey, V. et al. (2019). Looking Under the Hood: A Comparison of Techno-Economic Assumptions Across National and Global Integrated Assessment Models. Energy, 172 (2019): 1254-1267.

⁴⁷ Huppmann, D. et al. (2019). IAMC 1.5°C Scenario Explorer and Data Hosted by IIASA. Technical report, IIASA (2019).

⁴⁸ Riahi, K. et al. (2015). Locked into Copenhagen Pledges — Implications of Short-Term Emission Targets for the Cost and Feasibility of Long-Term Climate Goals. Technol. Forecasting Soc. Change 90 (2015): 8-23.

⁴⁹ Ferguson, C.D. et al. (2010). A US Nuclear Future? Nature, 467: 391-393.

图14：技术成本预测。（A–D）主图显示了太阳能光伏、风能、电池和PEM电解器在快速转型情景下的成本预测分布；50%置信区间（CI）为深蓝色，95%置信区间为浅蓝色。还显示了几个具有代表性的近期和过去的推测（红线），对应IAM和IEA做出的“乐观”减缓方案（见图13）。就电池而言，展示了锂离子消费者电池和锂离子电动汽车电池组，尽管它们的成本现在已经趋同；我们的预报是基于消费者电池，而IEA的推测是基于电动汽车电池。右侧图表中的方框图比较了无转型、慢速转型和快速转型情景下2050年的成本预测。插图显示了历史经验曲线和预测，学习率与情景无关，垂直线表示每种技术在各情景中沿着概率经验曲线下降的程度。E–G显示了基于AR（1）时间序列模型的石油、煤炭和天然气的概率成本预测



单个技术的概率成本预测

我们应用了迄今为止讨论过的方法预报未来的能源成本和价格。为了生成经验曲线预报，根据历史数据估计了每种技术的参数。然后，我们为每种技术的未来部署作为时间函数设定了情景，并预测了未来成本的分布。我们定义了三种具有代表性的部署情景。第一种情景与到2050年左右能源系统摆脱化石燃料的转型一致，因此我们将这种部署情景称为“快速转型”。第二种情景与到2070年左右淘汰化石燃料一致，因此我们将其称为“慢速转型”。最后一种方案与化石燃料继续主导能源系统一致，因此我们将其称为“无转型”。

图14显示了七种重要能源技术的概率预报。图14A–D的主图显示了快速转型情景中关键绿色技术的预报，这些预报是使用莱特定律的随机版本完成的。插图显示了成本与经验的关系，并强调在所有情景中，成本中位数作为经验的函数显示了一致的变化。图14A–D的侧图说明，根据莱特定律，预报分布取决于情景；因此，在快速转型中，我们可能会更快地实现更低的成本。每一项莱特定律技术最初都遵循当前成本呈指数级下降的趋势，但随着部署速度的下降，进展会放缓。为了生成化石燃料成本预报，根据观测数据校准了自回归模型（AR（1））。对于化石燃料来说，模型参数取决于过去的的数据，但预报与部署无关，因此每种技术在所有情景中都有单独的预报。

图14还显示了IAM和IEA研究报告的未来成本推测。我们只展示了其最乐观的推测。与图13所

示模型的历史行为一致，相对于历史趋势，成本推测较高，也都大大高于我们的推测中位值。

与这些成本推测相对应的部署与我们进行预报时的部署不同，因此它们不具有完全可比性。然而，正如箱形图所示，这些差异在我们所有的情景中都存在，包括“无转型”情景。这表明，在条件相同的情况下，我们的成本预报都明显低于有影响力的能源经济模型中使用的。

从单一技术到全系统成本

为了预测绿色能源转型的可能成本，并探索单个技术成本的不确定性如何扩散到系统成本，基于明确的技术部署情景，我们构建了一个简单、透明的全球能源系统模型。采用上文介绍的三种转型情景。有关情景和简单能源系统模型的实施的更多细节，请参见Way等人的报告。

为了将我们的概率技术成本预报方法应用于特定情景，我们采用了蒙特卡洛方法，模拟了许多不同的未来成本轨迹，然后对未来成本进行指数折现，计算出该情景到2070年的预期净现值成本（NPC）。图15A展示了各情景下每年的系统成本。黑色箱线图表示全部成本预报分布，而彩色条显示各技术组的支出中值。这表明，在快速转型方案中，支出是如何从化石燃料迅速转移到关键的绿色技术的。

图15: 情景成本。(A) 彩色条显示了每种情况下化石燃料和非化石燃料技术的年支出中位数, 单位为万亿美元。箱线图显示了年度总支出的中位数和四分位间距 (IQR), 盒须从方框中延伸到IQR的1.5倍。(B) 每种情景下2050年的年度系统成本的预测分布。(C) 每个方案的净现值成本预测分布, 固定贴现率为2%。(D) 相对于无转型情景, 每个情景的预期净现值成本, 是贴现率的函数。插图展示了作为贴现率的函数, 快速转型和缓慢转型的净现值低于无转型的概率

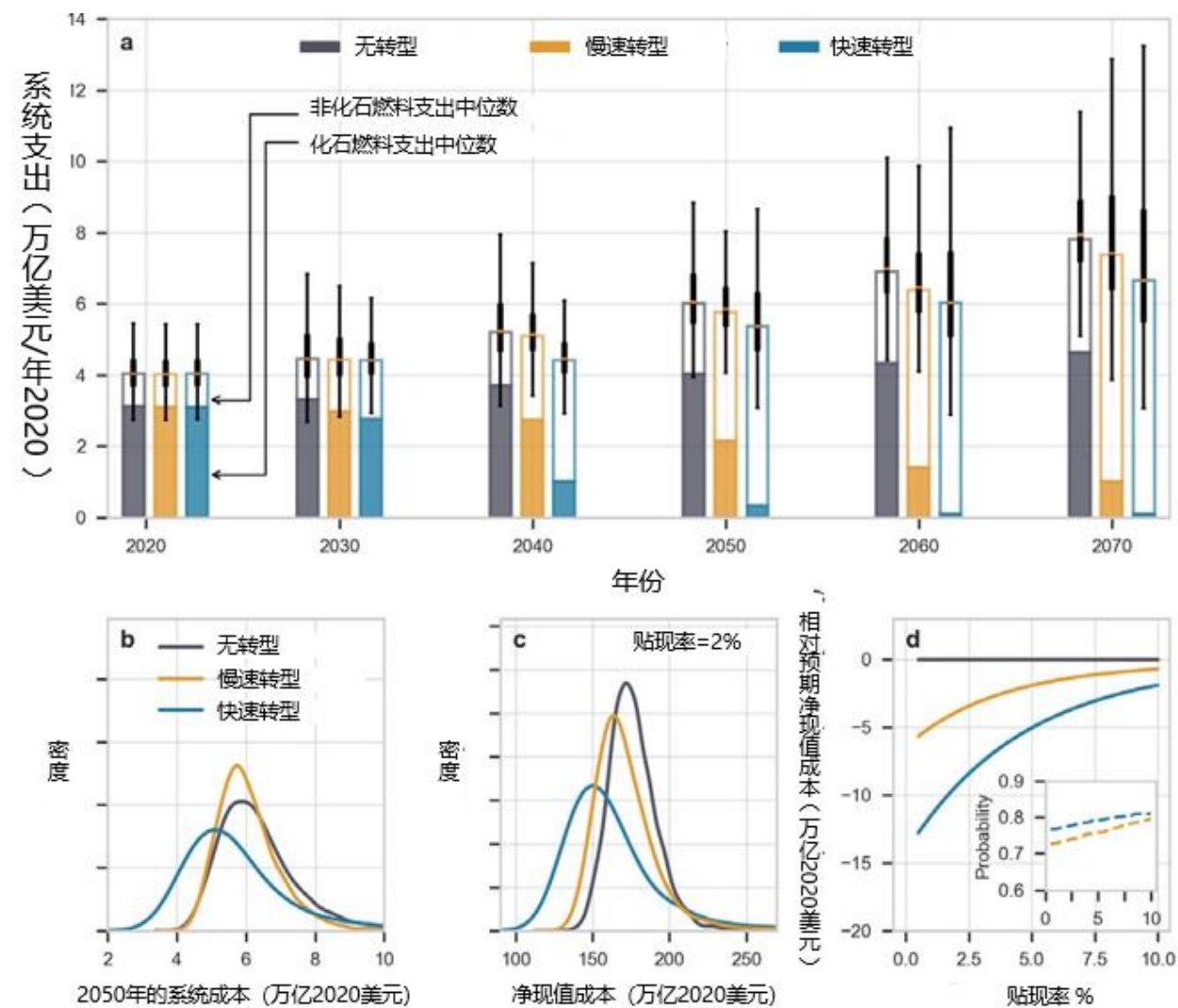


图15B展示了2050年的年度系统成本预报分布。用低成本的关键绿色技术迅速取代化石燃料技术, 尤其是在电力和运输领域, 导致2050年快速转型情景下的预计年度能源系统成本比无转型情景下低5140亿美元, 尽管快速转型可能的成本分布更广。2050年后, 如图15A所示, 虽然中位数和四分位间距 (IQR) 保持相对较低, 但相对于无转型情景, 快速转型的不确定性有所增加。如果成本处于不确定性范围的上限, 将使用更便宜的替代品; 没有考虑到这一点, 是我们这种研究方法的缺点。

图15C显示了在2%的固定贴现率下, 每个方案的NPC预测分布。尽管存在相当大的不确定性, 但快速转型的NPC可能比无转型低很多。相比之下, 慢速转型不如快速转型便宜。因为目前化石燃料的高支出持续了几十年, 而关键绿色技术的节约要晚得多才能实现。尽管如此, 与“无转型”方案相比, 它也能节省开支。与图15B类似, 快速转型的NPC分布比无转型的NPC更宽。尽管这是由更高的技术不确定性造成的, 由于与扩大关键绿色技术相关的预期成本下降, 这种增加的不确定性被分布的左移所补偿。

图15D展示了相对于无转型情景, 每种情景的预期NPC如何随贴现率变化的。插图显示, 无论贴现率如何, 快速转型方案的NPC低于无转型的可能性约为80%。先前的分析表明, 快速转型到清洁能源技术是否具有良好的经济意义取决于贴现率。但在这里, 我们展示了一个惊人的结果: 在所有合理的折扣率下, 快速转型可能便宜得多。例如, 使用《斯特恩报告》中建议的1.4%的社会

贴现率, 预计当前净现值约为12万亿美元。如果采用较高的5%的贴现率, 预期节省的资金约为5万亿美元。

结论

过去40年来, 人们认为绿色能源转型将耗资巨大, 这是应对气候变化不力的主要原因。这种悲观主义与过去技术成本优化的趋势相悖, 并有可能让人类的能源未来陷入昂贵而危险的局面。虽然支持快速绿色转型的论点列举了避免气象灾害、减少空气污染和降低能源价格波动等好处, 但提出这些好处的同时, 往往会分析转型带来的成本。我们的分析表明, 可能不存在取舍的问题: 一个更环保、更健康、更安全的全球能源系统也可能成本更低。更新预期以更好地与历史证据相一致, 可能会从根本上改变关于气候政策的辩论, 并大大加快世界各地能源系统的去碳化进程。

虽然对一些IAM假设持批评态度, 但我们认为我们的方法是对这些假设的补充, 是直接建立在历史趋势的基础上, 从而为IAM的推测提供了平衡。我们已经证明, IAM中常用的约束可能是其预测与历史数据不匹配的重要原因。未来可以探索减弱约束条件如何改变其推测。我们想强调的是, 与IAM不同, 我们并没有试图找到最佳解决方案。可能还有其他方案比快速转型方案更便宜, 快速转型方案是为了探索 (在充分快速的部署下) 快速转型是否可以实现净成本节约, 如果可以, 可能性有多大。

⁹⁰ Stern, N. (2007). The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge University Press.



案例分析:

实现快速、平稳脱碳和可持续发展的政策选择

Francesco Lamperti (比萨圣安娜高等学校) , Andrea Roventini (比萨圣安娜高等学校)

政策问题: 在保持经济体系和公共预算稳定的情况下, 哪些气候政策组合更有利于促进和维持能源转型?

范围: 全球

方法: 基于主体的模型

主要发现: 单独实行碳定价政策对低于2°C的控温目标无效, 而化石燃料禁令、公共建筑补贴和电气化标准政策的组合虽然会对财政造成(轻微)影响, 但在减少排放增长方面具有很大的潜力, 同时还能促进增长、维持宏观金融稳定。可以在政策组合中加入少量碳税, 进一步加快转型, 抵消其对公共预算的影响。

交流互动: 本案例研究得益于利益相关方、政策制定者和研究人员在多轮互动中频繁提供的各种反馈(特别是在巴西)。因此, 部分研究问题、测试的政策工具和结果变量是与政策利益相关者共同决定的。

摘要: 作者使用动态模拟来检验替代性气候政策组合能够以何种方式促进和维持能源转型、实现减排, 同时不破坏经济体系和公共预算的稳定。作者使用一个基于宏观金融主体的综合评估模型, 根据全球经济进行校准, 模拟一个不断发展的复杂经济体中的政策组合, 其中, 不同的公司相互作用, 处于持续的不平衡状态。

介绍

气候影响正在迅速恶化, 在目前的排放轨迹下, 很可能会破坏社会经济和自然系统的稳定。^{51,52}应对全球变暖、实现可持续发展, 需要不同的政策组合; 然而, 目前商定的承诺不足以实现《巴黎协定》的目标。为了减少排放, 各经济体必须降低碳强度, 淘汰化石燃料能源和相关实物资本, 并在三十年以内推动气候技术革命。若处理不当, 向低碳经济的转型要么动作迟缓, 要么过于突然, 由此可能造成高昂且系统性的转型成本。^{53,54,55,56}政策制定者越来越强调需要在快速转型、由此产生的宏观经济摩擦^{57,58}以及长期增长机会之间找到合理的平衡。⁵⁹尽管人们普遍认为, 采取气候行动、减轻不受控制的气候变化风险的需求非常迫切, 但是, 当前缺乏引导有效、有序转型的恰当政策组合⁶⁰, 且过度依赖政治上可接受性低的政策工具, 如碳定价, 引发了人们对转型前景的担忧。^{61,62,63}

Lamperti⁶⁴等人和Wieners⁶⁵等人采用了一个根据全球经济进行校准、且基于宏观金融主体的综合评估模型, 将其看作模拟实验室, 在一个持续失衡的复杂演变经济中比较了替代气候政策组合, 考察了在不破坏经济体系和公共预算稳定的情况下, 促进和维持转型以及利用技术机会的能力。结果显示, 仅靠碳定价政策无法有

效实现低于2摄氏度的控温目标。目前的碳税水平确实不足以实现这一目标, 而如果作为唯一的政策, 能够带来快速转型的高碳价很可能导致宏观经济的不稳定性。相反, 如果监管和投资补贴以及绿色能源技术的研发相结合, 经济则有望走上双赢的可持续发展之路。我们的模型切实考虑到了深度不确定性和路径依赖下的内生技术变革, 而传统方法忽略了这些因素。我们的结果源于不同的政策组合, 这些政策比碳价更直接地解决了更广泛的快速制度变革障碍, 而碳价只关注碳的外部性, 主要通过市场信号发挥作用。在政策组合中, 碳税可以有效地用于资助绿色公共支出, 同时又不会阻碍增长前景。以任务为导向的政策是气候政策的一个配合工具, 有望促进向新的低碳增长路径转变^{66,67}。此外, 还需要投资来提高政府的长期能力和动态能力, 以便在面对气候变化和其他紧迫的社会挑战时, 能够及时调整公共应对措施(Lamperti等, 2019b)。虽然其范围在绝对意义上是有限的(Lamperti等, 2021), 但是适时的信贷和宏观审慎政策在面临气候风险时可以促进宏观金融稳定, 同时适度减缓排放增长(Lamperti等, 2021)。总体而言, 我们的研究结果表明, 基于可信的政策目标的政策组合和投资, 以及政府以任务为导向和承担风险的态度, 有望实现快速脱碳、高就业率和长期可持续发展的双赢道路。

⁵¹ Coronese, M. et al. (2019). Evidence for Sharp Increase in the Economic Damages of Extreme Natural Disasters. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(43):21450–21455.

⁵² Palagi, E. et al. (2022). Climate Change and the Nonlinear Impact of Precipitation Anomalies on Income Inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(43):e2203595119.

⁵³ van der Ploeg, F. (2020). Macro-Financial Implications of Climate Change and the Carbon Transition. Presented at the Session “Implications of Fundamental Global Changes for Central Banks” of the ECB Forum on Central Banking, 11-12 November 2020.

⁵⁴ Mercure, J-F. et al. (2018). Macroeconomic Impact of Stranded Fossil Fuel Assets. *Nature Climate Change*, 8(7): 588– 593..

⁵⁵ Battiston, S. et al. (2017). A Climate Stress-Test of the Financial System. *Nature Climate Change*, 7(4): 283–288.

⁵⁶ Semieniuk, G. et al. (2021). Low-Carbon Transition Risks for Finance. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12(1): e678.

⁵⁷ Carney, M. (2015). Breaking the Tragedy of the Horizon—Climate Change and Financial Stability. Speech given at Lloyd’s of London 29: 220–230.

⁵⁸ NGFS (2019). NGFS First Comprehensive Report: A Call For Action – Climate change as a source of financial risk.

⁵⁹ Mercure, J.F. et al. (2021). Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. *Global Environmental Change*, 70: 102359.

⁶⁰ Stern, N. and Stiglitz, J. E. (2021). The social cost of carbon, risk, distribution, market failures: An alternative approach.

⁶¹ Lilliestam, J and Patt, A. (2018). The Case against Carbon Prices. *Joule*, 2(12):2494–2498.

⁶² Pezzey, J. C. V. (2019). Why the Social Cost of Carbon will Always be Disputed. 10(1): e558. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wcc.558>.

⁶³ Rosenbloom, D. et al. (2020). Opinion: Why Carbon Pricing is not Sufficient to Mitigate Climate Change — and How “Sustainability Transition Policy” Can Help. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(16): 8664–8668.

⁶⁴ Lamperti, F. et al. (2020). Green Transitions and the Prevention of Environmental Disasters: Market-Based vs. Command- and-Control Policies. *Macroeconomic Dynamics*, 24(7):1861–1880 ; Lamperti, F. et al. (2021). Three Green Financial Policies to Address Climate Risks. *Journal of Financial Stability*, 54: 100875.

⁶⁵ Lamperti, F. et al. (2022). Macroeconomic Policies to stay below 2°C with Sustainable Growth. Technical report, LEM Working Papers. Forthcoming.

⁶⁶ Dosi, G. et al (2021). Mission-oriented Policies and the ‘Entrepreneurial State’ at Work: An agent-based exploration. LEM Working Paper Series.

⁶⁷ Lamperti, F. et al. (2019). The Green Transition: Public Policy, Finance, and the Role of the State. *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung/Quarterly Journal of Economic Research* 88(2): 73-88.

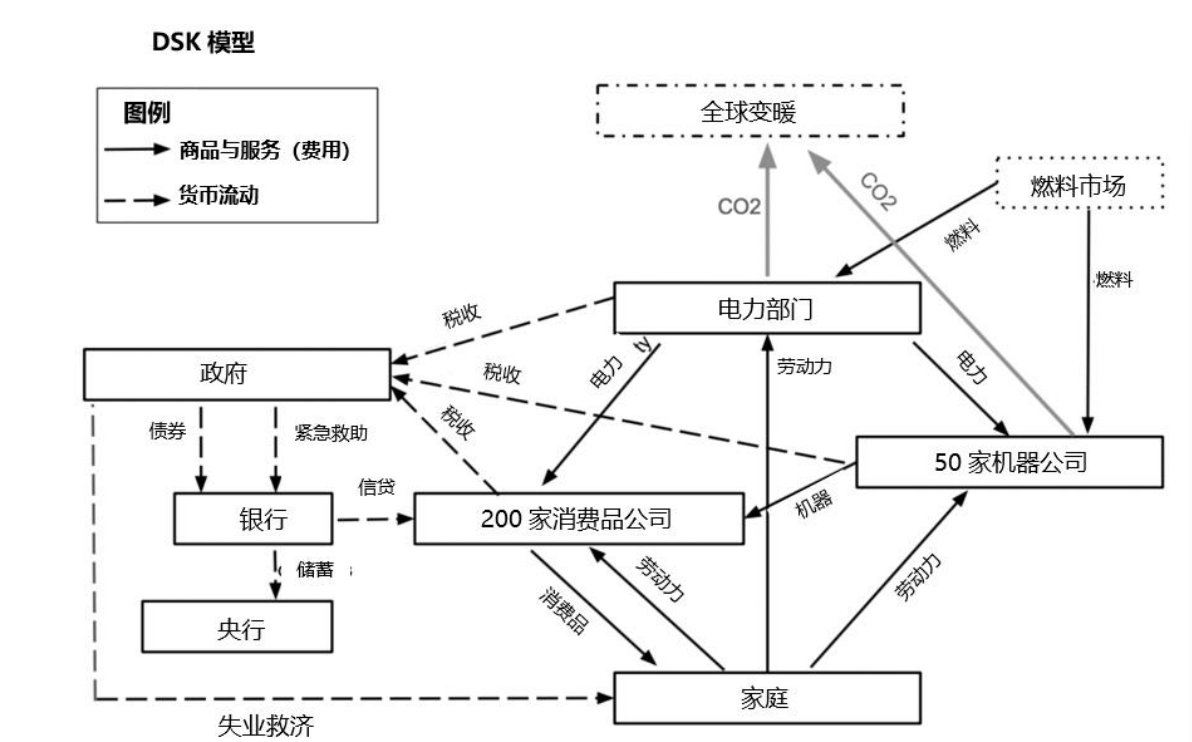
⁶⁸ Lamperti, F. et al. (2021). Three Green Financial Policies to Address Climate Risks. *Journal of Financial Stability* 54: 100875.

方法

为了检验替代气候政策在短期和中长期对宏观经济的风险和机遇，我们采用了反乌托邦的DSK模型。DSK模型是一个基于主体的模拟实验室，模拟了与环境 and 气候动态互动、共同发展的全球经济（见图16）。该模型包含不同的且相互作用的消费品和资本品，其生产需要能源和劳动力投入，也可能需要银行提供的信贷。生产资本品的公司还会开展研发活动，提高生产流程效率。在电力行业，能源工厂利用低碳能源或者化石燃料为经济提供电力。公司决定生产数量、员工数量、投资、外部融资金额以及如何寻找新技术；银行决定提供的信贷额度，信贷条件和客户，此外，银行还要求政府发行债券；消费者则赚取工资和股息，需要的是最终商品。政府实施财政、创新和能源政策，央行实施货币和宏观审慎政策。人为排放来自商品和能源的生产。累积排放量通过一个单一的气

候模型与温度上升联系在一起。该模型提供了气候损害的随机微观基础，模拟了一系列不同的冲击，这些冲击影响了企业、消费者和能源工厂的若干特征（Lamperti等，2018、2019）⁷⁰。该模型的独特之处在于，它将“熊彼特式”的增长引擎与“凯恩斯式”需求管理手段和由不同商业银行组成的金融部门相结合，其中，“熊彼特式”的增长引擎以“奈特式”不确定性和路径依赖下的内生技术变革为特征。上述所有特征都是根据有限理性主体在面对不断演变的环境生态时的行为惯例和去中心化互动所构建的，经过了实证验证，见Fagiolo等人（2019）⁷¹。在该模型中，有效的脱碳取决于政策对创新速度和方向的影响，也取决于政策在应对市场中不对称信息时发生作用的方式。

图16：Wieners等人的DSK模型格式化展示（2022）



⁶⁹ Lamperti, F. et al. (2018). Faraway, So Close: Coupled Climate and Economic Dynamics in an Agent-based Integrated Assessment Model. *Ecological Economics* 150: 315-339. Bosetti, V., Lamperti, F., Roventini, A., and Tavoni, M. (2019). The Public Costs of Climate-induced Financial Instability. *Nature Climate Change* 9(11): 829-833.

⁷⁰ Dosi, G., Lamperti, F., Napoletano, M., Roventini, A., and Sapio, A. (2018). Faraway, So Close: Coupled Climate and Economic Dynamics in an Agent-based Integrated Assessment Model. *Ecological Economics* 150: 315-339. Lamperti, F. et al. (2019). The Public Costs of Climate-induced Financial Instability. *Nature Climate Change* 9(11): 829-833.

⁷¹ Fagiolo, G. et al. (2019). Validation of agent-based models in economics and finance. *Computer Simulation Validation*: 763-787. Springer.

结果和政策洞察

在Wieners 等人（2022）的图中，我们分析了DSK模型中实施的多个碳税计划（见表7和图17）。我们认为，碳税会带来两种结果，一是逐渐抬高化石燃料价格（模仿成本收益综合评估文献所建议的政策），二是导致化石燃料价格的迅速上涨⁷²。结果非常清楚：单独实施碳定价，效益和风险并存（见图17）。一方面，过低的碳税在很大程度上无法引发电力和工业部门的绿色转型。我们发现，当政策制定者依赖低于化石燃料价格100%的碳税时，实现2℃温控目标的相对可能性接近于零。换句话说，提高化石燃料价格一倍大致上是最低的政策门槛，能为摆脱对排放密集型技术的路径依赖带来可见的效果。我们的研究表明，仅通过提高碳价格，很难克服技术搜索和采用过程中的惯性。由于围绕创新和寻找新技术过程的深度不确定性，价格无法作为快速引导技术变革的信号。对于能源密集型行业来说是如此，对于能源成本相对较低的行业来说更是如此。另一方面，高碳价可能会加剧经济的不稳定性，导致失业率急剧上升，企业破产激增，从而转化为暂时性但长期的衰退。碳定价不仅增加了生产的可变成本，也增加了技术采用的难度；加剧了金融脆弱性，降低了总需求。碳价格高到一定程度，足以将化石燃料价格提高约2.8倍时（这时能源转型的速度能达到2℃控温目标的所需条件），更可能出现危机。尽管针对企业（支付成本）或家庭（维持消费）的减税计划缓解了这一不利影响，但却并没有为经

济提供全面保障。结合上述两个结果，Wieners 等人发现，加快碳定价的步伐（通常在DICE和其他主流综合评估模型中提倡，案例参见Nordhaus, 2019,2014）⁷³，存在短期无效性与长期经济不稳定性增加的风险，使转型更加困难。这些发现指出，应适度、谨慎采用碳定价，并呼吁一个更广泛的政策组合，将碳税与其他政策相结合。

侧重于数量、监管、创新、推动、社会影响、信息披露和混合方法^{74,75}的大量政策工具通常被排除在气候政策的宏观经济评估之外。为了填补这一空白，我们测试了大量组合，包括对绿色电厂建设的补贴、对低碳技术研发的补贴、禁止化石燃料电厂的法规以及实施电气化的标准。所有工具都将进一步与碳税相结合，突出政策协同作用（主要结果见表7）。我们的研究补充了转型政策的生态宏观经济分析^{76,77,78,79}，提供了一个自下而上的视角，在这一视角下，深度不确定性和路径依赖下的技术变革过程是制度变革的关键驱动力。此外，我们提供了多个维度的替代政策方案对比，包括脱碳过程的速度和宏观金融表现的几个指标。首先，研究表明，禁止化石燃料工厂建设和化石燃料使用的命令与控制政策具有积极影响。这两项政策（在表7中标为B和E）都是规定在宽限期后实施禁令，违规公司将面临罚款和逐出市场的处罚。此类手段在政策领域越来越常见（例如，英国自2025年起禁用燃气锅炉），需要揭示这类政策会产生何种大规模的宏观影响。宽限期帮助企业适应新规，新规是可靠的，可以被经济主体立即内化。这些政策促进了能源和制造业对低碳技术的加速投资，与其他政策（如碳税）相比，可以更快促进排放密集型生产技术的淘汰。

⁷² Specifically, we test policies that raise the fossil fuel price by a factor ranging from 1 to 15, which allows studying carbon prices coherent with IPCC scenarios limiting temperature anomaly to 2 degrees as well as more aggressive policies. When modelling increasing rates, we consider exponential tax schedules following the same fossil fuel price trajectories of Nordhaus (2017)'s DICE model. Details in Wieners et al. (2022).

⁷³ Nordhaus, W. (2014). Estimates of the Social Cost of Carbon: Concepts and Results from the DICE- 2013R Model and Alternative Approaches. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1(1/2): 273-312. Nordhaus, W. (2019). Climate change: The ultimate challenge for economics. *American Economic Review*, 109(6): 1991-2014.

⁷⁴ Hepburn, C. (2006). Regulation by Prices, Quantities, or Both: A review of instrument choice. *Oxford Review of Economic Policy*, 22(2): 226-247.

⁷⁵ Peñasco, C. et al. (2021). Systematic Review of the Outcomes and Trade-Offs of Ten Types of Decarbonization Policy Instruments. *Nature Climate Change*, 11(3): 257-265.

⁷⁶ Mercure, J.F. et al. (2018). Environmental Impact Assessment for Climate Change Policy with the Simulation-Based Integrated Assessment Model E3ME-FTT-GENIE. *Energy strategy reviews*, 20: 195-208.

⁷⁷ Monasterolo, I. and Raberto, M. (2019). The impact of Phasing out Fossil Fuel Subsidies on the Low- Carbon Transition. *Energy policy*, 124: 355-370.

⁷⁸ Dafermos, Y. and Nikolaidi, M. (2019). Fiscal Policy and Ecological Sustainability: A Post- Keynesian Perspective. In *Frontiers of Heterodox Macroeconomics*, 277-322.

⁷⁹ Rengs, B. et al. (2020). Evolutionary Macroeconomic Assessment of Employment and Innovation Impacts of Climate Policy Packages. *Journal of Economic Behavior and Organisation*. 169: 332-368.

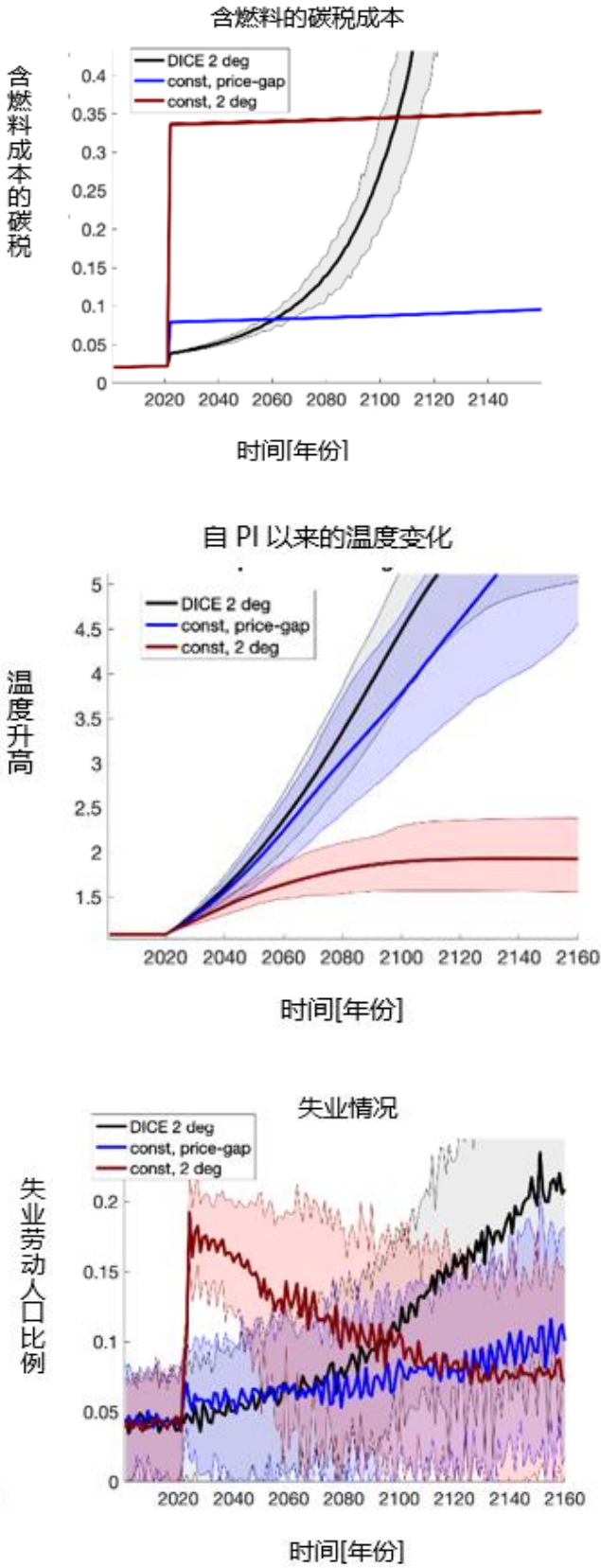
针对绿色工厂建设和绿色研发的公共补贴是气候政策的另一个重要工具，有助于(i)加速电力部门的转型（这对持续采用电气化解决方案来说非常关键）、(ii)持续创造就业机会。实验B+C+E（见表7）结合了化石燃料禁令、公共绿色建筑补贴和电气化标准，虽然在增加就业和维持宏观金融稳定的同时减少，排放增长方面表现出了巨大潜力。特别是，化石燃料禁令和电气化标准有效地将技术变革过程重新导向低碳技术，而补贴则加速了创新的探索和应用。不基于税收的政策给公共预算带来的总成本不高（在一个典型的发达国家，估计约为每年国内生产总值的1.5%[0.5%-3%]）。为吸收这些成本，我们测试了不同的碳税：总的来说，温和碳

表7: 不同气候政策相较于常规（无政策）情景的宏观经济影响。作者的分析基于Wieners等（2022）收集的数据。red.代表减少；inc.代表增加；cons.代表恒定；sub.代表补贴。来源: 改编自Lamperli and Roventini (2022)

政策	排放增长		产出增长		金融稳定性	公共预算
	政策	工业	短期	长期		
恒定低碳税（T）	略微减少	无影响	略微减少	略微减少	略微增加	略微减少
恒定高碳税	大量减少	减少	大量减少	大量减少	大量减少	减少
DICE模型下的碳税	略微减少	无影响	大量减少	大量减少	大量减少	减少
绿色工厂补贴（C）	减少	无影响	增加	无影响	略微增加	略微增加
绿色研发补贴	略微减少	无影响	增加	略微增加	无影响	略微增加
化石燃料禁令（B）	大量减少	减少	略微减少	无影响	略微减少	增加
电气化标准（E）	无影响	大量减少	大量减少	减少	略微减少	略微增加
B+E+C	大量减少	大量减少	略微减少	无影响	无影响	增加
B+E+C+T	大量减少	大量减少	略微减少	无影响	无影响	无影响

税的协同效应得以证明。政策组合中可以加入相对较低的碳税，进一步加快转型，从高排放企业获得收入，并抵消由监管和绿色公共支出组成的政策组合对公共预算的影响（实验B+C+E+T）。数值模拟表明，将2020年化石燃料价格提高2.5倍直到2100年，这一恒定碳税可以提供收入，为创新、指挥和控制以及绿色工厂建设政策提供资金，这些政策在转型的早期阶段至关重要；与此同时，这种碳定价的价格较低，足以防止宏观经济层面出现巨大的转型成本。上述结果表明，快速、平稳和促进就业的转型是可能的，将基于价格的工具与积极的产业政策相结合的简单政策组合就可以实现这一目标。

表7: 不同气候政策相较于常规（无政策）情景的宏观经济影响。作者的分析基于Wieners等（2022）收集的数据。red.代表减少；inc.代表增加；cons.代表恒定；sub.代表补贴。来源: 改编自Lamperli and Roventini (2022)



案例分析:

中国、印度和巴西可再生能源的必然趋势和边际定价

Pim Vercoulen (剑桥计量经济学和埃克塞特大学)、Femke Nijse (埃克塞特大学)、Simon Sharpe (气候支持团队)、Jean-Francois Mercure (世界银行)

政策问题: 阻碍可变可再生能源 (VRE) 应用和电力市场设计的障碍如何影响未来电力系统的电价?

地区: 巴西、中国、印度

方法: E3ME-FTT: 电力

主要发现: (1) 无论定价机制如何, 克服可变可再生能源 (VRE) 应用的障碍, 有望进一步降低电价。(2) 与电力供应的生命周期成本 (作为加权平均平准化成本WALC) 大体一致的电力定价机制能够通过降低电价至接近优序法 (MOA) 下的价格, 促进VRE的进一步应用。(3) 政策制定者的重点应该放在最大限度地减少此类壁垒上面, 打造一个由可变可再生能源 (VRE) 技术主导的电力系统市场。

交流: 在与能源研究公司 (EPE) 和其他英国研究人员就巴西电力行业进行讨论和模型比较后, 此项研究得以推进, 将印度和中国纳入其中。在印度能源研究所 (TERI) 组织的一次研讨会上介绍了关于印度的初步工作。

摘要: 作者利用E3ME-FTT电力模型探讨了中国、印度和巴西未来可能的电力系统配置, 重点探讨可负担的电力和市场设计的作用。此模型探讨了定价和监管政策在推动可变可再生能源 (VRE) 在上述国家应用的潜力。

介绍

煤炭发电是印度和中国采用的主要发电技术。巴西的电力则主要由水电厂供应。过去几年来, 可变可再生能源 (VRE) 技术在全球范围内以惊人的速度发展。最近, 中国率先安装了海上风力涡轮机。2018年至2021年间, 太阳能光伏和陆上风力发电能力在中国几乎翻了一番。同期巴西的太阳能光伏发电也实现了惊人的增长, 但分布式和集中式光伏发电的装机容量总和仍然低于陆上风力发电的总和。从历史上看, 由于巴西东北部蕴含巨大的风力资源, 巴西的陆上风力发电能力高于太阳能光伏发电。印度的VRE应用也带来了巨大的收益, 太阳能光伏发电能力也几乎翻了一番, 但陆上风力发电能力的扩展却没有跟上⁸¹。可以看到, 全球各地的VRE应用率是类似的。

随着可再生能源的成本持续下降, 部署VRE的趋势很可能会继续下去, 甚至可能会加速, 就像过去十年一样⁸²。在世界上大多数地区, 在电力成本平准化方面, VRE技术现在比传统技术更具竞争力。但是, VRE应用可能会面临一些障碍, 如电网韧性不足、融资渠道不畅、供应链滞后以及来自衰落行业的抵制。VRE面临的另一个障碍可能是电力市场的设计。

主导电力技术地位的转变也可能对电力市场的设计产生影响。在许多自由市场中, 特定时间点的边际生产成本决定了电价。在电力市场中, 这被称为边际定价或优序法 (MOA), 是清理市场的有效工具, 因为大多数电力系统由化石燃料发电主导, 成本来自燃料采购。与化石燃料发电厂相反, VRE技术的成本主要由前期资本投资决定。

因此, 如果VRE技术的应用轨迹仍然持续, MOA可能会导致VRE运营商亏本供电。在风力较大或是晴朗的天气, VRE的边际成本 (接近于零) 将决定电价。随着可再生能源的广泛推广, 这种情况会越来越常见。因此, 在未来由VRE主导的电力系统中, MOA可能不是一个合适的市场机制。相反, 高昂的化石燃料价格可能会给VRE公司带来意外的利润, 从而抬高电价。

在印度等市场, 长期电力供应合同在市场中扮演着重要角色, 支付给电力公司的费用更多地与电力公司的平准化成本有关。虽然长期合同不如日前电力市场灵活, 但没有上述MOA系统的缺陷。

我们尝试探索了中国、印度和巴西未来可能的电力系统配置, 特别关注可负担的电价以及市场设计能够发挥的作用。考虑到VRE可能持续的发展轨迹以及对全新定价机制的需求, 我们通过E3ME-FTT电力模型对印度、中国和巴西的电力系统不同情景进行了研究。

我们将分析的一种技术扩散情景是, VRE应用遇到了超出当前轨迹的额外阻力, 因此化石燃料的使用增加了 (高化石燃料)。在另外一组技术扩散情景下, 通过对化石燃料投资设定上限, VRE的应用可能会加速 (高VRE)。最后, 每种情况都暴露在两种不同的定价机制下: 一种是模仿MOA的定价机制 (在自由市场中很常见); 另一种是电价以平准化成本的加权平均值 (WALC) 呈现的范式, 它代表的是建立在生命周期成本、而非短期边际成本基础上的替代定价机制。FTT电力模型说明了存储成本和削减LCOE的影响。有关上述情景的概述, 请参见下表。

⁸⁰ IEA. (2019). World Energy Balances 2019. www.iea.org/statistics/.

⁸¹ IRENA (n.d.). Data Explorer. <https://www.irena.org/Data>. Accessed on: 19/11/2022.

⁸² IRENA (2021). Renewable Power Generation Costs in 2021, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>

⁸³ Nijse, F. J. M. M., et al. (2022). Is a Solar Future Inevitable? Global Systems Institute Working paper series number 2022/02. <https://eeist.co.uk/journalpapers/>

表8：E3ME-FTT电力模型下研究印度、中国和巴西电力系统的场景

情景名称	扩散假设	市场设计
参考场景-优序法	技术扩散遵循原有的轨迹	优序法
高化石燃料-优序法	VRE应用障碍较大，也即VRE技术的低扩散率	
高VRE-优序法	VRE应用障碍较少，表现为化石燃料技术的最大容量上限	
参考场景-WALC	技术扩散遵循当前的轨迹	平准化成本的加权平均值 (WALC)
高化石燃料-WALC	VRE应用障碍较大，也即VRE技术的低扩散率	
高VRE-WALC	VRE应用障碍较少，表现为化石燃料技术的最大容量上限	

E3ME-FTT：电力模型介绍

E3ME介绍

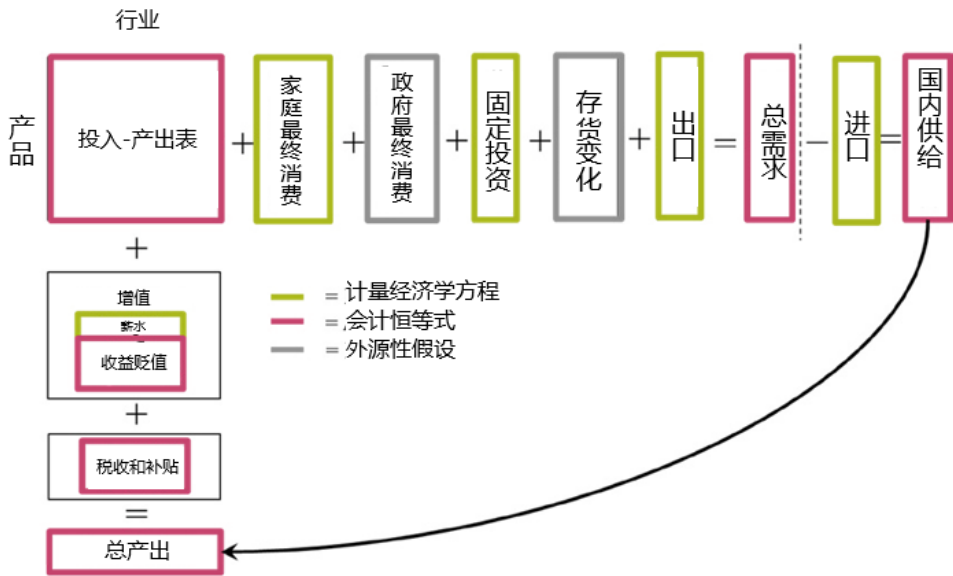
E3ME是一种基于计算机的世界经济、能源系统及环境模型。个人、家庭、企业和社会中其他群体从事的经济活动会对其他群体产生影响（时间上可能会滞后），这种影响可能会持续到后代身上。但其中的影响因素众多，这种影响（既有好处也有坏处）会在经济和实物资本中累积。详细描述可以在网络上找到。⁸⁴

经济主体的经济交易影响通过环境、经济、价格和货币体系（通过劳动力和商品市场）以及全球运输和信息网络传播。市场以三种主要方式传递影响：创造对材料、燃料和劳动力投入需求的活

动水平；影响收入的工资和价格；收入反过来导致对商品和服务的进一步需求。这些相互依存关系表明，E3模型应该是全面的，应包含经济和能源系统不同部分之间的诸多联系。因此E3ME的设计具有很高的地理和行业分辨率。

E3ME-FTT是涉及71个地区的全球模型，分别代表主要经济体，区分欧洲国家的70个经济部门和非欧洲国家的44个经济部门。E3ME模型是需求主导的宏观经济计量模型，使用时间序列计量经济学来确定需求的组成部分，目的是解决最终需求和各种其他指标的组成部分，参见图18。计量经济学参数代表了过去和当前应对冲击的行为。

图18：E3ME模型下的国家账户结构



能源领域也由经济计量关系决定，建立在上图中一些会计恒等式的基础上，但也包括对内生创新和能源价格的反应。非可再生能源价格的很大一部分是通过整合不确定性参数的成本供应曲线而形成的，在此基础上再增加税级。

技术在E3ME-FTT模型中的作用

在围绕经济去碳化的问题中，理解经济主体选择技术的理由和方式是很重要的。时间序列计量经济学方程需要很长的历史轨迹来模拟未来的情况。对于新技术来说，没有历史轨迹可循，因此计量经济学等式并不完全适合解决技术引发的转型。这就是未来技术转换（FTT）发挥作用的地方。FTT是一套与E3ME集成的模型，描述了大多数排放和能源密集型行业的技术决策，如发电⁸⁵、钢铁⁸⁶、家庭供暖⁸⁷和乘用车行业⁸⁸。

FTT遵循进化经济学的理论，该理论指出，社会技术体制（做某件事的原因和方式）因内部（如创新）和外部（如短缺或政策）压力而产生的不可逆和非边际的变化。FTT在其输入参数中加入了不确定性，代表了经济主体的多样性以及根本的不确定性。

FTT确定技术配置，满足E3ME-FTT模型确定的其他方面的需求。核心建立在Lotka-Volterra（捕食者-猎物）复制器函数的基础上，该函数成对地比较所有的技术，并将投资者偏好（确定为二元对数）、技术替代频率和上一年的市场份额作为输入，来确定本年度的市场份额⁸⁹。它包括正反馈，如基于全球累积技术能力增加的“边做边学”，以及由于部门限制而产生的负反馈，如VRE在电力部门的部署导致供需不匹配，或是钢铁部门回收的废料有限。

⁸⁴ Cambridge Econometrics (2022). E3ME Model Manual. Available at: <https://www.e3me.com/what/e3me/>

⁸⁵ Mercure, J. F. (2012). FTT: Power: A global model of the power sector with induced technological change and natural resource depletion. Energy Policy 48: 799-811.

⁸⁶ Vercoulen, P. et al. (2018). Decarbonizing the East Asian steel industry in 2050. Meijo University Discussion Paper #0008.

⁸⁷ Knobloch, F. et al. (2021). FTT: Heat - A Simulation Model for Technological Change in the European Residential Heating Sector. Energy Policy 153: 112249.

⁸⁸ Lam, A., and Mercure, J-F. (2015). The Effectiveness of Policy on Consumer Choices for Private Road Passenger Transport Emissions Reductions in Six Major Economies. Environmental Research Letters, 10(6): 064008.

⁸⁹ Mercure, J-F. (2015). An Age Structured Demographic Theory of Technological Change. Journal of Evolutionary Economics, 25(4): 787-820.

E3ME与其他模型有何不同？

E3ME经常被比作可计算一般均衡（CGE）或离散随机一般均衡（DSGE）模型^{90,91}。在多个方面，建模方法是相似的；模型用于回答相似的问题，使用相似的投入和产出。然而，这背后是建模方法之间的重要理论差异。E3ME这类模型建立在数据的基础上，试图从中推断出经济关系，而大多数其他宏观经济或综合评估模型（IAMs）建立在微观基础和理论之上。

在一个典型的CGE或DSGE框架中，优化行为是假设的，产出由供应约束决定，价格充分调整，使所有可用的能力都得到利用。在E3ME模型中，产出由经济的需求方决定，且可能有富余的经济能力。价格并不总是根据市场出清水平进行调整。

这些差异具有重要的实际意义，意味着在E3ME模型中，监管和其他政策如果能够利用现有的闲置经济能力，就有可能带来产出增加。金融部门的作用非常关键。

金融部门的作用

E3ME是一种后凯恩斯主义模型。该学派认为，货币是内生的，即货币可以由银行通过贷款等方式创造。这种方法不同于其他货币供应量固定的模型⁹²。固定的货币供应量意味着完全挤出；内生的货币供给并不存在。因此E3ME模型主张金融不可知论。该模型追踪给定部门的投资需求，将其作为计量经济关系或FTT的结果，但它不提供关于所需资金是否可获得的信息。

结果

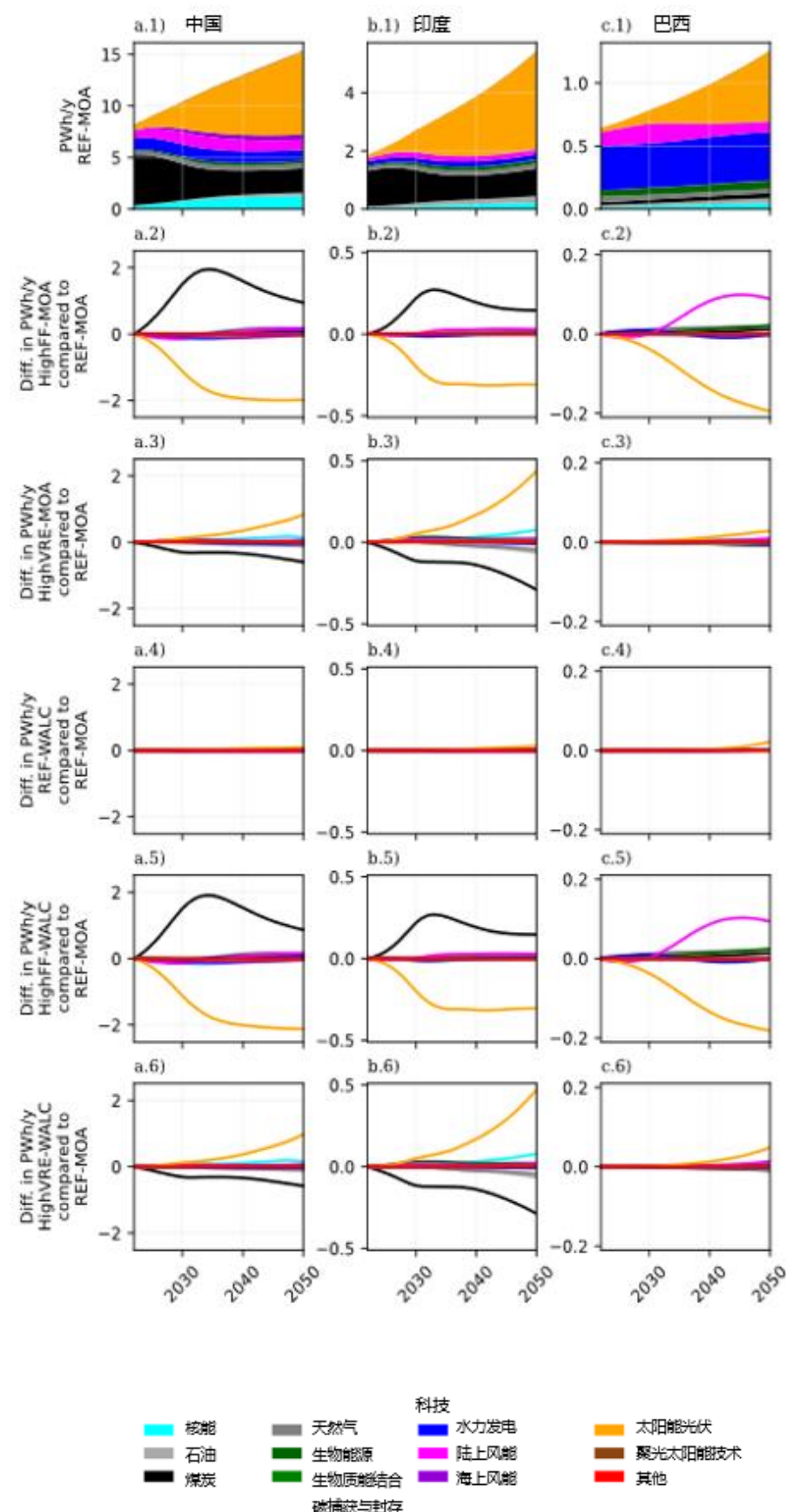
发电技术组合

在所有相关国家中，FTT:电力模型模拟了VRE技术在参照情景（REF-MOA和REF-WALC）中的持续扩散轨迹，与过去的扩散情况和持续的成本降低相一致（见图18）。随着太阳能光伏技术本身以及有助于VRE应用的存储技术成本持续下降，太阳能光伏发电的势头尤其强劲。在不久的将来，太阳能光伏发电很可能会胜过风力发电等其他替代能源。例如，巴西的情况就是如此。在巴西，风力过去一直是更受欢迎的VRE技术。由于VRE发电量的增加，化石燃料将会减少，这一情况主要集中在中国和印度。

然而，如果VRE技术遇到了额外障碍（见图18，高化石燃料-优序法HighFF-MOA和高化石燃料-加权平均平准成本HighFF-WALC），VRE的应用将会放缓，有利于化石燃料发电，巴西除外。巴西的可再生能源建设时间放缓有利于风能的利用。太阳能应用之初，市场份额很小。若建设周期过长，太阳能的绝对增长速度不可能像风能那样快。不过，巴西的VRE发电总量预计仍将下降，化石燃料发电将略有增加。VRE发电量减少说明对存储容量的需求也会相应减少，这减小了电力损失，从而降低了满足需求所需的供应。

在VRE面临的障碍较少的情景中，化石燃料发电的投资吸引力降低，VRE的应用则会如预期般上升。新建化石燃料发电厂的意愿降低，为VRE技术创造了空间。由于电力需求的快速增长，此种影响在印度最为显著。在巴西则不然，因为VRE技术与水电站等长期电力项目竞争，电力需求增长速度较慢。

图19：相关国家的技术发电。顶行显示了发电的绝对水平，下面的几行显示了与REF-MOA情景相比，各技术在发电方面的差异



⁹⁰ Mercure, J-F., et al. (2019). Modelling Innovation and the Macroeconomics of Low-Carbon Transitions: Theory, Perspectives and Practical Use. Climate Policy 19(8): 1019-1037.

⁹¹ Lefevre, J., et al. (2022). Global Socio-Economic and Climate Change Mitigation Scenarios Through the Lens of Structural Change. Global Environmental Change 74: 102510.

⁹² Mercure, J-F and Pollitt, H. (2018). The Role of Money and the Financial Sector in Energy-Economy Models used for Assessing Climate and Energy Policy. Climate Policy 18(2): 184-197.

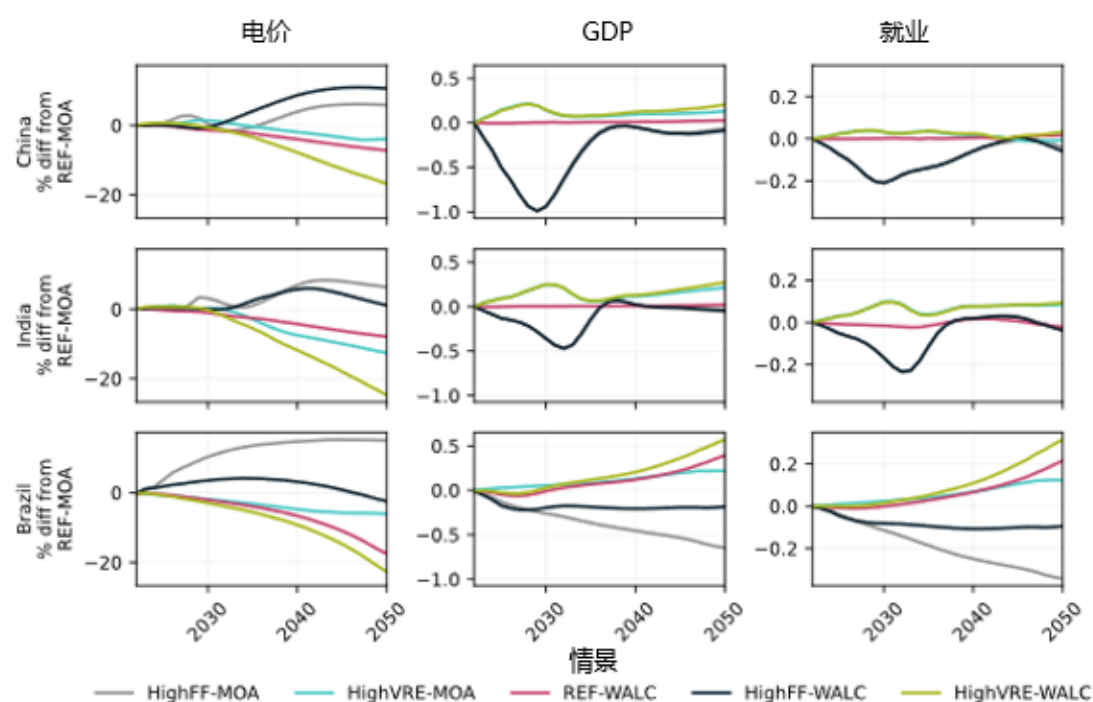
电价

上述情景模拟和市场设计对电价具有重要作用。图2显示了不同情景下的电价。无论市场设计如何，高可变可再生能源（HighVRE）情景下的电价低于高化石燃料（HighFF）情景下的电价。这是因为与化石燃料相比，可再生能源和存储的价格较低。

价格机制也发挥了作用，加权平均平准成本（WALC）的表现优于优序法（MOA）。优序法（MOA）价格机制通常会抬高电价，因为它依赖于化石燃料的边际成本，边际化石燃料价格较高时，可以为核电和VRE带来巨大利润。

对比参考情景-加权平均平准成本（REF-WALC）和高可变可再生能源-优序法（HighVRE-MOA）很有意思。两种情景都显示电价下降，但成因有所不同。WALC价格机制需要降低价格，因为价格不再由昂贵的边际化石燃料成本决定，而高可变可再生能源（HighVRE）情景显示价格下降，是因为可变可再生能源的价格更低。只有在印度，高可变可再生能源-优序法（HighVRE-MOA）的表现优于参考情景-加权平均平准成本（REF-WALC）。到2050年，印度的太阳能光伏发电在系统所占的份额相比其他相关国家最高，说明到那一年，有很多个小时都由VRE的边际成本决定价格，而不是由化石燃料的边际成本决定。这种效应在中国和巴西不存在，在这两个国家，替代定价机制的效果优于提高VRE应用。

图20:中国（第一排）、印度（第二排）和巴西（第三排）各情景与REF-MOA情景下的电价、总就业人数和GDP百分比差异比较



宏观经济效应

电价的变化会对经济的其他领域产生连锁反应。较低的电价减少了能源支出，释放了消费者支出。生产成本也降低了，也有助于增加消费者支出。

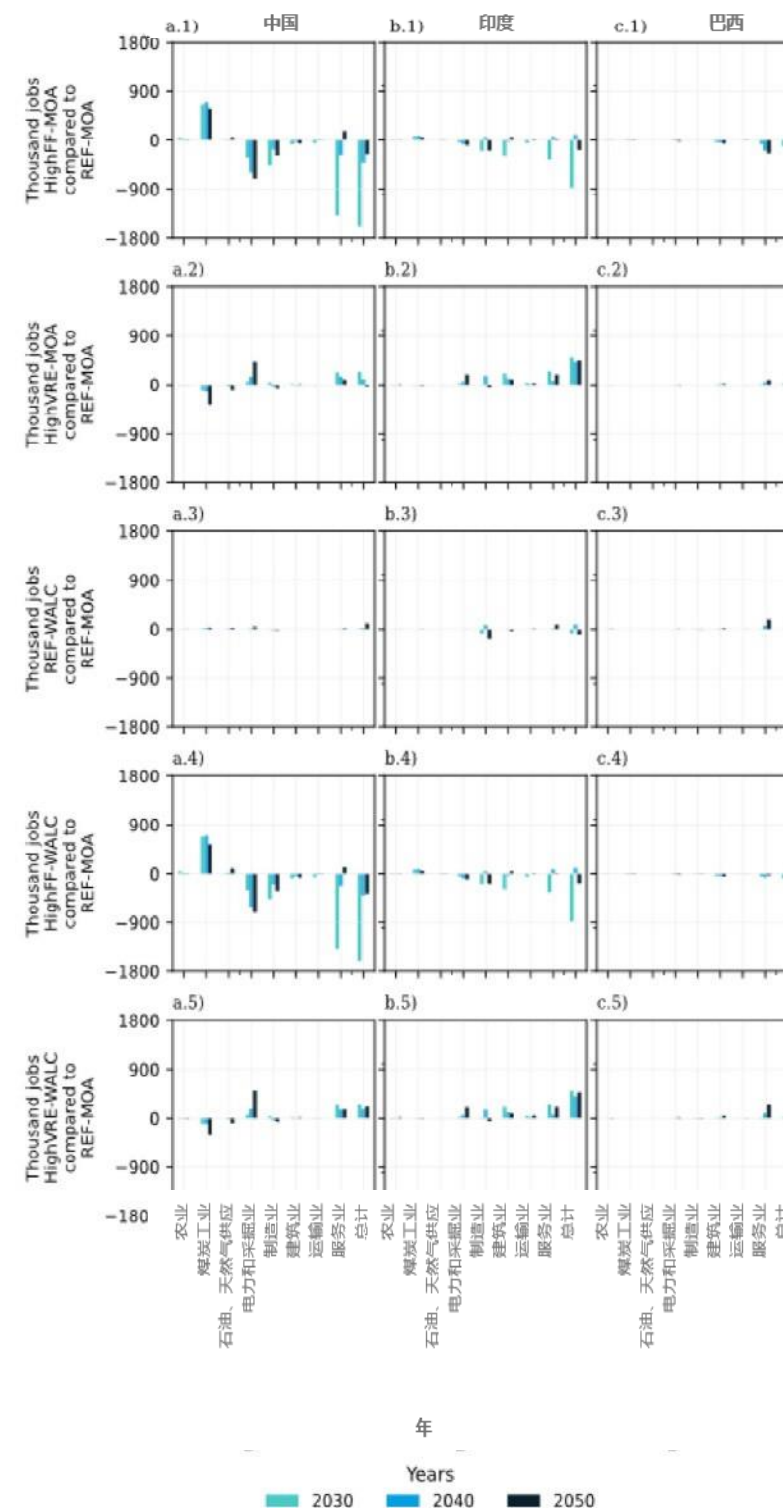
与参考案例相比，大多数高化石燃料情景呈现略微下降的情况，因为高电价和高工业生产成

限制了多个经济部门的消费。在本世纪中叶，高度依赖化石燃料对巴西尤为不利，因为这意味着巴西必须进口更多的能源资源。在印度和中国，VRE部署较少导致建筑业疲软，GDP下降的情况将提前出现。在高可再生能源的情景下，对GDP有积极的影响，高可再生能源部署与加权平均平准成本（WALC）市场设计相结合时，在三个国家都会产生最显著的积极影响。

对就业的影响是相似的。在高可变可再生能源情景（High-VRE）和加权平均平准成本（WALC）市场设计中，我们看到诸多行业的就业和总体净收益增加。在高可变可再生能源和加权平均平准成本（WALC）市场设计的情景下，就业增长是最高的。印度和巴西就业净增长显著，但

在中国，结果与参考案例相当。这是因为可再生能源行业的就业增长被国内采掘业的就业损失所抵消。相反，在电价较高的情况下，尤其是化石燃料价格较高的情况下，就业结果是负面的。在这些情景中，提高电价削弱了印度和中国的服务需求，并导致就业率下降（图21）。

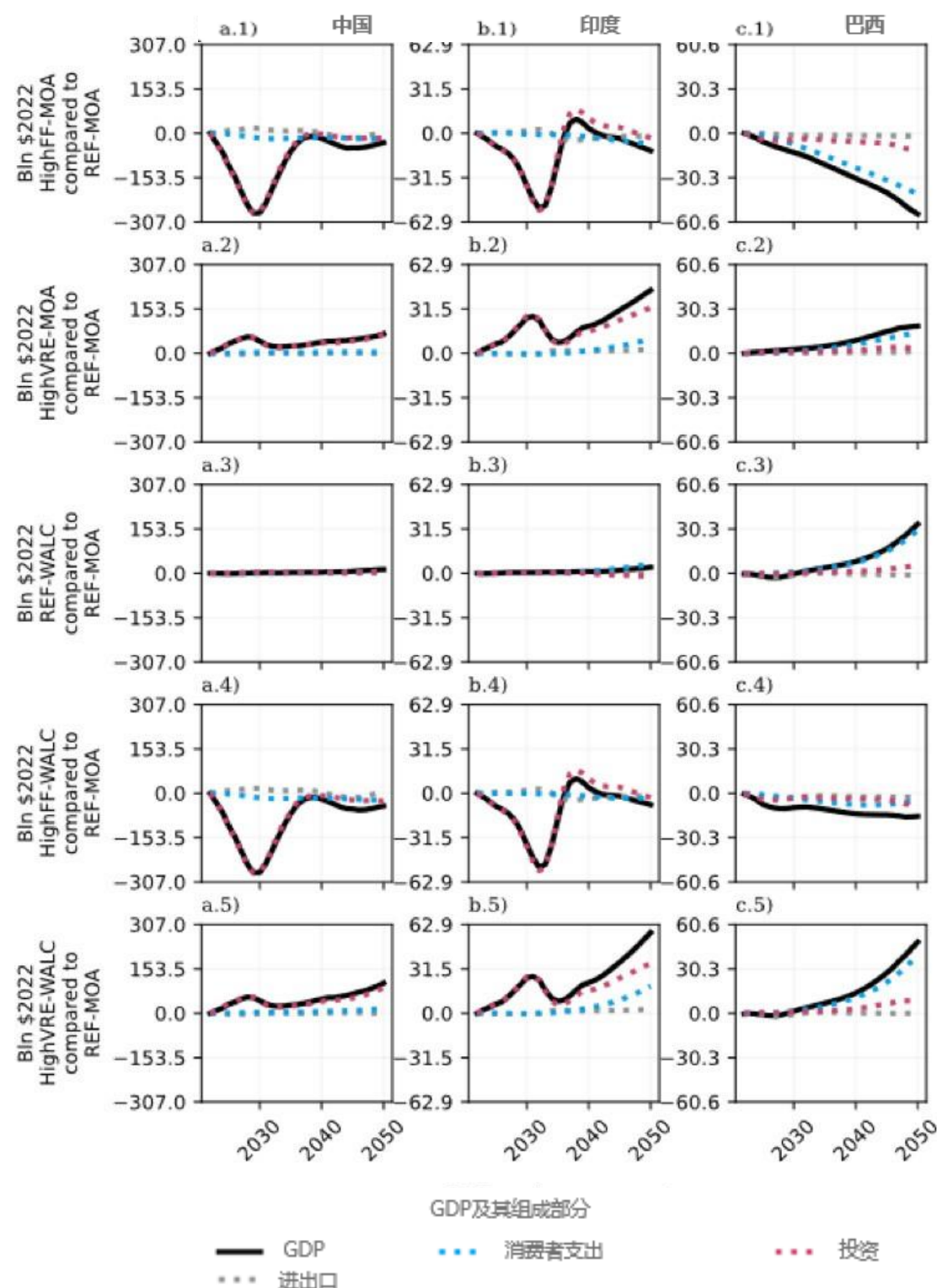
图21：与REF-MOA情景相比下的行业岗位影响。差异以绝对值形式呈现



在追踪GDP的组成要素（见图22）的过程中，我们发现，在高可变可再生能源（HighVRE）情景中的积极结果是由提高可变可再生能源（VRE）容量的资本投资驱动的。在高化石燃料（HighFF）情景下，到2050年，GDP与基

线水平持平或者低于基线水平。在这些情况下，负面影响体现为能源进口增加和高电价导致的消费者支出减少。巴西经济对定价机制变化的反应更为强烈，而不仅仅对电力系统配置的变化有所反应。

图22: GDP及其组成部分与REF-MOA情景的比较。差异以绝对值的形式呈现



讨论和结论

过去，太阳能光伏和风力发电的促进政策已经不可逆转地为如今的技术扩散创造了条件。⁹³上述情景模拟建立在历史的基础上，再加上基于莱特定律的正反馈循环，部署的技术越多，成本越低，表明了以往趋势的延续。从表面上看，太阳能光伏很可能超过其他技术。

消除太阳能光伏和风能应用的障碍，有助于各国减少对能源进口和国内化石燃料的依赖。进口减少改善了能源贸易平衡，对巴西和印度来说意义重大。国内资源的利用减少会导致相关行业的衰退，进一步造成该行业的失业现象，中国存在这种情况。不过，通过安装太阳能光伏和建造风力涡轮机，可以创造就业机会，克服这一问题。总体而言，加速VRE技术转向带来了积极的经济成果，这是由于电价降低，对VRE技术的投资增加，能源进口的依赖减少，国有含量较高行业的消费支出增加。如果不消除VRE应用的障碍，很可能会延续对化石燃料发电的依赖。中国、印度和巴西将错失持续能源转型带来的机遇，而中国可能会保留煤炭供应行业的工作岗位。

这两个定价市场在模型中以风格化的方式呈现。我们并不展示加权平均平准成本（WALC）市场的潜在灵活性损失，也不展示优序法（MOA）发电边际价格的每日变化。相反，我们根据VRE的扩散来估计化石燃料技术和可再生能源设定价格的时间。尽管如此，建模应该提供优势的一阶指示。我们的模型可能低估了中国、印度和巴西的电力系统（近期）未来面临的障碍。此模型体现了当前趋势的延续，但有可能一些趋势被打破，导致建造时间延长，高化石燃料（HighFF）情景将作为更好的参考场景。

印度和中国正在采取措施，推动电力行业自由化。放弃长期合同是确保中、印两国摆脱化石燃料基础设施束缚的重要一步。然而，他们可能会以自由市场中的优序法（MOA）为模板。这种市场设计可能会过时。与加权平均平准成本（WALC）大体一致的定价机制可以确保可再生能源获得足够的回报。

通过减少可变可再生能源（VRE）技术可能面临的壁垒，中国、印度和巴西有望获益。得益于过去和现在政策支持，VRE技术具有成本竞争力。政策制定者应该将重点放在最大限度地减少此类壁垒上，塑造一个适用于VRE技术主导的电力系统市场。

⁹³ Grubb, M. et al. (2021). The New Economics of Innovation and Transition: Evaluating Opportunities and Risks, EEIST report to COP26.



案例分析:

印度氢、氨行业耦合建模

ZAC CESARO (牛津大学), RASMUS BRAMSTOFT (丹麦技术大学),
MATTHEW IVES (牛津大学), RENÉ BAÑARES-ALCÁNTARA (牛津大学)

政策问题: 在印度发展绿色氢、氨基础设施能否促进向零电网的过渡?

地区: 印度

研究方法: 复杂性扩展的传统能源系统模型。

主要发现: 当前的政策是有成本的，依托这些政策，我们走上了将新兴氢、氨行业与电网分离的道路。如果系统在设计时考虑到了行业耦合，就有机会构建更具韧性、成本更低的系统。

交流互动: 本案例分析通过EEIST印度实践社区和其他建模论坛和活动，多次展示给印度利益相关方，寻求反馈。

摘要: 作者使用传统的能源系统模型，该模型通过新的经济建模和ROA的原理进行扩展，探究氢、氨行业耦合对印度净零排放目标的贡献。

介绍

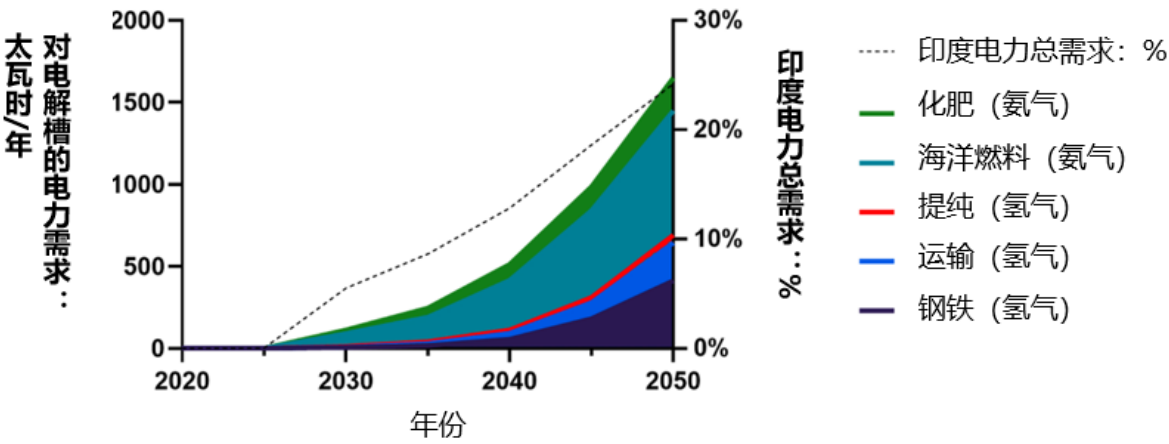
国际可再生能源署(IRENA)预测，2050年全球范围内的绿氢及其衍生物(主要是绿氨)的生产将占全球电力需求的30%。⁹⁴然而，使用能源系统模型(ESMs)发表的分析(ESMs是理解不同脱碳情景的主要工具)，系统地忽略了绿氢和绿氨在工业需求(如钢铁和化肥)和重型运输燃料(如航空、航运和陆运)方面的动态整合。

仅将静态需求纳入能源系统模型是不够的；行业耦合的未来潜力是一种动态妥协。绿氢和绿氨有助于通过短期和长期负荷转移灵活地从电网获取电量，以及在燃氢或燃氨的燃气轮机中

进行重新电气化，将可调度的电力返回电网。与行业耦合的能源系统模型文献主要关注短期、每日内的负荷转移，主要集中在轻型汽车运输部门和热力部门，如电池电动汽车(BEV)的协调充电。

在本研究中，通过对印度国家级电网的案例研究，探索绿氢和绿氨的电力与某个行业耦合的潜力，其中氢、氨生产的预计电力需求占2050年印度总电力需求的近25%(图23)。印度之所以成为案例研究对象，是因为印度在以下三个相关领域的需求增长是其他国家无法比拟的：绿色电力、绿色氢能(用于钢铁和交通需求)和绿色氨能(用于化肥和运输燃料需求)。

图23: 2050年前印度绿氢和绿氨的行业需求，包括与最终电力总需求的比较



⁹⁴IRENA, Geopolitics of the Energy Transformation The Hydrogen Factor, Technical Report, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2022

尽管所需的电解设备规模庞大，但据我们所知，还没有哪项建模工作考虑了工业电气化和电力与某个行业在这一规模上的耦合对于印度的动态作用。最近有大量的工作评估了将VRE纳入印度电力系统的作用。^{95,96,97,98,99,100,101,102,103}这些能源系统模型（ESMs）大多分析了新一代发电、输电和存储资产的开发，以及利用现有资产的最佳方式。然而，这些研究都忽略了电力与某个行业耦合在促进高水平VRE整合、降低脱碳成本 and 减少长期储存需求方面的重要作用。

印度走在了绿氢、绿氨政策制定的前面。印度政府宣布了到2070年104实现净零排放的目标，以及国家氢能计划（NHM），加快氢能技术的部署，并计划将印度建设成为全球电解槽和燃料电池制造中心¹⁰⁵。作为NHM的一部分，化肥行业承担了绿氨义务，如果实现，有望推动世界上最快的国家绿氨建设。即使目标没有实现，势头也在增长，印度已经宣布建立大型绿氨工厂106。但是，该政策并未关注电网整合及新增的庞大电力需求与电网的相互作用。

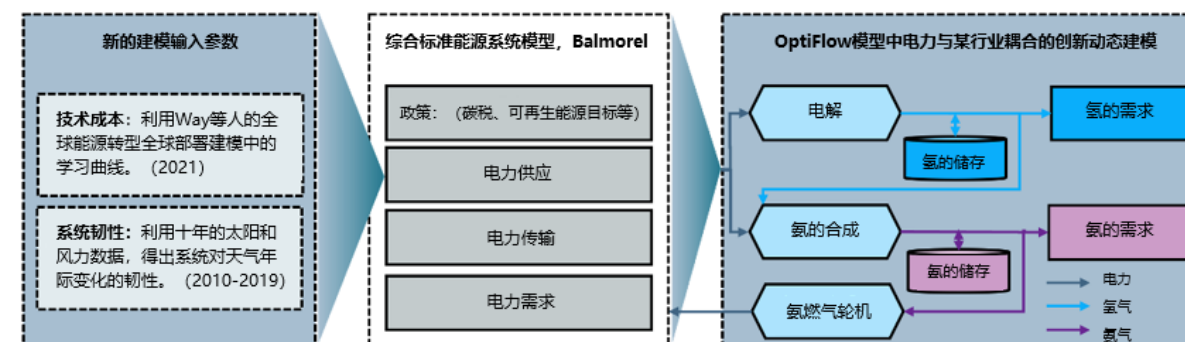
模型摘要

我们为2050年前的印度电网建立了一个最先进的能源系统模型（ESM），旨在探索氢和氨的全行业

耦合潜力，为电网提供交换服务，即负荷转移和可调度发电。如图23所示，本研究中的脱碳情景是根据其他行业级的研究编制的。本研究发现，到2050年，印度25%以上的电力将来自绿氢和绿氨。在这项研究中，传统的产能扩张能源系统中加入了新的方法，可以更好地捕捉能源系统的转型变化(图24)。

在印度，电力和其他行业耦合会给电力系统带来非边际性变革，因此作为EEIST的案例进行研究。电力行业与其他行业耦合对系统的非边际影响包括电力规划和系统运行的重大变化(本建模工作的重点)、土地和水使用的变化、地理和操作劳动力的变化、进口能源的显著减少以及出口能源的巨大潜力。本次建模工作包括对传统能源系统模型（ESM）的三项改进：电力与其他行业耦合和网络效应的详细动态整合（考虑生产、存储、运输、工业使用和峰值发电），2)基于Way等人107的全球能源转换情景的经验技术成本预测，以及3)在高VRE渗透率下系统对年际天气变化的韧性。这三个改进分别与(i)复杂性建模、(ii)正反馈循环和(iii)面对不确定性的系统韧性所使用的ROA方法一致。

图24：标准能源系统改进概述



我们使用“Balmorel”能源系统模型（ESM）和“OptiFlow”中的电力与某行业耦合模型进行建模。Balmorel是广泛使用的开源能源系统模型（ESM），用于容量规划和运营调度建模。该模型于过去二十年中开发，用于支持对能源部门的分析，重点关注电力和热电联产系统。基本模型最初是为波罗的海周边国家或北欧国家设计的，目前在全球范围内使用。例如，中国能源研究所（ERI，EEIST联盟的成员）在其年度《中国可再生能源展望报告》中使用Balmorel来模拟中国的能源转型。作为一个技术经济模型，它具有为电力和热力部门进行能源规划的功能。该模型用通用代数建模系统(GAMS)编写，即一种用于解决线性、非线性和混合整数优化问题的代数建模语

言和软件。在基本配置中，Balmorel模型使用每小时调度模拟和多年情景开发，对发电和输电投资进行线性优化。本质上，该模型根据所提供的技术、经济假设和约束，为所代表的能源系统找到最低成本的经济调度和容量扩展解决方案。

OptiFlow¹¹⁰是一个开源时空网络优化模型，可与Balmorel链接。OptiFlow使用节点弧关系来表示能量、质量、经济或环境指标流。在这项研究中，绿氢和绿氨的生产、储存、运输和使用是利用与Balmorel相连接的OptiFlow模型，并基于其他领域所使用的配置来建模的^{111,112}，如图24所示。

⁹⁵ Abhyankar, N. et al. (2021) Least-Cost Pathway for India’s Power System Investments through 2030. Technical Report, Lawrence Berkeley National Laboratory.

⁹⁶ Palchak, D. et al. (2017) Greening the Grid: Pathways to Integrate 175 Gigawatts of Renewable Energy into India’s Electric Grid. Vol. I – national study.

⁹⁷ Palchak, D. et al. (2019). India 2030 Wind and Solar Integration Study: Interim Report, Technical Report NREL/TP-6A20-73854, National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73854.pdf>

⁹⁸ Spencer, T. et al. (2020). Renewable Power Pathways: Modelling the Integration of Wind and Solar in India by 2030. TERI Discussion Paper. The Energy and Resources Institute. URL: <https://www.teriin.org/sites/default/files/2020-07/Renewable-Power-Pathways-Report.pdf>.

⁹⁹ CEA. (2020). Report on Optimal Generation Capacity Mix for 2029-30. Technical Report. Central Electricity Authority. URL: https://cea.nic.in/old/reports/others/planning/irp/Optimal_mix_report_2029-30_FINAL.pdf

¹⁰⁰ IEA. (2021). Renewables Integration in India, Technical Report. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-integration-in-india>.

¹⁰¹ Chernyakhovskiy, I. et al. (2021). Energy Storage in South Asia: Understanding the Role of Grid-Connected Energy Storage in South Asia’s Power Sector Transformation. Technical Report, National Renewable Energy Lab (US).

¹⁰² IEA. (2021). India Energy Outlook 2021. Technical Report, International Energy Agency. doi:10.1787/ec2fd78d-en.

¹⁰³ Lu, T. et al. (2020). India’s Potential for Integrating Solar and On and Offshore Wind Power into its Energy System. Nature communications 11 (2020) 1-10.

¹⁰⁴ Indian Ministry of External Affairs (2021) National Statement by Prime Minister Shri Narendra Modi at COP26 Summit in Glasgow.

¹⁰⁵ Ministry of New and Renewable Energy, Budget 2021-22 augments Capital of SECI and IREDA to promote development of RE sector. National Hydrogen Mission proposed, 2021.

¹⁰⁶ Pekic, Sanja. (2022). ‘India’s Avaada to Set up Green Ammonia Facility in Rajasthan’. Offshore Energy, 29 Aug. 2022, <https://www.offshore-energy.biz/indias-avaada-to-set-up-green-ammonia-facility-in-rajasthan/>.¹⁰⁷ Way, R. et al. (2021). Empirically Grounded Technology Forecasts and the Energy Transition, Technical Report INET Oxford Working Paper No. 2021-01, Oxford Institute of New Economic Thinking (INET), 2021. URL: https://www.inet.ox.ac.uk/files/energy_transition_paper-INET-working-paper.pdf.

¹⁰⁷ Way, R. et al. (2021). Empirically Grounded Technology Forecasts and the Energy Transition, Technical Report INET Oxford Working Paper No. 2021-01, Oxford Institute of New Economic Thinking (INET), 2021. URL: https://www.inet.ox.ac.uk/files/energy_transition_paper-INET-working-paper.pdf.

¹⁰⁸ Wiese, F. et al. (2018). Balmorel Open Source Energy System Model. Energy Strategy Reviews 20: 26-34. ISSN: 2211-467X. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X18300038>

¹⁰⁹ Energy Research Institute of Academy of Macroeconomic Research/NDRC, China National Renewable Energy Centre. Ea Energy Analyses and the Danish Energy Agency (2020). China Renewable Energy Outlook 2020 tech. rep. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/creo_2020_executive_summary.pdf

¹¹⁰ Ravn, H. (2017). The OptiFlow Model Structure Technical. <http://www.balmorel.com/images/downloads/optiflowdocumentation20170909.pdf> (2021).

¹¹¹ Bramstoft, R. et al. (2020). Modelling of Renewable Gas and Renewable Liquid Fuels in Future Integrated Energy Systems. Applied Energy 268: 114869.

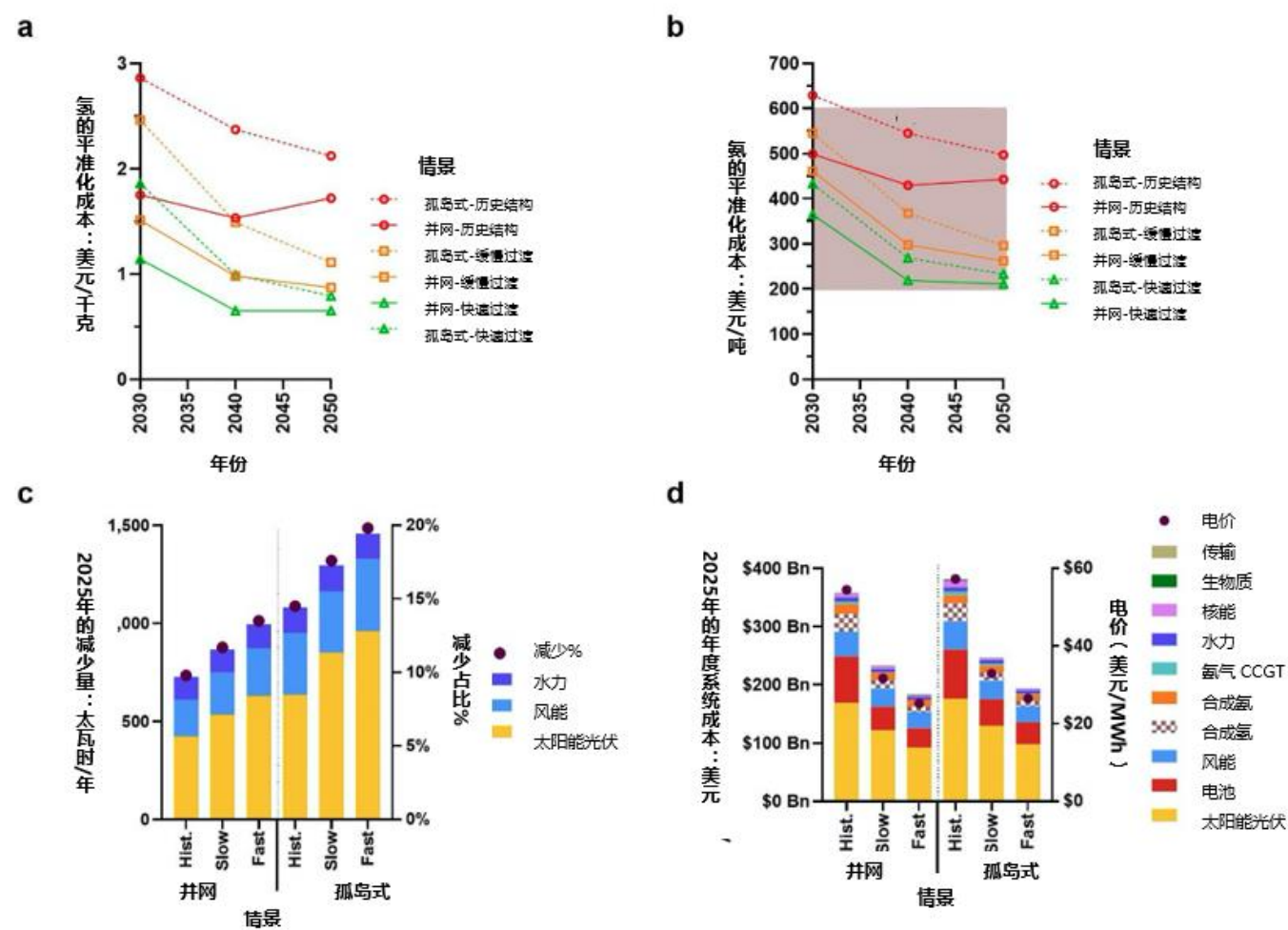
¹¹² Lester, M.S et al. (2020). Analysis on Electrofuels in Future Energy Systems: A 2050 Case Study. Energy 199: 117408.

结果

结果中的一个关键发现是，将氢和氨的生产与电网连接（而非孤立生产场所），具有显著的益处。“孤岛”发电厂独立于电网，并拥有专用的可再生能源，是当前的行业常态和发展轨迹，这需要政策干预来改变。在模拟情景中，电网整合将氢和氨的平准化成本(分别简称为LCOH和LCOA)降低了10-25%(图25a、25b)。LCOH和LCOA的减少是由与

电网连接的电解槽可获得的较低电价推动的，因为电解槽获得了本应被缩减的电力。在孤立生产情景中，2050年印度发电量减少15-20%，而在并网情景中仅减少10-14%（图25c）。从绝对值来看，这将节省350至460太瓦时的电力，到2050年，需要安装的光伏和风能电力将减少200至300吉瓦。

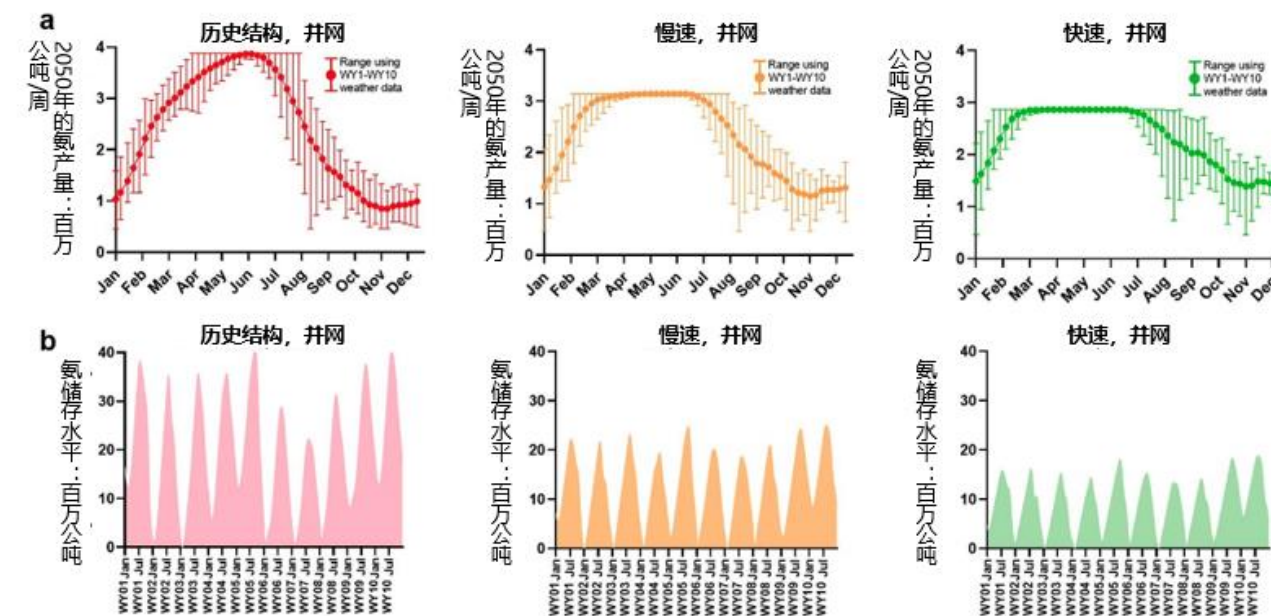
图25：并网和“孤岛”电厂系统情景的关键结果指标。a)2030-2050年情景下的LCOH。b)2030-2050年灰色氨历史商品价格情景下的LCOA(黑海)。c)2050年各种情景下的缩减情况。d)2050年各种情景下的年度系统成本



此外，将庞大的电解槽群连接到电网基础设施中，并转移工业生产的负荷（特别是用于化肥和船舶燃料的绿氨生产），是实现电网降成本、提效益、更可靠的可行策略。这一设想的最低成本系统以季节性模式生产绿氢和绿氨，匹配可再生能源的过剩。多余的绿氨储存在低成本的地上仓库中，然后在绿氢和氨产量较低的季节消耗，用以满足化肥和航运部门的持续需

求，并提供稳定的发电能力。少量的绿氢被储存用于日内负荷转移。这种电力与其他行业的耦合系统配置不仅成本较低，且在不利于可变可再生能源（VRE）的气象年中更具韧性。如十年的天气数据所示。

图26：满足恒定需求的氨生产和储存水平的季节性和年际变化。a)2050年全国范围内并网情景的每周氨产量显示，每周氨产量范围取决于太阳能和风能数据的年份。b)模拟10个气象年（WY1-WY10）的太阳能和风能数据，估算2050年全国范围内的氨储存水平，与2010-2019年相对应



总之，研究结果强调了当前“传统智慧”和政策决策的成本，这种成本正朝着将新兴的氢能和氨能行业从电网中分离的方向发展，如果在设计时考虑到行业耦合，则有机会构建更具韧性、

且成本更低的系统。重要的是，这种成本更低、韧性更强的系统依赖于一种合成氨的灵活工业新范式，这种范式具有大量的氨库存，以及有利的市场和政策措施。



政策相关性

不过，除非在政策的引导下，工业和电网之间的关系打破传统，否则这一系统设计的潜在利益不会实现。对于行业而言，电网连接通常与高电网连接费用和不稳定性相关，这就要求在极端情况下提供现场备用电源和完整的“受控”发电厂。这种历史路径依赖现象在印度非常明显，2019-2020年，商业和工业用户的自备电厂安装了超过78吉瓦的自备发电，占全国发电量的17%。¹¹³这些自备电厂与配电、输电网部分断开或完全断开，避免工业用户支付过去效果不佳且昂贵的费用。

如今，工业电解槽可能会重蹈覆辙，孤岛式系统避免了电网连接费用和其他明显的缺点。然而，基于我们的发现，政策应该引导系统走向一个新的工业-电网关系的范例，在向净零排放的转变中发挥协同作用，使双方受益。作为印度NHM的一部分，最近宣布的政策是电力与其他行业耦合模式迈出的一步。有政策通过免除邦际传输费用和其他激励措施来降低绿色氢和氨工厂的电网成本。¹¹⁴现在，也就是在转变开始时，就要开始探讨这些政策以及进一步的政策和市场机制的适宜性、使其未来朝着一体化的方向发展。

我们的研究结果还在两个方面为政策提供了依据。首先，研究结果为绿氢和绿氨可以显著提高能源安全和减少进口的观点提供了支持。印度NHM明确表示：“这项政策将为印度的普通民众提供清洁燃料，减少对化石燃料的依赖和原油进口。”¹¹⁵事实上，所达到的LCOH和LCOA水平比为印度钢铁和化肥行业进口化石燃料更具竞争力。在化肥

行业，目前印度80%的氨依赖进口：25%至30%的化肥消费来自进口氨(每年耗资逾13亿美元)，超过60%的国产氨是使用进口液化天然气¹¹⁶生产的。对进口的依赖是印度使用绿氨生产国内化肥的一个主要战略原因，此次能源系统模型(EMS)的结果表明，在没有补贴或二氧化碳定价机制的情况下，在短期内是可能实现这一转变的。

其次，研究结果也证明了印度利用贫瘠土地上剩余的VRE产能生产出口燃料的潜力，比如燃料补给。印度的NHM再次明确表示：“我们的目标也是让印度成为绿氢和绿氨的出口中心。”¹¹⁷研究表明，印度确实可以利用VRE资源来生产足够低成本的氨(使用贫瘠和废弃土地分类假设)，例如，到2050年，印度可以轻松满足全球航运燃料需求(世界银行预测)的10%以上。¹¹⁸

除印度之外，其他国家和地区也需要对绿氢、绿氨对负荷转移的潜在作用建模，这些国家和地区在本地VRE供需不匹配上具有独特性，且具有特定国家的电力与其他行业耦合需求。

我们所展示的模式，其真正价值并不是面向2050年能源系统模型(ESM)的精确结果，而是强调杠杆作用或敏感干预点以及系统设计的基础¹¹⁹，这将极大地改变系统转型的最终状态。我们发现，氢和氨如果完全整合，可以成为改善电网的杠杆。我们希望本文的分析能够激励和促进更多的研究团体去扩展不同地区的能源系统模型(ESMs)和相关假设，探究电力与其他行业耦合的潜在影响。

¹¹³ Central Electricity Authority. (2020). Growth of Electricity Sector in India from 1947-2020. Technical Report. URL: https://cea.nic.in/wp-content/uploads/pdm/2020/12/growth_2020.pdf

¹¹⁴ Ministry of Power. (2022). Ministry of Power Notifies Green Hydrogen/Green Ammonia Policy. URL: <https://pib.gov.in/pib.gov.in/Pressreleaseshare.aspx?PRID=1799067>

¹¹⁵ Ministry of Power. (2022). Ministry of Power Notifies Green Hydrogen/Green Ammonia Policy. URL: <https://pib.gov.in/pib.gov.in/Pressreleaseshare.aspx?PRID=1799067>

¹¹⁶ IEA. (2021). India Energy Outlook 2021. Technical Report, International Energy Agency. doi:10.1787/ec2fd78d-en.

¹¹⁷ Ministry of Power. (2022). Ministry of Power Notifies Green Hydrogen/Green Ammonia Policy. URL: <https://pib.gov.in/pib.gov.in/Pressreleaseshare.aspx?PRID=1799067>

¹¹⁸ Englert, D. et al. (2021). The Potential of Zero-Carbon Bunker Fuels in Developing Countries. World Bank Technical Report. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35435>.

¹¹⁹ Farmer, D. et al. (2019). Sensitive Intervention Points in the Post-Carbon Transition. Science 364: 132-134.



案例分析:

最具成本效益的碳定价形式是什么？ 中国（及一般）排放交易和碳税建模

Simon Sharpe (气候支持团队；世界资源研究所)、Huaiyu Wang (北京师范大学)、Jia Liu (北京仁木咨询公司)、Tianyi Wu (北京师范大学)、Zheng Kang (北京师范大学)、Zhangang Han (北京师范大学)、Aled Jones (安格利亚·罗斯金大学)、Davide Natalini(安格利亚·罗斯金大学)、Pete Barbrook-Johnson (牛津大学)

政策问题: 中国最具成本效益的碳定价形式是什么？

地区: 中国

研究方法: 一项系统映射实验（定性）和两个基于主体的模型（定量）。

主要发现: 排放交易计划的设计应避免引入排放的平衡反馈。没有这一点，碳税将更具成本效益。电力行业的竞争，更准确地说，一个清晰的价格信号，是碳定价政策发挥作用的关键。

交流互动: 本案例研究是中国政策团队和分析师、中国学者和英国研究人员长期密切合作的结果。因此，主题、问题和建模部分都是与政策利益相关方密切合作、共同设计的。

摘要: 作者使用定性系统映射的方法，结合两个基于主体的有效定量模型，来探索不同的碳定价方案在中国的有效性。系统映射法展示了排放交易计划应如何引入排放的平衡反馈，放缓进度，基于主体的模型提出税收，或许能以更加有效的方式进行补充。同时，该模型还展示了能源技术之间的竞争对政策有效性的重要性。

介绍

碳定价通常被认为是实现脱碳最有效的政策。EEIST项目之前的报告质疑了这一看法，并指出该提议来自于一种均衡假设，而这种假设似乎与低碳转型的背景不相容，考虑经济中的反馈可能会导致不同的结论。尽管如此，碳定价仍广泛应用：世界银行统计了2022年实施的70项碳定价举措，覆盖了47个国家和36个地方。因此，政府十分关注碳定价形式以及碳定价在何种情况下最有可能有效。如何利用碳定价快速、低成本地推动低碳转型？

碳定价仍然是目前的一个政策问题。欧洲联盟正在考虑扩大其排放交易计划，印度和巴西也在考虑新的计划，中国在2021年就实施了一项国家计划，关于不同定价机制的影响和优点及其与其他政策的相互作用仍有争议。

虽然有多种方法可以引入有效的碳价，如拍卖、影子价格和其他引入间接价格的监管，但大多数碳定价政策可以分为两种：一是碳税，即按照固定税率(可能是恒定的，也可能上下浮动)对排放征税；二是限额交易计划，也称排放交易计划(我们交替使用这两个术语，但主要使用后者)，这一计划要求公司购买在市场上交易的排放配额，供应额度有上限(可能是恒定的，也可能上下浮动)。

一般来说，经济学家认为，两种形式的碳定价基本上是等价的。两者都有望激励企业减少排放，直到边际减排成本等于碳价。从第一个近似值来看，两种碳定价方式激励减排的效果以及减排总成本预计是相当的。一般结论是，两种方式之间的差异在于实施的细节。普遍认为这是一个偏好问题：碳税为碳价水平提供了确定性，对企业有好处，而排放交易计划为排放水平提供了确定性，对政策制定者具有吸引力。

在本案例分析中，我们从不同的角度探讨了何种碳定价方式最具成本效益。由于低碳转型是一个变化的过程，我们不假设均衡。相反，我们采用考虑经济动态的分析工具，来理解不同形式的碳定价(单独实行以及与其他政策相结合)可能产生的影响。

本案例分析包括三个部分。第一部分使用系统映射来建立对经济动态的基本理解，不同的碳定价方法可能会产生或影响经济动态。第二部分使用一个基于主体的模型来探索碳定价的替代方法在假设的电力行业中的有效性，这一电力行业具有一个竞争性的发电市场，如英国或欧洲的电力市场。第三部分使用第二个基于主体的模型来分析中国碳定价政策选择的有效性。在每一部分的最后，我们给出了政策结论。

¹²⁰ <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>

¹²¹ <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>

¹²² Stavins, R. (2019). The Future of U.S. Carbon-Pricing Policy. M-RCBG Faculty Working Paper Series, No. 2019-02. Available online: <https://www.hks.harvard.edu/centers/mrcbg/publications/fwp/2019-02> (Accessed September 10, 2020.)

第一部分：碳定价方案的系统映射

什么是系统映射？

系统映射是一套方法的集合，其中所有的方法都是为了在图和模型中构建系统或系统的某些方面而设计的。¹²³系统映射方法有定性的，如丰富的图片或变革理论图；也有定量的(包含模拟法)，如贝叶斯网络或系统动力学。多数(非全部)系统映射方法关注系统中的原因和影响，试图描述因果关系。关注原因和影响的方法倾向于使用节点和边的网络来表示变量或因素之间的影响。

在本案例分析中，我们使用了一种称为“因果循环图”的系统映射方法。该方法可由个体研究人员使用，也可以与利益相关者团体一起构建，生成围绕核心反馈组织的图，有时也称为“系统引擎”。有两种类型：强化反馈，其中一个变量的增加导致同一变量的进一步增加，倾向于放大影响或加速变化；平衡反馈，其中一个变量的增加导致同一个变量的减少，倾向于限制变化或保持稳定。

在某些情况下，因果循环图是建立系统动力学模拟模型的第一步（并不总是如此）。有的情况下，需要为因果循环图制作“随时间变化的行为”（BOT）图，描述随时间变化的预期反馈行为。虽然看起来像定量图，但是这些图完全基于我们对反馈相互作用方式的定性预期，而不是任何定量分析的结果。

系统图是如何构建的？

为了比较碳定价政策选项的动态效果，我们使 Meadows（2008）开发的方法进行了系统思考和射。¹²⁴这项工作的重点是使用系统映射来确定相关济系统中的反馈——电力行业、电力技术和碳定价

政策——对快速、经济脱碳具有助力或阻碍作用。

上述系统图是基于文献综述、专家意见和利益相关者的讨论绘制而成的。我们有意将系统图简化，是为了关注系统中心的反馈，而非引入大量广泛的信息。虽然没有经过正式验证，但其中几乎所有的关系在逻辑上都是正确的(例如，如果一项技术的成本下降，其相对于竞争对手的成本也必然下降)，其余的则得到公认概念的支持(如技术的部署往往会压低其价格——莱特定律)。

不同碳定价机制的系统图

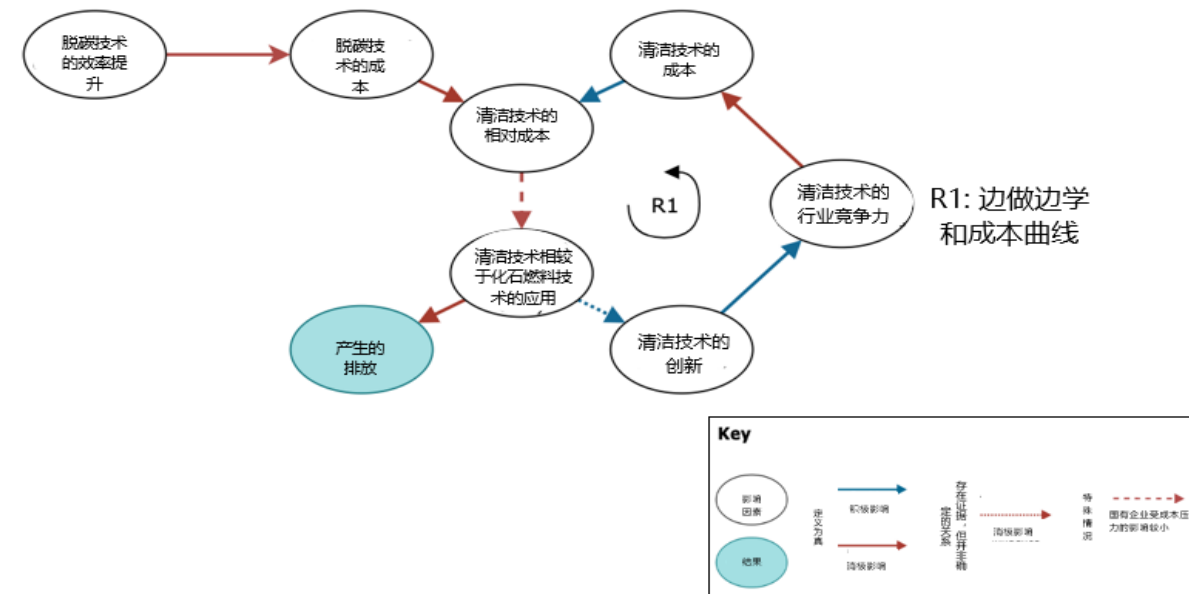
我们设计了五种碳定价政策情景的系统地图：(i)无干预，(ii)碳税，(iii)ETS，(iv)可再生能源组合标准，以及(v)这些政策的组合。这里我们只描述前三种。

没有政策干预和“边做边学”

“无干预”系统图(图27)强调莱特定律中“边做边学”所产生的强大反馈，即一项技术的部署往往会为该技术带来学习和创新，从而降低成本。这反过来使得该技术相对便宜，从而增加了进一步部署的可能性。这是一个有据可查的强化反馈，推动了清洁技术的应用并降低了排放。¹²⁵

除了这一反馈，“无干预”系统图还显示了另一项政策的效果：推动化石燃料技术提高效率。这可以减少化石燃料发电厂的排放，但可能降低这些技术的总电力成本，使其与清洁技术相比更具竞争力，因此有可能削弱清洁技术部署和成本降低的强化反馈，除非有其他政策予以抵消。

图27：“无干预”系统图——清洁技术以往的部署促进了“边做边学”，降低了成本，从而鼓励了更广泛的部署，这反过来又进一步支持了强化反馈中的“边做边学”(R1)。注意：积极和消极影响指的是数学关系，而不是规范关系（“积极”表示变化相同，同增同减，而不是指影响是积极、可取的）

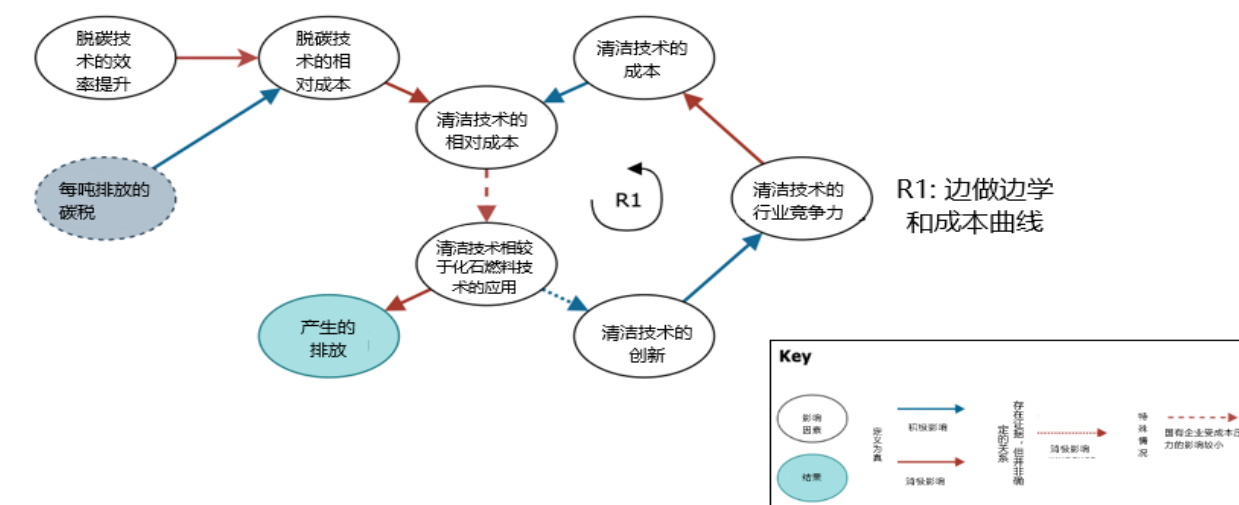


Carbon tax

图28是碳定价政策干预的第一张系统图：碳税。这张图中增加了一个直接影响碳技术成本的政策因素，我们看到了同样的“边做边学”强化反馈。可以清楚地看到，增加碳税加强了现有的反馈回路，而没有任何其他影响。在其他条件等同的情况下，我们预计这将加速清洁技术的部署，降低成本。

在这个例子中，没有涉及税收收入的使用。然而，如果想加入碳税收入的利用，可以通过增加基于排放的收入因子来实现，并将其应用到清洁技术的成本（代表技术部署的补贴）或清洁技术的创新（代表研发投入）。无论哪种情况，此举都将通过降低清洁技术的相对成本，或增加清洁技术创新，进一步强化清洁技术部署和成本降低的反馈。

图28：碳税——碳税增加了碳技术的成本，降低了清洁技术的相对成本，加强了“边做边学”的强化反馈（R1）



¹²³ Barbrook-Johnson, P. and Penn, A. (2022) Systems Mapping: How to Build and Use Causal Models of Systems. Palgrave.

¹²⁴ Meadows, D. (2008). Thinking in Systems: A primer. Chelsea Green, White River Junction.

¹²⁵ Way, R. et al. (2022). Empirically Grounded Technology Forecasts and the Energy Transition. Joule 6(9): 2057-2082. Note, this work also appears in this report as a case study.

排放交易计划

下一个系统图描绘了不同的情况，图29采用了相同的图，但用于标准ETS。此图中，图的结构随着平衡反馈的引入而变化（当一个变化引发了某种结果，而该结果逆转了这一变化时，以自我调节的方式起作用）。这种平衡反馈的逻辑是，随着排放量的下降，对配额的需求也会下降，因此配额价格也会降低(因为配额的供应是由上限决定的)，这将降低脱碳技术的总成本，从而增加清洁技术的相对成本，并降低进一步部署的可能性。此种平衡反馈抵消了强化反馈的效果，限制了碳价对清洁技术加快部署和降低成本的促进作用。

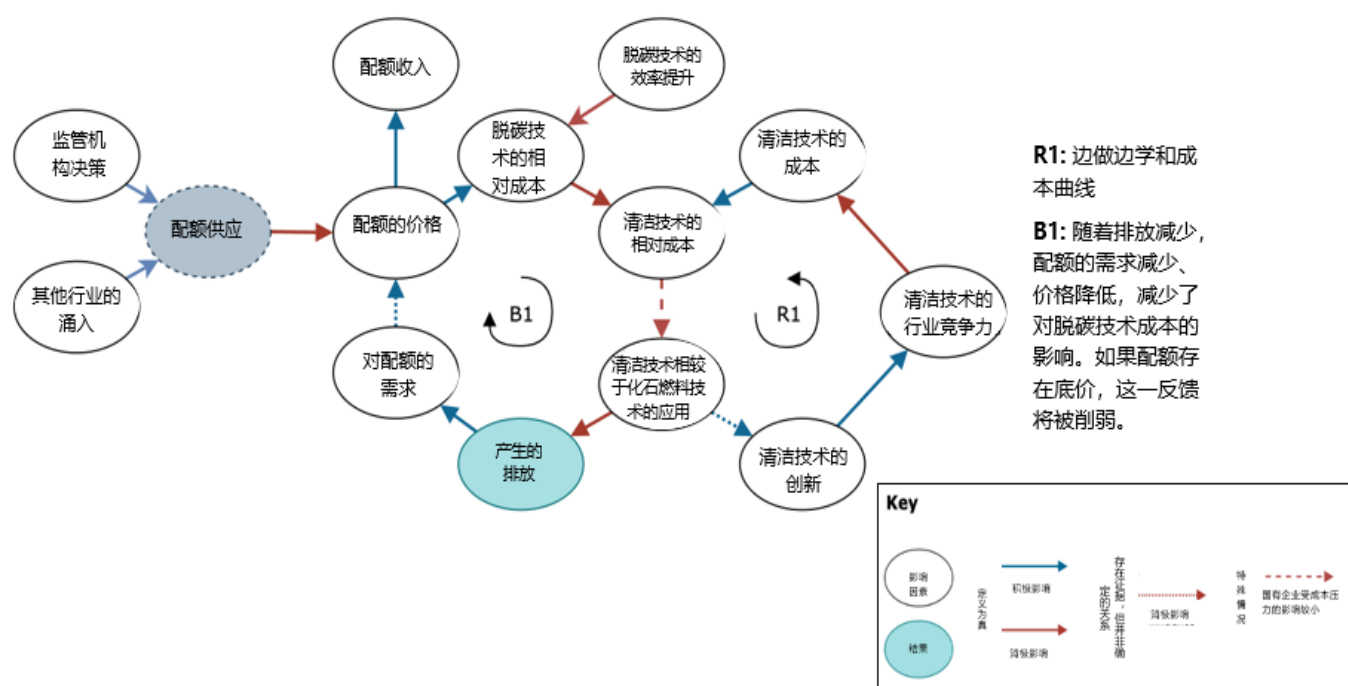
平衡反馈的逻辑相对清晰，但是有不少政策选择会影响其效果。如果排放上限随着时间的推移而迅速下降，那么在需求减少的同时，配额的供应也会减少，配额证价格有可能上涨或下跌。下降的限度将确保一定水平的清洁技术部署；然而，平衡反馈将继续发挥作用：不论哪一方导致的减排都会减少对

配额的需求，并减少其他方减排的动力。此种相互作用的方式导致该政策的效果会受到政策本身的限制。

另一个政策选择是为配额设立底价，也就是说，配额价格不能低于某一水平。此举将通过限制平衡反馈的操作范围来改变各因素相互作用的方式。有了足够高的底价，平衡反馈可以完全停止，使政策具有与税收相同的动态特征。

同样，此图中没有考虑收入的使用，但可以通过将配额收入的环路连接加入到清洁技术成本(代表补贴)或创新(代表研发投入)中来体现，如上文针对税收的内容所述。这两者都将加强清洁技术部署和降低成本的反馈；但该影响会在某种程度上被排放交易系统的平衡反馈所抵消，额外影响也因此变得不确定。

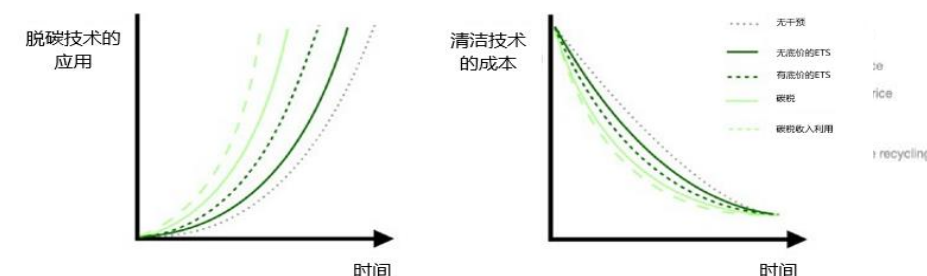
图29: ETS——该计划支持“边做边学”(R1)的强化反馈，但也引入了平衡反馈。随着排放量的下降，对配额的需求减少，有助于降低碳价对脱碳技术成本的影响(B1)



“随时间变化的行为” (BOT) 图

虽然在上方的系统图中，政策选择对能源系统动态的潜在影响更加清晰，但并没有完全解释我们预期系统行为会如何随着时间的推移而发展。为此，我们设计了“无干预”、税收和ETS情景下的清洁技术部署和清洁技术成本的BOT图表，包括两个税收情景（一个无收入利用，一个有收入利用；两个ETS情景（一个有底价，一个无底价），如图30所示。BOT图表说明，存在一种潜在的强化反馈：增加清洁技术的部署并降低其成本。“无干预”曲线显示带来的部署加速。（注意，我们只展示

图30: 税收和排放交易情景下清洁技术部署和成本的BOT图



系统映射工作的政策结论

系统映射工作得出的最重要结论是，这两种政策选择在各自相互作用的方式上具有根本的差异性。碳税不会产生新的反馈，但会加强清洁技术部署和成本降低的强化反馈。ETS创造了一个平衡的反馈，因此加强清洁技术的强化反馈幅度较小。在不考虑其他因素的情况下，这表明碳税可能是更具成本效益的政策，因为碳税不会造成自我限制。以下几个问题对政策选择的相对有效性也很重要：

- **政策力度：**在系统映射过程中，为了比较两种政策的作用方式，我们假设它们的实施力度相等。在实践中，一项政策的有效性将取决于实施的严格程度及其动态结构。碳税的实施力度较弱，使化石燃料成为最具竞争力的选择，因此对加强清洁技术部署和成本降低的反馈作用微乎其微。虽然快速下降的碳排放交易限额会产生平衡反馈，但也可能会加速减排(不一定是最具成本效益的方式)。
- **政策修改：**系统映射表明，碳排放交易体系中的碳底价可以限制平衡反馈的影响范围，改善政策的动态。但是，由于强有力的底价，

了S形曲线的早期部分；如果进一步遵循“无干预”曲线，预计部署会在某个时候趋于平稳。）税收和ETS情景都加强了此种强化反馈，因此曲线向左移动，代表部署进度加快。税收的收入利用计划进一步强化了这一作用方式。然而，由ETS产生的平衡反馈限制了它的效果，因此部署增加的程度较小。在实行底价的情况下，ETS的弊端减少了。清洁技术成本图也呈现了同样的情况，在税收情景下，成本下降得更快，在没有底价的排放交易体系下(干预措施)成本下降得最慢。

该计划的实施方式更像税收，这就引出了一个问题，即如果ETS以同样的方式运行，但其设计更加复杂，而管理负担更重，为什么会更可取。税收利用似乎有可能增加碳税的有效性，但是，与ETS一起使用时，额外的效果就不那么确定了。

- **市场设计：**在系统映射的工作中，我们假设电力市场中清洁技术和化石燃料技术之间存在竞争。清洁技术的相对成本和清洁技术部署之间的关联取决于能源公司根据价格信号来选择技术的行为。在此种情况不发生的市场中（可能是因为监管结构，也可能是因为驱动能源公司决策的其他目标和约束，两者的关联可能会更弱，甚至不存在。如果此种联系不存在，任何形式的碳税都很难产生效果，如果排放交易体系产生效果，很可能以类似监管的方式发挥作用(其效果与价格无关)。

前述两种政策的相对优势还可能取决于其它结果或影响因素。例如，这两种政策对电价的影响，对新发电容量投资的促进作用，或是政治、工业和社会利益相关者的接受程度。

第二部分：在竞争市场中使用基于主体的模型来模拟碳定价政策选择

在这个实验中，我们使用的是Chappin设计的ABM模型，还是对碳税和ETS这两种政策进行比较。这是一种不同的补充方法。在系统映射中，通过映射变量之间的关系（基于逻辑推理或潜在证据）、识别反馈来理解系统的动态。在ABM中，系统的动态是通过模拟经济主体之间的相互作用来发现的，其中每个主体的行为都是由一组假定的决策规则驱动的。这些方法之间存在差异，在应用于相同的政策问题时可以提供有益的交叉引用。

基于主体的模型设计

我们使用的ABM模型再造了一个由10家公司组成的抽象封闭电力市场，其中，各公司为需求趋势曲线上的消费者提供电力，消费者数量不明。所有电力需求都由这个市场内的供应满足，可以将这个市场想象成一个孤立国家或整个世界的程式化版本（即市场外没有交易）。公司可以使用四种技术来发电：煤、天然气、风能和太阳能光伏。该模型运行的三种情景：

- 1) 无政策，即不实施任何政策，公司继续沿着“一劳永逸”的轨迹进行生产和投资(BAU)。
- 2) 排放交易计划情景，引入基于欧盟排放交易计划的政策。
- 3) 税收情景，其中引入碳税(假设该税以统一税率引入，且市场假设其在规划期内保持该税率)。

该模型有部分以实证为基础，表明引入模型的部分数据以及所使用的参数来自从可用文献中收集的真实数据。定义不同发电技术成本的参数，以及这些技术成本随着模型中的部署而下降的速率取自Mercure（2012年），¹²⁷用于模拟ETS情景中排放上限的下降速率取自欧盟碳排放计划的实际实施效果。¹²⁸

该模型模拟了一个竞争性的电力市场，首先出售最便宜的电力，然后出售价格更高的电力，直到供应满足需求。需求是由外部因素决定的，假设每年增长5%。假定电力需求总是得到满足，电力供应也基于此进行定义。任何剩余的发电能力都没有得到利用。电价是由边际单位供应成本决定的。每单位供应的成本为电力的平准化成本，包括资本成本(折旧)、运行成本(燃料和维护)以及碳定价成本。

模型中的行为主体是能源公司，它们决定在新发电技术部署中的投资选择、投资时间以及投资金额。每家公司都可以从以下发电技术中选择：煤、天然气、风能和太阳能。各公司都从这些技术的不同组合开始，对未来有不同的预期。公司可以预测未来一年和七年内市场价格、投资成本和政策相关变量(即配额价格或税收)的趋势，据此预测利润。然后，各公司根据定义其预期的不同标准来决定投资哪种技术，这些标准包括对市场领导地位的态度（积极尝试增加市场份额）、对技术的预期（认为市场将青睐可再生能源，因此其成本将快速下降）、公司偏好（公司是否更看好可再生能源，这一点受其自身的历史经验或投资者压力的影响），以及对政策有效性的看法（公司对排放交易计划中配额价格增长速度的看法）。详见Sharpe等人即将发表的文章。¹²⁹由于企业的目标是实现利润最大化，因此它们的决策是预期回报和资本约束的函数。

该模型可以在两种管理创新的环境下运行。在“外生”环境中，清洁技术的成本随着时间的推移而降低，遵循基于历史数据的摩尔定律关系。可以认为，这代表了一个规模太小、无法对清洁技术成本产生显著影响的市场（一种简化的看法；实际上，即使核心技术成本不受影响，安装和融资成本等因素很可能会受到当地政策的影响）。在“内生”环境中，清洁技术的成本随着累积部署而降低，遵循基于历史数据的莱特定律关系。可以认为，这代表了全球市场，所有的清洁技术创新都发生在这个市场的范围内。

该模型可以在两种管理创新的环境下运行。在“外生”环境中，清洁技术的成本随着时间的推移而降低，遵循基于历史数据的摩尔定律关系。可以认为，这代表了一个规模太小、无法对清洁技术成本产生显著影响的市场（一种简化的看法；实际上，即使核心技术成本不受影响，安装和融资成本等因素很可能会受到当地政策的影响）。在“内生”环境中，清洁技术的成本随着累积部署而降低，遵循基于历史数据的莱特定律关系。可以认为，这代表了全球市场，所有的清洁技术创新都发生在这个市场的范围内。

该模型由一系列数值基于假设或实证文献的参数初始化。根据既定的模型开发技术，我们在一些参数和变量的初始化值中引入了随机性，这些参数和变量的值并不完全确定(尤其是在它们与行为反应相关的情况下)，允许出现紧急行为。然后，可以将多次运行的结果进行比较，给出总体平均值，确保结果不受特定变量选择的影响。此外，

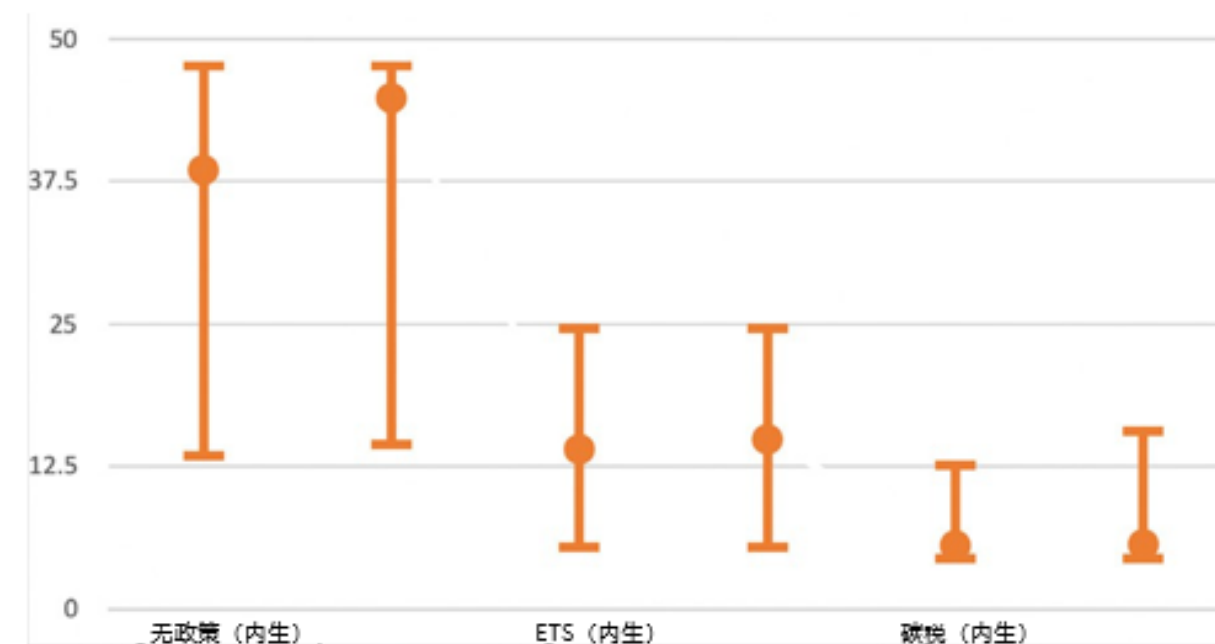
我们进一步使用一些变量的取值范围，其中典型的范围是已知的，用以测试对这些变化的输出敏感性。

结果

在模拟过程中，我们调查了各政策在减少排放方面的有效性。我们还将其与无政策选项进行了比较。我们在模型的两种创新设定（内生和外生）下进行了比较。为了确保两种政策比较的公平性，碳税是通过计算ETS模拟运行的平均碳成本来设定的（因此每次模拟的平均碳成本是相同的）。例如，如果内生情景下碳排放交易计划支付的（平均）碳价为68欧元/吨，那么内生情景的碳税就设定在这一水平。

相关的输出变量是排放达到零所需的时间，以及运行期间的总排放量。图31和表9对结果进行了总结。

图31：模拟情景中达到零排放的时间(显示最小值、最大值和平均值)(单位：年)。水平条表示每个场景中多个模型的平均值



¹²⁶ 126 Chappin, E. (2011). Simulating Energy Transitions. Next Generation Infrastructures Foundation, Delft, The Netherlands. Available online: <http://chappin.com/ChappinEIJL-PhDthesis.pdf>

¹²⁷ Mercure, J-F. (2012). FTTPower: A Global Model of the Power Sector with Induced Technological Change and Natural Resource Depletion. Energy Policy 48: 799-811. Note: Values have been converted from \$ to € for consistency for all four technologies (based on 2020 exchange rate). Due to the age of the paper (2012), the parameters related to current cost of renewables were outdated. Therefore, these were cross-checked with current values associated with the trend's position on the cost curves.

¹²⁸ EU. (2013). The EU Emissions Trading System (EU ETS). https://ec.europa.eu/clima/sites/default/files/factsheet_ets_en.pdf

¹²⁹ Sharpe, S. et al. (Forthcoming). Stuck in First Gear: Why Cap and Trade Causes Decarbonization at Maximum Cost.

表9：达到零排放前的累积排放量(范围)(二氧化碳，单位：吨)

情景		最小值	中间值	平均值	最大值
内生情景	无政策	290万	1.61亿	3.32亿	19亿
	排放交易计划	300万	2680万	2920万	1.3亿
	碳税	300万	860万	840万	2580万
外生情景s	无政策	300万	2.13亿	4.13亿	19亿
	排放交易计划	310万	2810万	3020万	1.38亿
	碳税	310万	860万	850万	2630万

可以看出，碳税在减排方面的效果优于ETS。在平均碳价相同的情况下，ETS下达到零排放的平均时间大约是碳税体系下的三倍。ETS下的累计排放量也比碳税下的高三倍以上。上述比率在内生和外生的创新设定下大致相同，说明两种政策之间的效果差异可能是独立于市场规模的。

讨论

上述发现支持了系统映射实验的主要结论：碳税在动态上优于ETS。ETS的性能受到其平衡反馈的限制；没有这种限制，税收可以推动快速转型。

该模型中呈现的情景结果是由不同主体之间的相互作用而驱动的，其中主体对技术成本和(ETS情景中)配额价格有不同的未来预期。在该模型中，有可再生能源技术成本未来预期范围和未来配额价格。(由于税收是固定的，所有行为主体对税收情景下的碳价都有相同的正确预期)。没有一家公司有完美的远见，所以尽管平均来说他们的预期可能与实际发生的情况一致，但单独而言，他们的预期会有差异。这些结果取决于行为主体预期的差异程度，在税收方案中，强化反馈为早期投资带来回报，而在ETS方案中，平衡反馈抵消这一影响并延迟了这种投资。

值得注意的是，以上结果受制于本案例分析第一部分末尾提到的警示：政策力度、政策修改和市场设计都会影响碳税或ETS的相对有效性。在这项研究中，为了在替代方案之间进行清楚比较，

我们假设在政策的生命周期中没有政策调整。实际上，政策的修改当然可以在政策的实施过程中进行，也可以在政策的设计过程中进行。

第三部分：基于主体的模型，模拟中国电力行业碳定价政策选择

在案例分析的最后一部分，我们设计了一个基于主体的模型来比较中国的碳定价政策选择，中国的电力市场结构与第二部分模型所模拟的竞争市场有很大不同。

中国碳定价的背景和历史

中国很早就开始利用计划、监管和其他“命令和控制”手段来实现国家政策目标。中国在2020年前的“国家适当减缓行动”以及2030年前的“国家自主贡献”中概述的气候变化减排目标也不例外。然而，自“十一五计划”（2006-2010年）以及2030年前的“国家自主贡献”中概述的气候变化减排目标也不例外。然而，自“十一五计划”（2006-2010年）以来，就有呼声呼吁使用“基于市场的”工具。

经过几年的准备工作，区域ETS试点于2013年启动，全国碳市场于2021年7月正式启动。目前，上述市场仅涉及占中国二氧化碳排放量40%以上的电力行业。市场的设计在两个重要方面与欧盟有所不同。首先，没有“硬性总量控制”，即排放配额的供应随着时间的推移而线性减少。相反，每年的排放

配额供应量是“基准”排放强度和总发电量的函数。第二，排放配额被免费分配给每个发电厂(基于其自身的发电量，乘以基准排放强度)，而不是通过拍卖的方式来分配。在欧盟排放交易体系中，基准水平设定在市场上效率排在前10%的燃煤电厂，相比之下，中国的计划相对保守，基准设定在效率为前50%至60%左右的发电厂，以避免配额供需之间出现缺口。在初级阶段，这是可以理解的。

国家碳市场的进展是积极的（MEE，2022年），¹³¹但也有人认为，该政策更多地刺激了化石燃料发电厂之间的竞争(提高效率)，而非促进可再生能源技术的应用（IEA，2022年）。¹³²因此，关于如何改革碳市场，以及征收碳税是否会有更好的效果，仍存在争议。

以往的研究

多数研究在应用背景下对这两种碳定价工具进行了比较。有的研究侧重于具体问题，如政策效率、成本效

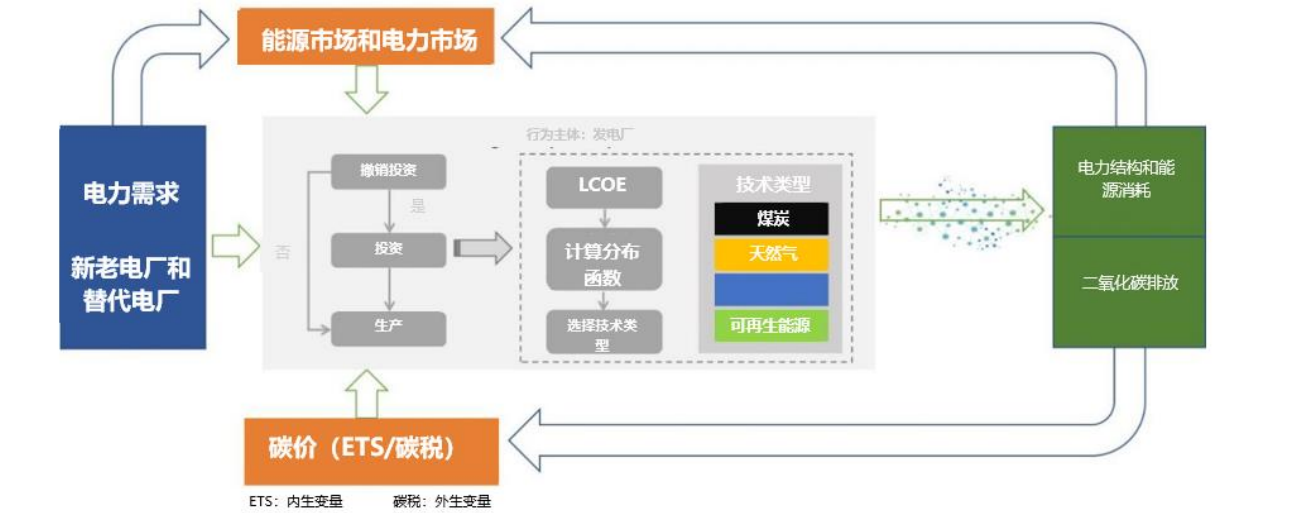
益、体制可行性或分配影响，^{133,134}而其他研究则使用建模方法，如均衡模型、成本优化模型，来评估政策选择。^{135,136,137}

在中国，有一些碳税相关的研究使用ABM模型来分析此种ETS设计，^{138,139}国际能源署(IEA)和清华大学也在这方面做了一些工作。然而，这些研究一次只关注一种政策选择，并且不比较税收和ETS。

中国背景下基于主体的模型设计

该模型的结构如图32所示。该模型模拟了代表单个发电厂的行为主体决策。(这是与第二部分中所涉及模型的一个重要区别，在第二部分中，行为主体是指公司，这些公司投资了使用不同技术的电厂组合) 每年，行为主体需作出决定：继续运营原先的发电厂，还是停止运营、投资一个新的发电厂。如果电力需求超过供给，新的行为主体就会进入市场。当某个行为主体进入市场或投资一个新的发电厂时，可以在煤炭、天然气、生物质能、核能、水力、太阳能、陆上风能和海上风能技术之间进行选择。

图32：ABM -电力过渡模型示意图



¹³¹ Ministry of Ecology and Environment. (2022). Annual report on China's policy and actions to address climate change. Available at: <https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqbh/syqhbh/202210/W020221027551216559294.pdf> [Accessed October 27, 2022].

¹³² IEA. (2021). The Role of China's ETS in Power Sector Decarbonisation. https://iea.blob.core.windows.net/assets/61d5f58d-4702-42bd-a6b6-59be3008ecc9/The_Role_of_China_ETS_in_Power_Sector_Decarbonisation.pdf

¹³³ Stavins, R. (2019). The Future of U.S. Carbon-Pricing Policy. M-RCBG Faculty Working Paper Series. Available online: <https://www.hks.harvard.edu/centers/mrcbg/publications/fwp/2019-02> (Accessed September 10, 2020.)

¹³⁴ Mathur, A. and Morris, A. (2014). Distributional Effects of a Carbon Tax in Broader U.S. Fiscal Reform. Energy Policy 66: 326-334.

¹³⁵ Fan X. et al. (2022). Is Price Commitment a Better Solution to Control Carbon Emissions and Promote Technology Investment? Management Science. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2022.4365>

¹³⁶ Hagmann, D et al. (2019). Nudging Out Support for a Carbon Tax. Nat. Clim. Chang. 9: 484-489.

¹³⁷ Li, W. et al. (2018). The Impact on Electric Power Industry under the Implementation of National Carbon Trading Market in China: A dynamic CGE analysis. Journal of Cleaner Production 200: 511-523.

¹³⁸ Maosheng, D. and Wang, B. (2022). Consignment Auctions of Emissions Trading Systems: An Agent-Based Approach Based on China's Practice. Energy Economics 112: 106187.

¹³⁹ Tang, L. et al. (2015). Carbon Emissions Trading Scheme Exploration in China: A multi-agent-based model. Energy Policy. 81: 152-169.

¹⁴⁰ <https://www.iea.org/reports/enhancing-chinas-ets-for-carbon-neutrality-focus-on-power-sector>

行为主体基于自身的盈利能力决定运营或关闭现有工厂。如果工厂盈利，行为主体会继续经营。行为主体的理性是有限的，而不是完美的远见，所以他们的决策是概率性的。如果一个工厂无利可图，那么亏损期越长，行为主体决定关停的可能性就越大。

行为主体在对新电厂所使用的技术进行决策时，会基于不同技术的预期盈利能力（利用LCOE计算得出）。这一决策同样是概率性的。行为主体的风险偏好各不相同：有些人厌恶风险，更倾向于坚持他们现有的技术(通常是煤炭)，而另一些人即使在成本更高的情况下也更愿意尝试新技术。有关更多详细信息，请参见附录。

该模型中首个决策规则的一个重要方面在于，对于选择继续运营工厂的行为主体来说，该电厂只需要当前盈利，而不需要考虑使用不同技术的替代电厂未来是否更有可能盈利。这表明现有发电厂的存量存在明显的惯性，技术之间的激烈竞争只适用于新发电厂的投资。我们将此作为中国电力市场实际情况的粗略代表，在中国，尽管替代方案更加有利可图，一些大型电力公司的利益往往与继续运营现有燃煤电厂相一致。对维持供电安全的关注(煤电被视为安全的选择)是现有发电厂不愿使用替代技术的一个重要因素。另一个可能的原因在于，与使用不同的技术取代煤电厂相比，提高煤电效率的风险和难度相对较低。

电力需求对于此模型来说是外生的变量，我们假设电力需求随着时间的推移而增加。行为主体的决策共同决定了发电技术组合，因此也决定了总排放量。

起初，该模型研究了14960个发电厂，包括化石燃料发电厂(其中约3000个纳入ETS中)和非化石燃料发电厂，总容量为2200 吉瓦，2020年(第一年)总发电量为7700 太瓦时。第一年的二氧化碳排放量约为4500公吨。电厂的属性包括发电能力、燃料类型、建造年份、寿命、每年平均工作时间、能源效率和排放强度，以上信息都是基于公开的信息来源和相关假设。根据学习曲线，可再生技术的技术进步(以及成本假设)被视为外生变量。基准年的发电能力、发电量和二氧化碳排放分布见附录。

模型中测试了以下政策选项：

- a) 无政策（一切照旧）
- b) 30元/吨二氧化碳(约4.3美元/吨二氧化碳)的碳税。
- c) 50元/吨二氧化碳的碳税(约7.2美元/吨二氧化碳)
注：两个水平的碳税与中国排放交易体系目前产生的平均碳价相似(2021年7月至2021年12月期间为51.20元/吨二氧化碳)。
- d) 设有软性总量控制(使用Zhang等人描述的基准方法，2022)和配额免费分配的排放交易体系。这是最符合中国目前实施的碳定价政策的。
- e) 设有硬性总量控制和配额拍卖分配的ETS（有关模型中拍卖设计的详细信息，请参见附录）。

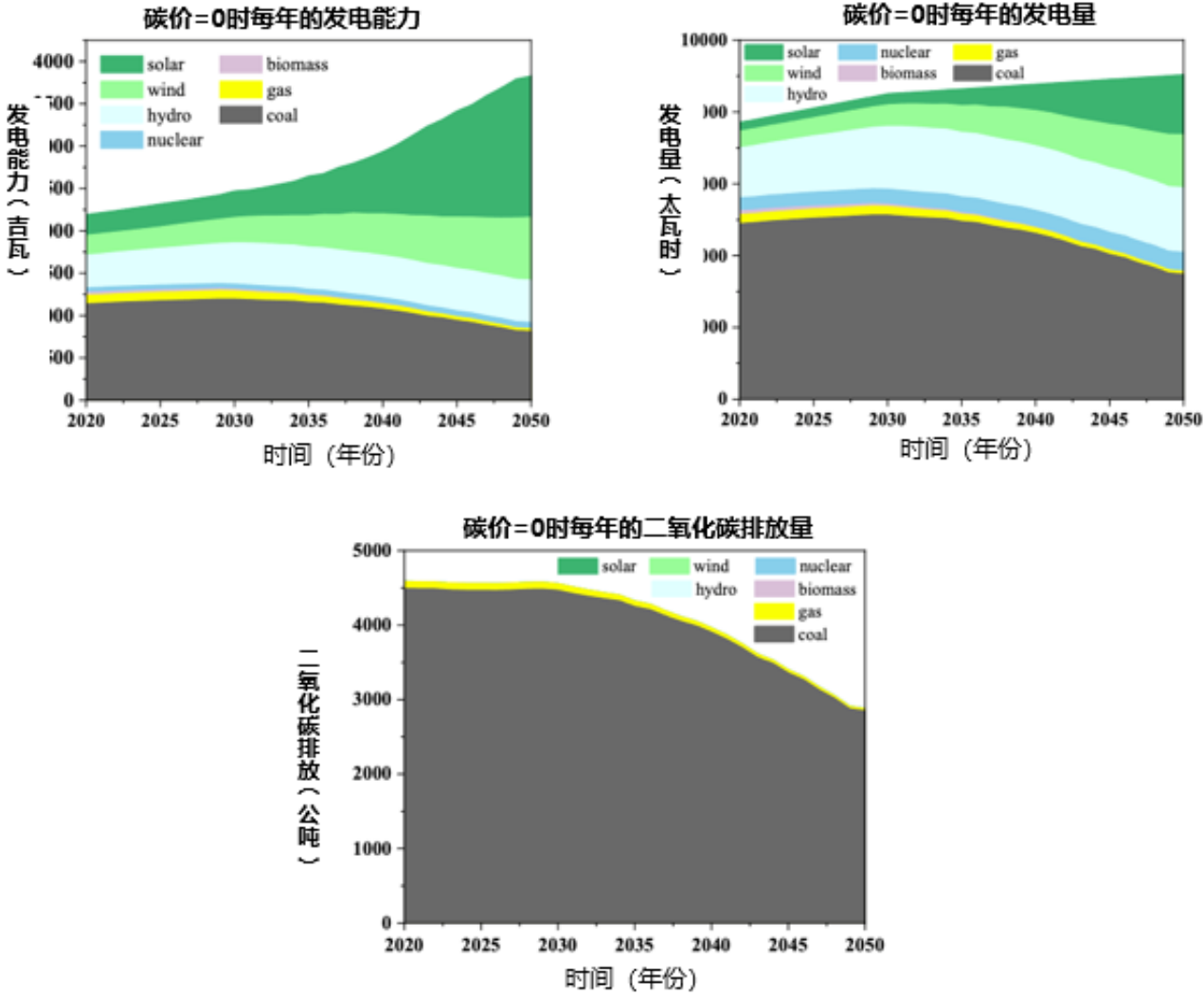
在所有案例中，基准年都是2020年，模型模拟了电力系统到2050年间的演变。

结论和讨论

一切照旧

在BAU的情景中，没有碳定价或其他政策干预。按燃料类型划分的发电能力、发电量和二氧化碳排放量如图33所示。

图33：BAU情景下的技术演变：发电能力(左上)、发电量(右上)、二氧化碳排放量(下)



可以看到，总的趋势是一个缓慢的转型。化石燃料发电能力，尤其是煤炭发电能力，会随着时间的推移而下降，而非化石燃料发电能力会上升。随着新技术的发展，太阳能和风能将占据主导地位，而总发电量将在2030年增长至2500吉瓦，在2050年增长至近4000吉瓦。

由于快速的创新率，太阳能发电发展的转折点是在2035年左右，此后的增长将会加速。煤炭的贡献一般在2030年之前保持稳定，之后开始下降。与2020年相比，到2050年，主要技术在发电能力中所占的份额

将发生显著变化：煤炭的份额从52%降至21%；风能的份额从11%升至19%，太阳能的份额从11%升至44%。燃气发电、水力发电和核能的作用相对来说没有变化。

发电技术组合遵循与装机容量相同的模式，因为模型假设每种技术的负载系数保持不变。二氧化碳排放主要来自煤和天然气发电厂，尤其是煤，在2030年前趋于稳定，然后在2050年大幅下降至3000公吨以下，约为2020年水平的三分之二。

¹⁴¹ The relevant assumption is from Jiang and Chen (2021) where the demand in 2030 and 2050 is up to 8,500 TWh and 9,000 TWh, respectively. These assumptions might be much lower than latest predictions. Jiang K and Chen Y eds. 2021. China Climate and Environment Evolution 3.

碳税

图34显示了低碳税情景(CT-30)下的发电能力、发电量和二氧化碳排放量。图35显示了高碳税情景(CT-50)的相同情况。图35的右下方比较了低水平和高水平碳税以及BAU情景下的排放量。

结果显示，与BAU情景相比，低碳税对加速2030年前的转型影响有限。原因很可能是，这种低税率仅足以推动年限较长且效率较低的燃煤电厂退出市场，而大多数燃煤电厂仍在盈利并继续运营。

随着风能和太阳能成本的下降，低碳税适度增加了这两种发电方式在新产能投资竞争中相对于煤炭的优势，这导致排放量进一步偏离BAU。即便如此，2050年的排放量仍在2500公吨左右，仅比同年BAU的水平低六分之一。

图34: CT-30情景下的技术演变: 发电能力(左上)、发电(右上)、二氧化碳排放(下)

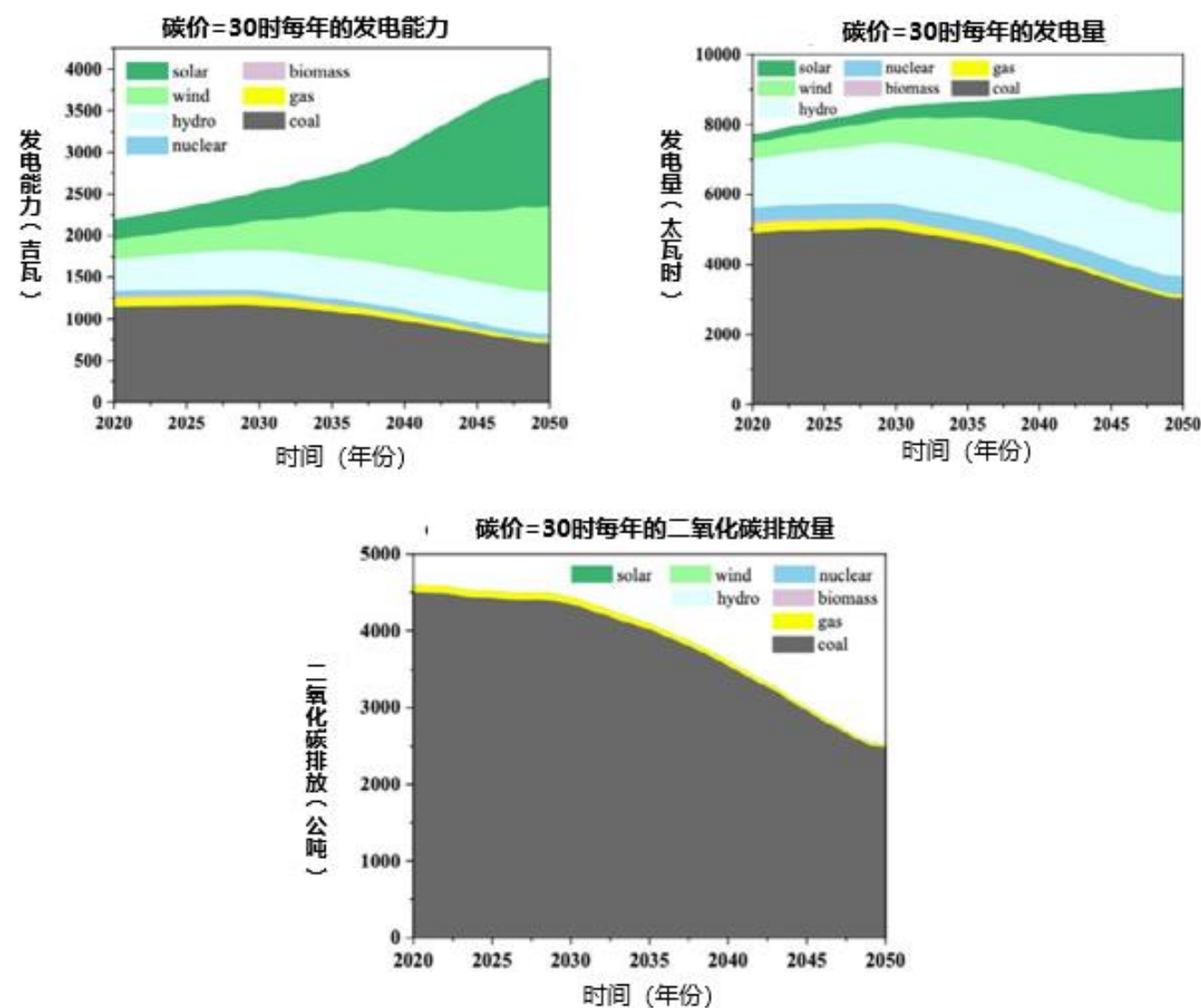
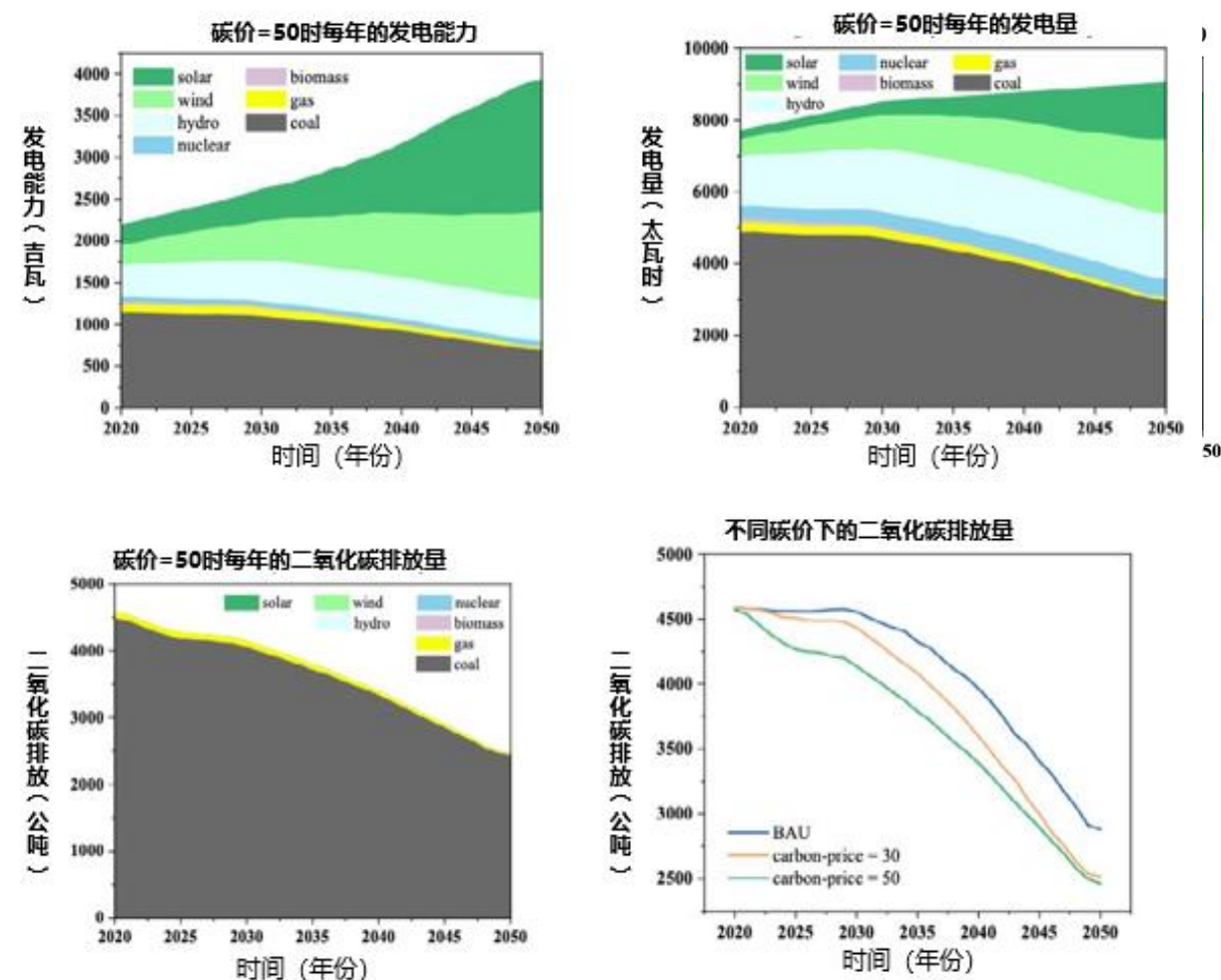


图35: CT-50情景下的技术演变: 发电能力(左上)、发电(右上)和二氧化碳排放(左下); BAU、CT-30和CT-50的二氧化碳排放量比较(右下)



高碳税在头十年的影响更大，2020-2030年间排放量迅速下降，在此期间低碳税的影响很小。然而，高碳税的优势在随后的几年中逐渐减弱，到2050年，其对技术组合和年排放量的影响几乎与低碳税的影响趋同。原因可能是，在转型的后期，太阳能和风能在新的发电能力投资方面已经超过了化石燃料，不再需要碳价的作用。与此同时，即使这种“高”碳税(50人民币或7.2美元/吨二氧化碳)也太低，不足以阻止大多数煤电厂盈利，尽管利润不可避免地缩水；因此，大多数现有的煤炭厂仍继续运行，不受影响。

政策的结论是，在一个现有发电技术之间几乎没有竞争的市场中，只有当碳税高到足以让典型的燃煤电厂无利可图时，碳税才会对排放产生实质性的持续影响。在我们的模拟中，碳税需达到大约120 人民币/吨二氧化碳(或17美元/吨二氧化碳)的水平。

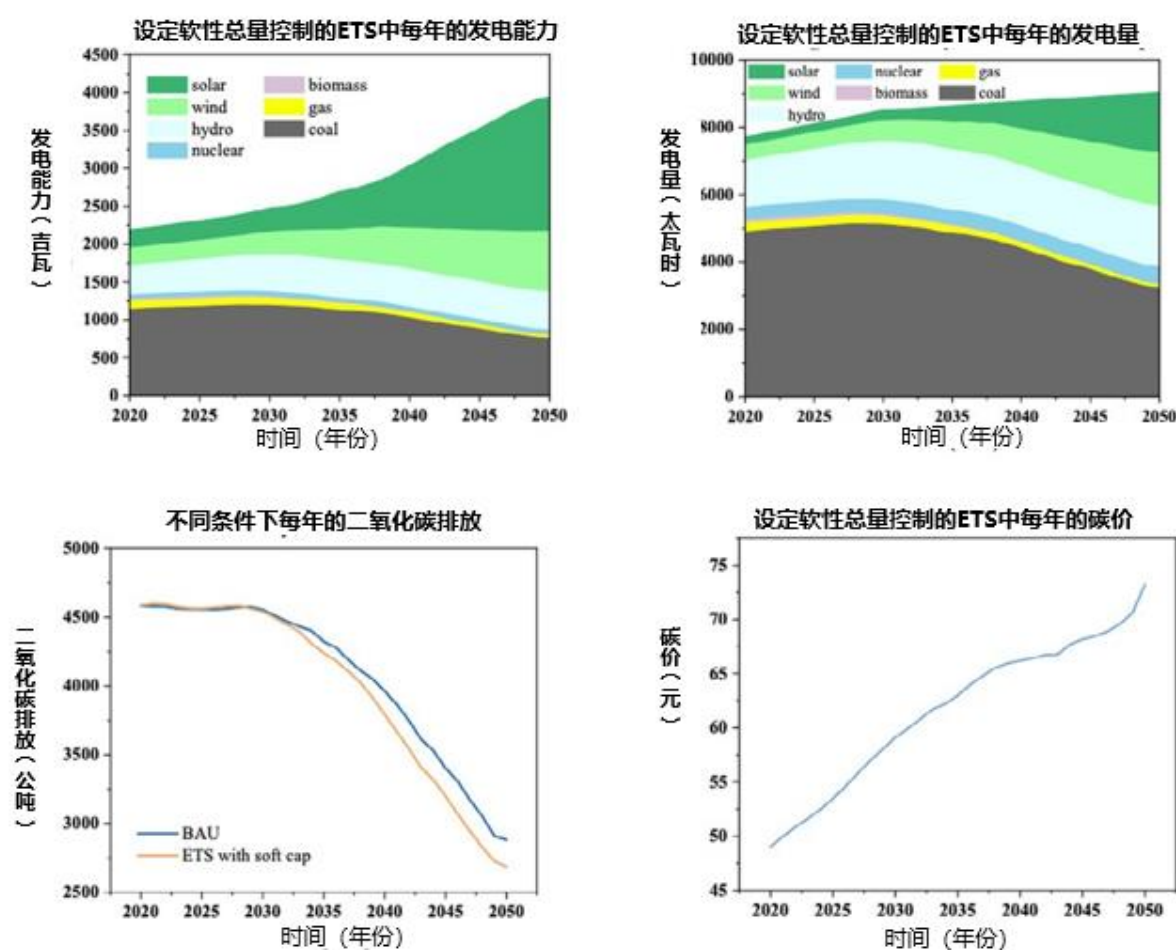
设有软性总量控制和配额免费分配的ETS

在此情景下，如上所述，每个行为主体根据其电力产出和基准碳强度分配排放配额。随着时间的推移，随着效率最高的电厂效率提高，该基准逐渐降低。配额可以免费分配，也可以在行为主体之间交易。当效率较低的电厂由于基准下降而出现配额短缺时，就必须在市场上购买额度。这种

配额交易产生的碳价是使用Chappin (2011年)¹⁴²设计的经验公式计算的(详见附录)¹⁴³。对于效率较低的煤电厂来说，这意味着成本；对于高效率的煤电厂来说，这是一个收入来源。

图36显示了每种技术的发电能力和发电量以及CO₂排放量的模拟输出。图36的右下方显示了配额价格随时间的变化。

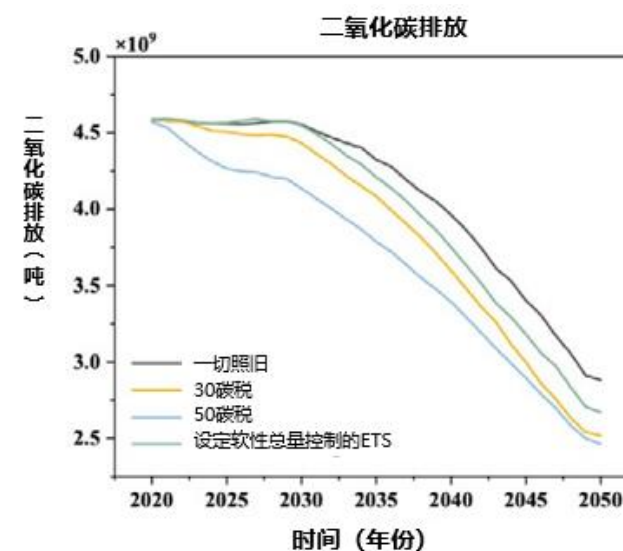
图36：ETS情景下的技术演变：发电能力（左上）、发电量（右上）、二氧化碳排放量（左下）和碳价（右下）



从图36(左下方)可以看出，与BAU相比，设有软性总量控制和配额免费分配的ETS在2020-2030年期间对排放几乎没有影响。2030年后虽会有一些影响，但也是非常有限的，尽管碳价稳步上升，2050年的排放量仅比同年的BAU水平低了不到10%。

图37比较了设有软性总量控制和免费配额分配的ETS在一段时间内的排放量与两种税收方案以及BAU的排放轨迹。这表明ETS的效果甚至不如低碳税。

图37：各个情景下的CO₂排放示意图



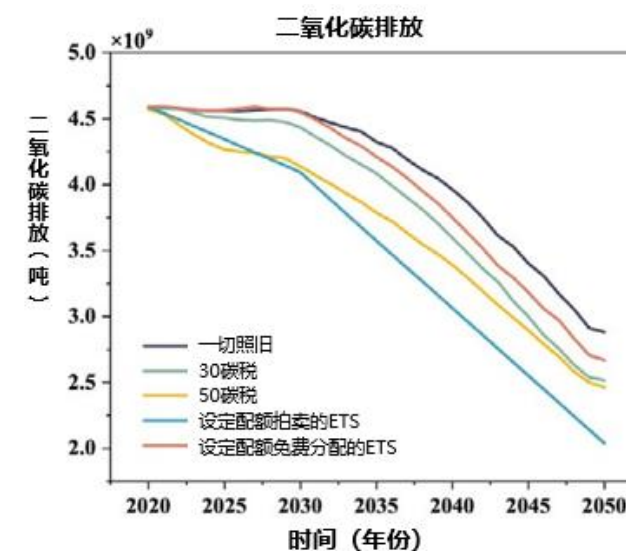
原因在于此种ETS设计的两个方面。配额的免费分配意味着只有小部分的排放需要支付碳价。即使是年限最长、效率最低的燃煤电厂也只需支付一定的费用，就可以将分配配额增加到所需的配额总数；免费配额所覆盖的排放没有定价。与此同时，基于基准碳强度的软性总量控制带来的效果是，效率最高的燃煤电厂无需为其任何排放支付碳价，而是通过出售免费分配配额获得收益。这项政策只对低碳转型有轻微的推动作用，并没有提供强大的推动力。

政策结论指出，对于ETS来说，要对排放产生实质性的影响，需要重大的设计改变。例如，可以硬性规定随着时间的推移排放总量要减少多少，也可以是通过拍卖而非免费分配的方式来发放配额。

设有硬性总量控制和配额拍卖的ETS

在这一情景下，ETS有硬性总量控制：配额的总供应量由政府设定。在我们的例子中，总量的设定大致符

图38：设有免费分配和拍卖分配配额的ETS情景中随时间变化的排放量，及其与低碳税、高碳税以及BAU的对比



合中国的“双碳”目标：到2030年实现碳达峰，到2060年实现碳中和。根据总量确定的轨迹是从目前的排放水平线性下降到2030年的4000公吨，然后以更快的速率线性下降到2050年的2000公吨。(要实现碳中和目标，需要在2050年至2060年间进一步降低轨迹的陡度。¹⁴⁴)行为主体在拍卖中竞标所需的配额，每年最终配额的竞标决定了整个市场的碳价。附录中描述了该过程的细节。

图38显示，该种ETS设计比免费分配更加有效。在2020-2030年期间，EST的效果相当于高碳税。在2030年以后，其效果优于高碳税，导致年排放量比2050年的BAU低近三分之一。原因很简单：排放的硬性总量控制限制了允许运行的化石燃料发电量。燃煤电厂逐渐被挤出市场（首先是那些效率最低的电厂），排放量减少至与总量控制一致的水平。

¹⁴² Chappin, E. (2011). Simulating Energy Transitions, Next Generation Infrastructures Foundation, Delft, The Netherlands. Available online: <http://chappin.com/ChappinEJL-PhDthesis.pdf>

¹⁴³ In order to validate the formula, the permit price was calculated for the base year, using the benchmark of 877gCO₂/kWh. The result gives an average carbon price of CNY 54.2/tCO₂ (with a soft emissions cap of around 4,280MtCO₂). These outcomes are close to their actual values in China, providing confidence in the applicability of this formula (which was originally designed for simulating the EU ETS).

¹⁴⁴ This is only one possible trajectory for power sector emissions towards meeting the 2060 target. We are not suggesting that it is the most cost-effective trajectory.

值得考虑的是，此种ETS在多大程度上是一种“基于市场”的政策。由于现有发电技术之间的竞争有限，燃煤电厂的运营时间会长于竞争更激烈的市场。这说明排放配额的需求总是高于供给，如图39所示，碳价随着时间稳步上升，如图40所示。（这与欧盟排放交易体系中波动的碳价明显不同）。虽然能够实现稳步增长，

但是碳价从来没有达到让一个现有燃煤电厂无利可图的水平（大约120人民币/吨的二氧化碳）。考虑到这些特点，碳排放交易体系的作用似乎更像是一种监管：通过对发电厂被允许的碳强度设定一个限制(随着时间的推移，配额的碳强度会降低)，可以达到类似的效果。

图39：一段时间内排放配额的需求和供给比率。大于1的比率表明需求大于供给

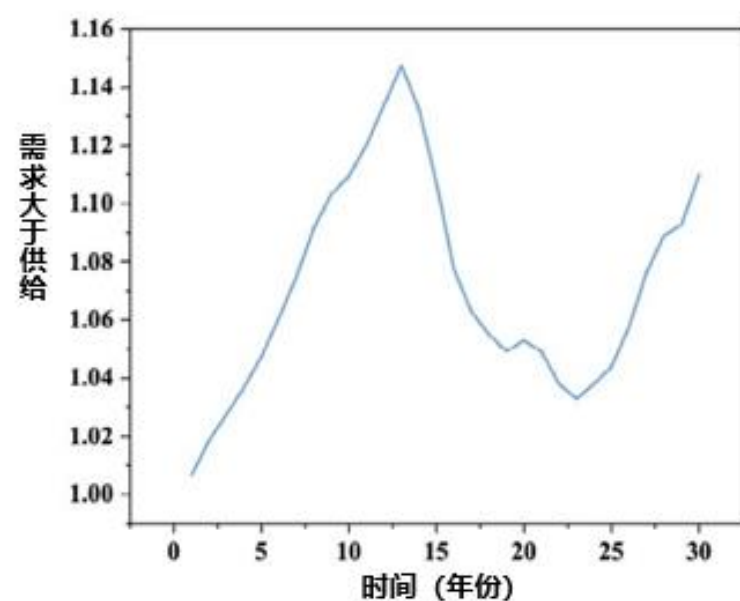
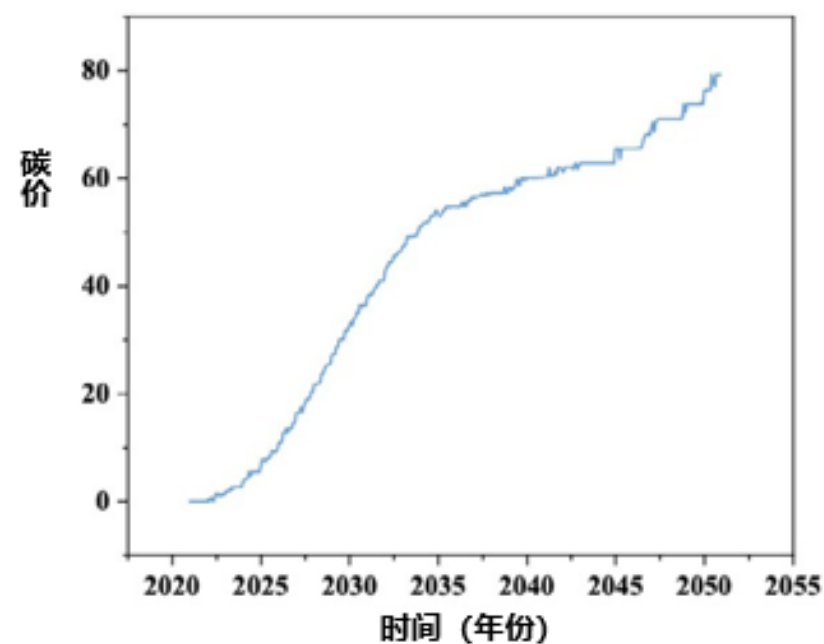


图40：随时间变化的碳价



政策结论

现有发电市场上的技术之间缺乏竞争（而不是对新容量的投资）限制了任何形式的基于价格的政策的有效性。现有的大量燃煤发电能力难以转移。参考图27，清洁技术的相对成本与清洁技术部署之间的联系被削弱，这削弱了清洁技术部署和成本降低的强化反馈。

政策结论指出，对于ETS来说，要对排放产生实质性的影响，需要重大的设计改变。例如，可以硬性规定随着时间的推移排放总量要减少多少，也可以是通过拍卖而非免费分配的方式来发放配额。

在这个市场上，由于碳市场具有软性总量控制、宽松基准水平和自由分配的配额，排放与常规情景类似。如果碳市场具有硬性总量控制和配额拍卖，可能会产生更强的效果，但其功能似乎与碳强度监管类似。监管将是行政上更简单、效果相同的方式。

鉴于中国的发展目标、地缘政治紧张局势和新冠疫情的影响，中国在电力行业的排放交易实验必须谨慎设计，以避免干扰发电、能源供应和经济增长。这两年（2021-2022年）观察到的进展和上述模拟输出看起来相对温和。当排放交易机制与深化电力市场改革相结合并协调，预计会取得更大的进展。

在任何情况下，电力市场引入更大的竞争都可能是可取的，以便能够更多地部署低成本、低排放的发电技术。如果中国市场朝着这个方向改革，碳定价政策选项将越来越类似于第二部分所述，因此碳税可能会比同等力度的排放交易机制更快地推动转型。

案例分析：

激活中国、印度、欧洲及美国电动汽车的临界点

Aileen Lam（澳门大学），Pim Vercoulen（剑桥计量经济学会&埃克塞特大学），Jean-Francois Mercure（世界银行），Simon Sharpe（气候行动倡导者团队）

政策问题：在推动汽车电动化转型方面，哪些单独政策或一揽子政策最有效？在道路运输部门成本以及宏观经济影响方面，快速转型相较于慢速转型哪个更好？

地区：全球范围

研究方法：E3ME-FTT：交通模型

主要发现：主要市场即将到达电动汽车和内燃机汽车的成本平价临界点。电动汽车补贴缩小了电动汽车和内燃机汽车之间的成本差距，而对电动汽车征收的小额税款可以覆盖补贴，达到税收中性。在推动汽车电动化转型方面，单独实施时，法规比财务激励手段更具有成本效益，并且有助于形成高效的政策组合。相比慢速转型，快速实现汽车电动化转型更能够节省成本。宏观经济层面，汽车电动化转型可能对大型石油进口国产生相对积极的影响，而对大型石油出口国产生相对消极的影响。

交流互动：本研究信息来源于EEIST伙伴国政府。政策制定者对下列议题表现出了兴趣：何种水平的电动汽车补贴措施有效、不同政策的相对成本效益、以及对特定政策以不同严格程度实施产生的效果方面。

摘要：作者使用了E3ME-FTT：交通模型来考量一系列政策单独和组合使用时，在促进印度、中国、美国 and 欧洲地区的零排放车辆转型方面等起到的作用。

介绍

2021年全球燃料燃烧所致二氧化碳排放量中，交通运输部门排放量占了总量的23%。¹⁴⁴其中私人客运道路交通占交通运输排放量的45%，占交通运输排放增长量的30%，因此这一方面必须立刻引起政策制定者的重视。¹⁴⁵电动汽车¹⁴⁶转型是促进私人客运道路交通脱碳的主要解决方案之一。¹⁴⁷由于持续性的电动汽车政策支持已经在全球范围内实施，投入使用的电动汽车数量大幅增长，2021年全球就约有1650万辆电动汽车投入使用。同时，电池价格大幅下降，从2010年的每千瓦时1100美元降至2020年的每千瓦时137美元¹⁴⁸，降幅达88%，这很大程度上是由于随着产量和销量的增长，电动汽车行业通过各种形式的学习，在生产和革新方面实现了规模经济。然而，经过数十年的价格下跌，由于原材料价格上涨，各行业的电池组成本在2022年回升至每千瓦时150美元。¹⁴⁹

随着电动汽车销量增长，许多国家设定了实现新车全部零排放的目标。例如，欧盟达成协定，要求到2035年实现售出新车全部零排放。¹⁵⁰一些主要市场目前只设定了中期目标，包括美国、中国等。这两个国家的目标是到2035年实现电动汽车市场占有率分别达到50%和40%。美国和中国在对转型速度进行决策时，可能考虑到了众多因素，包括对可行性的认知、对未来电动汽车的可负担性¹⁵¹的预估和政策实施对产业竞争力、就业、能源安全以及经济增长的预计影响。

此案例分析通过证据表明，主要市场即将达到不可逆转的电动汽车扩散临界点，并且指明了能够加速向零排放车辆（ZEVs）转型以及能够加速削减成本的一揽子政策；此外，还强调了相比慢速转型，快速转型对宏观经济的益处（使主要市场在2035

年实现100%零排放车辆销售）。主要汽车市场政策早日取得成功能提高电动汽车的可负担性，从而带动世界其他地区的汽车电动化转型，世界其他地区电动汽车的普及将有助于主要市场提前实现电动汽车和化石燃料汽车的成本平价。这些预计是基于对逾2000辆车模型的价格的观察以及过去12年的扩张数据，通过FTT：交通模型模拟得出的。E3ME模型则用于估算宏观经济影响。

FTT：交通模型描述

概述

未来技术转换（FTT）模型是一个松散的框架方法，基于市场中的技术竞争，对技术扩散情况进行动态建模。FTT：交通模型假定存在一个自适应的、不断发展的、路径依赖的汽车市场，其中消费者是各种各样的主体，汽车制造商则根据需求供应市场。我们预设偏好是显性的，观察到的近期汽车销售的成本分布与各种各样消费者偏好和选择相对应。

FTT框架利用Lotka-Volterra模型体系中的一组逻辑微分方程对技术扩散情况进行建模，代表循序渐进的技术迭代过程。扩散过程是路径依赖的，而且会给出积极反馈，FTT框架会捕捉反馈。在FTT框架下，由于可用性、可见性、社会影响和网络效应以及价格因素，消费者更有可能选择成本更低、市场份额更大的技术。

用离散选择理论模拟异质性

汽车市场的消费者具有异质性，根据概率做出选择。我们假设市场异质性可以来源于消费者的“显性偏好”（即他们的车辆选择），由消费者根据市场上汽车型号的可用性和成本进行的购买行为模拟得出。模型隐含了汽车制造商迎合消费

¹⁴⁵ IEA. (2021). World Energy Outlook.

¹⁴⁶ IEA. (2021). World Energy Outlook.

¹⁴⁷ EVs include both battery electric vehicles (BEVs) and plug-in electric vehicles (PHEVs).

¹⁴⁸ IEA. (2022). Global EV Outlook 2022.

¹⁴⁹ Bloomberg NEF. (2021). Electric Vehicle Outlook.

¹⁵⁰ Bloomberg NEF. (2022). Electric Vehicle Outlook.

¹⁵¹ UK Government. (2021). COP26 declaration on accelerating the transition to 100% zero-emission cars and vans. <https://www.gov.uk/government/publications/cop26-declaration-zero-emission-cars-and-vans/cop26-declaration-on-accelerating-the-transition-to-100-zero-emission-cars-and-vans>

¹⁵² Bloomberg NEF. (2021) Hitting the EV Inflection Point.

者偏好向市场供应汽车的假设。在离散选择理论中，消费者品味各异，对不同的产品特性赋予不同的效用权重。

FTT模型以进化论的形式使用了离散选择理论。它使用观察到的成本分布来表示主体的异质性（一种显示偏好的形式），用二元逻辑链模拟消费者的决定。在离散选择中，选择根据概率做出，这意味着离散选择模型中考虑了未观察到的因素，如品味变化和人际异质性等。就交通运输而言，选择特定车辆的可能性受到汽车技术各部分的成本分布广度和技术的市场份额的影响。因此，政策不会直接引起电动汽车的迅速扩散，激励措施也不会使所有消费者作出反应。

交通平整化成本（LCOT）

对于该模型的决策部分，我们将运输技术的投资者与运输服务的消费者区分开。为明确区分，将他们视为独立的实体，尽管在某些情况下投资者和消费者可能是同一个人。无论这些角色是否由同一个人扮演，两种角色都截然不同，因为投资者购买汽车是为了向消费者出售交通运输服务。将他们视为独立实体是为了理清技术投资及相关市场竞争和技术产生的服务消费之间的区别。这种区分还考虑到了这样一种可能性，即购买汽车的人仍然可以选择乘火车或飞机旅行，而不使用购买的汽车。即使都是同一个人做出的选择，对方式的选择区别于对技术的选择。从购买一辆车或单位运输技术的投资者角度来看，车辆的成本必须包括与决策相关的所有因素。其中许多因素很容易从现有数据中量化，而其他因素并非如此，此处展示了量化过程。购买一辆汽车时，对资本成本和此后的燃料及维护成本的初始投资和贷款就由此产生：

$$LCOT_i = \sum_t \frac{(I_i - EVS_i) + \sum_t \frac{RT_i(t)}{CF_i} + (F_i(t) + FT_i(t)) * (FE_i(t) * Dist_t) + MR_i(t)}{\sum_t \frac{1}{(1+r)^t}}$$

图41：该等式用于计算交通平整化成本。I_i、F_i和MR_i分别指平均资本成本（美元）、燃料成本（美元/升）和维护成本（美元/公里）。EVS_i代表购买时支付给购车者的电动汽车补贴（因此是负成本）。FT_i是燃油税，单位为美元/升。燃油成本取决于每年的油耗FE_i(t)和行驶距离（Dist_i）。RT_i是由车主每年根据车辆和类别支付一次的年度登记税。CF_i是容量因子，单位为公里/年

销售价格分布表明，交通成本不是影响消费者购车的唯一因素。消费者也重视许多其他方面的因素（如舒适度和奢华度），而除了购买价格分布之外，我们对其他方面的信息知之甚少。有一点要谨记，技术的金钱成本不尽相同，特别是在不同的发动机尺寸方面；尽管如此，更高的成本实际上会带来更高的感知收益，因此成本高昂的豪华汽车得以与成本低廉的经济型汽车共存。

如果我们仅仅基于的交通平整化成本（LCOT）分布对比来模拟技术扩散，则LCOT最小的技术扩散会更成功，这与历史数据相悖。LCOT缺少对一些因素的考量，例如舒适性、加速性能和风格等，这些可以被称为“无形因素”。我们将此模型的无形因素定义为广义成本和LCOT之间的差异，广义成本导致了观察到的扩散，而LCOT是根据车辆资产值的数据计算的。无形因素的价值是一个经验参数，通过使FTT扩散轨迹契合我们在模拟最初年份的历史数据中的轨迹而获得。

车辆数量预测

汽车保有量模型用于预测交通需求、能源消耗和排放量水平。在不同类型的模型中，最著名的方法之一是基于逻辑函数对收入-汽车存量模型进行的经济计量估算。历史表明，GDP增长和经济发展与汽车保有量的增长相关。此前研究已经基于GDP对乘用车保有量进行了预测。

Gompertz曲线是一条S形增长曲线，将人均汽车保有量与人均GDP联系起来。尽管该曲线没有将报废车辆明确包括在内，但经过实证测试，它可以代表车辆存量的增长趋势。¹⁵²我们利用来自不同国家的大量样本研究了汽车保有量增长趋势，并使用Gompertz函数来估算汽车数量和人均收入之间的关系。

$$V_{i,t} = V_i^* e^{ae^{\beta EF_{i,t}}}$$

图42：根据此前研究，我们采用Gompertz模型估计汽车存量

客运需求预测

交通需求受收入、人口、城市密度、家庭结构和其他人口统计学因素的驱动。本节中的需求估算由两部分组成。第一部分主要构建了一个计量经济模型，利用燃油价格、收入、城市化水平、道路基础设施、城市密度和燃料经济性来预测轻型车辆（PLDV_s）的需求（单位为每辆车公里数）。然后利用计量经济模型预测未来私人客运车辆运输需求（每辆车）。在第二部分中，我们开发了一个车辆存量模型，并预测未来的汽车保有量，据此预测对轻型车辆的总需求

FTT：交通模型中的政策模拟实施和相互作用

图41直接计算了电动汽车补贴、道路税和燃油税等财政激励措施，这些因素会影响车辆运营成本。模型模拟了新的内燃机汽车继续销售的情况下，燃料经济性法规对旧的低能效车辆的技术类别中的份额流动的影响。实施燃料经济性法规后，不允许销售不符合规定能效标准的车辆。因此，道路上的车辆存量将逐渐被更节能的车辆所取代。

对于电动汽车强制规定，假设政策在特定时间点从外部施压改变了车辆类型所占份额。我们假设根据新车辆技术法规从外部分配最低要求的份额，传统

汽车的市场份额会流向电动汽车。这种方法模拟的法规旨在对制造商做出要求，即在销售的车辆中，电动汽车要占一定比例。这种最简化版的政策与现实世界中的一些电动汽车法规有所出入。在现实中，政府通过碳信用来分配电动汽车生产配额。在此我们假设电动汽车强制规定得到了有效执行，那么电动汽车销量在汽车销售中的占比就能达到政府所设定的目标。

在FTT模型中，每一层政策在交通部门的去碳化中都发挥着特定作用。如果这些政策在模型中同时模拟实施，会影响彼此的有效性。例如，对高排放车辆征收车辆税的手段将会鼓励消费者购买低排放车辆。在电动汽车车型有限的消费市场，消费者更有可能选择低排放的汽油车，而非电动汽车。不过，电动汽车强制规定的存在，鼓励了制造商加快电动汽车部署，为消费者提供更多样的选择。这样一来，电动汽车规定的存在使车辆税在引导消费者选择减排车辆方面的效果更加显著。此外，电动汽车产量越大，成本就会下降得越快，电动汽车扩散率就会越高。这也导致了该模型中的技术扩散曲线呈现为S形。因此，政策的相互作用是FTT：交通模型内在的一部分。

即将到达电动汽车临界点

尽管目前电动汽车的购买价格可能高于汽油和柴油汽车，但电动汽车更容易维护，运营成本也更低。以上因素意味着电池成本正在快速下降，就总拥有成本而言，电动汽车似乎很快就会成为更便宜的选择，这可能会导致到达一个社会“临界点”，即电动汽车成为大多数消费者的首选。¹⁵³几项研究分析了代表车型分别使用电池和内燃机作为动力来源的预计成本¹⁵⁴ ¹⁵⁵ ¹⁵⁶ ¹⁵⁷。结论是，在2022-2027年期间，欧洲、美国和中国开始达到电动汽车成本平价¹⁵⁸（总拥有成本）。然而，由于折扣率和其他影响决策的因素，对于消费

¹⁵³ Meyer, I. et al. (2012). Scenarios for Regional Passenger Car Fleets and their CO2 Emissions. Energy Policy, 41: 66-74.

¹⁵⁴ Sharpe, S. and Lenton, T. M. (2021). Upward-Scaling Tipping Cascades to Meet Climate Goals: Plausible Grounds for Hope. Climate Policy 21: 421–433. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1870097>

¹⁵⁵ Bloomberg NEF. (2021) Hitting the EV Inflection Point.

¹⁵⁶ Lutsey, N. et al. (2021). Evaluating Electric Vehicle Costs and Benefits in China in the 2020-2035 Time Frame. International Council on Clean Transportation (ICCT).

¹⁵⁷ Lutsey, N and Nicholas, M. (2019). Update on Electric Vehicle Costs in the United States through 2030.

¹⁵⁸ Lam, A. and Mercure, J-F (2022). Evidence for a Global Electric Vehicle Tipping Point. GSI Working paper series number 2022/01. https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/globalsystemsinsitute/documents/Lam_et_al_Evidence_for_a_global_EV_TP.pdf

¹⁵⁹ Cost parity does not happen for all EV models at the same time because this depends on the model size and specification. “Initial cost parity” is triggered when cost parity is first reached for some vehicle models, in a given market.

者来说，前期购买价格平价这一因素可能比总拥有成本平价更重要。

图43显示了到2050年，根据Rogers-Wright综合定律（关于扩散和经验曲线），相对所有四个主要汽车市场中的内燃机汽车，针对三个不同细分市场预测了电动汽车拥有成本和价格。预测是基于观察到的趋势、现有的不确定性，并假设当前的政策框架保持不变的情况下给出的。

在2022-2025年期间，所有细分市场的纯电动汽车（BEVs）开始达到成本平价。对于欧洲、美国和中国来说，价格相对便宜的汽车最早达到成本平价，在中国，纯电动汽车的价格和拥有成本已经低于内燃机汽车。对于中档或豪华车，2023年至2025年间，中国、印度、欧洲和美国的纯电动汽车的拥有成本可以与内燃机汽车持平（图43）。然而，插电式混合动力汽车（PHEVs）永远无法达到与内燃机汽车的成本平价，并且在印度缺少这一车型。这是因为插电式混合动力汽车同时消耗燃料和电力，导致它的平均拥有成本比纯电动汽车更高，而由于同时配备电池和电力传动系统以及发动机，它的购买成本也比内燃机汽车高。此外，纯电动汽车的电池比插电式混合动力汽车的更大，因此成本下降幅度更大。

实现纯电动汽车的购买价格平价可能会比实现拥有成本平价要晚，前者可能在2028-2035年期间实现。现有数据表明，在某些情况下（例如印度市场的低成本细分市场），2040年之前难以实现购买价格平价，因为少数可用的纯电动汽车车型仍然比同等的内燃机汽车贵得多。为了说服消费者转向车型较少的纯电动汽车市场，必须利用补贴促进成本方面的盈亏平衡，弥补部分传统汽车细分市场与稀缺的零碳排放替代车辆之间潜在的巨大价格差距（见图44）。另一方面，零排放车辆强制规定等供给侧政策能有助于增加市场上的车型种类，减少补贴需求。

在主要市场，越来越多电动汽车型号上市，增强了电动汽车对消费者的吸引力。据观察，纯电动汽车和插电式混合动力汽车的销量和品种都在快速增长。近期，纯电动汽车的增长速度远超插电式混合动力汽车，后者在2019-2021年期间的增长停滞不前。而电动汽车的销量完全没有受到新冠肺炎疫情的影响。虽然在印度等发展中国家，电动汽车的销量仍然落后，只有少数几款车型可用（见图45），但两轮和三轮电动汽车的销量持续增长。需要继续增加所有市场的电动汽车种类，以确保转型成功且具有成本效益。针对电动汽车车型匮乏的内燃机汽车热门细分市场，实施电动汽车购买激励措施有助于增加可用电动汽车的种类。在市场上现有电动汽车稀缺的情况下，制定有利于增加进口的贸易政策或实施国内电动汽车供应链增强措施可能也有所帮助。

旨在支持电动汽车部署的单独政策

电动汽车即将实现成本平价并不能保证电动汽车转型的结果符合一个国家的经济、工业或气候变化目标。我们分析了支持电动汽车部署的四个主要政策工具的有效性，包括电动汽车补贴、车辆税、车辆能效法规和电动汽车强制规定。我们比较了电动汽车部署的成本效益；减排的成本效益；以及在此期间实现的电动汽车成本削减幅度。此外，我们还从整体经济的能源消耗、国内生产总值、进口和就业方面比较了快速和慢速转型带来的宏观经济影响。

为便于比较，我们对单独政策工具作出如下定义：

- **补贴：**“现行补贴”是指在指定市场中电动汽车购买补贴的当前水平。“补贴成本平价”是根据在2022年达到与同等内燃机汽车拥有成本平价所需的水平所设定的电动汽车购买补贴。“高补贴”是指达到基准/2020年水平的150%的补贴。“超高补贴”是指达到基准/2020年水平的200%的补贴。
- **税收：**“税收成本平价”是对内燃机汽车征收的一

种税，税额根据在2022年特定市场中与同等电动汽车实现拥有成本平价所需的水平而设定。

“高税率”是指税率达到基准/2020年水平的150%。“超高税率”是指税率达到基准/2020年水平的200%。

- **法规：**“慢速监管”是一项能效法规，要求新车的碳排放强度（以每公里碳排放量衡量）直线下降，到2035年降至2022年水平的50%。“快速监管”则要求新车的碳排放强度直线下降，从2022年的水平降至2035年为零。
- **强制规定：**“慢速转型强制规定”要求到2035年，50%的新车实现零排放。“快速转型强制规定”则要求到2035年，所有新车实现零排放。

图46和图47比较了在欧洲、美国、中国和印度推广电动汽车的各种政策工具的有效性和成本。

结果表明：

- **单纯就推动汽车电动化转型的有效性而言，强制规定是在以上四个地区最有效的政策。**这样的结果在意料之中：强制规定旨在确保向新技术的转移。而法规即使同样严格（要求新车销售在同一日期前实现所有新车零排放），也难以在道路汽车电动化转型方面实现同样的效果，因为至少在一段时间内，销售更高效的汽油或柴油汽车也并不违反这些法规。
- **如果没有配套法规支持，补贴和税收手段相对来说收效甚微。**即使将补贴和税收水平提高到实现电动车和内燃机车成本平价所需的水平之上，对电动汽车部署的额外促进作用也相对较小。这是因为成本平价水平的税收或补贴不一定足以让大量消费者转而青睐电动汽车，尤其是在缺乏同等车型或足够数量充电站的情况下。如果没有推动电动汽车加速扩散的法规，很少有消费者意识到新技术的存在或接触到新

技术，因此，在扩散水平进一步提高之前，财政激励手段的受益者寥寥无几。

- **就推动汽车电动化转型而言，监管法规通常比财政激励手段更具成本效益。**背后原因很复杂。通过对供应采取果断行动，并对制造商提出硬性要求，法规能够帮助实现更大程度的汽车电动化转型。相比之下，财政激励手段则专注于缩小成本差异，只是鼓励消费者改变行为，但并不做出强制要求，而由于消费者的偏好各异，部分消费者仍然不会改变选择。与此同时，实行法规的成本（以更高的购买价格购买更多的车辆）被电动汽车和高效的内燃机汽车的低运营成本所抵消了。例如在中国，监管成本为负值，这是由于电动汽车的拥有成本已经低于内燃机汽车。而欧洲的情况则是例外，因为该地区的相关法规已经实施了一段时间，所以电动汽车市场已经相对成熟和多样化。在这种情况下，发放补贴可能更具有成本效益。
- **在任何情况下，税收的成本效益远不如补贴。**这是因为，为了同样在电动汽车和内燃机汽车之间实现成本平价，电动汽车补贴只需要在目前电动汽车销售所占的小部分市场范围内施行，而税收则需要在内燃机汽车销售所占的庞大市场范围内施行。

图48根据不同的减排成果比较了不同政策的成本效益。尽管总体模式相似，与财政激励相比，法规在长期实现累积减排方面的成本效益更高；而与税收相比，补贴在实现减排方面的成本效益更高。

无论旨在部署电动汽车还是减排，我们发现快速转型比慢速转型更具成本效益（见图47和48）。由于技术扩散系统的路径依赖性高，短期内快速转型的情况会促进长期内更大程度的电动汽车扩散，因此在电动汽车部署和二氧化碳减排方面，快速转型效果更显著。由于目前电动汽车的运营成本比内燃机汽车要低，所以转型速度更快能够在总体上节约更多成本。

图49显示随着时间的推移，用于降低电动汽车成本的政策有效性的变化。变化的原因是电动汽车部署推动了技术学习和规模经济。监管政策比财政激励手段更

有效，因为前者能更有效地增加电动汽车部署。在所有情况下，电动汽车硬性要求实现的电动汽车累积部署量最大，因此实现的成本削减幅度最大（见图45）。

图50和图51显示了不同政策下的累计能耗和二氧化碳排放减少量。总体而言，结果表明，法规在减少二氧化碳排放和减少能源消耗方面都比财政激励手段更有效。

旨在支持电动汽车部署的政策组合

在现实中，很少单独使用某一政策部署。通常，多种政策并行更具优势。不过，不同政策配套实施产生的效力可能截然不同。

如图52所示，通常两种政策配套实施的效果不等于各自单独实施效果的总和，也许会更小（权衡效应）或更大（强化效应）。电动汽车强制规定与能效法规同步施行时，或电动汽车强制规定与公路税同步施行时，观察到的强化效应最大。而能效法规与公路税或燃油税配套实施时，就会出现有得有失的情况：此时政策配套实施所取得的效果小于各政策单独实施效果的总和。

图53显示了基于四个主要市场中车辆构成的模拟情景采用一揽子政策所产生的效果。当前轨迹（A）显示了在没有额外政策的情况下市场的走向。（B）增加更严格的道路和车辆税以及电动汽车补贴的影响有限。（C）燃料经济性法规促进了传统车辆的减排，但对电动汽车的推广影响有限。（D）增加零排放车辆的硬性要求增强了对车辆使用者的影响，从而大大增强了其他政策的效果。在当前轨迹情景（A栏）中，我们假设没有新的政策激励措施。结果表明，如果没有持续政策支持，将难以实现到2035年100%电动汽车销量

的转型目标。

综上所述，实现电动汽车和化石燃料汽车之前成本平价的财政激励措施会有一定效果。通过实施收入中性的税收制度，有可能在不增加政府财政压力的情况下实现这一成本平价目标。表10显示了在2023年主要市场中，要打破内燃机汽车不同细分市场的成本平价所需的纯电动汽车补贴金额。补贴的资金来源于在购车点对内燃机汽车所征税款。根据表10中列出的化石燃料汽车补贴范围，可以在激励结构中创建收入中性机制，从而为纯电动汽车补贴提供资金，补贴用于弥补2023年欧洲、美国和印度的内燃机汽车和电动汽车之间的成本差距。中国政府不再向电动汽车的购买者提供补贴，因此这里不考虑中国的电动汽车补贴情况。因为电动汽车目前只占市场的一小部分，所以对每辆售出的化石燃料汽车征收小额税款就足以以为每辆新电动汽车提供高额补贴。

我们发现，由于上述原因，采用补贴打破内燃机汽车的成本平价还不足以实现到2035年所有新车零排放的目标（见图53，B栏）。实施零排放车辆硬性规定或强有力的能效法规可以加速解决纯电动汽车的供应问题。大量现有研究^{159,160,161}发现，相比单独实施任何政策工具，设计良好的政策工具组合能实现更大程度的转型。特别是，零排放车辆硬性规定和其他财政激励措施之间存在一种强化效应（即两种政策并行比其中任何一种政策单独实施带来更大的二氧化碳减排效益）。¹⁶²

鉴于零排放车辆硬性规定和其他财政激励手段之间存在强化效应，我们在图53的B-C-D的情景中依次添加了电动汽车补贴、法规和零排放车辆强制规定。增加零排放车辆强制规定，引导制造商供应占特定市场份额的零排放车辆，使这一份额逐渐达到100 %。这一举措与其他政策一起发挥作用能够确保到2050年或更早实现尾气零排放。

我们将逐步收紧旨在实现零排放的能效法规和旨在到2035年实现100%纯电动汽车销售的零排放车辆硬性规

定的结果进行了对比。如图54所示，与逐渐收紧燃料经济性法规相比，零排放车辆硬性规定会使纯电动汽车扩散速度更快。这是因为燃料经济性标准是技术中性的，允许低排放车辆如混合动力电动汽车（HEVs）和插电式混合动力汽车的扩散。在当前轨迹情景中，如果一个国家插电式混合动力电动汽车和混合动力电动汽车的数量远大于纯电动汽车（如美国和印度），由于技术扩散的路径依赖性高，传统汽车逐步被淘汰为插电式混合动力电动汽车和混合动力电动汽车的扩散提供了契机。同时，零排放车辆硬性规定要求汽车制造商生产和销售一定数量的纯电动汽车，这一措施能更直接地鼓励纯电动汽车快速扩散。考虑到纯电动汽车没有尾气排放，当零排放车辆强制规定与模拟期间逐渐收紧的燃料经济性法规相结合，减排效果更显著。

国际协调推进纯电动汽车成本平价

由45个国家在格拉斯哥COP26上达成的《突破性议程》旨在促进各国协调行动，加速清洁能源技术的开发和部署，从而更快降低成本。即使近期主要市场的电动汽车部署成效斐然，但要实现与气候目标轨迹一致，还需要各国采取强有力的政策措施。

图55显示了主要市场在不同国际合作情景下纯电动汽车和内燃机汽车之间的成本差异。假设没有任何地区对所有零排放的新车实施强有力的政策，此时纯电动汽车成本降低的速度是最慢的。主要市场（欧洲、美国、中国）采用的政策框架是到2035年实现100%新车零排放，这使这些国家实现成本平价的年份提前了两到五年，大大增加了实现气候目标的机会。这个模拟情景中假设了电池和电动汽车的生产能力足以满足政策所需电动汽车数量。同时，在世界其他地区采用纯电动汽车可以推动扩大生产，并进一步降低主要市场的成本。这种协调增益证明了有必要在主要市场之间进行强有力的协调行动，并且要为发展中国家促进纯电动汽车部署提供金融和技术支持。由于降价带来的收益递减，早

日取得政策成效能更有效地加速成本削减。这表明，欧洲、中国和美国的政策行动可能对推动世界其他地区的零排放车辆转型至关重要。

快速向零排放车辆转型可带来积极的宏观经济影响（取决于具体情况）

我们使用E3ME模型来研究汽车电动化转型的影响及转型影响各种宏观经济指标的速度。图56显示了慢速和快速转型的影响，并将两者与未发生此类转型的参照情景进行比较。最上面一行显示了在整体经济层面，这两种情景与参照情景相比对一次能源需求的差异。车辆构成电动化导致对石油的需求大幅减少，且在快速转型的情况下，降幅会更为显著。与2035年的基线情景相比，在慢速转型情景下，中国2035年的石油需求将下降8%，而在快速转型情景下将下降12%，印度分别为4%和8%。不过，转型会带来额外的电力需求，需要多种一次能源。我们注意到所有地区的电力需求都在增长，而电力通常来源于可再生能源和化石燃料，这取决于当地能源结构。电力需求的增长体现为印度和美国的电力行业排放量增加；不过，排放增长量低于交通部门和燃料制造部门（包含在“其他能源”类别中）实现的减排量。原因是化石燃料发电和电力传输相结合通常比汽车的内燃机更高效。

汽车电动化转型对每个国家GDP的影响有微妙的差异。印度和欧盟得益于汽车电动化转型，都实现了额外的经济增长，且快速转型下的增长幅度大于慢速转型（与2050年的参照情景相比，印度2020年额外增长1260亿美元，欧盟2020年额外增长600亿美元）。在转型速度比参照情景更快时，美国和尤其是中国的GDP受到的影响较小。唯独中国受到了慢速转型情景对GDP产生的负面影响。这些结果受到消费者支出、工业投资和净出口的综合变化的影响，其中消费者支出受制于就业、工资和物价。模型显示，在中国，化石燃料部门和采矿部门（特别是石油和天然气）提供的就业机会大幅下降，从而抑制了消费者支出。消费者支出的减少导致需求下降，从而减缓投资速度，同

¹⁶⁰ Axsen, J. et al. (2020). Crafting strong, integrated policy mixes for deep CO2 mitigation in road transport. *Nature Climate Change* 10: 809–818. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0877-y>

¹⁶¹ Bhardwaj, C. et al. (2020). Why have Multiple Climate Policies for Light-Duty Vehicles? Policy mix rationales, interactions and research gaps. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 135: 309–326. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.03.011>

¹⁶² Lam, A and Mercure, J-F. (2021). Which Policy Mixes are Best for Decarbonising Passenger cars? Simulating Interactions Among taxes, Subsidies and Regulations for the United Kingdom, the United States, Japan, China, and India. *Energy Research and Social Science* 75. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101951>

¹⁶³ Lam, A and Mercure, J-F. (2021). Which policy mixes are best for decarbonising passenger cars? Simulating interactions among taxes, subsidies and regulations for the United Kingdom, the United States, Japan, China, and India. *Energy Research and Social Science* 75. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101951>

时，尽管原油进口的减少和成品油出口的减少之间相互作用，净出口仍然有所下降。印度的情况则正好相反。由于印度比其他国家更加依赖原油进口，石油需求的下降会有助于改善贸易平衡（表现为净出口），使收入用于国内消费，从而有利于提高GDP和促进就业。相比之下，美国是原油和成品油的生产大国，主要受原油出口减少带来的负面影响。欧盟不是原油生产地区，但拥有相当强的炼油能力来满足欧盟内部市场需求。因此，欧盟遭受负面贸易影响较小。在所有国家和情景中，相对GDP影响的范围较小，大约介于-0.1%到+0.6%之间。

此模型的一个重要局限性在于它没有区分由电动汽车制造和由内燃机汽车制造所产生的经济活动和就业机会，也不能确定每个国家的电动汽车是进口的还是国产的。这意味着，该指标没有显示一个国家随着汽车电动化转型而增加或减少其全球汽车销量份额的行为可能带来的经济收益或损失，从而可能低估了刺激国内市场电动汽车供需增长的政策带来的经济效益。

结论

随着电动汽车电池成本的迅速下降，在不久的将来，许多国家的电动汽车成本可能会与化石燃料汽车持平。一旦达到成本平价，电动汽车可以为经济节省大量成本。因此，政府有兴趣寻找能够最大限度地节约资金的政策。

电动汽车补贴可以缩小电动汽车和内燃机汽车之间的成本差距，增强电动汽车对消费者的吸引力，并且只需对内燃机汽车征收小额税款，就可以达到税收中性。然而，由于个人偏好不同且选择有限，仅靠财政激励措施不足以推动快速转型。就零排放汽车强制规定和能效法规等增加市场零排量汽车供应量的政策措施而言，单独实施可能成本较低，与财政激励措施配套使用则更加有效。此外，国际协调行动有助于进一步加快汽车电动化转型。这一转型带来的最重要的宏观经济影响可能是石油消耗量减少，从而可能对国家产生积极或消极的影响，这取决于这些国家处于进口国还是出口国地位。

表10. 支持向电动汽车转型的收入中性方法。a) 打破与内燃机车成本平价所需的电动汽车补贴。b) 2023年主要市场的收入中性税收

A. 2023年每辆车所需补贴（美元）欧洲美国印度	欧洲	美国	印度
EV低挡	0	1900	1000
EV中档	1600	3000	0
EV豪华	4800	4500	NA
B. 2023年每辆车的收入中性税收	欧洲	美国	印度
ICEV 低价	0	90	7
ICEV中档	160	200	0
ICEV 豪华	310	260	NA

图43. 纯电动汽车/插电式混合动力汽车/内燃机汽车的总拥有成本（虚线）和价格（实线）轨迹（中位数和95%置信区间学习率）¹⁶⁴

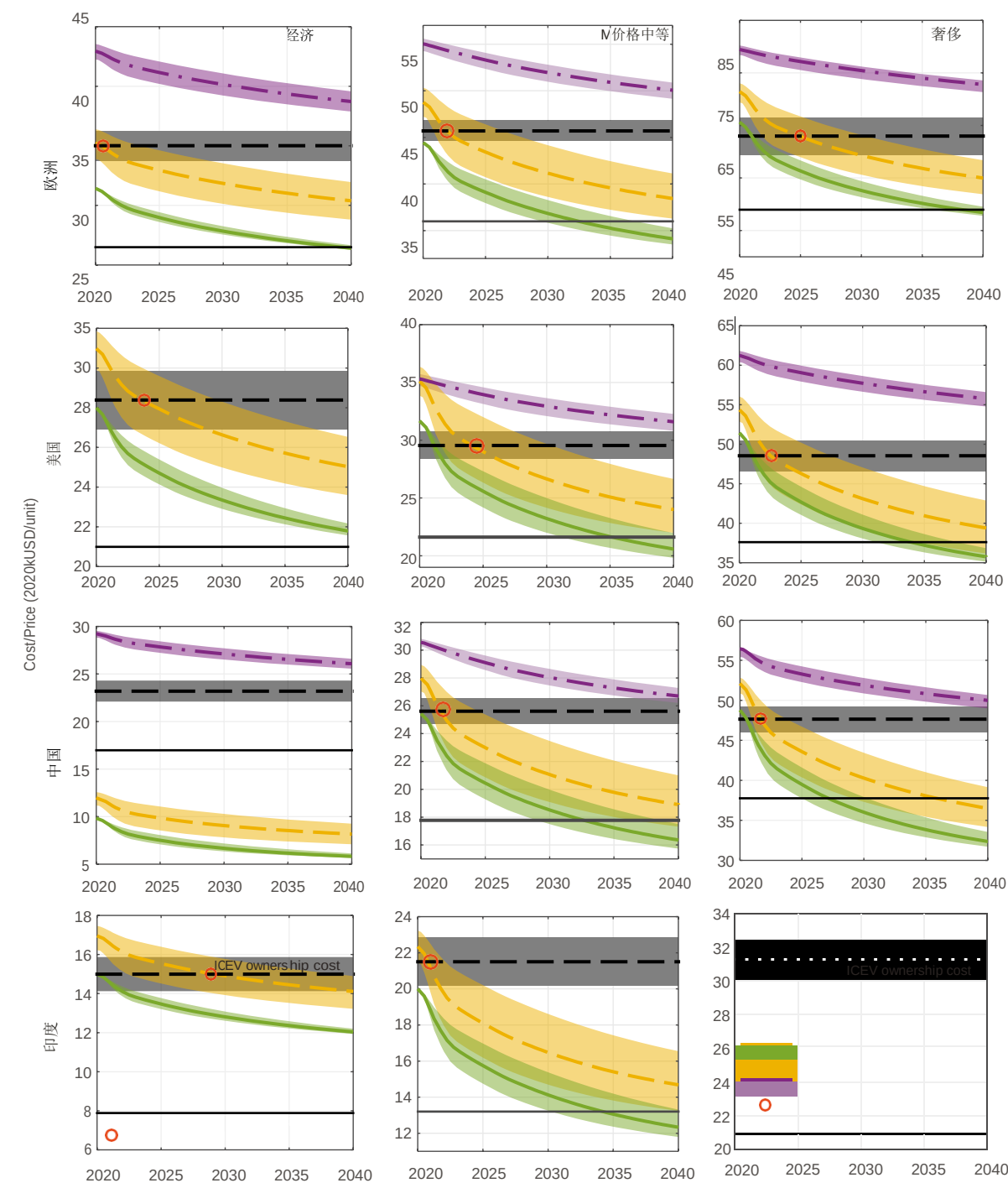
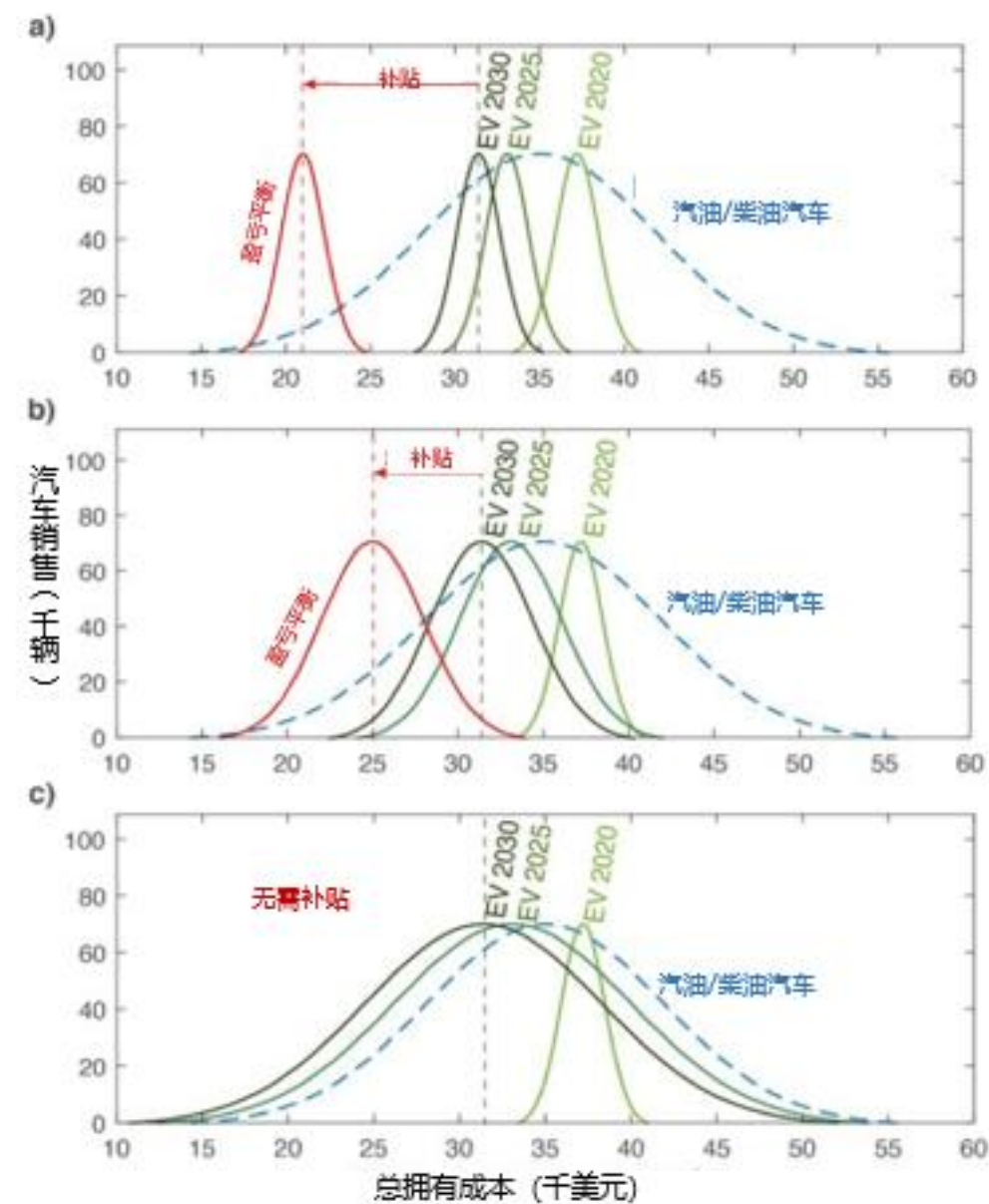


图44. 2025年和2030年车型种类与盈亏平衡补贴的关系。红色曲线代表在市场上每种成本类别中电动汽车的成本低于大多数同等内燃机车型所需的补贴。对于（a）纯电动汽车种类恒定，（b）纯电动汽车种类加倍和（c）纯电动汽车种类与当前汽油/柴油车辆种类匹配，这种盈亏平衡补贴随着成本的下降而减少。在（a）中，缩小成本差异所需的补贴大于（b）和（c）中的补贴，因为市场上有大量成本较低的内燃机汽车车型。当电动汽车的种类多样性达到内燃机汽车的水平时，消费者就有可能在没有补贴的情况下购买同等电动汽车车型



¹⁶⁴ Lam, A., Mercure, J-F (2022). Evidence for a global electric vehicle tipping point. GSI Working paper series number 2022/01.
https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/globalsystemsinsitute/documents/Lam_et_al_Evidence_for_a_global_EV_TP.pdf

图47. 因单独使用不同政策而产生的电动车部署成本

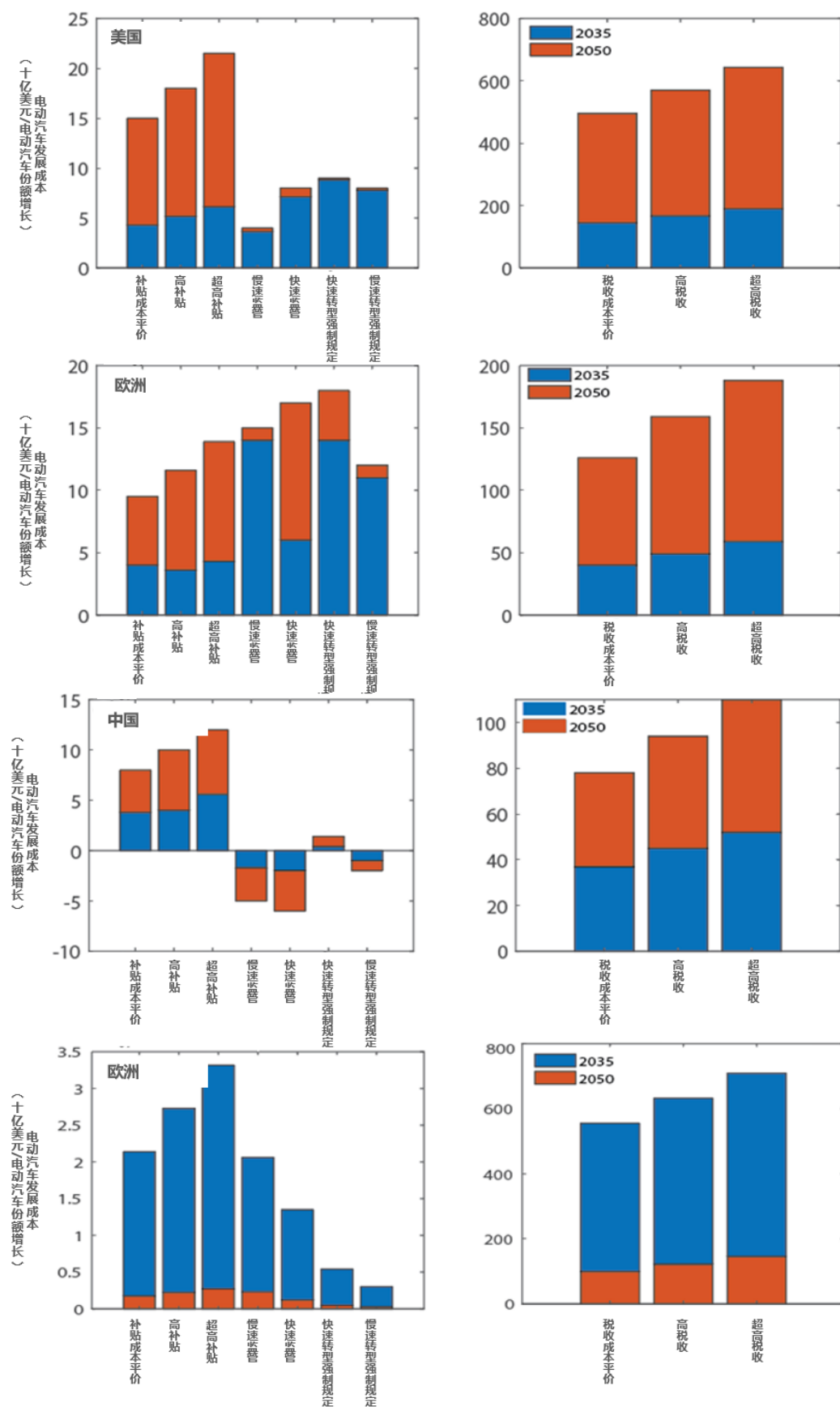


图48. 不同政策假设下的二氧化碳减排成本

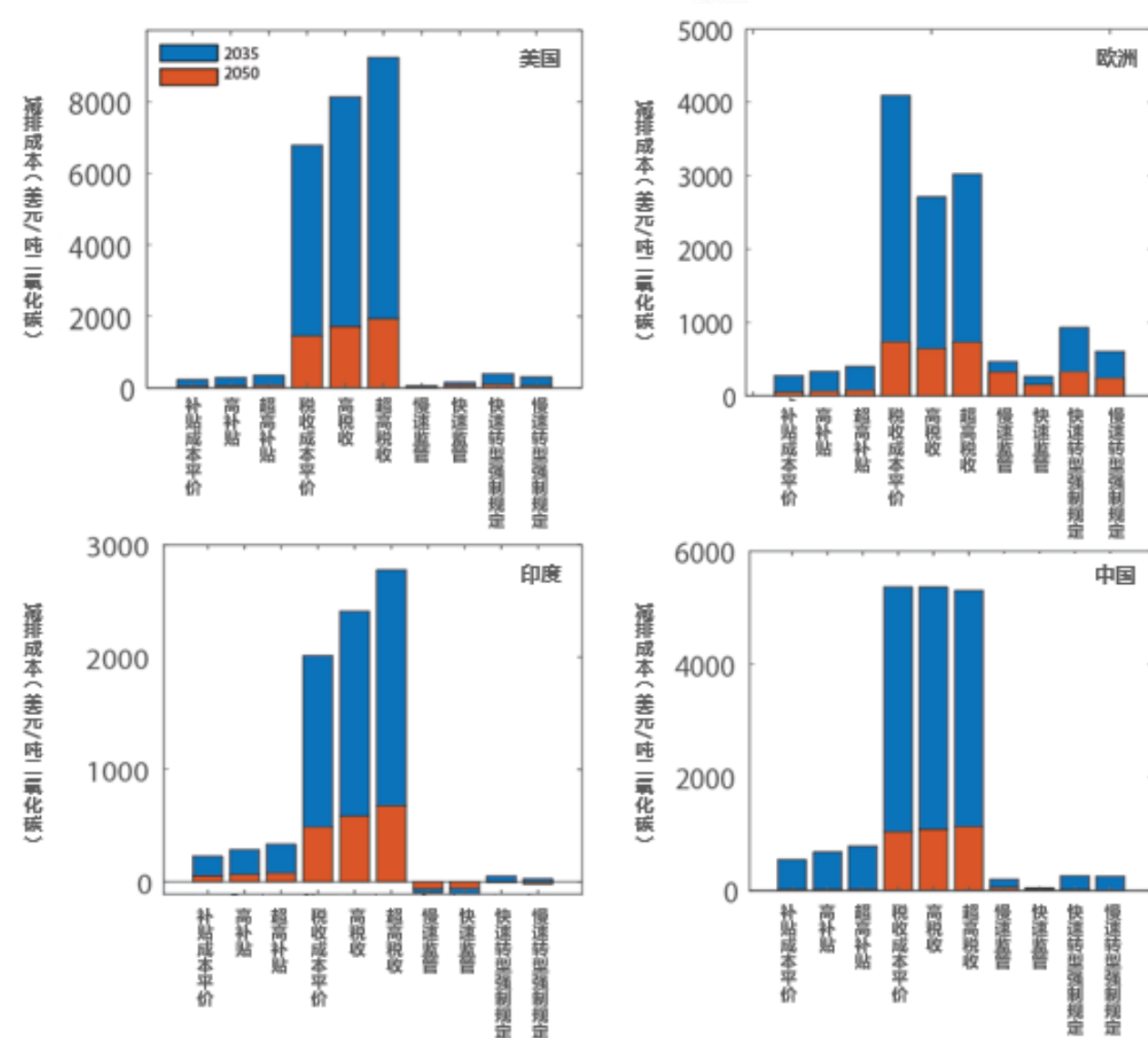


图49. 不同政策假设下基准电动车的成本

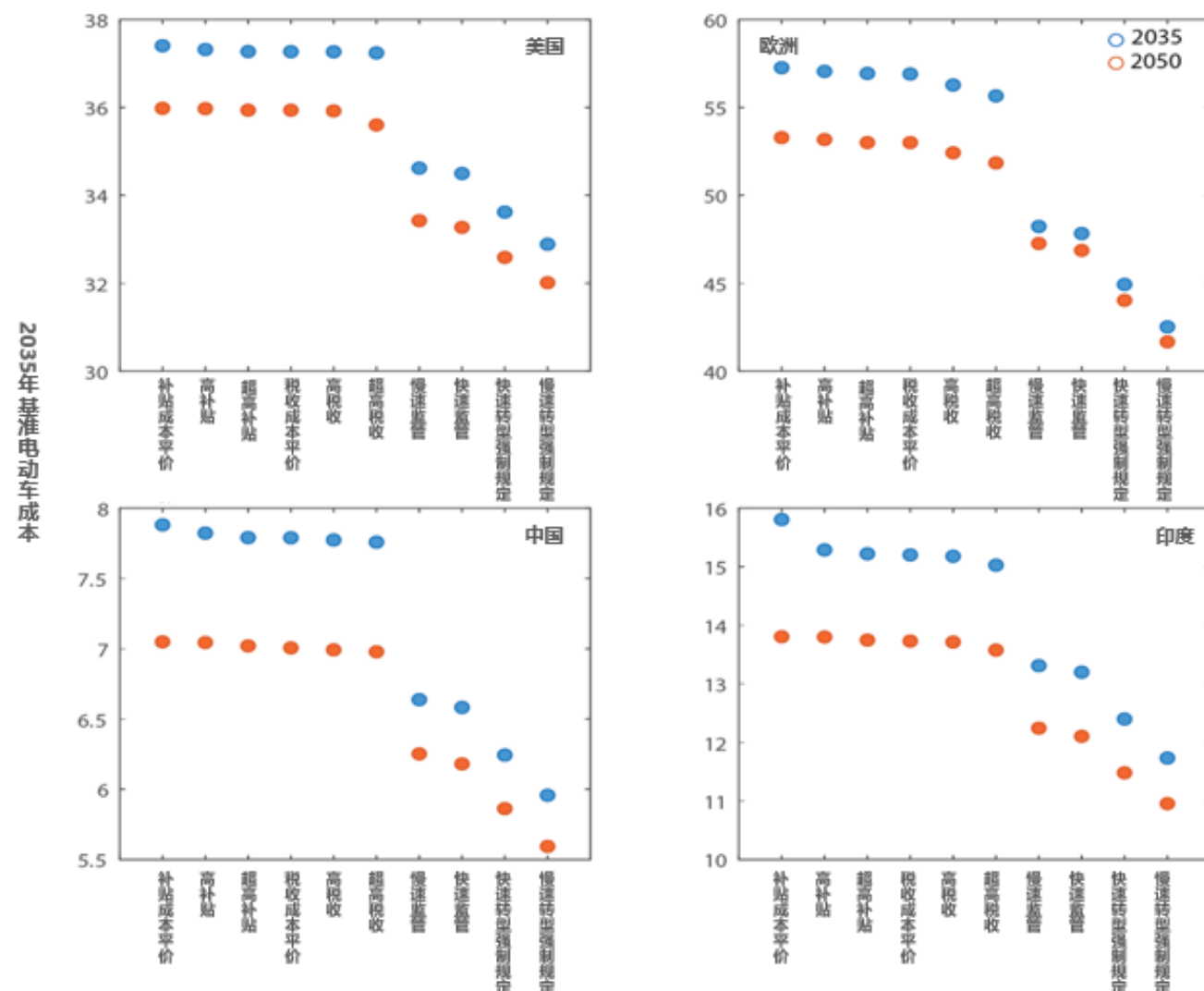


图50. 不同政策假设下的累积能源消耗量

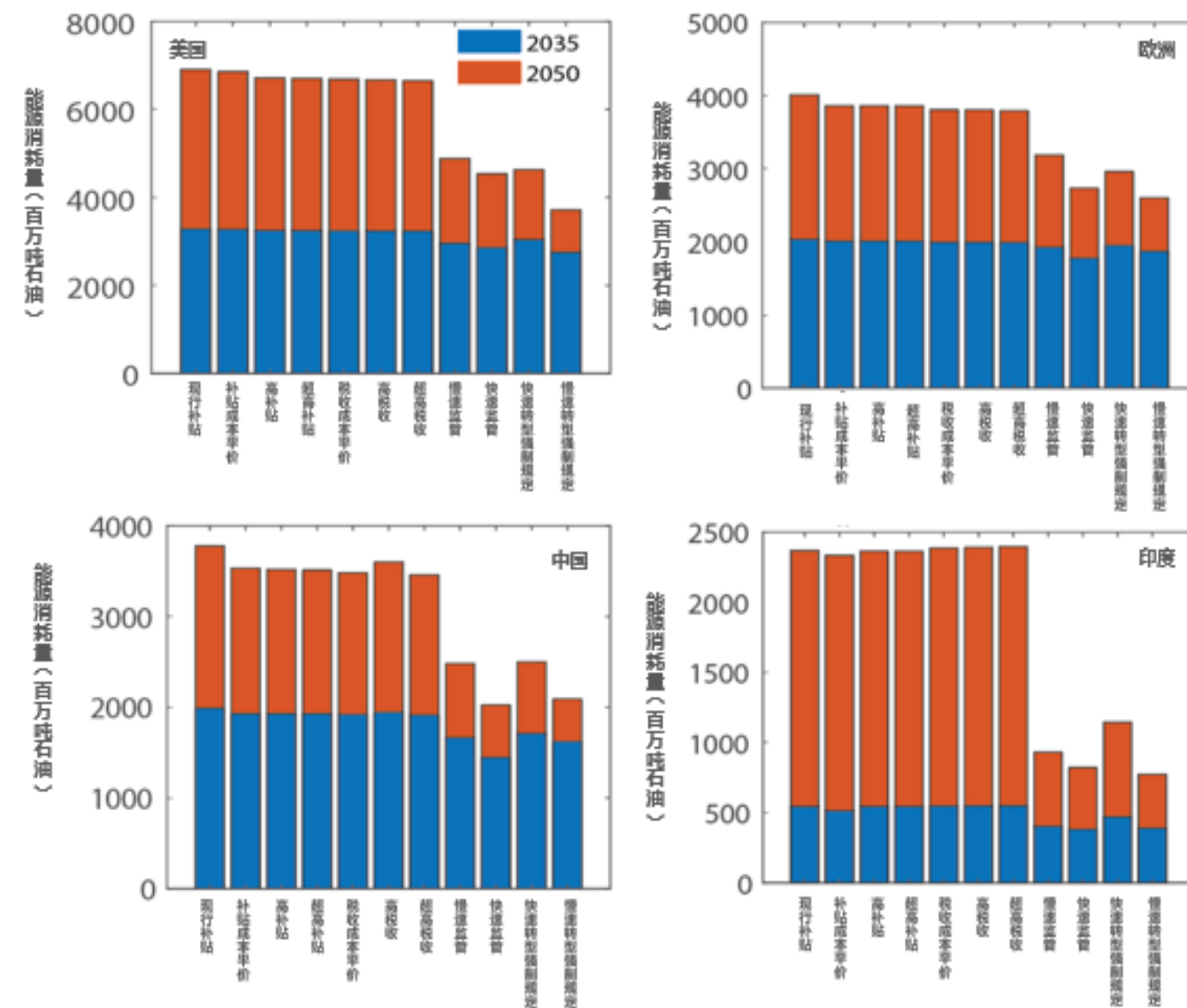


图51. 不同政策假设下的累计二氧化碳减排量

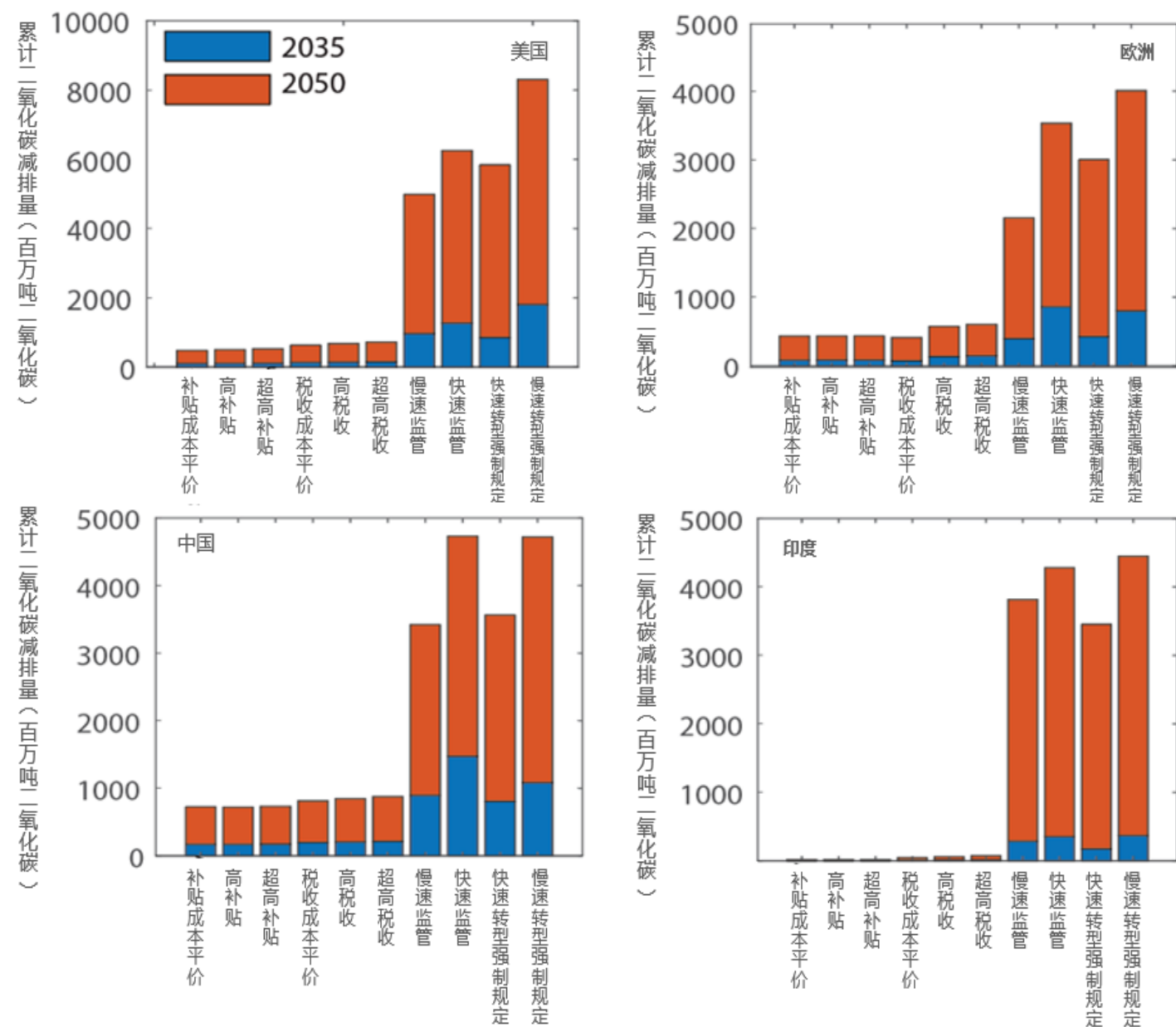
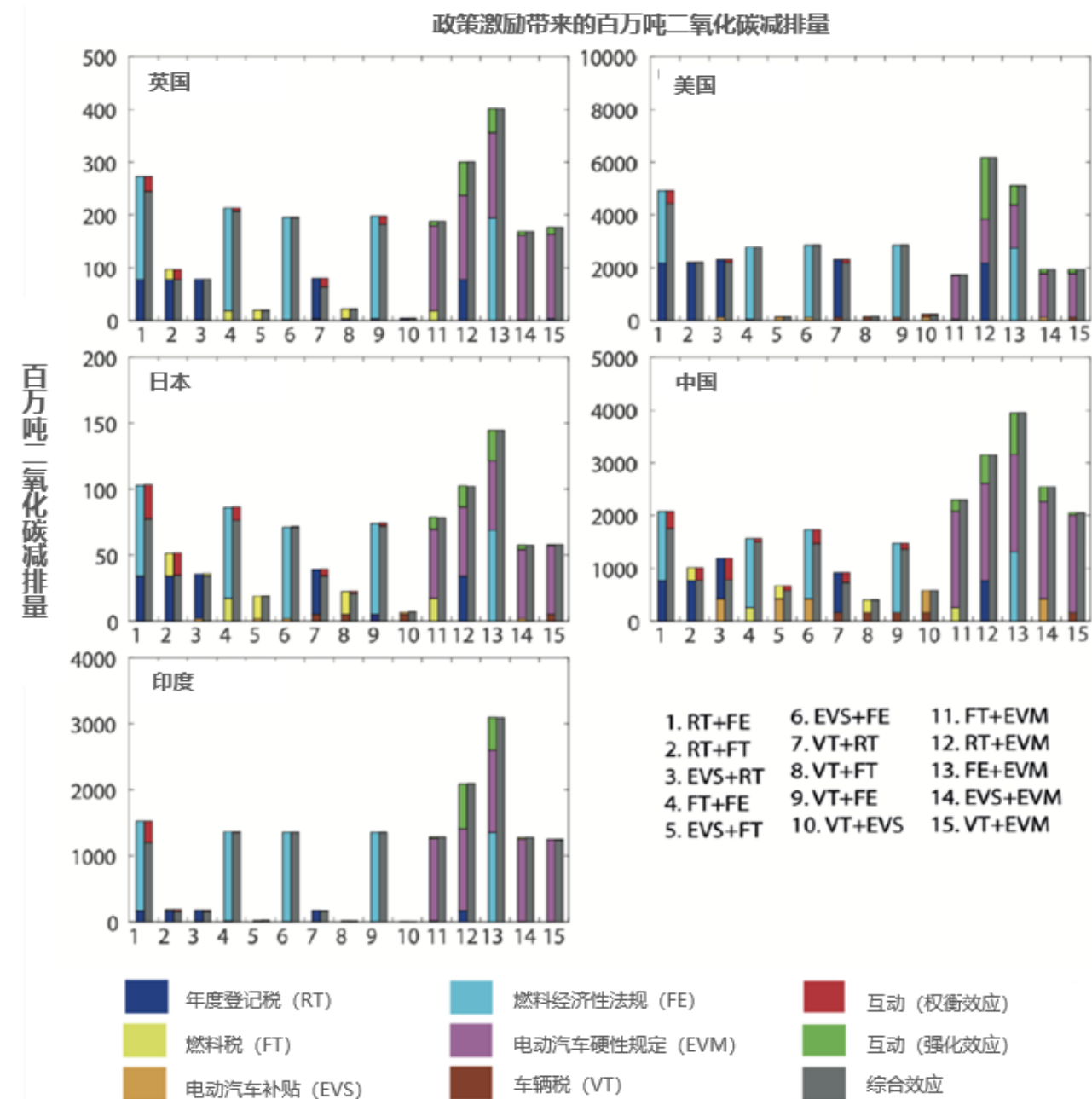
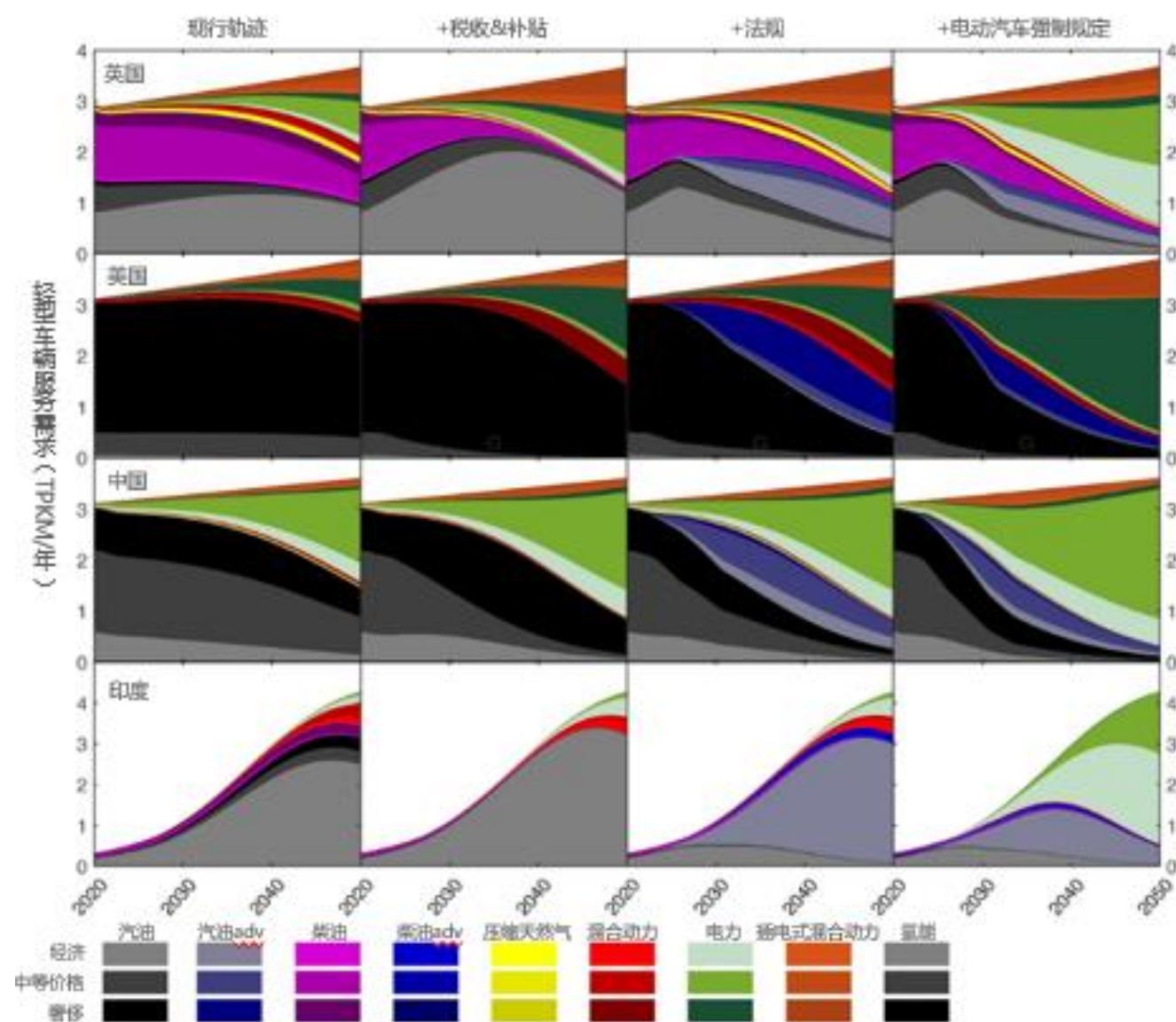


图52. 在不同政策情景下实现快速交通脱碳的政策情景¹⁶⁶



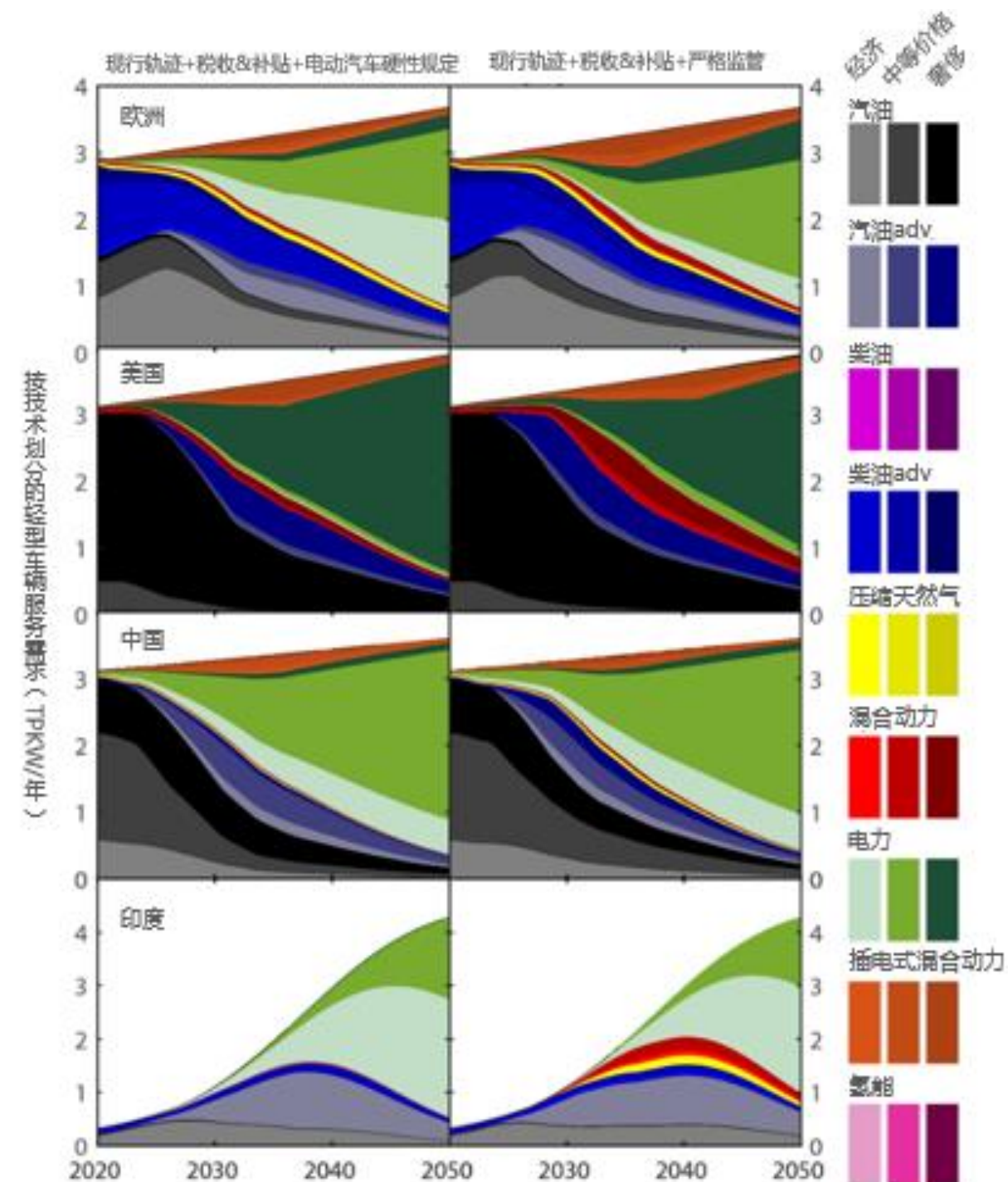
¹⁶⁶ Lam, A. and Mercure, J-F. (2021). Which Policy Mixes are Best for Decarbonising Passenger cars? Simulating interactions among taxes, subsidies and regulations for the United Kingdom, the United States, Japan, China, and India. Energy Research and Social Science 75. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101951>

图53. 所有主要汽车市场的综合电动汽车政策情景模拟。当前轨迹（A）显示了在没有额外政策的情况下市场的走向。（B）增加更严格的道路和车辆税以及电动汽车补贴的影响有限。（C）燃料经济性法规促进了传统车辆的减排，但对电动汽车的推广影响有限。（D）增加零排放车辆的硬性要求增强了对车辆使用者的影响，从而大大增强了其他政策的效果¹⁶⁷



¹⁶⁷ Lam, A., Mercure, J-F (2022). Evidence for a Global Electric Vehicle Tipping Point. GSI Working paper series number 2022/01. https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/globalsystemsinsitute/documents/Lam_et_al_Evidence_for_a_global_EV_TP.pdf

图54. 模拟严格法规和零排放车辆硬性规定。A列显示的车型构成模拟情景假设在税收和补贴的基础上采用零排放车辆硬性规定。B栏显示的车型构成模拟情景假设除了税收和补贴之外，还采用了逐步收紧的燃油经济性法规来逐步淘汰内燃机汽车¹⁶⁸



¹⁶⁸ Lam, A., Mercure, J-F (2022). Evidence for a Global Electric Vehicle Tipping Point. GSI Working paper series number 2022/01. https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/globalsystemsinsitute/documents/Lam_et_al_Evidence_for_a_global_EV_TP.pdf

图55. 国际合作使成本平价提前实现。为降低纯电动汽车成本的不同国际合作情景下，分析内燃机汽车和纯电动汽车之间的成本平价。越多国家加入进来，纯电动汽车和内燃机汽车之间的成本差异就能越快消除。加入世界其他地区（RoW）的影响仅在欧洲和美国可见，这两个地区的成本平价实现得较晚。加入印度的影响没有显示出来，因为引起的差异很小，且相对于显示的其他市场，印度市场仍然相对较小¹⁶⁹

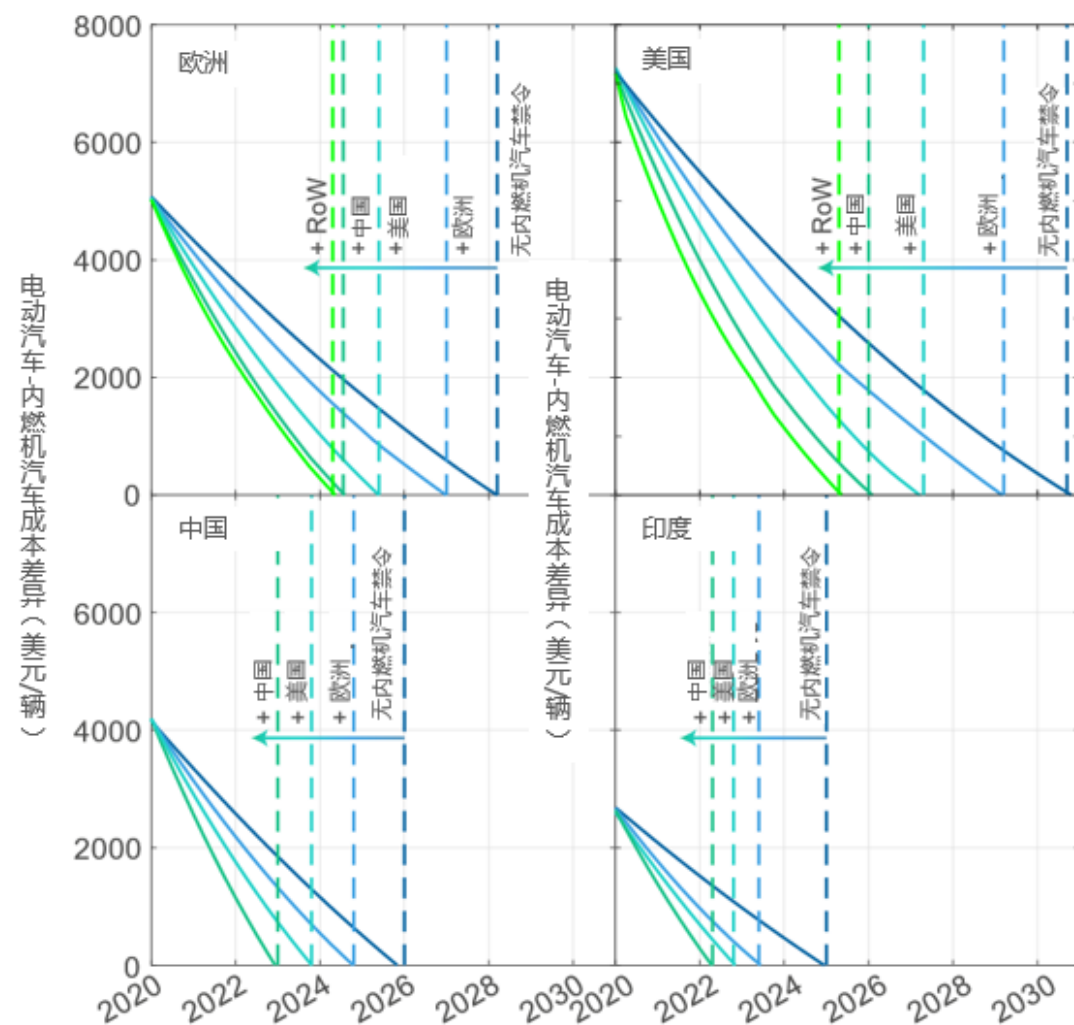
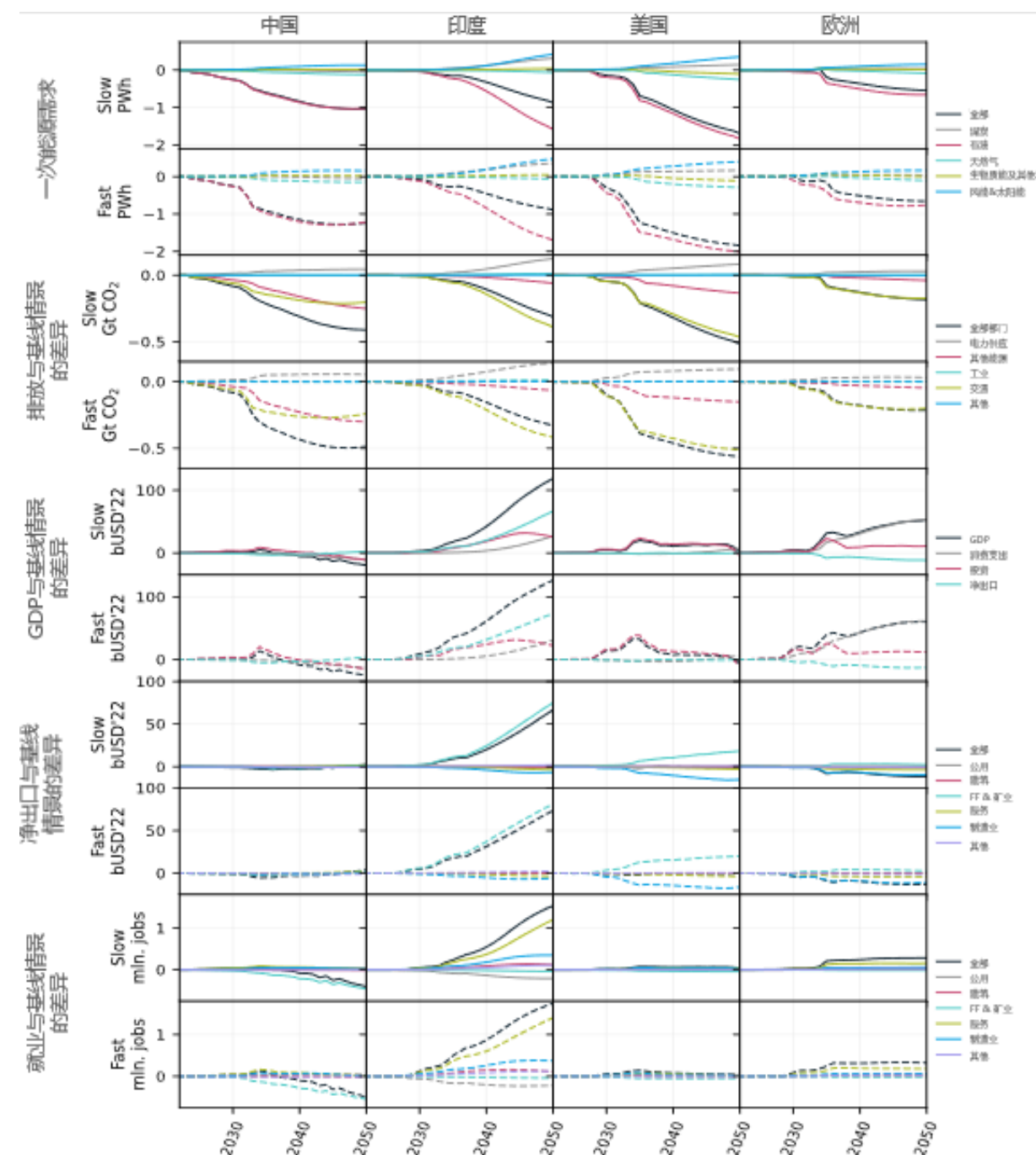


图56. 与参考情景相比，慢速和快速转型对一次能源需求（PED）、排放、GDP、净出口和就业的影响



¹⁶⁹ Lam, A., Mercure, J-F (2022). Evidence for a Global Electric Vehicle Tipping Point. GSI Working paper series number 2022/01. https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/globalssystemsinstitute/documents/Lam_et_al_Evidence_for_a_global_EV_TP.pdf



案例分析：

支持可持续农业集约化：全系统基于主体建模方法

Matteo Coronese（意大利比萨圣安娜高等学校），Martina Occelli（意大利比萨圣安娜高等学校&美国伊萨卡康奈尔大学），Francesco Lamperti（意大利比萨圣安娜高等学校&米兰RFF-CMCC欧洲经济与环境研究所），Andrea Roventini（意大利比萨圣安娜高等学校& 法国经济形势观察所（OFCE），法国巴黎政治学院）

政策问题：是否应该从制度上支持可持续农业集约化，哪些因素增加了制度干预的迫切性？

地区：全球范围

研究方法：基于主体建模

主要发现：（1）应从制度层面促进和激励可持续农业；（2）在模拟的早期阶段，制度的保护和培育尤为有益；（3）支持性政策包括税收手段和命令与控制手段相结合；（4）如果支持性政策出台过晚，巨大的技术鸿沟可能会导致陷入不可持续农业实践的锁定情景。

交流互动：本案例分析是圣安娜高等学校经济研究所、生命科学研究所和植物科学中心的研究团队长期密切合作的成果。在利益相关方会议期间，深入讨论了研究主题、研究问题和建模，参会者包括巴西政府官员和巴西国家经济和社会发展银行（BNDES）代表。因此，本案例分析是研究人员与政策利益相关方密切合作的产物。

摘要：作者使用基于主体建模（ABM）来考量用于弥补可持续农业生产率差距的若干支持性政策。具体而言，该研究提出了agriLOVE模型，模型特点是高度不确定性，强化了企业/农场之间模拟竞争的反馈回路及异质性。

介绍

由于全球人口预计在下个世纪将稳步增长，而土壤退化已经影响到全球主要农作物的种植¹⁶⁹，农业系统需要迅速找到可持续农业集约化战略，确保用可行的方法实现粮食安全。^{170,171,172,173}支持可持续农业集约化这一需求至关重要，因为农业部门正在慢慢侵蚀重要环境资源，危及环境极限，并可能激活积极/消极临界点。¹⁷⁴

我们研究了在确保粮食安全的同时可能会阻碍或促进这种转型的因素，以及随之而来的政策影响。更明确地说，从政策角度来看，问题在于：是否应该从制度上支持可持续集约化，哪些因素增加了制度干预的紧迫性？

建模方法

在典型的综合评估模型（IAMs）方面，基于主体建模（ABMs）提供了一个有效的替代范式来研究这些问题。由于社会环境相互作用的内在复杂性，这些模型被越来越多地应用到农业经济领域。^{175,176,177,178}此外，很容易用它们来真实的体现决策、社会中不同行动者之间的复杂的社会互动（例如，网络或财产结构）、自我强化反馈回路的存在、真实内置路径依赖性以及生物物理子模型的整合，还可以精准的体现非平凡空间交互。

我们采用了agriLOVE模型来调查可能有助于或阻碍可持续农业转型的因素。¹⁷⁹与其他农业ABM模型不同，agriLOVE的一个关键特征是它能

清楚地模拟农业中的内生技术变化从而允许对技术范式演变的不同路径依赖轨迹、使用这些技术范式的主体数量以及它们在粮食安全和自然资源耗竭方面的总成果进行研究。因此，该模型是测试备选政策、制度和环境情景以及评估其相对风险和机会的试验台。此方法符合风险-机会分析(ROA)框架。¹⁸⁰该模型嵌入了ROA方法的核心概念，包括i) 彻底的不确定性（主体不知道世界上可能实施可持续集约化农业的国家分布，也不能推知其支持性政策），ii) 路径依赖性，模型中出现的内生情景彼此不同，关键取决于所采取的行动和过去观察到的可持续集约化农业国家，iii) 持续不平衡性，因为模型经济没有达到供需平衡的强加趋势。但是由于高度异质的行为者之间的持续协调，模型经济趋于按稳定的轨迹发展，以及iv) 原因和结果不成比例，即通过路径依赖性和高度非线性的动态发展，农业系统的小幅扰动会导致完全不同的轨迹。在目前阶段，该模型没有针对特定区域进行参数化，而是代表了以小农农业为主要特征的宏观区域。

该模型的特征是一系列主体农场，在空间分明的网格上经营，网格分别代表着耕地和未开垦的土地或森林等自然资源（图58C）。每个农场结合劳动力和土地生产相同的粮食。公司持有农场，收集生产的作物，将其在一个集中垄断市场上出售。市场结果反过来会影响主体农场/公司的未来决策。,

¹⁷⁰ Ray, D.K. et al. (2012). Recent Patterns of Crop Yield Growth and Stagnation. Nature communications, 3: 1293.

¹⁷¹ Rockström, J. et al. (2017). Sustainable Intensification of Agriculture for Human Prosperity and Global Sustainability. Ambio, 46(1): 4-17.

¹⁷² Ramankutty, N. et al. (2018). Trends in Global Agricultural Land Use: Implications for Environmental Health and Food Security. Annual Review of Plant Biology 69: 789-815.

¹⁷³ Tilman, D. et al. (2002). Agricultural Sustainability and Intensive Production Practices. Nature, 418(6898): 671-677.

¹⁷⁴ Howden, S.M. et al. (2007). Adapting Agriculture to Climate Change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(50): 19691-19696.

¹⁷⁵ Steffen, W. et al. (2015). Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, 347(6223): 1259855.

¹⁷⁶ Filatova, T. et al. (2013). Spatial Agent-Based Models for Socio-Ecological Systems: Challenges and Prospects. Environmental Modelling & Software 45: 1-7.

¹⁷⁷ Berger, T. (2001). Agent-based Spatial Models Applied to Agriculture: A simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. Agricultural Economics 25(2-3): 245-260.

¹⁷⁸ Bert, F. E. et al. (2011). An Agent Based Model to Simulate Structural and Land use Changes in Agricultural Systems of the Argentine Pampas. Ecological Modelling, 222(19): 3486-3499.

¹⁷⁹ Berger, T. and Troost, C. (2014). Agent-based Modelling of Climate Adaptation and Mitigation Options in Agriculture. Journal of Agricultural Economics, 65(2): 323-348.

¹⁸⁰ Coronese, M. et al. (Forthcoming). Agrilove: Agriculture, Land-Use and Technical Change in an Evolutionary, Agent-Based Model. Ecological Economics.

¹⁸¹ Mercure, J-F. et al. (2021). Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. Global Environmental Change, 70: 102359.

鉴于技术和环境方面的强烈不确定性，主体学习并适应性地采用启发法，以指导关于参与创新和模仿活动方面的决策。例如，他们根据现金流来动态调整投入这些昂贵活动的资源数量，并积极选择附近表现最佳的农场进行模仿。此外，主体还通过雇佣工人，收购新农场，砍伐未开垦森林，以及放弃低产耕地等手段，试图适应性地调整生产，以满足预期未来需求水平，尽管预测不一定准确。寻找提高生产率的新方法的过程往往代价高昂，而创新和模仿活动不断演化体现了这一过程的要点，包括不同维度的动态学习和知识传播模式（技术邻近、空间邻近和网络效应）。

正如文献中常见的分类法¹⁸¹，我们在此特别关注对传统农业技术与可持续农业技术之间二分法的建模，并调查这些不同技术轨迹的动态扩散和学习模式。通常，传统农业实践会使用合成化学产品和化肥来最大限度地提高特定作物产量，这些作物通常属于转基因，而且是单一种植。这些方法需要投入大量化学物质和能源，并且可能会危害

景观的生态系统¹⁸²。相比之下，可持续农业的定义相对广泛，通常指任何在生产过程中重新整合土壤养分的农业模式。可持续农业依靠适应当地条件的生态过程、生物多样性和生态循环，而非投入大量化学品。¹⁸³这种模式通常引发环境正外部性。¹⁸⁴

我们假设传统技术往往比可持续技术在挖掘提高生产率的创新方法方面有更大空间（图58B），这体现为历史上出现更高产量。传统技术还可以带来对森林等可用自然资源的更大程度的开发。然而，现实表明，长期使用传统技术会使土壤退化，从而导致生产率下降，甚至可能导致产量停滞不前。另一方面，可持续技术尽管增长潜力较小，但不会导致土壤耗竭。主体可以根据感知到的邻近地区特定技术的生产率，动态地选择使用哪种技术（图58A）。

主体当前的技术选择不仅会影响当前的粮食价格和粮食安全，而且会通过创新支出和模仿/扩散模式的反馈回路动态地塑造农业部门内不同技术范式的发展轨迹。如此一来，随着传统农民依靠增加劳动力或砍伐森林来应对产量停滞问题，该系统会向可持续转型、传统锁定情景

（产量突然崩溃和粮食安全）或延迟转型（超调）发展（图58）。从粮食安全、粮食价格和自然资源枯竭的角度来看，锁定情景和延迟转型都会带来很多弊端。而这些内生情景发生的可能性关键取决于多个因素。

图58：模型的三次不同运行结果例示了模型中观察到的主要动态变化：可持续农业快速转型、超调（或延迟转型）和传统锁定情景。图表显示了每次运行中总需求和总供给之间的差距以及粮食价格的动态变化。其中，x轴代表模型模拟的时间步长，y轴代表相对于初始值（100）的变化。红色区域对应粮食短缺。

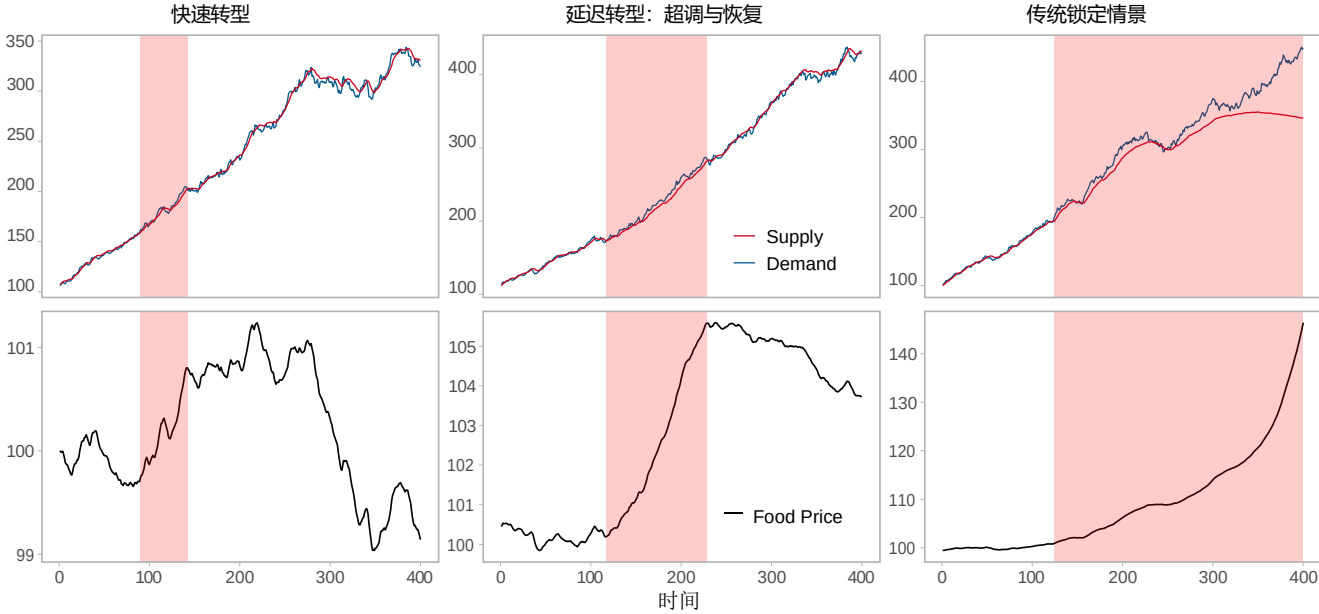
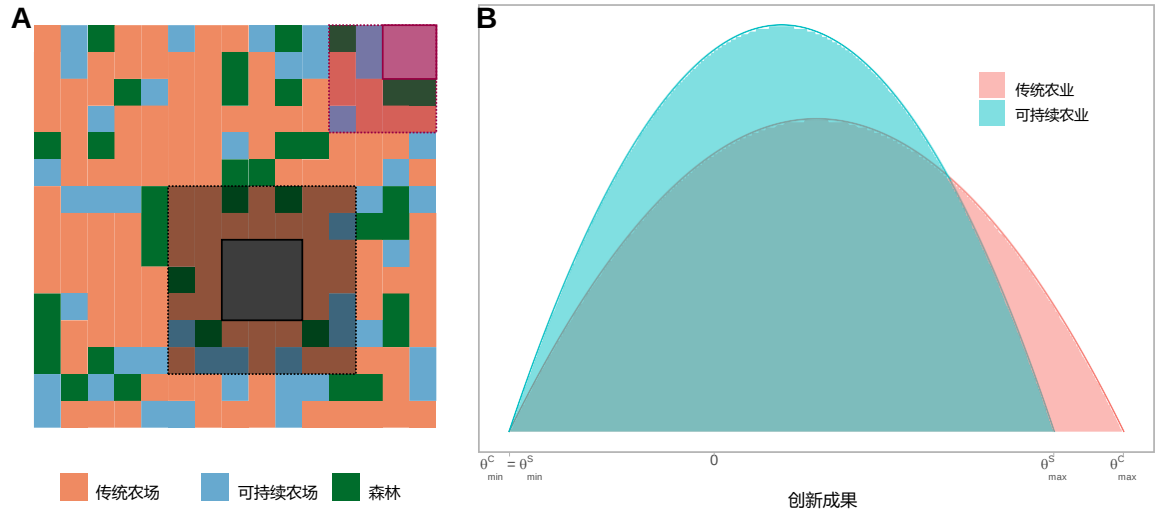


图57：图A：评估不同技术方案的相对绩效时，模型空间网格上不同位置的不同观测条件（因此产生不同信息组）的农场示例。图B：传统农业和可持续农业的创新成果分布。x轴代表生产率提高幅度，y轴代表相对概率。传统农业表示出更多创新机会，带来了更高的创新潜力和产量（不考虑土壤退化问题）



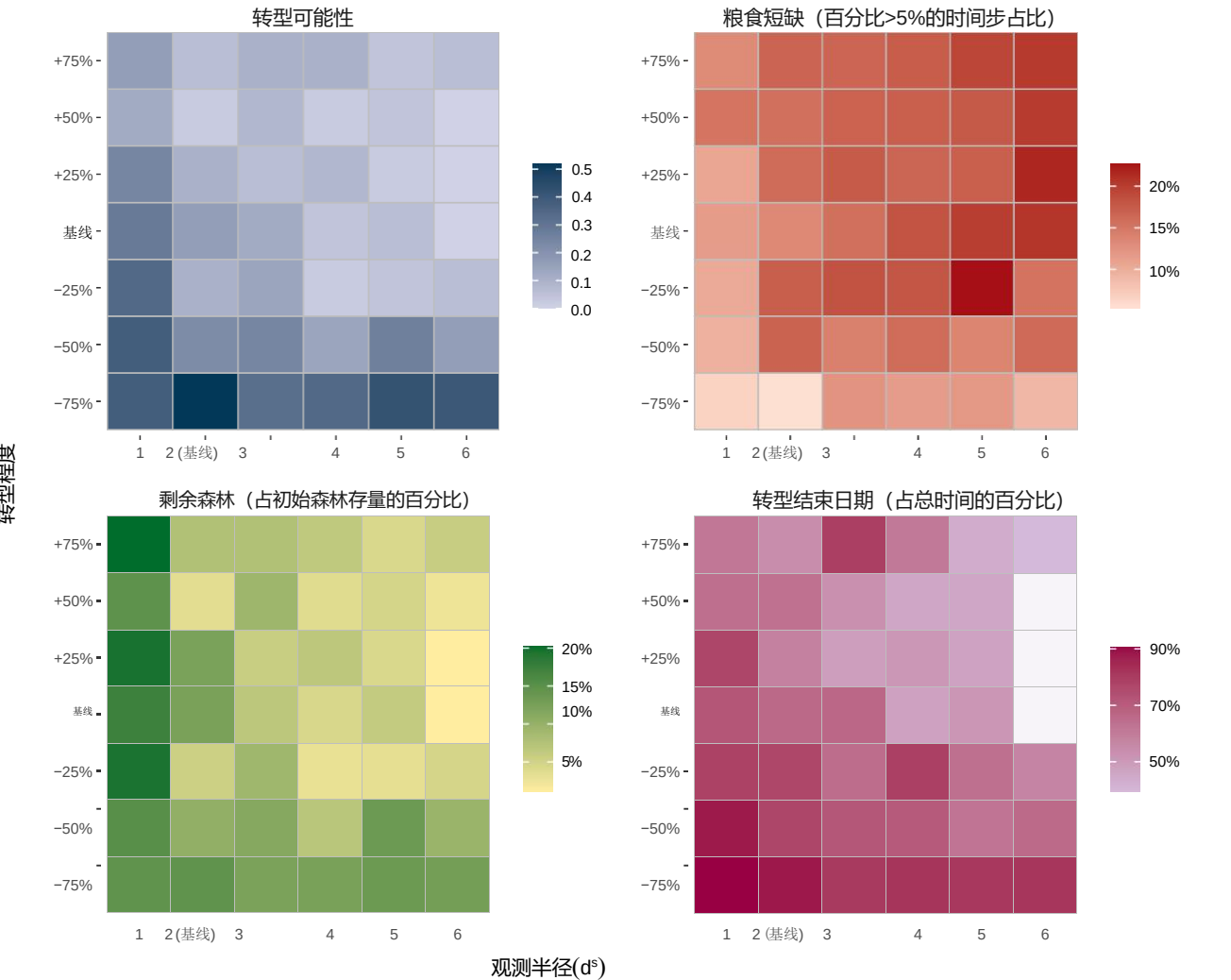
¹⁸² Saifi, B. and Drake, L. (2008). A Coevolutionary Model for Promoting Agricultural Sustainability. *Ecological Economics*, 65(1): 24-34
¹⁸³ Schrama, M. et al. (2018). Crop Yield Gap and Stability in Organic and Conventional Farming Systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 256: 123-130.
¹⁸⁴ Gomiero, T. et al. (2011). Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional Vs. Organic Agriculture. *Critical Reviews In Plant Sciences*, 30(1-2): 95-124
¹⁸⁵ Rockström, J. et al. (2017). Sustainable Intensification of Agriculture for Human Prosperity and Global Sustainability. *Ambio*, 46(1): 4-17.

结果

总体而言，分析表明，如果缺乏适当的政策支持，农业系统的能力不足以支撑可持续转型，这是由于激励措施不当和协调失败。比如，耗竭自然资源或过度开垦土壤等短期内提高生产率的方法尽管会造成长期隐患，但是通常能给农场带来竞争优势。而通过路径依赖，这会导致采用传统

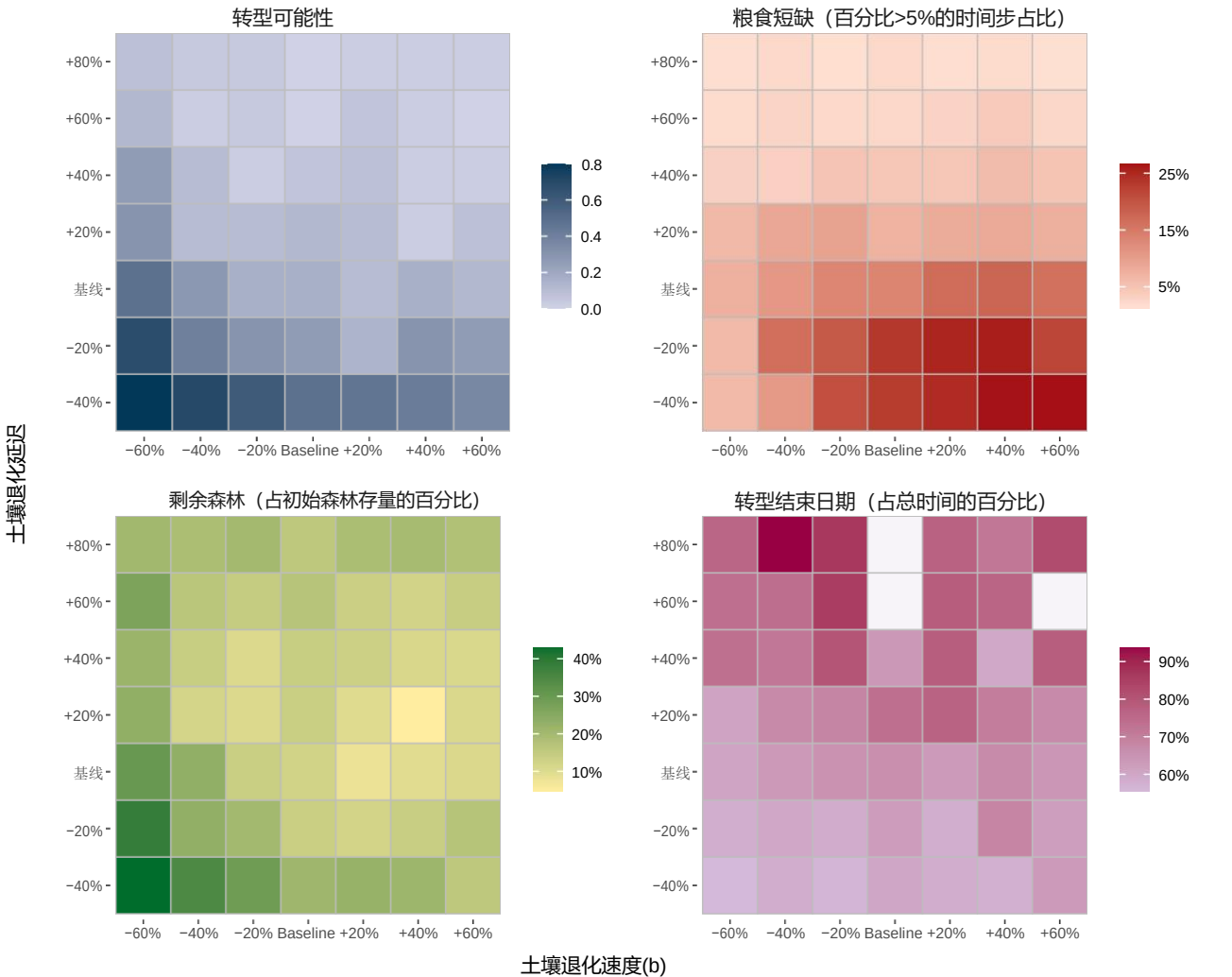
技术的农场获得更高的市场份额，反过来会进一步延迟可持续发展轨迹所需的集体学习过程。如图59所示，随着转型强度（用于衡量农场快速改变技术的意愿）和可用信息的变化，转型可能性迅速下降，说明从事可持续农业的农民的市场地位脆弱且不稳定。

图59：不同转换强度值的热图（当选择农业制度时，主体对传统和可持续之间的感知差异给予的权重）和观测半径（见图57A）。转型可能性被定义为蒙特卡洛模型（Monte Carlo model）运行中，可持续农场的最终份额大于90%所占的次数比例。转型结束日期表示转型结束时占模拟时间长度的百分比，用以衡量转型速度。粮食短缺的定义是粮食供应低于粮食需求5%以上时间步的占比。剩余森林表示为占初始森林存量的百分比。粮食短缺和剩余森林利用蒙特卡洛模型衡量。蒙特卡洛模型重复运行50次



相反，图60显示，当面临快速和延迟的土壤退化现象时，农业系统对可持续转型的支持度尤为低。

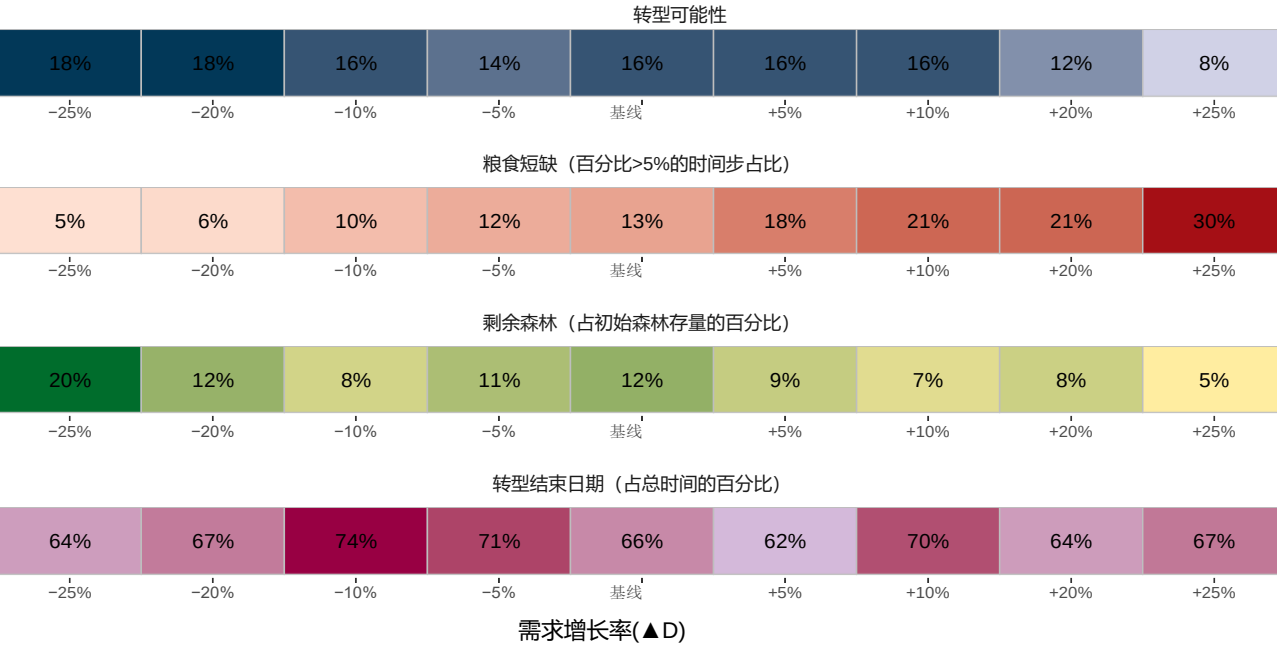
图60：热图显示了土壤退化速度值和延迟值变化，前者表示一旦生产率下降的首个迹象出现，达到土壤破坏极限的最快速度，后者表示随着使用时间的延长，土壤破坏效应的首个迹象出现的延迟时间。转型可能性被定义为蒙特卡洛模型运行中，可持续农场的最终份额大于90%所占的次数比例。转型结束日期表示转型结束时占模拟时间长度的百分比，用以衡量转型速度。粮食短缺的定义是粮食供应低于粮食需求5%以上时间步的占比。剩余森林表示为占初始森林存量的百分比。粮食短缺和剩余森林利用蒙特卡洛模型衡量。蒙特卡洛模型重复运行50次



研究发现强调，环境对生产率和产量的反馈复杂、转型的可能性受到粮食需求增长的负面影响延迟且不易测量，在处理这些反馈时，市场的反（图61），而人口快速增长情景下粮食安全问

馈可能不足以支持及时的成功转型。总体而言，题成为了重要关切。

图61：不同粮食需求增长率的热图。转型可能性被定义为蒙特卡洛模型运行中，可持续农场的最终份额大于90%所占的次数比例。转型结束日期表示转型结束时占模拟时间长度的百分比，用以衡量转型速度。粮食短缺的定义是粮食供应低于粮食需求5%以上时间步的占比。剩余森林表示为占初始森林存量的百分比。粮食短缺和剩余森林利用蒙特卡洛模型衡量。蒙特卡洛模型重复运行50次



最后，可持续扩散的拓扑结构（及其与可用自然资源的相互作用）也很重要。如图62A和62B所示，聚集从事可持续农业的农民，可能有利于当地模仿，但扩散速度会受到当地技术吸收水平的影响而有所减缓，因此不会显著影响转型可能性。然而，使自然资源集聚（从而更不容易开发）在一定程度上有利于可持续转型（图62C），因为可以阻止传统农民将砍伐森林作为应对产量下降的短期解决办法。

图62：传统农场和可持续农场不同初始空间分布的热图。转型可能性被定义为蒙特卡洛模型运行中，可持续农场的最终份额大于90%所占的次数比例。转型结束日期表示转型结束时占模拟时间长度的百分比，用以衡量转型速度。粮食短缺的定义是粮食供应低于粮食需求5%以上时间步的占比。剩余森林表示为占初始森林存量的百分比。粮食短缺和剩余森林利用蒙特卡洛模型衡量。蒙特卡洛模型重复运行50次

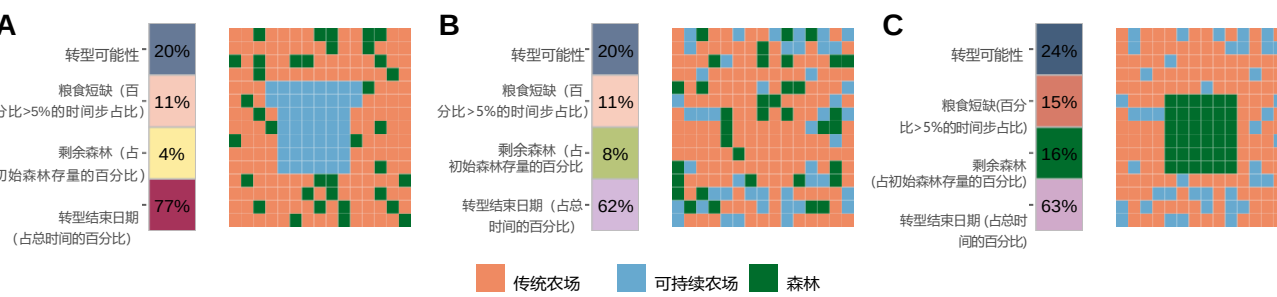
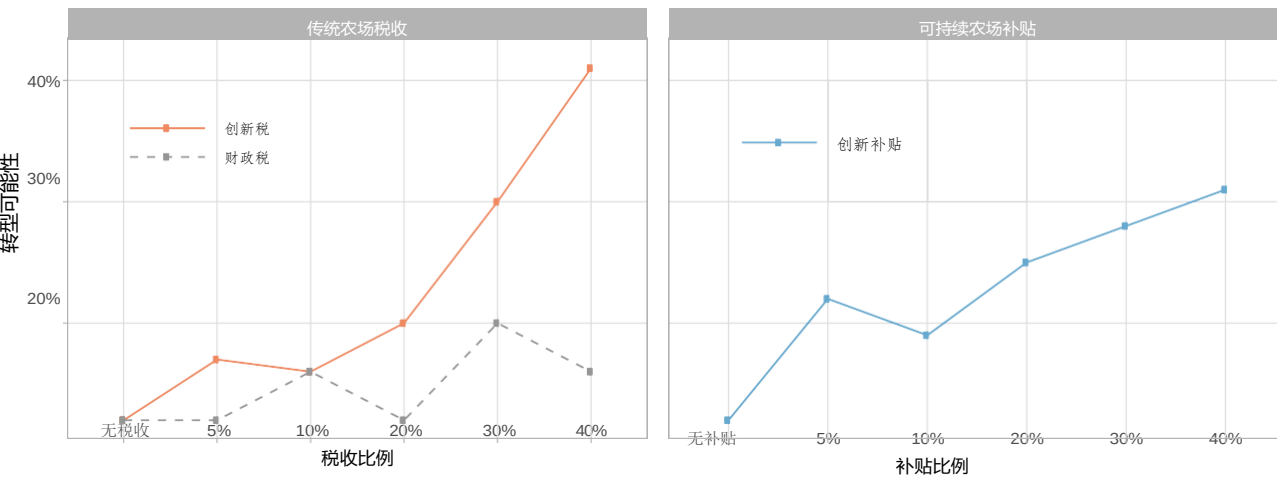


图63：不同政策带来的转型可能性。创新补贴/税收的比例为可持续/传统农场以前创新支出所占的百分比。财政税额相当于创新税的货币等值。转型可能性被定义为蒙特卡洛模型运行中，可持续农场的最终份额大于90%所占的次数比例。转型结束日期表示转型结束时占模拟时间长度的百分比，用以衡量转型速度。蒙特卡洛模型重复运行100次



政策影响和结论

分析得出的结论是，应该从制度层面促进和激励可持续农业，而且在模拟早期阶段制度对可持续农业的保护和培育尤其有益。支持性政策可能包括税收手段和监管手段的结合。

在需求侧，旨在减少粮食浪费的政策肯定可以有助于缓解粮食短缺，不过在高人口增长率的情景下，这些政策在缩小供需差距方面的效果肯定会逐步减弱。空间动态也很重要：鼓励集群化社区有助于相互模仿和动态学习，但应该辅之支持性政策来加快转型速度（例如，规定在特定日期内使用可持续技术耕种的土地应占的最低百分比）。

监管政策可能会非常有效（如直接禁止砍伐森林），但如果缺乏及时的支持性政策来缩小可持续技术和传统技术之间的生产率差距，仍会导致短期内出现严重的粮食短缺。税收政策可以体现为对传统农场征税和对可持续农场激励相结合。然而，为了最大限度地发挥它们在提高转型可能性方面的积极影响、尽可能减少扭曲性影响，税

收政策应该精准用于增加资源投入，支持农场在可持续农业活动的创新和模仿。

图63显示了监管政策和税收政策这两种不同政策的效果。尽管其有效性并不随着补贴额度的增加而线性增加，可持续农场补贴已经以相对较低的金额有效地增加了转型可能性。这表明尽管由于传统技术和可持续技术之间的结构性差距，补贴有效性有限，但它仍然是推动可持续集约化的有力工具（见图57B）。

另一方面，当对传统农民征税时，转型可能性会随着税收力度非线性增加。不过，如果税收数额不大，或者不是直接用于创新支出，那么税收手段就收效甚微（见图63中的财政税）。



案例分析：

劳动力市场转型建模：以巴西生产率转移为例

Anna Berryman（牛津大学）、Joris Bücker（牛津大学）、Fernanda Senra de Moura（牛津大学）、Pete Barbrook-Johnson（牛津大学）、Marek Hanusch（世界银行）、Penny Mealy（世界银行/牛津大学）、Maria del Rio-Chanona（维也纳复杂性科学中心）、J. Doyne Farmer（牛津大学）

政策问题：不同驱动因素和排放结果的经济增长路径将如何影响巴西职业层面的失业？

地区：巴西

方法：数据驱动的职业流动网络与基于主体建模相结合。

主要发现：相比较高排放的农业驱动经济增长路径（49%），在较低排放的制造业驱动经济增长路径中，因流动性有限而导致失业率更高的职业数量较少（占总职业的21%）。因此，进一步努力提高制造业生产力既能更好地与巴西国家主导型减排目标保持一致，也能减少劳动力市场摩擦。

交流互动：本案例分析由作者与世界银行巴西办事处联合完成。劳动力流动、相关情景以及开发这些情景所用的CGE模型的相关数据都来自世界银行的团队。世界银行协助作者得出了这些研究发现和框架。在今后的工作中，世界银行将不仅在研究方法方面，而且在改善政策影响方面参与推动此案例进一步分析。还将通过巴西EEIST实践社区寻求巴西政府的意见，以探索其他潜在相关情景。

摘要：作者将宏观经济模型输出与动态劳动力市场模拟相结合，研究在绿色转型的背景下，不同部门和地区的生产率转变如何影响巴西的职业水平失业情况。具体而言，该研究将数据驱动的职业流动网络与基于主体的劳动力市场模型相结合，以解释劳动力市场中的流动性有限和二次摩擦。根据这种方法，他们讨论了劳动力需求的变化是如何影响职业的，这取决于预计职业间流动性有多大。他们发现，与农业生产力的提高相比，制造业生产力的提高导致的劳动力市场摩擦更少。

介绍

巴西是世界上主要的温室气体排放国之一¹⁸⁵，大多数排放都直接或间接地与农业有关，因为对农业用地的需求仍在推动森林砍伐（Ferreira Filho and Hanusch, 2022）1862021年，土地利用变化和森林的排放占总量的49%以上，农业排放占近25%。¹⁸⁷

2020年，巴西更新了其国家自主减排（NDC），增加了一个新的中期目标¹⁸⁸，希望与2005年的水平相比，在2025年和2030年分别实现减排37%和43%，长期目标是到2060年实现碳中和。Gurgel，Paltsev和Breviglieri（2019）¹⁸⁹认为2030年NDC目标主要通过减少森林砍伐和改变农业实践来实现。从长期来看，Soterroni等人（2022年）¹⁹⁰认为停止砍伐森林和促进森林植被恢复对实现净零目标至关重要。

虽然巴西的《森林法》是保护和恢复原生植被的关键指挥和控制政策，因此也是有利于减少排放的政策，但政策执行的严格性和持续性受制于经济压力。一方面，巴西的农业极具竞争力、土地需求量巨大。另一方面，限制土地供应可能会导致农业就业减少和粮食价格上涨，从而导致福利损失（Ferreira Filho and Hanusch，2022）。

在此背景下，Ferreira Filho和Hanusch（2022）考虑了不同的经济增长路径及其对巴西的森林砍伐和二氧化碳排放的影响。作者表明，向制造业或服务业为主的生产力增长模式转型，能够在维持长期GDP增长的同时显著减少排放和毁林，其中制造业的减排幅度最大。相反，农业生产力的增长会导致排放量增加，并可能导致毁林增加或减少，这取决于生产力的增长是发生在亚马逊还是其他地方（详见Ferreira Filho和Hanusch，2022）。

在生产力向服务业或制造业为主转型的情况下，随着生产力水平的提高，不同职业对劳动力的相对需求可能会发生变化，从而可能会要求劳动者转行。包括IO和CGE模型在内的几个经济模型估计了转型期间不同行业的劳动力需求变化。然而，这些估计往往没有考虑到劳动力市场的摩擦，而这些摩擦限制了劳动者在工作之间的流动性。最近的研究认为，一般而言，以及在模拟后碳转型时，¹⁹¹需要考虑劳动力流动性的有限，因为在现实中，一些劳动者可能会发现转向某些职业更加困难，甚至不可能，因此可能会面临更高的失业率。同理，企业可能会面临转型带来的更多的技能短缺和职业空缺。

劳动力市场模式

为了解释劳动力市场结构和可能限制劳动者流动性的劳动力市场摩擦，在本案例分析中，我们使用由Del Rio-Chanona、Mealy、Beguerisse-Díaz、Lafond和Farmer开发的数据驱动的职业流动性网络模型，对职业层面的劳动力市场动态进行建模。¹⁹²

我们首先使用RAIS数据集（Relação Anual de Informações Sociais）构建实证职业流动网络¹⁹³（图64）。RAIS数据集包含2011年至2019年期间每年某个时间点巴西所有劳动者-工作-公司组合的有效合同数据。根据RAIS的记录，由此产生的网络含有2591个节点，代表六位数的职业¹⁹⁴，两个节点之间的边反映了劳动者从一种职业转换到另一种职业的可能性。

¹⁸⁶ UNEP, UNEP Copenhagen Climate Centre (UNEP-CCC). Emissions Gap Report 2021. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021>.

¹⁸⁷ Ferreira Filho, J. and Hanusch, M. (2022). A Macroeconomic Perspective of Deforestation in Brazil's Legal Amazon. Policy Research Working Papers; 10162. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/38253>.

¹⁸⁸ SEEG (Greenhouse Gas Emission and Removal Estimating System). Based on total emissions - CO2e(t) GWP-AR5.

¹⁸⁹ Although with a different baseline, making the target less, rather than more, ambitious in practice (UNEP, UNEP-CCC, Emissions Gap Report 2021).

¹⁹⁰ Gurgel, A. et al. (2019). The Impacts of the Brazilian NDC and their Contribution to the Paris Agreement on Climate Change. Environment and Development Economics, 24(4): 395-412.

¹⁹¹ Soterroni, A. et al. (2022). Nature-Based Solutions are Critical for Putting Brazil on Track Towards Net Zero. Preprints 2022, 2022110054.

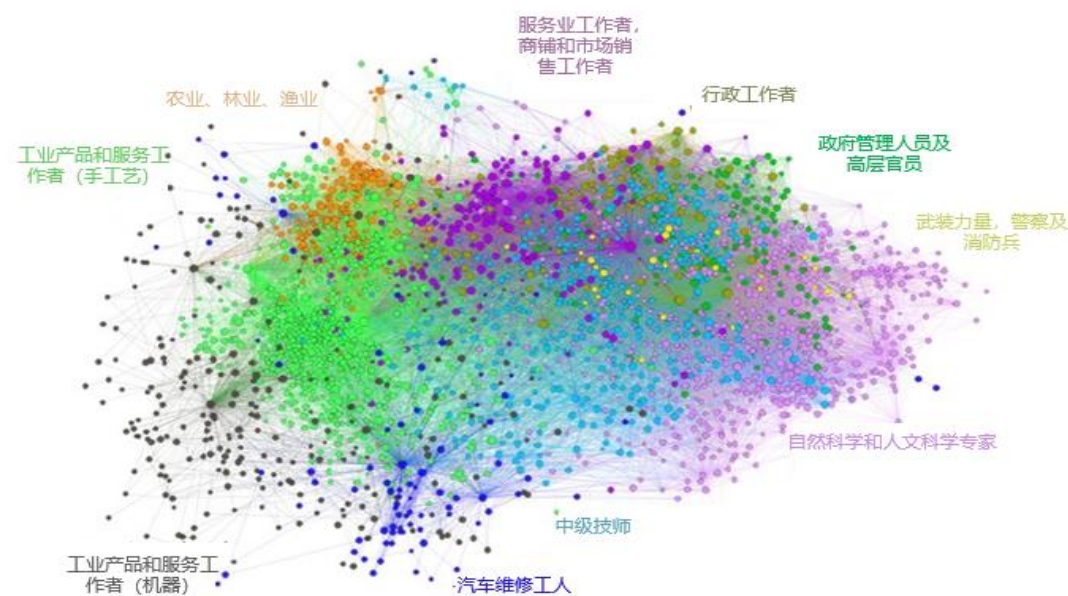
¹⁹² Castellanos, K. and Heutel, G. (2019). Unemployment, Labour Mobility and Climate Policy. National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w25797>

¹⁹³ del Rio-Chanona, M.R. et al. (2021). Occupational Mobility and Automation: A Data-Driven Network Model. Journal of the Royal Society Interface. <https://doi.org/10.1098/rsif.2020.0898>

¹⁹⁴ Mealy, P. et al. (2018). What You Do At Work Matters: New Lenses On Labour. SSRN Electronic Journal, Apr 2018.

¹⁹⁵ Every occupation is classified according to the Brazilian 2002 CBO (Classificação Brasileira de Ocupações) system. This is a nested classification, where each detailed occupation has a six-digit code. Occupations that share the same first digits can be grouped together. In this case study, we also use the three-digit and one-digit occupation codes. There are 2,591 six-digit occupations in our case study, which can be grouped into 196 three-digit occupations, or ten one-digit occupations. For example, six-digit code 913110 refers to Maintenance mechanics for mining equipment; this six-digit occupations is included in the three-digit code 913, which refers to all Maintenance mechanics for heavy machinery and agricultural equipment; the one-digit code 9 refers to all Repair and maintenance workers.

图64：职业流动网络。每个节点都代表六位数的职业，职业之间的边越宽，意味着职业流动性越大。职业按其一位数字级别的职业（见标签）进行着色，大小取决于各职业的总就业日志



然后，我们转向基于主体的劳动力市场模型，模型包括就业人数、失业人数¹⁹⁶和每个时间点每个职业空缺数量。劳动者根据职业流动网络所规定的限制申请工作；即他们只能申请他们在职业流动网络中所链接的职业的空缺（相邻职业）。解雇劳动者和产生空缺职位有两套流程；随机过程和状态依赖型过程，这两套流程反映了特定职业的实际需求（即就业和空缺）与每个情景的目标需求之间的差异。如果实现的需求低于（或高于）该情景中的目标需求，则该职业会出现更多空缺，解雇员工数量会减少（或者空缺数量减少，解雇员工数量会增多）。

巴西向绿色增长模式的结构性转变

我们使用Ferreira Filho和Hanusch（2022）对产品层面劳动力需求的估计来模拟职业层面的劳动力需求，并利用劳动力市场模型来研究职业流动网络给出的流动性摩擦下的职业层面失业。

政策情景

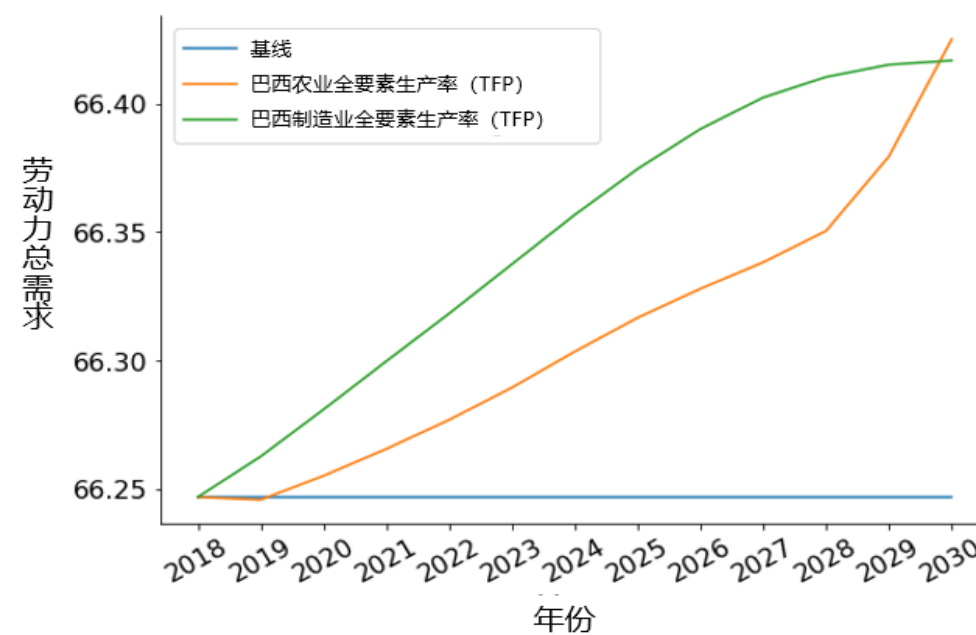
为了研究增长模式的结构性变化对从事不同职业的劳动者的影响，我们应用了Ferreira Filho和Hanusch（2022）的两种不同的政策情景：与假

设生产率没有变化的基线相比，假设巴西制造业和农业生产率都得到了提高。这两者都会促进GDP增长，而农业生产率的增长会导致温室气体排放增加。¹⁹⁵Ferreira Filho和Hanusczh（2022年）通过TERM-BR CGE模型发现，与基线情景相比，制造业全要素生产率（TFP）在全国范围内每年持续增长0.5%，就会导致12年内GDP累计增长3.9%，森林砍伐减少80万公顷，二氧化碳排放量减少超67833千吨。反之亦然，如果巴西农业全要素生产率每年增长0.5%，将导致GDP累计增长1.8%，森林砍伐减少30万公顷，但同期二氧化碳排放量增加18221千吨。

按职业划分的预估劳动力需求

我们使用2018年RAIS行业-职业构成数据，将每种商品的劳动力需求变化转化为每种职业的劳动力需求变化。由于基于主体的劳动力市场模型没有模拟人口增长情况，我们通过保持总劳动力需求在基线中不变，对劳动力需求预测的人口增长进行重新正常化。我们记录了每次生产率增长带来的总劳动力需求相对于基线的变化。图65显示了调整后对于基线和不同政策情景的总劳动力需求。

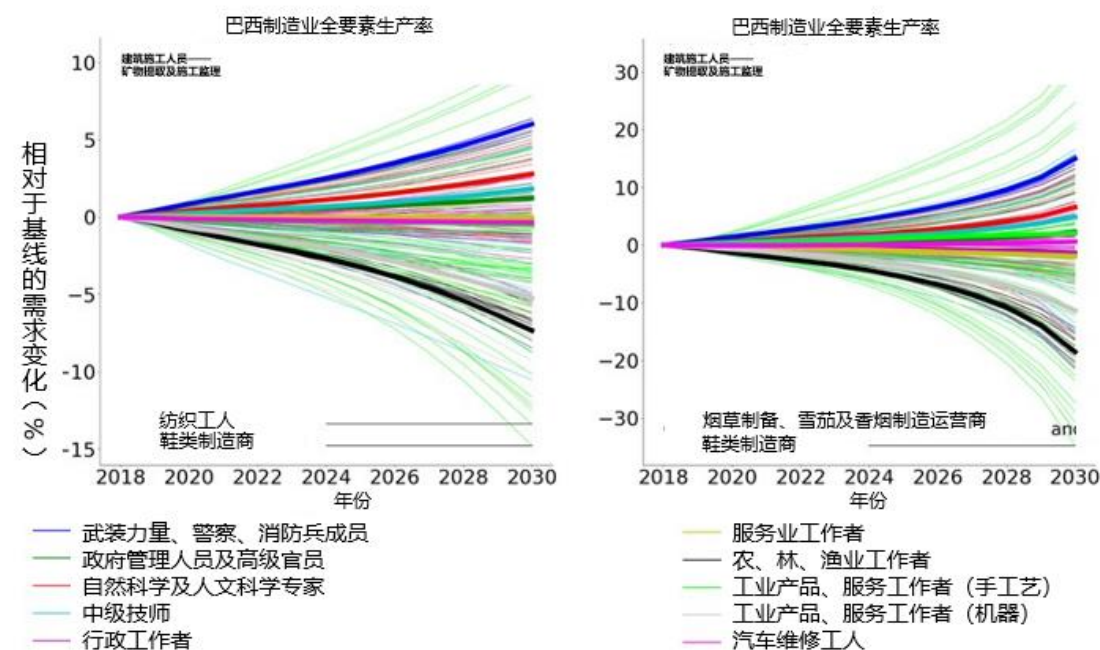
图65：2018年至2030年，基线情景下劳动力总需求保持不变，各政策情景下的劳动力总需求



按职业分解劳动力需求时，发现在巴西制造业全要素生产率和农业全要素生产率的两种情景下，对农业劳动力的需求都有所减少，而对公共服务和教育部门劳动力的需求都有所增加（见图66）。与制造业全要素生产率增长情景相比，农业全要素生产率增长情景导致的职业相对需求基线变化要大得多：在三位数水平上，需求增长（下降）

最大的职业群体在制造业全要素生产率增长情景中变化幅度达到+10%（-15%），在农业全要素生产率增长情景中变化幅度达到+33%（-35%）。尽管如此，与基线相比，两种情景下农业劳动力和部分制造业职业的需求都有所下降，而对服务劳动力和建筑职业的需求则有所增加。

图66：每个职业的就需求与制造业全要素生产率增长（左）和农业全要素生产率增长（右）情景的基线比较。粗线代表按一位数级别分组的职业数量平均值（见图例）。细线是以三位数分类的职业，根据一位数分类来着色。对影响力排名前两位和后两位的三位数职业进行标记



¹⁹⁶ An unemployed worker counts as unemployed in the occupation in which they were most recently employed.

¹⁹⁷ Compared to agriculture, manufacturing is comparably less emissions-intensive due to Brazil's relatively clean power mix (see Ferreira-Filho and Hanusch, 2022).

行业全要素生产率的提高意味着只需要更少的劳动力就可以实现同样的产出，但通常均衡效应可能会抵消这一点并增加行业的劳动力需求。生产率的提高使得生产某种产品的成本减少，从而导致均衡价格降低。如果价格下降的情况下需求仍然保持相对稳定，就业岗位就需要减少，以达到供需平衡。然而，如果一个较低价格会使需求大幅上涨，就需要更多的劳动力。由此导致了图66中职业需求轨迹的差异。

因此，这两种情景下农业劳动力的需求下降的原因可以解释如下。农业生产率的提高导致同等数量的劳动力有更高的产出，可能导致劳动力工资上涨和/或农产品价格下降。在这种情况下，价格下降导致的需求增长不足以抵消生产率的增长。因此，对劳动力的需求随之下降。对于另一种情况，制造业生产率的提高可能会导致制造业价格下降和工资上涨。由于劳动力竞争压力，工资上涨不仅限于制造业，还会（一定程度上）影响到农业。在这种情况下，更高的工资并没有带来更多需求，因此农业部门对劳动力的需求就会下降。

结果

我们使用职业流动网络和完全连接的无摩擦网络作为对比，基于农业全要素生产率情景、制造业全要素生产率情景和基线情景运行了基于主体的劳动力市场模型。在无摩擦网络中，劳动力可以在所有职业之间转换而没有任何摩擦。如图67所示，对于每一次全要素生产率冲击，我们绘制了2030年基线情景劳动力需求的变化（百分比）197，相对于2018年至2030年基线情景平均（百分点）失业率的变化。图表的绘制是基于职业流动网络和无摩擦网络。

使用无摩擦网络时，劳动力需求的变化对所有职业的失业率的影响相似：比制造业全要素生产率情景的基线低0.13个百分点，比农业全要素生产率情景低0.08个百分点。失业率的下降是由于两种全要素

生产率情景的需求相对于基线的实现了总体增长（见图65）；在这两种情况下，工作机会增加，因为失业工人可以自由申请任何职业的任何空缺职位，直到因额外需求而出现职位的空缺被填满。我们看到，与基线相比，2030年需求变化相同的职业有微小变化，这是由于从2018年到2030年的整个情景中这种需求变化的不同情况。如果没有劳动力市场摩擦，就会出现以上这种情况。

当我们通过使用职业流动网络来设计一个更切合实际的劳动力市场结构时，不出所料，在这两种情况下，都看到失业和劳动力需求之间的负相关关系；一般来说，劳动力需求相对于基线的增加会使失业率下降。我们还可以看到，一旦考虑到流动性摩擦，大多数职业的失业率会有小幅下降甚至上升，劳动力需求变化相似的职业可能失业率变化大相径庭。也就是说，职业流动网络显示了劳动力市场的摩擦如何阻碍劳动者获得一些本可以在无摩擦网络中获得的就业福利。

在图67里位于上方的图显示了农业全要素生产率情景的结果。可以清楚地看到，在劳动力需求发生类似变化的情况下，网络效应对职业失业率的影响大相径庭。例如，农业经理人和植树人员的需求分别下降了20%和21%，而农业经理人的失业率上升了0.24个百分点，远低于树木种植者0.57个百分点的失业率上升幅度。这种差异的原因之一是，植树人员的相邻职业比农业经理面临更大的需求下降，因此当发生需求冲击时，树木种植者在相邻职业中找到工作的机会更少。

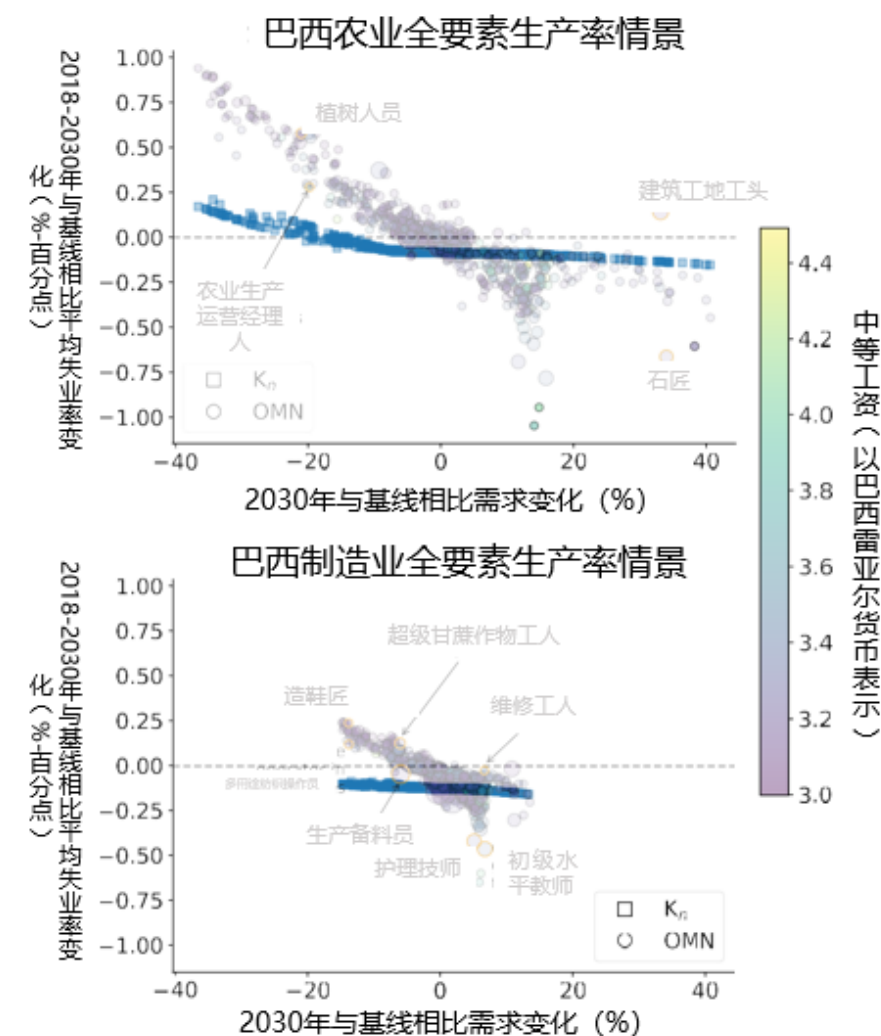
同样地，建筑工地工头和泥瓦匠的需求相对于基线增加了约34%。建筑工地工头的相邻职业比泥瓦匠多，但是相邻职业越多意味着围绕需求冲击所创造的新工作的竞争越激烈，因此尽管需求增加了，失业率依然上升。如图67所示，建筑工地工头的相邻职业比泥瓦匠的相邻职业多。正是这些细微的次要影响突出了利用职业流动网络相比无摩擦网络的优点。

在制造业全要素生产率情景下，我们也看到了网络效应。制鞋商和纺织行业的多功能经营者的劳动力需求都下降了14%，但失业率结果不同。同样，小学教师和维修技工的劳动力需求增加了约6%，但与基线相比，小学教师的失业率下降幅度最大。在这两组职业中，有更多相邻职业的职业与基线相比情况更好。

我们还可以确定弱势职业，即与2030年的基线相比失业率上升最快的职业。在包含621个职业的四位数职业级别里，两种情景中的弱势职业包括土木

建筑助理、砌筑工人、织机操作员和油料作物农业工作者。香烟和烟草加工商在农业情景下也很脆弱，而制鞋部门的职业（手工制鞋和皮革制品工作者以及鞋饰制备工作者）在制造业全要素生产率情境下面临失业增加的风险。再培训计划正是针对这些弱势职业，目的在于减轻绿色转型路径对劳动力市场的影响。

图67：与基线情景相比，巴西农业全要素生产率（上图）和巴西制造业全要素生产率（下图）在2018-2030年平均失业率百分比变化，（其中2018年每种职业至少有1000名员工），相对2030年每种情景与基线相比的需求百分比变化。圆形由职业流动网络（OMN）的模型输出，正方形由无摩擦网络（Kn）的模型输出。每个圆形的大小与2018年的就业数量成正比，颜色记录了2018年以巴西雷亚尔（BRL）表示的月工资中位数



¹⁹⁸ The actual demand change from 2018 to 2030 for each scenario agrees with the demand change in 2030 relative to the baseline almost entirely, with small variations.



讨论

通过比较全要素生产率制造业和全要素生产率农业情景下的劳动力市场效应，我们看到全要素生产率制造业冲击一起的劳动力需求绝对变化较小。更重要的是，在制造业全要素生产率情景中，相比基线，因职业转换困难而面临更多失业的职业数量（21%）低于农业全要素生产率情景（49%）。换言之，结果表明，总体上，相比农业，制造业生产率的持续增长导致了劳动力需求变化，使得更多受到负面影响的劳动者离开了需求下降的职业。这在很大程度上是由于每种情景下职业层面劳动力市场需求变化的幅度不同，同时也受到劳动者适应能力的影响。此外，如上所述，尽管全要素生产率制造业情境中的排放量低于基准，但高于农业全要素生产率情景中的基准。这表明，提高对制造业生产率增长的关注有助于巴西实现国家主导型减排计划目标，增加就业数量，并缩小对职业的负面影响范围。

我们模型的网络受到几个因素的影响，如所需技能组合的差异或地理限制，但需要注意的是，本案例分析没有明确涉及地理因素。相反，我们假设了一个所有工人都可以申请工作的就业市场，尽管地理限制隐含在职业流动网络中（因为地理上集中的职业的相互关联性更强），但地理因素的作用与技能组合、工资差异、种族和性别偏见等其他影响密切相关。由于劳动者的重新安置是CGE情景的一个重要考虑因素，因此将地理因素纳入模型是未来工作的重要方向之一。

未来研究的另一个方向是将劳动力市场模型与我们用于预测需求的模型相结合，在此处指CGE模型和土地利用模型。目前，CGE模型是独立于劳动力市场模型运行的，因此在随后的时间步中没有考虑减缓劳动力再分配的劳动力市场摩擦问题。这两个模型的耦合将能够体现劳动力市场摩擦可能会在多大

程度上减缓或促成向净零的转变。未来研究的另一条途径将是允许宏观经济模型中出现更切合实际的供需失衡行为。我们在分析中使用的职业组合不变；该模型只覆盖已有职业，特别是2002年CBO职业分类系统中的职业。我们使用的数据也适用于这一分类系统。因此，对创造新工作的研究也将成为未来研究一个有意义的问题。

最后，我们用来计算职业流动网络的RAIS数据只涵盖了正规劳动力，而在巴西，正规劳动力约占总劳动力的67%。198在解释研究结果时应该考虑到这一因素，而在未来的研究工作中，我们可以将RAIS的数据与非正规劳动力数据进行整合，例如使用PNAD家庭调查的数据。

在本案例分析中，我们将Ferreira-Filho和Hanusch（2022）提出的情景与更切合实际的劳动力市场模型相结合，以体现这些情景对失业的职业层面影响，进而调查全要素生产率增长对巴西经济的影响。这种建模方法也可以在许多其他方面为低碳转型政策提供信息。例如，可以调查加快净零转型速度对特定职业劳动力市场的影响。同样地，这种建模方法可以让决策者了解不同技术选择对劳动力市场的影响，以及不同转型方案所需的技能再培训。



¹⁹⁹ Ulysea, G. (2018). Firms, Informality and Development. The American Economic Review 108.8 <https://doi.org/10.1257/aer.20141745>

案例分析： 中国和煤电转型的社会影响

Alex Clark（牛津大学）和Weirong Zhang（华北电力大学）

政策问题：中国逐步淘汰煤电给财政和就业带来哪些影响？

地区：中国

方法：微观模拟。

主要发现：在中国碳中和目标一致的基线情景下，由煤炭支撑的就业机会从2021年的270万削减至2035年的140万，再跌至2050年的9.4万。到2040年代，税收年损失率将升至10%以上。然而，鉴于目前的补贴水平，煤炭很可能已经造成财政收入净流失。中国的内蒙古等主要产煤区如果没有成功实现多元化电力供应，将面临重大挑战。

交流互动：本案例分析的开展得益于智库组织碳追踪计划（the Carbon Tracker Initiative）和华北电力大学研究人员合作，在国际应用系统分析研究所（IIASA）的支持下完成。通过与英国驻北京大使馆合作，向中国的受众广泛传播了该报告，受众包括许多其他大使馆、基金会、国际组织、民间团体和政府官员。

摘要：作者使用动态模拟来考量逐步淘汰煤炭这种技术选择如何在时间和空间上影响煤炭行业的就业和税收。作者在对行业的微观动态模拟中使用资产级别数据，这种模拟的分辨率高于通常宏观建模中所需的区域整合的分辨率，同时克服了运行稳健的经验网络模型所需的高质量微观数据不足的问题。

介绍

在国内经济逐步淘汰煤炭使用方面，中国面临着前所未有的结构性挑战。中国每年的煤炭消耗量约40亿吨，是第二大煤炭消耗国印度的四倍多，煤炭支持了中国大部分电力供应和重工业生产。如果中国在2060年实现碳中和的长期目标，那么未来几十年内，煤炭作为能源的作用将减少至现有水平的一小部分。实现这一目标需要大规模部署可再生能源、电气化、氢基合成燃料、能效措施以及（最有可能的是）碳捕获和碳封存以及其他除碳技术。

这些结构和技术转变将在各个层面对中国的经济结构产生深远影响。研究人员和政策制定者需要详细分析这些变化在不同的空间和时间是如何在整个煤炭价值链以及更广泛的经济中发生的。在设计政策以应对这些变化带来的社会经济和分布影响时，有两个关键方面很突出：逐步淘汰煤电对煤炭部门就业以及税收方面的影响。

Clark和Zhang（2022）¹⁹⁹在他们的研究《中国逐步淘汰热煤的就业和财政影响估计》中回答了这些密切相关的问题。由于撰写文章时数据有限，他们的研究仅关注约占中国煤炭消耗总量一半的热煤（用于发电）。²⁰⁰

结构性转变建模的方法

传统上，这种性质的结构性经济变化及其对就业和税收的影响是通过基于均衡的宏观经济模型的角度来分析的，模型以描述生产-消费网络的详细投入-产出表为基础。²⁰¹

这些模型旨在捕捉各行业对价格和需求变化的替代效应，并将技术变革的速度纳入考量，但通常无法以高粒度捕捉具体部门的动态。这些模型依赖于大量区域整合和大量的定量假设，而这些假设不一定准确，并且在数据匮乏的情况下难以得到验证，因为这些情况受制于命令与控制政策以及像中国那样价格弹性、需求增长、价格形成等方面受到严格监管的市场。近期研究方法使用网络分析来了解劳动力市场如何适应微观层面的变化，但相应的模型依赖详细、高质量的微观数据，如关联的雇主-雇员数据集。^{202,203}

就中国而言，中国政府以外的研究人员基本上无法获得所需数据用以运行稳健的经验网络模型。此外，如果缺乏某种形式的聚合，大多数传统的经济模型无法获取微观层面的数据，从而导致产生的结果分辨率相对较低。因此，宏观建模方法不够合理，而网络建模方法难以实行。

模型设计、动态和局限性

考虑到这些限制，本研究没有预测最可能的途径，而是使用微观模拟方法来模拟煤炭行业系统的动态。此研究估算了热煤行业产生的就业和税收的数量及分布（包括地理位置、价值链和企业的分布），以及这些结果如何随时间变化。

煤炭部门的模型独立于其他行业，使用了中国煤电厂和煤矿的资产级数据集，辅以一系列独立来源的数据点和关于煤炭运输就业、工厂利用率、税率和生产率提高的假设，并将外部确定的煤炭最终需求作为影响中国气候政策的函数。

²⁰⁰ Clark, A. and Zhang, W. (2022). Estimating the Employment and Fiscal Consequences of Thermal Coal Phase-Out in China. *Energies* (Basel), 15(3): 800. doi:10.3390/en15030800.

²⁰¹ Most of China's coal consumption for purposes other than electricity generation is used to generate heat, largely for industrial processes such as steel and cement production, with a small and shrinking proportion still being used for domestic heating. At the time this study was undertaken, data availability limited the scope to thermal power only. The Spatial Finance Initiative at Oxford University has since published asset-level datasets for the steel and cement sectors that may facilitate an expansion of this model to cover a much greater share of China's total coal consumption.

²⁰² Mercure, J-F. et al. (2018). Macroeconomic Impact of Stranded Fossil Fuel Assets. *Nature Climate Change*, 8(7): 588-593. doi:10.1038/s41558-018-0182-1.

²⁰³ del Rio-Chanona, R. M. et al. (2020). Supply and Demand Shocks in the COVID-19 Pandemic: An Industry and Occupation Perspective. *Oxford Review of Economic Policy*. doi:10.1093/oxrep/graa033.

²⁰⁴ Mealy, P. (2018). Know What? New Lenses on Productive Knowledge Shed Light on Long Run Development, Structural Change, Job Switching and the Transition to the Green Economy. In J. D. Farmer & C. Hepburn (Eds.).

此需求驱动模型是自下而上构建的，包含了中国单个燃煤电厂的具体位置数据，并将这些数据与省级煤矿产能联系起来。这个网络计算了就业和税收收入，并且随着时间的推移，计算结果会根据煤电厂活动的变化而改变。煤炭种类的差异以及煤矿和工厂之间的物理距离也被考虑在内，从而使分析中能够加入煤炭运输图层。

由于上述数据质量原因，在模型的这一次迭代中，工厂并不与特定矿山相关联，尽管随着研究人员进一步了解矿山-工厂关系的决定因素，如距离、运输成本、共享矿山和工厂所有权等，本可以将工厂和煤矿直接相关联。

此模型与Mercure等人（2020年）制定的风险-机会分析框架一致，²⁰⁴旨在处理非边际变化，同时在此次迭代中，需求变化导致替代和价格效应依旧不可知。这并不代表中国不受这些效应影响，而表明面对市场受到严格监管的现实，以及价格形成、弹性和煤炭供应合同细节方面的根本不确定性，对效应的判断有所保留。随着获取的信息越来越多，该模型一定可以得到改进，以进一步揭示这些重要动态。

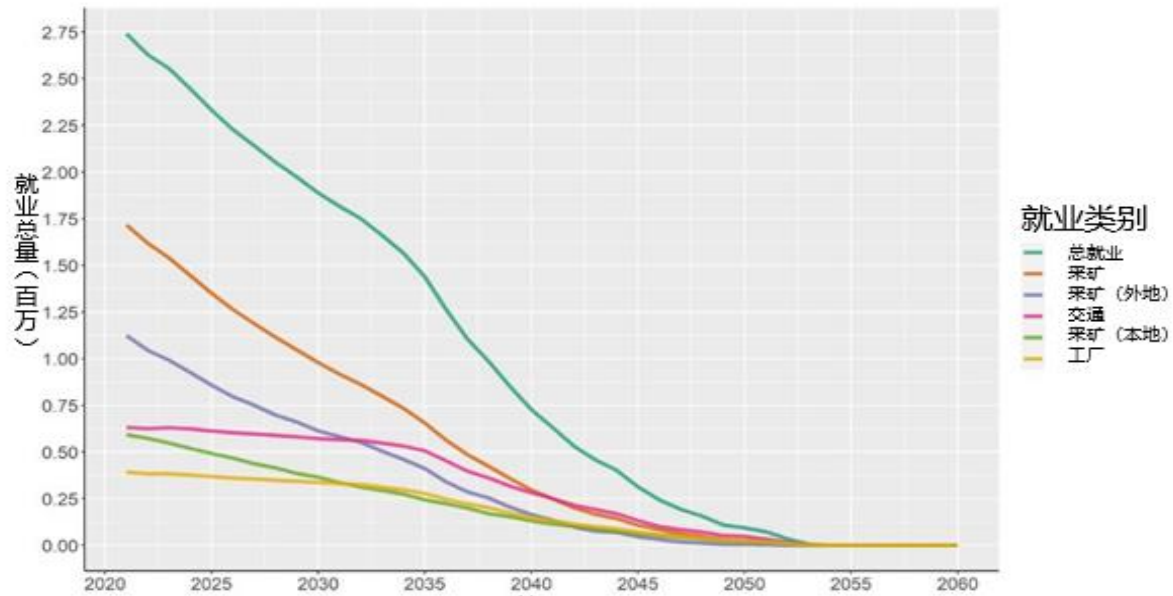
研究结果

我们建立了一个基线情景模型，其中现有电厂按计划运行30年后退役；所有目前已批准的工厂均已建成（目前已规划但未批准的工厂尚未建成）；采矿业没有用其他能源替代热煤的需求。²⁰⁵以上条件将导致煤电在2050年代中期被淘汰，且任何退役煤电都不会为新的煤电所取代，取而代之的是成本更低的清洁能源。

该模型还运行了另外四种情景：无转型（NT）情景（在这种情况下，无论是否已获批，所有规划中的工厂都已建成并在整个生命周期内运行）；以及反气候政策更高目标的另外三种情景，经过校准与He等人（2020年）模拟的煤炭产能轨迹大致匹配。²⁰⁶R情景反映了低成本可再生能源的激烈竞争，C50和C80情景要求到2030年燃煤发电的排放量比2015年分别减少50%和80%。情景越来越严格意味着煤炭产能短期内降幅越大，同时剩余煤矿的淘汰速度越快。

在基线情景中，采煤部门的历史劳动生产率持续提高，意味着在中期内效率的提高会导致工作岗位的流失。由热煤消耗支撑的就业人口从2021年的270万下降到2035年的140万，再降至2050年的9.4万。全部采矿工作分为来源于采煤省（“本地”）的煤炭消耗和来源于其他省份（“外地”）的煤炭消耗。在这两个类别中，即使现有政策基线没有任何变化，预计到2025年，仅面临裁员的煤矿工人数量就将超过110万（见图68）。

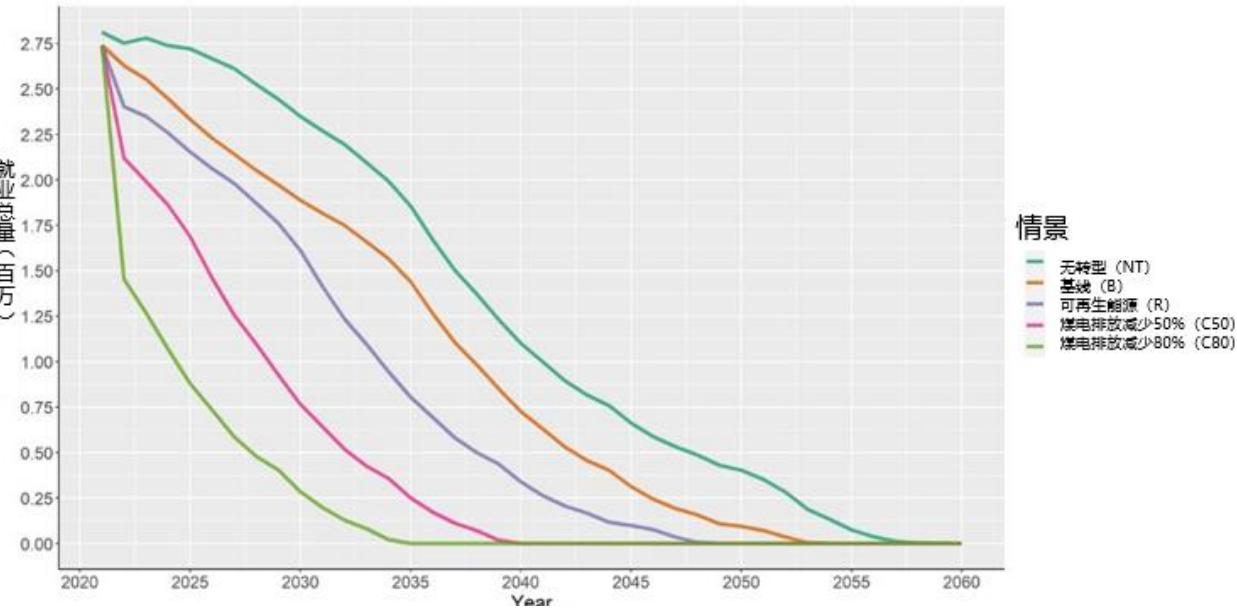
图68. 2021-2060年基线情景下热煤开采、电力和交通运输部门的就业情况



如图69所示，R情景对总就业的影响在2020年代末之前有限，但对基线的边际影响范围在2035年扩大，影响到63万个工作岗位，然后再次缩小，而C50和C80影响范围差距更大。相反，

到2030年，无转型情景只能保护50万名员工免遭裁员，到2040年，就业率将继续下降40%，到2050年将下降85%。

图69. 2021-2060年五种煤炭淘汰情景下热煤开采、电力和交通运输部门的就业情况



²⁰⁵ Mercure, J-F. et al. (2020). Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. Global Environmental Change 70: 102359.

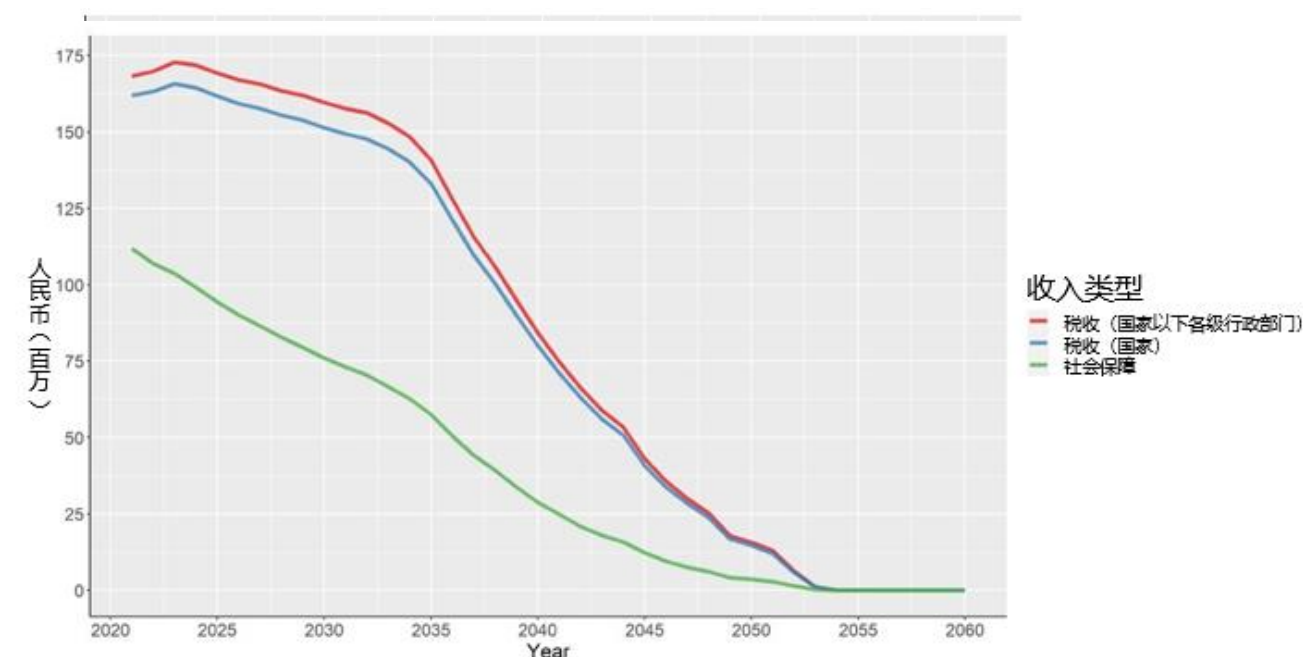
²⁰⁶ It is possible but unlikely that large-scale alternative uses for thermal coal will be found within China, assuming it continues to export only a modest share of its total coal production. This may lead to the outright closure of mines producing thermal coal exclusively, particularly those supplying specific plants. However, while many coal mines produce either thermal or coking (metallurgical) coal, some mines produce both types and may be less affected by a phase-out of thermal coal only. It remains to be seen whether China's demand for coking coal will decline at a similar rate to thermal coal or whether decarbonisation of industrial coal use will be delayed in comparison.

²⁰⁷ He, G. et al. (2020). Rapid Cost Decrease of Renewables and Storage Accelerates the Decarbonization of China's power system. Nature Communications, 11(1): 1-9.

相同情景下，2021-2030年期间，热煤对税收的总贡献约为每年人民币3000亿元（另外还有价值人民币1100亿元的社会保障贡献），税收贡献在2023年达到顶峰，为人民币3400亿元（见图3）。基于对研究中模拟的价值链的直接和

间接补贴的现有文献的详细调查，不包括温室气体外部性或完全包括当地污染外部性的情况下，总补贴可能约为每年人民币4800亿元，热煤部门本身可能已经给中国公共领域财政带来财政收入净损失。

图70. 2021-2060年基线情景下，热煤部门产生的税收分类（国家和下级行政部门）和社会保障收入



随着2030年代中期燃煤电厂开始大量退役，财政收入迅速减少，税收年损失率从2020年代的1%上升至2040年代的10%以上。随着中国未来煤炭政策的假设变得更加严格，一定时期内的就业和税收收入损失会提前到来。尽管完全不转型的政策不太可能实现，但在该政策下，所有目前规划的燃煤电厂都已建成，这些损失虽然会被推迟，但不能完全消除。

税收收入受煤炭消耗总量影响，因此B和NT情景的税收分别在2023年（人民币3390亿元）和2027年（人民币3990亿元）达到峰值。即使在R情景下，税基在2030年前也将保持稳定，在2020年代只会下降17%，此后会迅速下降。C50和C80情景的下降率相似，但分别比基线情景提前了10-11年和15-16年。这反映了税基的资本密集度：税收收入的下降几乎完全是由产能退役造成的。

对这些省级层面模拟结果的评估表明，内蒙古、山西、陕西和新疆这几个承担绝大部分产量的产煤区在管理当地失业以及将劳动力供应转向其他生产用途方面将面临重大挑战。由于工业依赖于煤炭出口，这些省份的劳动效率相对较高，但受煤炭需求下降的影响大，这意味着除非它们成功实现税收来源多元化，否则到2030年代这些省级政府的税收收入将迅速崩溃。

在企业层面，2021年，“五大”国有电力企业的煤炭需求支撑着40%的全国就业岗位和来自热煤的税收。到21世纪40年代初，由全国10家最大企业（除了一家企业例外）支撑的就业岗位将减少约70%至85%，而每家企业的煤炭消耗产生的税收将减少约45%至70%。

政策结论

这项研究至少产生了两个主要的政策结论，尽管结论有待在未来的研究中完善和检验。首先，在未来几十年，中国热煤行业有数百万工作岗位面临风险，但未能采取脱碳政策对失业的规模和分布产生的影响可能有限，因为这些失业大多是由企业合并和技术自动化造成的。只有最激进的脱碳政策情景（C50和C80）会导致失业大幅增加，尤其是在21世纪20年代。因此，对煤炭部门大规模失业的预期是制定政策的一个重要的考虑因素，但其本身并不是推迟低碳转型措施的理由，尤其是在其他部门就业扩大以及快速转型节约成本的背景下。207《中国、印度和巴西可再生能源的必然趋势和边际定价》案例分析发现，加速清洁能源转型的情景比推迟清洁能源转型的情景对中国的就业和国内生产总值产生更多积极影响。

第二，煤炭行业活动减少导致的税收损失也不是推迟转型的理由，因为即使不考虑温室气体外部性，减少煤炭行业补贴所节省的资金也很可能足以抵消税收损失。各省的短期和长期净财政影响差异很大，因此国家政府有充分理由采取再分配措施。在风险较低的省份逐步淘汰煤炭所带来的任何财政资金净结余都可以用来暂时弥补风险较高的省份的损失，因为后者正在重新定位税基和/或实现税基多元化，为转型铺平了道路。

展望未来:自下而上视角的用处

针对特定煤电厂的分析允许用户从地点和资产所有权两个方面，在高粒度水平上确定煤炭行业就业和税收的最终（需求侧）驱动因素。对煤炭跨省流动进行核算也可以有助于分析一个省份的煤炭需求是如何支持另一个省份的就业和税收的。

该模型还允许根据需求侧政策和供应侧政策对单个煤电厂需求或单个矿山供应的影响，对多种不同类型的需求侧和供给侧政策进行评估。未来煤炭需求的情景可以通过多种方式进行校准，比如直接调整每个煤厂/矿山的寿命及其利用率/生产率，或者模拟省级或国

家级政策对控制煤电行业或煤炭生产排放的影响（例如，可能首先针对效率较低的煤厂）。同样，可以根据煤炭行业价值链各方面的新信息或更新信息轻易调整用于估算煤炭开采、运输和使用相关的就业和税收收入的基本假设和计算。

虽然现有模型仅涵盖电力部门的煤炭使用，但它也可以扩展到重工业（主要用于钢铁和水泥制造）的煤炭使用，其背后的建模方法也可以扩展到能源部门的其他部分，包括非煤发电，以及石油和天然气的开采和使用（尽管后者国际化因素更显著）。

该模型在构造和逻辑上相对简单，没有研究煤炭部门就业和税收收入的减少如何被替代煤炭而获得的收益所抵消。其他使用网络分析和投入产出表的建模方法可能可以更好地回答这些问题，但是这里使用的微观模拟方法可以结合到补充方法中，或者用作比较结果和校准对外部刺激的反应动态。

例如，这种建模方法可用于确定通过宏观经济建模（如基于最低成本发电）确定的煤炭淘汰“最佳”路径可能如何偏离自上而下政策的结果，这些政策在确定中国煤炭需求方面继续发挥重要作用。它还可以用于与其他模型的结果开展对话，以确定哪些结果可能不切实际，或者意味着中国不同省份和地区煤炭行业的构成将发生前所未有的变化。最后，分析的高分辨率性质也有助于根据脆弱地区、既得利益、政治经济激励等因素来预测政治、经济或其他变革的阻力来源。



案例分析：

印度2070年净零排放的经济影响

Michael McGovern（剑桥计量经济学会），Pim Vercoulen（剑桥计量经济学会&埃克塞特大学），Femke Nijssse（埃克塞特大学），Jean-Francois Mercure（世界银行）

政策问题：印度到2070年实现净零排放会产生什么样的宏观经济影响？

地区：印度

研究方法：E3ME-FTT：电力模型

主要发现：（1）到2070年，通过许多终端使用技术的电气化，太阳能将成为主导技术，满足57%的一次能源需求，（2）经济向净零排放转型可能会给印度宏观经济带来净正面影响，与基线情景相比，到2070年，印度的GDP可能会增加8400亿美元，（3）净零转型可能会导致化石燃料相关行业的工作岗位大量减少，超过200万个就业人口面临失业风险，（4）将增加电力、建筑和服务行业等的就业。

交流互动：本案例分析是印度能源与资源研究所（TERI）在EEIST项目过程中多次组织印度利益相关方参与活动的成果。

摘要：作者使用E3ME-FTT：电力模型探索印度未来可能的电力系统配置，特别关注关键能源密集型部门实现净零排放的政策组合。该模型使用自我强化的技术吸收机制，探索一系列政策的综合影响，包括：（i）碳价格，（ii）能源效率投资，（iii）生物燃料混合硬性规定，（iv）车辆税和补贴，（v）道路税，（vi）燃油税，（vii）电动汽车规定，（viii）碳密集型工艺的淘汰条例，（ix）低碳工艺的投资补贴，（x）战略性电力投资，以及（xi）上网电价。

介绍

随着人口增长，²⁰⁸经济和生活水平提高，²⁰⁹以及对煤炭和能源进口的高度依赖性，²¹⁰印度要实现2070年净零排放的承诺面临着许多挑战。如果使用目前的供应链和能源系统来满足未来需求，会产生大量的排放。必须减少这些排放，才能将全球变暖幅度限制在2°C以下。不过，减缓气候变化不一定带来净成本，而可以为不同地区带来机遇或风险。²¹¹印度是化石燃料净进口国，如果实现净零排放，可能会改善能源贸易平衡。此外，净零转型会刺激经济活动，带来额外的就业机会，取代化石燃料部门（主要是煤炭供应部门）的工作岗位。模型可以就印度如何能够在2070年实现净零转型提供洞见，无论是从技术优化组合的角度，还是从政策预期结果的角度。像这样的大规模变革对一些经济主体来说是一种风险，而对其他主体来说则是一种机遇。化石燃料相关行业的从业人员可能会失去工作（如采矿），或者工作性质发生变化（如汽车制造）。

在本案例分析中，我们研究了脱碳方案，并使用E3ME-FTT将脱碳结果与基线进行了比较。基线与“当前政策情景”相一致。这里将提出的净零情景只是印度经济到2070年实现净零

转型的众多途径之一。E3ME-FTT模型的一个关键特征是，它并不是假设经济体在资源配置完美的（接近）均衡状态下运行的最优化模型。通常可以调用备用容量来触发变化，可能来自未能得到充分利用的劳动力，或者在不挤占其他地方投资的情况下提供的额外投资（例如通过贷款）等。此外，E3ME-FTT模型允许碳定价机制之外的多种政策。这为测试不同政策组合的效果提供了条件，可以了解哪些方法在减少排放和促进积极经济成果方面最有效。

表11显示了印度为实现2070年净零排放而实施的政策概况，并模拟了世界所有其他地区类似的政策组合。如果其他大型经济体不承诺达到类似的目标，任何一个国家都不太可能承诺实施如此严厉的政策组合。政策组合包括碳惩罚政策，如碳定价或逐步淘汰有关能源密集型技术的法规，以及低碳促进政策，如补贴等。由于E3ME-FTT模型是一个模拟工具，这套政策是在反复试验的基础上制定的。模拟不能保证达到所期望的结果；只是呈现了可能的结果。初始版本的政策组合旨在调查因脱碳和开采策略而搁浅的化石燃料资产。²¹²虽然政策组合可能有多种变化，但过去的努力表明，基本上需要使用所有的政策杠杆才能实现净零这样严格的目标。

²⁰⁹ United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). World Population Prospects 2022: Summary of Results.

²¹⁰ OECD. (2023). Real GDP long-term forecast (indicator). doi: 10.1787/d927bc18-en (Accessed on 06 January 2023)

²¹¹ IEA. (2020). India 2020 Energy Policy Review. IEA Energy Policy Reviews. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9faa9816-en.

²¹² Mercure, J. F., et al. (2021). Reframing Incentives For Climate Policy Action. Nature Energy, 6(12): 1133-1143.

²¹³ Mercure, J. F., et al. (2021). Reframing Incentives for Climate Policy Action. Nature Energy, 6(12): 1133-1143.

表11：模拟印度实现2070年净零目标而实施的政策清单

部门	政策	政策细节
多部门	碳价格	2024年起价为40美元/吨二氧化碳，2070年增至325美元/吨二氧化碳（2022年价值）。
	能源效率投资	特定部门最终能源需求的减少。
	生物质能混合法规	燃料混合，如将生物乙醇与汽油混合。影响所有基于石油的交通方式。
道路交通	车辆税	从2024年起增加内燃机汽车的登记税。
	车辆补贴	从2024年起就电动汽车的购买价格进行补贴。
	道路税	从2024年起增加内燃机汽车的道路税。
	燃料税	从2024年起增加内燃机汽车的燃料税。
	逐步淘汰法规	禁止内燃机汽车销售。2024年禁止低效（较旧）的内燃机汽车车型。2040年禁止更高能效的内燃机汽车车型。
	电动汽车硬性规定	强制要求制造商在产品组合中提供一定数量的电动汽车。
电力供应	投资补贴	从2024年起，对核电实行20%的补贴，对碳捕获和碳封存（CCS）的应用实行50%的补贴，对生物质能结合碳捕获与封存（BECCS）的应用实行60%的补贴。
	逐步淘汰法规	到2060年逐步淘汰煤电。从2028年起，不得增加其他化石燃料发电。
	战略性公共投资	2024年至2026年间对BECCS进行战略投资，培育系统。
	上网电价	2024年至2036年风力发电实行上网电价，到2046年全部取消。
住宅供暖	逐步淘汰法规	从2024年起禁止销售化石燃料家用供暖系统。
	燃料税	与碳税一致的燃油税。
	投资补贴	从2024年开始对热泵和太阳能发热进行补贴。
钢铁制造	投资补贴	从2024年起，对CCS应用的预付投资实行10%的补贴，对其他主要低碳技术实行50%的补贴。
	能源补贴	从2024年到2046年，对氢（50%）和电（25%）的使用发放补贴，随后到2057年逐步淘汰补贴。
	战略性公共投资	从2024年到2032年对氢气直接还原炼钢技术进行战略投资，从2035年到2039年对电解方法进行战略投资，以培育该系统。
土地利用	减少土地利用碳排放（基于假设）	减少土地使用排放包括减少农业排放、重新造林、植树造林和其他土地利用相关措施。

E3ME-FTT描述

E3ME-FTT描述

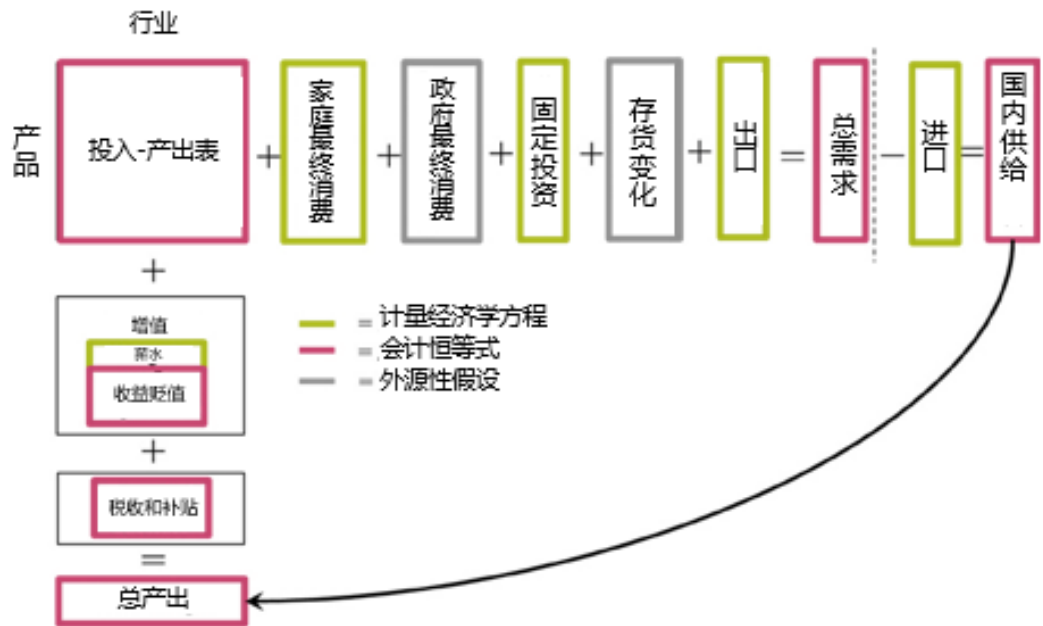
E3ME是一个基于计算机的世界经济、能源系统和环境模型。社会中的个人、家庭、企业和其他群体所从事的经济活动会对其他群体产生影响（可能存在一段时间的滞后），这些影响可能会持续到子孙后代。但有许多行为和影响，无论是有益的还是有害的，都会在经济和物理库存中累积。详细的描述可以在剑桥计量经济学网站上找到。²¹⁴

经济主体的经济交易影响通过环境、经济、价格和货币体系（通过劳动力和商品市场），以及全球运输和信息网络来传播。市场主要通过三种方式传递效应：1）通过活动创造的对材料、燃料和劳动力投入的需求水平；2）通过工资和价格影响收入；以及3）通过收入进而引发对商品和服务的进一步需求。这些相互依存的关系表明，E3模型应该是全面的，包含经济和能源系统不同部分间的联系。因此，E3ME的设计具有很高的地理和行业分辨率。

E3ME-FTT是一个涵盖71个地区的全球模型，该模型单独展示主要经济体，并在欧洲国家中划分出70个经济部门，非欧洲国家中划分出44个。E3ME是一个需求主导的宏观计量经济学模型。它使用时间序列计量经济学来求解最终需求的组成部分及各类其他指标，以确定需求的组成。参见图71。计量经济学参数代表过去和现在应对冲击的行为。

能源领域也由计量经济学关系决定，并建立在以上展示的一些会计恒等式之上，但同样也包括对内生创新和能源价格的反应。不可再生能源价格的批发部分是通过成本-供应曲线法得出的，该方法包含一个不确定性参数。在顶部加上了纳税等级。

图71：E3ME的国家账户结构



²¹⁴ Cambridge Econometrics (2022). E3ME Model Manual. Available at: <https://www.e3me.com/what/e3me/>

技术在E3ME-FTT模型中的作用

在有关经济脱碳的问题中，理解经济主体为什么以及如何选择技术很重要。时间序列计量经济学方程需要很长的历史轨迹来模拟未来。对于新技术来说，这样的历史并不存在，因此计量经济学方程并不完全适用于解决技术引发的转型问题。这就是未来技术转型（FTT）发挥作用的地方。FTT是一套与E3ME集成的模型，描述了发电、²¹⁵钢铁、²¹⁶家用供暖²¹⁷和乘用车²¹⁸等排放和能源密集型行业的技术决策。它基于对进化经济学的理解，即社会技术体系（为什么某件事是这样做的）会由于内部（如创新）和外部（如短缺或政策）的压力而发生变化，这种变化往往是不可逆转和非边际的。FTT在输入参数中融入了不确定性，这些不确定性既代表了经济主体的异质性，也代表了根本不确定性。

FTT能够确定满足需求的技术配置，需求则在E3ME-FTT的其他部分确定。该模型的核心基于Lotka-Volterra的复制函数，该函数对所有技术进行两两对比，并将投资者偏好（确定为二元logit）、技术替代频率和前一年的市场份额作为输入，以确定当年的市场份额。²¹⁹它包括积极反馈，如基于全球累积技术能力增加的边做边学，以及由于部门限制而产生的消极反馈，如电力部门的VRE部署导致供需不匹配，或钢铁部门回收的废料可用性有限。

E3ME与其他模型有什么不同？

E3ME常与可计算的一般均衡（CGE）或离散随机一般均衡（DSGE）模型相比较。²²⁰，²²¹在许多方面，这些建模方法是相似的；它们被用来回答类似的问题，使用类似的输入和输出。然而，这背后隐藏着建模方法间重要的理论差异。E3ME这样的模型建立在数据之上，并试图从数据中推断经济关系。其他大多数宏观经济或综合评估模型（IAMs）则试图建立在微观基础和理论之上。

在典型的CGE或DSGE框架中，人们假设存在优化行为，产出由供给侧的限制决定，价格充分调整，以利用所有可用的产能。在E3ME中，产出决定于经济的需求方，有可能存在闲置的经济产能。不存在价格总是会调整至市场出清水平的假设。

这些差异具有重要的实际意义，因为它们意味着在E3ME中，如果监管和其他政策能够利用可用的闲置经济产能，就有可能带来产出的增加。金融部门的作用至关重要。

金融的作用

E3ME是一个后凯恩斯主义模型，在这个学派中，货币是内生的，即它可以由银行通过贷款等方式创造。这种方法不同于其他许多模型，在那些模型中，货币的供给是固定。²²²固定的货币供给意味着完全挤出效应，而内生的货币供给本身并不意味着完全挤出效应。E3ME是金融不可知论者。根据计量经济学关系或FTT的结果，该模型追踪一个特定部门的投资需求，但它不提供关于所需资金是否可以获得的信息。

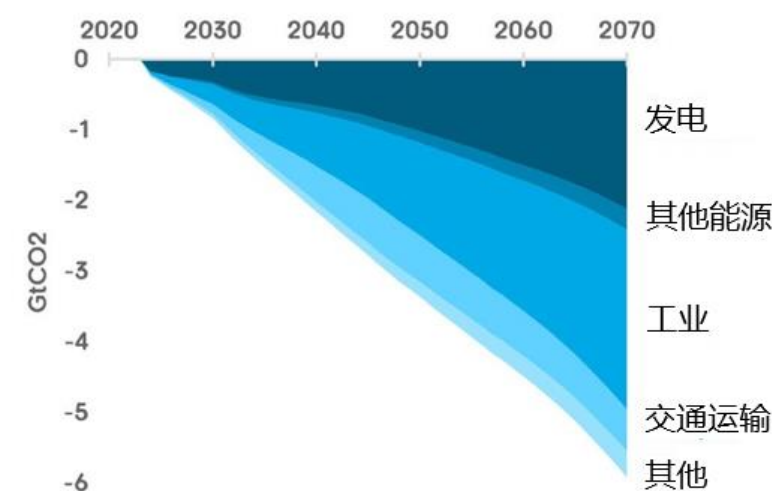
结果

二氧化碳排放

将净零情景与参照情景（符合现行政策）相比较，发现到2070年，能源和工艺相关的二氧化碳排放将减少59亿公吨，相当于在2020和2070年间累计减少1410亿公吨二氧化碳排放。按百分比计算，这比基线减少了91%，到2070年还剩下5亿公吨的二氧化碳年排放量，这被认为可以通过减少土地使用的排放来抵消（见图72）。大部分减排是在发电和工业领域实现的，运输和家庭部门的减排较小。前两个行业在基线情景中很大程度

上依赖化石燃料，由于政策组合带来的技术转型，这一情况发生了改变。净零情景意味着2050年公路运输部门几乎完全脱碳，基线情景则意味着部分脱碳，尤其是自2045年起。因此，在运输部门，净零情景和基线情景间二氧化碳减排结果的差异有限。到2070年，在净零情景下，家庭部门几乎完全脱碳。但是，随着大多数家庭从基于生物燃料的供暖转向低碳替代品，家庭排放水平在基线情景中也很低。在净零情景下，部分基于液化石油气（LPG）的供暖被清洁技术所取代，有助于少量减少二氧化碳的排放。

图72：能源和工艺相关的二氧化碳排放，与基线的绝对差距，横轴：2020-2070年，纵轴：10亿公吨CO₂



一次能源需求

政策组合消除了对化石燃料的大部分依赖，这可以从净零情景和基线之间一次能源需求的变化中看出（见图73）。随着企业和消费者投资于能效措施，并转向更节能的技术（如电动汽车），到2070年，一次能源总需求较基准下降8.6 PWh（减少24%）。以煤和石油为基础的一次能源生产主要被太阳能取代，许多终端技术的电气化使太阳能成为可能。这包括公路运输部门的电气化，到2050年，内燃机车辆将基本不

再使用石油。发电和工业领域的石油使用量也大幅下降。发电、炼钢和非金属矿产等一系列重工业行业的煤炭使用量大幅减少。天然气需求的下降的原因是家庭对液化石油气作为能源的需求减少，以及天然气在工业应用中的使用量下降。到2070年，太阳能将成为一项主导技术，占一次能源需求份额的57%。剩余的大部分化石燃料需求用于非能源用途，或内置碳捕获技术的应用。

²¹⁵ Mercure, J. F. (2012). FTT:Power: A Global Model of the Power Sector with Induced Technological Change and Natural Resource Depletion. Energy Policy 48: 799-811.

²¹⁶ Vercoulen, P., et al. (2018). Decarbonizing the East Asian steel industry in 2050. Meijo University Discussion Paper #0008.

²¹⁷ Knobloch, F. et al. (2021). FTT: Heat – A Simulation Model for Technological Change in the European Residential Heating Sector. Energy Policy 153: 112249.

²¹⁸ Lam, A and Mercure, J-F. (2015). The Effectiveness of Policy on Consumer Choices for Private Road Passenger Transport Emissions Reductions in Six Major Economies. Environmental Research Letters, 10(6): 064008.

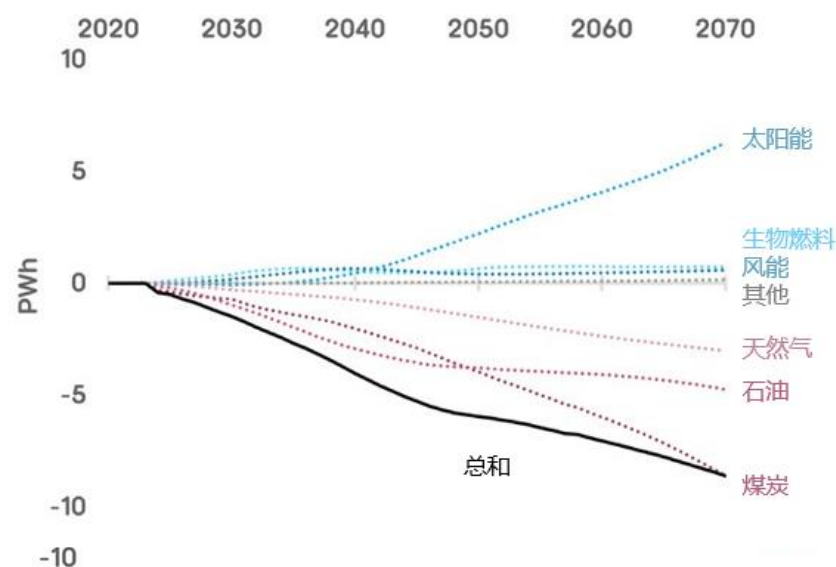
²¹⁹ Mercure, J. F. (2015). An Age Structured Demographic Theory of Technological Change. Journal of Evolutionary Economics, 25(4): 787-820.

²²⁰ Mercure, J. F., et al. (2019). Modelling Innovation and The Macroeconomics of Low-Carbon Transitions: Theory, Perspectives and Practical Use. Climate Policy, 19(8): 1019-1037.

²²¹ Lefevre, J., et al. (2022). Global Socio-Economic and Climate Change Mitigation Scenarios Through the Lens of Structural Change. Global Environmental Change 74: 102510.

²²² Mercure, J-F and Pollitt, H. (2018). The Role of Money and the Financial Sector in Energy-Economy Models Used for Assessing Climate and Energy Policy. Climate Policy, 18(2): 184-197.

图73: 按载体划分的一次能源需求, 与基线的绝对差距, 横轴: 2020-2070年, 纵轴: PWh

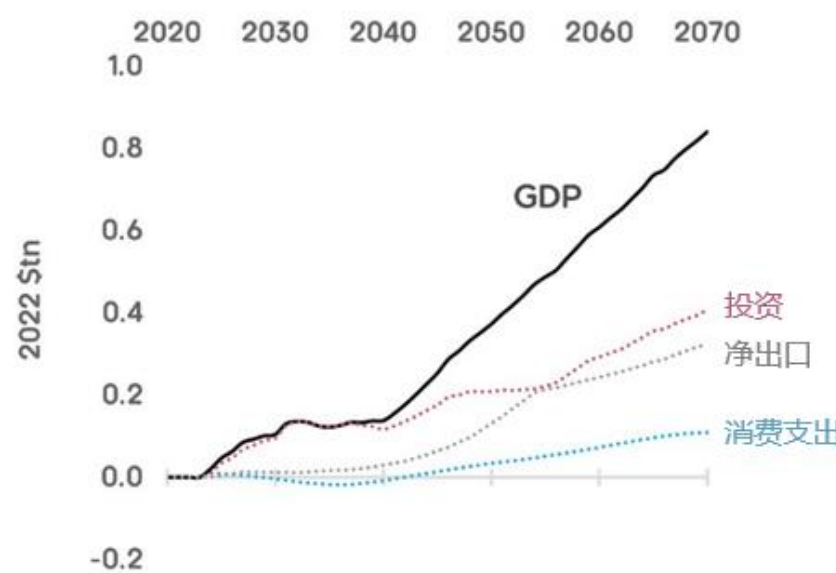


GDP及其组成

建模结果表明, 向净零经济的转型可能会给印度带来净正向的宏观经济影响。到2070年, GDP可能比基线增长8400亿美元(见图74), 意味着2.5%的增长。这些额外需求大多由对低碳技术和节能措施的投资驱动, 这些投资创造了建筑和电气工程领域的经济活动, 它们将在2024年至2040年间占据主导地位。随后, 能

源生产的恢复也带来了可观的收益。随着各类能源用户转向电气技术, 国内发电部门的产出大幅增加, 降低了对进口化石燃料的依赖, 改善了贸易平衡。从转型对消费者支出的影响来看, 影响较小。一些部门的产出增加(见下文)带来了就业增加, 从而有助于增加实际收入和消费。同样, 家庭采用更高效的技术, 减少了能源费用, 有更多的支出可用于其他商品和服务。

图74: GDP及其组成, 与基线的绝对差距, 横轴: 2020-2070年, 纵轴: 万亿美元2022

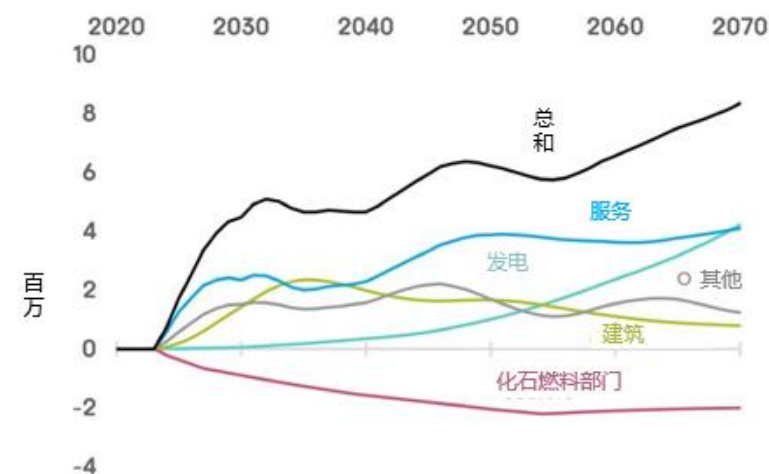


就业

虽然GDP结果显示大部分影响是积极的, 但模拟结果确实表明, 并非每个人都能从中受益。由化石燃料(尤其是煤炭)向其他能源的转型可能导致化石燃料相关部门的就业机会大幅减少, 包括采矿和冶炼部门。超过200万个工作岗位受到威胁。无论出台怎样的缓和政策, 这些工作都可能因自动化而面临风险, 中国可能就是这样的情况。²²³然而, 这些工作岗位的损失会被其他部门工作岗位

的增加所弥补。随着印度经济中能源生产的恢复, 大部分就业岗位将集中在发电部门。此外, 随着转型所需的建造和翻新工作的进行, 建筑行业的就业也将得到强劲提振, 特别是在政策情景的早期和中期。以上部门就业的增加提高了消费者的收入, 他们的额外消费集中于服务部门, 使服务部门的产出和就业也随之增加。总的来说, 建模结果表明, 得益于清洁能源转型, 到2070年, 印度的总就业人数将增加840万, 比基线水平增加1.6%。

图75: 就业, 与基线的绝对差距, 横轴: 2022-2070年, 纵轴: 百万



讨论与结论

首先, 没有任何一个模型能完整地说明情况。这些模拟中缺少几个重要的方面。第一, 没有追踪技能, 这意味着工作是可以互换的。但这种情况不太可能发生, 对那些在化石燃料相关岗位中失去工作的人进行再培训是必要的。第二, 在E3ME-FTT中, 货币供给具有内生性。然而, 它对投资的来源(如贷款、外国投资、积累的储蓄或财富等)是不可知的。此处, 假定可以得到推动这一转型的投资。因此, 净零情景中展示的额外投资应被解释为实现上述转型所需的投资。第三, 假定土地使用增加了碳封存或减少了碳排放。目前, 该模型不包括土地使用的相关内容。第四, 所有情景都未考虑气候和污染损害。可能存在的气候和污染损害减少是脱碳带来的另一常被忽视的好处, 而且不可否认的是, 这一好处难以估计。

尽管这些模型存在限制, 我们仍认为印度在2070年实现净零排放的道路上存在许多机遇。这一转型为印度带来了机会, 如改善能源安全状况、建立更高效的整体能源供应体系、创造大规模的净就业, 以及大规模减少排放。世界其他地区同样制定了脱碳政策, 这有助于低碳技术在全球的推动下更为普及。

在对净零排放的展示中, 我们发现电力部门出现了向太阳能光伏、陆上风力发电和生物发电等重要技术的转型。公路运输领域向电动传动系过渡, 家庭供暖从生物基和液化石油气消费转向太阳能热能和各种电力供暖的形式。在钢铁行业, 我们发现大规模的向钢铁回收和基于氢气的炼钢技术的转型。所有这些转型都会带来供给侧效率的提高, 从而减少对一次能源的需求。

²²³ Clark, A. and Zhang, W. (2022). Estimating the Employment and Fiscal Consequences of Thermal Coal Phase-Out in China. *Energies* 15(3): 800. <https://doi.org/10.3390/en15030800> (Note, this work is presented in this report in the case study on the coal transition in China).



案例分析：

印度经济脱碳：政策和影响

Deepthi Swamy (世界资源研究所 印度), Varun Agarwal (世界资源研究所 印度), Ulka Kelkar (世界资源研究所 印度)

政策问题：未来三十年，哪些政策组合对印度经济脱碳最有效？实施这些政策对经济增长和就业可能产生什么影响？

地区：印度

研究方法：系统动态模型

主要发现：通过将一系列政策重点放在电力、交通和工业部门的脱碳上，印度经济实现脱碳是可能的，同时还能节约净成本，实现更好的经济增长和就业。

交流互动：本案例依托的脱碳情景是与来自工业界、智库、学术界、资助方的行业专家和一些政策制定者磋商后制定和完善的。分析所得的主要发现与见解已在多个平台进行了介绍和讨论，包括拟议的全球气候联盟（GCA）²²⁴研究合作，以及印度道路运输和公路部和印度国家转型研究所（NITI Aayog）在印度气候和能源建模论坛（ICEMF）²²⁵指导下建立的工作组。

摘要：作者使用系统动态模型来思考印度经济脱碳可能需要的政策组合，以及这些政策组合对经济增长和就业可能产生的影响。他们认为该模型可以更真实地反映政策与经济之间的相互作用。他们发现，印度经济脱碳是可能的，同时可以节约净成本，实现更好的经济增长和就业。

介绍

印度在2021年11月举行的《联合国气候变化框架公约》第26次缔约方大会（COP-26）上宣布了到2070年实现净零排放的目标。²²⁶规划一条满足其人民愿望（如获得充足能源的可靠途径）的低碳发展道路，将需要对印度经济进行深层次的结构改造。目前，印度经济能源需求总量的约四分之三依赖于化石燃料。²²⁷

为了设计符合印度脱碳和发展目标的有效政策组合，孤立地评估不同的政策选择远远不够；还需要政策制定者了解不同部门的政策选择和经济之间的潜在关系，以及这种相互作用如何影响政策目标的实现。

分析框架

印度能源政策模拟器（EPS）²²⁸是一个开源的系统动态（SD）模型，它可以通过对印度到2050年的跨部门气候政策组合及其对宏观经济的影响进行综合评估，为政策制定提供信息。

EPS的政策选择涵盖了主要的经济部门：交通、建筑、电力供应、工业（包括农业、废弃物和废水）、土地使用和氢气。政策选择包括定价政策（如税收和补贴）以及法规（如技术采用或淘汰）。印度EPS的结构、建模方法、基本数据来源以及假设都在网上的技术说明中进行了阐释。²²⁹

与迄今在印度用于气候政策分析的建模方法相比，EPS建模方法包括以下主要优势：

- 与现有的建模方法（多数采用可计算的一般均衡或局部均衡法）相比，EPS的SD方法可以更贴近现实地展示政策和经济间动态的相互作用，由此产生的整体效果不同于颁布多个单一政策

的效果总和。例如，EPS结合所预测的全球价格和内生学习来计算技术成本，以说明当地技术扩散的影响。这意味着促进技术采用的法规或补贴可以创建一个不断强化的循环，由此，由政策引发的技术采用加快会进一步降低技术价格，这反过来又加速了技术的采用。

- EPS覆盖整个经济所带来的跨部门政策分析能够使用户发现不同部门在政策执行方面的协同效应和取舍。例如，电力供应脱碳政策未能跟上终端使用电气化政策的步伐，使后者无法实现其减排的潜力，在极端情况下可能导致排放惩罚。
- EEPS包括一个综合的投入-产出模型，该模型计算在某一情景下制定的气候政策对宏观经济参数(如GDP、就业和政府账目)的影响，它同时考虑了所制定政策的直接、间接和所诱发的经济影响。当前用于印度气候政策分析的模型通常不会输出这些内容，关于印度气候行动对宏观经济潜在影响的研究文献也很有限。然而，这部分分析与印度政策制定者尤为相关，对政策制定者而言，经济发展是一个关键的政策目标。

EPS的一些主要局限性如下：

- 它在总体空间（国家）和时间（年度）的维度上模拟政策。模型的输出是汇总的，无法评估已颁布政策的影响（如对就业和GDP的影响）在各地区或人口群体中的分布情况，如按收入、性别或年龄分布。
- 模型中的间接和被诱发的经济影响是根据截至2015年印度各经济行业投入产出（I/O）表中的交易关系来计算的，假定这些影响被持续一段时间。
- 目前不可能对模型中的不确定性进行量化。

²²⁴ The Global Climate Alliance (GCA) Collaborative is an independent research effort to evaluate how Global South countries can best secure the support of Global North countries to address the economy-wide impacts of climate change, including both adaptation and mitigation measures. Over the past two years, several academic institutions and think tanks have been collaborating on these issues and pooling their individual research efforts.

²²⁵ India Climate and Energy Modelling Forum (ICEMF) is a platform for leading energy experts, think tanks, researchers, modellers and policymakers to collaborate and examine important climate, energy and environment-related issues, including their economic linkages, through integrated modelling exercises.

²²⁶ <https://pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=1768712>

²²⁷ <https://www.iea.org/reports/india-energy-outlook-2021/energy-in-india-today>

²²⁸ <https://india.energypolicy.solutions/scenarios/home>

²²⁹ <https://www.wri.org/research/tool-designing-policy-packages-indias-climate-targets>

作者分析

我们使用印度的EPS分析了专注于电力、工业和运输部门的政策组合，它们将使印度走在正确的道路，迈向2070年实现净零二氧化碳排放目标。政策组合，下文称之为长期脱碳（LTD）情景，在短期内建立在可再生能源、能源效率和电动出行领域的现有政策目标上。在中期，则考虑在政策的支持下逐步引入如氢能和电池储能等新兴技术，以到2050年达到较高实施水平。该情景中建模政策的选择以三个主要标准为指导：a）它们与印度当前政策和目标的一致性，以及围绕支持氢能等新绿色技术政策的新兴对话，b）政策（与模型中可用的其他政策选择相比）在促进温室气体减排方面的相对有效性，以及c）它们对宏观经济指标（即政府账目、GDP和就业）的影响。

我们展示了与截至2019年的参考情景相关的研究成果，该参考情景纳入了现有政策的影响。

LTD情景下政策制定和政策执行率的目标水平由多种因素决定，包括参考情景中政策的现有实现水平、文献综述确定的政策中的模拟技术能够实现的技术潜力，以及考虑到印度落地执行的挑战，与行业专家就政策可行性进行的初步咨询。

我们的方法是构建一个前瞻性的或“假设”的情景，旨在评估给定的一组政策行动的合理结果，而非提出一系列“最佳的”政策行动。有几种可选择的行动组合可能在未来达到相同的排放水平，它们中的每一种都对其他产出（如成本、社会效益和经济效益）有不同的影响。

我们分析的涉及政策利益的具体问题如下：

- 未来三十年内，对印度经济脱碳最有效的政策/政策组合是什么？
- 制定这些政策对投资、经济增长和就业可能产生什么影响？

结果

参考情景认为，印度的总排放量在未来30年内约翻一番，从2022年的略高于30亿吨二氧化碳当量（BtCO₂e）上升到2050年的约60亿吨二氧化碳当量。尽管受经济增长和城市化推动，在此期间单位GDP的排放量减少了61%，排放总量仍在上升。

工业和运输部门的排放量增长最快，到2050年约为目前的三倍。相比之下，得益于印度的可再生能源目标和下降的技术成本，电力部门的排放量与目前的水平相比没有显著增加，这些在参考情景中都被考虑。2050年，工业部门排放量将占总排放量的近50%，其次是电力（18%）和运输（16%）部门。

脱碳的关键政策杠杆

LTD情景的政策主要集中在三个部门的脱碳上——即工业和运输部门，因为参考情景中它们的排放量增长迅速，以及电力部门，因为绿色电力是终端使用电气化政策和绿色氢能生产成功的先决条件。

政策（及其目标水平）是通过应用前一节中提到的标准来确定的。例如，清洁发电和采用电动汽车的法规建立在现有的可再生能源和电动出行政策目标的基础上。初步征求行业专家的意见后，选择强制要求行业电气化和采用氢能，这是由于它们所依托的技术具有高减排潜力。初步选择碳税作为转型期间增加公共收入的一种手段，它在支持脱碳的法规上也起到了补充作用。表12总结了LTD情景的主要政策假设。

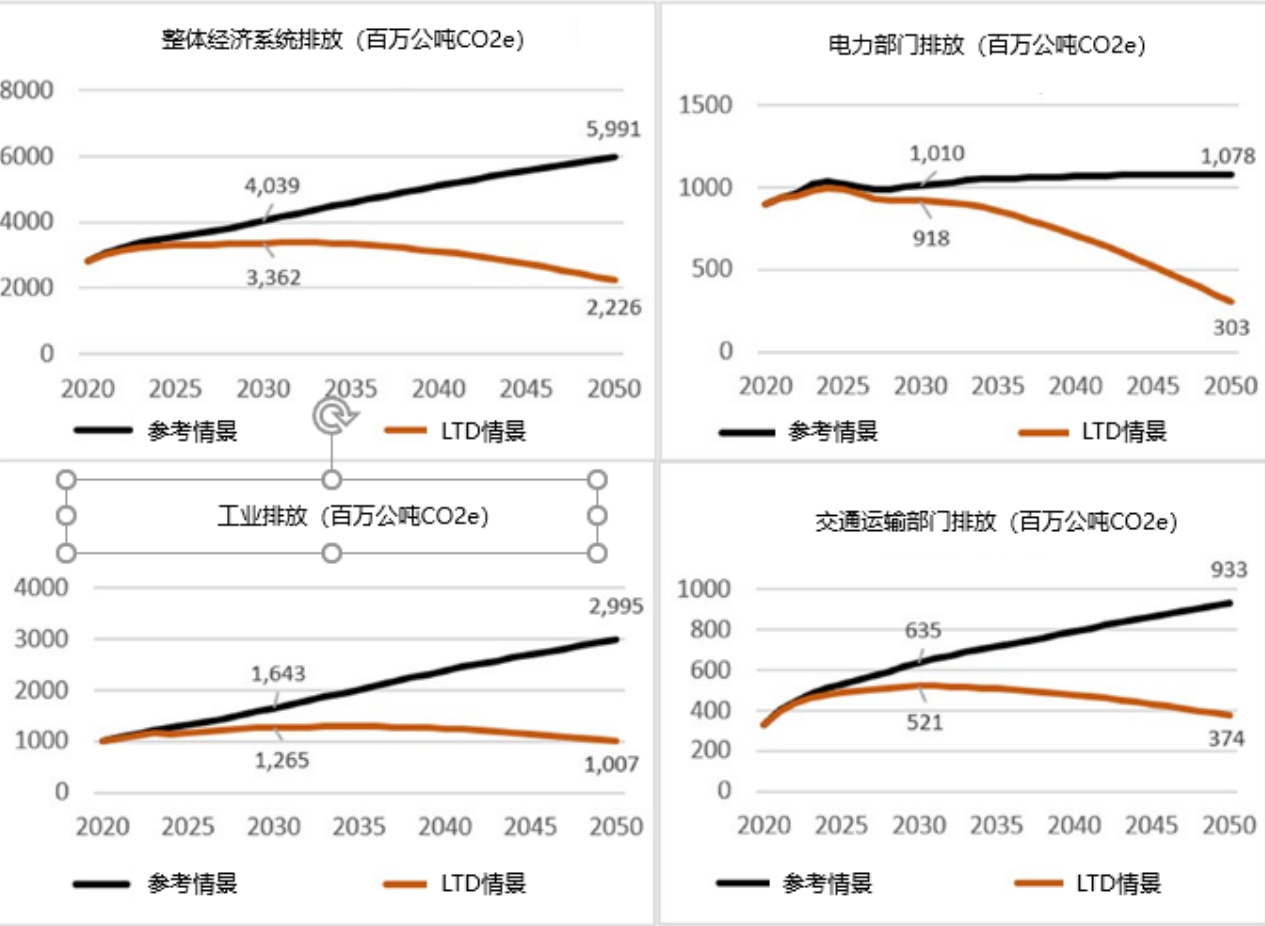
表12：LTD情景中的关键政策杠杆。*除非另有说明，该政策自2020年起线性实施，至2050年达到全面实施

政策	参考情景（2050）	LTD情景（2050）*
工业电气化和氢能使用的硬性规定 (工业部门化石燃料替代的百分比。从2030年的0开始线性增长)	0	50%
电解制氢的硬性规定 (从2025年的0开始线性增长)	0	100%
二氧化碳税 （每吨二氧化碳当量） (电力和工业部门)	0	INR 3500 (USD 50)
电动汽车/氢能源汽车销售法规 （占新车销量的百分比） 客运LDV， 客运HDV 货运LDV， 货运HDV 2W, 3W (自2030年始的H2V销售法规)	35%, 23% 14%, 4% 38%, 30%	80%, 50% (+25% H2V) 70%, 25% (+45% H2V) 100%, 100%
材料使用效率硬性规定 (排放密集型产品需求的减少 w.r.t .参考情景)	-	水泥： 15% 钢铁： 20%
无碳发电硬性规定 (强制规定的最小百分比)	68%	93% (75%)
煤电提前淘汰硬性规定 (自2027年的300MW/年线性增长)	-	7 GW/年

LTD情景的政策在2030年将减少参考情景中排放量的约五分之一，2050年减少三分之二。累计而言，2020-2050年间相对于参考情景所减少的排

放量略高于46 BtCO₂e。图76显示了这两种情景在此期间覆盖整个经济和部门范围的排放轨迹。

图76: 参考情景和LTD情景中温室气体排放对比



在电力部门，由于出台了无碳发电和煤电提前淘汰的硬性规定，到2030年，无碳发电的比例将接近50%，到2050年达到90%以上（目前略低于25%）。技术扩散导致的可再生能源（RE）成本下降（起初是这些硬性规定的结果），反过来推动了RE产能的进一步增加，这又进一步降低了其成本。因此，RE技术的吸收形成了一个积极的强化效应，并且随着时间的推移，无碳发电成果超越了强制性政策的要求。二氧化碳税也起到了补充作用，它使基于化石燃料的电力更加昂贵。再加上相对于化石燃料，RE的成本竞争力不断提高，电力部门的政策共同导致2024年后不再需要新增煤炭产能。

电力部门的快速脱碳支持了工业和运输部门以电力和/或绿色氢能代替化石燃料的硬性规定，有助于这两个部门发挥其减排潜力。这些燃料转换规定将从2025年或2030年开始逐步实施，从长远来看，它们是工业和运输部门脱碳的主要政策杠杆，而能效政策则在短期内发挥作用。这些规定还得到碳税的补充，如同电力部门。然而，与电力部门不同，这一政策组合在工业和运输部门没有达到成本临界点，因为这两个部门的硬性规定实施更具渐进性，褐色和绿色技术的成本差异更大。不过，与参考情景相比，得益于这些政策，电力和氢能在整个工业和运输业能源结构中的份额明显提高(见表13)。

表13: 随着时间的推移，电力和氢能在工业和运输业能源结构中所占份额

年份	工业能源结构				运输业能源结构			
	电力份额		氢能份额		电力份额		氢能份额	
	参考情景	LTD情景	参考情景	LTD情景	参考情景	LTD情景	参考情景	LTD情景
目前	13%		0%		1.5%		0%	
2030	16%	20%	0%	2%	3%	6%	0%	0%
2050	16%	40%	0%	18%	9%	29%	0%	7%

经济成果

我们发现，与参考情景相比，印度经济在长期实现脱碳是可能的，同时随着时间的推移，还能在整个经济中节约净成本，实现更好的经济增长和就业。

向绿色技术的转型需要在参考情景下增加资本支出。到2030年，额外的年资本支出约为280亿美元（2018）（约占GDP的0.5%），此后随着RE基础设施、电动汽车、电池储能和绿色氢生产的发展，该支出会不断上涨，到2050年将达到2470亿美元（约占GDP的1.5%）。虽然前期资本投资的规模可能会带来融资方面的挑战，但我们看到，随着时间的推移，采用绿色技术在整个经济中减少的燃料及运营维护成本超越了前期资本投入的成本，从长远来看，从21世纪40年代起可以实现净节约。

从化石燃料向其他能源的转型导致了煤矿开采、石油加工和内燃机汽车制造等褐色部门的萎缩。此外，由于石油产品目前占中央政府税

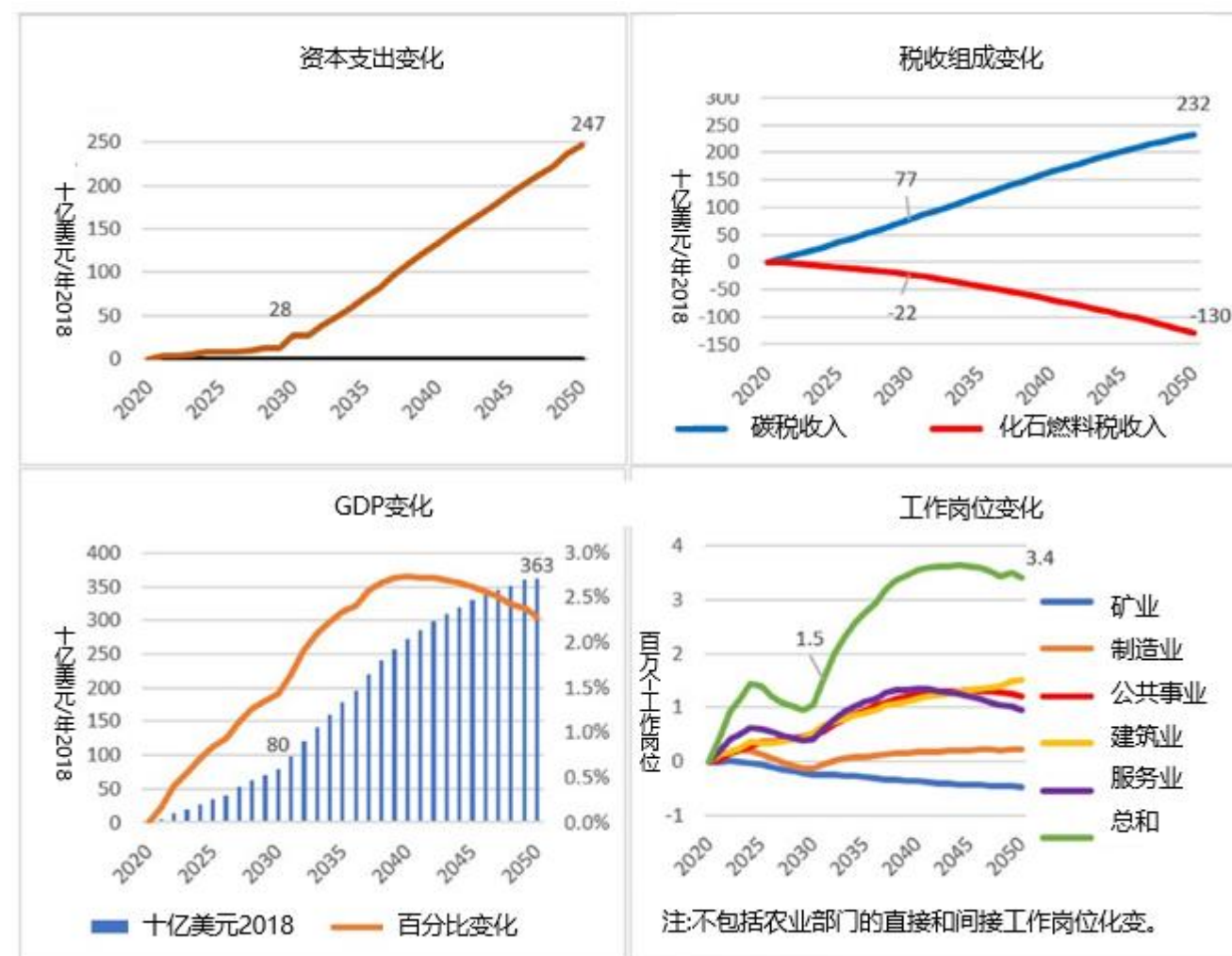
收总额的25%以上，减少石油产品的使用可能会大幅削弱整体税收，使政府支出受限，从而加剧经济萎缩。政府在教育、医疗等基本服务上的支出可以提高生产效率，对经济增长产生乘数效应。然而，我们发现，碳税(随着时间的推移而阶段性增加)有可能通过将税基扩大到所有导致排放的化石燃料使用，包括工业过程排放，来抵消转型期间的石油税损失。

碳税收入支撑的生产性公共支出，以及清洁发电和制氢等行业的增长，足以抵消甚至超出LTD情景下褐色部门的萎缩。总体而言，与参考情景相比，LTD情景下的政策组合到2050年将使GDP提高2.3%，并创造340多万个就业岗位。230经济增长和就业的驱动力是供给侧效应——尽管对能源和材料的总需求因效率提高而下降，但对脱碳供给的投资(以及相关的间接和诱导效应)推动了经济的增长。231图2展示了相对于参考情景，LTD情景的宏观经济结果。

²³⁰ These include direct jobs (created due to enacted climate policies) and indirect jobs (created within industries that supply to directly affected industries). The agriculture sector is excluded from the jobs estimates presented here.

²³¹ Indirect effects refer to changes in output or employment of sectors that supply the sector directly affected by a policy. Induced effects are created by changes in re-spending of money by workers or government in the economy as a result of direct and indirect effects.

图77: 相对于参考情景, LTD情景的宏观经济结果



结论

在LTD情景下的政策组合主要依赖早期的政策信号(例如对可再生能源、电动出行和工业燃料的硬性规定)来刺激私人对绿色技术的投资,以及反过来,增强通过技术吸收导致的成本降低而推动的绿色技术进一步采用的强化效应。在这种情况下,碳税可以作为一种补充政策,进一步降低使用绿色技术相对于褐色技术的成本。在政策组合中,碳税还有助于补偿石油税收减少而带来的公共收入损失,从而减轻政府生产性支出削减对经济活动的负面影响。然而,碳定价政策可能在短期内对必需商品的价格产生重大影响,但在长期内作为提高公共收入的手段效果甚微,因为化石燃料的使用已在经济中被淘汰。这

强调了周密设计的必要性,设计中应包含对其他公共收入来源的评估。

在政策组合中,有几种政策类型是尚未探索或无法探索的,随着印度迈向低碳未来,政策制定者对它们的评估和考量至关重要。虽然由于补贴对政府账目的影响,政策组合不依赖于补贴,但针对特定技术的补贴可以被视为一项重要的补充政策,与其他政策相结合,它能够通过为新兴技术创造成本临界点,加速如海上风能、氢能和电池储能等新兴绿色技术的采用。一项类似的补充政策(不在政策组合范围内是公共基础设施的建立,如电动汽车充电站和氢气分销网络,以鼓励消费者和工业界采用绿色技术。

最后,为了确保低碳转型是可持续的和公正的,任何政策方案都必须评估和纳入再分配政策,以确保转型的成本和利益在社会各部分得到公平分配。





案例分析:

可持续发展目标与能源转型间相互作用的
数据驱动系统映射

Fernanda Senra de Moura (牛津大学) 和Pete Barbrook-Johnson (牛津大学)

政策问题: 能源转型将为可持续发展目标 (SDGs) 带来哪些风险和机遇, 我们要如何管理这些风险和机遇?

地区: 巴西

研究方法: 数据驱动的系统映射方法。

主要发现: 风能与巴西可持续发展目标及经济指标间的联系相对紧密, 与健康、水资源和卫生部门的产出存在相互作用, 与碳排放和电力供应间有直观的联系。也有证据表明, 风能与生物燃料间的联系尚未得到充分研究。太阳能生产与可持续发展目标及经济指标间的联系则较弱, 表明太阳能与其他目标间没有明显的协同或取舍。未来的工作将更密切地关注这些关系。

交流互动: 这项工作已提交至EEIST巴西社区进行实践, 但全面的实施参与尚未开始。建模工作正在推进, 在下一开发阶段将进行关键的合作。这将涉及向政策利益相关方展示完整的映射图和分析, 着重关注转型和可持续发展目标间的取舍和协同, 在此基础上讨论如何开发和使用更具针对性的分析方法。

摘要: 作者使用数据模型来探讨在巴西能源部门增加可再生能源使用对巴西发展造成的普遍影响。该研究的主要目的在于探索可再生能源多样化与可持续发展其他维度间的协同和取舍, 以便政策制定者思考如何利用协同作用及瓶颈的突破去实现该国的可持续发展目标。该研究采用了数据驱动的系统映射法, 将基于数据的网络估算法、标准网络分析法和主观映射分析法相结合, 从而能够对包含可再生能源政策的广泛系统进行定量和定性描述, 这反过来又为高层决策和跨部门政策协调提供了信息。

介绍

能源转型会给可持续发展目标带来哪些风险和机遇? 我们可以如何管理它们? 在这个案例分析中, 我们从狭隘聚焦狭隘的模拟模型中抽身出来, 考虑能源转型如何与以可持续发展目标为代表的更广泛目标进行互动相互作用。我们使用数据驱动的系统映射方法来探索巴西的可持续发展目标、经济和能源转型指标间的相互作用。具体来说, 我们使用国家层面的时间序列数据来估计可持续发展目标、经济和能源转型指标的网络 (即我们的映射地图), 然后使用主观映射地图和子映射地图分析法来分析所得地图, 以补充标准网络指标。

我们专注于可持续发展目标与风能扩张之间的相互作用; 一组初步数据结果表明风能和生物燃料之间存在联系, 受其启发, 我们反复实验进行迭代, 进一步研究生物燃料, 重点关注了甘蔗。但是, 使利用用这类映射地图的进行分析很灵活, 因此也可以进行更有针对性的政策分析, 或是提供对其他建模结果或建议的情景化处理也是可能的, 正如进行中的EEIST子项目就是如此。本案例以该子项目为基础研究基于的进行中的EEIST子项目所展示的那样。

可持续发展目标: 系统化的政策方法

联合国大会在2015年通过了《2030年可持续发展议程》, 其中提出了有17个可持续发展目标。每个目标都包含5到19个具体目标, 以及6到28个相关指标。《2030议程》设想将经济、社会和环境发展目标整合为一个相互关联系统的组成部分, 而不是单独独立的目标。应用学术研究反映了这种系统化的政策方法, 关于可持续发展目标互动作用的文献快速涌现,

多方法将这类互动概念化为可持续发展目标指标网络, 我们也是如此。此外, 随着2030年最后期限的逼近, 以及许多国家在一些目标上仍旧落后, 更好地理解可持续发展目标的相互作用已成为一个关键的政策问题, 原因在于其是发挥协同效应和解决权衡问题的需要。

学者们已将能源转型和可持续发展目标之间的相互作用纳入考虑范围。Nerini等人 (2017) 在专家的启发下, 总结了可持续发展目标7 (能源) 和非能源可持续发展目标之间的协同作用和权衡。同样, McCollum等人 (2018) 绘制了能源和其他可持续发展目标之间的协同和权衡映射图, 但他们的工作以大规模、系统性的能源相关文献回顾综述为基础。最近, 来自政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第三工作组的报告总结评估了关注可持续发展目标和气候变化缓解减缓方案 (包括能源转型) 之间互动作用的文献。

巴西的能源转型和可持续发展目标

在巴西, 可再生能源在能源供应矩阵中的比例历来很高 (自1970年以来便在39%至58%之间), 它大大高于世界平均水平 (2019年巴西值为46%, 而世界平均值为14%)。然而, 考虑到在现有水平上进一步扩张水电存在环境成本和气候风险, 风能和太阳能作为可再生能源生产多样化的一种手段, 在过去10年中意义凸显。

在这一背景下, 经济适用的清洁能源 (可持续发展目标7) 是巴西当前唯一实现并能够维持的可持续发展目标。其他有望实现但仍存在挑战的目标包含气候行动, 清洁饮水和卫生设施, 优质教育。在所有其他目标上, 巴西的表现都不太乐观, 因此, 更好地了解巴西在清洁能源方面的优势, 以及近期其能源供应矩阵中可再生能源多样化与可持续发展其他方面的互动, 能够为意在实现可持续发展目标的关键政策提供参考。

232 Barbrook-Johnson, P. and Senra de Moura, F. (2022) Using Data-Driven Systems Mapping to Contextualise Complexity Economics Insights. INET Oxford working paper, https://www.inet.ox.ac.uk/publications.

233 Breuer, A. et al. (2019). Translating Sustainable Development Goal (SDG) Interdependencies into Policy Advice. Sustainability 11(7); Bennich, T. et al. (2020). Deciphering the Scientific Literature on SDG Interactions: A Review and Reading Guide. Science of The Total Environment 728, 138405.

234 Fuso Nerini, F. et al. (2018). Mapping Synergies and Trade-Offs Between Energy and the Sustainable Development Goals. Nature Energy 3, 10-15.

235 McCollum, D. et al. (2018). Connecting the Sustainable Development Goals by their Energy Inter-linkages. Environmental Research Letters 13, 033006. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaafe3.

236 Shukla, P. et al., eds (2022), Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Summary for Policymakers, IPCC.

237 Empresa de Pesquisa Energética. (2022). Brazilian Energy Balance 2022: Year 2021. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro; Empresa de Pesquisa Energética (Brasil) (2022) Power matrix and electrical matrix. ABCDEnergia Blog. Available at: https://www.epe.gov.br/sites-pt/abcedenergia/Paginas/MATRIZ-ENERGETICA.aspx.

238 Sachs, J. et al. (2022). Sustainable Development Report 2022, Cambridge University Press, Cambridge.iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaafe3.

数据驱动的系统映射方法

将数据带入系统映射

我们使用一种新的数据驱动系统映射法，它使我们从而能够探索系统中不同领域间的广泛互动，并将新经济思维的见解置于现实世界的政策问题背景下，使之与现实世界的政策问题沟通与融合。在传统的系统映射工作中，主要目标是确定系统的关键因素和它们之间的联系，这通常以参与式方式开展。²³⁹核心产出是绘图映射过程和相应的映射地图，它代表着对发挥作用因素的全面和共同的想法，而这又可以作为政策设计、评估和评价的框架和讨论工具。

我们在方法论上的主要贡献是提供了一种将数据带入制图映射过程，以及直接从数据中建立系统映射的方法。这种方法使我们能够建立代表体现广泛一系列因素间实证性规律的网络，并使用与政策相关的方法分析这些网络。

网络估计：研究方法

我们展示了两种数据驱动的网络估计技术的使用——相关网络和PC算法。我们希望在当下开展的工作中结合更多的方法，它们只是其中之二两种。

相关性阈值是最常见的网络估计技术之一，主要原因在于它易于实施和解释，且不对变量间的关系施加限制性假设。该方法包括两个主要步骤：首先，给定一组节点（即我们引入分析的变量），我们估计出一个完整的相关矩阵。然后，从一个空白网络开始，对于每一对节点，如果它们之间的估计相关性高于所选阈值和/或在变量之间没有真正联系的情况下，观察到的测试统计数据（P值）低于所选阈值，我们就用一条边（即它们之间的连接）来填充我们的网络。

相关性阈值是一个很好的基准，但由于它只关注成对的关系，它不能解决干扰变量带来的问题，或者

概括的说，它无法在考虑到系统其他节点（条件依赖性）的同时，绘制出系统节点间关系的映射图。一种替代性方法是将系统视为一个条件依赖的网络，它可以被建模为一个图形，并使用条件独立性测试来学习其结构。换句话说，当评估两个节点之间是否存在边时，系统中的所有变量都被考虑在内。

为了实现这种方法，我们在此使用因果结构学习的主要算法——PC算法²⁴⁰。该算法分三个步骤。1) 确定网络的“骨架”，即估计所有网络的边，而不考虑关系的方向；2) 确定v型结构 $x \rightarrow z \leftarrow y$ 的边的方向，即结构中两个变量x和y具有共同影响z；3) 基于步骤1和步骤2的结果，进一步确定边的方向。²⁴¹

网络估计：数据

我们使用国家层面的可持续发展目标、宏观经济和能源部门指标的时间序列。有关可持续发展目标指标的数据来自联合国可持续发展目标数据库，我们还补充了来自世界银行、气候观察、拉丁美洲和加勒比经济委员会、世界不平等数据库和巴西灾害信息综合系统（S2ID）的数据。能源部门的数据（包括能源转型指标）和宏观经济因素的数据来自巴西矿业和能源部、巴西应用经济研究所、世界银行、巴西地理和统计研究所，以及巴西甘蔗观察站。

使用和分析系统映射地图

一旦估计出一个网络，就可以使用不同的方法来分析系统和解释结果。我们建议遵循Barbrook-Johnson和Penn（2021，2022）²⁴²的做法，考虑三个广泛用于使用和分析映射图的方法：（i）观察全图的结构，即使用不同的布局和可视化方法来探索整个映射图的结构，例如寻找聚类、瓶颈和连接中断的因素。（ii）网络分析，即使用规范的网络分析方法来寻找稳定连接和存在影响的因素。（iii）子地图分析，即查看映射地图的特定子区域来考虑具体问题——例如，什么因素影响关键结果，或者一系列活动集或是投入和结果之间存在什么样的路径。

局限性

本案例基于正在进行的工作，我们在此只实施了两种网络估计方法，使用的数据集仍在搭建中。总体而言，任何数据驱动的系统映射工作的主要局限可能在于难以将其融入参与式过程，较难以通俗易懂的方式向他人传达映射地图和发现的丰富内容，以及难以获得所有相关因素的可使用和全面的数据。

实例研究结果：风能和生物燃料

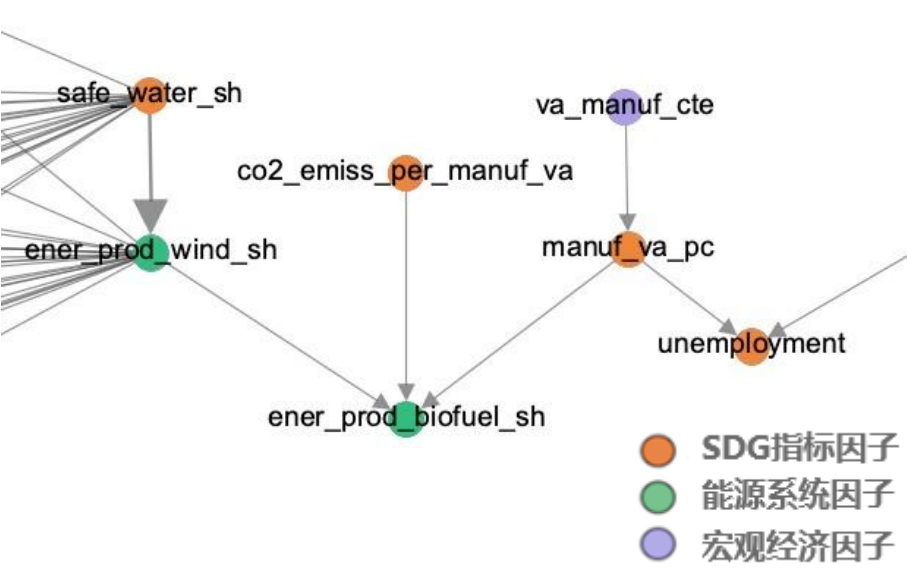
为了说明所用方法，在本节中我们介绍了巴西风能与可持续发展其他方面互动上的初步发现，并演示了我们如何在第一组数据结果的基础上进行迭代，以进一步研究生物燃料在巴西可持续发展目标-能源系统中的作用。

完整映射地图（此处未显示）表明风能与相关网络中的几个节点存在联系，因此，风能是能源转型相关因素中联系网络最密集的，也是三大标准网络衡量方法中排名前五的节点之一：中间性（反映节点是“桥梁”还是“瓶颈”）、紧密度（反映节点是否处于密集状态）和程度（连接的数量）。具体而言，初步研究结果表明，风能与温

室气体排放总量（可持续发展目标13）和可获得的电力（可持续发展目标7）有关，但它们也表明，风能与卫生部门243（可持续发展目标3）、可获得的水资源和卫生设施（可持续发展目标6）、保护区（可持续发展目标14和15）以及材料消费（可持续发展目标12）之间存在不太直观的相互作用。

除了与相关网络中的几个节点存在联系外，在PC算法网络中，风能份额与生物燃料的份额相关，而生物燃料是巴西的主要能源来源。在这一联系的推动下，我们进一步研究了生物燃料在可持续发展目标能源系统中的影响。从生物燃料的上游看（图78），我们可以看到制造业增加值和每单位增加值的二氧化碳排放量（两者都是可持续发展目标9的指标）都与生物燃料有关。由于生物燃料包括甘蔗产品、木柴、植物油和废弃能源，而这些能源又可以转化为热能、机械能和光能，这些关联的合理性及其背后的机制将是进一步研究的有趣课题，与能源和制造业部门利益相关者的讨论也会如此，尤其是考虑到工业化是可持续发展目标的一个重要方面。

图78: 生物燃料的个体网络²⁴⁴。这显示了生物燃料生产的两步个体网络（即所有节点直接连接或仅通过一个步骤连接），网络中删除了许多通过风能生产连接的节点



²³⁹ Barbrook-Johnson, P. and Penn, A. (2022). Systems Mapping: how to build and use causal models of systems. Palgrave.

²⁴⁰ Spirtes, P. et al. (1993). Causation, Prediction, and Search – Lecture Notes in Statistics 81. Glymour, C., Scheines, R and Spirtes, P. (2001), Causation, Prediction, and Search, 2nd edn, MIT Press, Cambridge..

²⁴¹ Heinze-Deml, C. et al. (2018). Causal Structure Learning. Annual Review of Statistics and Its Application 5: 371-391.

²⁴² Barbrook-Johnson, P. and Penn, A. (2021). Participatory Systems Mapping for Complex Energy Policy Evaluation. Evaluation 27(1): 57-79. Barbrook-Johnson, P. and Penn, A. (2022), Participatory Systems Mapping, Systems Mapping, Palgrave Macmillan.

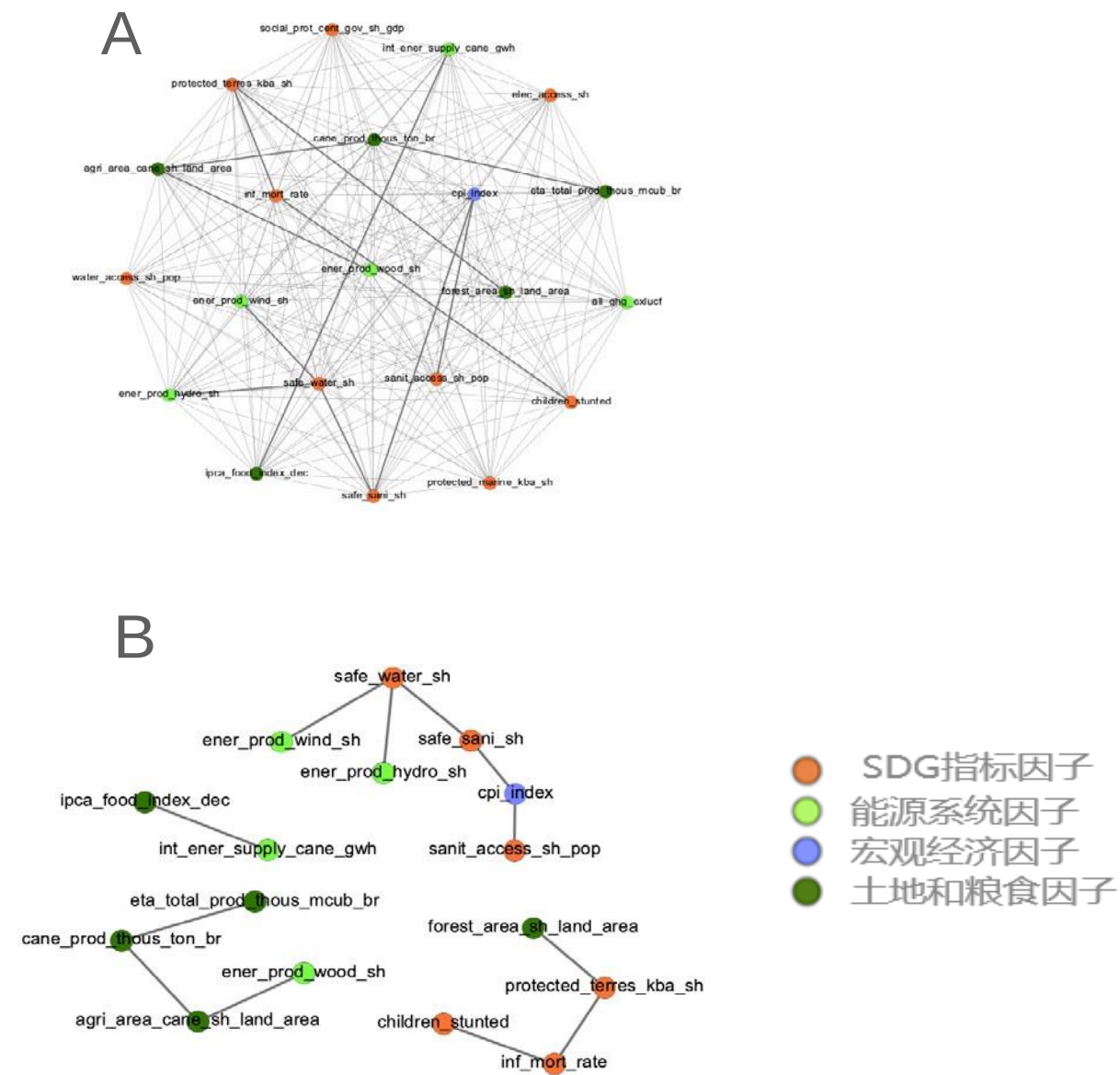
²⁴³ Share of women with anaemia, infant and neonatal mortality, children stunted.

²⁴⁴ An ego network is a subset of a network focused on one particular node and its neighbours.

为了展示对子地图的探索如何能够引发进一步的文献回顾、数据收集和映射图绘制，我们再次迭代，这次额外关注生物燃料和土地利用情况的作用，并以此为起点。这一想法意在探索巴西生物燃料、土地利用情况和粮食价格之间的相互依存关系，原因在于随着农产品越来越多地被用作能源生产的投入，一些文献考虑到了石油和农产品价格同步变动的情况。²⁴⁵

我们收集了更多的数据来拆分生物燃料，重点关注甘蔗。具体来说，我们将甘蔗和乙醇生产，以及甘蔗发电的能源供应数据纳入考虑范围。其他可再生能源的来源包括木材、太阳能、风能和水力。我们还囊括了巴西土地面积中甘蔗和森林所占份额的数据，以及食品价格指数。由此生成的子映射图如图79所示。这一迭代显示了生物燃料因子与映射地图的高度紧密联系，所有这些因子都占据了中心位置。

图79: 生物燃料的个体网络2. A) 生物燃料相关因素的两步个体网络。B) 相同的网络，但只展现了同时存在于相关网络和PC算法网络中的边



²⁴⁵ Hassler, J. and Sinn, H. (2016). The Fossil Episode. Journal of Monetary Economics 83: 14-26. Peersman, G. et al. (2021). The Interplay between Oil and Food Commodity Prices: Has it changed over time? Journal of International Economics 133: 103540.

如果保留同时出现在 PC 算法和相关网络中的连接，我们看到了不同的情况。首先，看到了一条从甘蔗种植面积到甘蔗生产，再到乙醇生产的直观链条。虽然 PC 算法无法指导这些边的绘制，但出于政策目的，可以利用专家的知识/或进一步的数据收集来完成地图的这一部分。还看到甘蔗电力供应与食品价格之间的关系，但甘蔗电力供应与链条的其他部分没有联系，这个问题可以与部门专家讨论。

同样，还可以进一步调查生产甘蔗的土地面积与来自木材的能源生产份额之间的联系，以及森林面积（可持续发展目标15）与甘蔗生产之间缺乏联系的情况，特别是考虑甘蔗生产会在何种程度上导致森林砍伐，这是能源（可持续发展目标7）和森林保护政策两者（可持续发展目标15）都需要考虑的重要问题。

总之，我们数据驱动的映射地图显示风能与可持续发展目标-能源系统中的其他节点联系紧密，除了与排放（可持续发展目标9和13）和电力获取（可持续发展目标7）有关外，还极可能与健康、水资源和卫生部门（可持续发展目标3和6）存在相互作用。风能同样可以与生物燃料相联系，当生物燃料被进一步细分，且重点关注甘蔗能源和土地利用时，其在相关网络中也与其他节点存在密切联系。最后，生物燃料的 PC 算法网络为进一步研究甘蔗生产、森林面积和排放之间的相互作用提供了有趣用的建议。

总结

这项初步开展的、由数据驱动的系统映射绘图工作显示，在巴西，比起太阳能，风能和生物燃料似乎与可持续发展目标及经济指标的联系更为紧密。这表明，想在能源转型和可持续发展目标之间寻求协同和机会，或解决进行权衡和应对风险，最好将注意力集中在风能和生物燃料上。在未来的工作中，我们将更详细地探讨这些关系，并将其向负责支持巴西可持续发展目标进展的政策利益相关者展示，以引发由利益相关者问题所推动的进一步分析。

我们认为，这种数据驱动的系统绘图法是一个有用的工具，它可以补充较为狭隘的模型，并与定性的系统绘图法相结合（如案例《什么是最具成本效益的碳定价形式？》所示）。事实证明，从政策设计、评估到评价7，系统映射在从事政策制定的分析人员中被证实是有用的，且受欢迎，我们认为我们应该更多地利用不同类型的系统映射，包括更多的数据驱动方法。具体而言，在新的经济思维和模型框架内，系统映射是风险-机会分析246的关键前期步骤，也是开放经济学的有效方法，使其结论更易理解，鼓励其多元发展。

²⁴⁶ Mercure, J-F. et al. (2021) Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal, Global Environmental Change, 70: 102359.



案例分析：

中国出口的绿色复杂性和竞争力

Joris Bücker (牛津大学) , Pia Andres (伦敦政治经济学院/牛津大学) , Matthew Ives (牛津大学) , Penny Mealy (世界银行/牛津大学) , Kevin Tang (牛津大学) , Michael Urban (瑞士隆奥) , Matthew McCarten (瑞士隆奥) , Sugandha Srivastav (牛津大学) , Cameron Hepburn (牛津大学)

政策问题： 能源转型可能会怎样影响各国的比较优势？布署哪些政策能最好地帮助各国应对不断变化的比较优势并帮助其确立未来的繁荣地位？

地区： 中国

研究方法： 基于经济复杂性文献的绿色复杂性指数

主要发现： (i) 了解一个国家现有的绿色复杂性指数及其绿色复杂性潜力，可以为未来可能的比较优势指明方向；(ii) 战略性的长期政策可以推动一个国家走向具有潜在比较优势的领域；(iii) 中国在过去20年中成功地做到了这一点，其作为绿色产品出口国的崛起，甚至比其全球领先制造商的地位更有影响力。

交流互动： 本案例的研究方法是基于在学术背景环境中开发的一个关于能力的一般框架。全球大多数国家的大部分数据和结果都已在绿色转型协会导航的网站上 (<https://green-transition-navigator.org/>) 公开发布。该资源已被用于多个关于各国绿色出口能力的报告。关于中国的这一特定案例分析是牛津大学团队与瑞士私人银行Lombard Odier合作的一部分，在格拉斯哥等地举行的COP26的周边会议中展示了此案例的一个版本。

摘要： 作者使用数据分析法探讨了全球贸易数据和各国在绿色产品方面的比较优势。该研究提出了绿色复杂性指数法，该方法建立在经济复杂性文献的基础上。这一文献对我们如何看待国家的发展产生了巨大影响；在这里，它被应用于中国的绿色竞争力，并指出中国作为绿色产品出口国的崛起，甚至比其作为全球领先制造商的崛起还要强大。

介绍

本案例介绍了以经济复杂性为基础的衡量方法在理解中国绿色竞争力方面的应用。向低碳经济的转型要求许多部门转向更绿色的技术，意味着绿色技术产量高的国家极可能是绿色转型的受益者。具备出口高端绿色产品的能力可以视为绿色增长战略的一部分，但这并非在任何地方都易于实现。在这里，我们评估了25年绿色产品的全球贸易，以了解中国绿色竞争力和产品复杂性的最新趋势，并考虑未来可能发生的情况。这一类型的分析可以让我们深入了解，随着绿色转型的展开，各国可能出现的产业动态和影响。本案例分析总结了Mealy和Teytelboym (2020) ²⁴⁷的方法在中国的应用，以及Andres等人 (2021) ²⁴⁸的方法在其他国家的应用。

衡量绿色竞争力

我们追踪的“绿色”产品是由Mealy和Teytelboym定义的295种产品清单，他们整合了世贸组织、经合组织和亚太经合组织编制的环境商品清单。其中的子类别包括可再生能源产品、高效的能源消耗技术、碳捕获和储存产品、以及废水管理和饮用水处理。通过制造和出口高精尖设备以实现低碳转型的国家最有可能从转型中获益，这些高精尖设备如太阳能电池板、风力涡轮机、电解器和电池及其组件等。

我们的方法还识别出了具有出口能力的国家，这些国家可能在未来转向出口绿色产品。这一推论是基于工业发展往往存在路径依赖的观点。²⁴⁹经验实证证据表明，国家和地区更有可能在需要与其已有能力相似的产品和服务上发展竞争力。²⁵⁰还有进一步

为了捕捉这些现象，采用了由Hidalgo等人²⁵²首次提出，并由Mealy和Teytelboym发展的方法来衡量绿色产品出口的竞争力。一类产品与一国当前能力的相近性，与该未来在该产品上发展出相对竞争力的可能性密切相关（如果该国目前还没有极具竞争力地出口该产品的话）。²⁵³

我们使用Hidalgo和Hausmann开发的算法来计算产品复杂度指数（PCI），它是技术先进性的代表。我们间或会提到经济复杂性指数（ECI），它衡量一个国家出口组合的整体复杂性。一个国家的ECI已被证明是该国未来GDP增长的重要预测指标。²⁵⁴

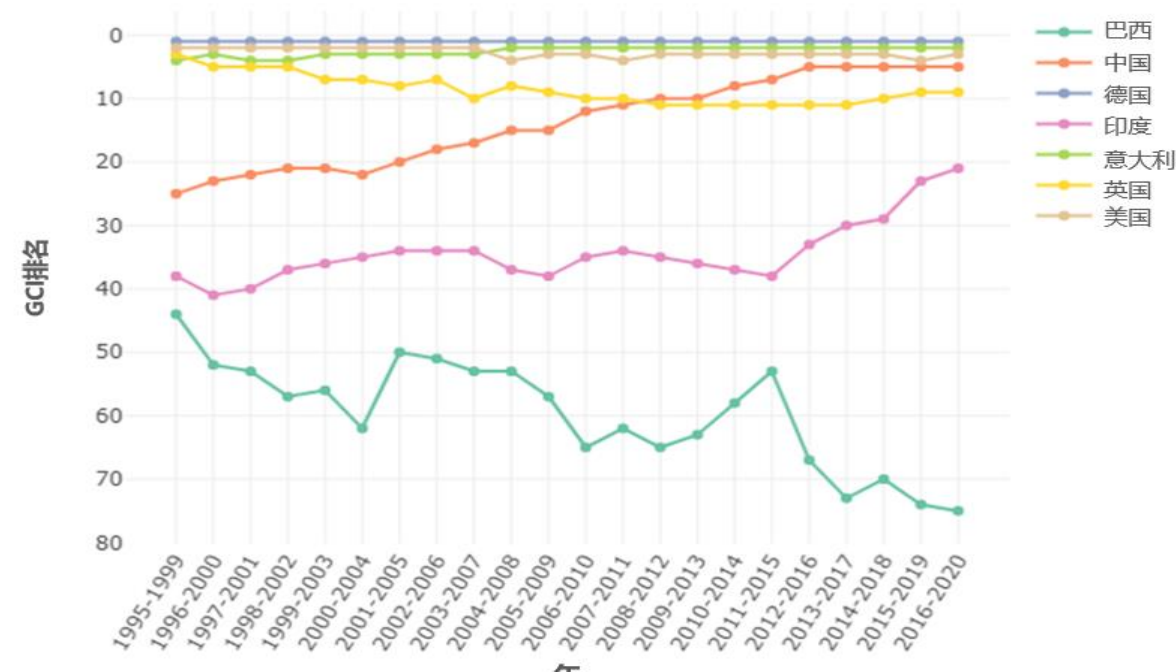
我们在此采用Mealy和Teytelboym的方法，将这些复杂性度量标准与世贸组织、经合组织和亚太经合组织的绿色产品贸易清单相结合，以开发绿色复杂性或绿色竞争力指数。我们使用两个关键指标来评估各国在利用不断增长的绿色产品市场方面取得的进展。

- 绿色复杂性指数（GCI）** 衡量一个国家出口的具有竞争力的绿色产品的数量和复杂性。它构成了绿色竞争力的综合衡量标准，使我们能够直接比较各国当前的绿色出口实力。
- 绿色复杂性潜力（GCP）** 衡量每个国家与尚未具备出口竞争力的复杂绿色产品的相近性。我们使用两种产品共同出口的频率来衡量产品之间的相近性。一种产品和一国之间的相近程度表明该产品与该国家当前出口能力的相似程度。根据工业发展中的路径依赖，识别与一国能力密切相关的产品，可以让我们瞥见其未来路径的大致模样。GCP已被证明是一个国家未来GCI的重要预测指标。²⁵⁵

²⁴⁷ Mealy, P and Teytelboym, A. (2020). Economic Complexity and the Green Economy. Research Policy: 103948.
²⁴⁸ <https://www.inet.ox.ac.uk/publications/predictors-of-success-in-a-greening-world/>
²⁴⁹ Grubb, M. et al. (2014). Planetary Economics: Energy, Climate Change and the Three Domains of Sustainable Development. Planetary Economics.
²⁵⁰ Hidalgo, C. et al. (2007). The Product Space Conditions the Development of Nations. Science, 317: 5837; Neffke, F. et al. (2011). How Do Regions Diversify over Time? Industry Relatedness and the Development of New Growth Paths in Regions. Economic Geography, 87.3.
²⁵¹ Hidalgo, C. et al. (2007). The Product Space Conditions the Development of Nations. Science 317: 5837; Hausmann, R. et al. (2007). What You Export Matters. Journal of Economic Growth, 12.1.
²⁵² Hausmann, R. and Hidalgo, C. A. (2009). The Building Blocks of Economic Complexity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(26): 10570-10575.
²⁵³ Hidalgo, C. et al. (2007). The Product Space Conditions the Development of Nations. Science, 317: 5837; Neffke, F. et al. (2011). How Do Regions Diversify over Time? Industry Relatedness and the Development of New Growth Paths in Regions. Economic Geography, 87.3.
²⁵⁴ Hidalgo, C. et al. (2007). The Product Space Conditions the Development of Nations. Science 317: 5837; Hausmann, R. et al. (2007). What You Export Matters. Journal of Economic Growth, 12.1.

为了防止我们的分析受到贸易短期波动的影响，我们使用滚动五年期的年平均值（1995-1999，1996-2000等）。有关方法的更多细节，请参考本案例分析基于的报告²⁵⁶以及Mealy和Teytelboym（2020）的文章。²⁵⁷

图80：所选国家不同时期的GCI



中国的绿色复杂性趋势和机遇

在过去十年中，中国已经成为世界上最大的制造业经济体。它也是世界上最大的温室气体排放国。然而，中国在制造业方面的全球主导地位反映在其清洁技术生产能力上。目前，中国在经济复杂度（ECI）总排名中位列第42，但在绿色复杂度（GCI）上排名第五。

中国的国家产业战略旨在推动技术前沿的发展。

2015年宣布的“中国制造2025”²⁵⁸是一项重要的产业政策，确定了中国计划到2025年成为世界领跑者的10个行业。其中包括绿色交通和轨道交通技术。中国对高科技产业的关注可能会提高其经济和

1995至2020年间，德国和意大利的GCI得分一直很高（见图80），德国目前排名第一。英国一直保持在前十。印度已上升至接近前20名，而巴西则跌至70名左右。最引人瞩目的积极趋势可以说是中国的崛起。

绿色复杂性的排名。中国的第14个五年计划（2021-2025年）强调了一系列类似的产业，还制定了更多有关科学和技术层面自力更生，以及工业和研究机构之间加强合作的计划纲要。²⁵⁹ 最近，2022年政府召开的中央经济工作会议再次强调技术优先是打造中国外向型产业竞争力的重点，其中能源技术是核心；不过，现在比以前更强调自力更生。

接下来，我们将讨论中国绿色产品类别的过往趋势，然后重点介绍形成优势的具体产品和潜在的多样化选择，最后对中国电动汽车产业进行分析。

中国绿色竞争力发展趋势

中国在全球绿色产品出口中的份额从1995-1999年的3%增加到2015-2019年的19%。其在绿色产品进口中所占份额也有所上升，但幅度较小：从这一时期开始时的2.87%上升至最近一段时期的8%。中国是绿色产品的净出口国（更广泛地反映了中国在全球制造业出口中的主导地位）。

中国的GCI排名从1995-1999年期间的第25位上升至最近2015-2019年期间的第五位，而GCP排名从第七位上升到第一位。这表明，中国不仅提高了绿色产品出口份额，而且还涉足了对相对复杂的绿色技术领域。其较高的GCP尤其表明，中国完全

有能力在未来进一步提高其绿色产品的全球竞争力。可再生能源产品是中国最重要的绿色出口产品，也是最重要的进口产品。

研究期间，许多类别产品的出口额都有所增加，在较为复杂的产品类别中增长尤为明显（图81）。排名前三的类别为可再生能源产品，其次是能源高效消耗技术和碳捕获与储存产品，然后是废水管理和饮用水处理产品。如图82所示，在所有环境类产品中，中国与绿色产品之间的平均相近性都有所提高。这表明，中国的生产能力正日益向具有竞争力的绿色技术生产所需能力看齐，这也体现于中国在高GCP的高排名上。

图81：按环境产品类别划分的历年出口额

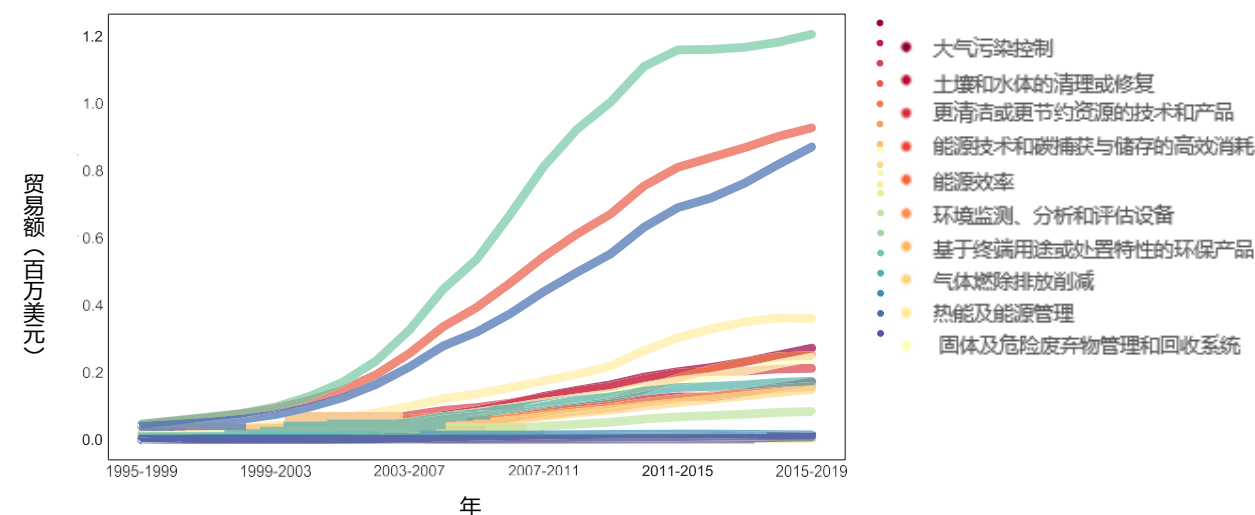
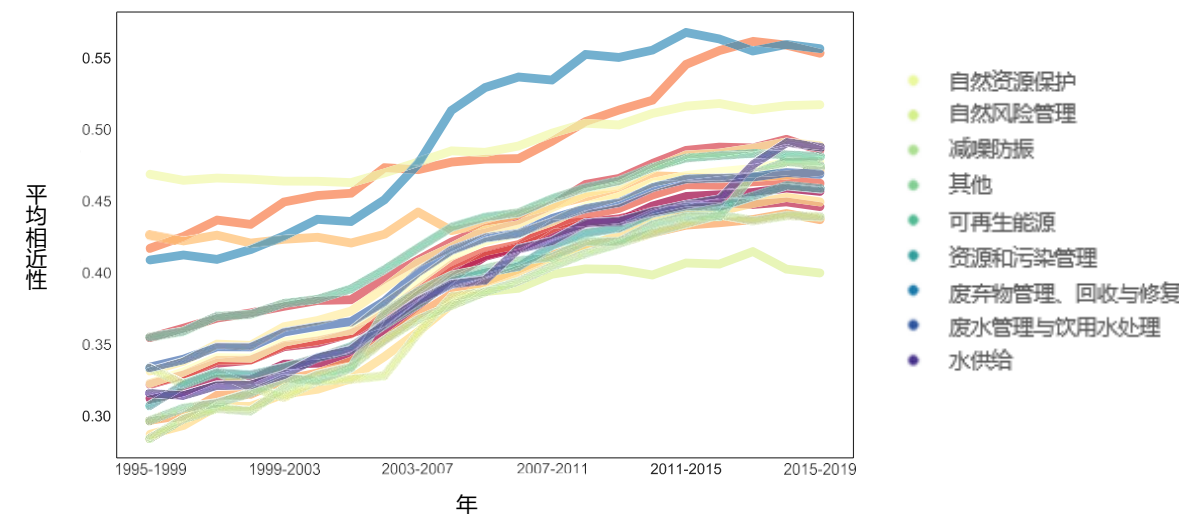


图82：按环境产品类别划分的产品平均相近性



²⁵⁵ Mealy, P and Teytelboym, A. (2020). Economic Complexity and the Green Economy. Research Policy: 103948.

²⁵⁶ <https://www.inet.ox.ac.uk/publications/predictors-of-success-in-a-greening-world/>

²⁵⁷ Mealy, P and Teytelboym, A. (2020). Economic Complexity and the Green Economy. Research Policy: 103948.

²⁵⁸ State Council of The People's Republic of China. (2015). Made in China 2025. <http://english.www.gov.cn/policies/latest_releases/2015/05/19/content_281475110703534.htm>

²⁵⁹ Mallapaty, S. (2021). China's Five-Year Plan Focuses on Scientific Self-Reliance. Nature: 353-54. <<https://doi.org/10.1038/d41586-021-00638-3>>.

中国的绿色优势和机遇

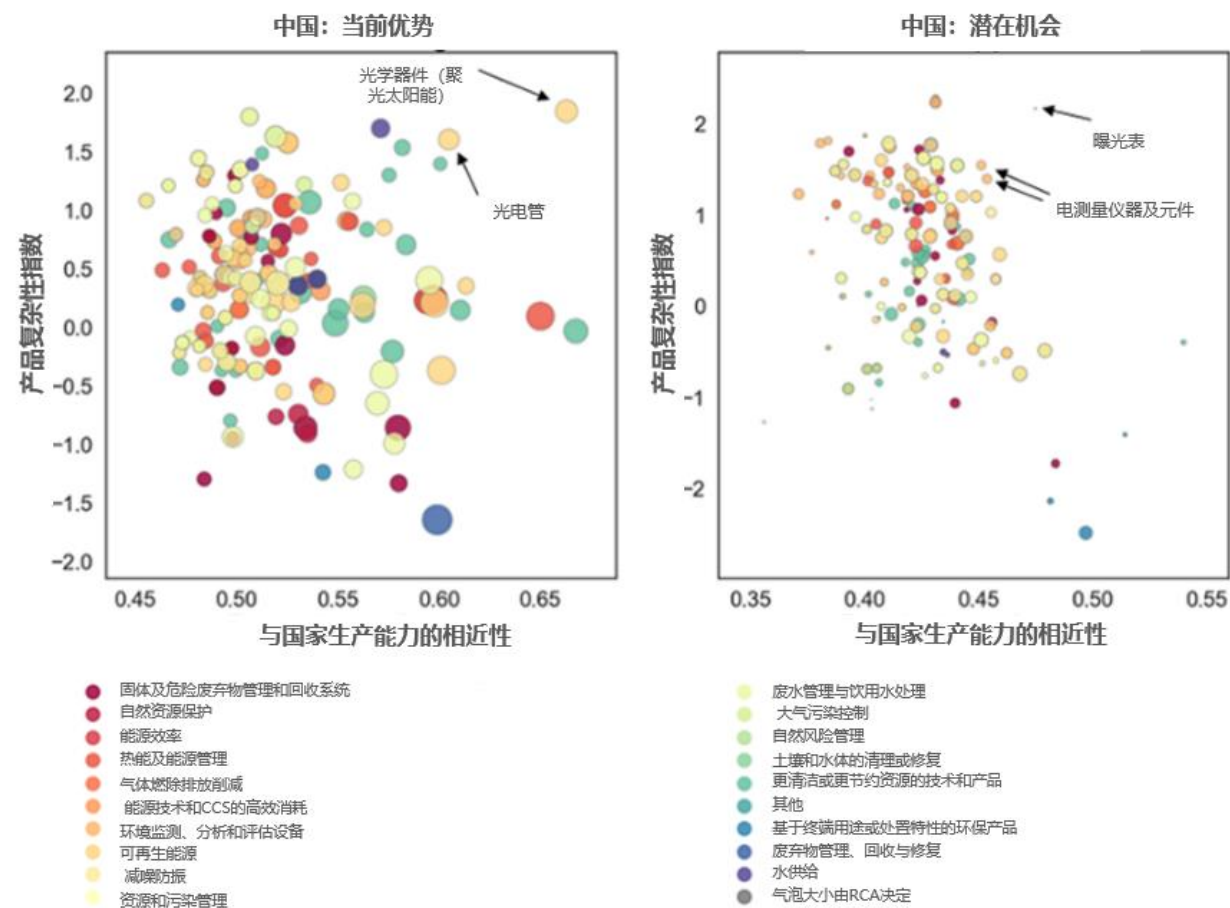
中国提交的首份国家自主贡献（NDC）文件呼吁在可再生能源和相关技术方面加大研发投入，包括海水淡化和气候变化风险评估方法。²⁶⁰一些环境监测技术高度复杂，且与中国目前的强项接近，如曝光表或电测仪器及其组件，它们都可以用于环境监测。

图83将所有绿色产品分为中国有竞争力的出口产品（基于明显的比较优势，²⁶¹标记为“当前优势”）和目前没有出口竞争力的产

品（标记为“潜在机会”）。横轴展示了产品与中国当前生产能力的相近性，这暗示了中国在未来能以多快的速度发展这些产品的竞争力，这些产品的竞争力是中国目前还不具备的。

图83显示，对中国来说，相近性最高的产品往往有较低的PCI得分，这意味着过渡到“相近”还是“复杂”的新产品之间存在权衡取舍。高复杂性的产品更有可能增值，拥有更多样化的机会，但如果一类产品具有高复杂性，却相对远离现有能力，那么过渡到这类产品将有较高风险。

图83: 中国绿色出口产品的当前优势(左)和潜在机会(右)。产品圈的大小表示中国目前的RCA；颜色代表产品类别



低排放车辆

“中国制造2025”的目标产业之一是绿色汽车。自2009年以来，中国已出台政策鼓励消费者购买混合动力和电动汽车，根据工业和信息化部的一份指导性报告，²⁶²到2035年，所有出售的新车必须是电动、混合动力或燃料电池驱动的。2020年，电动和混合动力汽车销量占新车销量的5%左右，到2025年可能占到20%，使中国在绝对数量上成为全球最大的电动汽车市场。²⁶³

根据分析，2015-2019年，中国在全球新能源汽车（包括天然气动力汽车、电动汽车、混合动力汽车和氢动力汽车）出口中的份额仅为1%左右，而德国、日本和美国这三个拥有大型汽车产业的国家的份额为12%至25%。2015-2019年，中国在该领域尚未形成有竞争力的出口能力，RCA为0.06，与生产性出口能力的相近程度相对较低，约为0.4。

然而，自2017年以来，电动汽车有了自己的出口代码（与其他“新能源”汽车区分开），但这没有包括在我们1995-2019年间的纵向数据中。追踪这个新的出口代码，可以发现中国在2021年是第三大电动汽车净出口国，出口量比2020年增长了4倍，占据全球电动汽车出口市场的13.7%，²⁶⁴这意味着中国在2021年才获得了电动汽车的出口能力（RCA=1.02>1）。²⁶⁵

在数据集中可以发现，中国在2015-2019年间已经具备了非柴油动力公交车的出口能力（RCA=1.1>1），这使中国产生的污染相对减少²⁶⁶，并成为该公交车出口市场的主要参与者。但这些公交车是一种不同的产品，其复杂性指数（PCI=0.43）低于新能源汽车（PCI=1.87）。

结论

本案例分析提出了两种相对较新的经济复杂性衡量标准：绿色复杂性指数和绿色复杂性潜力。随着向净零排放转型，政策制定者可以使用它们来了解当前和未来比较优势的细颗粒度领域。我们将这些衡量标准应用于中国，以了解中国随着时间推移所发生的演变，以及中国在从能源转型中受益的竞争内所处的位置。研究发现，近几十年来，中国在绿色复杂性方面的增长取得了世界领先的增长，实现了经济的巨大转型，在研究的最后阶段（2015-2019），中国在绿色复杂性指数上排名第五，在绿色复杂性潜力方面排名第一。

从之前的研究来看，这种成功不是偶然发生的，是由中国有针对性的产业政策推动的，其中包括针对特定行业的补贴、优惠信贷和积极的技术转让措施。我们讨论了“中国制造2025”战略，其目标是可持续发展和若干关键的绿色技术，如电动汽车，在2021年，中国于在电动汽车领域获得了出口能力，还有数字化和高科技产业。但并不是每个国家都认为这种干预性的产业政策是可行或可取的。中国的经验证明了什么是可能的，其他国家将会发现，若将经济的演变完全交由市场力量，可能意味着错失利用不断增长的回报的机会。

展望未来，政策制定者可以利用本国的绿色复杂性指数和绿色复杂性潜力来预示未来可能具有比较优势的领域。战略性的长期政策——无论是重度还是轻微干预——都有助于引导国家走向具有潜在比较优势的领域。以中国为例，分析表明，中国在许多领域已经很强大，因此在这些领域中加倍投入并保持比较优势很可能是有意义的。例如，考虑到汽车行业正在发生的颠覆性变化及其所涉及的价值规模，中国继续加大对电动汽车的投资可能是明智的。其他国家的政策制定者可能会从对本国经济的绿色复杂性潜力分析中得出不同的结论。

²⁶⁰ NDRC. (2015). China's Intended Nationally Determined Contribution: Enhanced Actions on Climate Change.

²⁶¹ Revealed Comparative Advantage is a measure of the relative advantage of a certain country in exporting a certain product. An RCA of a country-product pair of 0.5 means that country exports half of what is expected given the global average exports of that product and the country's total export value. A country exports a product with competitive advantage or capabilities if it has an RCA of >1 for that product.²⁶⁷ Mallapaty, S. (2021). China's Five-Year Plan Focuses on Scientific Self-Reliance. Nature: 353-54. <<https://doi.org/10.1038/d41586-021-00638-3>>.5.

²⁶² Tabeta, S. (2020). China Plans to Phase out Conventional Gas-Burning Cars by 2035. Nikkei Asia. <<https://asia.nikkei.com/Business/Automobiles/China-plans-to-phase-out-conventional-gas-burning-cars-by-2035>>

²⁶³ IEA. (2020). Reports: Electric Vehicles.

²⁶⁴ Workman, D. (2021). Electric Cars Exports by Country. World's Top Exports. <https://www.worldstopexports.com/electric-cars-exports-by-country/?utm_content=cmp-true>

²⁶⁵ Taking China's percentage of world trade at 13.5% using 2020 data from <https://wits.worldbank.org/CountryProfile/en/WLD>

²⁶⁶ This category includes electric and hydrogen buses, but also those that run on non-diesel fossil fuels such as natural gas or petrol.



案例分析：

弥合英国的绿色金融缺口：低碳电力转型及其经济影响

Sarah Hafner（安格利亚鲁斯金大学），Aled Jones（安格利亚鲁斯金大学）

政策问题：英国的低碳电力转型与旨在弥合绿色金融缺口的政策协同实施与否，对宏观经济会有什么影响？

地区：英国

研究方法：系统动态模型

主要结论发现：将弥合绿色金融缺口的政策情景与低碳电力方案相结合，可以实现可以降低电力系统成本、减少失业率以及GDP增长等协同效益。

交流互动：本案例分析了来自多方利益相关集团或组织的31份政策报告，他们代表着金融界更广泛的利益相关者，同时还分析了17次对私人投资者、资产所有者和经理、银行和养老基金代表以及精算师的结构化访谈。圆桌讨论也通过奥德斯盖特集团、世界银行、精算师学会以及印度观察研究基金会举办的活动进行了圆桌讨论，为案例分析提供了支持。本案例分析建立在能源和气候变化部时任气候变化部长领导的资本市场气候倡议（CMCI）的基础上。

摘要：作者使用系统动态模型来考虑针对能源行业的政策是否足以支持英国的低碳转型。具体来说，该研究提出了绿色投资障碍模型，该模型侧重于金融行业的建模，包括利率和汇率等变量，并将其与能源行业的投资联系起来，以模拟两个行业通过实体经济的相互作用。与仅关注能源行业的传统模型不同，我们发现，仅依靠能源政策不足以实现能源领域的净零目标，在实施能源政策的同时，还需要进行金融监管，以增加来自机构和私人投资者的可用资本。

介绍

要实现其气候政策目标，英国需要快速实现能源产业的脱碳。这要求对低碳能源基础设施进行大规模的投资。例如，英国能源与气候变化部（DECC）²⁶⁷预测，到2030年，低排放能源基础设施（包括输电和发电）所需的投资将达到1300亿英镑。其他信息来源，如气候变化委员会（CCC）²⁶⁸和Vivid Economics²⁶⁹预计所需的投资更高，到2030年将达到3000亿英镑。传统的资金来源（如项目融资）将不足以支付所需的能源基础设施投资。因此，需要额外的资金来源，如来自机构或私人投资者（如主流投资者或高净值人群）的资金，来弥补绿色金融缺口。²⁷⁰然而，由于对技术风险、不稳定的政策、可再生能源前期的高资本需求缺乏信心，或是缺乏足够的信息等原因，目前私人机构和机构投资者对绿色能源基础设施的投资并不充分。^{271,272}

虽然目前的能源经济模型揭示了低碳能源转型的各种不同方面/影响（并聚焦于大量不同的角度），但迄今为止，除了扩展的EIRIN模型可能是个例外，²⁷³没有任何一个模型说明了政策如何有助于扩大为低碳能源基础设施融资所需的绿色投资，和显示相关宏观经济的影响。我们的研究旨在填补这一空白，从而扩大扩展现有的能源经济模型范围研究。我们重点关注以下问题：

- 英国的低碳电力转型与旨在弥合绿色金融缺口的政策协同实施与否，对宏观经济会有什么影响？

为了解决这一问题，我们采用了扩展的绿色投资障碍模型（GIBM），²⁷⁴该模型包含了Hafner等人对绿色金融缺口定性调查的主要结果。²⁷⁵

当前的能源政策，如上网电价、差价合约或补贴，主要关注能源公司的投资决策。然而，本案例分析中提出的政策情景还旨在影响私人机构和投资者的投资决策，能源公司需要他们提供的资金，能源基础设施也需要他们的直接投资。

建模方法

本研究中提出的模型是一个描述性模拟模型，而非更常见的平衡和优化模型。SD是一种合适的工具，用于研究以反馈循环、不确定性和路径依赖性为特征的复杂系统的关键机制，并通过在杠杆点上施加干预来管理和/或改善这些系统，以加强理想的反馈循环或削弱不理想的反馈循环。

我们根据英国的情况对GIBM进行了校准，使其能够模拟不同的低碳电力转型方案。²⁷⁶该模型包括关键宏观经济变量的内生模拟，如GDP或失业率、供电部门排放的污染物（作为关键环境指标）以及电力系统成本。GIBM的经济模型部分可以说是嵌入于后凯恩斯主义/生态宏观经济框架中。具体的模型方程通常建立在各类不均衡建模方法上，包括后凯恩斯主义经济学、生态经济学或系统动态学，但也包括均衡方法（如常数替代弹性-CES-生产函数）。较之于大规模模型（例如剑桥计量经济学E3ME模型），该模型的适用范围较窄，但较之于程式化的数学模型，该模型的适用范围较广。具体

²⁶⁷ UK Department of Energy & Climate Change. (2014). Energy Investment Report, April 2014. <https://www.gov.uk/government/publications/energyinvestment-report-april-2014> (Accessed April 19, 2019)

²⁶⁸ Committee on Climate Change. (2013). Next Steps on Electricity Market Reform – Securing the Benefits of Low-Carbon Investment. Committee on Climate Change. https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2013/05/1720_EMR_report_web.pdf. (Accessed May 1, 2019).

²⁶⁹ Vivid Economics. (2012). Energy and the Economy - The 2030 Outlook for UK Businesses. A London School of Economics Report Commissioned by RWE NPower. Available at: www.vivideconomics.com/publications/energy-and-the-economy-the-2030-outlook-for-uk-businesses (Accessed May 4, 2019)

²⁷⁰ OECD. (2016). Fragmentation in Clear Energy Investment and Financing. Available at: <http://www.oecd.org/investment/investment-policy/BFO-2016-Ch5-Green-Energy.pdf> (Accessed July 4, 2018).

²⁷¹ Hafner, S. et al. (2019). A Scoping Review of Barriers to Investment in Climate Change Solutions. Sustainability, 11(11), 3201.

²⁷² Hafner, S. et al. (2020). Closing the Green Finance Gap – A Systems Perspective. Environmental Innovation and Societal Transitions, 34: 26–60.

²⁷³ Dunz, N. et al. (2019). Climate Transition Risk, Climate Sentiments and Financial Stability in a Stock-Flow Consistent Approach. Journal of Financial Stability 54: 100872.

²⁷⁴ Hafner, S. et al. (2021). Modelling the Macroeconomics of a ‘Closing the Green Finance Gap’ Scenario for an Energy Transition. Environmental Innovation and Societal Transitions, 40: 536–568.

²⁷⁵ Hafner, S. et al. (2020). Closing the Green Finance Gap – A Systems Perspective. Environmental Innovation and Societal Transitions, 34: 26–60.

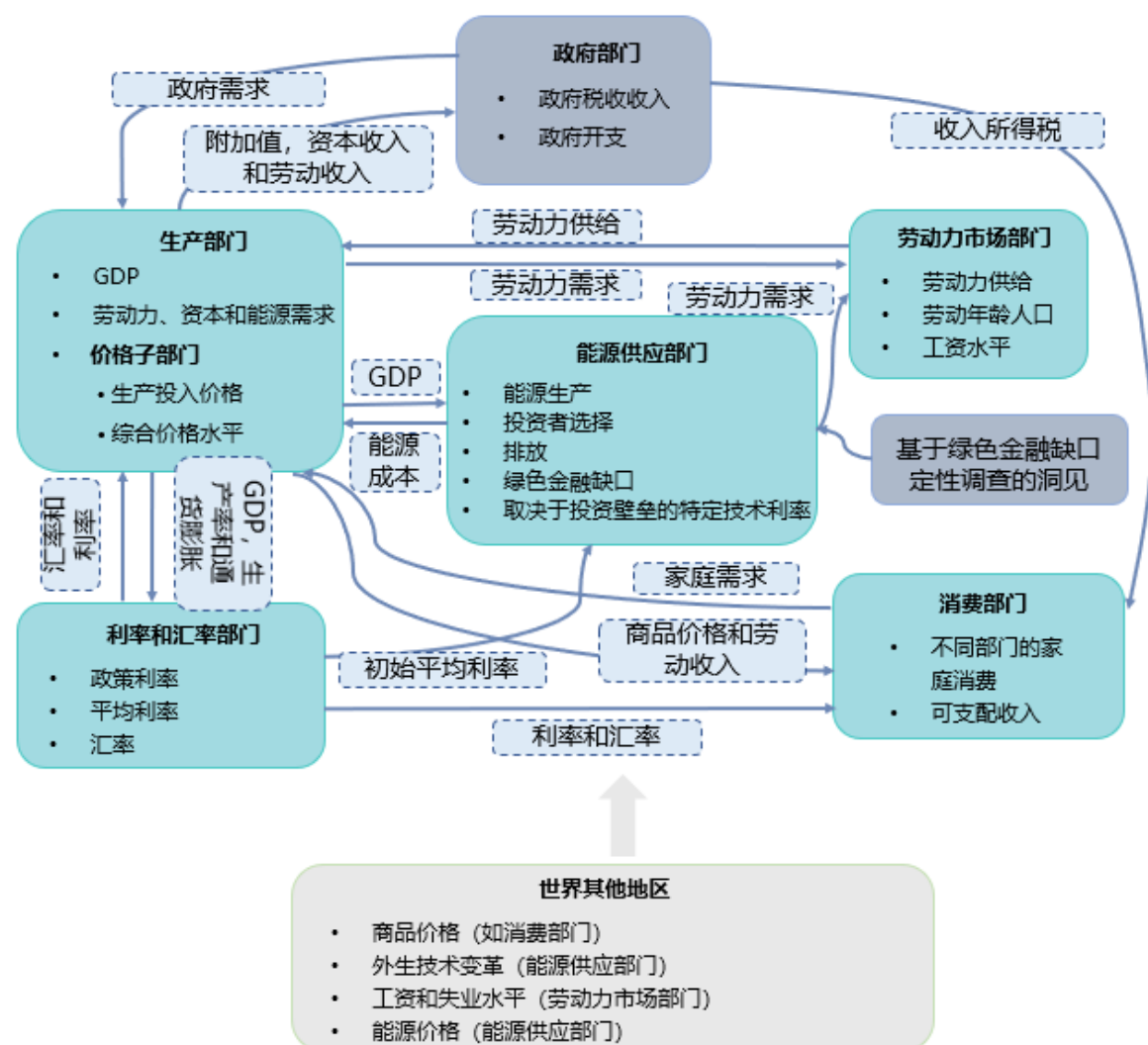
²⁷⁶ Hafner, S. et al. (2021). Economic Impacts of Achieving a Net-Zero Emissions Target in the Power Sector. Cleaner Production, 312: 127610.

来说，GIBM包括313个存量变数，总计有3000多个变量。本研究的模拟周期涵盖2016年至2050年，时间步长为0.25年。

图84整体展示了GIBM及相关的主要宏观经济

部门（如生产、消费和劳动力市场）、公共部门和电力供应部门。该模型使我们能够了解不同电力转型方案对宏观经济的影响及其电力系统成本。

图84: GIBM概览。各模型部门间的主要因果关系。虚线框内是GIBM的可视化展示，世界其他地区不包括在内。“世界其他地区”方框号内的模型部门意味着来自世界其他地区的附加外生输入变量进入了模型。宏观经济层面的生产过程使用需求为主导的CES生产函数表示——即生产投入、劳动力、资本、能源和中间投入并非（必然）得到充分利用。生产部门还涵盖了对价格的模拟；消费部门模拟了家庭在各行业中的消费；劳动力市场部门决定就业情况，并以生产部门的劳动力需求和现有劳动力之间的差异来模拟失业。此外，劳动力部门还揭示了工资水平，且包含了一个在内生条件下模拟英国劳动人口的子部门；汇率和利率部门包含英国与其主要贸易伙伴之间的汇率，以及英国企业信贷的平均利率；公共或政府部门追踪国家的收入和支出。最后，电力供应部门详细展示了电力生产能力，并确定英国每年生产的能源。电力供应部门按12种电力生产技术进行了划分，包括生物质能、水电、海洋发电、陆上风能、海上风能、太阳能、其他热能和其他可再生能源作为可再生技术，核能和CCS气体作为低碳技术，煤炭和天然气作为褐色技术。^{277,278}



GIBM复杂性特征描述

以下是GIBM基于风险-机会分析框架抓取的复杂性特征清单：^{279,280}

- **复杂性和多重均衡/非均衡**：在GIBM中，不同经济部门间相互联系，经济与能源部门也是如此。另外，由于复杂性的存在，行为主体难以做出“理性”决策，也难以实现长期的均衡。
- **深度不确定性**：SD模型承认在模型构建上存在不确定性；系统复杂性意味着未来的系统行为无法通过过去的系统结构和行为预测。
- **非线性**：消费部门涵盖达到一定消费水平后弹性参数的变化。
- **反馈循环、路径依赖和锁定**：电力部门存在由边做边学带来的可再生能源技术成本下降，经济部门包含凯恩斯主义的GDP乘数效应。
- **行为者的行为和决策**：SD旨在展示模型内主体如何做出决策，相关的经济和社会心理因素（如主体的价值观或偏好）均被纳入了考虑范围。在GIBM中，金融投资者的决策会通过定性研究的结果²⁸¹（包括对这些投资者的采访）来模拟，其中还包括目前没有定量数据支持的“软参数”。

情景和结果描述

我们模拟并比较了以下政策情景（由政策情景引发的关键宏观经济变动在Hafner等人2021a的文章中有详细描述）：

- **低碳能源转型情景（LETS）**影响模型中能源部门的变量，因为它意味着新装置设备只会选择可再生能源。此外，它还意味着从2020年起褐色能源装机容量呈线性下降，使能源部门能够在2050年实现零排放。LETS由假设引入，没有具体说明所需的

政策。在LETS中，没有针对投资者以解决当前对绿色基础设施投资障碍（如主流投资者和机构报告的那样）的具体政策，因此这类项目的资本供应存在局限性。

- **金融系统的政策情景（FSPS）**影响模型中金融部门的变量。基于系统的观点，该政策情景被认为以一种高效和全面的方式解决关键的绿色投资障碍。我们注意到，虽然本研究没有具体说明这一系统政策的细节，但参考Hafner等人（2020a）的实证证据，我们假设该系统政策涉及对现行法规、投资建议、风险评估要求（如环境、社会和公司治理（ESG）标准和气候相关风险披露）、报告指标以及所使用工具的修订。因此，这一系统政策的引入弥合了绿色金融的缺口（资本的可用性与未来情景下预测的需求相匹配，从而使所有可投资项目都能够吸引到足够的资金）。这意味着，与代表绿色金融缺口现状的基准运行情况相比，流向可再生能源基础设施的绿色投资不再受到资本可用性的限制。也就是说，在GIBM中，如果没有出台适当的政策，绿色资本将少于支持绿色能源转型所需的资本金额。此外，系统政策的引入尤其降低了可再生能源项目的利率加成，也降低了总体的平均利率水平（见图85）。

- 最后，我们综合检测了以上介绍的两种情景。

²⁷⁷ Hafner, S. et al. (2021). Modelling the Macroeconomics of a 'Closing the Green Finance Gap' Scenario for an Energy Transition. Environmental Innovation and Societal Transitions, 40: 536-568.

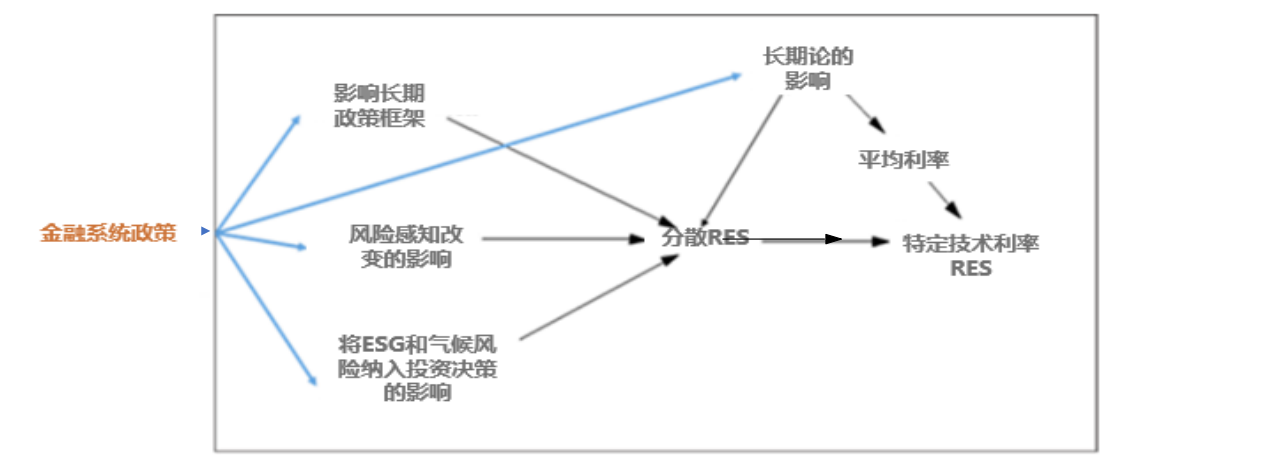
²⁷⁸ Hafner, S. et al. (2021). Economic Impacts of Achieving a Net-Zero Emissions Target in the Power Sector. Journal of Cleaner Production, 312: 127610.

²⁷⁹ Mercure, J-F. et al. (2021). Risk-Opportunity Analysis for Transformative Policy Design and Appraisal. Global Environmental Change, 70: 102359.

²⁸⁰ Grubb, M. et al. (2021). The New Economics of Innovation and Transition: Evaluating Opportunities and Risks.

²⁸¹ Hafner, S. et al. (2019). A Scoping Review of Barriers to Investment in Climate Change Solutions. Sustainability, 11(11): 3201.

图85: 金融系统政策的影响: 金融系统政策从系统的角度解决了关键的绿色投资障碍。它 (i) 降低了平均利率水平, (ii) 减少了可再生能源技术投资的利差, (iii) 缩小了绿色金融缺口。^{282,283}



下文介绍了以下关键政策指标的模拟结果：²⁸⁴

- 能源供应系统的温室气体排放
- 失业工人外加非活跃劳动年龄人口数量
- 国内生产总值
- 能源系统成本
- 能源转型直接产生的就业

在本研究中, 我们将“失业”定义为失业工人和不活跃工人的总和。²⁸⁵

表14展示了模拟能源政策情景的结果, 以所选政策指标与其在基准运行情况下模拟结果的百分比表示 (如果没有特殊说明, 则始终以累积数字形式展现)。更重要的是, 尽管英国已经实施了CFD方案, 但程式化的CFD方案没有被作为基准来运行, 因为相较于缺少主要方案 (除了价格) 的基准运行方式, 人们的兴趣在于了解不同政策情景的额外成本。

表14: 经测试的政策情景效果概览。在三大低碳政策情景中, 橙色突显了效果最差的一项, 蓝色则是效果最好的; 对累积变量的影响从2016年持续至2050年

	排放 (%)	GDP (%)	失业情况 (%)	直接就业 (%)	系统成本 (%)
金融系统政策情景	-7.09	3.05	-1.47	15.12	-2.58
低碳能源转型情景	-44.90	0.50	0.20	-6.90	12.44
两种情景的结合	-44.90	3.46	-1.4053	40.15	3.66

模型结果表明, “缩小绿色金融缺口”的政策情景配合低碳电力情景可以实现电力系统成本降低、失业率降低和GDP增长的共同效益。研究结果还显示, 仅关注弥合绿色金融缺口不足以在2050年实现低碳电力生产的净零排放, 还需要电力行业本身的政策进行补充。

结论

我们建议实施低碳能源转型情景, 并结合施行基于系统方法的、以缩小绿色金融缺口为目的的政策。模拟结果表明, 虽然不存在明确的双赢解决方案, 但实施旨在缩小绿色金融缺口的长期金融体系政策, 无论是将其单独引入还是与低碳能源转型相结合, 都会带来多种协同效益:

- 当单独出台一项金融系统政策时, 它会降低市场平均利率, 减少可再生能源技术的利差。这些影响会进一步引发(i)由平均利率水平降低推动的GDP增长, (ii)失业率降低, (iii)由于可再生能源融资成本降低而增加的直接就业, 以及(iv)由于市场利率降低而降低的能源系统成本。单独引入这一政策带来的唯一缺点是, GDP增长意味着生产和能源使用提高, 这会导致更多的排放。

- 金融系统政策与低碳能源情景的结合可以带来多种协同效益。也就是说, 同时引入LETS和FSPS会促进GDP的增长和直接就业的增加, 与此同时降低失业率和能源系统成本。最终到2050年, 英国的能源系统成本实现净零排放。

金融系统政策的影响一方面来自于它推动了利率水平的降低, 另一方面在于它缩小了绿色金融的缺口, 从而避免了从国外进口能源。综上所述, 我们建议低碳能源转型情景和金融系统政策同时推进。敏感性分析显示, 研究提出的关键见解、政策影响和结论都是稳健可靠的。

²⁸² Hafner, S. et al. (2021). Modelling the Macroeconomics of a ‘Closing the Green Finance Gap’ Scenario for an Energy Transition. Environmental Innovation and Societal Transitions, 40: 536-568.

²⁸³ Hafner, S. et al. (2021). Economic Impacts of Achieving a Net-Zero Emissions Target in the Power Sector. Journal of Cleaner Production, 312: 127610.

²⁸⁴ Results are presented in ‘accumulated’ terms, which means that the annual amount of each of the chosen policy variables is added up/accumulated over the simulation time horizon from 2016 to 2050.

²⁸⁵ In GIBM, the number of people outside the labour force is dependent on the percentage of unemployment due to the so-called ‘discouraged workers effect’. Therefore, individuals who although would desire to work, may decide to stay outside the labour force due to discouragement and are therefore a part of the inactive labour force. In our study, we decided to consider these otherwise ‘hidden’ individuals in our policy evaluation.



案例分析：

巴西可再生能源投资的退出期权

Anna Carolina Martins (坎皮纳斯大学, 巴西), Marcelo Pereira (坎皮纳斯大学, 巴西)

政策问题：“退出期权”分析如何支持可再生能源项目的私人融资？

地区：巴西

研究方法：财务建模

主要发现：单一可再生能源项目财务评估的不确定性是债权人行使退出期权的重要驱动因素。尽管该项目评估方法在巴西并不为人所知，但对推动巴西可再生能源行业的发展具有重要意义。

交流互动：这项工作已经在2021年和2022年的一系列会议和交流活动中进行了展示和讨论，参与者包括巴西国家开发银行（BNDES）、巴西光伏太阳能协会（ABSOLAR）、联合国拉丁美洲和加勒比经济委员会（ECLAC）以及巴西能源研究办公室（EPE）的代表。这项工作仍在进行，并计划进一步推进。

摘要：作者使用财务建模方法来考虑可再生项目私人融资的替代方法——退出期权的可行性和影响。模型表明该方法具有潜力，应该对其实施和运用进行细致探索。

介绍

尽管人们一致认为需要快速实现能源转型，但现阶段投资于绿色能源的私人资金仍然匮乏，^{286,287,288}考虑到所需的巨额资金，仅靠公共投资几乎不可能达到所需水平。²⁸⁹巴西的情况也不例外。巴西国家发展银行（BNDES）和巴西银行（BB）等公共银行是可再生能源的最大投资者，^{290,291}欧洲投资银行（EIB）和法国开发署（AFD）等国际开发银行也提供了大量投资。但是，私营部门的投资比例较小，且据CEPAL（2020）²⁹²的报道，这类投资多依赖于公共政策和激励措施。因此，对能够刺激私营部门扩大对可再生能源项目投资的替代方案进行评估，是绿色转型议程的重要组成部分。

绿色能源融资

从历史上看，巴西的基础设施投资主要依赖于公共资金来源（EPGE，2023）。^{293,294}即使没有精确数据，传闻表明，私人债权人在可再生能源融资中的作用主要是作为公共机构项目的中介者，如BNDES Fundo Clima或Finem“间接支持”模式，²⁹⁵亦或是BNDES Garantia及FGI的信用担保工具。²⁹⁶然而，这些模式和工具假定了对项目进行传统的财务评估，即（直接或间接）债权人要求为整个项目提供财务担保，没有有效考虑到初期退出期权的“附加价值”。这对于非常长期的项目，如能源发电十分关键，在这种项目中，能源价格和发电成本的不确定性随着时间的推移极易出现大幅波动。

BNDES等公共实体要求候选项目提供大量信用担保以规避风险的做法，在巴西的监管框架下可能是合理的。但这类约束可能不适用于自己提供资金的私人债权人。了解在何种条件下，可再生能源的（实际）私人投资者会改变他们目前的行为，并增大他们对绿色转型的支持力度，似乎是政策分析家和决策者要解决的一个关键问题。监管框架使新的融资主体和模式成为可能，这对绿色转型的成功至关重要，特别是在巴西这样的发展中国家，这些国家的投资信贷历来稀缺且昂贵。²⁹⁷

私人绿色能源融资的一个主要瓶颈是缺乏风险调整后的可再生能源（RE）投资。²⁹⁸最常见的项目评估做法是基于项目的贴现现金流，也称为净现值（NPV），并考虑资本支出和运营支出所需的资金。然而，这类项目评估和融资的方法没有考虑到随着项目的发展，当事方可能会改变他们的投资策略。这意味着，一旦在合同中达成一致，他们必须持续将资源投入项目中。

鉴于绿色能源项目可能需要大量的资金资源，长期来看，这种刻板要求极易挫伤私营部门的投资行为，²⁹⁹特别是因为净现值计算所需的一些关键假设存在很大的不确定性。显而易见的，能源价格在长期内表现出明显的波动性，预期项目的收益也是如此。即使在成本方面，工资、（进口）设备价格和汇率等基本因素的波动性也处于历史高位，尤其在发展中国家。所有这些不确定性的叠加，导致债权人对融资项目有较高的（内部）收益率要求，在这

²⁸⁶ IEA. (2017). Perspectives for the Energy Transition: Investment needs for a low-carbon energy system.

²⁸⁷ Wüstenhagen, R.A.E.M. (2012). Strategic Choices for Renewable Energy Investment: Conceptual framework and opportunities for further research. Energy Policy.

²⁸⁸ Bloomberg New Energy Finance. (2010). Global Trends in Sustainable Energy Investment 2010: Analysis of Trends and Issues in the Financing.

²⁸⁹ Fadly, D. (2019). Low-carbon transition: Private sector investment in renewable energy projects in developing countries. World Development, 122, 552-569.

²⁹⁰ BNDS. (2022). Fundo Clima – Subprograma Energias Renováveis. Available at <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima-energias-renovaveis>. Accessed on December 20, 2022.

²⁹¹ Banco do Brasil - BB (2022). Estimulo à Energia Renovável. Available at <https://www.bb.com.br/pbb/pagina-inicial/sobre-nos/sustentabilidade/energias-renovaveis/solucoes-para-voce#/>. Accessed on December 20, 2022.

²⁹² CEPAL, Energia. (2022). Available at < https://www.cepal.org/pt-br/subtopicos/energia#> . Accessed on December 20 2022.

²⁹³ EPGE. (1999). Investimentos, Fontes de Financiamento e Evolução do Setor de Infra-Estrutura no Brasil: 1950-1996, Available at < https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/575/1199.pdf>, Accessed on January 12, 2023.

²⁹⁴ Albanez, T. and Ribeiro do Valle, M. (2012). High Interest Rates, Capital Sources and Capital Structure: The Debt Of Brazilian Companies In The Period 1997-2006, Available at <https://www.revistas.usp.br/rco/article/download/52667/56551>. Accessed on January 12, 2023.

²⁹⁵ BNDES Finem. Geração de Energia. Available at < https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-energia> . Accessed on January 12, 2023.

²⁹⁶ BNDES, Guia do Financiamento. Available at <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia> . Accessed on January 12, 2023.

²⁹⁷ BNDES, Guia do Financiamento. Available at <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia> . Accessed on January 12, 2023.

²⁹⁸ Nelson, D.and Pierpont, B. (2013). The Challenge of Institutional Investment in Renewable Energy. Climate Policy Initiative, San Francisco.

²⁹⁹ DWIH São Paulo. (2022). 10th German-Brazilian Innovation and Sustainability Congress. Available at < https://www.dwih-saopaulo.org/en/event/10th-german-brazilian-innovation-and-sustainability-congress/> Accessed on September 29 and 30, 2022.

一过程中放弃了许多事后证明完全可行的项目。

实物期权分析

为了解决这个问题，实物期权（RO）分析已越来越多地用于加州、挪威和土耳其等地的可再生能源项目评估中(见表15)，并早已用于中国发电项目的财务可行性研究。³⁰⁰与寻常以流动性资产（易于交易）作为标的资产的金融期权不同，实物期权适用于投资项目等实物资产。其核心理念是，当事各方（即债权人和开发商）可以在项目启动后改变他们对项目融资和开发的决定，而不会引起违约或诉讼。

实物期权有不同的类型。Gazheli（2018）³⁰¹分析了三类：

- 延迟期权：等待投资项目的期权。只有获得了足够的未来市场和生产条件信息时，才会进行不可逆的投资。
- 变更期权：根据未来市场和生产条件的情况，通过改变生产形式的可能性来灵活调整项目。
- 退出期权：在预期期限前退出项目并收回所有剩余价值的机会。

在收到融资请求，而经济环境或未来环境不确定时，债权人可能希望等待一段时间来决定是否投资于特定的可再生能源项目。在这种情况下，延迟期权提供了在未来某个时间加入此类项目的机会。另一方面，变更期权使投资主体能够切换到随着时间的推移被证明表现得更好的技术或商业模式上。或者，如果一个项目提供了不同的选择，如风能、太阳能或水力发电，投资主体有权根据市场可行性在技术之间进行切换。

退出期权，也是本项工作的重点，赋予双方主体（债权人和开发商）在固定期限前退出项目的权利，但这不是义务。也就是说，若出于任何原因，项目的财务表现受到消极影响，债权人和开发商都

可以（在约定的期限内）选择退出信贷业务，他们因而获得了改变投资决策的机会。³⁰²在这种情况下，债权人可以放弃之前在合同中确定的为项目其他阶段提供资金的义务，这一点将在下文中详细说明，同时，双方必须就他们可以退出的期限达成一致。此外，退出期权无法免除开发商偿还已借款项的义务。

退出期权提供了一种替代工具来降低债权人所承担的风险，由于风险的减少而导致的项目净现值增加便是这一期权的估值。简单来说，如果传统的估值方式下（即没有退出期权） $NPV1=X$ ，那么考虑到退出期权价值的估值为 $NPV2=X+Y$ 。故期权的价值为 $NPV2-NPV1=X+Y-X=Y$ 。由此，在通常标准下不可行（即净现值为负），但退出期权价值为正值的项目，可能变得可行。

巴西绿色能源投资的退出期权

现在，我们重点讨论在巴西等发展中国家的可再生能源项目中应用退出期权的潜力。实物期权（RO）已在各国的风能、太阳能和水能项目中得到应用（见表15）。但是，我们没有获得其在巴西应用的信息，这可能是因为BNDES提出的标准信贷模型中没有这种工具，而BNDES是迄今为止可再生能源投资最大、最主要的资金来源[同上]。无论如何，考虑到发展中国家不断增长的不确定性，进一步探索这一替代方案似乎能使一些本不可行的项目获得融资资金。

估计期权价值有不同的方法，如表15所示。在此，我们应用 Kim³⁰³ 提出的实物期权分析框架，简要讨论退出期权对促进可再生能源（REE）融资的潜力。我们以巴西为例，在2012年至2021年期间，包括可再生能源项目在内的近7000个公共资助的基础设施项目被暂停（即已经启动，但由于资金不足或预期结果发生变化等各种原因被叫停），合同总价值为93.2亿巴西雷亚尔。这凸显了重新审视项目评估和批准方式的必要性。³⁰⁴

我们的贡献在于提出了一个简单的模型，通过考虑能够广泛反映基础设施项目净现值的经济波动关键变量来评估项目。我们关注两个变量：工资和劳动生产率，将劳动力市场引起的波动纳入估值模型。其理念是，较高的劳动生产率可以降低成本，使项目净现值（更可能）为正，但如果工资的增长速度超过劳动生产率，则会出现相反的情况。我们使用工资和劳动生产率来举例说明项目波动的典型来源，并由此通过退出期权的价值来定义这种波动的隐性“成本”。完整起见，我们在模型中还考虑了两个额外的变量，服务（能源）关税和资本利用率（服务/能源需求）。

我们分为三个步骤进行：

1. 为四个测试变量定义三种未来的情景，即普通、最好和最坏的情况；
2. 运用二叉树模型，^{305,306}估算项目变得更有利可图的预期概率（q），并计算该模型的单次退出期权价值；
3. 将预期净现值与退出期权价值结合，得到一个更真实的项目估值。

在对这一概念的演示中，我们应用了所提出的评估模型，以提供一个真实的可再生能源项目影响程度的大致描述。在未来的工作中，我们将进一步探索，将该模型视作债权人和开发商（潜在的）行为规则，整合到一个基于主体的模型中，以供，就像 Lamperti等人³⁰⁷在案例研究“快速平稳脱碳和可持续增长的政策选择”中提出的反乌托邦式熊彼特与凯恩斯模型一样。这将使我们能够基于一个复杂的综合评估模型，研究宏观综合的再融资环境中，实物期权如何随着时间的推移影响能源转型。

模拟和初步发现

作为分析展示，我们研究了伊通比亚拉（Itumbiara）水电站，它是福纳斯系统的一部分。³⁰⁸ 该项目（建设）总投资为1.875亿美元，前7年用于建设，其余40年用于运营（特许期）。因此，我们在第 7 年计算退出期权的价值。在实践中，这使期权持有人，即项目债权人，有权在项目第一阶段（建设）结束时，即第7年，退出项目。

基于与伊通比亚拉项目有关的一系列技术和市场参数，我们构建了最佳、普通和最坏的情景，并假设所考虑的四个变量（工资、劳动生产率、能源关税和能源需求）最大和最小演变轨迹在历史上是一致的。相应的二叉树模型如图86所示。

³⁰⁰ Kim, K. H. P. A. H. K. (2017). Real Options Analysis for Renewable Energy Investment Decisions in Developing Countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

³⁰¹ Gazheli, A. A. J. V. D. B. (2018). Real Options Analysis of Investment In Solar Vs. Wind Energy: Diversification strategies under uncertain prices and costs. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

³⁰² Kim, K. H. P. A. H. K. (2017). Real Options Analysis for Renewable Energy Investment Decisions in Developing Countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

³⁰³ Kim, K. H. P. A. H. K. (2017). Real Options Analysis for Renewable Energy Investment Decisions in Developing Countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

³⁰⁴ National Confederation of Municipalities-CNM (2022). Estudo técnico- Obras Paradas. Available in < <https://www.cnm.org.br/biblioteca/exibe/15354> >. Accessed 2022.

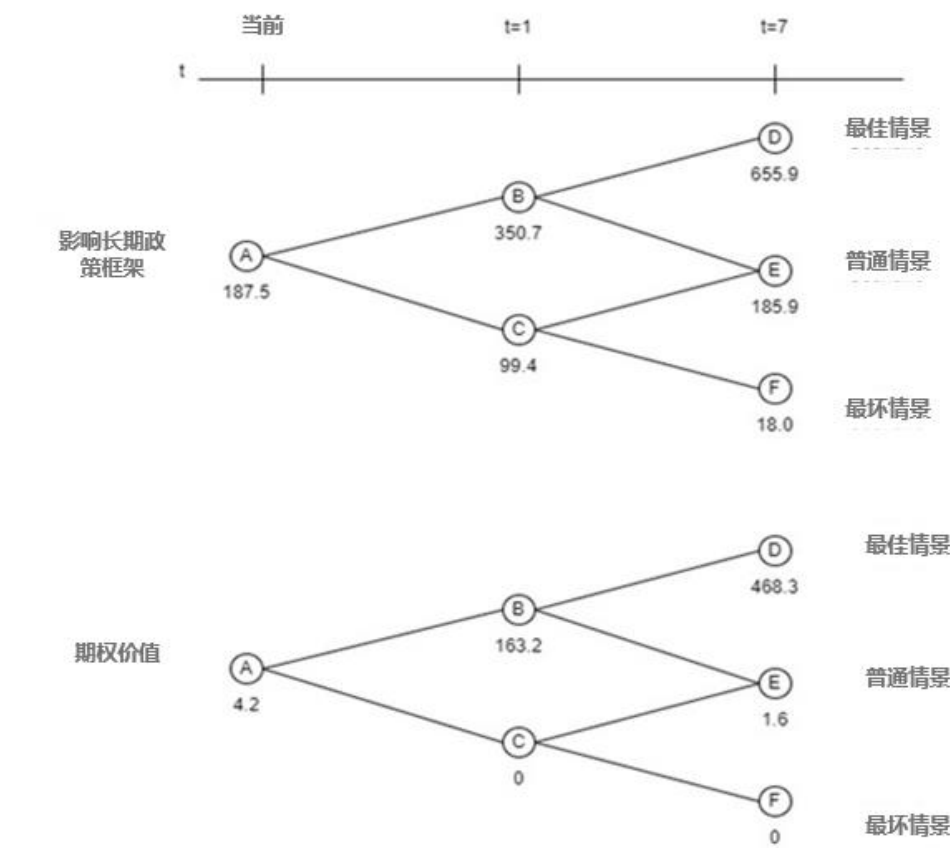
³⁰⁵ Valuation of the exit option can be computed using different methods: Binomial Tree, Partial Differential Equations, Simulation; Dynamic Programming, Empirical Analysis, Monte Carlo Least Squares Approach, Game Theory, or Probabilistic Model (Extension of the table in Kim, 2014).

³⁰⁶ Kim, K.t. et al. (2014). Evaluation of R&D Investments in Wind Power in Korea Using Real Option. Renewable and Sustainable Energy Reviews 40: 335-347.

³⁰⁷ Lamperti, F. et al. (2018). Faraway, So Close: Coupled Climate and Economic Dynamics in an Agent-Based Integrated Assessment Model. Ecological Economics 150: 315-339.

³⁰⁸ Brazilian hydroelectric power plant systems with facilities in the states of São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Paraná, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Pará, Tocantins, Rondônia, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Ceará, Bahia and the Federal District.

图 86：项目和期权估值树（单位：百万美元）。注：节点D、E、F分别代表不同情景下t=7时的项目价值和期权价值。两棵树中的节点A都是t=0时的价值。也就是说，目前，期权价值树中的节点A是项目评估时应该考虑的价值



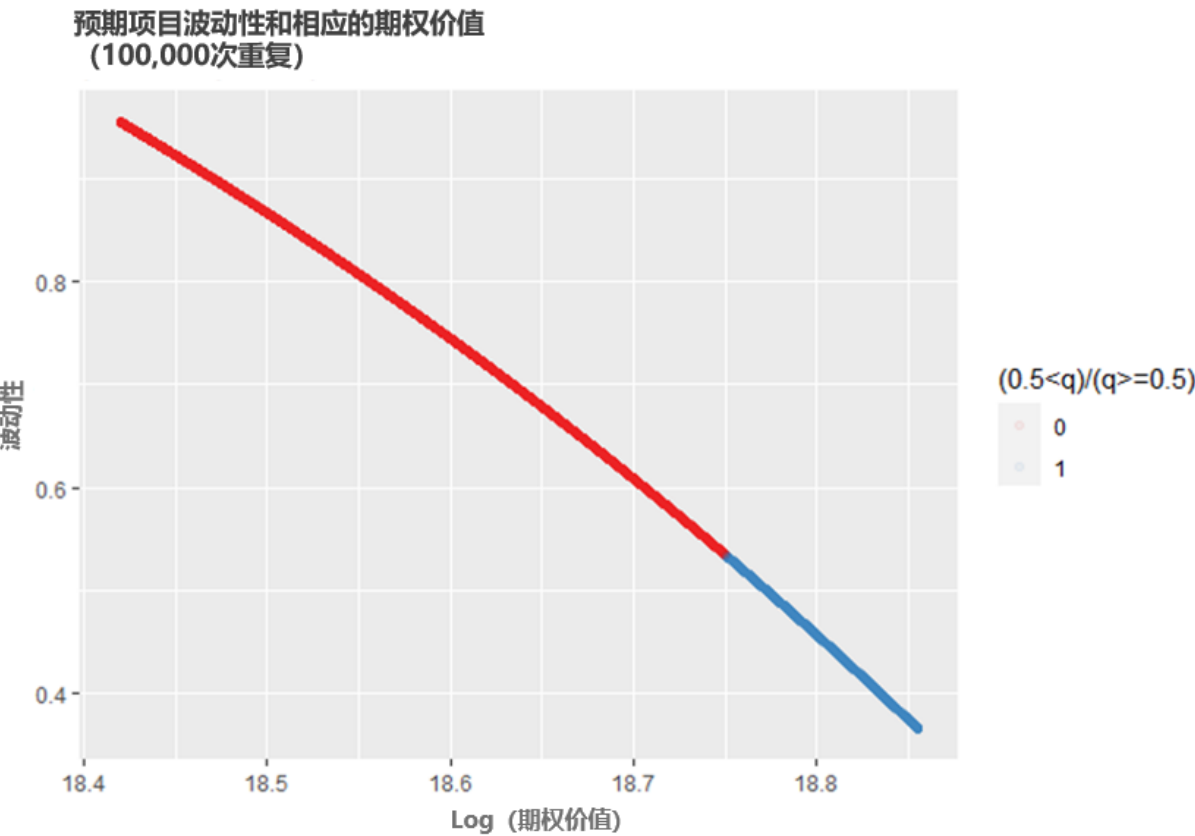
如图 86 所示，如果考虑这种机制，债权人通过将传统普通情景下的净现值增加420万美元，“获得”了在建设阶段结束时（7年后）退出项目的权利。因此，如果行使期权，债权人将不再需要为下一个项目阶段（运营支出）提供资金，同时保留了收回未偿还贷款（资本支出）的全部权利。由于不含期权价值时，该项目的净现值计算约为370万美元，故期权价值占新现值的 53%。这一显著差异意味着净现值略低的类似项目可能会被拒绝，但如果考虑到退出期权，它们与伊通比亚拉案例一样值得投资。

从伊通比亚拉基准项目开始，我们模拟了 10万个类似的潜在可行项目，³⁰⁹以研究退出期权价

值与项目变量波动性之间的关系。在模型中，最坏和最好情况之间的差异是由基于历史波动性的工资、能源关税、资本利用率和劳动生产率的不同假设所决定的。这些变量在根本上是由各自的市场驱动的，但它们如何影响项目绩效也取决于开发商的能力，这是我们在此模型中试图解决的另一种不确定性。因此，退出期权价值将同时反映市场和项目的不确定性。

针对这些模拟的项目，图87展示了模拟的项目总波动性，相应的退出期权价值，以及项目变得更有利可图的概率 q 。 q 小于0.5的项目用红色表示， q 大于或等于0.5的项目用蓝色表示。

图 87：tex=7 时，预期的项目波动性和相应的期权价值（百万美元/亿次）。数据来源：作者阐述

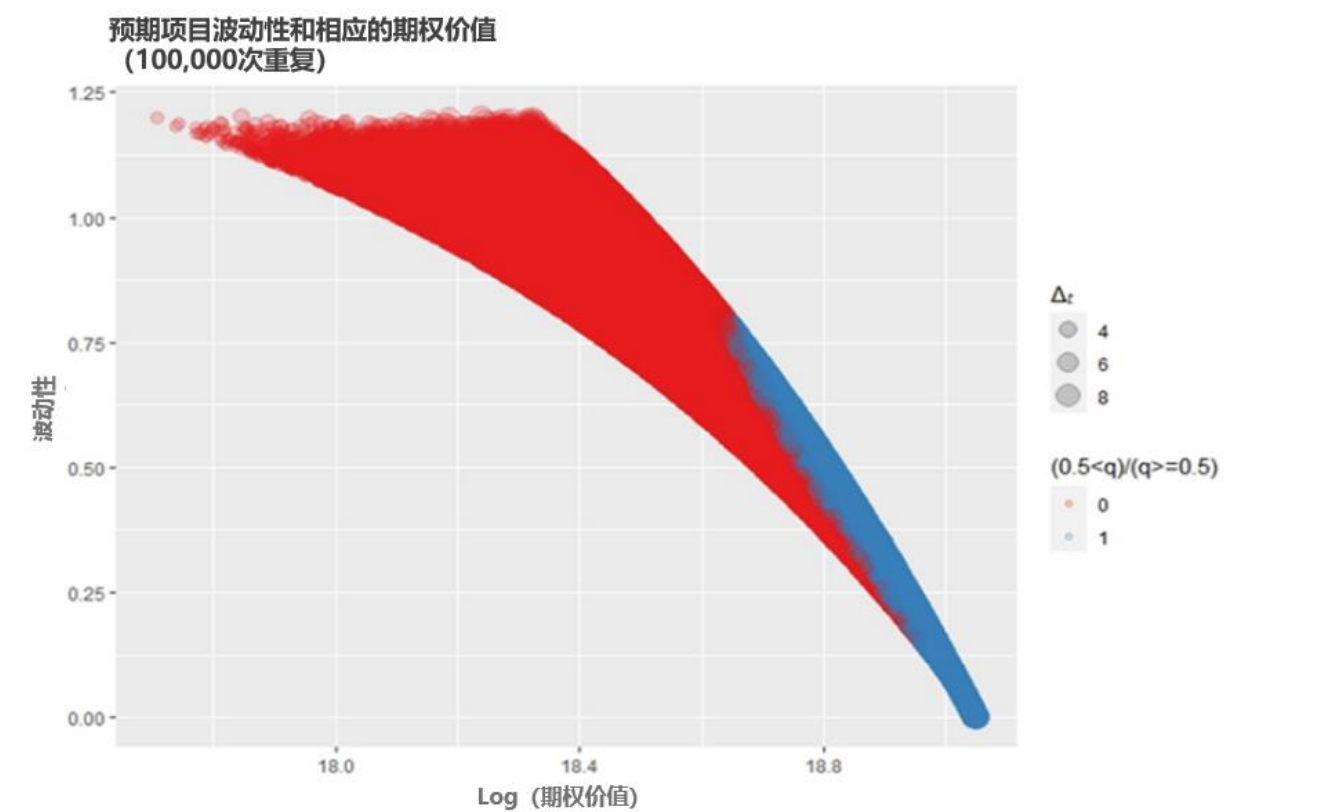


总的来说，我们发现项目的波动性越高，退出期权的价值越低。在较低的波动率水平上，更可能有利可图的项目占比较高，在波动性很低的项目中，所有项目都更有可能增值而不是贬值（蓝色表示的项目）。它们都是低风险项目，也因此具有最高的退出期权价值。相反，较高的波动性意味着项目升值的可能性较低，期权价值也同样较低，这可以解释为项目融资所产生的风险溢价。

在图 88 中，我们进一步尝试，使每个模拟项目中行使退出期权（tex）的时间具备一定灵活性，允许在第2年至第9年间行权。在这种情况下，可以看到有些项目具有相同的波动性，但期权价值却不同，这是因为一些项目出现不良净现值轨迹的概率高于其他项目。此时，在融资运作中加入退出期权能使债权人在不产生计划外费用（如诉讼费）的情况下退出项目，因为随着时间的推移，有关项目表现的信息越来越多，风险“偏好”的提升也是合理的。

³⁰⁹ We focus our analysis on financially viable projects – that is, those with a positive net present value.

图 88: tex在2-9之间时，预期的项目波动性和相应的期权价值（百万美元/亿次）。数据来源：作者阐述



最后，在模拟项目中，大多数项目变得更有利可图的概率低于0.5（红色区域），这表明即使评估的主要驱动因素仅与主要变量中的历史波动性有关，像伊通比亚拉水电站这样的电厂前期在经济上可行的概率仍然较低。在许多情况下，事后证明完全可行的项目被放弃，是因为在处理与长期项目相关的不确定性时，估值方法存在限制。

结论

这些实验结果似乎与巴西及许多发展中国家基础设施部门较低水平的私人投资相一致。这类经济体的国内市场波动较大，外加通常的估值方法（为发达国家开发）难以有效处理这种不确定性，这似乎表明，如果希望私人资金参与投资，需要采纳新的估值方法。

上述模拟是以水电站为基础的，因此对风能和太阳能项目进行类似的模拟实践将是下一步工作的重点，以便更好地了解退出期权在加强巴西绿色能源私人投资方面的潜力。除此之外，更好地了解实物期权在巴西采用率较低的原因，和探索可能需要的监管变化，以使实物期权对融资主体而言可行性更高，是我们未来研究的方向。

表 15: 不同估值方法中的实物期权应用

图例：PDE=偏微分方程；AB=二叉树；SIM=模拟；PD=动态规划；AE=实证分析；AMMQ=蒙特卡罗最小二乘法；GT=博弈论；MP=概率模型

作者	地区	可再生能源类型	研究方法
HOFF (2003)	加利福尼亚州	光伏	AB 二叉树
ZHANG X (2005)	非地区性	水力	SIM 模拟
KJAERLAND (2007)	挪威	水力	EDP偏微分方程？
KUMBAROĞLU (2008)	土耳其	风力	EDP 偏微分方程
LEE (2010)	台湾	风力	AB 二叉树
YANG (2010)	中国	风力	SIM 模拟
BATISTA (2011)	巴西	水力	SIM 模拟
LEE (2011)	台湾	风力	AE实证分析
ZAVODOV (2012)	中国	水力	AE实证分析
REUTER (2012)	英格兰	风力	EDP偏微分方程
BOOMSMA (2012)	北欧	风力	AMMQ 蒙特卡罗最小二乘法
LEE (2013)	印度尼西亚	水力	GT + SIM 博弈论+模拟
CESEÑA (2013)	英国	光伏	SIM 模拟
KRONIGER (2014)	英格兰	风力	EDP + SIM 偏微分方程+模拟
KIM (2014)	韩国	风力	AB 二叉树
ABADIE (2014)	英国	风力	EDP偏微分方程
WEIBEL (2015)	英格兰	风力（陆上和海上）	AMMQ 蒙特卡罗最小二乘法
JEON (2015)	韩国	光伏	MP 概率模型
ZHANG (2016)	中国	光伏	EDP 偏微分方程
KIM (2017)	韩国	水力	EDP偏微分方程
AGATON (2018)	菲律宾	可再生能源	EDP + AMMQ 偏微分方程+蒙特卡罗最小二乘法
GAZHELI, (2018)	非地区性	太阳能和风力	EDP偏微分方程

³¹⁰ Kim, K. H. P. A. H. K. (2017). Real Options Analysis for Renewable Energy Investment Decisions in Developing Countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

结论

本报告通过与全球能源转型关键国家的政策利益相关者合作，就特定主题和政策问题，精心展示和证明了一系列新经济模型的价值。报告介绍了被称为“新经济模型”的各类方法，研究这些方法如何应用于不同类型的政策问题，以及如何进行使用。

本报告介绍了15个应用和以政策为导向的案例分析，将上述方法用于实际的政策问题，为真正的决策者提供了洞见和价值。因此，我们相信本报告兑现了新经济模型的承诺，超越了对现有方法和抽象概念的批评，并提供了具体的见解，让我们在能源和气候政策分析方面走得更远。

案例分析结果摘要

通过案例分析，我们对四类政策问题得出了一系列主要发现，表16对此进行了总结。

表16：本报告涉及的政策问题和主要调查结果

政策问题	主要发现
发展方向： 是否应该脱碳吗？脱碳成本是多少？宏观经济影响是什么？	- 针对不同国家、使用不同方法进行的多个案例分析都表明，去碳化可能提供净就业机会，考虑到相关地区的具体经济结构，可能推动经济的整体增长。 - 比目前设想的更快的转型是可取的。 - 在某些转型情景下，可能会产生负面影响或负面成本，我们能确定这些影响可能出现的特定时期、行业或职业，以及与其他发展目标的关系。
技术选择： 应该专注于哪些技术？对行业有什么影响？	- 政策制定者应尽量消除对零排放技术的壁垒，随着部署的扩大，这些技术的性能会提高，成本会降低，包括太阳能、风能、电解器和电池。政策制定者应塑造市场，以加快技术创新和增长。 - 各国基于自身现状，将关注不同的技术。 - 化石燃料向其他能源转型的不同性质，会产生可预测和可管理的影响。
政策选择： 哪些政策最能支持我们的目标？	- 对于实现减排和关键能源技术的创新，投资于零排放技术往往比给化石燃料定价更有效。 - 监管可以非常有效地将投资重新分配给零排放技术，加速其改进并降低成本。 - 强制技术规定或政府采购是启动某一行业的有效政策，可以使其他政策更高效。 - 将碳定价纳入一揽子政策很有用（收税比总量控制和碳交易的方式更加有效）。 - 政策支持的关键是时机，迟来的支持会增加不必要的锁定效应。 - 政策支持通常可以实现收入或财政中立。
政策设计： 应该如何设计这项政策？	- 当财政补贴或税收水平使零排放技术成本足以与化石燃料相竞争时，其成效可能会尤为显著。 - 强制规定采用零排放技术，可能比要求提高化石燃料的效率更有效（尽管两者结合可能是最好的）。 - 如果快速减排超过了排放配额的调整，应设计排放交易方案，防止在减排上“刹车”。

主题和教训

案例分析内容丰富多样，但也有一些关键的总体主题和经验教训：

1. **与利益相关者和合作伙伴共同进行分析的重要性。**共同的主题是联合开发洞见，政策团队和建模人员密切合作来定义分析问题和方法，并通过一轮轮的分析和讨论进行迭代。这种工作模式并不通用，也不是必须的，但它是提供洞见的主要方式，同时提高用户和建模人员的能力。我们建议将共同开发模型洞见作为默认选项。
2. **详细政策评估的价值。**许多案例研究提供了详细的政策分析，或使用有能力提供这一分析的模型。这里指的是结构足够现实且参数充分的模型，能够有针对性地表示政策实施的细节，而不仅仅是将碳价作为代表。使用无法捕捉政策细节的模型，或运行不包括现实政策的情景，对政策制定者来说几乎没有价值。政策应在模型中显现，但要从外部制定，允许建模者和政策客户使用模型轻松运行政策情景。
3. **新一代自下而上、结构现实、实证验证过的经济模拟模型。**无论是基于主体的模型、系统动态模型，还是E3ME及其扩展，本报告中的所有模拟模型都旨在以结构现实的方式展示经济和能源系统，捕捉由点到面的关系，而不是观察到的宏观变量间的关系。至关重要的是，在实证验证方面坚持高标准——根据其以往的表现，只产出我们信任的结果。这是一个常见而重要的主题，也是对前几代此类模型的重大改进。创新点是计算能力和精细数据的有效性，以提高模型的质量、复杂度和可靠性。
4. **基于主体的模型很重要，但并不是所有的模型都基于主体。**基于主体的模型是复杂性经济学的同义词，有时也与新经济建模同义。然而，广泛的

案例分析表明，还有其它方法，包括模拟和数据分析方法。这一点很重要，因为新的经济建模本质上是多元的，这体现在其包含一系列建模方法。这种多元性使得新经济建模能够应对不同的利益相关者的需求和政策背景。

5. **在使用不同的建模方法时，需要考虑其成熟度。为了管理预期并确保恰当应用不同的方法，必须了解不同模型的成熟度。**例如，CGE和DSGE模型已经非常成熟³¹¹。已广泛用于学术和政策领域，因此也有完善的标准、框架和制度支撑。这意味着通常可以快速地熟练使用，但有固定的步骤，很难退一步质疑某些假设。相比之下，许多新经济方法还不太成熟，使用这些方法的成规也较少。这意味着它们使用起来可能较慢，在每次应用时需要做出许多抉择，而在更成熟的方法中可以跳过。另一方面，没那么成熟的模型在应用中灵活性更强。E3ME是一个例外，过去23年中，E3ME开发了一个制度支持和操作框架，使用时与更成熟的建模方法类似。这为其他新经济方法提供了样板。

新经济模型的未来

本报告仅仅记录了将新的经济模型应用于气候和能源政策的开始。政策的影响才刚刚开始显现。随着新经济模型的价值得到更广泛的认可，模型不断改进和推广，未来五年的主要趋势如下：

1. **了解什么在实践中有效。**在EEIST内外，我们已经意识到大量国家和地区政府、多边组织、私营部门行为者和资助者正在使用或计划使用我们在此介绍的各类模型。各类分析的应用将在未来几年大幅扩展。这一点之所以重要，原因有二。首先，从中可以学习除了提供单独的政策洞见之外，这些方法适用于哪些应用，从而推广其使用。其次，这将扩大政策制定者使用的范例和蓝图，以便更清楚地阐明他们需要的政策分析。我们经常听到政策团队抱怨不同类型模型的缺点，但不确定解决方案是什么样的。现在，他们有了一个正面的故事和愿景，可以更全面地阐明想要的东西。
2. **更广泛地传播应用系统思维。**随着模型的应用越来越广，其背后的系统思维概念也将得到更广泛的应用。我们之前的报告《制定能源转型政策的十项原则》³¹²概述了新经济模型和方法的深远政策影响。其背后是广泛的概念框架。除此之外还有反馈回路、临界点和不平衡等概念。随着应用的拓展，预计政策制定者在应用系统思维方面的成熟度和“素养”将显著提高。这本身就是一条令人倍感鼓舞的道路。

3. **方法创新和透明度。**除了方法和思想的应用，我们预计新研究方法的创新将激增，不断获得成功、使用需求增加。创新最有可能围绕：（i）不断改进的模型校准和验证；（ii）使用更多和更好的数据和新型数据；（iii）使用机器学习技术来建立更好的数据衍生模型；以及（iv）模型设计和洞见的交流和可视化。不同机构很可能进行能力建设，来制作和使用这类模型，推进模型的透明度和清晰度，反映更直观和结构现实的倾向。如果能够围绕这些方法进行能力建设和培训，希望更多的政策团队批判性地参与到建模中，了解其假设、设计以及给出某结果的原因，而不是被动地接受模型的洞见。

新经济模型的未来需要机遇，而不是必然。我们需要学习和利用当前的政策洞见，然后继续投入，将这些方法应用于现实世界的政策和决策。我们需要在使用这些方法的机构中加强能力建设和专业知识，这也至关重要。

³¹¹ Computable General Equilibrium and Dynamic Stochastic General Equilibrium models.

³¹² <https://eeist.co.uk/eeist-reports/>

附录

新经济模型的数据要求示例

附录总结了本报告系列模型所收集和使用的数据，在后面以电子表格的形式呈现。

这个总结在某种程度上是为让EEIST联盟的成员了解，在特定情况下应用建模能力的相关数据要求。因此，数据按主要模型组件（以及数据类型和使用的模型）进行细分，包括情景、生产、劳动力、能源和可持续发展目标。数据也分为“最低要求”和“重要但非必需”两种。前者是模型产出可靠结果所必需的数据；后者是重要但可以用估计值或其他背景中的数据代替的数据。

如报告正文所述，每个模型收集的数据为其提供了来自现实世界指标的测量结果，使其立足于真实世界现象和具体案例研究背景中。模型预测或预报未来的能力在很大程度上取决于所用数据的质量和数量。本报告中介绍的每一个案例分析中使用的数据质量都因情况而异。不是每个国家或情景应用的数据质量都很好。所有案例分析在一定程度上都受到所用数据质量的影响。模型通常采用随机方法来考察与其数据相关的不确定性，并提供产出的范围估计。全球综合研究最有可能提供最佳预测，但局限性在于，只能提供全球范围内的产出。

数据要求电子表格详见：<https://eeist.co.uk/eeist-reports/new-economic-models-of-energy-innovation-and-transition/>。

案例分析附录：最具成本效益的碳定价形式是什么？

这是案例分析第三部分的附件。附件由Huaiyu Wang, Jia Liu, Tianyi Wu,, Zheng Kang和Zhangang Han撰写。

A：能源基础设施的平准化成本

在建立新电厂时，每种技术的平准化电力成本（LCOE）用于指导技术选择。313对于新建的发电厂，其LCOE可计算为：

$$LCOE_i = \sum_{y=y_b}^{y_b+d} \frac{LC(y) * (\delta * IC + MC + FC)}{(1 + r)^{y-y_b}}$$

LC=第y年总成本受学习率影响的百分比。

MC=第y年的维护成本。

FC=第y年发电厂的燃料成本。

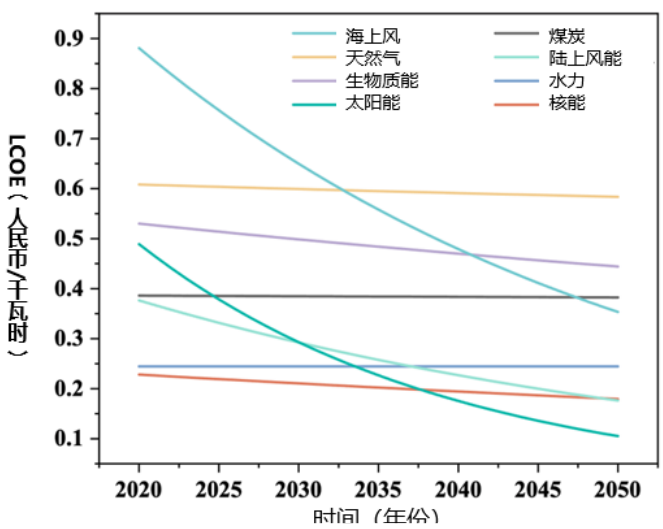
y=估计总体成本的特定年份。

R=资本折现率，假设一直恒定。

总和符号表示LCOE是一个从竣工年份到设计年份的生命周期变量，且假设工厂没有关闭或拆除。分子表示生命周期中某一年的所有成本，分母表示根据复利公式将本年的成本折现到竣工年份所需的系数，折现率定为2001年至今的CMB-GD年化收益率，即1.25%。在ETS情景中，这里的未来碳成本不是一个指定值，而是估计值（去年的配额），因为发电厂不知道能得到多少碳配额。而确定修建年份的因子，在修建年份等于1，其他时候等于0。

模型中使用的最终LCOE如图A-1所示。如图所示，煤炭、天然气、水力、核能等传统技术进步非常有限，但假设风能和太阳能发电取得了重大进步。

图A-1传统技术和创新技术的成本演变



B：有限理性与配分函数

决策机制中的有限理性原则体现在新发电厂能源的最终选择上。引入了一种类似于统计物理学中的配分函数（PF）的随机决策机制，将热力学系统处于某种状态的概率与电厂选择某种能源的概率联系起来。能量越高，热力学系统不稳定的概率就越低，同样，LCOE越高，选择修建发电厂的概率就越低。在这种机制中，选择某个发电厂i Pi的概率如以下公式所示：

$$\begin{cases} E_i = LCOE_i \\ Z = \sum_{E_i} e^{-\beta E_i} \\ P_i = \frac{e^{-\beta E_i}}{Z} \end{cases}$$

β是理性指数，β越大，Ei对概率越敏感，决策越理性；β越小，Ei的敏感性越低，决策越不合理。Z是作为归一化参数的PF，作用是求和。使用统一的随机数生成器生成0和1之间的随机数，并使用上述公式计算每个Pi，然后按确定的顺序对每个能源厂Pi划分轴。随机数落在哪一个区间，就在哪一个区间选择工厂进行建设。重复该过程，直到满足不需要新工厂的条件，本年新工厂的开发流程就完成了。

C：现有工厂的停用规则

考虑到建造发电厂所涉及的巨大劳动力成本、设备成本、建造和拆除成本，以及发电厂提供的大量就业机会和能源，决定停用发电厂并不是一件容易的事。对发电厂的盈利能力过于小心谨慎（无法忍受损失和快速拆卸）或过于粗心大意（无论运行条件如何，总是工作和运行）显然是不现实的。因此，在我们的模型中引入了拆卸概率Pdown来简化决策过程。发电厂应检查最近Tthreshold年的利润，其中亏损年数ndeficit除以Tthreshold就是发电厂的拆除概率，即：

$$P_{down} = \frac{1}{T_{threshold}} * n_{deficit}$$

使用统一的随机数生成器来生成0和1之间的随机数。如果它大于或等于Pdown，则不拆除工厂，反之亦然。

³¹³ Branker, K. et al. (2011). A Review of Solar Photovoltaic Levelised Cost of Electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15(9): 4470-4482.

D：具有软性总量控制和免费分配的ETS碳价

在此情景中，我们使用经验公式来计算年度碳价，引用现有的参考资料：³¹⁴

$$p_{CO_2} = 10 + 40 \times \left(\frac{\sum_{j=1}^n e_j}{t} \right)$$

其中：pCO₂：CO₂碳配额价格，单位：元/吨

e_j：发电厂j的排放量

n：发电厂的数量

t：总量控制，单位为吨/年。

为了验证该公式，我们以877克二氧化碳/千瓦时作为大多数生产单位的基准，计算了基准年的配额价格。结果显示，平均价格约为54.2元/吨二氧化碳（软性总量控制约为428亿吨二氧化碳），准确反映了中国的实际情况。本团队确信，最初为欧盟ETS开发的公式是适用的。

E：清算所双倍拍卖机制。

我们使用的碳交易机制是国家对所有火力发电厂的碳配额进行的统一拍卖，国家直接拍卖第一级的碳配额，每个发电厂为自己配额的拍卖出价，然后从高到低的价格匹配，直到配额发出。发电厂拍卖的学习机制基于Roth-Erev多智能体强化学习算法，315,316选择下一行动的概率根据前一行动的收益来调整。拍卖机制流程如下。

拍卖

1. 国家每年根据外国投资者给出的碳排放指标确定配额总数，将其等同于当年的拍卖次数，并分批发放配额供煤电公司购买。

2. 煤电公司根据研究得出的出价概率给出其采购量和出价，将煤电公司的出价由高到低排序，将其购买的配额相加，直到达到国家发布的配额量，并将当时的价格作为本年的配额价格。

注：每个燃煤厂只能根据购买配额量来排放二氧化碳，配额仅用于发电，而不考虑工厂之后再出售配额。

出价与学习

1. 在底价和电厂可接受的最大碳配额价格之间，等间距取一定数量的数值作为出价点，每个出价将根据出价点与习得的出价点对应的概率从出价点中选择。

在模型中，允许的最低出价为0，最高出价在模型中设计为每个主体的盈亏平衡点，这意味着出价等于电力销售收入减去燃料成本。

2. 本研究采用了带有遗忘因子的Roth-Erev强化学习模型，基于市场中多个交易者的两个基本假设：

- 过去成功和相似的选择更有可能在未来采用。
- 与长期经验相比，最近的经验对当前的决策更

该模型的基本设定如下：

$$\begin{aligned} q_{jk}(1) &= \frac{s(1)X}{K} \\ p_{jk}(1) &= 1/K \\ r^* &= \frac{r-e}{K-1} \\ q_{jk}(n+1) &= (1-r)q_{jk}(n) + ME(j, k, k', n, K, e) \\ ME(j, k, k', n, K, e) &= \begin{cases} R(j, k, n)(1-e), & k = k' \\ q_{jk}(n) \frac{e}{K-1}, & k \neq k' \end{cases} \\ p_{jk}(n+1) &= \frac{q_{jk}(n+1)}{\sum_{m=1}^K q_{jm}(n+1)} \end{aligned}$$

其中，q_{jk}(n)，p_{jk}(n)是第j个个体在第n次拍卖中选择第k个出价的“偏好”和概率，e是实验参数，反映了学习速度。偏好是碳配额拍卖中历史收入（购买碳配额产生的利润）的累积，概率是所有出价选择的“偏好”的规范化。在初始化时，每个选择的“偏好”和概率是相等的，其中K是竞价选择的数量，X是估计的初始平均收益。r是近度参数，代表相同策略的最后一次拍卖的“偏好”遗忘率。ME(j, k, k', n, K, e)是偏好更新项。如果拍卖成功，竞价将根据学习速度e选择线性增加正的“偏好”，剩余竞价的收益比例将分配给未使用的策略“偏好”。目前的政策和使用该机制预期的具体参数如下：

表E1 机器学习出价的参数设置

参数	符号	值
近度参数	r	0.1
实验参数	e	0.5
出价选择的数量	K	50
估计初始		
平均收益	X	4,000,000
尺度参数	S(1)	1

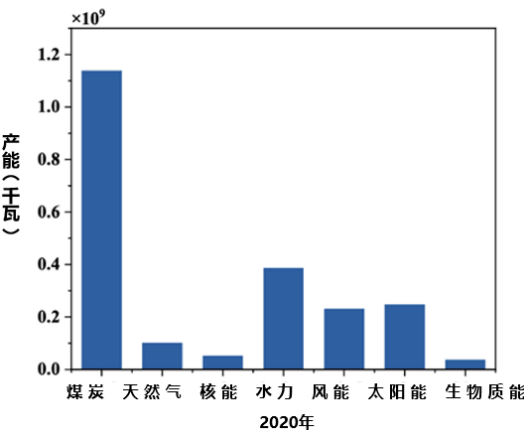
让r等于0.1是因为r是最近度参数，取一个较小的值合理。e等于0.5是因为e的值范围从0到1，所以取0.5的中值。K之所以等于50，是因为实验发现，如果K很小，出价就会太离散，而太大会使主体学习太慢。X仅与初始化相关，实验发现，由于遗忘因子的存在，只要数值大到一定程度，模型就对X的值不敏感，最终选定4000000。s(1)是尺度参数，s(1)设为1意为没有额外的缩放。

煤电厂建设限制

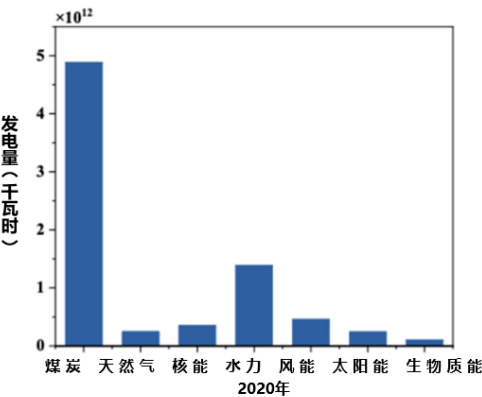
当配额已满时，是否允许新建煤电厂？如果不允许，就会引入额外的监管和行政干预。尽管本文作者并不欣赏这一政策，但仍然模拟了该政策，以更深入地了解决策支持的拍卖机制。

F：基准年的产能、发电量和二氧化碳排放量分布

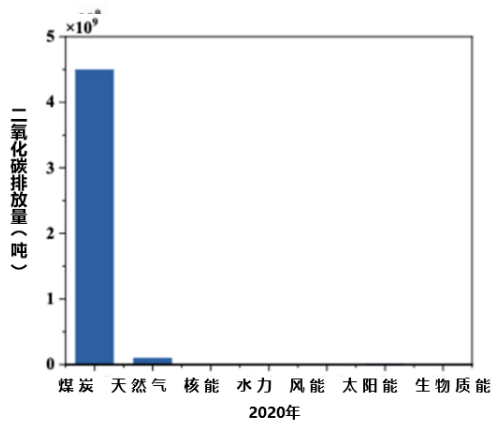
图F-1 基准年的产能分布



图F-2 基准年的发电量分布



图F-3 基准年的二氧化碳排放量分布



³¹⁴ Chappin, E. (2011). Simulating Energy Transitions. Mother Pelican. Delft University of Technology. Retrieved from <http://www.chappin.com/thesis>.

³¹⁵ Roth, A. E. and Erev I. (1995). Learning in Extensive-Form Games: Experimental data and simple dynamic models in the intermediate term. Games and Economic Behavior 8(1): 164-212.

³¹⁶ Nicolaisen, J. et al. (2001). Market Power And Efficiency in a Computational Electricity Market with Discriminatory Double-Auction Pricing. IEEE transactions on Evolutionary Computation, 5(5): 504-523.

EEIST

Economics of Energy Innovation and System Transition (EEIST)

EEIST项目对前沿的能源创新分析进行研究，以支持政府关于低碳创新和技术变革的决策。本项目与巴西、中国、印度、英国和欧盟的政策制定者和利益攸关方进行合作，旨在为新兴国家的经济发展做出贡献，并支持全球可持续发展。

EEIST版权所有2023.埃克塞特大学。

保留所有权利。本报告及相关内容的版权和知识产权以及本文所包含的材料归埃克塞特大学所有。有关版权的信息、使用或翻译，请联系创新、影响和业务部门

IPcommercialisation@exeter.ac.uk.



更多信息请访问：
eeist.co.uk



所有文件请访问：
eeist.co.uk/downloads

