

保持全球能源转型势头

Valerie J. Karplus

Carnegie Mellon University

Harvard Project on Climate Agreements

2025 年 9 月 12 日



保持全球能源转型势头

Valerie J. Karplus

Carnegie Mellon University

2025 年 9 月 12 日

ABOUT THE HARVARD PROJECT ON CLIMATE AGREEMENTS

The Harvard Project on Climate Agreements is a Harvard-University-wide initiative established in 2007 to identify and advance scientifically sound, economically sensible, and politically pragmatic public policy options for addressing global climate change. Drawing upon leading thinkers from around the world, the Harvard Project conducts research on policy architecture, key design elements, and institutional dimensions of international and domestic climate-change policy. The Harvard Project is directed by Robert N. Stavins, A.J. Meyer Professor of Energy and Economic Development, Harvard Kennedy School. For more information, see the Harvard Project's website: www.hks.harvard.edu/hpca.

ACKNOWLEDGEMENTS

The Harvard Project on Climate Agreements is grateful to [Energy Foundation China](#) for support for the preparation of this paper and of a larger project exploring the intersection of trade and climate-change policy. Information on sponsors of other Harvard Project initiatives and on programmatic support can be found on the [website](#).

CITATION INFORMATION

Karplus, Valerie J. "Sustaining the Global Energy Transition." Discussion Paper. Cambridge, Massachusetts: Harvard Project on Climate Agreements. September 2025.

The views expressed in this publication are those of the author alone. These views do not necessarily reflect those of the Harvard Project on Climate Agreements; Harvard University; any of the University's constituent schools or programs; or Energy Foundation China. This publication has not undergone formal review and approval. It has been released to elicit feedback and to encourage debate on important public policy challenges. Copyright belongs to the author(s). Publications may be downloaded for personal use only.

摘要

高利率、贸易紧张局势和能源地缘政治问题，加之美国气候政策的突然转向，引发了人们对全球能源转型前景的质疑。本文旨在探讨这些新形势对全球各行业推进深度脱碳技术部署势头的影响。目前，深度脱碳的推动因素在不同行业间呈现出更大的差异化。不同行业实现深度脱碳的赋能要素差异显著：部分行业清洁技术安装成本已与传统技术持平，而另一些行业仍面临巨大资本运营成本障碍或供应链安全问题。尽管专项气候政策仍然重要，但要维持转型势头，还需要关注推动能源转型的更广泛的制度性因素。解决新能源基础设施建设的瓶颈、构建供应链互信、拓展低成本能源和基础设施项目融资渠道，不仅是满足近期发展需求的“无悔”策略，还能为未来提升气候雄心创造更多机会并释放更大潜力。

1. 引言

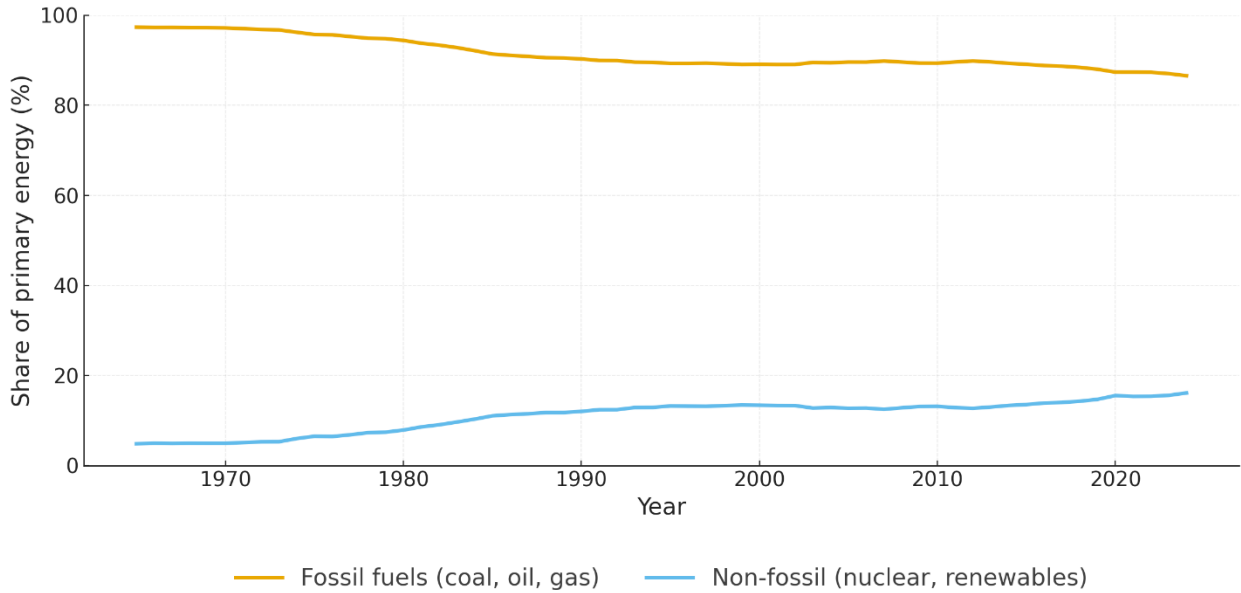
全球能源转型已站在十字路口。许多深度脱碳所需技术的成本，特别是在电力和交通领域，已降至与传统技术持平或接近持平。2024 年，91% 新投产的公用事业规模可再生能源项目的平准化发电成本已低于最廉价的化石燃料替代方案（Dardour 等人 2025）。同时，自 1991 年以来，锂离子电池的实际价格已下降 97%（Ziegler 和 Trancik 2020）。然而，部分国家气候行动的意愿正在减弱（Groom 2025；Sabin Center 2025）。新兴清洁能源技术的研发和生产集中在少数几个国家，其中中国扮演着至关重要的角色（S&P Global Commodity Insights 2025）。对供应链地理集中、利率上升以及保护主义贸易政策抬头等问题的担忧，可能会减缓清洁技术的开发和推广进程，即便是那些设定了宏伟气候目标的国家也不例外（BNEF 2025）。如图 1 所示，过去 60 年间，一次能源消费结构明显呈现出从化石能源向非化石能源转变的趋势。然而，与预期的气候变化减缓需求相比，这一转变进程至今仍然相对缓慢。面对这些阻力，我们如何才能维持并最终加速能源转型的势头？

回答这个问题变得愈发复杂：随着转型成本和更广泛的动态因素在各经济部门间的差异日益显著，推动变革的关键点也随之呈现多元化。在电力和交通领域，低碳技术成本已与现有技术持平或接近持平，因此其推广应用取决于与演进中系统的整合。随着这些技术的规模化应用，基础设施日益成为瓶颈——包括电动汽车（EV）充电设施、发电设备、输配电网网络的选址与升级，以及运营灵活性的提升。随着电力系统承载更多终端用途，对网络物理威胁或气候驱动的极端事件引发的停电情况的抵御能力变得愈发重要。相比之下，工业部门面临的挑战则截然不同。实施工业流程的深度脱碳技术不仅需要大量资本投入，还会导致更高的运营成本。事实上，无论是公用事业公司投资建设大型发电机组，还是家庭购置新车，亦或是工厂重新设计生产流程，只要脱碳需要大量前期成本，那么一旦利率或关税上升导致借贷和设备成本增加，转型势头就可能会受到影响。部分原因在于技术及制度环境日益呈现出差异化态势，学者们据此认为，这些差异强化了将政策重点放在特定行业上的必要性（Stock

2021)。在国际层面，以经济部门为重点的方法也很有说服力，因为包括复杂供应链在内的许多活动都跨越国界，这使得协调转型工作变得更加困难（Oberthür 等人 2021）。

Figure 1 Fossil and non-fossil (renewable and nuclear) energy sources as a share of primary energy (1965–2024).

图 1 化石与非化石(可再生能源与核能)能源占一次能源比重 (1965–2024)。



来源：能源研究所（2024）

本文旨在结合主要参与方在气候雄心、技术成本以及宏观经济、贸易和国家安全优先事项等方面的持续变化，探讨在主要耗能活动中推进气候变化减缓的路径。第二部分将分析能源转型技术在电力、工业和交通这三个主要二氧化碳（CO₂）排放部门中日益分化的创新和部署模式。该部分将描述预计具有成本效益的减排策略，并审视这些策略与更广泛的部门及经济发展优先事项的契合度。第三部分将阐述不断变化的气候政策格局，并结合当前成本情况和采用的激励制度，探讨其中存在的差距。该部分将探讨企业和政府在弥合这些差距方面各自扮演的角色。第四部分将探讨一系列可能与转型相互影响的更广泛优先事项：贸易和产业政策、国家安全以及宏观经济稳定性。第五部分将提出若干机遇，旨在实现能源系统现代化，支持经济和安全目标，同时为提高未来气候政策的可行性、雄心和持久性做出贡献。

2. 各经济部门的转型障碍日益分化

虽然在全球任何地方减少一个单位的温室气体（GHG）排放对减缓气候变化的贡献大致相同，但实现这一单位减排的成本和复杂程度却千差万别。¹这种差异在很大程度上源于不

1 每减少一个单位 GHG 所带来的预计效益，在不同国家和地区之间也存在巨大差异。

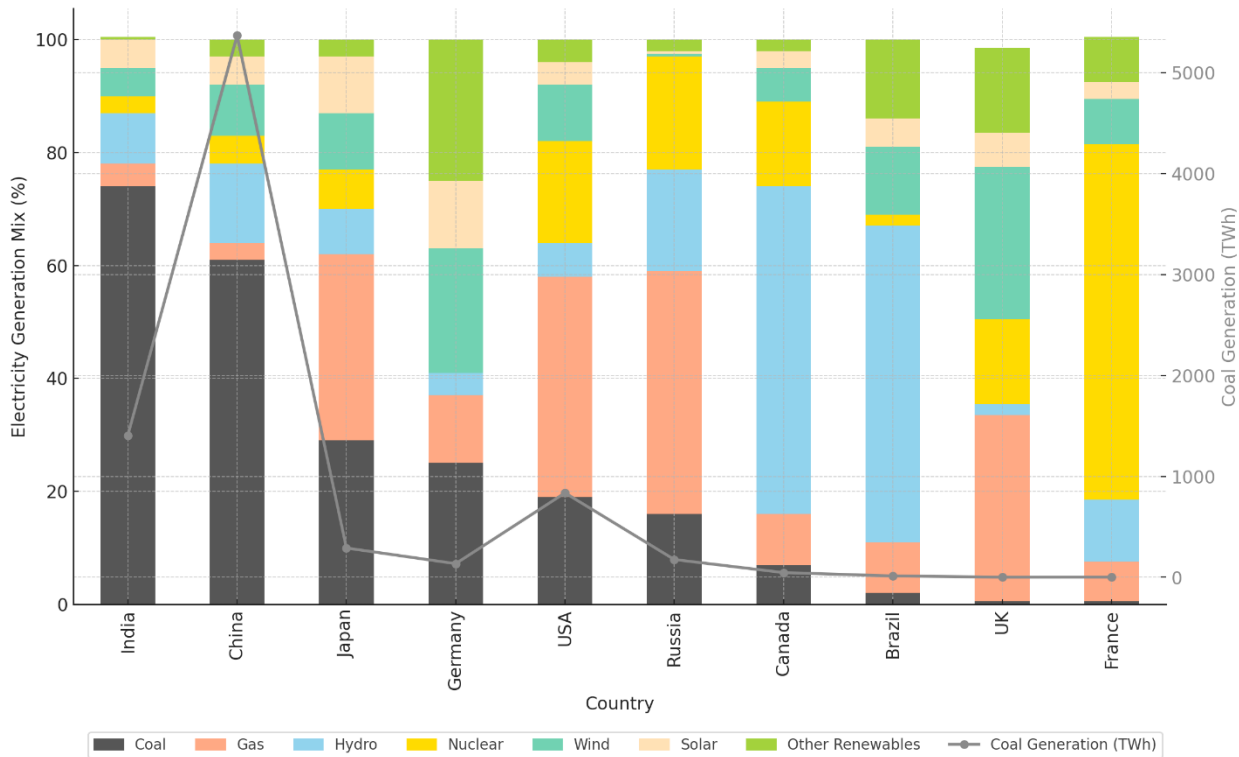
同部门、产业、公司和流程层面的技术与制度动态，以及它们在各国间不均衡的地理分布状况。因此，我们必须认识到各部门和产业在全球能源转型中的作用及其对脱碳技术部署的影响。据估计，电力、交通和工业领域的 GHG 排放量合计占全球总排放量的 65% 以上（Ritchie 和 Roser 2020）。本文聚焦于这三个部门，因此主要关注 CO₂ 的减排问题。这一选择并非旨在削弱推动农业、废弃物和土地利用领域 GHG 减排解决方案的重要性，这些领域同样需要专门分析以找出差距并制定应对策略。

各种终端用途带来的预期电力需求增长，将改变各部门的能源消费和 GHG 排放结构，使脱碳挑战变得更加复杂。迄今为止的能源转型主要涉及增加清洁能源以及从煤炭转向天然气。然而，在众多模拟的本世纪中叶实现净零 GHG 排放的路径中，降低煤炭及其他化石燃料在发电领域的比重是核心要素（IEA 2021；Larson 等人 2020；CEEW 2022；He 等人 2022；Roelfsema 等人 2020）。汽车和工业流程等终端用途的电气化将推高电力需求。数据中心电力需求的预期增长，特别是用于训练人工智能大语言模型（LLM）和流程自动化的电力需求，将进一步加剧这一趋势。根据国际能源署的数据，到 2035 年，数据中心的电力需求预计将达到 1,200–1,700 太瓦时，占发达经济体预计电力需求增长的 20%，全球的 10%（IEA 2025a）。要在支持温室气体排放持续减少的同时控制成本，关键在于允许多元化技术满足需求。电气化的速度和范围将受到多种因素的影响，这些因素包括新增发电能力的可用性和经济性，以及各种燃料和能源载体的竞争性应用，如天然气等传统化石燃料、石油、电燃料和氢能。

2.1 电力

化石燃料发电仍然是温室气体的主要来源，2023 年占全球总排放量的 31%。电力是国际贸易量最小的商品之一，全球供应的电力中仅有 2.8% 跨越国境（IEA 2020）。各国在系统结构与效率、制度与政策环境、发电成本（包括部署脱碳替代方案的成本）等方面存在差异（世界银行 2024a）。电力市场呈现不同程度的自由化，这影响着技术选择以及成本向终端消费者的传导。这些市场在风能和太阳能资源的自然禀赋，以及为煤炭和天然气发电部署先进核能和碳捕集与封存（CCS）技术的科技水平与监管准备程度上也各不相同。

Figure 2 Electricity generation mix by country.
图 2 各国发电结构。

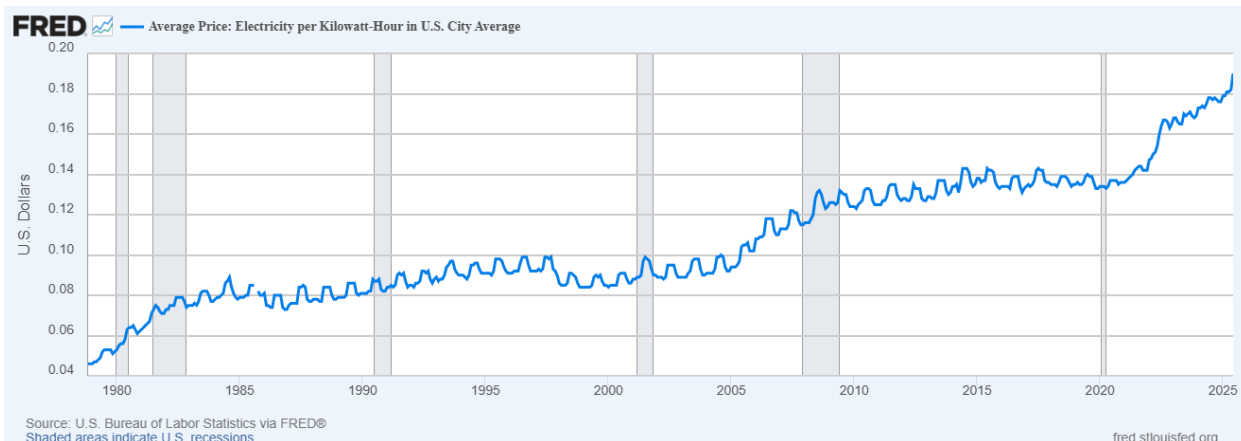


来源：中国 - Ember (2024)；美国 - 美国能源信息署 (U.S. EIA 2024)；印度 - 中央电力局 (CEA 2023)；德国 - 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 (ISE 2024)；日本 - 资源能源厅 (ANRE 2024)；巴西 - 国家电力系统运营商 (ONS 2024)；加拿大 - 加拿大统计局 (2024) 和加拿大自然资源部 (NRCan 2024)；俄罗斯 - 国际能源署 (IEA 2023)，2022 年数据；英国 - 英国能源安全与净零排放部 (DESNZ 2024)；法国 - 法国电力传输网 (RTE 2024)。除非另有说明，所有数据均为 2023 年数据。

如果不减少未经减排处理的煤炭发电量，仅靠扩大清洁和可再生能源无法降低电力部门的 GHG 排放。如图 2 所示，中国的电力用煤量最高。2023 年，在中国 9,548 太瓦时/年的发电总量中，煤电占比达 61% (IEA 2024)。仅中国的煤电一项，就占同年全球 CO₂ 排放总量的 15%。这些电厂中有许多相对较新，平均运营年限为 12-14 年，而全球平均水平为 26 年。在印度，煤电占其发电结构的 74%，但其电力系统规模约为 1,900 太瓦时，不到中国的四分之一。包括美国、德国和日本在内的许多工业化国家仍在推进“去煤化”转型，而法国和英国已基本完成这一进程（见图 2）。

与此同时，各国正努力维持或降低电力用户的用电成本，这些用户中也包括政府希望留住或吸引的产业。在美国，城市的平均实际电价在 1980 年至 2024 年间上涨了两倍，自疫情以来更是急剧攀升，如图 3 所示（美国劳工统计局 2025）。欧洲的平均电价也呈现类似的上涨趋势，在 1990 年至 2024 年间实际价格翻了一番（欧盟统计局 2025）。预计未来的需求浪潮将给电价可负担性带来更大压力；因此，需要精心设计煤炭淘汰计划，使电力用户能够从新建的、成本更低的发电方式中受益。

Figure 3 Average electricity price per kWh, U.S. cities.
图 3 美国城市平均每千瓦时电价。



来源：美国劳工统计局（2025）

不同电力系统在燃料、发电及输电环节的经济激励分布格局各不相同。全球电力系统高度受监管，但各国在将技术成本及整合成本（如储能、调节平衡和输电）纳入电价的程度上有所不同。清洁和可再生能源的商业可行性，取决于人们对其装机成本与替代方案的比较认知、价值链上增量成本如何被分摊或由政策覆盖，以及补贴或其他形式支持的可用性水平和确定性程度。然而，激励发电领域逐步淘汰化石燃料更具挑战性，因为这些电力来源可能是地方的重要收入来源。下游买家，尤其是在那些受 GHG 约束性目标限制的市场中，可能会鼓励其上游供应商采购清洁电力。这样做的目的之一是实现企业自身的气候目标，从而扩大供应商所在市场对清洁和可再生能源的需求。近年来，这些需求虽有所增长，但在许多市场中，与煤炭及其他化石燃料的发电量相比，其规模仍然相对较小。

在发电领域逐步减少煤炭使用并用清洁和可再生能源替代，这项任务必须克服多重经济与制度障碍。尽管通过购电协议（PPA）获得的可变可再生能源电力成本现在通常低于化石燃料基荷电力，但将这些能源并入电网会带来额外成本。这些成本源于为适应波动而进行的功率调节、基荷发电机组利用率的下降以及对足够可靠备用容量的维持。在风电占比 30–40% 的系统中，这些额外成本可高达每兆瓦时 25–35 欧元（Hirth 等人 2015）。这些成本在 PPA 价格中并未得到充分体现 (Duldinger 2023)。将整合成本反映在消费价格中，会加重原本有意愿买家的财务负担，这在效率低下或相对缺乏灵活性的电力系统中尤为明显。

尽管可变可再生能源成本的下降有利于脱碳，但这远远不足以推动整个能源转型进程。无论具体的发电结构如何，电网设计或加固的总体方向大致相同。这些方向包括：提高运营灵活性以处理双向电力流动、增强抵御自然和人为威胁的能力，以及支持更多分布式能源资源（如微电网、EV、可变可再生能源和储能）（Slaria 等人 2023）。同时，提升电力系统可靠性和加强成本控制的努力，将增强人们对系统应对扩张（尤其是新增可变可再生能源）

能力的信心。换句话说，如果商业、工业和居民用户能直接体验到清洁和可再生能源的成本优势，他们对能源转型的支持度可能会随之提高（NCSL 2023）。

2.2 交通运输

重型和轻型车辆、海运、铁路和航空运输合计占全球约 15% 的 GHG 排放。交通部门的 GHG 排放主要来自于交通设备的使用阶段。²各主要交通方式在决策模式和低排放技术的应用情况上存在显著差异。例如，在轻型车领域，家庭或车队所有者的选择正在推动 EV 的普及。2024 年，全球共售出 1,730 万辆新 EV（包括插电式混合动力车），其中大部分在中国，而 2020 年的销量仅为 300 万辆（IEA 2025b）。专注于 EV 车队服务的商业模式已在全球多个地区发展成熟并实现盈利（IEA 2025b; Becerra 和 Galarza 2022; Chauhan 等人 2023）。对于铁路部门而言，电气化是其脱碳战略的关键组成部分。全球许多铁路网已实现电气化，美国联邦政府也在其交通部门脱碳计划中将铁路电气化列为重点（Ellis 2023）。海运领域的情况更为复杂，因为航运排放通常不计入国家 GHG 排放核算，而是受独立的治理安排约束。海运的减排策略包括解决甲烷泄漏问题，采用氢气等低碳燃料，以及优化航线和贸易模式（Hirata 等人 2024）。在国际民用航空组织（ICAO）的支持下，航空业的脱碳工作正在推进。主要利益相关方已达成国际公约，制定了可持续航空燃料（SAF）的开发、示范与部署时间表。目前，SAF 的成本比传统化石航空燃料高出 120–700%，但其使用可减少 27–28% 的 CO₂ 排放（Watson 等人 2024）。本部分后续将聚焦电动汽车部署以应对道路交通排放问题，同时强调航空、铁路及海运持续脱碳努力的重要性。

EV 成本的下降，极大改变了人们对轻型车领域难以脱碳的认知。目前，无论在中国本土还是海外市场，中国生产的 EV 在购置成本上已能与内燃机（ICE）汽车相抗衡。在多数其他市场，EV 的初始购买成本仍高于 ICE 汽车，但若考虑全生命周期的燃料成本，其竞争力通常不亚于 ICE 汽车。此外，在欧美地区，注重环保或其他便利性的消费者一直愿意为 EV 车型支付比同款 ICE 车型更高的价格（Buhmann 和 Criado 2023）。

鉴于 EV 在成本平价和市场份额扩大方面取得了显著进展，关注点已迅速转向大规模生产和部署对供应链的影响。这些影响在 EV 电池及其组件和前体材料方面尤为明显。中国在 EV 供应链多个环节的主导地位引发了双重担忧：一是对中国以外汽车生产商长期竞争力的忧虑，二是随着 EV 产量扩大以满足脱碳目标，供应链可能面临短缺或中断的风险（Cheng 等人 2024a）。半导体领域也存在类似的脆弱性——ICE 汽车包含 300–1,000 个半导体，而新型 EV 可能使用超过 3,000 个半导体。随着车辆自动驾驶功能的日益普及，对半导体的需求将进一步增加。出于对这些脆弱性的担忧，美国对半导体制造业进行了空前规模的投资。2022 年美国《通胀削减法案》为国内生产的 EV 电池提供额外税收抵免，旨在通过鼓

2

尽管生产和报废阶段的排放不容忽视，但这些排放通常被归类为工业部门的排放。

励上游供应链活动回流本土来缓解这些脆弱性（Cheng 等人 2024b）。欧盟的《关键原材料法案》同样旨在实现EV原材料供应链的多元化。该法案设定了以下目标：10% 的原材料在欧盟境内开采，40% 在境内加工，25% 来自回收，且每年从任何单一第三国的进口量不得超过欧盟消费量的 65%（欧盟委员会 2025a）。

如今，中国的 EV 生产商正借助其在国内市场的成功扩张，逐步将目光转向全球销售和生产。比亚迪预计，到 2030 年，其生产的 EV 将有超过一半销往海外市场（Goh 和 Carey 2025）。中国其他汽车制造商，包括长城汽车、吉利、奇瑞和五菱，也制定了类似战略（AP 2025）。随着欧盟和美国对中国 EV 征收高额关税（欧盟在原有 10% 的基础上额外加征 17% 至 35.3%，美国则加征 100%），市场份额的竞争重心已转移至其他地区，特别是亚洲发展中国家、拉丁美洲和非洲市场。如果这些市场能够增加 EV 的销售和使用，同时配套部署脱碳电力来源，将加速深度脱碳进程。

2.3 工业

工业部门涵盖钢铁、水泥、化工和石化、纸浆和造纸等 GHG 密集型活动，预计到 2040 年将成为 GHG 排放的主要来源（IPCC 2022）。许多工业和制造工艺需要持续的高温热量，这使得用电力替代化石燃料变得困难重重。氢气或电制燃料等直接替代品目前尚未实现成本效益。第二个挑战来自工业过程中 GHG 排放所占的巨大比重。目前，工业部门的直接排放已占全球 GHG 排放总量的 24%；如果将电力和热力产生的间接排放计算在内，这一比例将升至 34%（IPCC 2022）。

鉴于工业品需求在经济快速扩张期最为旺盛，且这些产品通常运输困难，中国在钢铁、水泥和化工产品生产中占据主导地位也就不足为奇，其全球产量占比分别达 54%、51% 和 44%。当前，印度、东南亚和其他新兴市场为满足国内需求，其产量正呈现快速增长态势。剩余的生产份额主要集中在工业化国家，其中许多国家正在权衡应在国内保留多少产能，以满足国防、国家安全和就业需求（Millot 和 Rawdanowicz 2023）。

工业部门生产的许多大宗商品在全球范围内交易，因此同时受到关税和碳边境调节机制（CBAM）的双重影响。在工业部门内，汽车零部件和高价值化学品等中间产品在钢铁和化工行业的贸易中占据重要份额，而水泥因其低价值重量比，贸易份额相对较小。在这些领域，中国的占比尤为显著：中国供应了全球约 45% 的化学品、12% 的汽车零部件和 15% 的纸制品销售份额（Atkinson 2024; Tendata 2024a; Tendata 2024b）。中国的钢铁和化学品生产工艺仍然严重依赖煤炭以制造焦炭、氨和甲醇。

仅在钢铁和化工行业创新并部署低排放技术，就能显著降低全球工业的 GHG 排放。若相关技术能像风电、光伏和电动汽车电池那样实现低成本普及，将有助于全球众多国家实现脱碳。同时，这也可能减少空气污染对健康的危害，从而带来巨大益处（Li 等人 2018）。

在工业部门，部署脱碳技术的主要障碍包括成本、性能不确定性，以及许多脱碳技术的市场和供应链尚处于萌芽阶段。对于利润微薄且对贸易和宏观经济冲击高度敏感的经济活动而言，这些挑战更显严峻。目前，支持深度脱碳的技术普遍被认为资本和运营成本过高，难以支撑大规模转型，即便在已建立 GHG 排放交易体系的地区也不例外。然而，替代生产路线的经济性在很大程度上取决于废钢和替代铁源的供应情况，如使用天然气和（或）氢气生产的直接还原铁（DRI）或通过电解生产的铁。这将有助于进一步扩大以废钢为原料、排放较低的电弧炉（EAF）路线的份额，以替代全球主导的、排放较高的高炉-转炉（BF-BOF）路线。BF-BOF 工艺每生产一吨粗钢会排放超过两吨 CO₂，而转向 EAF 路线可将排放量减少 50-75% 甚至更多。然而，通常脱碳程度越深，成本也越高。要实现净零目标，极有可能需要为工业排放源开发碳管理技术，包括 CCS、碳捕获与利用（CCU）以及直接空气捕获（DAC）。

在一些特定案例中，买家已表现出愿意为脱碳工业产品支付溢价。即使对于减排成本相对较高（每吨 90 美元或以上）的技术，一些消费者也表示愿意为低 GHG 排放的钢材买单。这种情况在汽车行业尤为明显，而在科技和电子商务等行业也日益普遍，特别是当钢材成本在总成本中占比较小时。Stegra 公司正在瑞典北部建设以氢气为基础的钢铁生产设施。该公司已签订了超过 50% 产量的合同，溢价高达 30-35%。在中国，宝马已与河钢集团签订合同，由河钢为宝马位于沈阳的汽车制造厂供应绿色钢材（河钢集团 2023）。该合同初期规定生产减排钢材（与长流程工艺相比，GHG 排放量减少 10-30%），并计划到 2026 年通过转向氢基 DRI-EAF 生产工艺实现 95% 的减排。这些钢材将用于生产出口至欧盟的汽车和零部件，以及中国国内的 EV。关键问题是，这些由高支付意愿买家推动的首批规模化生产案例，是否将能够降低成本和/或验证技术，进而激发更大的全球需求。

钢铁、水泥、塑料等众多工业大宗商品，或可通过提升循环生产工艺占比获益。随着可回收的产品废料增多，回收利用将逐渐成为推动深度脱碳的重要策略，这在快速工业化的经济体中尤为明显。尽管美国并未出台政策来限制钢铁行业的 GHG 排放，但废钢炼钢法的广泛应用和低成本，使美国成为全球钢铁生产 CO₂ 强度最低的市场之一。

鼓励对现有生产设备进行渐进式改造，也可以在有限的资本投入下显著减少 GHG 排放（相比高碳排放的现有设备，可减少 10% 或更多）。以钢铁为例，生产商正在考虑是否有机会通过调整 BF-BOF 操作来大幅降低 CO₂ 排放。这些调整包括在 BF 中加入更多预还原材料（如热压块铁（HBI），一种易于运输的直接还原铁，即 DRI 形式）或废钢，或注入氢气等替代还原剂以降低焦炭使用量。此类策略可使长流程炼钢的排放减少约 20%。更深度的减排需要为综合钢厂配备碳捕集与封存（CCS）技术。尽管具体细节有所不同，其他行业也存在类似的机遇。

重工业的深度脱碳可能需要一套有针对性的组合式策略，以满足多样化的加热和工艺需求。电气化预计将成为钢铁和化工行业解决方案的重要组成部分，其实施效果取决于继续依

赖煤炭、天然气或氢能等脱碳电力生产的燃料替代品的经济性。虽然全球工业脱碳在短期内可能受益于天然气对煤炭的替代，但关键在于确保锅炉或熔炉等工艺设备能够以较小的资本投入，轻松地从天然气转向电力或氢气等替代能源。在这方面，分阶段引入技术（如在 DRI 工艺中逐步增加氢气掺混比例）提供了一条可行路径。同时，我们也要认识到，丰富、低成本的脱碳电力将创造更多可能性。

3. 气候政策与商业战略

在认识到上述三个部门在主要减排机遇和挑战上的差异后，本分析转而探讨：当前的公共政策和商业战略在推动脱碳方面效果如何？本部分将从国家/区域的角度，结合上述部门视角进行分析。在 2009 年丹麦哥本哈根气候变化大会（COP）之后的《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）进程中，各国提出其国家自主贡献（NDC），随后设计并实施相应政策以实现这些目标。这促进各国纷纷出台专门政策，旨在加强限制 CO₂ 排放的力度。然而，《巴黎协定》将全球平均气温较工业化前水平升幅控制在 2 摄氏度或 1.5 摄氏度以内的目标与各国的 NDC 之间，以及 NDC 既定目标与实际执行之间，仍然存在显著差距（UNEP 2023；Meckling 和 Karplus 2023）。先前的研究表明，碳定价体系是有效的，尤其是当它作为精心设计的政策组合的一部分，用于解决其他外部性问题时（Stechemesser 等人 2024）。其他与社会应对气候变化能力相互作用的外部因素还包括知识溢出、协调失灵和金融摩擦（Armitage 等人 2023；Acemoglu 等人 2012）。

本部分将考察三个主要国家/区域集团的气候政策雄心现状与发展趋势。这些国家/区域要么是气候政策的引领者，要么是经济与 GHG 排放快速增长的主要中心，包括中国、欧盟，以及印度和东南亚。同时，本部分也会兼及其他值得关注的地区。本部分将探讨当前的政策雄心与现有及预期的主要 GHG 排放源之间的关系。本部分将同时考察政府政策和商业战略在减缓气候变化方面所发挥的作用。各国的应对方法各不相同：中国和欧盟采用了直至本世纪中叶的目标、市场化工具和部门战略；而印度和东南亚则制定了以可负担性为基础的目标和计划。与此同时，向气候信息披露项目（CDP）报告的企业数量持续逐年增长，2024 年已达 4,000 家（PwC 2025）。许多全球供应链中 GHG 排放最密集的环节，恰好位于气候政策压力已存在或日益增大的地区。这一事实表明，在脱碳路径尚未实现商业化的部门，可能存在利用公共资金和支持来推动技术示范和规模化生产的机会。相比之下，对于那些设定了宏伟气候目标的公司而言，缺乏强有力气候政策的国家可能会变得不那么具有吸引力。

中国。为实现 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的目标，中国制定了详尽的路线图，并将其具体化为“1+N”政策体系。国家决策者预计，约有一半的目标减排量将通过排放交易体系实现。该体系于 2021 年在电力行业启动，近期已扩展至钢铁、水泥和铝行业（Zhang 等人 2025）。针对各行业制定的行动计划有助于克服协调方面的挑战，为可接受的减排技术

及其目标应用时间框架提供了明确指导。中国的《可再生能源法》为风能和太阳能发电的快速增长创造了关键条件。同时，电网扩张和电力市场改革对于减少弃风弃光、提高可变可再生能源在一次能源结构中的占比也起到了至关重要的作用。学者们认识到，中国现有制度安排与净零转型所需的激励机制存在差距（Li 等人 2025）。但正在进行的积极对话集中在改善未来的对齐上。1+N政策框架支持未来30年实现稳定、有管理的过渡的能力对全球减缓气候变化的努力至关重要。同时，中国开发或生产的清洁技术在国内和出口市场的持续应用，对于维持国家领导层对转型的支持也至关重要。鉴于中国领导层决策的长期性，其政策连续性几乎可以得到保证。然而，具体实施方式将取决于经济和地缘政治的现实情况。

企业的各项举措正在助力中国实现其气候目标。跨国公司的气候承诺通常涵盖上游供应商，这实际上给许多在中国运营的公司带来了压力。这些公司通过购买绿色电力证书或参与国家的绿色电力交易（GPT）系统来应对这一压力（路透社 2024a），同时也在推动供应扩张和价格透明化。目前，电子和重型设备制造等许多大型部门的供应商尚未被纳入排放交易体系。来自跨国公司以及近期中国本土品牌的压力，可能正在促使许多供应商采购脱碳电力，而这些供应商原本可能不会这么做。这种压力对于推动中国电力部门的进一步脱碳可能至关重要，有助于加速清洁和可再生能源的部署。在工业部门，中国两大钢铁生产商河钢集团和宝钢集团已建成工业规模的氢基 DRI 生产示范设施（Tenova 2023；河钢集团 2023），部分原因是为了响应汽车品牌的脱碳目标。这些在中国积累的建设运营经验将向全球扩散。

印度和东南亚。在未来 GHG 排放预测中，印度和东南亚的占比是最大的不确定因素之一。2024 年，印度的能源相关 CO₂ 排放量增长了 5%（IEA 2025c）。预计从现在到 2035 年，东南亚将贡献全球能源需求增长的 25%（IEA 2025d）。考虑到这些国家的气候政策雄心尚处于起步阶段且高度依赖成本因素，获得经济可负担的清洁能源技术对于加速转型很可能至关重要。该地区的国家已提交 NDC，主要包括基于排放强度的减排目标，以及提高清洁能源占比和降低化石燃料使用比例的目标。印度尼西亚和越南正在构建碳市场框架，但这些工作尚处于早期发展阶段，预计将覆盖电力和工业部门。两国的“公正能源转型伙伴关系”（JTEP）旨在为电力部门的脱碳提供低成本融资渠道（Dwitiyasih 等人 2025）。印度已承诺在 2070 年前实现 CO₂ 排放达峰。印度的 NDC 目标包括：到 2030 年，单位 GDP 排放强度较 2005 年下降 45%；电力部门累计装机容量中可再生能源占比达到 50%；通过植树造林实现 25-30 亿吨 CO₂ 当量的碳汇。印度还发布了一项长期低碳发展战略，着重关注更长远时期的实施措施（MoEFCC 2022）。对于发展中国家而言，风能、太阳能和 EV 电池的成本优势很可能成为推动脱碳的更强劲动力，尤其是在电力和交通部门。

跨国公司的气候雄心是推动印度、东南亚以及更广泛发展中国家供应商产生清洁能源需求的重要驱动力。企业购电协议（CPPA）在东南亚地区迅速普及，帮助企业履行其气候承诺（KPMG International 2022）。尽管新的 CPPA 受益于可再生能源成本的下降，但推动燃

煤电厂提前关闭的努力仍面临挑战。这是因为东南亚许多燃煤电厂相对较新，提前关闭将导致投资者蒙受损失（路透社 2024b）。中国 EV 产业的全球化可能会进一步加速 EV 在发展中国家普及。例如，比亚迪计划在印度海得拉巴建立制造基地，年产能达 20 吉瓦电池和 600,000 辆电动汽车（Business Standard 2025）。

欧盟。欧盟到 2050 年实现净零排放的承诺已写入《欧洲气候法》（欧盟委员会 2025b）。尽管因成本高于预期等原因出现了新的阻力，但该承诺依然坚定不移。欧盟还设定了到 2030 年将 GHG 排放量在 1990 年基础上减少 55% 的目标。欧盟排放交易体系（EU-ETS）覆盖了 40% 的 GHG 排放，涵盖电力、工业和航空业。2023 年宣布的 CBAM 将根据进口商品的隐含碳排放将 GHG 价格延伸至这些商品，该机制将于 2026 年正式生效。从 2027 年起，海运排放将被纳入 EU-ETS，同时将为交通和建筑部门建立独立的 ETS。第 4 阶段改革旨在实现更具雄心的年度排放上限削减目标，并在部分部门逐步取消免费排放配额。欧盟的《共同努力条例》为非 ETS 覆盖部门设定了具有约束力的减排目标，其中首要目标是到 2030 年将排放量较 2005 年水平减少 40%。欧盟以其全面且与净零目标一致的方法而在国际社会具有良好口碑，其 EU-ETS 已成为包括中国在内的许多国家效仿的典范。

或许部分得益于其坚定连贯的气候政策立场，许多欧盟国家已成为清洁能源技术和系统设计运营的创新中心。然而，越来越多的系统、技术和组件正在欧美境外生产。欧盟领导层已表达了对依赖进口的担忧，认为这可能威胁到欧盟在汽车设计和重工业等重要领域的技术领先地位。2024 年 10 月，欧盟在对进口汽车征收 10% 关税的基础上，又对中国生产的 EV 征收了反补贴税。许多总部位于欧盟的公司正在推动其全球供应链的能源脱碳，以实现净零目标，并减少 CBAM 在 2026 年全面实施后可能带来的不利影响。

4. 相互作用：贸易、产业政策、国家安全与宏观经济

尽管气候政策是激励脱碳的直接而具体的方式，但一系列更广泛的优先事项及相关政策也在影响着能源转型的进程和方向。在美国近期宣布新的关税政策后，贸易成为主要焦点，但这并非唯一的影响因素。本部分探讨了以下优先事项对转型的影响：贸易和产业政策、国家安全以及宏观经济政策，重点关注每个类别如何与全球加速深度脱碳的努力相互影响。在某些情况下，这些优先事项及相关政策对减缓气候变化的影响，可能比迄今为止的专项气候政策更为显著。然而，要实现深度脱碳，仍然需要更强有力的政策信号。但在当前气候政策受限的环境中，关注这些具有协同效应的优先事项可能变得尤为重要。

4.1 贸易与产业政策

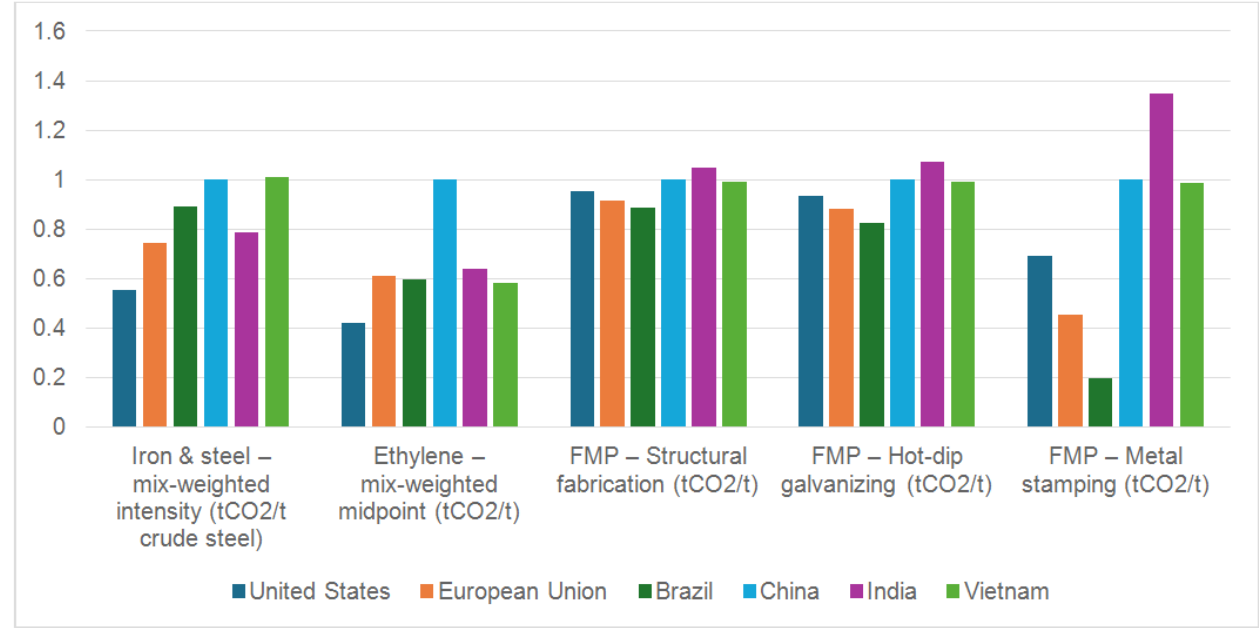
贸易和产业政策与气候雄心之间存在重要的相互作用。在各类产品中，贸易流向都倾向于 CO₂ 排放相对密集的生产方式。Shapiro（2021）的研究表明，在大部分的国家里，与

CO₂ 强度低的行业（通常多为下游服务提供商）相比，CO₂ 强度高的行业（通常是上游大宗商品和重型设备生产商）面临的进口关税和非关税壁垒要低得多。新的关税将与这种既有的倾向相互影响。

即使在同一产品类别内，不同国家之间的 CO₂ 或 GHG 排放强度差异也可能十分显著。一刀切的关税政策可能会间接奖励或惩罚 CO₂ 排放，这取决于国内产品和进口产品之间的 CO₂ 排放强度差异以及关税的幅度。图 4 展示了一组特定产品的排放强度比较。比较结果表明，对于某些产品，美国的关税政策将有利于 CO₂ 排放较低的国内生产，因为美国的生产 CO₂ 强度低于其他国家。这一差距在钢铁和乙烯等 CO₂ 强度相对较高的产品中尤为明显。然而，在金属制品加工类别中，特别是主要依赖电力的金属冲压领域，美国的 CO₂ 强度已不再保持最低水平。如果关税能促使部分生产回流美国，从而取代其他地区的生产，那么全球 CO₂ 排放量可能会呈下降趋势。但是，如果在美国增产的同时，CO₂ 密集型出口商品转而流向其他国家，那么减排效果可能会被抵消。

Figure 4 CO₂ intensity of different product categories subject to tariffs by country, using a cradle-to-gate accounting methodology, relative to levels in China.

图 4 各国受关税影响的不同产品类别的 CO₂ 强度(采用全生命周期核算方法，以中国水平为基准进行比较)。



注释：钢铁行业的碳排放强度是根据不同技术路线进行加权计算的，采用了世界钢铁协会 2024 年的基准数据（BF-BOF 2.32；DRI-EAF 1.43；废钢-EAF 0.70 吨 CO₂/吨），并结合了各国不同路线的份额（世界钢铁协会 2023、2024、2025）。化学品以乙烯为代表（工厂门口范围 1 和范围 2 排放）：工艺路线中点值约为 1.1（乙烷）、1.9（石脑油）、1.5（液化石油气）和 7.0（煤/甲醇制烯烃），再乘以假定的各国原料混合比例。

(Shin 等人 2025; 能源转型委员会 2022; 美国能源部 2022; 美国能源信息署 2023)。金属制成品的碳排放数据展示了代表性工艺的现场范围 1 和范围 2 排放 (AISC 2021; AGA 2022) 及 GREET 模型数据 (美国能源部 2024); 国家间的差异反映了电网的 CO₂ 排放强度。美国的电网排放因子数据来源于 EIA (2025)、Ember (2023、2024、2025) 和 Climate Transparency (2020、2021)。天然气的排放因子为每 GJ 56.1 kg CO₂ (IPCC 2006)。上游材料和原料的排放未包含在内。

与一刀切的关税相比, CBAM 是一种更具针对性的工具, 旨在限制碳泄漏并减轻碳定价对国内生产商造成的经济影响。由于许多相关的 GHG 排放转移超出了国家层面气候政策的管辖范围, 这导致了所谓的“碳漏洞”(Hasanbeigi 等人, 2018)。CBAM 旨在根据贸易商品的隐含 CO₂ 含量调整其价格。如果通用关税针对的是生产某一特定商品时 CO₂ 排放强度较高的国家, 那么它只间接针对二氧化碳排放, 但情况并非都是如此。

贸易通过加速技术的应用、经验积累和学习过程, 也降低了能源转型所需技术的成本。例如, 贸易使中国的太阳能光伏制造商能够受益于德国和美国的安装补贴政策。海外生产的低成本设备, 一直是推动美国可再生能源开发商和安装商增长并提高其竞争力的主要因素。贸易通过将生产引导至投入成本具有吸引力的市场, 同时将产品引向支付意愿最高的市场, 从而加速了转型进程。反事实分析显示, 如果因市场准入受限而导致学习速度减慢, 2008 年至 2020 年期间, 中国、德国和美国的太阳能光伏总成本将分别增加 360 亿美元、70 亿美元和 240 亿美元 (Helveston 等人 2022)。

在这种背景下, 我们需要考虑近期贸易政策的发展可能如何影响全球贸易中的隐含 CO₂ 排放, 以及对能源转型至关重要的技术传播。首先, 我们观察到两种新型贸易壁垒的实施。一种是适用于广泛产品类别的统一从价关税, 例如美国政府在 2025 年初宣布的关税政策。另一种是与产品隐含 CO₂ 排放量成正比的关税, 例如欧盟将于 2026 年生效的 CBAM, 亚洲部分地区也正在讨论类似措施。除了美国政府在 2024 年针对中国清洁技术 (如 EV) 征收的关税外, 统一的从价关税不一定能促进如前所述的气候行动。相比之下, CBAM 则更具直接针对性。如果关税或 CBAM 的价格信号能够持续鼓励提高工艺效率、采用清洁燃料组合以及节约能源, 那么它们可能会产生更持久的、有利于气候的效果。在未来几年, 对这一效果进行实证评估将至关重要。

美国政府推出的关税政策包含两个部分。10% 的基准关税普遍适用于所有进口商品, 但有几个例外: 已受 232 条款关税约束的产品 (钢铁、铝以及扩大范围后的汽车制造业)、铜、药品、半导体和集成电路、能源产品, 以及受《美国-墨西哥-加拿大协定》(USMCA) 保护的加拿大和墨西哥商品。此外, 自 2025 年 4 月 9 日起, 美国进一步采取了针对特定国家的对等关税, 相关税率在持续的谈判中不断更新。该公式基于美国与另一国之间的贸易逆差进行计算: 将贸易逆差除以从该国进口的商品总值, 然后实施相当于计算得出的贸易壁垒值一半或 10% 的关税, 取两者中的较高值。关税税率仍在持续谈判中; 2025 年 7 月下旬, 欧盟通过谈判成功将关税从 30% 降至 15%。除了这些广泛的基础关税外, 美国政府还扩大

了专门针对中国进口商品的 301 条款关税范围，涵盖了农业（11）、采矿业（21）和制造业（31 - 33）中 98 个 4 位数行业代码中的 94 个。从本质上讲，301 条款关税对从中国进口到美国的多类商品（例如钢铁）施加惩罚。这在减排效果上等同于对生产过程中的二氧化碳排放进行了惩罚。以钢铁为例，中国钢铁生产的 CO₂ 强度大约是美国的两倍（见图 4）。

与此同时，欧盟正在积极推进其 CBAM 的实施（欧盟委员会 2025c）。CBAM 初期将覆盖具有高迁移风险的排放密集型行业，包括钢铁、水泥、铝、化肥、电力和氢能。进口商需要报告产品的 CO₂ 排放强度，并按照当时欧盟 ETS 的 CO₂ 当量价格，购买与产品隐含排放量相等的 CBAM 证书。进口商在原产国已支付的 CO₂ 价格可从其在 CBAM 下的义务中扣除。在过渡阶段（2023 年 10 月至 2025 年），进口商仅需报告产品的隐含排放量。自 2026 年 1 月 1 日起，进口商将被要求使用 CBAM 证书来覆盖其产品的隐含排放。一些发展中国家担心 CBAM 会限制其产品的市场准入，而另一些国家则通过制定自己的 CO₂ 定价体系计划来予以应对（Clausing 等人 2024）。CBAM 的支持者强调，它能在抑制 GHG 密集型生产方面发挥重要作用。然而，批评者担心进口商会根据 GHG 排放强度对生产进行分流，将排放强度最低的产品转向欧盟，从而增加世界其他地区进口产品的 GHG 排放强度，最终抵消气候效益（Abnett 2025）。

广义上的产业政策指政府对国内经济活动的定向支持，尽管这涉及各种难以分类和衡量的干预措施（Juhász 等人 2022）。近年来，产业政策一词与气候变化议题紧密交织，因为前者旨在通过调整经济结构和资源配置来支持脱碳进程（Flegal 2023）。产业政策通常与国家安全密切相关，但总体而言，它更侧重于提升竞争力和确立领导地位，而非仅仅保护或维持特定能力。贸易政策的设计通常旨在与产业政策协同发挥作用，尽管在实际操作中实现两者的协调可能十分困难。

产业政策如今在全球范围内普遍存在，但各国采取的形式不尽相同。自 20 世纪 80 年代初以来，产业政策一直是中国经济建设战略的基石。经济结构的演变和技术变革的方向，在很大程度上由国家早期科技规划中确立的经济蓝图和优先研究领域所引导。这些规划已演变为国家主导的、旨在长期培育新兴产业的系统性努力。其政策工具涵盖了供给侧和需求侧两个方面：前者包括对研究、开发和示范的公共资助，后者包括退税、对现有企业的限制以及对出口商的定向支持等。在美国，产业政策与气候议程在为美国制造商设计清洁能源经济激励措施时相互交织，这在 2022 年《通胀削减法案》（在近期政策转变之前）中尤为突出。欧盟及其成员国的产业政策目标多样，但在能源转型过程中持续支持本国产业一直是其中的重点之一。

4.2 国家安全

尽管产业政策与国家安全是相关概念，但两者侧重点不同。产业政策主要关注经济竞争力和转型，而国家安全则主要聚焦于保护主权、维护经济稳定和捍卫战略利益。预计能源转型将对国家安全目标同时产生正面和负面的双重影响。减少对波动剧烈的化石燃料价格的敞

口、提高系统效率和电气化水平可以简化冲突时期的能源交付。此外，与集中式能源基础设施相比，分布式系统（如可再生电力和分布式储能）成为攻击目标的风险更低。同时，能源转型导致对矿产和电池材料的需求增加，而这些材料目前的供应链在地理上高度集中（Cheng 等人 2024a）。电气化将增加许多活动对电网的能源依赖度。随着复杂、数字化系统的普及，这可能会扩大潜在的攻击面（Zografopoulos 等人 2023）。为实现脱碳而增加核能利用，将引发人们对核扩散风险的担忧，因此需要谨慎的管理。欧盟的《关键原材料法案》和美国的《通胀削减法案》旨在最大限度降低国家安全潜在风险、支持在本土布局供应链（欧盟委员会 2025b；Cheng 等人 2024b）。

国家安全优先事项随全球地缘政治格局的变化而不断调整。美国与中国之间，以及在一定程度上欧盟与中国之间日益紧张的关系，凸显了人们对依赖中国主导供应链的担忧。疫情期间半导体短缺和 EV 电池材料价格飙升加剧了这些担忧。尽管目前这些供应中断的信号已经减弱，但影响仍在。然而，从能源独立的论点来看，转向发电来源灵活的电力型能源系统，表明风能、太阳能、EV 和热泵将发挥日益重要的作用。积极有效地管理实际和潜在的国家安全风险，能为加速能源转型进程提供强大动力。

表 1 2020–2025 年主要地区平均借贷成本概览。

国家/地区	2020 – 2021 年 (疫情期间低点)	2022 – 2023 年 (紧缩周期峰值)	2024 年 – 2025 年中 (宽松/平稳期)	当前政策利率 (2025 年中)
美国	0 – 0.25%	5.25 – 5.50%	放宽至 4.25 – 4.50%	4.50%
欧元区(欧洲 中央银行)	– 0.50% 至 0%	4.00 – 4.75%	下调至 2.00 – 2.15%	2.00 – 2.15%
英国	0.10%	5.25%	降至 4.25%	4.25%
加拿大	0.25%	4.25% (2022 年 末)	逐步降至 2.75%	2.75%
澳大利亚	0.10%	4.35% (2023 年 11 月)	下调至 4.10% (2025 年 2 月), 继续放宽政策	3.85 – 4.10%
日本	– 0.10% 至 0%	维持在 0%	2025 年初首次加息至 0.50%	0.50%
中国	维持在 3.10 – 3.50% 左右	保持在接近 3.10% 的水平	下调至 3.00% (2025 年 5 月)	3.00%
印度	回购利率维持在 4.00% – 4.40%	2023 年末上调至 6.50%	逐步下调: 6.25% (2025 年 2 月) 、6.00% (4 月) 、5.50% (6 月)	5.50%
巴西	2.00% 的极低水平 (2020 年 8 月)	急剧上升: 从 9.25% (2021 年) 攀升至 13.75% (2022 年末)	先达到 14.25 – 14.75% 的峰值, 随后到 2025 年 6 月进一步上升至 15%	15.00%

注释：基于各国和欧元区公布的利率：美联储：联邦基金目标利率；欧洲中央银行：主要再融资操作利率；英格兰银行：银行利率；日本银行：政策利率余额；加拿大银行：隔夜利率目标；澳大利亚储备银行：现金利率目标；中国人民银行：贷款市场报价利率（1 年期）；印度储备银行：回购利率；巴西中央银行：巴西基准利率。

4.3 宏观经济趋势

最后，全球范围内更高的利率以及某些类型清洁能源价格的上升，为能源转型带来了不利影响。相较于化石燃料替代方案，能源转型需要部署更加资本密集型的技术。如表 1 所示，过去五年间，货币政策从新冠疫情初期的低利率状态转向相对紧缩，以抑制通货膨胀。2025 年，随着通胀得到控制的迹象显现，利率进入平稳期并出现小幅下调。在这一趋势中，只有日本例外，在 2025 年中之前一直维持着极低的利率水平。

高利率和通胀减缓能源转型的迹象，早在近期关税调整和政策支持减少之前就已显现。利

率上升以及未能将通胀因素纳入定价，被认为是沃旭能源（Ørsted）在 2023 年取消“海洋 1 号”和“海洋 2 号”大型风电项目的主要原因（Ørsted 2023）。2023 年末，尽管面临高额违约金，伊维尔德罗拉（Iberdrola）的子公司 Avangrid 仍因应对高利率而终止了 PPA 并重组了海上风电投标（CleanTechnica 2023）。Sunnova 在申请破产的决定中，将高利率列为主要考虑因素之一（Dhumal 2025）。高利率，加上经济前景不明朗和对公共补贴的依赖，共同导致了多个欧洲氢能项目的取消（路透社 2025a）。脱碳能源（特别是电力）的高昂成本也是欧洲面临的一大挑战。安赛乐米塔尔（ArcelorMittal）在 2025 年 6 月宣布，将拒绝接受 13 亿美元补贴，该补贴原本用于在欧洲通过氢基 DRI 工艺生产钢铁。公司给出的理由包括电价高昂、进口竞争激烈以及对 CBAM 有效性的担忧（ArcelorMittal 2025；路透社 2025b）。

5. 未来发展方向

本文按经济部门阐述了加速脱碳的主要机遇，并对影响气候变化行动的各项政策和议程进行了评估。本文的最后一部分旨在将这些线索整合起来，为推进脱碳的潜在路径提供全面的视角。这些建议旨在同时解决部门需求与机遇（第 2 部分）、应对气候变化政策与商业战略的现状（第 3 部分），以及应对影响转型势头的更广泛制度和市场驱动因素（第 4 部分）。主要结论是，政府和企业的气候政策不仅可以而且必须继续使生产者和消费者的激励措施与全球目标保持一致。同时，拓宽视野、纳入辅助手段，可以发现许多支持或加速进展的途径。这些辅助手段与气候政策并非毫无关联，相反，它们可能会增加未来推进能源转型的可能性，提高目标雄心，并增强持久性。

三大机遇领域可以帮助全球清洁能源转型积蓄动力。首先是未来更加依赖电力的社会做好准备。这一趋势与解决经济优先事项的努力高度一致，包括应对人工智能（AI）领域预期的能源需求激增，以及新增工业和住宅用电负荷的电气化。其次是管理供应链风险，以确保清洁能源技术的应用规模能够持续扩大。第三个领域是推行部门战略，将技术进步与脱碳目标相结合，并与慈善机构和政府合作，为首创项目增加可豁免贷款和赠款资金，同时为后续分批部署提供低息贷款。

5.1 加大电网投资

电网正日益成为现代经济的命脉。预计在未来几十年，数据中心、人工智能和计算领域的电力需求将大幅增长。加强电网建设对于推动交通、建筑和工业等众多终端用途的电气化进程也至关重要。所需的变革包括：输配电系统的现代化和扩建、提高系统可靠性和抵御服务中断的韧性，以及增强系统灵活性以更好地接纳可变可再生能源和其他分布式能源。实现这些目标将需要为新建发电设施和系统运营的其他变革投入巨额资本。尽管各地发电构成和治理结构有所不同，但每个电力系统都面临着大致相似的挑战。提高电力和其他能源系统的效率，可以进一步补充在新建发电、输配电方面的投资。

以电网现代化为总体战略，需要制定并实施具体而有针对性的政策措施。首先，需要增加电网现代化的公共投资。尽管历史上组建此类联盟一直充满挑战，但多种因素的汇集为采取行动提供了更有力的理由，并吸引了新的利益相关方参与其中。这些因素包括：数据中心的能源需求增长、其他主要终端用途的电气化、老旧基础设施承受的压力、日益频繁的极端天气事件，以及日益复杂的网络攻击。总之，加强电网建设的必要性几乎没有争议，并且与经济效益直接挂钩。中国在电网扩建上的巨额投资已转化为显著的经济优势，为企业和公民带来了实际利益。为了重获竞争优势而进行投资，可能成为一些政府的强大动力。同时，其他国家将继续从中国生产的设备所带来的规模经济中受益。

协同加强电网建设，可以促使需求和目标各异的商界、行业协会、政府、多边开发银行和慈善机构形成强大的统一阵线。制定一个可适应不同背景和利益相关方需求的通用议程和行动手册来加速电气化，有望提高协调效率和决策有效性。电网天然受限于国家或地区边界，这有助于提升国家主权和决策权在塑造某些系统要素方面的作用，从而可能有助于化解对变革的反对声音。同时，这也为一些做出气候承诺的政府提供了灵活性，使其能够加速部署清洁和可再生能源，并同时获得安全和其他非气候相关的环境效益。通过公共投资或公私合作模式，对更强大、响应更快的基础设施进行投资，将使新增发电能力、整合分布式能源资源以及持续满足需求变得更加容易且成本更低。

5.2 推动本地化生产:改善关系并促进学习

如今，与成本相比，人们更普遍担心在全球清洁技术竞赛中落后以及面临供应链中断，这已成为不从本国境外（尤其是中国）采购清洁技术的主要理由。这些担忧在欧盟和美国的相关讨论中尤为突出。这些担忧引发了在安全因素与获取中国技术之间的权衡，而中国技术通常代表着最佳性价比。这些担忧的核心在于对技术依赖性和相互信任问题。如果买家最担心的情况真的发生，对海外供应商而言将是一场噩梦；长期来看，这将削弱其商业竞争力和经营资格。目前，提高贸易壁垒是应对依赖性担忧的直接措施；而另一种缓解这些担忧的策略是鼓励与领先开发商建立伙伴关系，这种伙伴关系涉及国内投资和利用本地劳动力进行制造。这方面的例子包括：晶科能源在佛罗里达州生产太阳能光伏和储能设备；福特与宁德时代合作在密歇根州生产 EV 电池；国轩高科在伊利诺伊州和加利福尼亚州生产 EV 电池；以及比亚迪在印度海得拉巴新建 EV 和电池制造厂。

鼓励或要求在本国境内进行实体生产，或与本国生产商建立伙伴关系、联盟或合资企业 (JV)，能够提高各方的利害关系，从而为缓解冲突、增进互利创造机会。这种做法也可以促进本地学习和知识转移，类似于中国早期要求进入市场的外国汽车公司必须成立合资企业的政策。当一些国家在是否允许从中国进口的 EV 进入本国市场的问题上犹豫不决时，他们可以借鉴这一早期经验，认识到学习并借鉴中国的成功经验可能是一条可行的发展路径。尽管开发商将生产设在中国境外可能会失去一些规模经济效益，但他们可以基于其他因素选择生产地点，如劳动力素质或靠近客户市场等优势。

即使在存在关税的情况下，这种策略依然有效，因为关税不适用于国内生产。在中国的许多目标出口市场中，总部位于中国的公司已经开始在当地生产。一些国家征收关税可能会进一步加速这一趋势。宁德时代与福特合作在密歇根州福特 BlueOval 电池园区开发的电池生产项目，预计将于 2026 年投产 (Shepardson 2025)。宁德时代正在向福特授权其电池生产技术。截至目前，该项目仍被认为有资格获得税收抵免，相关资金也未被撤回或取消 (Shepardson 2025)。如果这些投资及其审查机构能够建立适当且不过于繁琐的报告与保障措施，同时认识到其潜在益处——不仅能在短期降低生产成本，更能在长期加速学习进程——那么宝贵的经验和信任将得以积累。这可能会减少安全顾虑在未来气候决策中成为阻碍因素的可能性。

5.3 扩大低成本项目融资渠道

降低符合长期脱碳目标的项目的融资门槛，有助于缓解全球多个地区高利率带来的影响。提供低息融资的计划，尤其是针对首创性项目的融资，有助于吸引投资者。在这方面，多边开发银行、美国温室气体减排基金等项目、国家开发银行、气候基金以及出口信贷机构，将在保持低风险资本来源方面发挥核心作用。表 2 列出了各类融资方式的相关资本成本。

表 2 可能有助于降低资本成本的潜在融资来源。

融资来源	典型成本	作用
多边开发银行贷款(如世界银行)	1 - 3%	提供优惠资本，降低风险
国家开发银行	2 - 5%	提供长期、低利率贷款
气候基金	赠款/低利率	降低风险，提供混合融资
绿色债券	3 - 5%（浮动）	为大型项目提供融资，开辟投资者渠道
出口信贷机构	2 - 4%	设备融资

来源：气候债券倡议组织（2023）；FinDevLab（2023）；世界银行（2024b）

要持续获得并扩大这些低成本融资方案，有几个关键因素需要考虑。必须谨慎管理个别成员国或反对应对气候变化的利益相关方的过度影响，以防止国内气候政策的变化削弱全球行动势头。此外，需要逐步增加融资项目的数量和种类，特别是在高利率环境持续的情况下，以吸引更多项目参与。最后，各行业可以成为协调不同脱碳努力的强大力量，它们可以设定预期目标，制定衡量和基准评估框架，并向各国政府和全球组织传达各种可能的方案。

我们可以通过多种方式来限制和管理反对者的影响。在发电领域，将投资与气候行动相结合可能更为直接，因为可再生能源目前是最具成本效益的发电选择之一。对清洁稳定电源或储能设施的需求（用以补充可变可再生能源）可以通过抽水蓄能、天然气或核能等具有成本效益的方式来满足。这些方式在短期内要么支持净零路径，要么至少不会严重偏离这一路径。对电网基础设施的投资或许更容易获得广泛的支持。强调循序渐进而非追求完美，尤其是在政治障碍较小的领域，可以减少阻力。这种做法反而可能在长期推动脱碳取得更大进展。在工业部门，扩大 EAF 产能并推广电力作为炼钢能源，将为多种替代铁源（包括使用天然气的路线）的制造商提高市场稳定性。就 DRI 而言，使用天然气和氢气生产 DRI 所需的新资本设备成本基本相同。许多钢铁制造商提议将天然气作为实现净零排放的过渡步骤。确保融资机会涵盖多种契合净零目标的发展路径至关重要。

6. 为更有力的气候行动奠定基础

本文概述的三项战略仅是分析中阐释的几个例子，它们不仅满足近期需求，还在推动长期转型中发挥重要作用。过去二十年，国家和企业层面对气候行动的支持程度时而增强、时而减弱。尽管近期美国和某些行业（如钢铁业）对能源转型的支持出现波动并引起关注，但这是政策问题的典型特征：解决这类问题需要集体行动，但解决方案往往意味着成本投入即时且集中，而收益却分散且滞后。专注于一个能够抓住有利时机、平稳度过低潮的支持性议程，可以为决策和日常运作提供亟需的连贯性。同时，这一议程有助于缓解快速发展时期可能出现的瓶颈，如可再生能源的高昂并网成本、运营灵活性的限制、审批难题和供应链冲击。它还能增加在经历挫折后重拾雄心的可能性。

在部门层面推行这些战略可能带来尤为可观的回报，同时需要认识到各部门具备不同的技术需求和制度架构。跨国治理在推动工业脱碳方面的作用目前仍不充分，缺少一致的部门战略和协调机制（Oberthür 等人 2021）。生产者联盟掌握有关实施特定技术或设计面向深度脱碳技术所需成本和投入的专业知识。许多生产商已经制定了实现净零排放的路线图，但要实施这些路线图，需要降低所涉及许多技术的风险。各行业可以通过统一目标获益，提交具有巨大预期溢出效应的首创示范项目提案，并向政府传达其计划和需求。与此同时，在宏观经济、产业与贸易以及国家安全等决策机构内部建立支持性议程，可以与部门性方法相辅相成，并放大其效果。

本文提出，推进脱碳进程应重点培育那些既能减碳又能促进经济发展的协同措施。由于各国公共和私营部门的优先事项不同，战略组合可能会因国而异。例如，在中国投资 EV 的案例中，改善空气质量、加强能源安全和促进产业升级等优先事项高度契合。同样，改善电网运营不仅可以更好地利用 AI 及其对经济的潜在贡献，还能促进可变可再生能源的并网。对许多发展中国家来说，改善能源可及性和可负担性与部署清洁能源的目标相一致，但同样

需要电网投资的支持。在脱碳面临新挑战时，这种目标一致性可能尤为重要。本文概述的战略，在适当和全面的政策支持下，有助于确保脱碳的推动因素被持久地整合到国家和全球经济规划、公共政策和商业战略中，而不仅仅局限于“气候”这一单一标签。

REFERENCES

- Abnett, K. 2025. “EU Drafting Plans to Prevent Circumvention of Carbon-Border Tariff.” Reuters, September 3, 2025. <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/eu-drafting-plans-prevent-circumvention-carbon-border-tariff-2025-09-03/>
- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, and D. Hemous. 2012. “The Environment and Directed Technical Change.” *American Economic Review* 102(1): 131–166. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131>
- AGA (American Galvanizers Association). 2022. Environmental Product Declaration: Hot-Dip Galvanized Steel after Fabrication. Centennial, CO: AGA.
- AISC (American Institute of Steel Construction). 2021. Environmental Product Declaration: Fabricated Hot-Rolled Structural Sections. Chicago: AISC/UL Environment.
- ANRE (Agency for Natural Resources and Energy). 2024. *Energy White Paper* and electricity generation statistics. Tokyo: Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). <https://www.enecho.meti.go.jp/>
- AP (Associated Press). 2025. “China’s Fast-Growing EV Makers Pursuing Varied Routes to Global Expansion.” AP News, April 23, 2025. <https://www.apnews.com/article/china-ev-tariffs-geely-byd-51b3c0040bbe25c9d5636d70a4011e2e>
- Armitage, S., N. Bakhtian, and A. B. Jaffe. 2023. “Innovation Market Failures and the Design of New Climate Policy Instruments.” NBER Working Paper No. 31622. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w31622>
- Atkinson, R. D. 2024. How Innovative Is China in the Chemicals Industry? Information Technology and Innovation Foundation. <https://www2.itif.org/2024-chinese-chemicals-innovation.pdf>
- Becerra, L., and S. Galarza. 2022. “Costo total de propiedad: Buses eléctricos en el nuevo modelo de negocios del transporte público de Santiago de Chile.” ZEBRA (Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator) Report. International Council on Clean Transportation (ICCT) and C40 Cities. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/07/lat-am-hvs-evs-zebra-costo-total-propiedad-buses-electricos-santiago-jul22.pdf>
- Department for Energy Security and Net Zero (BEIS). 2024. *Energy Trends*. Full-year 2023. London: Government of the United Kingdom. <https://www.gov.uk/government/collections/energy-trends>

- BNEF (BloombergNEF). 2025. “China Dominates Clean Technology Manufacturing Investment as Tariffs Begin to Reshape Trade Flows.” BloombergNEF Insights. <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/china-dominates-clean-technology-manufacturing-investment-as-tariffs-begin-to-reshape-trade-flows-bloombergnef>
- Buhmann, K. M., and J. R. Criado. 2023. “Consumers’ Preferences for Electric Vehicles: The Role of Status and Reputation.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 114: 103530. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103530>
- Business Standard. 2025. “BYD to Set up First India EV Factory Near Hyderabad, Eyes 600K Cars Yearly.” *Business Standard*, March 27, 2025. https://www.business-standard.com/industry/auto/byd-electric-car-factory-hyderabad-telangana-ev-manufacturing-india-125032701329_1.html
- CEA (Central Electricity Authority). 2023. *Monthly Generation Reports*. Fiscal year 2023 and calendar year 2023 provisional. Delhi: Government of India. <https://cea.nic.in/>
- CEEW (Council on Energy, Environment and Water). 2022. Implications of a Net-Zero Target for India’s Sectoral Energy Transitions. <https://www.ceew.in/publications/net-zero-sectoral-pathways>
- Chauhan, S., M. Hans, M. Rittstieg, and S. Zafar. 2023. “Why the Economics of Electrification Make This Decarbonization Transition Different.” McKinsey & Company, January 30, 2023. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/why-the-economics-of-electrification-make-this-decarbonization-transition-different>
- Cheng, A. L., E. R. H. Fuchs, V. J. Karplus, and J. J. Michalek. 2024a. “Electric vehicle battery chemistry affects supply chain disruption vulnerabilities.” *Nature Communications* 15(1): 2143. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46418-1>
- Cheng, A. L., E. R. H. Fuchs, and J. J. Michalek. 2024b. “US industrial policy may reduce electric vehicle battery supply chain vulnerabilities and influence technology choice.” *Nature Energy* 9(12): 1561–1570. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01649-w>
- Clausing, K., M. Elkerbout, K. Nehrkorn, and C. Wolfram. 2024. *How Carbon Border Adjustments Might Drive Global Climate Policy Momentum*. Washington, D.C.: Resources for the Future. <https://www.rff.org/publications/reports/how-carbon-border-adjustments-might-drive-global-climate-policy-momentum/>
- CleanTechnica. 2023. “Another New England Offshore Wind PPA Cancelled.” <https://cleantechnica.com/2023/10/04/another-new-england-offshore-wind-ppa-cancelled/>
- Climate Bonds Initiative. 2023. Green Bond Pricing in the Primary Market: H2 2022. London: Climate Bonds Initiative. <https://www.climatebonds.net/files/documents/publications/Green-Bond-Pricing-in-the-Primary-Market-H2-2022.pdf>
- Climate Transparency. 2020. Climate Transparency Report 2020: Vietnam Country Profile. Berlin: Climate Transparency. <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2021/11/Vietnam-CP2020.pdf>

- Climate Transparency. 2021. Climate Transparency Report 2021: India Country Profile. Berlin: Climate Transparency. <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2021/10/CT2021India.pdf>
- Dardour, S., D. Ayres, and L. Zamora. 2025. Renewable Power Generation Costs in 2024–2025. International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_2025.pdf
- Dhumal, T. 2025. “Sunnova Energy Files Chapter 11 Bankruptcy Protection.” Reuters Business/Energy, June 9, 2025. <https://www.reuters.com/business/energy/sunnova-energy-files-chapter-11-bankruptcy-protection-2025-06-09/>
- Duldinger, L. (CFA, RVA). 2023. “Pay-as-Produced PPA vs. Baseload PPA: What’s the Difference.” Renewables Valuation Institute. <https://courses.renewablesvaluationinstitute.com/pages/academy/pay-as-produced-and-baseload-ppa-whats-the-difference>
- Dwitiyasih, T., A. Putri, and H. Nguyen. 2025. *Financing Industrial Decarbonization in Indonesia and Vietnam: Technical Perspectives*. Washington, D.C.: World Resources Institute. <https://www.wri.org/technical-perspectives/industrial-decarbonization-finance-indonesia-vietnam>
- Ellis, M. 2023. “Biden Administration Releases U.S. National Blueprint for Transportation Decarbonization.” *Railway Age*. <https://www.railwayage.com/regulatory/biden-administration-releases-u-s-national-blueprint-for-transportation-decarbonization/>
- Ember. 2023. European Electricity Review 2023 — EU Electricity Trends. London: Ember. <https://ember-energy.org/latest-insights/european-electricity-review-2023/>
- Ember. 2024. Global Electricity Review 2024 — Major Countries and Regions: China. London: Ember. <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2024/>
- Ember. 2025. “Brazil — Country Profile.” London: Ember. <https://ember-energy.org/countries-and-regions/brazil/>
- Energy Institute. 2024. *Statistical Review of World Energy 2024*. London: Energy Institute. <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Energy Transitions Commission. 2022. Transforming China’s Chemicals Industry: Pathways and Outlook under the Carbon Neutrality Goal. London: ETC. https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2022/05/transforming_china_chemicals_industry_report.pdf
- Eurostat. 2025. Electricity Price Statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics
- European Commission. 2025a. Critical Raw Materials Act. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en
- European Commission. 2025b. European Climate Law. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en

- European Commission. 2025c. Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en
- FinDevLab. “Supercharging Multilateral Development Banks.” FinDevLab, 2023. <https://findevlab.org/supercharging-multilateral-development-banks/>
- Flegel, J. 2023. Industrial Policy Synergies: Industrial Policy + Climate Policy. New York: Roosevelt Institute. <https://rooseveltinstitute.org/publications/industrial-policy-synergies-industrial-policy-climate-policy/>
- ISE (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems). *Energy Charts*. 2023 generation by source. Freiburg: Fraunhofer ISE, 2024. <https://energy-charts.info/>
- Goh, B., and N. Carey. 2025. “BYD Aims to Sell Half Its Cars Outside China by 2030, Sources Say.” Reuters, May 8, 2025. <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/byd-aims-sell-half-its-cars-outside-china-by-2030-sources-say-2025-05-08/>
- Groom, N. 2025. “Boom Fades for US Clean Energy as Trump Guts Subsidies.” Reuters, July 24, 2025. <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/boom-fades-us-clean-energy-trump-guts-subsidies-2025-07-24/>
- Hasanbeigi, A., D. Moran, and C. Springer. 2018. *The Carbon Loophole in Climate Policy: Quantifying the Embodied Carbon in Traded Products*. Global Efficiency Intelligence. <https://www.climateworks.org/wp-content/uploads/2018/09/Carbon-Loophole-in-Climate-Policy-Final.pdf>
- HBIS Group. 2023. “World’s First 1.2 Million Ton Hydrogen Steel Making Pilot Plant Successfully Delivered its First Green DRI Products from HBIS.” *HBIS News*, June 5, 2023. <https://www.hbisco.com/en/news/group/t101/2075>
- He, J., Z. Li, X. Zhang, H. Wang, W. Dong, E. Du, S. Chang, X. Ou, S. Gu, Z. Tian, A. Gu, F. Teng, B. Hu, X. Yang, S. Yao, Z. Yuan, L. Zhou, X. Zhao, Y. Li, D. Zhang, and X. Zhang. 2022. “Towards Carbon Neutrality: A Study on China’s Long-Term Low-Carbon Transition Pathways and Strategies.” *Environmental Science and Ecotechnology* 9: 100134. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2021.100134>
- Helveston, J. P., G. He, and M. R. Davidson. 2022. “Quantifying the Cost Savings of Global Solar Photovoltaic Supply Chains.” *Nature* 612(7938): 83–87. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05316-6>
- Hirata, E., K. X. Li, and D. Watanabe. 2024. “Exploring Decarbonization Priorities for Sustainable Shipping: A Natural Language Processing-Based Experiment.” *Sustainable Futures* 8: 100358. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100358>
- Hirth, L., F. Ueckerdt, and O. Edenhofer. 2015. “Integration Costs Revisited: An Economic Framework for Wind and Solar Integration.” *Renewable Energy* 74 (February): 925–939. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148114005357>

- IEA (International Energy Agency). 2020. *Electricity Market Report — December 2020*. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-december-2020>
- IEA (International Energy Agency). 2021. *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- IEA (International Energy Agency). 2023. *Electricity Information 2023*. Paris: OECD/IEA, 2023. <https://www.iea.org/data-and-statistics>
- IEA (International Energy Agency). 2025a. *Energy and AI*. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- IEA (International Energy Agency). 2025b. *Global EV Outlook 2025: Trends in Electric Car Markets*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/trends-in-electric-car-markets-2>
- IEA (International Energy Agency). 2025c. *Global Energy Review 2025: CO₂ Emissions*. Paris: IEA. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828-aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf>
- IEA (International Energy Agency). 2025d. “Southeast Asia’s role in the global energy system is set to grow strongly over next decade.” <https://www.iea.org/news/southeast-asias-role-in-the-global-energy-system-is-set-to-grow-strongly-over-next-decade>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 2: Energy, Ch. 2 (Stationary Combustion). Hayama, Japan: IGES.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. “Chapter 11: Industry.” In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-11/>
- Juhász, R., N. Lane, E. Oehlsen, and V. C. Pérez. 2022. “The Who, What, When, and How of Industrial Policy: A Text-Based Approach.” SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4198209>
- KPMG International. 2022. *Decarbonization through Renewable Energy: Understanding Asia Pacific’s Corporate Power Purchase Agreement Landscape*. <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/xx/pdf/2022/10/decarbonization-through-renewable-energy.pdf>
- Larson, E., C. Greig, J. Jenkins, E. Mayfield, A. Pascale, C. Zhang, A. Drossman, *et al.* 2020. *Net-Zero America: Potential Pathways, Infrastructure, and Impacts*. Princeton: Princeton University. <https://netzeroamerica.princeton.edu>
- Li, M., D. Zhang, C.-T. Li, K. M. Mulvaney, N. E. Selin, and V. J. Karplus. 2018. “Air Quality Co-benefits of Carbon Pricing in China.” *Nature Climate Change* 8(5): 398-403. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0139-4>

- Li, X., S. He, Y. Gu, Y. Sun, L. Feng, and J. Qiu. 2025. “Unpacking China’s Climate Policy Mixes Shows a Disconnect Between Policy Density and Intensity in the Post-Paris Era.” *npj Climate Action* 4(30). <https://doi.org/10.1038/s44168-025-00233-6>
- Meckling, J., and V. J. Karplus. 2023. “Political Strategies for Climate and Environmental Solutions.” *Nature Sustainability* 6: 742–751. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01109-5>
- Millot, V., and Ł. Rawdanowicz. 2024. “The Return of Industrial Policies: Policy Considerations in the Current Context.” OECD Economic Policy Papers No. 34. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/051ce36d-en>
- MoEFCC (Ministry of Environment, Forest, and Climate Change, Government of India. 2022. *India’s Long-Term Low Emission Development Strategy (LT-LEDS)*. New Delhi: MoEFCC. <https://moef.gov.in/uploads/2022/11/Indias-LT-LEDS.pdf>
- NRCan (National Resources Canada). 2023. *Energy Fact Book 2023–2024*. Ottawa: Government of Canada. <https://natural-resources.canada.ca/>
- NCSL (National Conference of State Legislatures). 2023. “Navigating the Energy Transition: A Review of State Policies.” <https://www.ncsl.org/energy/energy-transition-report>
- Oberthür, S., G. Khandekar, and T. Wyns. 2021. “Global Governance for the Decarbonization of Energy-Intensive Industries.” *Earth System Governance* 8: 100072. <https://doi.org/10.1016/j.esg.2020.100072>
- ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). 2024. *Geração de Energia Elétrica no Brasil*. 2023 statistics. Brasília: ONS. <https://www.ons.org.br/>
- Ørsted. 2023. “Ørsted Ceases Development of Its US Offshore Wind.” <https://orsted.com/en/company-announcement-list/2023/10/orsted-ceases-development-of-its-us-offshore-wind-73751>
- PricewaterhouseCoopers (PwC). 2025. *State of Decarbonization 2025*. <https://www.pwc.com/us/en/services/esg/library/decarbonization-strategic-plan.html>
- RTE (Réseau de Transport d’Électricité). 2024. *Bilan Électrique 2023*. Paris: RTE. <https://www.rte-france.com/>
- Reuters. 2024a. “China Issues Guidelines on Green Power Trading.” Reuters, August 23, 2024. <https://www.reuters.com/business/energy/china-issues-guidelines-green-power-trading-2024-08-23/>
- Reuters. 2024b. “Global Plan for Early Ditch of Coal Power Hits Indonesia Hurdle.” Reuters, September 25, 2024. <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/global-plan-early-ditch-coal-power-hits-indonesia-hurdle-2024-09-25/>
- Reuters. 2025a. “Cancelled or Postponed Green Hydrogen Projects Highlight Investment Risks.” Reuters. <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/cancelled-postponed-green-hydrogen-projects-2025-07-23/>

- Reuters. 2025b. “ArcelorMittal Drops Plans for Green Steel in Germany Due to High Energy Costs.” Reuters, June 19, 2025. <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/arcelormittal-drops-plans-green-steel-germany-due-high-energy-costs-2025-06-19/>
- Ritchie, H., and M. Roser. 2020. “4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors.” *World Resources Institute*. <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>
- Roelfsema, M., H. van Soest, D. den Elzen, D. van Vuuren, A. Hof, *et al.* 2020. “Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement.” *Nature Climate Change* 10: 1004–1009. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15414-6>
- RTE (Réseau de Transport d’Électricité). 2024. *Bilan Électrique 2023*. Paris: RTE. <https://www.rte-france.com/>
- Sabin Center (Sabin Center for Climate Change Law). 2025. Climate Backtracker. New York: Sabin Center for Climate Change Law. <https://climate.law.columbia.edu/content/climate-backtracker>
- S&P Global Commodity Insights. 2025. “Playing Catch-Up with China: The West Faces Uphill Battle in Growing Cleantech Supply Chains.” S&P Global Commodity Insights Blog. <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/blog/energy-transition/040325-playing-catchup-with-china-the-west-faces-uphill-battle-in-growing-cleantech-supply-chains>
- Shapiro, J. S. 2021. “The Environmental Bias of Trade Policy.” *Quarterly Journal of Economics* 136(2): 831–886. <https://doi.org/10.1093/qje/qjaa042>
- Shepardson, D. 2025. “Ford says Michigan EV battery plant ‘on track’ for production tax credits.” Reuters. <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/ford-says-michigan-ev-battery-plant-on-track-production-tax-credits-2025-07-08/>
- Shin, W., B. Lin, H. Lai, G. Ibrahim, and G. Zang. 2025. “Decarbonization Approaches for Ethylene Production: Comparative Techno-Economic and Life-Cycle Analysis.” *Green Chemistry* 27: 3655–3675. <https://doi.org/10.1039/D4GC04538F>
- Slaria, S., M. Robertson, and K. Palmer. 2023. *Expanding the Possibilities: When and Where Can Grid-Enhancing Technologies, Distributed Energy Resources, and Microgrids Support the Grid of the Future?* Report 23-13. Washington, D.C.: Resources for the Future. <https://www.rff.org/publications/reports/expanding-the-possibilities-when-and-where-can-grid-enhancing-technologies-distributed-energy-resources-and-microgrids-support-the-grid-of-the-future/>
- Statistics Canada. 2024. “Electric Power Generation, Monthly Generation by Source, Table 25-10-0017-01.” Ottawa: Government of Canada. <https://www150.statcan.gc.ca/>
- Stechemesser, A., N. Koch, E. Mark, E. Dilger, P. Klösel, L. Menicacci, D. Nachtigall, F. Pretis, N. Ritter, M. Schwarz, H. Vossen, and A. Wenzel. 2024. “Climate Policies That Achieved Major Emission Reductions: Global Evidence from Two Decades.” *Science* 385(6711): 884–892. <https://doi.org/10.1126/science.adl6547>

- Stock, J. H. 2021. “Driving Deep Decarbonization.” *Finance and Development* 58(3). International Monetary Fund. <https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2021/09/how-to-drive-deep-decarbonization-stock>
- Tendata. 2024a. “Top Automotive Parts Exports by Country in 2023.” Tendata Market Insights, September 27, 2024. <https://www.tendata.com/blogs/insight/6129.html>
- Tendata. 2024b. “Global Paper Export by Country.” Tendata Trade Data, August 26, 2024. <https://www.tendata.com/blogs/tradedata/6033.html>
- Tenova. 2024. “First-ever DRI Production for Baowu in China.” *Tenova*. January 9, 2024. <https://www.tenova.com/newsroom/latest-tenova/first-ever-dri-production-baowu-china>
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2024. *Emissions Gap Report 2024: No More Hot Air ... Please!* Nairobi: UNEP. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024>
- U.S. Bureau of Labor Statistics. 2025. Average Price: Electricity per Kilowatt-Hour in U.S. City Average [APU000072610], retrieved from FRED, Federal Reserve Bank of St. Louis; <https://fred.stlouisfed.org/series/APU000072610>
- U.S. DOE (Department of Energy). 2024. “GREET: Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Technologies (Life-Cycle Assessment Model).” Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://www.energy.gov/eere/greet>
- U.S. EIA (Energy Information Administration). 2024. *Electric Power Monthly*. Full-year 2023 net generation by source. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy. <https://www.eia.gov/electricity/monthly/>
- U.S. EIA (Energy Information Administration). 2025. “How much carbon dioxide is produced per kilowatt hour of U.S. electricity generation?” Frequently Asked Questions. Washington, D.C.: EIA. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>
- U.K. Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ). 2024. *Energy Trends*. Full-year 2023. London: Government of the United Kingdom. <https://www.gov.uk/government/collections/energy-trends>
- Watson, M. J., P. G. Machado, A. V. da Silva, Y. Saltar, C. O. Ribeiro, C. A. O. Nascimento, and A. W. Dowling. 2024. “Sustainable Aviation Fuel Technologies, Costs, Emissions, Policies, and Markets: A Critical Review.” *Journal of Cleaner Production* 449: 141472. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262400920X>
- World Bank. 2024a. *Wholesale Electricity Market Design*. Washington, D.C.: World Bank. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099040423113526753/p1745180a970000950a115044ef25ffe368>
- World Bank. 2024b. IDA Financial Products — Lending Rates and Fees. Washington, D.C.: World Bank Treasury. <https://documents.worldbank.org/en/about/unit/treasury/ida-financial-products/lending-rates-and-fees>

worldsteel (World Steel Association). 2023. World Steel in Figures 2023 (Table: “Crude steel production by process, 2022”). Brussels: World Steel Association.

worldsteel (World Steel Association). 2024. Sustainability Indicators 2024. Brussels: World Steel Association.

worldsteel (World Steel Association). 2025. World Steel in Figures 2025. Brussels: World Steel Association.

Zhang, X., R. Yu, and V. J. Karplus. 2025. “The Development of China’s National Carbon Market: An Overview.” *Energy and Climate Management* 1(2): 9400015. <https://doi.org/10.26599/ECM.2025.9400015>

Ziegler, M. S., and J. E. Trancik. 2021. “Re-examining Rates of Lithium-Ion Battery Technology Improvement and Cost Decline.” *Energy and Environmental Science* 14: 1635–1651. <https://doi.org/10.1039/D0EE02681F>

Zografopoulos, I., N. D. Hatziaargyriou, and C. Konstantinou. 2022. “Distributed Energy Resources Cybersecurity Outlook: Vulnerabilities, Attacks, Impacts, and Mitigations.” *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2205.11171>

Harvard Project on Climate Agreements

79 John F. Kennedy Street
Cambridge, Massachusetts 02138, USA

+1 617 496 8054
www.hks.harvard.edu/hpca

