

气候科技焦点

创新赋能绿色供应链



目录



使用条款与免责声明	01
序言	03
报告摘要	06
I 背景	07
从意识到行动：绿色供应链的驱动因素	11
从精益到绿色：气候科技解决的挑战	21
II 气候科技市场格局	33
评估气候科技的成熟度	35
气候科技广泛应用的动力和阻力	37
从实验室到工厂，加速市场化进程	39
III 重点领域深度解析	41
大数据与人工智能	43
传统能源系统的脱碳化	49
绿氢与基础化学品	52
航运、物流与航空领域的清洁能源应用	56
IV 推动进程：基础设施、金融与教育	59
政策与基础设施	61
金融与投资	67
教育与人才培养	71
V 结论：未来应当何去何从？	77
编撰机构	81
致谢	82
参考文献	85

使用条款与免责声明

本报告由上海气候周及其合作伙伴机构共同出版。未经上海气候周书面准许不得复制或发布本报告全部或部分内容，无论是电子的、机械的、复印的、录音的或其他方式。上海气候周对第三方的上述行为不承担任何责任。

本报告中的信息和观点均来自上海气候周及其合作伙伴机构。本报告并非投资建议，不应依赖报告中的建议内容进行投资，也不应将本报告内容替代专业会计、税务、法律或金融顾问意见。上海气候周及其合作伙伴机构已尽最大努力确保报告内容采用了真实、全面和最新的信息和研究结果，但是对所提供的信息的准确性不承担任何明示的或者隐含的责任。

上海气候周及其合作伙伴机构亦不承担更新报告信息或结论的任何责任，并对于因本报告内容、引用此处信息的任何报告或资料来源采取或放弃的任何行为而产生的损失或者对任何后果性的、特殊的、相似的损害（即使得知该损害发生的可能性）不承担任何责任。

本报告不构成买卖有价证券要约，亦不构成买卖有价证券要约邀请。未经上海气候周书面同意或授权不得出售本报告。

“

上海气候周致力于通过创新与合作推动气候行动与可持续发展。秉承“中国行动、亚洲声音、全球标准”理念，我们着力将应对全球气候挑战的实践方案提升为绿色发展国际标准。年度旗舰报告《气候科技焦点》与联合国训练研究所及太平洋经济合作理事会联合编制，深化倡导技术创新与可持续实践融合的综合气候解决方案。今年，我们的报告聚焦构建绿色、高效、环境友好的供应链，为您提供前瞻性战略观点。

上海气候周执行委员会及研究院

作为上海气候周青年委员会，我们以前沿技术见解、全球关系网络与创新前瞻能力参与本年《气候科技焦点》报告编制。我们愿以我们的贡献来彰显青年在推动可持续供应链与气候解决方案中的关键作用，呼吁全球青年以创新思维激发集体行动，共同塑造可持续未来。

上海气候周青年委员会



序言一



九年前，《2030 年可持续发展议程》及其 17 项可持续发展目标（Sustainable Development Goals, SDGs）为全球确立了满足人类发展需求与保护地球平衡、实现和谐共生的路线图。世界各个国家和地区在构建公平繁荣未来的愿景下凝聚共识，形成了前所未有的合作态势。

然而，当我们步入 2030 议程中期，现实给我们敲响了警钟：我们与目标仍存在显著的差距。政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）发出紧急预警：全球气温已较工业化前上升 1.1°C，正以惊人速度逼近 1.5°C 的生存红线，并可能在 2035 年前突破这一临界点，将人类命运推向“全球沸腾”的险境。尽管绿色技术取得了不少突破，但国际社会仍困于行动迟缓、推诿塞责、欠缺合作的困境。在这个决定性时刻，我们相比以往任何时期都更加需要政府、金融机构、创新力量与学术界全方位团结起来，共同应对人类最大的挑战。

本年报告深度聚焦供应链绿色转型，这是一个把宏观气候战略与微观的工作与生活连接起来的关键议题，交汇了市场机制、技术创新、产业利益的动态平衡。秉承联合国授予的使命，我们着力探索气候科技如何创造新的领导力机遇，产生更多的优质就业机会。作为联合国下属的研究与培训机构，联合国训练研究所特别关注新技术的应用如何影响制造业与能源系统，关注我们的社会架构和学习生态系统能否

保障教育公平，使全球人才储备与绿色变革浪潮同步进化。

本报告深度解析了气候科技在重塑全球供应链中的变革性角色，通过行业案例研究与全球决策者对话，既呈现气候危机的紧迫性，又勾勒出可落地实施的解决方案，推动和启发全民参与果断的气候行动。唯有如此，方能就共同应对挑战的紧迫性达成更广泛共识。

面对交织不确定性挑战与巨大机遇和潜能的未来，联合国将持续深化多元协作，共同实现 2030 年可持续发展议程。我们呼吁全球团结起来，共同行动，为后代守护宜居繁荣的地球家园。只要我们齐心协力，必能将我们的潜能转化为现实。

Nikhil Seth

联合国助理秘书长兼联合国训练研究所执行主任

序言二



在参与本报告编撰并与全球各领域领袖探讨供应链转型与气候未来时，“即刻行动、协同共进”的紧迫感始终萦绕心头。作为长期推动亚太地区可持续发展的太平洋经济合作理事会，我们始终将这份紧迫感转化为行动力。

太平洋经济合作理事会的使命植根于一个根本认知：可持续性是人类存续与繁荣的基石。我们深知亚太地区在推进绿色实践方面蕴藏着独特势能，并致力于通过政策倡导、对话平台搭建、行动激励等方式，推动实现经济增长与环境保护深度融合的未来。

在全球气候危机的阴云下，技术创新犹如破晓之光。气候科技绝非实验室里昙花一现的概念，而是人类对抗全球气候变暖、重构发展逻辑的最具潜力的抓手。值得欣慰的是，我们看到越来越多技术成果正跨越实验室的壁垒，在工厂车间、产业园区、交易市场乃至社区家庭落地生根，形成应对气候变化的坚强防线。太平洋经济合作理事会将持续赋能和培育这些变革力量，支持相关项目，推动合作与知识共享，让我们的区域成为全球绿色科技和可持续发展的前沿之地。

在太平洋经济合作理事会发布的《2023-2024 年区域发展现况报告》中，我们已将“强化供应链韧性”与“提升气候与清洁能源目标”列为区域战略的关注重点。本次《气候科技焦点：创新赋能绿色供应链》报告，则通过深入解构绿色供应链的发源、透视气候科技的市场

格局、挖掘重点领域变革潜能，为这些战略重点提供更多深入的实践和智慧。在此之上，报告揭示了金融、教育、基础建设等要素在这一过程中的关键角色，提供了具体可行动的解决方案。通过这一深入研究，我们呼吁各利益相关者合作，共同推动可持续发展实践，落实相关倡议和行动。

历史正将我们推向决定性的十字路口，我们今天的行动将决定我们为子孙后代留下的遗产。我衷心希望，在本地区朝着可持续愿景迈进的进程中，各方参与者能从亚太区域的协同实践中获得力量，携手缔造一个繁荣而可持续的美好未来。

Antonio Basilio

太平洋经济合作理事会菲律宾国家委员会主席、
亚太经合组织工商咨询理事会秘书长

序言 三



气候变化已成为一项关乎人类未来的重大性、长期性、系统性挑战。在全球绿色浪潮奔涌的当下，我们正以绿色经济转型为契机，开辟一条科技赋能、质效并举的可持续发展之路。持续升高的气温与频发的极端天气正在侵蚀生态根基，导致生物多样性流失，最终威胁人类的生存和发展。在此之上，地缘博弈与单边行径更让气候治理面临层层压力。

各国正以各种各样的路径来应对气候危机。对中国而言，“碳达峰、碳中和”目标既是时代大考更是战略机遇。如何在减排与发展间寻求最优解，在保障能源安全中实现绿色转型，既需要攻坚克难的毅力，更需要创新突破的智慧。可持续发展战略的终极价值，不应局限于低碳指标本身，而是要构建供应、繁荣的社会图景与具有竞争力的绿色低碳经济体系，其核心在于为人类可持续发展开辟新局，具有划时代的经济与社会现实意义。

作为亚洲与发展中国家的气候行动标杆平台，上海气候周通过技术革新、共识凝聚与青年培育的多层次布局，持续赋能全球气候治理进程。2024 上海气候周期间，我们搭建起汇聚政、商、学界及国际组织及金融机构千余家单位的对话平台，共商破局良策。未来，《气候科技焦点》系列报告将以前瞻视野，深度解析各方如何通过创新机制推动气候技术迭代与产业转型，持续输出具有引领性的思想和智慧。

作为该系列首份报告，我们汇聚全球超过 70 位政商领袖的真知灼见，从政策创新、技术突破、金融赋能、教育支撑等维度勾勒绿色供应链转型路径。报告精选十余个标杆案例，为读者呈现气候科技赋能绿色供应链建设的实践案例，激发创新灵感。

我们诚邀更多伙伴加入到我们的行列中，共同建设绿色供应链，推动可持续发展。我们以跨越国界、跨越行业、跨越职能部门的协同之力，共同探索安全有效、可复制推广的绿色解决方案。相信通过集体智慧的持续进发，气候科技必将成为人类智慧与技术创新交相辉映的璀璨结晶，既为经济增长注入新的绿色动能，更在推动可持续发展的征程中书写崭新篇章。

李政

清华大学气候变化与可持续发展研究院院长、
上海气候周研究院首席专家



报告摘要

《气候科技焦点》报告以全球视野直面气候危机，深刻揭示了气候技术在重塑全球供应链中的变革潜力。报告指出，环保认知建立、国家政策目标与经济激励机制共同构成了气候行动的三大核心驱动力，其作用权重因地域差异而动态演变。进行科学规划、建立利益相关方协同机制对达成各国制定的国家目标至关重要。当前，虽然推动这些目标的努力已经有了不少进展，但仍需要突破性的加速度来实现全球净零减排目标。

在政策制定方面，构建气候变化相关的立法框架是迈向可持续发展的制度基石，而严格执法、全民普法则是将法律文本转化为气候行动的关键支柱。发展中国家特别需要关注达成气候目标与保证经济增长间的动态平衡，使得环境治理成为发展的提质引擎。

供应链绿色转型需聚焦三大攻坚点：构建溯源机制、突破难减排行业瓶颈、推动企业从合规达标继续实现卓越引领。这要求系统性改造既有基础设施，并通过成本分摊机制重构实现效益共享。风险管理增效、运营效率提升与品牌价值重塑等内生动力，正驱动企业突破合规底线向行业标杆攀升。

报告创新采用“技术成熟度-市场适配度”双维坐标，精准梳理气候技术图谱，聚焦最具规模效应的突破领域。报告同时揭示了大数据与人工智能的深度赋能、传统能源系统脱碳改造、绿氢与基础化学品革新、清洁能源物流网络构建成为绿色技术攻坚的主要阵地。在创新孵化方面，“概念验证基金”等新型融资模式架设了实验室到产业化的桥梁。这类机制有效破解气候科技初创企业的商业化困境，使前沿技术得以跨越商业化鸿沟。

通向可持续未来的道路同样需要支撑体系：具有前瞻性的政策框架提供制度保障，创新型金融工具激活市场动能，全民教育体系构建人力资源保障。政府需通过稳定性、激励性的政策引导绿色创新，金融机构则需开发适配工具精准灌溉成长型气候科技企业。教育革新已突破传统边界，既着力培育具有气候领导力的新生代，又通过职业技能培训重塑产业大军。这种产教融合模式正在各行各业孵化能够为绿色技术提供必要建设和维护的人才矩阵，使得可持续发展实践能够在各行各业落地生根。

气候科技潜能的全面释放呼唤全球协同行动。当政府、资本、创新者、教育机构与产业链形成共振，一个自驱动的绿色经济正向循环将加速运转。这种集体智慧不仅使绿色供应链转型更具经济韧性，更将铸就发展与可持续性深度交融的人类文明新前景。



背景

“

面对全球经济挑战与新兴气候议题的交织，发达国家与发展中国家的协同合作至关重要。从单纯碳减排向系统化气候治理的战略转型，是有效应对气候变化的必由之路。这一路径凸显协调全球供应链中的气候目标与经济可持续性，建立协作型国际框架的重要性。

Graciela Chichilnisky 博士
《京都议定书》首席谈判代表

供应链是从原材料开采到成品交付，再到产品回收或废弃处理的完整体系，深刻影响着全球消费者的日常生活。全球供应链从业者超过 4.5 亿人¹，贡献着全球 60% 的碳排放量与终端能源消耗²。绿色供应链转型绝不单单是一个学术与技术层面的议题，而是直接牵动着就业市场、企业经营、金融投资、家庭收入，最终与我们每个人的工作和生活息息相关。

图 1.1 供应链的核心环节、排放来源与绿色因素



资料来源：蔚碳科技

现代供应链管理的主导原则是“精益”和“绿色”。精益逻辑聚焦效率与经济目标，包括成本削减³、库存优化与产能提升⁴。因为精益原则契合股东、客户与监管机构等利益相关者的价值诉求，其始终占据供应链领域主导地位⁵。随着可持续发展成为利益相关方的新共识，供应链参与者正加速引入绿色原则以降低环境影响，适应消费端偏好的演变趋势。二者虽然都体现了满足利益相关方价值主张与减少浪费的共性诉求，但其内核存在权衡、取舍与内在矛盾。例如，精益原则对供应链要求准时化配送 (just-in-delivery, JIT)，需要密集甚至冗余的配送网络实现快速响应，而绿色原则要求尽可能减少空等和浪费，即使会造成一定的时间损失^{6,7}。

“虽然气候变化已经成为了全球性议题，但在社会共识上依然存在撕裂，甚至仍有部分群体因为认知局限仍然视其为谎言。供应链直接关系到千家万户的生计，所以其转型势必更加具有挑战性。唯有找到创造新就业、平衡商业利益的解决方案，才能凝聚转型共识。”

Mohamed Bashir Kharrubi 博士
石油输出国组织 (Organization of the Petroleum Exporting Countries, OPEC) 主席前高级顾问

全球供应链正加速向绿色化转型，2023 年全球清洁能源领域非公有经济投资额已突破 1350 亿美元⁸。尽管势头向好，

本报告贡献者与学术研究仍然指出，供应链气候行动的进展依然不够充分、不够均衡。具体体现在：

• **实施路径分歧**——全球气候行动虽与宏观目标形成战略共识，但具体落地路线仍存实践鸿沟。以 COP28 气候峰会宣示的“化石燃料时代终结的开端”为例，尽管淘汰传统能源已成共识，但转型时间表、资金分担机制等关键细则仍待厘清，这些真空地带正制约着气候承诺的实质转化。

• **激励措施失衡**——政策制定不宜假定供应链主体会自愿牺牲经济利益实现减碳目标。需进一步发展市场化激励措施，同时需要在培育绿色市场与维护公平竞争间把握政策平衡，避免其扭曲公平竞争或催生新型贸易壁垒。

• **政策连续性不足**——绿色供应链长期投资依赖于稳定的政策预期^{10,11}。但现实中的气候政策常因社会认知波动等因素出现倒退或反复，这种不确定性会加剧相关投资的转型风险，最终导致投资可行性降低和进度滞后。

气候科技指应对全球气候挑战的科学技术。在供应链脱碳过程中采用气候科技，不仅能提升运营效率、降低转型成本，更能最大限度减少对生产秩序的干扰和影响。通过提供具有可持续影响力的新产品与服务，气候科技开辟出新的经济增长赛道和机遇。但机遇往往隐于纷繁变化之中，特别是在全球可持续发展浪潮下，客户决定采纳绿色供应链产品的决策动机的动态演变，使得价值识别成为关键挑战。以下动机常被视为客户价值认知与购买决策的关键驱动因素：

图 1.2 绿色产品决策背后的价值创造机制

个人消费	企业采购	政府采购
<p>消费者对产品感知到了绿色价值 (perceived green value, PGV) 找到了与自身环境保护价值观和关切的共鸣^{12,13,14}</p> <p>消费者对绿色供应链产品的质量信心更高，心理上认为其在健康、性能和可靠性等方面的风险更小^{12,15,16,17,18,20}</p> <p>消费者通过消费行为，形成了对环境意识和利他主义精神的自我表达¹⁹</p>	<p>企业采购决策者认为绿色供应链产品更合规，例如更符合环境、社会和公司治理 (Environment, Social and Governance, ESG) 标准、气候相关法规要求、可持续发展标准、政府指引或下游客客户要求</p> <p>企业采购决策者认为采购绿色供应链产品可以提升品牌形象，保持与下游客客户的可持续发展价值观的一致性^{21,23,24}</p> <p>企业采购决策者认为采购绿色供应链产品可以减少与政策、质量、运营相关的外部供应链风险，同时通过提升企业道德水平、建立合规体系、履行社会责任，可以筑牢企业“底线思维”，减少内部的操作风险</p>	<p>政府采购决策者认为绿色供应链产品符合国家和联合国等国际组织的战略目标</p> <p>降低环境治理成本与生态影响^{25,26,28}</p> <p>推动气候技术创新扩散，推动绿色经济增长^{25,26,27,29}</p>

气候科技的另一核心价值在于显著提升供应链透明度。区块链和物联网 (Internet of Things, IoT) 等技术能够实时监测与核验碳排放及环境足迹，从而精准支持碳核算与可持续方案的监测、报告与核查 (Monitoring, Reporting and Verification, MRV) 体系。这种透明性不仅增强了消费者和

投资者的信任，还帮助企业识别运营低效环节并推动优化，进而建立更可持续的运营模式。此外，气候科技使气候政策实施更具可操作性，从而推动政策落地、赋能与可持续指标相关的管控措施和流程。

从意识到行动： 绿色供应链的驱动因素

绿色供应链的核心驱动力包含环保认知建立、国际/国家政策目标与经济激励机制，三者的作用强度因地域特征及经济发展水平动态变化。

图 1.3 各国家与地区绿色供应链发展的主要驱动力

环保认知建立	国际/国家政策目标	经济激励机制
全球北方部分国家和地区绿色供应链的初始驱动力，源于中产阶层规模扩大及气候事件频发引发，从而公民更加关注可持续相关的议题	大多数发展中国家和地区，特别是后工业化地区的绿色供应链建设核心驱动力，都源于联合国和所在国家或地区的政府目标	大多数全球南方的发展中国家和地区的主要驱动力，主要源于气候灾害造成经济损失的倒逼；同时也源于希望通过绿色转型稳固全球市场地位、创造新经济机遇的战略考量
在另外一些地区，政府的环保认知建设先于公众，并通过政策工具（如绿色公共采购）成为主要推动力	在其他地区，联合国和国家政策目标也同样会加速绿色供应链建设进程	经济收益预期将持续激励更多国家和地区采用可持续实践方案
全球南方部分情况下，政府意识与政策框架亦可通过国际金融合作建立，尤其是多边开发银行 (multilateral development banks, MDBs) 的引导作用		

上述分析框架适用于评估国家和地区层面的绿色供应链发展驱动力。如果视角聚焦到地方层面，推动因素的分布可能有所不同。牛津气候校友网络 (Oxford Climate Alumni Network, OxCAN) 首席执行官 Ese Owie 博士给出了一个例子，即使在非洲某些基础设施薄弱的地区里，依靠很多社会积极分子的活动，也同样推动了环保意识的快速觉醒。而在部分富裕的全球北方地区，经济模式固化，保守主义文化盛行，环境保护文化也不健全³⁰，导致了这些地方虽然发达而富裕，但对新的环境政策和目标抱有抵触心态，只有依赖经济利益的激励才能有效促进当地绿色供应链的建设³¹。

公众和政府的早期认知

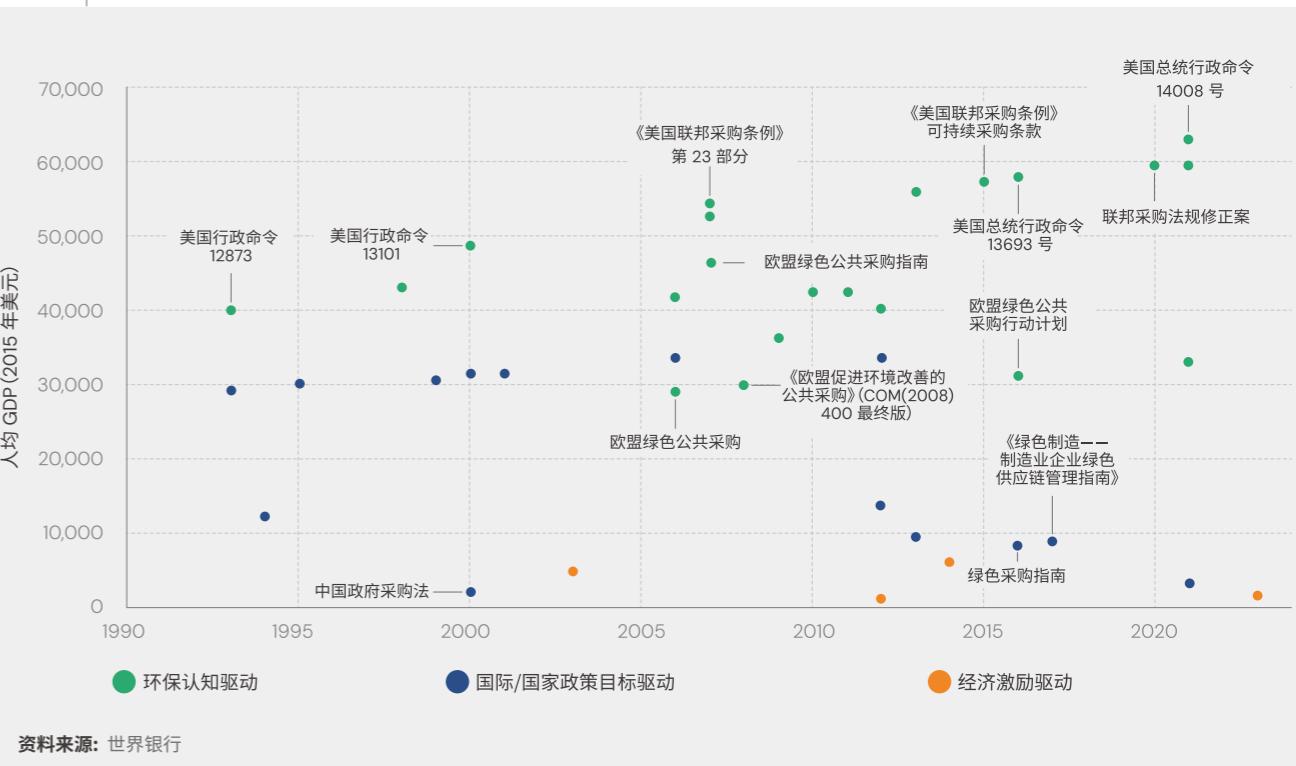
在部分全球北方地区，绿色供应链的兴起植根于后工业时代社会财富的逐步积累，其萌芽可追溯至 20 世纪 90 年代初。随着生产力水平、富裕程度与现代化程度的提升，规模持续扩大的中产阶层开始更加关注环境保护、可持续发展等后物质主义价值观，由此逐步导致政策模式与消费形式的不断变化^{32,33}。

为此，各国政府与相关机构采取了具体行动应对环境可持续性挑战，其中最具代表性的是绿色公共采购 (Green Public Procurement, GPP) 政策，其相关的排放约占全球温室气体排放的 15%³⁴。政府开始强制要求将环境标准纳入公共产品及服务的采购流程^{35,36}。尽管绿色公共采购的效果有差异，

但其本质上反映了政府对环境问题的早期关注，以及通过政策规制手段解决此类问题的初步尝试^{37,38,39,40}。在许多地区，政府主导的举措往往依赖于陈旧的标准，难以追赶最新的绿色创新趋势。同时官僚主义程序复杂⁴¹、官员专业认知有限^{42,43}，也可能是制约绿色公共采购推动绿色创新的因素。

绿色公共采购还呈现了明显的经济关联性。一项针对绿色公共采购政策与政策生效当年人均 GDP 的相关性分析表明，超 80% 的绿色公共采购政策诞生于人均 GDP 超 1.4 万美元的高收入水平情况下。在人均 GDP 较低地区，政策采纳主要受经济激励驱动。

图 1.4 绿色公共采购政策与政策生效当年人均 GDP 的相关性





我们建议在实施绿色公共采购政策的过程中，应当关注培训与教育的战略意义。培训和教育既能推动供应商认识和对接可持续目标，又能帮助政府官员开展公正的供应商遴选，从而系统性提升采购流程的公信力与实效性^{43,44}。

“
公众认知是政策与技术转化为实际行动中的必要因素。只有每个个体都充分理解了环境治理的利害关系与可行解决方案，他们才会更倾向于支持必要的绿色变革，从而为气候行动营造有利的实施环境。

Butti Almheiri
联合国基金会 Next-generation 气候学者

除了绿色公共采购，各国在早期也形成了一些其他的环境政策体系。但是在全球环境意识尚处萌芽阶段，部分政策推进周期仍显漫长。例如，为了保护臭氧层，各国发起了禁用氯氟烃（Chlorofluorocarbons, CFCs）的倡议，但由于相关阻力，从初步认知到通过《蒙特利尔议定书》实现有效治理耗时十年之久^{45,46}。这项1987年达成的国际协定通过逐步减少生产、消费并最终淘汰消耗臭氧层的氯氟烃，成功将北极首次无冰之夏的出现时间推迟长达15年⁴⁷。《蒙特利尔议定书》的谈判进程为气候变化治理提供了宝贵借鉴，但同时也凸显此类政策全面落地所需的复杂博弈。与之相似的另一种臭氧层消耗物质甲基溴，其淘汰进程亦因遭遇阻力而延迟⁴⁸。

当前，在绿色供应链采购的立法进程中，发展中国家和地区的政府的意愿显著增强。以多边开发银行为代表的全球机构投资者长期支持政府认知体系与方法论的建设，从而在这一进程中呈现指导作用。大多数多边开发银行已经将气候变化作为核心战略，将绿色采购整合进入政策框架。亚洲开发银行（Asian Development Bank, ADB）在第3个业务优先发展

领域“应对气候变化，增强气候和灾害适应能力，提高环境可持续性”下构建了可持续公共采购框架（Sustainable Public Procurement, SusPP），推动绿色采购实践的识别与优化。亚洲开发银行通过在发展中国家和地区的项目投资，系统性引入该框架及配套采购体系，使发展中成员国（Development Member Countries, DMCs）能够获取先进清洁技术并推动其在项目中的整合应用。因此，这些框架已成为相关政府具有参考价值的采购指南，并进一步影响其他国内项目。

案例1 提升印度尼西亚的可持续采购体系



亚洲开发银行是印度尼西亚在可持续发展领域的重要合作伙伴。截止2024年4月，亚洲开发银行累计在印度尼西亚实施了800余个项目，累计主权贷款总额超过460亿美元。在融资支持之外，亚洲开发银行还深度参与了印度尼西亚政府公共管理能力的建设，其中最具有代表性的事件是将可持续公共采购框架纳入印度尼西亚的采购法规体系。

2022年，亚洲开发银行与印度尼西亚政府货物及服务采购局（Lembaga Kebijakan dan Pengadaan Barang/Jasa Pemerintah, LKPP）开展了重要合作，通过一系列培训和能力建设，提升采购决策执行者对可持续采购的认知与实践理解。在形式上，这样的培训突破传统的教学模式，通过具有互动性的研讨会，使得决策者能够掌握与可持续公共采购框架融合应用相关的信息和知识。为了使得可持续采购的标准达到国内国际领先水平，双方在培训合作之外，更开发了一套监督和管理工具，以及一个包含采购标准、执行办法和招投标文件模板在内的全面框架。

亚洲开发银行提供的支持有效促进了领先气候科技在印度尼西亚的落地。依托其覆盖广泛的采购系统和资源网络，亚洲开发银行为印度尼西亚带来了遥感分析、大数据分析、以及其他各种清洁技术。在2023年，亚洲开发银行批准了一项340万美元的投资，与印度尼西亚国家电力公司（Perusahaan Listrik Negara, PLN）共同启动了低碳能源基础设施开发的项目，从工艺流程改进、领先实践落地、劳动者技能提升三方面推动从化石能源到绿色低碳电力的改进。上述项目取得成功后，在2024年，亚洲开发银行还进一步建立了“推动可持续清洁能源网络发展”倡议，关注为清洁能源技术提供知识解决方案和能力建设。在这些工作之外，亚洲开发银行还通过推动采购框架的完善，助力印度尼西亚实现可持续发展的承诺。

资料来源：亚洲开发银行，2022年⁴⁹

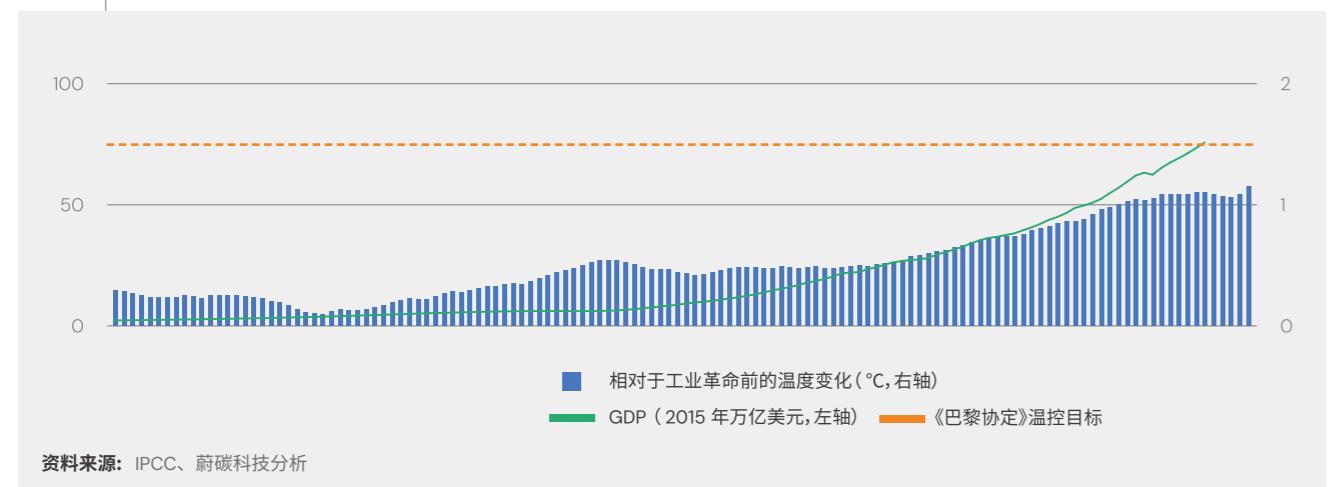


全球环境关切催生减排目标的诞生

“防患未然胜于亡羊补牢。应对气候变化，与其坐等问题发生，不如现在就采取预防性措施。彼时仓促补救的成本，可能比预先防范高出数千倍。”

Zayed Bin Rashid Bin Aweidha 阁下
阿布扎比投资集团首席执行官

图 1.5 全球平均气温与工业化水平变化趋势



自 2015 年《巴黎协定》通过以来，多个国家和地区通过制定国家自主贡献（Nationally Determined Contributions, NDCs），提出了最初的气候目标。在国际谈判、外交努力与民间倡导下，气候议题实现了从学术讨论向具象化政策的转型过渡。在此期间，绿色供应链、可持续供应链的概念也逐步在全球多地落地为具体实践。

确立全球气候目标绝非政策文本呈现的简单结果，而是一个复杂过程。正如 Clean Rivers 项目经理 Mujeeb Khan 认为，在阿联酋开幕的第 28 届联合国气候变化大会（COP28）达成多国共识的过程，正是这种复杂性的生动例证。“COP28 是气候谈判的历史性时刻，其前所未有的包容性体现在谈判代表、成员国、公民社会及各利益相关方的

人类工农业活动产生的温室气体排放，已使地球表面均温较工业化前水平上升 1.15°C ，达到十万年来的峰值⁵⁰。这种气候变迁正在改变天气模式并破坏人类栖息地，导致热浪、冰川消融、暴雨、洪涝、干旱与野火等极端天气频发，造成大量生命财产损失。如果气候变化持续失控，全球升温突破 2°C 临界值，极端高温将超越工业、农业及人体健康承受的临界阈值，导致农作物绝收、诱发大面积森林火灾、抬升海平面淹没城市，给人类社会带来不可逆转的生态灾难。

有参与方的绿色经济良性发展循环。这保证了气候目标不仅是一腔热血的雄心壮志，更具有现实可操作性与广泛支持基础。正如 Blue Capital Advisory 首席执行官 Mohamed Gouali 博士强调，提升气候变化认知与凝聚共识，需要通过国际协作实现长远利益，而非仅停留于协议签署与会晤层面。唯有构建有效的经济激励机制与政策保障机制，才能巩固阿联酋共识并持续推进 1.5°C 温控目标。

“沙特阿拉伯高度重视通过国际合作实现可持续发展目标。发展中国家若无法获得补贴等援助，将难以独立达成目标。发达国家提供支持势在必行。”

Nabil Al Saleh 阁下
沙特阿拉伯王国前副国务部长

科学方法论是制定和评估气候目标的基础框架，包括数据技术与宏观经济工具的应用。当前普遍采用的基准是《巴黎协定》框架下的“2050 年净零排放目标”。这类工具能在供应链持续性与环境目标间的均衡情景下，模拟政策产生的经济社会连锁反应，从而能够评估气候政策的经济效应。综合评估模型（Integrated Assessment Model, IAM）是气候情景分析的典型工具，其优势在于可识别经济增长与可持续性落地的最优政策强度。自 2020 年起，由 114 家央行与监管机构组成的绿色金融体系网络（The Network for Greening the Financial System, NGFS）通过情景推演，为评估气候政策金融风险敞口提供支持。国际能源署（IEA）开发的情景分析体系亦被广泛应用于此类评估。

2050 年净零排放现有的模型预测表明，全球能源转型需要付出远超预期的努力。数据显示，2024 年全球化石燃料在能源结构中占比仍高达 81.5%⁵¹，而要实现净零目标，该比例须在 2050 年前降至 5%⁵²。这意味着清洁能源应用规模需实现指数级扩张，但当前推进速度明显滞后。尽管部分指标已接近净零路径要求，区域发展失衡问题依然突出。以平准化度电成本（Levelized Cost of Electricity, LCOE）为例，该指标从 2010 年的 460 美元/兆瓦时降至 2023 年的 44 美元

/兆瓦时，预计 2030 年可达 30 美元/兆瓦时，成就显著⁵³。然而非洲地区的平准化度电成本仍普遍高于 105 美元/兆瓦时，太阳能资源丰富的区域光伏能源可用率却严重不足。欧洲则因能源供应不稳定，德国和荷兰部分地区的平准化度电成本甚至超过 80 美元/兆瓦时⁵⁴。

全球碳移除技术进展同样未达预期。科学家主张本世纪中叶需实现年移除 50-100 亿吨二氧化碳，但目前年移除总量仅 20 亿吨⁵⁵。以直接空气捕捉技术为例，其成本高达 250-600 美元/吨，严重制约大规模应用。此外，监测、报告与核证框架的缺失，导致碳移除项目的可信度存疑，进而影响政策支持与技术突破。

这些数据揭示全球绿色供应链建设仍存在系统性滞后。面对多重现实障碍，亟需通过气候技术创新与强化气候行动，推动供应链体系深度适配气候目标要求。

全球多国和地区近期通过立法形式对供应链实施新型监管机制，着力实现利益相关方协同效应。与此前的监管措施相比，这些新规增加了评估和确保供应链可持续性的操作规则与实施程序。以欧盟为例，其推出的碳边境调节机制（Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM）旨在应对碳泄漏风险，强化支撑“减碳 55%”（Fit for 55）气候战略框架。截止本报告英文版发布时间，美国虽尚未正式立法的《清洁竞争法案》（Clean Competition Act, CCA）配合《通胀削减法案》（Inflation Reduction Act, IRA），则着眼于提升清洁能源产业竞争力，与其长期气候战略形成政策协同。此类法规通过明确的合规流程、补贴措施和准入限制，对产业链运行提出实质性管控要求。

虽然全球气候目标的雄心壮志已经确立，现有进展也十分显著，但是绿色供应链法规仍需持续完善以实现预期效果。中研绿色金融研究院院长顾蔚博士强调：立法只是起点，严格执法、全民普法同样不可或缺。绿色供应链法规还面临跨境数据核证复杂性与高成本挑战。降低此类成本需培育国际合作及对共享数据与标准的互信，发展包括国际协作、数据与认证互认、标准化指标在内的支撑框架。这些进步将推动法规更具实操性、公平性，切实促进供应链可持续转型。

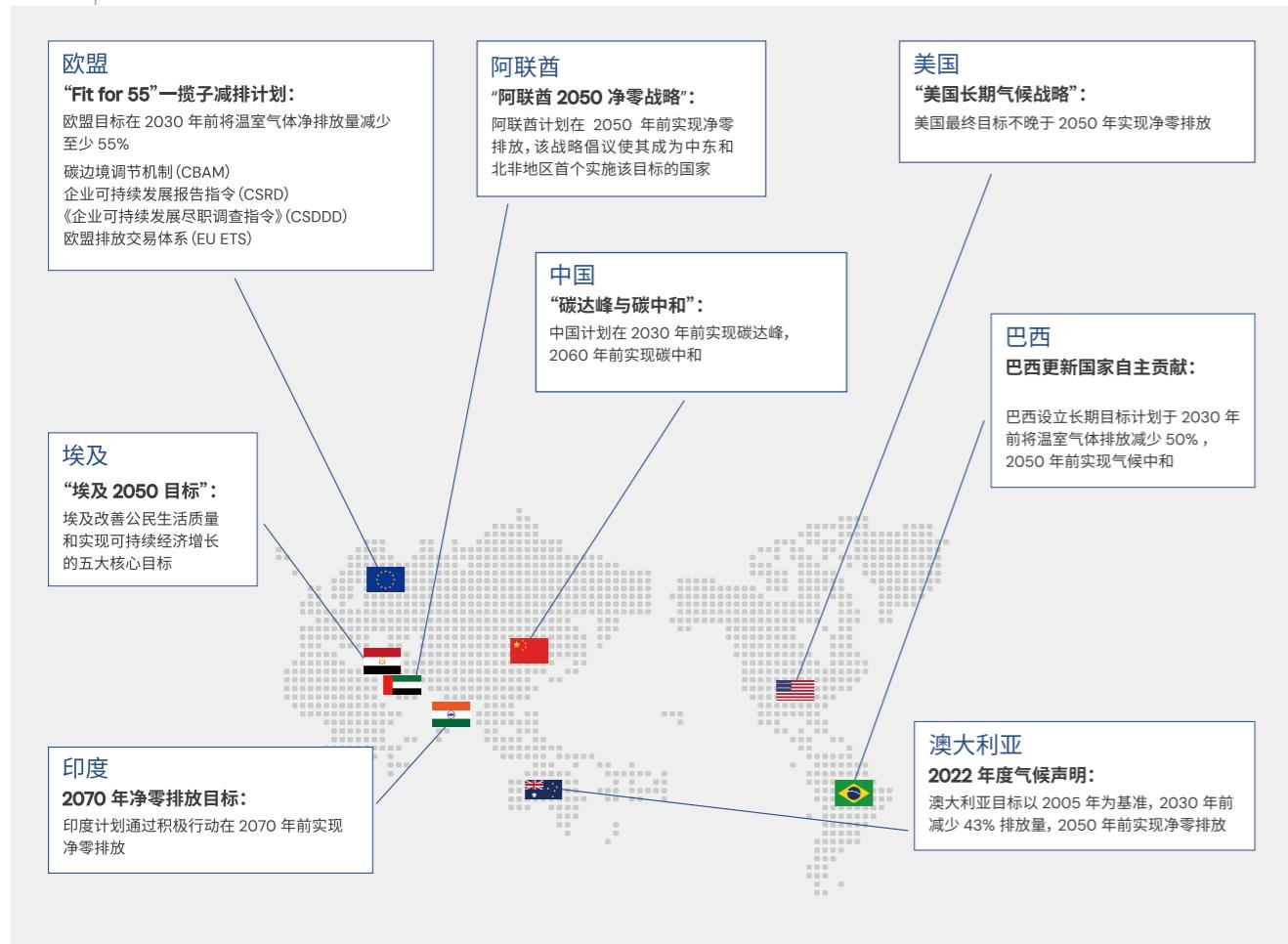


图 1.7

欧盟“减碳 55%”与碳边境调节机制目标



资料来源：欧洲议会，2022年

在部分发展中经济体中，绿色供应链目标需应对更为复杂的利益相关方动态平衡，往往更倾向于通过发展实现经济跃升而非单纯限制性措施⁵⁷。这种路径有效统筹了环境保护与经济增长。例如埃塞俄比亚《长期低碳与气候韧性发展战略》(Long-Term Low Emission and Climate Resilient Development Strategy, LT-LEDS) 通过提升木材供应链的森林管理专业水平，在减少森林退化同时创造符合联合国 REDD+ 框架 (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation) 的碳信用，并重点布局电动汽车领域就业岗位，推动经济持续增长。通常而言，在环境可持续性基础上兼顾减贫、就业提升或区域经济繁荣等多重目标的绿色举措，在这些国家和地区更易获得实施成效⁵⁸。

贸易限制措施（尤其是全球南方国家与全球北方国家间）可能产生碳排放增加效应。研究表明，贸易限制可能促使生产转移至能效较低地区，若该地区未同步提升排放标准，反而会导致排放量上升^{59,60}。英国气候变化委员会主席 Adair Turner 勋爵强调：“碳边境调节机制等绿色供应链政策的初衷并非贸易保护主义，理论上不会对出口国构成不利影响。”同时呼吁所有国家和地区采取更符合国际标准与多边原则的措施，以保障供应链的持续和稳定。

标准互认与执行差异可能引发政策成本不均衡。例如欧盟自 2006 年起对特定进口商品实施系列环境声明要求，尽管制造商常通过购买可再生能源证书 (Renewable Energy Certificates, RECs，俗称“绿证”) 证明其可再生能源使用或用于碳抵消，但欧盟一些标准仅认可北美 Green-e、欧洲来源担保 (Guarantees of Origin, GO) 及国际 REC 标准 (International REC Standard, I-REC, 现为 I-TRACK) 等少数体系。区域性绿证机制常因标准差异、核查不足或双重计算风险被拒绝承认，导致相关地区生产者为满足合规要求，往往需承担重复购买绿证、额外认证流程等增量成本。

弥合全球南北各方在环境标准领域的鸿沟，最需要的是

国际合作与对话机制。当前日益增多的双边伙伴关系及多边机制着力推动环境标准互认，并配套技术转移、能力建设与资金支持，助力发展中国家和地区在维持经济发展进程中实现绿色目标。未来应重点通过多边渠道扩展此类倡议的覆盖面。

“
全球多边合作体系通过协调、推动、监督和落实应对气候变化的各项行动，在气候治理领域促进各国协作与联合行动。这一体系不仅确保全球气候目标的制定与实施，还为资金流动和技术转移的全球化流动提供关键支持。

周一平
联合国南南合作办公室创始主任

经济激励推动绿色经济不断成熟

气候科技焦点

商业利益与盈利是可持续行动的必备前提。绿色供应链不仅需具备环境可行性，更需实现经济可持续性，在生态效益之外创造就业与经济增长。企业通过提升生产效率或将资源从不可持续的传统业务中转移，能够从气候行动与绿色投资中获益。

尽管绿色或可持续资产常被宣传具有超额投资回报与长期优异表现，但学界对其收益规模尚未形成共识。绿色投资的增长多被归因于投资者气候相关意识的觉醒，或者与投资领域近年来呈现的专业化、主题化的趋势有关⁶¹。从利润与风险同源的角度来看，由于绿色资产具有长期投资周期、较低融资成本以及政策稳定性，造成其相比同类型的产品风险更低，进而可能导致其实际回报率低于传统资产。一项针对真实市场的实证分析显示，绿色债券收益率可比传统债券低0-20个基点^{62,63}。

近期，一项针对《东盟绿色债券标准》（ASEAN Green Bonds Standards, ASEAN GBS）的实证研究揭示了该地区绿色金融的潜力与挑战。虽然《东盟绿色债券标准》致力于推动区域资本市场可持续投资，但多数受访者认为绿色债券相比传统债券“缺乏显著财务优势”⁶⁴。这种认知实际上揭示了传统财务绩效指标仍然让位于可持续性考量的现实，阻

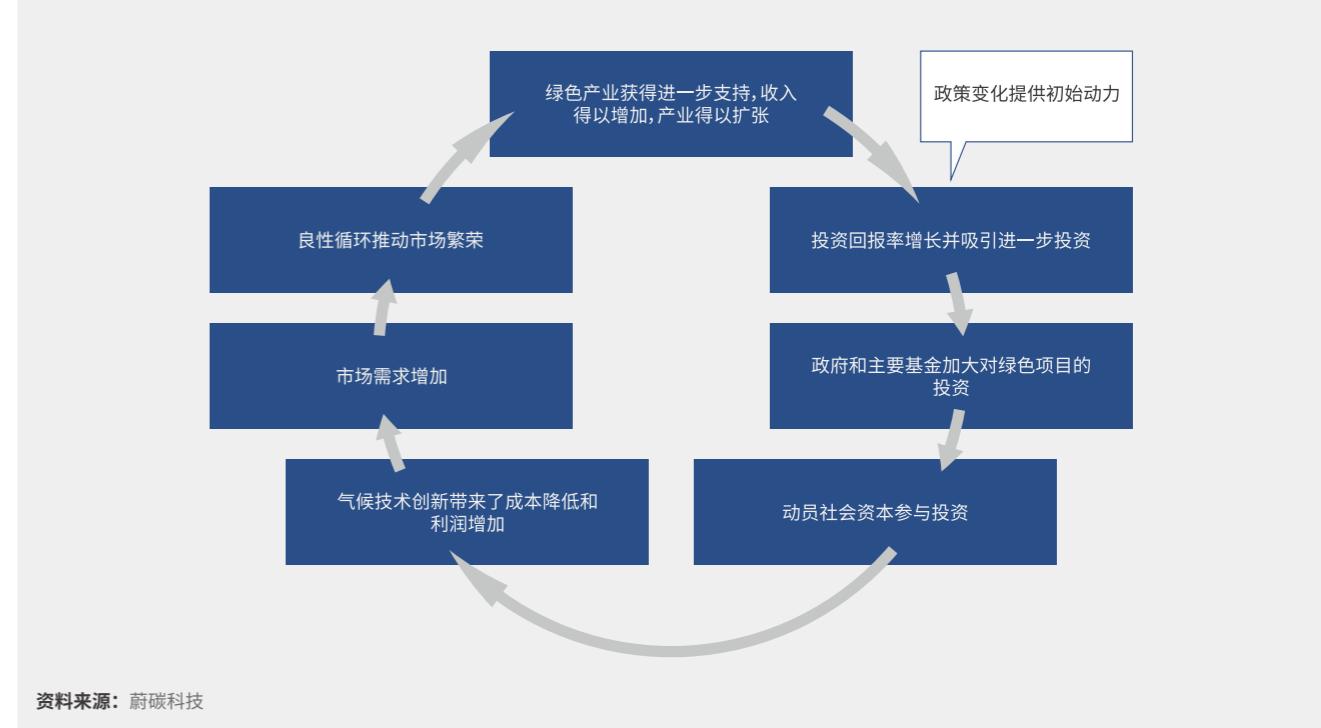


© 南水北调工程，南水北调 2024 气候与可持续摄影大赛入围作品

图 1.8 绿色经济良性循环

碍了绿色债券市场的发展。来自马来西亚、新加坡和泰国的受访者指出，绿色项目数量不足、绿色债券供给有限，也是制约市场发展的因素。虽然理论上很多机构都对投资绿色债券有兴趣，但依然受制于财务收益不明确、市场流动性不足等现实障碍。通过提高透明度、增强认知并开发更多绿色投资机会，有助于将投资者预期与绿色资产的长期效益对齐，推动东盟地区绿色金融市场赢得更广泛的接受度，实现持续增长⁶⁴。

绿色经济的吸引力在于通过政策的“看得见的手”重新分配商业利益。通过约束高污染产业、强化绿色管理措施、推动定价体系转型等机制，政策可为绿色供应链创造更低政策风险与更优现金流。各国可通过直接经济处罚限制高污染生产流程，或通过补贴降低绿色技术初始成本，推动经济绿色转型。碳排放交易体系等定价机制将环境成本纳入市场价格，在促进减排的同时引导资源向绿色领域集中。此类机制虽未创造新价值，但通过基础设施与市场建设的配套，同样实现绿色经济参与者的帕累托改进^{65,66,67}。



在绿色领域，大家都不会喜欢惩罚性的措施，但研究证明其对抑制环境危害行为和激励气候技术创新具有短期立竿见影的效果^{68,69,70}。然而，惩罚与补贴均需高昂社会治理成本，可能受经济或社会压力制约。如果因为经济下行等原因，政府和社会难以承担这些成本，则不可避免会带来政策的放松或调整，最终导致排放和污染卷土重来。相比之下，定价机制通过将环境成本持续内化于市场价格，形成对绿色技术的长期稳定激励。这种市场化路径既能规避财税压力对绿色技术发展的波动性干扰，又能为本土技术升级提供持续动力，其抗经济周期特性为绿色转型提供更稳健支撑。

全球南方国家和地区通过立法支持绿色经济并促进投资，有效协调政府行动与营造绿色经济友好型投资生态。典型案例包括菲律宾根据第 18 号行政令设立的“绿色通道”机制，聚焦于符合优先支持符合国家发展计划的气候减缓与可持

续项目⁷¹。配套出台了《蓝色经济法案》（Blue Economy Act, 参议院第 2450 号法案）并成立蓝色经济委员会以管理海洋资源、沿海规划及韧性投资，进一步强化该国对可持续金融的承诺⁷²。根据该法案，蓝色经济委员会将统筹整合沿海管理计划，包括渔业管理计划、沿海资源管理计划、气候行动计划和海洋空间规划，以此划定区域并明确准入、监管及禁止性活动清单。该委员会还负责识别气候适应型及环境友好型投资、基础设施与技术，为当地绿色与蓝色经济发展提供强劲推力。

从精益到绿色：气候科技解决的挑战

在供应链中实现对环境可持续发展，需要对其各个组成部分进行全面转型，包括能源结构、产品设计、原材料获取、生产制造、物流运输到终端使用及循环再生等。本章将深入探讨影响探討影响各环节的关键挑战。解决这些挑战是推动气候技术解决方案开发和应用的核心驱动力。

图 1.9 与供应链各环节相关的挑战



端到端供应链：数据与可追溯性

可追溯性技术能确保时空分布广、地理分散的供应链全方位符合绿色原则、规范与法规，包括精确的碳足迹报告和经认证的原材料负责任采购，同时支持实时识别风险与中断，减少潜在环境、社会和公司治理问题。贝恩公司最新发布的《全球可追溯性现状调研》显示，在 150 余位供应链高管中，68% 认为可追溯性“非常重要”或“极其重要”⁷³。

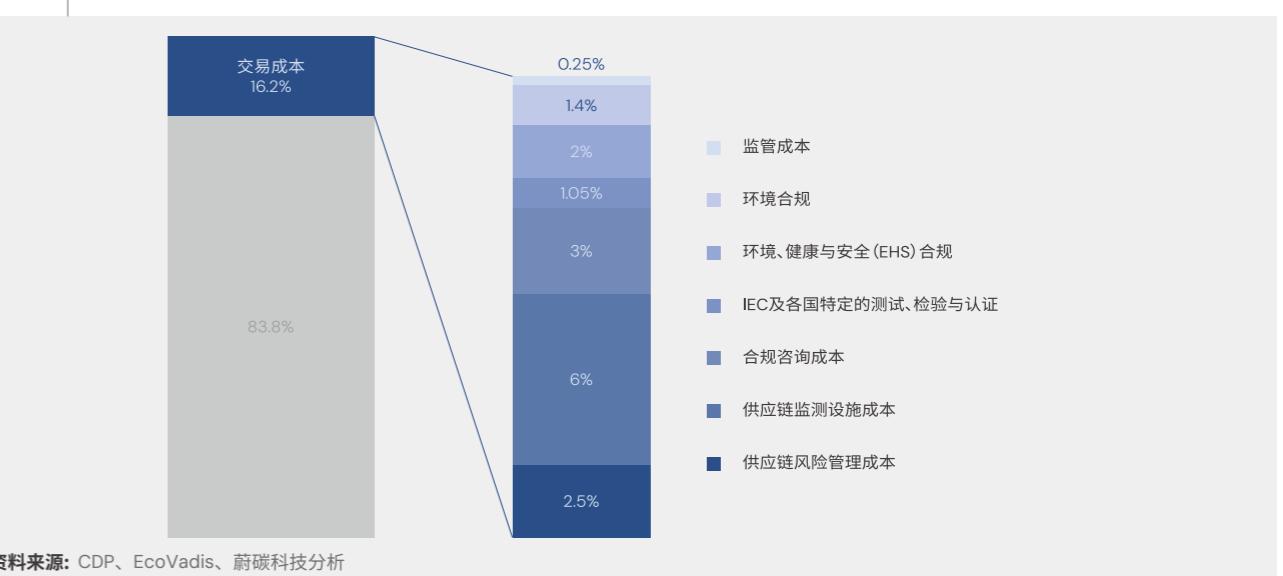
鉴于可追溯性在绿色供应链中的关键作用，多个国家和地区已采取积极行动。例如，欧盟出台《零毁林产品条例》(EU Regulation on Deforestation-Free Products, EUDR)，要求经营林产品的企业必须溯源至木材采伐地的地理坐标；新修订的欧盟电池法规规定，镍、钴、锂、铅等关键材料的回收过程需通过“电池护照”进行追溯。澳大利亚政府则正在构建国家级再生材料溯源框架，以提升进口产品的可追溯性与质量保证。

可追溯性的复杂度取决于供应链的时间跨度和组织边界。协调多源信息时存在标准不统一、沟通成本高、商业秘密泄露等风险，导致部分供应链参与者普遍存在数据共享意愿不足

的现象，特别是涉及原材料供应商、客户群体及生产工艺等核心环节时更是如此。世界钢铁协会数据显示，2021 年全球 41% (约 8 亿吨) 的粗钢产量来自年产能低于 800 万吨的中小型钢厂⁷⁴，其中多数小型钢厂缺乏可追溯基础设施，难以建立完整的数据档案。此外，钢材从生产到最终产品应用的周期可能长达数年，追溯时需依赖可靠、长效的历史信息存储系统，这对信息归档提出了更高要求。

在可持续发展数据精准度与供应链成本效率间实现“精益与绿色平衡”，是供应链当前面临的重要课题。碳足迹等环境指标的核算过程须在减少人工干预（以降低数据篡改风险）的同时确保精确性，优先采用政府认证文件、第三方审计报告及物联网设备等可信数据源。但此类技术手段在提升数据质量的同时，也推高了供应链管理复杂度与交易成本 (Transaction cost economics, TCE)。以电池产业链为例，约 16.2% 的行业收入消耗于合规认证、风险管理等衍生交易成本。

图 1.10 典型电池生产商的交易成本结构



除政府监管外，供应链核心企业（链主企业）同样是可追溯性升级的推动力量。这些企业凭借强大的采购话语权和议价能力，通过制定严苛的环境准入标准倒逼供应商体系升级。此外，此类企业正系统性地运用其生态影响力，构建覆盖全产业链的数据互联网络，通过可信数据支撑，确保端到端的可追溯性与可验证的可持续性。

案例 2

端到端供应链管理实践



全球工业技术领军企业施耐德电气构建了全方位绿色多元供应链体系，将电气化、自动化、数字化领域的技术积淀赋能于智慧工业、韧性基建、未来数据中心、智能建筑及家居生态。截至 2024 年中，其全球营收中的 74% 来自可持续影响收入，即通过能效提升、气候应对及资源优化创造的业务收入，并计划 2025 年将该比例提升至 80%。面对 2023 财年创纪录的 360 亿欧元营收规模及其庞大的供应链网络，施耐德电气将推动绿色供应链转型作为长期战略支点。

施耐德电气将端到端管理模式作为绿色供应链转型的核心框架，其关键在于打破行业惯常的碎片化管理模式（如仅关注供应商资质认证），转而构建贯穿产品设计、采购、制造、交付及运维的全链条绿色标准体系。

1. 产品设计端

施耐德电气从产品全生命周期环境影响视角出发，运用生态设计（Eco-Design）原则开发符合净零目标的可持续产品。例如，其采用干燥空气替代传统产品中使用的六氟化硫（SF₆），该气体的全球变暖潜力（Global Warming Potential, GWP）是二氧化碳的 23,500 倍，此举显著降低了环境负荷。

2. 采购制造端

施耐德电气实施供应商碳排放评估机制，仅达标者方可进入采购清单。其采购团队对铝材、铜材、塑料等关键原材料制定差异化的绿色标准。在制造端，企业通过数字化、循环经济与清洁能源加速推进“零碳工厂”建设，目前在中国已建成 19 家“零碳工厂”与 15 家“绿色工厂”，供应链能耗较 2019 年基线下降 15.5%。

3. 交付维护端

施耐德电气承诺 2025 年前全面淘汰包装中的一次性塑料，采用 100% 可回收纸质材料，并运用人工智能优化物流路径，力争 2025 年运输排放减少 15%。此外，其与供应链参与者战略共建绿色生态物流体系，依托软件与数字化工具提供 EcoConsult（生态咨询）、EcoCare（生态运维）、EcoFit™（生态改造）等全生命周期服务。

施耐德电气进一步将供应链实践外延至生态圈赋能。2021 年发起的“零碳计划”（The Zero Carbon Project）覆盖千家供应商，目标到 2025 年实现运营碳排放减少 50%。该计划提供战略咨询、技术导入、资源对接及现场工程支持，通过提供数字化碳管理、CDP (Carbon Disclosure Project) 披露支持、绿证采购及现场工程支持等解决方案，截至 2024 年已助力供应商降低运营碳排放 33%。

资料来源：施耐德电气，2024



“作为产业供应链引领者，施耐德电气的承诺不仅是实现 2030 年运营端碳中和，更致力于 2050 年达成端到端价值链的净零碳排放目标。未来我们将持续携手行业伙伴与社会各界，探索高效可持续的发展范式，担当可持续发展“影响者”角色。”

张开鹏 施耐德电气全球供应链中国区高级副总裁

认证机构作为连接生产者、采购方与监管方的第三方，通过验证标准合规性构建供应链的信任纽带。这类机构亦开始应用气候技术提升可追溯性。德国 TÜV 莱茵可持续发展服务总经理许秋明指出，TÜV 莱茵率先在棕榈油、再生塑料、电池及海洋废弃物等领域应用监管链（Chain-of-Custody）追溯管理技术，并通过绿电溯源数据校验、产品二维码追溯系统开发等创新实践，凸显专业服务机构在提升供应链透明度中的技术中枢作用。（关于认证机构运用气候科技确保可追溯性的深度分析，请参阅第四章第一节）

在产品出厂后的使用与回收阶段，可追溯体系仍然在发挥作用。值得注意的是，可追溯性体系可延伸至产品出厂后的使用与回收环节。消费品制造商日益重视终端使用场景的能耗数据追踪与再生材料流向监控，通过构建覆盖产品全生命周期的环境数据图谱，确保可持续承诺的闭环实现。

案例 3

追踪技术驱动低碳转型



全球卫浴洁具行业领军企业乐家集团（Roca Group），凭借横跨多国的制造与分销网络，以 2045 年实现碳中和的行业标杆目标为引领，构建起技术革新、智造管理与循环实践三位一体的可持续发展体系。

乐家集团通过部署全流程追踪技术，实现对运营过程中能源、水资源及原材料消耗的精准监测与优化调控，这项技术贯穿制造端与产品端：

1. 生产制造环节，乐家通过工厂全域计量系统（直连总部中央监控中心）实时追踪各生产环节的水气消耗、原材料使用及废料回收率。这种集中管理模式确保所有行动与其可持续目标保持同步，并精确把控目标达成进度。
2. 产品研发环节，乐家深入使用追踪技术。以智能马桶为例，内置水量监测系统可自动优化冲水当量；恒温龙头采用的 Quick Reaction® 快速反应技术、冷启动（Cold Start）模式及 Security 38° 安全温控系统，均基于流量追踪实现能效跃升。此类技术创新使产品资源利用效率提升并降低环境足迹。

乐家 2023 年综合报告显示，通过上述可持续行动已实现节能减排重大进展：较 2018 年基准，直接二氧化碳当量排放降低 50%，能源强度下降 57%，废弃物循环率达 69%。集团将持续推进技术创新，向 2045 碳中和目标迈进，引领卫浴行业可持续发展转型。

资料来源：乐家集团，2023 年



“实现碳中和目标不仅是企业愿景，更需要关键环节的持续投入与革新。我们正在推动从产品设计、生产制造、物流运输到回收利用的全生命周期管理模式转型，通过全流程追踪管理构建新型绿色运营体系。”

Guillem Pages 乐家中国董事总经理

难减排行业：规模化应用与降本挑战

钢铁、化工、水泥、炼油、航空及航运等难减排行业排放超30%的全球碳排放量⁷⁵。这些行业之所以“难减排”，主要因其依赖高温工艺、化石燃料及难以替代的化学反应路径。实现脱碳需突破财务、成本、市场与技术等领域的多重挑战。

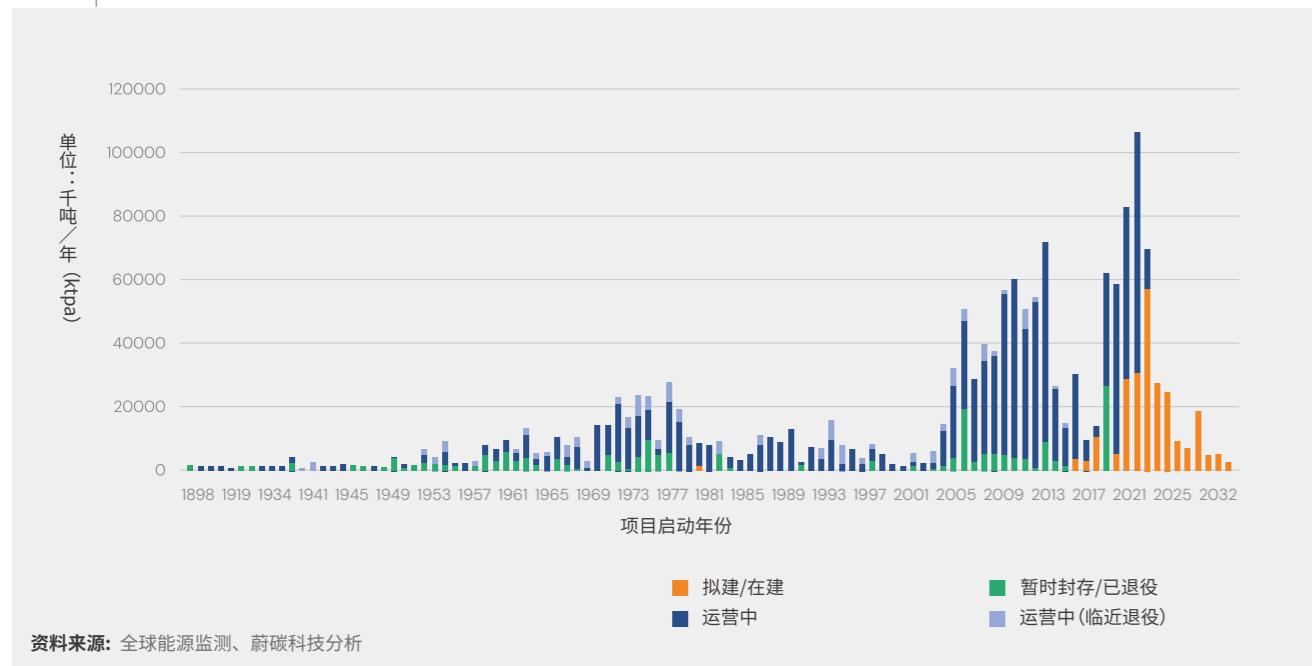
30%
难减排行业排放占全球碳排放量

本报告多数贡献者认为，难减排行业的破局关键并非依赖未知的气候科技突破，而在于现有技术的规模化推广与成本控制。部分行业或可通过技术进步逐步缩减绿色技术溢价——例如，至2050年基于可再生能源制绿氢的钢铁生产工艺有望比焦炭炼钢更具经济性。但实现这一愿景需依托大规模需求驱动的技术迭代，其核心任务在于筛选适用材料路径、优

化工艺设计并构建配套政策体系，将绿色技术成本压降至市场可承受区间。当前，绿色产能扩张面临两大显性障碍：存量设施改造与成本结构重构。

在钢铁、水泥等传统重工业领域，存量生产设施往往承载着巨大的历史投资，承担着庞大就业人口的生计，成为地方的经济支柱。以钢铁行业为例，最优脱碳路径需从高炉-转炉工艺转向电弧炉工艺，并整合废钢循环利用、氢基直接还原铁（H₂DRI）及碳捕集利用与封存（Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS）技术以实现近零排放。然而现实数据显示，全球现存高炉年产能至少达14.54亿吨，且新建产能仍在扩张——其中46%的高炉炉龄不足15年，按会计准则来看仍具有可观的账面残值。更值得关注的是，全球在建高炉年产能超2.8亿吨。尽管老旧设备残值有限，但其关停涉及区域就业稳定与产业生态重构，进一步加剧技术改造的复杂性。

图 1.11 全球高炉产能分布



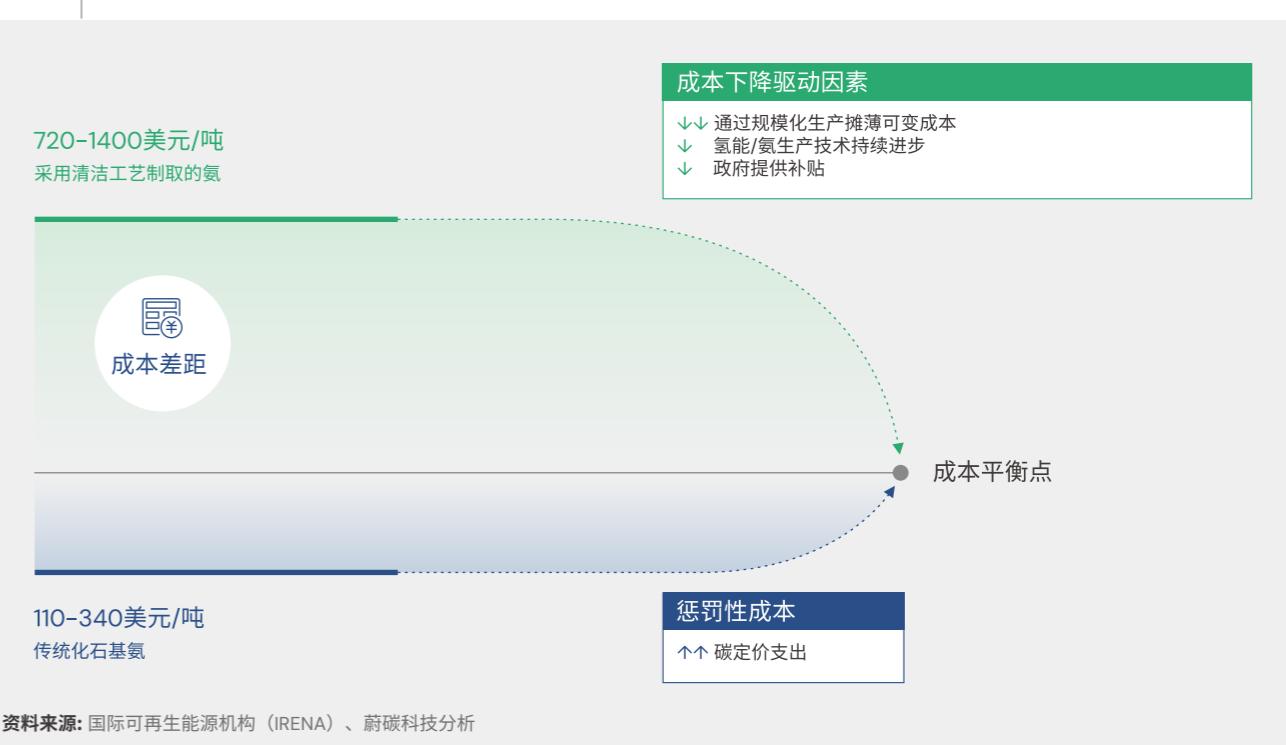
如果不能妥善应对生产工艺转型的复杂性，可能引发投资损失、大量失业、生产中断及供应链紊乱等连锁反应。从操作工、焊工到技术专员、销售代表的全产业链人力资源体系，均需通过技能重塑适应转型需求。例如，电弧炉工艺的推广要求卡车驾驶员掌握新型装卸流程与废钢回收规范；若实施氢基直接还原铁技术，则需额外培训涉氢运输安全规程。

成本结构重构是另一个难题。这些传统行业的成本结构历经长期优化，已逼近降本极限。要使绿色产品获得采购方认可，必须消弭其与传统产品的价差——这可通过降低绿色制造成本，或借助市场机制、政策调控及供应链规则调整抬高传统产品相对成本实现。

以绿色氨与传统化石基氨的价差为例：当前技术进步着力提升制氢与合成氨工艺能效，降低能耗；依托风能、太阳能等

可再生能源驱动的电解技术进一步压缩碳排放。政府补贴可缓解初期投资压力，培育产业生态；碳定价与排放处罚机制通过将环境成本内部化，削弱化石基氨的市场竞争力，从而激励工业界转向清洁替代方案，并催生融合可持续要素的新型绿色氨供应链合作模式。企业、政府与研究机构间的跨组织协作能驱动技术创新与成本下探，为绿色氨的大规模应用奠定技术基础与设施条件。通过将经济激励与环境目标深度耦合，绿色氨有望成为氨依赖行业的可行替代品，推动相关领域碳减排进程。

图 1.12 绿色氨成本平衡分析



为避免颠覆性改造导致的产能断层，业界主要采取渐进改良与产能迁移策略。渐进改良强调在既有设施基础上进行局部升级或关键设备替换，在维持连续生产的同时实现降碳目标。产能迁移则通过在新建项目中直接采用低碳技术，规避存量设施改造阻力，但需配套产业政策引导与区域经济协调机制。

案例 4 原位转型的钢铁生产路径



中国宝武钢铁集团（以下简称“宝武”）作为全球粗钢产量最大的钢铁企业，长期依赖传统高炉工艺（占其总产能的93.5%），在碳中和背景下面临严峻脱碳挑战。为此，宝武聚焦原位转型战略，通过多元技术集成对现有高炉系统进行低碳化升级。

宝武构建了内部“最佳可行控制技术（Best Available Control Technology, BACT）数据库”，系统梳理各环节脱碳最优解决方案，并应用于现有高炉系统的设备升级。例如，梅山基地采用烧结矿竖冷炉技术，在保留高炉核心工艺的前提下，余热回收效率较传统系统提升100%。

在避免新建产线的前提下，宝武探索高炉富氢冶炼路径。通过将富氢碳循环技术（Hydrogen-enriched Carbonic oxide Recycling Oxygenate Furnace, HyCROF）整合至现有高炉流程，采用焦炉煤气与超高氧冶炼技术注入方案，成功验证碳减排15%的潜力，为传统高炉适配现代环保标准提供技术范本。

除高炉优化外，宝武同步推进电弧炉等新型工艺研发。其开发的氢基竖炉技术以氢气替代碳基还原剂，直接还原铁矿石，目标实现炼钢流程净零排放。目前已在东山基地投资18.9亿元建设示范项目，并配套高效电弧炉打造国内首个零碳高等级薄钢板工厂。

宝武通过将前沿技术嵌入既有高炉体系，不仅回应了迫切的脱碳需求，更开创了重资产行业绿色转型的创新路径。这种原位转型模式证明，传统工艺可通过系统性技术改造满足可持续发展要求，无需全盘颠覆现有生产设施。

资料来源：中国宝武钢铁集团，2022⁷⁷



“中国宝武作为钢铁行业龙头企业，立志成为行业实现碳中和的先行者和引领者。通过推进绿色制造、强化技术创新、构建绿色产业生态，我们将打造新型低碳冶金产业链，推动钢铁行业绿色低碳转型。”

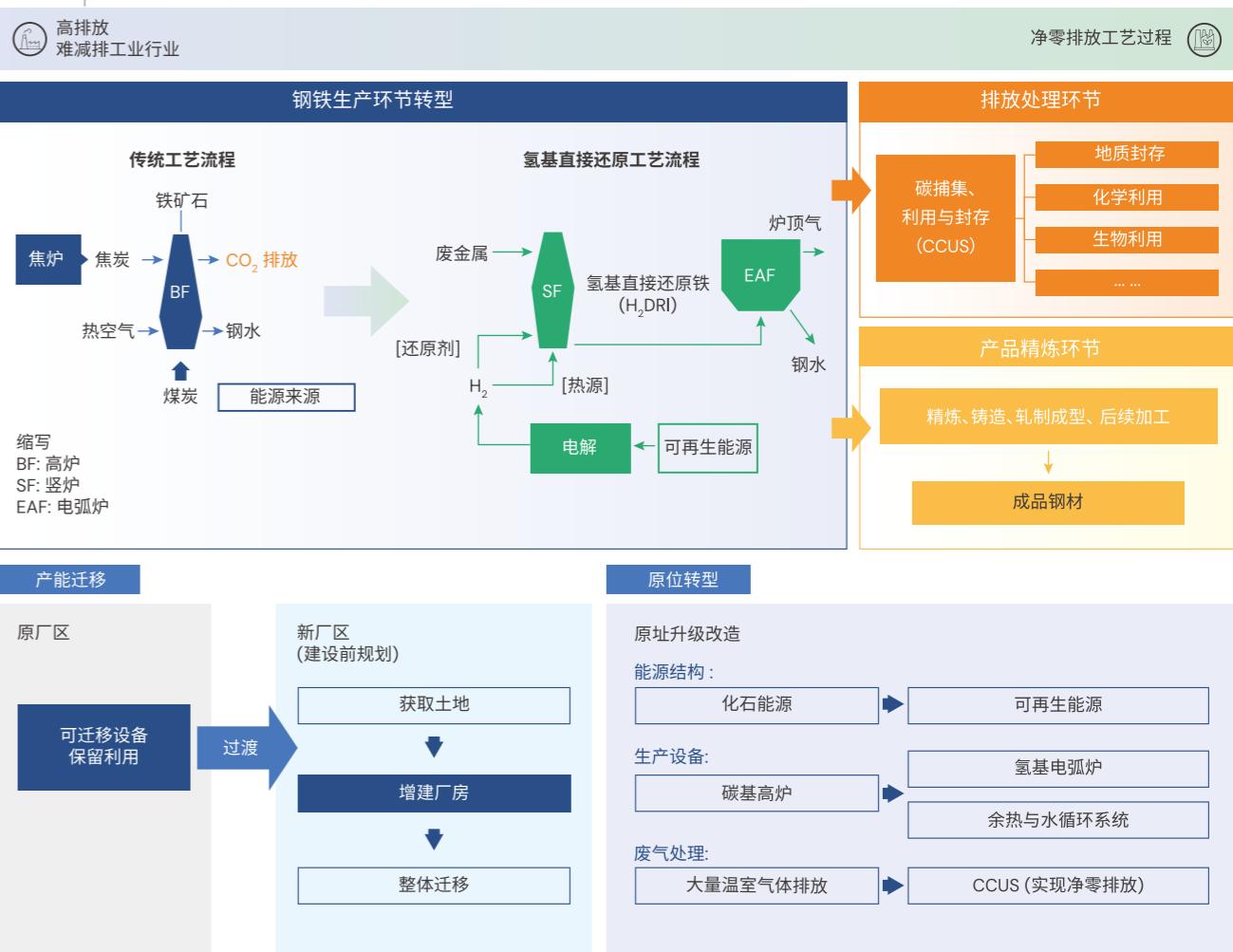
高建兵 中国宝武钢铁集团副总经理

产能迁移涉及新生产厂址的选定，以及将现有设施中的可复用组件整合至新址。该策略通过加速未安装组件的迁移、安装和投产，有效减少生产中断时间。通过分阶段转移设备及配套基础设施，企业既可维持生产能力，又可规避全面停产风险。此外，这种渐进式迁移模式还能促进先进技术与可持续实践的应用，最终提升运营效率并降低环境影响。

在此迁移过程中，气候科技创新通过三大途径发挥作用：实现组件高效拆装重组、升级现有组件适配数字化智能设施、

以及促进传统设备转型。以钢铁行业为例，技术进步使得高炉煤气净化系统或余热回收装置可改造应用于电弧炉，耐火材料也可通过新技术实现回收再利用。为实现与数字系统的兼容，创新型数字化改造方案（如夹装式流量计、插入式采样探头等）已实现非侵入式安装，无需对现有管道进行大规模改造。

图 1.13 钢铁制造厂转型流程



资料来源：Our World in Data, 蔚碳科技分析⁷⁸

从合规到卓越：可持续发展的进阶之路

此前的章节主要探讨以合规为导向的脱碳战略。合规虽然是基础，但本质上是采取被动迎合的姿态来推动可持续发展工作，这样的姿态是难以推动根本性变革的。

当前，大型企业集团已不再满足于被动遵守法规，而是主动

追求可持续卓越，建立并践行行业领先标准。这一转变源于社会压力，以及大企业在供应链与利益相关方网络中引发的连锁效应。在此背景下，中小企业也将可持续实践视为获取竞争优势与长期效益的机遇。

要推动更多企业投身可持续卓越，需深入理解背后的核心驱动力。仅靠社会责任或 ESG 指标并不足以形成有效激励——这些指标更多是衡量工具而非驱动力。真正的进步需要平衡经济价值与可持续性，确保利益相关方认识到这种实践对企业发展的助益。

动力揭示了一个核心原则：可持续卓越应与企业战略深度协同，而非停留于合规或公益层面。战略性地整合这些要素的企业往往能建立竞争优势，巩固财务韧性，从而在可持续转型中实现良性循环。

图 1.14 《财富》500 强企业气候相关承诺

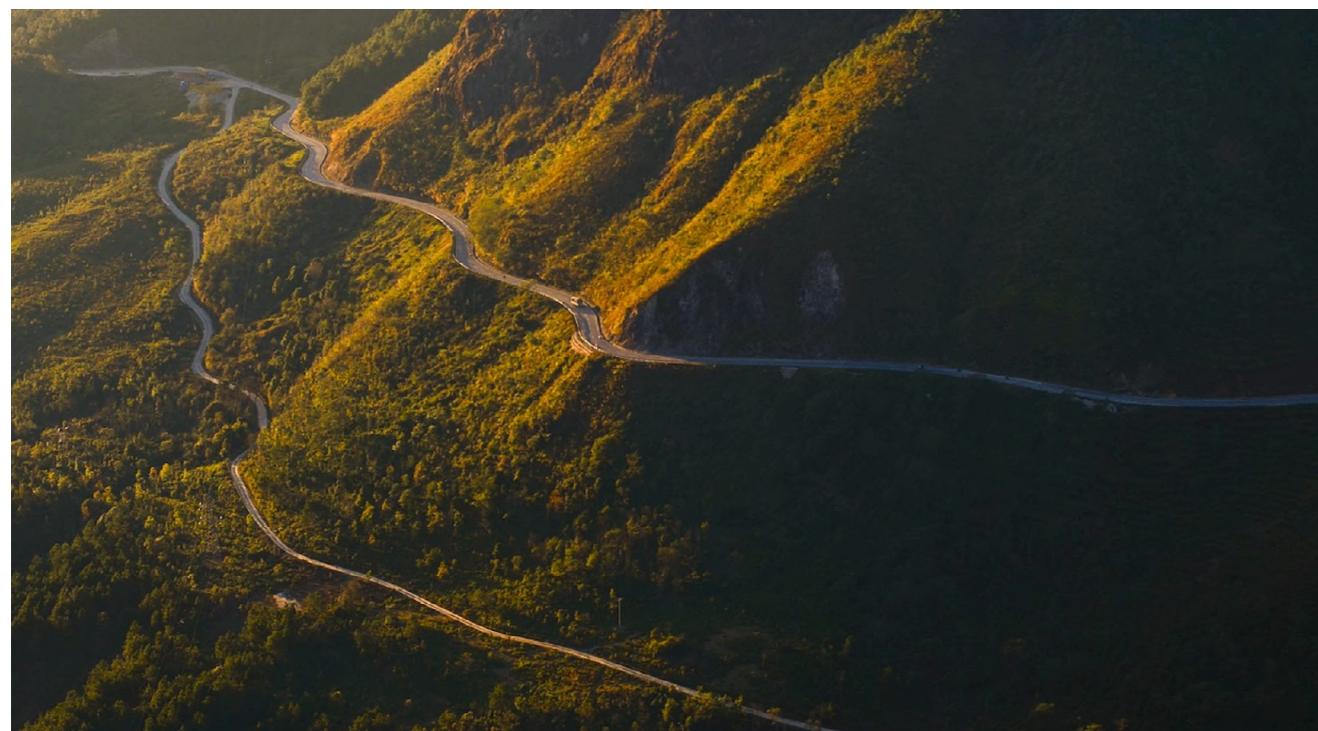
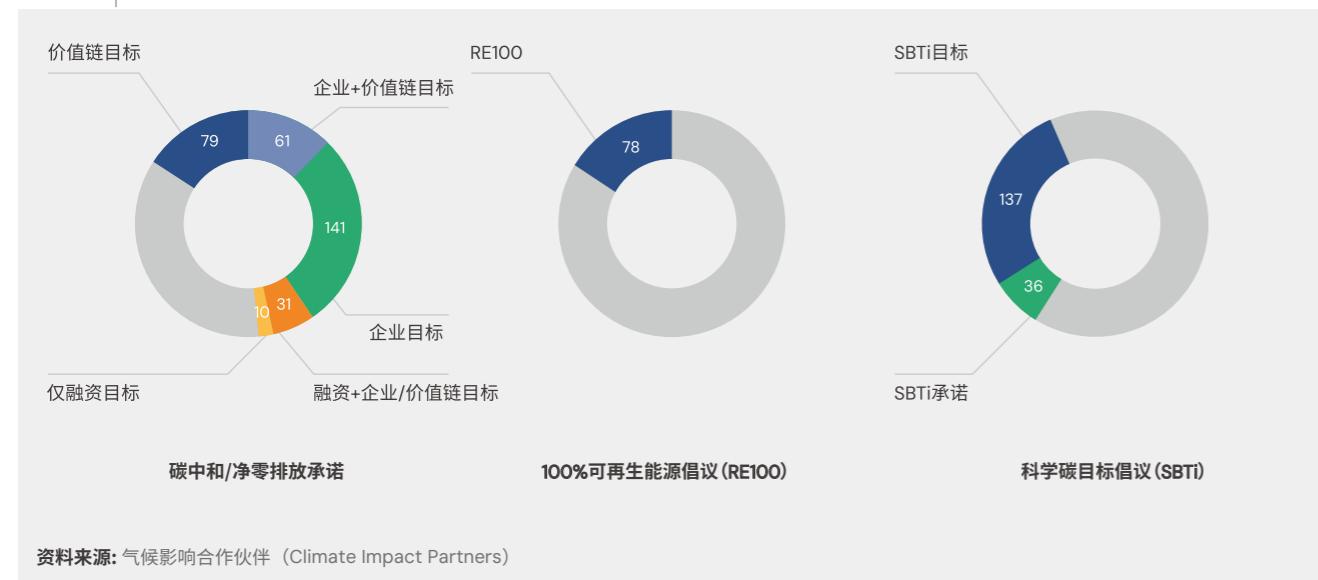


图 1.15 从合规到卓越的驱动要素

差异化品牌竞争力 与客户感知

可持续卓越实践有助于强化企业与品牌定位，提升客户认知度、信任感与价值共鸣。

“
我们通过电动化、智能科技与可再生材料的融合，将可持续理念注入品牌基因，塑造区别于传统豪华车企的差异化竞争壁垒，吸引具有共同价值观的目标客群。

李坤龙
路特斯科技首席财务官兼 ESG 委员会主席

构建气候、监管与供应链风险 的长期韧性

顺应全球绿色转型趋势，减少与气候、监管、供应链相关的风险。

“
投资者压力与法规变革正推动企业将可持续性纳入优先事项。通过践行 ESG 价值与脱碳承诺，企业不仅能规避声誉与运营风险，更能增强对气候及供应链风险的抵御力。

Warwick Smith 阁下
澳大利亚前联邦政府部长

开拓企业的第二 发展曲线

以可持续卓越探索未来增长机遇。

“
可持续已深度融入企业文化，是未来增长的关键要素。我们通过可持续发展实现持续改进与创新，以质量与效率提升保持企业进阶的领先性。

张开鹏
施耐德电气全球供应链中国区高级副总裁

其他驱动要素包括：

- 通过环境承诺强化投资者信任，拓展融资渠道
- 借助资源高效利用降低运营成本，改善盈利水平
- 构建可持续导向的工作环境，吸引并留存高素质人才

实现真正的可持续卓越要求企业将创新实践与品牌文化、设计理念深度耦合。合规导向的可持续策略往往呈现同质化特征，而追求卓越的企业则展现出突破性创新特质。

案例 5 汽车制造的可持续供应商管理



路特斯科技 (Lotus Tech) 作为豪华电动汽车市场的领军企业，致力于提供高端纯电动汽车解决方案。公司以研发下一代汽车技术为核心战略，重点布局电动化和数字化领域。随着消费者偏好向可持续智能出行方案转变，路特斯科技计划于 2028 年实现全面电动化与智能化转型，并制定了 2038 年实现全价值链碳中和的战略目标。

在可持续发展实践方面，路特斯科技通过与合作伙伴及供应商的深度协作，持续创新设计与生产工艺。公司重点采用可循环再生材料，已将 WYRON truecycled® 可再生复合材料与 Alcantara 复合材料等先进可持续材料应用于其产品体系。旗下纯电超跑轿车 Emeya 的材料可回收率达到 91.4%。更具创意的是，路特斯将历史 F1 赛车的再生铝材再造为典藏书写工具，将品牌传承与可持续发展理念深度融合。

2024 年推出的 Theory 1 概念车彰显了极简主义的设计哲学，创新采用 10 种核心 A 级表面材料，涵盖纤维素基玻璃纤维、再生碳纤维、钛合金、再生玻璃、再生聚酯、再生橡胶等兼具高性能与环保属性的创新材质。这一材料选择策略不仅延续了品牌经典的轻量化工程理念，更通过材料科学突破实现了可持续性飞跃。

在产品创新之外，路特斯科技构建了区块链赋能的数字化溯源平台体系。通过区块链溯源平台实现材料全生命周期追踪，建立全面的供应链调查机制。该体系既保障了供应链可靠性，也为服务高端客户群体提供了品质背书，树立了行业新标杆。

公司更率先开展行业首创的自然资源评估项目，与供应商共同识别原材料采购、装配、制造等环节的生态风险与机遇，推动再生材料使用比例提升及绿色能源转型。

资料来源：路特斯科技，2024



“
路特斯科技建立供应商可持续绩效量化体系，通过激励机制推动表现优异者，共同促进汽车制造全供应链绿色转型。

李坤龙 路特斯科技首席财务官兼 ESG 委员会主席

在消费品领域运营卓越实践中，企业正将可持续发展理念全面融入产品全生命周期管理。行业领先企业已形成共识：建立覆盖产品设计、生产、使用到回收阶段的完整可持续管理体系，不仅能有效降低环境足迹，更能显著提升品牌价值认同。通过精准构建气候友好型品牌叙事，企业得以与消费者价值观形成深度共鸣，强化可持续实践的市场感知度。

案例 6 运动鞋履行业的循环经济实践



全球运动鞋行业领导者耐克 (Nike) 始终致力于通过产品循环经济推动可持续发展。其标志性的“耐克创新环保材料 (Nike Grind) 计划”通过创新技术将退役运动鞋及生产废料转化为再生材料，构建了从产品回收到资源再生的完整闭环。这些再生材料用于建造全球贫困地区儿童的操场和跑道，同时被融入其他回收产品的设计中。

Nike Grind 主要以回收橡胶颗粒为核心成分，其研发过程需要攻克旧鞋材料分离、转化与合成的技术难题。为此，耐克与中国同济大学循环经济研究所展开合作，共同开发了针对废弃运动鞋的全流程循环利用体系。

该技术路径有效应对运动鞋回收处理的复杂性，同时拓展了耐克创新环保材料在多场景下的环保应用。截至 2024 年 8 月，通过耐克创新环保材料项目已累计生产 63.5 万吨再生材料，这些材料不仅应用于合作伙伴的产品制造中，更在全球逾万个项目中用于建造总计超 9.29 亿平方米的运动空间。耐克的可持续发展承诺不仅体现在运动场地的营造上——该项目还将再生材料创新运用于实体零售环境设计与员工工作场所建设。

该技术路线不仅解决了运动鞋多材料复合结构带来的回收难题，更使耐克创新环保材料材料的环境效益得到跨场景延伸。到 2024 年 8 月，耐克创新环保材料项目已生产了 1.4 亿磅的再生材料，这些材料被整合到合作伙伴的产品中，并用于建设全球超过 10,000 个项目中的运动空间，总面积超过 10 亿平方英尺。耐克对可持续性的承诺不仅限于运动场地；该项目还将回收材料融入到实体零售环境和员工工作场所的设计中。

耐克通过举办“旧鞋新生” (Recycle A Shoe) 计划，消费者参与并捐赠旧鞋，这些鞋子随后被转化为材料。该创新模式增强了消费者在耐克可持续发展努力中的参与度，在提升客户粘性的同时，成功塑造了“循环型设计+绿色商业模式”的行业典范。这种深度用户参与机制既响应了新一代消费者对可持续消费的期待，更通过品牌价值共振构建了差异化竞争优势，为耐克赢得长期市场领导地位提供了战略支撑。

资料来源：耐克公司，2024



“
我们欣喜地看到“旧鞋新生”计划正推动可持续理念融入大众日常生活。耐克将持续创新循环技术解决方案，在生态保护与赋能下一代发展领域创造更大社会价值。

常远 耐克大中华区供应链副总裁

气候科技市场格局

“

政府构建质量管理体系与流程标准，为产品采购方与开发者提供支持，从而营造资本良性流动的市场环境。要在低碳经济发展中保持竞争优势，我们必须加大对产业和企业的战略性扶持投入。正因如此，各国政府的政策导向也在发生深刻转变——若要在全球低碳市场占据一席之地，就必须确保本国产业具备足够的国际竞争力。

Matt Kean 阁下
澳大利亚气候变化管理局主席

评估气候科技的成熟度

气候科技焦点

气候科技横跨多个行业与技术领域，其创新扩散呈现多样化模式。理解这些模式需要聚焦气候科技区别于其他领域的核心特征，这些特征揭示了该领域创新传播的机制。这些认知不仅有助于把握气候科技发展现状，更能为预测 2030 年前可能实现显著增长与规模化应用的技术提供依据。

气候技术创新扩散的一个重要因素是替代程度。替代可以是完全替代，例如绿色电力和替代燃料技术，这类技术通过与传统能源相同的物理化学属性实现直接替代；也可以是部分替代，如电动汽车和可持续农业技术，其产品功能具有可比性，但在性能、外观、消费者认知或健康效益等方面存在独特差异。另有一些气候技术（如绿色认证、气候金融或碳捕集技术）并不取代现有产品，而是提供补充性服务或独立解决方案。

技术成熟度（Technical Readiness Level, TRL）主要影响高替代效应的产品。对于这类产品而言，消费者几乎仅将成本作为与传统替代品对比的考量因素。成本不仅包含直接定价，还涵盖间接价值因素：政策惩罚性成本与激励性收益、

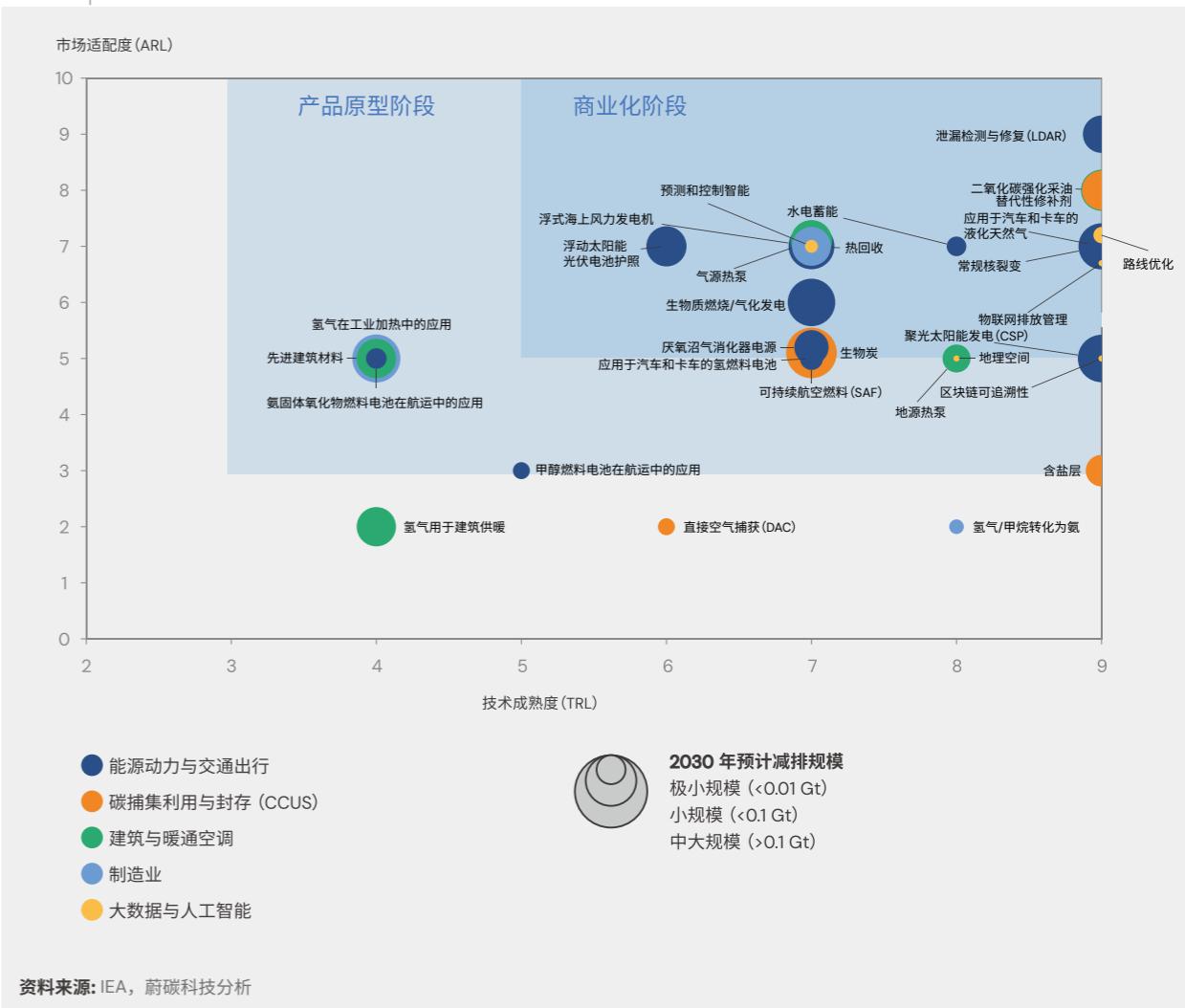
公众认知带来的品牌溢价或减值风险、政策连续性引发的投资确定性评估、风险管理成本与低碳转型的机遇成本。这类技术的采用通常始于政府与重视间接价值因素的大型企业发起的试点项目，而中小型企业往往在直接政策激励出现后才会跟进。当技术就绪度突破临界阈值后，市场将推动成本大幅下降并实现指数级扩张。

市场适配度（Adoption Readiness Level, ARL）主要影响低替代效应的产品，包括消费品及独立气候解决方案（如直接空气碳捕集，以及与可持续认证、投融资、碳监测、碳报告、碳核查等相关的服务）。这类技术的核心在于市场是否达到足够的成熟度，从而让客户能明确感知这些解决方案在创造更多收入、优化成本收益结构等方面的价值。

本报告通过考察两个关键指标对气候科技领域进行量化分析：技术成熟度评估气候技术方案能否达到成本效益临界点，市场适配度则衡量这些方案创造客户感知价值并获得市场接纳的能力。



图 2.1 气候科技关键技术成熟度



要实现 2030 年脱碳目标，需双轨并进：既推动成熟技术大规模落地，也培育渐露锋芒的创新方案。太阳能、风能、核能等主力军已在物流航运、工业制造领域形成完整应用生态，凭借技术成熟度与减排实效性，这些可再生能源的规模化应用将成为全球减排的中流砥柱。

在传统技术持续发力的同时，可再生能源创新领域正孕育新突破。浮式海上风力发电机与浮动式光伏电站加速商业化进程，为规模化清洁能源开发开辟海陆空立体战场，进一步瓦解传统能源的地域垄断。航运业燃料革命同样值得关注，甲醇等替代燃料的应用标志着物流体系的低碳化同样如火如荼。

氢能技术版图持续扩张，燃料电池在多领域逼近商业化临界点，其应用场景的延展性正在破解高排放行业的脱碳困局。在能效提升战场，空气源热泵等热管理方案通过系统级创新实现能耗瘦身。更值得注意的是，大数据与人工智能正化身为“减碳加速器”，通过能源系统优化与智能决策赋能，让传统减排手段获得指数级增效。这五大技术矩阵的协同演进，实际上构建了覆盖能源生产、传输、消费全链路的碳中和解决方案体系。

气候科技广泛应用的动力和阻力

要提升气候科技的技术成熟度，关键在于把握全球不同区域技术演进的特殊规律，既要捕捉驱动要素，也要破解制约瓶颈。

资金投入仍是气候科技发展的核心驱动力。2023 年数据显示，北美地区吸纳了全球最大规模的气候投资，欧洲与中国紧随其后。从赛道分布看，交通出行与能源革命两大主战场吸引了逾三分之二的资金⁷⁹，但区域布局呈现显著差异：在欧美成熟市场，资金分布呈现多元化特征，覆盖领域更为广泛，其中欧洲工业领域获得的气候投资占比明显高于其他地区；而亚太与中国市场正经历结构性调整，投资重心从交通赛道向能源转型及新兴领域迁移的趋势愈发明显。

“
气候变化战役的胜负手在于亚洲。

张星博士
亚洲基础设施投资银行高级气候政策专家

总体而言，减排潜力大的技术不一定融资规模大。比如，绿氢等减排潜力较大的技术仅获相对比较少的初创投资，而减排潜力相比有限的轻型电池电动车却因为其市场化程度高而占据最大投资份额⁷⁹。为了弥合这个缺口，政府贷款等公共融资可缓解高资本需求，撬动私人投资。美国能源部贷款项目办公室（Loan Programs Office, LPO）提供超 4000 亿美元贷款额度，支持可再生能源与先进核能项目，降低私营投资者顾虑。欧盟通过欧洲投资银行（European Investment Bank, EIB）计划 2030 年前动员 1 万亿欧元投向气候项目。此类政府担保贷款机制降低高资本项目的风险，吸引私人资本参与清洁能源转型。

政府贷款仅是解决方案的一部分，实现全球气候目标需大幅增加公私部门投资。为实现 2050 年净零排放，全球清洁能源及相关技术年投资额需提升至 6.7-7 万亿美元⁸⁰，未来几十年累计投资近 200 万亿美元。这些资金将加速可再生能源、碳捕集封存、制氢及先进核能技术的部署。

尽管气候科技发展势头强劲，其规模化落地仍面临技术、资金、监管与社会的复合型挑战。从技术维度看，光伏与风电已形成成熟体系，但氢能炼钢等工业应用成本仍数倍于传统工艺，碳捕捉技术尚未跨越商业拐点，风光发电的间歇性缺陷更凸显储能技术的战略卡位价值。从财务角度来看，一个不可忽视的阻碍是各类绿色项目巨大的初始投资。目前全球

气候科技的投资规模距离 2050 年前达到净零排放目标所需的 6.7 万亿美元相去甚远。对于发展中国家而言，投资风险更高，政府和民营投资动力更不充足，相关激励也不够。对于发达国家而言，虽然许多规则的确立已有进展，但依然存在政策的不完备性。基础设施同样需要巨额投资，更需要产业和政府之间加强合作。破解这些困局需要构建多方协同机制——政策端打造连贯稳定的制度，资本界强化对前沿技术

的早期押注，社会层面加速培育绿色文化，共同推进全球净零目标的达成。

6.7 万亿美元

全球清洁能源及相关技术年投资额需提升至



从实验室到工厂，加速市场化进程

技术成熟度与市场适配度的深度解析揭示了气候科技产业化跃迁的特殊规律。本报告的多位贡献者指出，来自高校实验室的创业团队常常面临商业化挑战。部分科研人员可能过度专注技术研究，或寄希望于孵化器和风险投资基金解决市场推广与融资问题，从而将精力集中于技术突破。但多数受访者认为，气候科技创业需要复合型能力——尤其是市场开拓、政府协作与投资者关系管理能力同样不可或缺。

绿动资本董事长白波博士指出，科研人员往往聚焦于技术可行性提升，但科技企业的成功更依赖创业者的韧性和灵活解决问题的能力。单纯追求学术价值的研发可能脱离市场需求，有效的技术转化需要跨学科协作，将基础研究者与具备产业实战经验的专业人士结合，形成多元化团队。

当团队存在能力短板时，需要引入专业服务机构。清华大学气候变化与可持续发展研究院院长李政博士指出，亟需搭建连接融资、补偿、补贴、税收优惠的资源整合平台，更需要经验丰富的专业人士协助学者将研究成果转化为可量产的工业产品。同时，来自专业从业者的支持对产品推向市场也同样重要，高校可通过设立技术转移办公室（Technology Transfer Office, TTO），由专业团队协助科研人员管理知识产权和商业合作。

技术从实验室到产业化的过渡需要支持机制，尤其是风险投资与政府支持的结合，以帮助技术在特定行业实现应用突破。此外，其成功还依赖于建立适当的规则和机制。停留在实验室阶段的技术风险往往超出早期风投的承受阈值，因此必须通过创新机制弥合这一鸿沟，缩短早期测试与原型开发的路径。

监管沙盒在受控监管下为技术测试提供场景，使创新者能够在真实环境中试验新技术和商业模式，同时确保符合现有法规。在绿色技术领域，智能电网和新型燃料是典型例证：智能电网或微电网的影响通常只能在互联电网中测量，但现行的集中式电力监管框架可能限制其动态定价机制运行。通过设定边界条件的沙盒测试，政策制定者既能观测新技术对能源系统的真实影响，又能逐步调整法规以适配提升可持续性与效率的技术。对于氢燃料等新型能源，监管沙盒为科学证明安全的测试提供机会，允许在未完全符合现行标准的情况下进行真实场景验证。2019 年韩国批准部分放宽限制的加氢站（包括国会大厦示范项目），即展示了这种支持气候科技发展的监管创新。

概念验证基金（Proof of Concept Fund, PoCF）作为风险投资的一种形式，专注于填补从研究到技术可行产品的资金断层。这类基金通过早期注资验证新技术的技术可行性与商业潜力，帮助降低项目风险以吸引更大规模投资。这种“风险共担+专业陪跑”的模式，与气候科技长周期、重资产的产业化特征高度契合。通过支持初期开发与市场测试，PoCF 使初创企业能够证明其创新的可行性，从而增加获得后续投资的机会。

图 2.2 概念验证基金的典型工作流程



概念验证（Proof of Concept, PoC）的实施需要极高的风险承受能力，因其失败概率较高，需要拥有“快速试错，有效容错”（又叫“错得快、错得好”，fail fast, fail well）的心态和理念。一时的成功通常掩盖了问题的症结，失败则往往能得到宝贵的经验和价值。同时，概念验证机制可帮助早期淘汰不可行方案，避免将大量资金投入最终缺乏商业可行性的项目。

政府主导的协同机制为概念验证提供核心支撑。鉴于概念验证的高风险属性，多数此类计划由政府机构提供支持或直接管理。这些基金通过双重路径维持可持续运作：一方面为初期项目提供有限但充足的资金支持，并配备经验丰富的专家团队协助制定技术路线；另一方面，即使面对初期试验失败的情况，仍持续跟踪具有潜力的细分领域企业。更重要的是，项目失败积累的行业认知转化为对可行商业领域的深度洞察，使基金在后续投资中获得先发优势。启迪之星亚太首席执行官陈垚卉指出，当前存在市场化基金与政府联合设立概念验证基金的创新模式，此类合作机制将产业专业能力与政府扶持绿色产业的职能深度耦合。在监管框架下，此类资金以定向投放方式确保资源精准配置与合规使用。

重工业巨头构建开放式技术试验场。大型工业集团通过在自有工厂内设立实验室并向第三方开放，为钢铁、汽车、铝业等难减排领域的技术测试创造实体场景。由于测试设施必须依托实际生产环境，其高昂的运营成本往往超出创新者的承受能力。通过提供这些工业级测试平台，新技术得以在真实生产条件下验证技术经济性。与此同时，企业借此提前捕捉技术变革趋势，并优先获取风险投资机会。基于对技术原理及工厂适配性的深度理解，企业能够以较高确定性进行战略投资。

总而言之，制度创新驱动气候科技产业化突破。气候技术的成功商业化本质上要求技术突破、商业洞察与制度设计的系统协同。除资金投入与科研攻关外，跨学科能力整合与精准机制设计在连接实验室与市场过程中发挥枢纽作用。通过构建政府-市场协同的验证体系、工业级技术测试平台等系统化路径，能够有效突破商业化瓶颈，推动具有全球影响力气候解决方案加速落地。

重点领域深度解析



“

非洲正面临公正转型的挑战。南非拥有大量优质化石燃料资源，向绿色技术转型时必须统筹考虑燃煤电厂处置问题。这需要系统性规划、资金支持与专业能力支撑。

Mohammed Dangor 阁下
南非国会议员

大数据与人工智能

人工智能（Artificial Intelligence, AI）在供应链管理中可模拟甚至超越人类智能的响应与决策能力，尤其在处理海量数据与实时优先级判定方面展现优势。本报告多数受访者认可人工智能对供应链管理的变革潜力，但也指出实验室方案与工业应用间存在断层。基于当前市场现状，识别能创造实际价值的特定应用场景，或将成为人工智能服务与产品成功的关键突破点。

除算法升级外，早期数据流动可显著提升模型性能。先期需求预警（Prior Information Notice, PIN）系统在实际需求到达前捕获信息，与人工智能集成后增强预测精度。这种协同形成动态反馈循环：来自人工智能的洞见可有效指导数据采集需求构建，通过优化算法显著提升对供应链短缺、物流延误等问题的预测判断能力。该系统的落地实施需依托完善的数据治理体系及基础设施支撑，保障从数据采集、处理到

应用的全链条数据质量、一致性与可用性。虽然并非独立解决方案，但通过将先期需求预警机制与人工智能技术深度融合，该系统已成为应对现代供应链复杂性挑战、保持业务动态响应能力的核心赋能手段，为企业在不确定环境中构建风险抵御能力提供关键支撑。

供应链管理中的预测与控制智能

当代的人工智能技术被广泛应用于解决可持续性和效率问题，许多应用已经达到了成熟阶段。人工智能中的预测和控制智能功能通过模式分析来预测事件，例如恶劣天气和市场需求波动，从而使供应链能够主动适应。这些预测和控制元素可以独立运作，例如采购智能中的市场趋势预测，或者协同运作，如在工业环境中展示的模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）。

预测分析，专注于预测未来的供应链指标，如库存、需求、维护和能源使用，在指导决策方面尤为重要。早期的机器学习方法，如长短期记忆（Long-Short Term Memory, LSTM），侧重于学习历史的重复趋势和动量，并广泛应用于预测周期性事件，例如季节性需求激增或每天电网使用的波动。这种方法有用，但存在一个逻辑谬误，即相关性不代表因果性，并且需要消耗大量的供应链数据，而这些数据的获取可能既昂贵又耗时。最新的预测分析算法则侧重于迁移学习，利用更复杂的预训练基础模型，减少额外的训练数据，并提升推理能力的可转移性。使用多模态的大语言模型（Large Language Model, LLM）能够在最早的时刻捕捉并处理异构的现实世界供应链数据，减轻了手动数据清理和标准化的压力。控制智能通过对供应链过程采取行动进一步挖掘数据价值，如路线优化，从而减少燃料消耗和排放。

世界经济论坛循环经济倡议前负责人叶强生指出，计算机视觉（Computer Vision, CV）与分类算法在库存识别分拣等场景的应用持续深化。随着生成式预训练模型（Generative

Pre-trained Transformers, GPT）的发展，传统专用预测、控制与识别模型可被封装为智能体，由生成式预训练模型大语言模型协调调度，形成“大语言模型-智能体”架构。该框架使人工智能在保持通用推理能力的同时，精准执行专项任务。检索增强生成（Retrieval Augmented Generation, RAG）技术通过接入数据库与搜索代理扩展知识库，为领域知识提供海量信息支撑。这些AI驱动系统标志着供应链管理向更高自主性与可持续性迈进，技术演进将持续提升效率与环保效益。

尽管取得进展，人工智能在供应链中的规模化应用与跨系统复用仍面临重大挑战。供应链系统的固有波动性使许多企业低估相关成本与复杂性。多数人工智能技术针对特定场景、区域或模型集训练优化，而不同供应链的动态特征、法规与基础设施差异，导致规模化或复用时需大量重新校准，甚至完全重新设计算法。市场亟需更先进的校准与迁移学习技术以降低扩展成本。例如，单个工厂与互联工厂群的暖通空调（Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC）优化器需构建截然不同的复杂度模型——简单场景下模型训练快速收敛且样本外表现良好，但多因素复杂场景仅能寻求局部优化，并需警惕过拟合风险。此时，元启发式方法（如深度强化学习、遗传算法、粒子群优化）能有效实现启发式局部优化。人工智能规模化还意味着算力需求分散化，需借助边缘计算技术^{81,82,83}。

案例 7 人工智能驱动能源管理平台



作为全球技术与服务领导者，博世集团将可持续性纳入核心战略。自2020年以来，博世其全球400余个基地实现范围一与范围二排放碳中和，主要依托四大举措：提升能效、生产可再生能源、采购绿电及碳信用抵消。

中国作为博世最大海外市场，持续推进能效提升。2023年，博世中国实施近220个节能项目，节能量达27吉瓦时。通过应用人工智能等先进技术，其在能源管理与工艺优化领域取得显著进展。

以生产柴油喷射系统的青岛工厂为例：传统节能措施潜力趋尽后，工厂引入人工智能解决方案。能源管理平台显示冷却系统能耗占比超15%，遂部署员工自主研发的人工智能系统优化制冷机组运行。该系统分析历史数据，结合实时天气与冷却需求动态调整温度设定点，在24小时连续生产中将能耗降低至少10%。该方案已推广至无锡、西安与武进工厂进行规模化应用。

资料来源：博世集团，2024



“
可持续性是驱动博世业务发展的核心战略之一。我们致力于推进产品、技术与运营的绿色转型，并协同全供应链构建更可持续的未来。

徐大全博士 博世中国总裁

基于物联网与地理空间技术的排放追踪

精准排放监测是激励供应链参与者、推动绿色供应链活动的核心。然而，高精度往往伴随高成本，在农业、采矿及部分工业等场景广阔或环境复杂的领域尤为显著。精度与成本的权衡主要取决于商业敏感性：例如，涉及多元实体的投融资

组合碳核算常面临精准活动数据获取限制，因此更倾向选择快速低成本方案；而认证、贸易合规及绿色资产交易等商业敏感活动通常需更高精度。

图 3.1 按准确度划分的排放追踪方法



以连续排放监测系统（Continuous Emission Monitoring Systems, CEMS）与物联网为代表的自动化追踪技术，通过自动化数据采集、排放计算及监管报告，实现温室气体排放的精准监测。该技术不仅提升精度，还通过减少人工干预提高数据可信度，避免无意干扰、数据造假或环保欺诈。多国已强制要求将连续排放监测系统数据与监管机构实时联通，以监测二氧化碳或甲烷排放，该模式此前已应用于二氧化硫、一氧化氮等空气污染物的成熟监管体系。数据分析中，通过整合多种人工智能技术，系统可实现异常状态的智能侦测、支撑预防性维护决策，并将海量数据自动转化为标准化合规报告。

温室气体（尤其是二氧化碳）的测量基于其对特定波长光线的吸收特性。工业场景中，非分散红外（Non-Dispersive Infrared, NDIR）传感器与紫外差分吸收光谱（Ultraviolet Differential Optical Absorption Spectroscopy, UV-DOAS）是主流技术：气体成分简单时多采用非分散红外，复杂混合气体则适用紫外差分吸收光谱。对于更复杂的需求，可能还需要借助傅里叶变换红外光谱（Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR）与可调谐二极管激光吸收光谱（Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS）等技术。

图 3.2 使用传感器的排放追踪



在物联网系统难以密集部署的农业及部分采矿场景中，地理空间技术成为经济高效的替代方案。该技术通过卫星、航空器或无人机获取电磁波信息：激光雷达（Light Detection And Ranging, LiDAR）无人机用于测算造林工程的碳汇量；合成孔径雷达（Synthetic aperture radar, SAR）通过分析

水面深度、坡度与流向模拟水稻生长条件；热红外传感器（Thermal infrared sensors, TIRS）通过温度波动推断制造工厂运行状态。采用这类地理空间技术，可以帮助我们更容易获得碳核算所需要的数据，从而助力实现减排目标。

图 3.3 地理空间分析带来的核心价值



地理空间分析的核心在于整合更多样化、更精确的传感器。最新民用成像卫星已达到 50 厘米级极高分辨率 (very high resolution, VHR)，通过融合多光谱数据通道，用户可构建生态与生产条件模型获取全面洞察。

图 3.4 地理空间分析中使用的渠道和传感器

可见光	全色	用于观察地面轮廓并监测卡车数量、仓库库存等要素，有助于评估企业的生产和运营状况。
	多光谱	用于检测地面颜色特征，如烟雾颜色和积雪覆盖，以减少数据误差和干扰。
高光谱	高分辨率光谱成像	用于估算地表和大气特性，包括温室气体、温度和地表状态。
	热红外传感器	用于测量温度特性，并推断生产条件和燃料燃烧情况。
	成像紫外光谱仪	用于评估臭氧层污染及特定气体 (如 SO_2) 的浓度水平。
	短波红外	通过吸收光谱分析大气中二氧化碳的浓度。
雷达	合成孔径雷达	可用于创建三维地形模型，评估地形和湿度，并分析工业活动，重点关注碳排放与生产要素的关系。

来源: 蔚碳科技

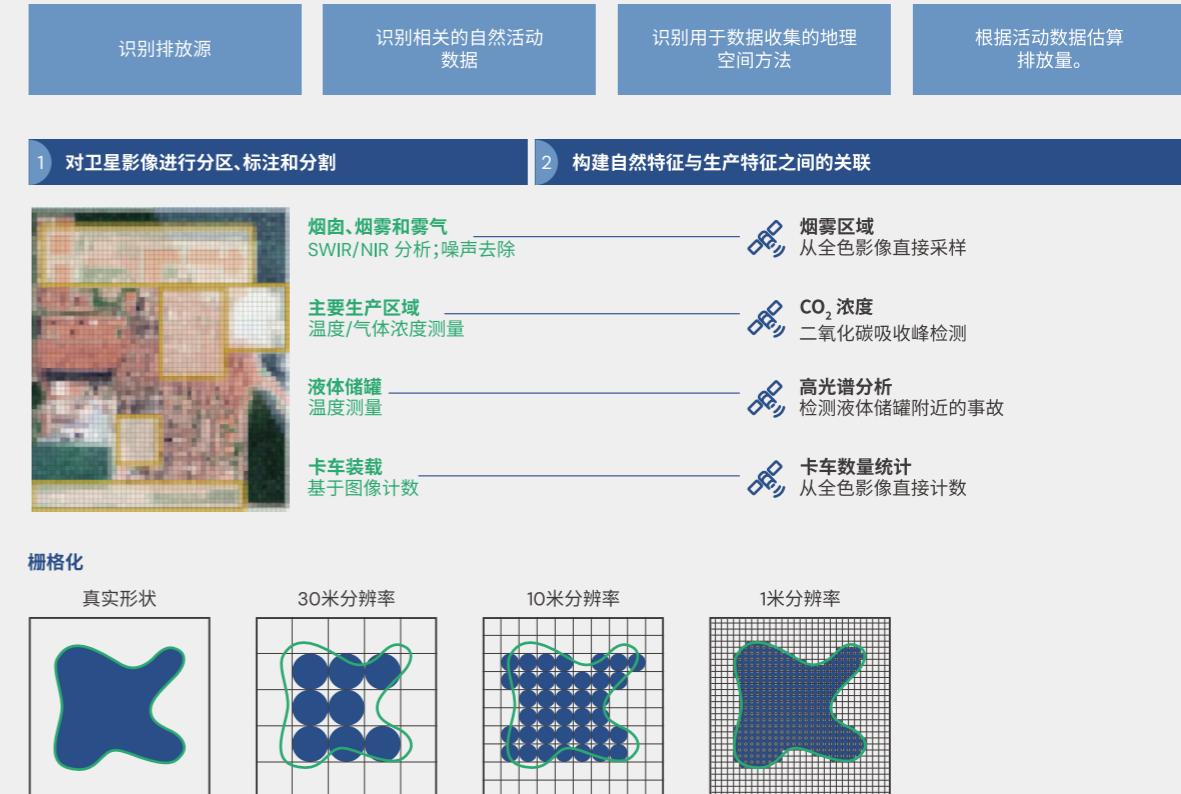
地理空间分析通常同步构建生产活动模型，将遥感获取的自然特征与生产工艺及指标关联。此类模型可识别排放类型、来源及位置，形成清晰的排放图谱。受雨雪等气象条件影响，需通过标准化处理消除其对数据视角的干扰。

气候
科技
焦点



图 3.5 生产活动建模过程

生产活动建模过程
将自然特征转换为产能、燃料消耗和负载系数以计算排放量的过程



栅格化有助于数据降维，以便进一步分析。
包括通过像素化处理图像，并利用傅里叶分析解析波动和趋势。

资料来源: 谷歌地球⁸⁴、蔚碳科技分析

传统计算机视觉算法仍主导地理空间数据分析，如频谱分析中的小波与傅里叶分析、碎片去除及地面监测。人工智能技术的引入增强了异常事件早期预警能力。除排放预测外，地理空间技术还可预警严重空气污染、洪水及海上事故等气候相关灾害。

传统能源系统的脱碳化

“
碳捕集、利用与封存技术有望成为泰国脱碳行动的关键突破点。凭借充足的技术与资金投入，我们预期碳捕集、利用与封存项目将取得成功。

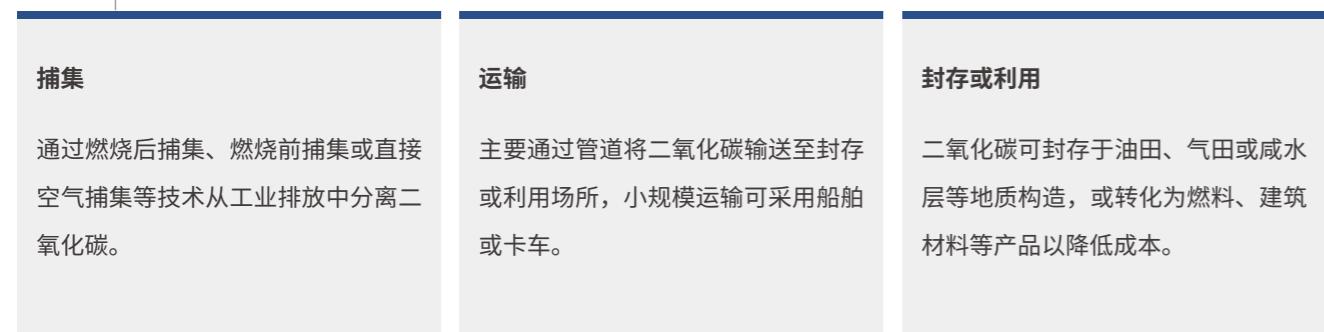
Twarath Sutabutr 博士
泰国知识管理发展办公室主任

碳捕集、利用与封存技术进展

碳捕集、利用与封存技术通过捕集工业活动、发电厂或空气中的二氧化碳实现减排⁸⁵。捕集后，二氧化碳可封存于地质构造，或用于化工生产、建筑材料制造等流程。该技术作为直接减排手段，通常无需对现有设施进行大规模改造，尤其适用于钢铁、水泥、化工及化石燃料发电等难减排领域。

气候科技焦点

图3.6 碳捕集、利用与封存流程



碳捕集、利用与封存商业化面临捕集、运输及封存成本高昂的挑战。工业流程捕集成本为 50 至 150 美元/吨，直接空气捕集成本高达 600 美元/吨⁸⁷。大规模二氧化碳管道网络主要用于连接工业中心、发电厂等排放源与油田、咸水层等封存地，长距离管道建设成本巨大。无管道地区可选择船舶运输至岛屿或沿海⁸⁷。寻找稳定地质构造实现永久封存需前期投资。

50-150 美元/吨

工业流程捕集成本

由于民营企业难以仅凭市场收益支撑项目，政策与监管支持对碳捕集、利用与封存发展至关重要。美国通过 45Q 税收抵免政策为封存二氧化碳提供 50 美元/吨补贴，提高石油采收率项目补贴 35 美元/吨⁸⁸。欧盟排放交易体系通过碳定价机制提升碳捕集、利用与封存经济吸引力。除政策支持，龙头企业也直接投资大型碳捕集、利用与封存项目。例如挪威“北极光”项目由道达尔能源、挪威国家石油公司和壳牌投资，将欧洲工业二氧化碳经船舶运至挪威，注入北海海底封存场，年封存量达 150 万吨⁸⁹，并具备扩展潜力。长期监管

稳定性是降低投资风险的关键，税收抵免、碳信用、公共投资等激励措施可加速碳捕集、利用与封存商业化进程。

材料科学进展提供了无需运输二氧化碳的替代方案。生物炭通过有机废弃物热解制成⁸⁵，除固碳外还可提升土壤肥力、促进微生物活动⁸⁶，助力气候适应及其他可持续发展目标。



电网现代化与储能系统

随着可再生能源在全球能源结构中占比提升，电网现代化势在必行。传统电网基于相对稳定的化石能源发电设计，难以应对风能、太阳能等清洁能源的间歇性特征。清洁能源时代的电网需推进数字化，并增强调节功能以平抑供需峰谷。

现代电网数字化实现了各单元容量的自动化监测与控制。传统控制模式依赖数字化设备被动监测波动并响应，而先进数字化技术通过人工智能预测需求，主动调节发电量与供需平衡，从而降低化石能源依赖。现代电网还可协调屋顶光伏、家用电池等分布式能源设施，形成效率与减排协同优化的系统生态。

作为现代电网另一核心要素，虚拟电厂（virtual power plant, VPP）通过储能系统充放电缓解清洁能源波动性。抽水蓄能与飞轮储能因扩展性强、原理简明成为主流技术。抽水蓄能当前占全球长时储能 90% 以上，预计未来五年年复合增长率约 30%，到 2030 年新增抽水蓄能装机 69 吉瓦^{90,91,92}。利用废弃矿井、非发电水坝等基础设施改造可降低投资压力。飞轮储能系统（flywheel energy storage system, FESS）虽物理原理传统，但通过提升储能量、能量密度及安全性等技术革新持续发展，磁悬浮与超导材料等创新显著降低摩擦与能量损耗。锂离子电池集群与储热等技术也取得突破。

气候
科技
焦点



绿氢与基础化学品

“国际企业正协同供应链减少对化石燃料电力及低效能源的依赖，以降低成本并推动全链脱碳。”

Helen Clarkson
气候组织首席执行官

绿氢通过太阳能、风能等可再生能源电解水制取，因其理论能量密度高，既可成为运输物流的高效燃料，也可作为合成基础化学品的原料，降低化工行业对化石燃料的依赖。

氢燃料未来展望

氢气已在直接还原铁（direct reduced iron, DRI）等工业流程中广泛应用，但其作为燃料的主要应用方向仍存争议：应作为直接燃料普及，还是作为其他燃料的前驱体？

氢气直接燃料性能优异但面临安全与基建挑战。理论上，氢气燃烧零排放且能量密度达 33.33 千瓦时/千克，是汽柴油的三倍。然而氢气在空气中可燃范围达 4%-75%，需采用 35-70 兆帕高压储罐⁹⁵、液化、金属氢化物吸附等特殊储存方式，实际能量密度大幅降低。技术成熟前，氢能车辆在密闭空间（如地下车库）的储存仍存安全隐患^{96,97}。此外，氢气易引发金属氢脆（hydrogen embrittlement, HE）或氢致开裂（hydrogen-induced cracking, HIC），加氢站建设成本高昂。截至 2023 年底，全球加氢站仅 1100 座，远低于 270 万处电动汽车充电桩。单座加氢站建设成本约 190 万美元，是充电站的 20 倍。学界认为，电动汽车先发优势可能永久固化氢能与充电网络的成本差距^{93,94,95}。

电解水制氢设备中的离子交换膜承担电极间绝缘与离子传导功能。传统碱性电解因氢气逸散存在爆炸风险，质子交换膜（proton exchange membrane, PEM）与阴离子交换膜（anion exchange membrane, AEM）的应用显著提升安全性、防泄漏能力及电解效率。气候技术发展催生固体氧化物电解槽（solid oxide electrolyzers, SOE）等新型方案。

当前质子交换膜技术聚焦提升质子传导率、机械耐久性与耐化学腐蚀性，以延长燃料电池寿命。但主流质子交换膜材料全氟磺酸（perfluorosulfonic acid, PFSA）因难降解特性被欧盟《可持续化学品战略》列为持久性污染物，其潜在致癌性与内分泌干扰风险引发关注。环境政策与经济考量推动市场寻求全氟磺酸替代材料，如磺化碳氢聚合物及复合材料。

氢能车辆相关气候技术虽面临挑战，但在亚洲地区专利申报活跃度显示其快速发展。本报告多位贡献者对氢能车辆应用持审慎乐观态度，认为其适用场景应限定于特定区域与用途。例如，工厂、港口及物流枢纽等工业场景的重型卡车运输具备可行性：此类场景基础设施可控、安全措施完善，且开放空间可确保氢气泄漏时向上扩散^{98,99}。

绿氨与甲醇

绿氨与甲醇作为绿色燃料前景广阔，可通过绿氢与碳捕集、利用与封存捕集的 CO 或 CO₂ 合成，通常被称为非生物来源的可再生燃料 (Renewable Fuels of Non-Biological Origins, RFNBOs) 或“电燃料”，也可通过生物质法或传统化石燃料工艺结合碳捕集、利用与封存制取。美国能源部高级研究计划署项目主任 Ramon Gonzalez 博士指出技术路径选择取决于目标产物：“从 CO₂ 生产可溶性原料时化学法更具优势，但可持续航空燃料 (sustainable aviation fuel, SAF) 等复杂分子生产中生物法可显著简化流程。”

生物质法因原料成本低（农作物残渣、林业废弃物、城市固体废物等）展现经济性优势。其第一阶段通过厌氧消化将生物质转化为合成气 (H₂、CO、CO₂ 混合物) 为成熟工艺，第二阶段将合成气化学转化为氨或甲醇的碳排放低于化石燃料路径。但生物质法非完全零碳，且原料成分复杂（如城市固体废物含多种组分）制约规模化应用。相较而言，氢能与碳捕集、利用与封存制甲醇成本较高但可实现零碳路径，创新联产机制可同步生产生物甲醇与绿甲醇。

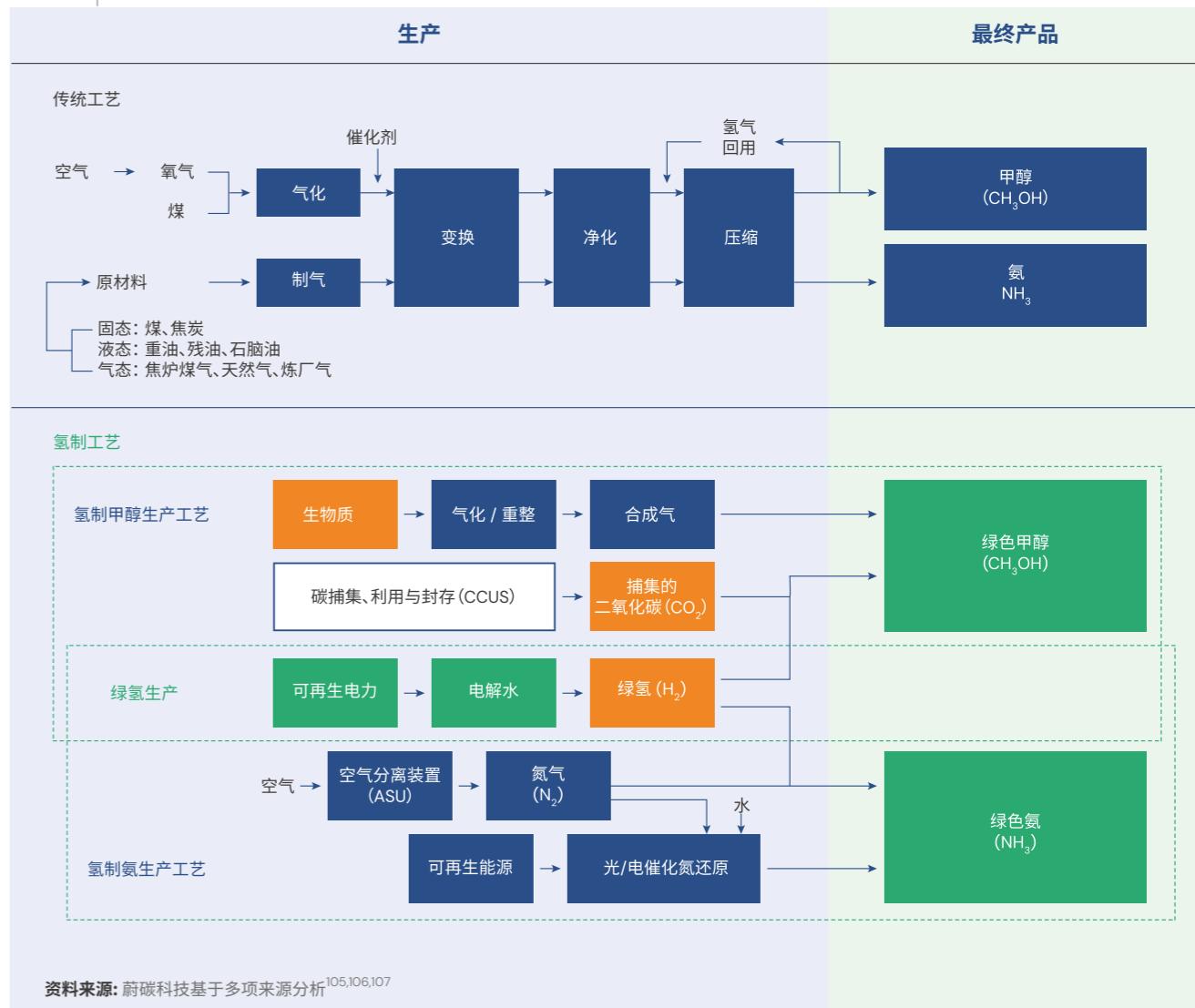
地理分布显示欧洲占据全球绿氨¹⁰²与甲醇产能超 80%，得益于《修订版可再生能源指令》(Revised Renewable Energy Directive, RED II)、《燃料质量指令》(Fuel Quality Directive, FQD) 等政策支持。中东 NEOM 绿氢项目计划 2026 年实现日产绿氢 640 吨、绿氨 120 万吨¹⁰⁰。沙特阿美 (Aramco) 与新未来城 (NEOM) 旗下能源水务公司 ENOWA 合作建设电燃料示范厂，目标年产低碳汽油超 1.2 万桶¹⁰¹。

绿氨与甲醇主要应用于航运领域，也可作为纺织、塑料、农业及制药行业原料。绿氨作为短途船运燃料可减排 40%-70%¹⁰⁴；绿甲醇可替代或掺混船用燃料、柴油、航空煤油等，被归类为可持续航空燃料。马士基 2023-2024 年完成首艘甲醇动力集装箱船试航并获氨燃料船舶早期监管许可。国际可再生能源署预测 2050 年氨/甲醇相关生物燃料市场需求达 5 亿吨¹⁰³，但大规模应用需成本降至可竞争水平。

500 Mt

国际可再生能源署预测 2050 年氨/甲醇相关生物燃料市场需求达

图 3.7 氨和甲醇的生产、加工及利用



可追溯性困境与解决方案

作为大宗商品的化学品，其绿色产品与传统产品在成分上几无差异。尽管同位素特征分析（C-12、C-13、C-14）及痕量污染物检测等实验室方法可鉴别绿色属性，但高昂成本使其无法作为广泛可靠的物理化学认证手段。

因此，生产过程数据追溯成为支撑绿色产品溢价市场价值、碳市场优势及可持续品牌形象的核心依据。此类数据需经可信第三方认证以获取采购方信任。

传统做法中，政府颁发的证书仅标注产品类型、质量及碳足迹。缺乏追溯机制时，证书可能被滥用于非相关产品，且在绿灰燃料混合场景中失去追踪效力。国际可持续与碳认证（International Sustainability and Carbon Certification, ISCC）作为主要框架，通过监管链模式追踪产品全流程文件，允许受控混合认证与非认证产品，并定期由第三方机构审计以确保标准合规。可持续生物材料圆桌会议（Roundtable on Sustainable Biomaterials, RSB）、可再生能源指令认证（Renewable Energy Directive Certification, REDcert）等体系也为欧洲可持续实践提供支持。

气候科技焦点

航运、物流与航空领域的清洁能源应用

除认证外，市场与金融工具亦有实践。欧洲氢能银行通过市场机制连接买卖双方，优化补贴分配并确保绿氢/非生物来源的可再生燃料真实性。欧盟气候、基础设施与环境执行署（Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency, CINEA）设立创新基金评估投标项目，对五年内投产的优胜者提供最长十年固定补贴¹⁰⁸。德国推出“拍卖即服务”（Auction as a Service, AaaS）计划，对未获欧盟资助的优质项目追加财政支持。

“

人工智能与物流领域，效率导向的解决方案已实现高度优化，推动流程柔性化。当前技术助力全球实时监测船舶质量、效率与性能表现。智能技术整体提升石油与海事行业效能，越来越多港口与物流中心采用人工智能控制流程，实现运营优化。

Khamis Juma Buamim 阁下
迪拜海洋及海事工业委员会主席

车船和交通枢纽，最该关注谁的降碳？

图 3.8 交通枢纽的减碳化



运输枢纽与载具是主要排放源。载具脱碳路径（替代燃料与电气化）已形成共识，但本报告建议同步重视港口、货运站等枢纽脱碳，其在可再生能源应用、智能装卸技术及可持续基建方面仍有较大提升空间。采用可持续实践与气候技术的港口更易符合全球绿色供应链标准并提升竞争力。治理粉尘污染与油污排放可改善港口生态，其成本效益可能优于载具脱碳。岸电设施建设亦能降低港口运营排放，全球推广将显著减少航运物流碳足迹。

重型商用车占全球车辆总数 10%，但贡献了公路运输 28% 的温室气体、45% 的氮氧化物及 57% 的颗粒物排放¹⁰⁹。作为绿色转型重点的电气化技术可使温室气体排放较柴油车减少 63%，完全使用可再生电力时减排率可达 92%¹¹⁰，同时解决颗粒物污染等问题。但重型商用车电动化面临续航限制挑战：蔚来资本创始合伙人张君毅指出，当前电池技术能量密度提升困难，导致车载电池重量大、运载效率低于燃油重型商用车；充电速度慢也制约运营效率。领先气候技术聚焦材



料与设计创新实现轻量化，提升能效并降低碳足迹。部分动力系统创新在改善环境效益的同时，也提升驾乘体验、操控性能及载重能力。

电气化转型不仅需要投资，还将引发就业结构调整。研究¹¹¹显示，至 2030 年欧盟电动汽车普及将减少 8.4 万个岗位，生产效率提升再削减 22.2 万个岗位，但充电网络维护、电动动力系统保养等领域将新增 20 万个长期岗位。消费者抵触情绪、固有习惯及公众认知不足等社会心理因素也可能阻碍新技术应用¹¹²。

替代燃料推广：液化天然气与可持续航空燃料

液化天然气与可持续航空燃料是交通与航空领域脱碳的重要选项。液化天然气较煤炭减排约 40%，较石油减排 30%¹¹³，且烟尘、颗粒物等有害物质排放更低，成为传统船用燃料的清洁替代过渡方案。Clarendon Capital 董事总经理 Isaac Smith 提出，液化天然气可作为“桥梁燃料”替代煤炭，尤其在制造业与能源生产领域，虽非最绿色选择，但未来 10-15 年有助于向可再生能源过渡，符合“能源三元悖论”中经济性、能源安全与减排的平衡理念。

航空业中，可持续航空燃料较传统航油最高可减排 80%¹¹⁴，成为该领域脱碳核心方案。可持续航空燃料以厨余垃圾、城市固体废物或林业废弃物为原料，通过回收生物质吸收的二氧化碳实现碳循环。鉴于航空器设计改进环保动力激励不足，电池或氢燃料等低碳能源预计 2030 年代末才能应用，可持续航空燃料成为现有机队即时减排手段。国际航空运输协会 (International Air Transport Association, IATA) 估

算 2050 年可持续航空燃料年需求量将达 4500 亿升，远超当前 1.25 亿升产能¹¹⁵，亟需扩大生产规模。

4500 亿升

预估 2050 年可持续航空燃料年需求量

液化天然气与可持续航空燃料在各自领域发挥减排作用，共同支持全球交通与航空业实现净零目标。随着技术与基础设施进步，二者将持续推动可持续未来建设。

IV

推动进程： 基础设施、金融与教育



“

当前气候议题在全球治理格局中正经历深刻变革。我们有责任凝聚共识、强化协作，将青年力量置于变革进程的核心位置。

Sultan Saif Al Neyadi 博士阁下
阿拉伯联合酋长国青年事务国务部长

气候变化的减缓，特别是通过技术进步来推动实现，需要在基础设施、金融以及教育等领域进行战略性的投资布局。基础设施是培育、推广和拓展气候技术的基石，构成低碳转型的实体支撑网络；金融支持则为加速气候技术成熟化进程提供关键资金保障，撬动绿色资本的有效配置；健全的教育体系旨在培育未来领袖、专业人才及技术型劳动力队伍，为气候科技解决方案的开发与规模化应用提供持续智力动能。

政策与基础设施

健全完善的现代化基础设施包括有形资产（城市开发、电网系统）与无形资产（交易平台、认证机构、政策框架），为创新发展平台与高效连接。作为气候变化领域的重要支柱，基础设施通过建立标准化体系与监管框架，推动新技术规模化应用，从而促进可持续增长。

构建可信认证网络

绿色供应链中，认证（包括核查与合格评定）是确保遵守法规与标准的关键基础设施。认证可分为政府强制型（遵循政策指令与标准体系）和生产者自愿型（突显可持续性效能）。鉴于许多绿色产品在外观与理化特性上往往与传统产品难以区分——特别是钢铁、铝材、氢能及基础化学品等大宗商品——认证成为验证环境声明、确保透明度与维护可信度的核心机制。对供应链各参与方而言，认证具有多重价值：生产者借此进入公平竞争市场，消费者获得可信可持续性验证依据，政府则通过认证落实技术层面的政策指令。伦敦发展促进署大中华区首席代表赵冰冰指出，绿色认证产品

更易获得行业与市场认可，尤其在环保意识提升背景下增强企业竞争力。

“尽管 APEC 成员国内存在众多公认标准，但定义与报告规范的差异仍构成显著障碍。”

Alex Parle
亚太经合组织美国国家中心执行副主席



本报告多位贡献者指出，认证机构、司法管辖区乃至企业内部对既有标准存在执行差异与解释分歧，导致跨区域供应链数据互认困难。同时，认证作为一种高度依赖企业自主提交信息、开展选择性监测、基于有限信息进行评判的机制，无论认证机构资料审查、实地调研、抽样检测做的多么细致，总会有一些关于产品的因素是无法注意到或错判的，这被称为“剩余风险”。剩余风险会导致监管疏漏，削弱认证体系整体效力。随着绿色认证产品获得越来越多的政策和市场利好，许多机构故意利用剩余风险开展漂绿与欺诈行为，从而规避审查。欧盟委员会研究¹¹⁶显示，欧盟 53.3% 的环保声明存在模糊、误导或缺乏依据问题，40% 声明无实质证据支撑。

53.3%

欧盟环保声明存在模糊、误导或缺乏依据问题

气候科技领域为应对“剩余风险”提出了许多创新机制。例如区块链技术确保上游供应商数据准确性与完整性，德国莱茵 TÜV 可持续发展服务总经理许秋明强调区块链可增强供应链透明度、提升可追溯性并降低成本，但其关键在数据必须在上链前就已经具有可靠性。数据上链前若存在错误、虚假或不完整等情况，即便区块链技术能保证上链后数据的不可篡改，也无法从根本上确保数据质量。为此德国莱茵 TÜV 与区块链服务商合作保障数据合法性，尤其在绿电行业实现突破，确保符合绿电证书等监管要求。

近年来，国际组织、行业协会与私营机构推出的自愿性认证项目的权威性良莠不齐，部分企业出于利益驱动，甚至自己建造认证体系和认证标志，使得消费者更难区分孰是孰非。认证体系的过度泛滥削弱了权威标准的可信度，使得缺乏可信度的噪音掩盖了认真践行可持续发展的优秀企业和产品。欧盟产品政策框架公众咨询¹¹⁷印证了这些观察，指出采购方确实在评估海量绿色声明时面临比对困难。

为维护认证体系公信力、打击虚假“绿色”营销，多国建立环保认证声明真实性监管框架。例如中国通过中国合

格评定国家认可委员会对认证计划进行官方审查；欧盟《2024/825 号指令》（“通过优化反不正当行为保护与信息披露赋能消费者绿色转型”）规范消费品绿色声明；美国联邦贸易委员会（Federal Trade Commission, FTC）制定绿色声明指导准则。这些监管架构构成政府主导的保障力量，确保绿色供应链转型中的道德规范与反欺诈机制。

人工智能可以降低认证工作的负荷，减少人为操作风险。随着法规复杂度与数量呈现出爆发式增长，工程师在执行实验室操作、测试、报告生成以及认证流程等一系列工作时，面临着前所未有的挑战。在此背景下，人工智能成为辅助工程师工作的有力工具。自然语言处理（Natural Language Processing, NLP）技术近年来取得了快速发展，其启发式算法与诸如 LayoutLM 等先进的版面处理模型相结合，展现出强大的功能。这些技术能够深入分析各类文档和操作流程，精准识别其中偏离既定标准的错误与细节问题，从而使认证机构实现风险前置管理，维护公信力。

将认证流程前置并融入供应链的各个环节，能够有效减少因信息不对称、重复检测以及不合规等问题所导致的额外成本支出，同时使得供应链各节点的信息更加公开、透明，便于各方进行监督与管理。常见实施路径是将测试设施直接整合至制造流程中，一些大型制造商通常与国际权威认证机构共建联合实验室，实现产品下线即时检测，确保快速符合相关标准。在气候科技领域，随着产业界加速推进碳减排并应对日益严苛的环保法规，这种嵌入式认证模式凸显其价值。通过现场认证能力的即时获取，可持续生产实践得以在全生命周期内验证，这不仅助力企业满足合规要求，更可强化其环境责任的可视化呈现——这种优势可转化为显著的市场竞争力。英格尔认证副总经理孙浩洋博士强调，企业必须通过外部合作强化合规体系，实现与全球标准的无缝衔接，并借助数字化与智能化手段推动合规认证及供应链整体建设水平升级。

构建可持续城市基础设施

气候
科技
焦点

实现城市绿色转型对于地球生态系统的健康和城市社区的韧性至关重要。随着城市规模的不断扩张，各类资源和能源的需求呈现出急剧增长的态势。这种增长不可避免地引发了一系列严峻的环境挑战，其中空气污染问题日益严重，温室气体排放量持续攀升等现象尤为突出。为有效应对这些环境问题，需要采用基于实证研究且优先考虑可持续性和韧性的城市设计原则。

在城市绿色转型的进程中，需要规避“邻避效应”（Not In My Backyard, NIMBY）。公众出于对生活环境质量的关注，往往对自己生活地方附近的高污染产业持有强烈的抵制态度。如果政府简单顺应这种诉求，其后果就是高污染产业像踢皮球一样被不断转移，而不是真正实现绿色转型。通常，这些高污染产业会流向经济不发达、政策法规不完善的地方，并造成一种环境问题已经真正解决的错觉——这些不发达地区在收集统计数据方面同样欠缺能力，导致污染事件难以被上报和注意到，虽然看起来担忧环境问题的声音消失了，但这样做无法真正反映和解决全球的环境挑战。

以垃圾处理为例，在过去数十年间，全球北方国家城市的居民为了阻碍垃圾填埋场的建设发起了诸多公众行动，最终使得废弃物处理业务大量转移至全球南方国家。特别是随着电子垃圾的大量涌入，这种转移对全球南方经济欠发达地区造成了巨大比例的影响。非洲加纳共和国的阿博布罗西（Agbogbloshie）作为这种趋势的典型受害者代表，已经成为全球主要的电子垃圾集散地之一。即使气候科技的不断发展能够减少环境影响，但在城市绿色转型过程中，必须谨慎考虑有害活动转移的风险，以确保转型的全面性和可持续性。

交通、能源与工业作为城市运转的核心部门，在城市绿色转型中扮演着至关重要的角色。以公共交通领域为例，实现公共交通的电气化与数字化能够显著降低碳排放。具体而言，电气化对脱碳的贡献主要体现在两个方面：一方面，非化石燃料电力的使用可以直接替代传统化石燃料，减少燃烧过程中的污染物排放；另一方面，即使是来源于化石燃料的电力，通过集中燃烧的方式，也更便于通过空气污染控制技术和碳捕获、利用与封存技术进行管理，从而有效降低污染排放。

在推动公共交通减排的同时，提升公共交通的出行体验以切实替代私家车出行，是城市绿色转型的关键任务之一。出行即服务（Mobility-as-a-Service, MaaS）理念与AI算法的应用为此提供了有效途径。这些技术手段，对公共交通路线进行优化，提升乘客的出行舒适度，并降低出行对环境的影响。智能系统能够实时监测交通状况，缩短乘客候车时间，有效预防交通拥堵，从而提高可持续出行方式的吸引力。出行即服务平台整合了公交、火车、共享单车和拼车等多种出行方式，为用户提供便捷的一站式出行解决方案，从而提高效率并减少对私家车的依赖。然而，在利用这些技术提升服务的过程中，保障用户隐私安全至关重要。这需要借助数据加密、联邦学习与边缘计算等先进技术来实现。通过这些技术手段，可以在不牺牲AI优势的情况下，确保用户数据的安全性。联邦学习技术允许在分布式设备上进行AI模型训练，将数据存储在本地设备，仅交换模型参数，从而有效保护用户数据隐私；差分隐私技术则通过向数据中添加干扰的方式，防止用户信息被泄露，增强隐私保护。

在建筑领域，节能建筑的发展对于降低城市能耗具有重要意义。通过采用智能照明、温控系统等先进技术，能够显著降低建筑能耗。城市层面为达到节能减排的效果应积极投资绿色建筑技术，并严格执行能效标准。在建筑设计阶段，通过制定严格的节能设计标准，最大限度地提高建筑的绝缘性和气密性，可以有效减少在制冷和供暖过程中的能源使用，从而增强建筑的可持续性。对于既有建筑，市政当局应制定简化的法规，并提供激励措施，鼓励实施节能改造。为了实现能源的高效利用，除了采用节能技术外，还需要借助实时数据分析来优化能源使用方案。由于可再生能源具有间歇性和波动性的特点，需要配套先进的储能解决方案，并实现与电网的有效集成，以确保能源供应的稳定性和可靠性，从而应对可再生能源波动带来的挑战。有效管理这些技术需要建立合作伙伴关系和进行积极的维护。

案例 8 净零工业园区的实现路径



金桥金湾创翼道客园区坐落于中国上海，其产业布局聚焦于新材料与医疗健康两大关键领域。作为开发主体，金桥集团秉持着构建绿色产业社区、达人与自然和谐共生的愿景，积极响应国家气候战略部署。在园区向产业社区转型升级进程中，着重关注城市更新发展过程中的功能复合性提升，同时高度重视建设过程对中国绿色低碳目标的积极贡献。

园区致力于以先进的人工智能技术打造低碳发展标杆。园区积极探索绿色低碳实践与人工智能技术的深度融合路径，利用人工智能与智能建筑系统（特别是物联网以及数据驱动模型等创新技术手段），实现显著的碳减排成效。其中，光伏建筑一体化（Building Integrated Photovoltaic, BIPV）作为重要的能源转化技术手段，将园区产生的富余清洁能源，合理应用于储能领域以及移动能源供应，有效提升能源利用效率。园区创新性地引入了四大减碳策略：

1. 被动式节能设计
2. 主动式能源调控
3. 可再生能源高效利用
4. 健康可感知环境营造

这座占地面积达10万平方米的园区，预计每年可实现碳减排约376万吨，产生约90万千瓦时的可再生能源。目前，园区的减碳工作正稳步推进，拟定于2027年实现碳排放达峰，2028年达成碳中和目标，树立起行业领先的可持续发展实践典范。金湾创新港始终将碳中和理念贯穿于园区全生命周期，从前期的规划设计、中期的建设施工，到后期的运营管理，全方位借助AI与智能建筑技术实现深度降碳，致力于成为上海首批零碳产业园，为城市可持续发展贡献示范力量。

资料来源：金桥集团, 2023



“

数字化和智能化技术不仅支持金湾创翼道客园区在建设阶段实现其可持续目标，更将赋能全生命周期的净零运营。

朱理立 金桥集团副总经理

巴黎所推行的“15分钟城市”模式，旨在通过将服务设施合理布局在便捷半径内，以此减少居民对汽车的依赖程度，进而培育出可持续的城市生活方式。要切实达成这种复合功能的城市开发目标，深度的社区参与以及灵活多变的策略制定必不可少。以公共交通为导向的发展模式（Transit-Oriented-Development, TOD），其核心在于将公共交通系统与居住、商业等空间进行有机融合。这一模式能够显著提升城市空间的可达性，同时有效降低居民对私人汽车的依赖。然而，该模式的成功实施，高度依赖于城市规划者与交通部门之间的协同合作以应对潜在的拥堵问题并确保公平发展，保证各个群体都能受益于这种模式。适应性再利用项目则提供了一种现代化途径，通过改造现有建筑而保留其历史价值。在此过程中，需要精准平衡遗产保护与功能更新这两方面的需求，既保留历史建筑的文化价值，又使其能够适应

现代城市生活的实际需要。

制造业作为城市经济增长的重要引擎，过去常常因其生产过程中产生的污染问题，而受到社区的抵制。如今，采用零碳技术的生态友好型工厂为实现产城融合开辟了新的路径。例如，整体煤气化联合循环（Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC）技术能够助力传统电厂转型为零排放、零废弃的现代化设施，甚至和居民社区和谐共生。目前，已有一些领先的整体煤气化联合循环项目成功在滨海、公园和居住区等城市环境中共生。各个制造业领域正积极加速探索如何提升自身与城市环境的适配性，以及与社区协同发展的有效模式，以实现经济发展与环境保护、社区和谐的双赢局面。

处好“邻里关系”，生产绿色浆纸



作为金鹰（RGE）集团旗下全球领先浆纸企业，亚太森博（Asia Symbol）在产城融合以及与社区实现良性互动方面取得了显著成效。尽管亚太森博属传统制造业领域，但在 2023 年，其单位产品的温室气体排放强度已成功降至 0.44 吨二氧化碳当量/吨，这一成果在行业内树立了低碳发展的标杆，充分彰显了该企业在可持续实践方面的卓越能力以及与社区和谐共生的良好态势。

在制造业领域，工厂通常会面临“邻避效应”的困扰，这一现象往往会引发周边居民的投诉，进而对工厂的正常运营构成威胁。亚太森博将“和谐邻里关系”作为发展重点，通过一系列实践成功创造了正向外部性：

1. 余热供暖，造福百姓：亚太森博开展了中国浆纸行业首个烟气深度治理与余热回收一体化项目。该企业投入近 5700 万美元用于回收电厂余热，通过捕获烟囱排出的余热以及水蒸气，为周边面积达 600 万平方米的社区提供冬季供暖服务。经核算，这一举措每年可实现减碳 38 万吨。
2. 提升可再生与清洁能源占比：亚太森博持续致力于提升生产过程中可再生能源（如生物质能、太阳能）以及清洁能源的使用占比。到 2023 年，这一占比已达到 71.53%，在能源结构优化方面取得了突出进展。
3. 建成城市中水回用项目：亚太森博建成了中国首个城市中水回用项目。该项目将市政污水转化为生产用水，每年节水总量超过 1000 万立方米，在水资源循环利用方面发挥了示范引领作用。
4. 投建全流程零排放废水处理站：亚太森博投资建设了中国首个全流程零排放废水处理站，该处理站日处理量达 3 万立方米。通过一系列先进处理工艺，将废水转化为再生水、工业盐、建材添加剂等副产品，有效推动了废水的资源化利用，极大地提高了资源利用效率。

亚太森博明确承诺，到 2030 年单位产品的温室气体排放将相较于基准年下降 30%。在实际行动中，该企业典型项目的投资中，近 25% 的资金专门用于环保领域。同时，亚太森博还积极与高校展开合作，共同对废水处理曝气物理除污工艺进行优化，不断探索更为高效、环保的生产技术与工艺。

资料来源：金鹰集团中国, 2023



“在绿色供应链转型中，金鹰集团正通过规模效应推动最新技术应用，实现从环境友好到邻里友好的供应链升级。”

束兰根博士 新加坡金鹰集团中国区财务副总裁

绿色资产交易与金融工具创新

随着社会各界对企业责任的关注日益增加，证券交易所等金融交易平台正日益成为推动供应链环境责任的重要力量。目前，几乎所有交易所都实施了环境、社会和治理标准，并且对气候信息披露的要求也日趋严格。证券交易所作为监管机构，确保上市公司遵循 ESG 和气候披露的要求，积极培育可持续发展的商业生态系统。

证券交易所不仅承担着监管职责，还在行业标准制定以及激励协同行动方面发挥着重要作用。以纽约证券交易所为例，其对“Climate Action 100+”倡议给予支持，积极动员投资者，以此推动企业提升环境绩效。而伦敦证券交易所发起的“可持续证券交易所倡议”，则联合全球众多证券交易所，制定并传播可持续供应链管理的最佳实践。这些合作有助于

企业与不断变化的标准保持一致，并推动整个行业在可持续发展方面取得更大进展。

在金融市场领域，除了股票、债券等传统金融工具之外，绿色资产交易所中出现了多元化的可交易资产。其中，碳资产占据了重要地位，其市场分为自愿市场和强制市场。在自愿市场中，交易标的是基于各类减排机制所产生的抵消资产；而强制市场则主要通过法定碳配额的交易，以达成相关主体的履约要求。在成熟的金融市场环境下，“配额”或者“负外部性”通常用于指代强制市场中的资产，而“信用”或者“正外部性”则与自愿市场相关联。中国人民大学生态金融研究中心副主任蓝虹博士指出，“市场机制通过跨行业的资源优化配置，自动筛选出碳减排成本最低的领域，从而形成高效的减排路径。在此过程中，资源配置的效率不断提高，同时也推动了新兴低碳产业的发展，为经济的可持续发展注入新的活力与动力。”

在绿色交易所的交易范畴内，可再生能源可以作为资产进行交易。与可再生能源发电量相对应的可再生能源证书/积分，包括可再生能源证书以及国际可再生能源证书（I-RECs，现称 I-TRACK），为各组织提供了一种机制，用于衡量并交换其在可再生能源生产中的贡献。此外，诸如脂肪酸甲酯（Fatty Acid Methyl Ester, FAME）和生物乙醇等新型生物燃料，同样可以在绿色交易所进行交易。

这些绿色资产交易所增强了绿色资产的流动性，使成熟的制造商和可持续创新者受益。展示出卓越可持续实践的公司可以通过交易碳信用和可再生能源证书获得收入，这为持续投资绿色项目提供了强有力的激励。同时，制造商和排放者通过这些交易所能够高效获取所需的信用和配额，从而更容易遵守监管要求。这种简化的获取过程促进了可持续实践，使他们能够符合监管合规要求。总之，绿色资产交易所提供了一种高效分配环境资源的可扩展市场机制。

确保绿色资产的可信度和有效性至关重要，而这一目标的达成依赖于强化数据互联和完善真实性验证机制。从数据互联方面，其核心要求在于实现交易系统与政府登记处或授权数据库之间的无缝对接。例如，在绿色证书交易中，必须进行实时更新，以有效避免重复计算问题，从而保障绿色资产交易数据的准确性和唯一性。

在真实性验证方面，需要为碳信用、生物燃料等绿色资产建立行之有效的环境效益认证机制。对于自愿碳资产，一旦出现数据失实的情况，必须立即撤销相关资产的签发，以此维护市场的诚信环境。在生物燃料领域，应进行详细的全生命周期分析，并引入独立的第三方审计和认证，确保生产过程严格符合可持续性标准，从而从源头上保障绿色资产的质量和可信度。

区块链等去中心化技术解决方案为提升绿色资产数据互联和可信度提供了创新路径。主要涉及的两种策略分别为证书的公证和代币化。公证通过智能合约和密码学技术确保数据的真实性和完整性，创建出一个安全、防篡改的记录，确认数据的来源和完整性。这种方法能够保证交易者所获取信息的精确性和稳定性，从而强化认证流程。代币化，特别是通过发行现实世界资产（Real World Assets, RWA）代币，为每单位生产的绿色电力、减少的排放量或制造的产品创建数字代币。这些代币代表着具有可验证性的可持续活动或生产的独立单位，即便产品的形态在后续过程中发生改变，依然能够凭借这一代币化体系追溯和验证其可持续性相关主张，极大地增强了绿色资产数据的可追溯性与可信度。

在区块链技术应用场景中，现实世界资产可以作为一种有价值的信用来源，解决中小企业面临的“融资难”问题。传统融资通常需要较高的信用评级，而这种信用评级通常更容易被大型企业获得，这对中小企业获取必要资金构成了重大挑战。现实世界资产有助于资产验证、所有权证明和信用评估，弥合了区块链技术与实物资产之间的差距。新加坡数字绿色交易所（MVGX）总裁张翼翔指出，非同质化数字孪生技术与碳中和代币技术，严格遵循区块链所具备的透明性、可追溯性以及不可篡改原则，确保绿色资产交易的透明度、可追溯性和永久性，实现了对碳信用的全面数据追踪、验证、监管和管理，优化了数据流动和与外部系统的连接，确保了绿色行业供应链中碳信用的验证、注册和交易合规性。

综上所述，绿色资产交易所标志着可持续金融的变革性演进。然而，这一演进的成功取决于严格的数据互联机制和健全的真实性验证体系，以维护市场的完整性和有效性。安全的交易环境、精准的资产追踪和透明的验证流程使得这些交易所能够显著推动全球可持续发展目标，同时开辟新的投资渠道。

推进绿色金融创新

绿色金融通过结构化的金融活动，引导资本流向环境友好型领域。由于资本流动在技术革新和人力资源配置方面具有深远影响，绿色金融在塑造供应链实践、行为和技术应用方面将发挥关键的建设性作用。例如，多边开发银行通过严格设定并执行项目贷款标准，有力推动先进技术的实际应用。诸多先进技术因前期成本高昂等因素，在过往的市场环境中难以得到广泛采用。而多边开发银行的这一举措，有效打破了技术应用的成本壁垒。对于领先的气候技术公司而言，获得早期投资是成功的关键因素，这不仅直接影响其项目启动能力，还决定了其持续进行绿色创新的能力。

尽管积极推动绿色金融发展是值得追求的理想目标，但我们仍需审慎权衡金融机构对于风险和收益的诉求。学术研究¹¹⁸明确指出，政策不确定性以及金融体系倾向于注重短期收益等特性，会对绿色金融投资形成显著阻碍。在绿色金融领域占据领导地位，往往意味着要对不确定性较高、行业内尚未达成广泛共识的领域进行投资，这无疑会扩大投资组合所面临的不确定性风险敞口。同时，绿色金融通常涉及较低利率或优惠条款，本质上更倾向于选择低风险的投资项目。在绿色金融仍处于早期和不成熟的市场中，往往缺乏明确、可靠且有说服力的财务数据来证明绿色项目能够带来超额回报。因此，在绿色金融领域主动承担领导角色需要创新设计金融

工具，这对金融机构来说是一项极具挑战性的任务。

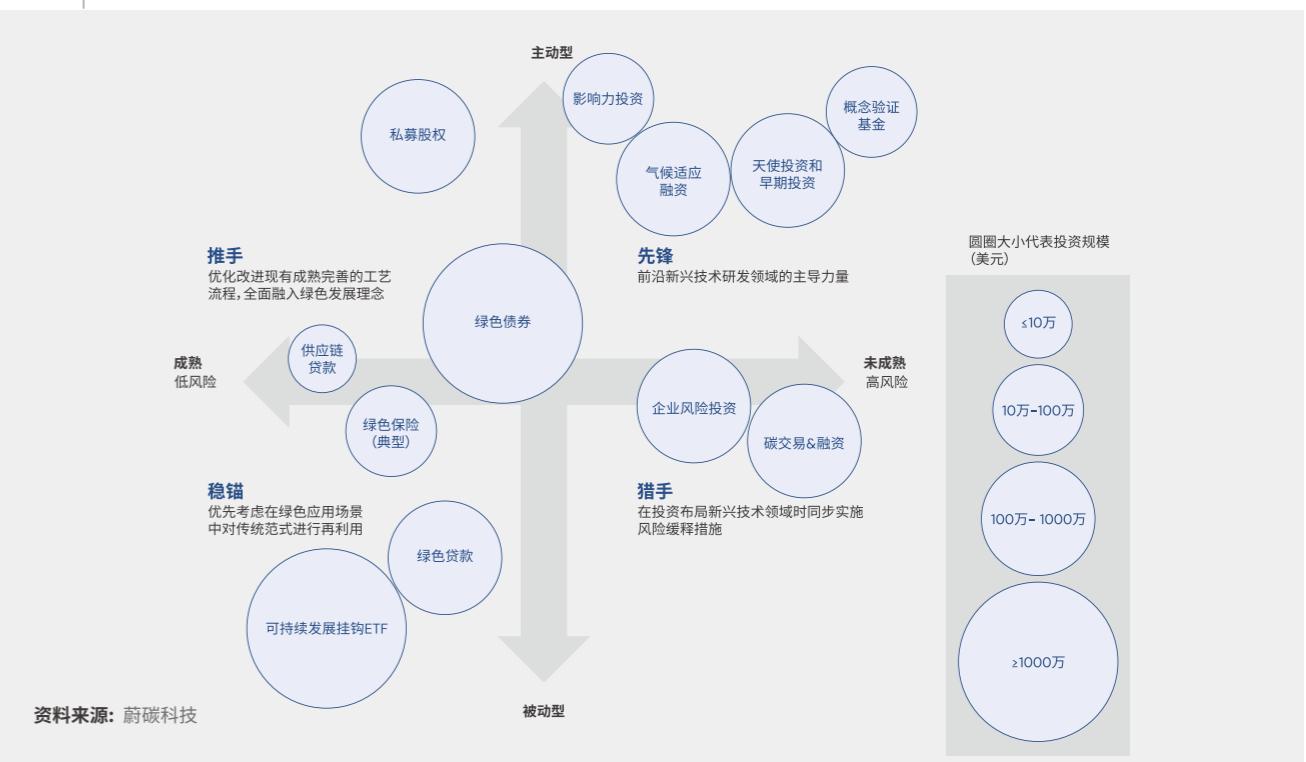
传统绿色金融工具强调使用既有金融手段满足绿色需求，而非主动创新。例如绿色贷款仅提供边际利率优惠但仍需充足抵押物。气候技术虽吸引私募股权投资关注，但估值仍受限于现金流等传统指标。

本报告根据主动性和成熟度对绿色金融机制进行分类，可以将气候技术融资领域划分为四种不同的类型：

- 先锋：**气候融资的拓荒者，率先投资于新的气候技术，即使在技术尚未成熟时，也愿意勇敢地投入资金，为技术的发展提供初期支持。
- 猎手：**这类参与者主要关注新技术的可行性得到验证，并乘势进入市场进行投资。
- 推手：**当技术成熟并需要大规模资金支持以进行推广和完善时，推手会介入，承担“放大器”的职责，提供大量资金，助力技术的广泛应用。
- 稳锚：**尽管稳锚也投入大量资金，但他们采用较传统的风险管理方法，例如要求抵押和使用银行常规风险评估方式，在此基础上进行调整以适应绿色金融环境。



图 4.1 不同金融工具的成熟度、主动性和投资规模的象限图



可持续供应链需平衡主动型与被动型绿色金融模式。金融机构普遍采用的被动模式，在一定程度上具备优势。它能够依托较为成熟的行业惯例与传统风险评估体系，为金融机构带来相对稳定的收益，同时风险也处于可控范围。然而，这种模式也存在明显弊端，即对传统模式的依赖使其在面对绿色领域的技术挑战和机遇时反应迟缓，从而阻碍气候行动的进展。相较之下，主动模式具有不同的特征。其积极为气候技术初创企业和早期采用者提供资金支持，在企业实现正现金流之前帮助其降低潜在风险。但如果过度激进，主动模式也可能引发问题。例如，在缺乏充分市场调研和技术评估的情况下，大量资金涌入不成熟的技术领域可能导致不理性的投资行为，使得一些尚未成熟的技术过早应用，最终引发市场紊乱，导致资源浪费和金融风险。

在绿色金融领域，实现金融机构在被动应对与主动参与之间的平衡是关键议题。其中，绿色金融工具的战略设计发挥核心作用，旨在赋能优质气候科技企业，通过降低风险来帮助企业培育长期竞争力。绿色金融工具战略设计的核心任务是建立合适的评估框架，以精准筛选投资标的。这一框架对于金融资源的有效配置以及绿色金融市场的稳健发展至关重要。

要。传统的投资评估框架，主要依赖于现金流折现模型和财务预测手段，在评估过程中难以全面捕捉气候相关的风险因素和潜在机遇。在当前气候变化影响日益显著的背景下，这种局限性愈加明显，无法满足绿色金融投资决策的需求。中研绿色金融研究院院长顾蔚博士指出，金融机构在开展绿色金融业务时，需要通过合理定价或风险缓释措施来实现审慎的风险管理。为实现这一目标，金融机构必须提供充分证据，证明绿色低碳供应链相较于传统供应链具有更低的发展风险。并且，应着重展示绿色低碳供应链在卓越绩效、战略优势和市场接受度等方面的表现，以说服投资者降低风险溢价，从而吸引更多资金流入绿色低碳领域。

传统金融工具的创新正从“稳锚”向“推手”演进，显示出积极的发展趋势。在绿色保险领域，虽然传统绿色保险涉及绿色资产，但在风险评估和定价上仍依赖于常规的精算模型。相比之下，参数保险则通过纳入气候相关参数，更加精准地反映气候风险。这一创新显著提高了风险评估的准确性和定价的科学性，使金融产品能够更好地适应气候变化的实际情况，从而有效拓展了保险的功能边界。



随着气候变化影响的加剧，曾经罕见且孤立的极端天气事件正变得愈发频繁、并发且强度增大。面对不断演变的风险格局，传统保险解决方案已无法完全满足企业的需求。参数保险作为一种行之有效的创新举措，能够对传统保险项目形成补充，并为被保险人提供广泛的应用场景，涵盖非损害性业务中断、难以投保的物质风险，抑或是单纯的财务损失保障等领域。

Aboitiz Power 是菲律宾主要发电及公用事业企业，拥有该国规模庞大的配电网络之一。由于其输配电线广泛分布在台风频发的地区，传统保单通常将这些高风险线路列为不可保，从而使 Aboitiz Power 面临巨大的潜在损失风险。为解决这一问题，Aboitiz Power 采用了瑞士再保险集团旗下瑞再企商保险有限公司（瑞再企商）提供的参数保险，为其易受台风影响的输配电线提供保障。

2021 年 12 月，台风“雷伊”（在菲律宾被称为“奥黛特”）对菲律宾造成了极为严重的冲击。此次台风影响范围广泛，波及人口多达 1,060 万，致使基础设施与农业领域遭受了约 9 亿美元的损失。“雷伊”作为当年风力最为强劲的台风，在 Aboitiz Power 资产集中分布的宿务地区引发了大面积的破坏。台风所持续的风速达到了参数保险预先设定的赔付条件。瑞再企商在台风登陆后的 33 天内便迅速完成了赔付工作，距离报告机构确认风速数据，仅仅过去了 12 天。

与传统保险依赖实际损失评估不同，参数保险在符合特定参数（如风速）的预设事件发生时立即触发赔付。瑞再企商为 Aboitiz Power 量身定制的参数保险，运用了“闭盒触发型巨灾险”（Cat-in-a-box）解决方案。此方案采用透明框架，将 Aboitiz Power 位于宿务与棉兰老岛的输配电线的核心价值区域涵盖其中。当台风等气象事件在预先设定的地理“区域”内达到既定的风速阈值时，保单便会被激活。在台风“雷伊”侵袭期间，宿务地区风速接近 190 公里/小时，达到了赔付机制的触发条件。快速的理赔服务帮助 Aboitiz Power 迅速修复电网，为当地经济复苏提供了有力支持。

瑞再企商为 Aboitiz Power 提供的参数保险方案，在台风“雷伊”事件中验证了另类风险转移工具的有效性。凭借简捷高效的理赔流程，被保险人得以集中资源减轻灾害影响并快速恢复运营。该案例同时彰显了参数保险填补传统保单保障缺口的能力。随着气候变化影响加剧，另类风险转移手段与风险管理创新举措在提升韧性和应对气候风险方面的价值日益凸显。

资料来源：瑞再企商，2022 年



“气候变化仍是当前最普遍的威胁之一。作为保险行业面临的重大风险，它也是我们与客户共同关注的核心议题。我们致力于开发满足企业动态需求的保险方案，以应对当前及未来持续演变的风险格局。”

Jonathan Rake 瑞士再保险集团瑞再企商亚太区首席执行官

在推动应对气候变化风险的保险领域发展进程中，除了商业机构所采取的一系列举措之外，多边开发银行也积极投身其中，开发出定制化的参数保险产品。其中，世界银行为菲律宾定制的参数型巨灾风险保险产品是一个典型案例。该保险产品专为菲律宾的中央和地方政府在遭遇重大灾害后提供赔付支持，其年度保额显著增长，从最初的 2.06 亿美元提升至 4.06 亿美元。凭借其显著的优势和良好的保障效果，该产品也被墨西哥、乌拉圭、太平洋岛国、加勒比国家以及部分南美国家所采用¹¹⁹。

政策与风险投资的协同效应

风险投资在为气候科技项目提供早期资金支持方面发挥着关键作用，尤其是对于那些技术成熟度不足的项目。众多创新企业高度依赖风险资本来实现其发展，而在气候科技领域，这种依赖性表现得尤为明显。气候科技项目通常具有较长的研发周期，并且与政策的关联性较强，这就要求风险资本能够持续地支持创新者，推动技术的进步。然而，全球经济的下行压力已导致全球气候投资的缩减。在此背景下，深化对市场因素的理解，加强气候科技创新者与投资者之间的协作，对于实现增长至关重要。

图 4.2 2020-2024 年半年度气候投资统计（单位：亿美元）



激励机制与政策手段对气候科技风险投资格局产生着极为显著的影响。以美国《通胀削减法案》颁布后该国气候科技市场的扩张情形来说，该法案借助针对可再生能源、碳捕集与封存等清洁技术的税收抵免政策，有力推动了市场的显著增长。根据荣鼎集团与麻省理工学院能源与环境政策研究中心合作开展的“清洁投资监测（Clean Investment Monitor）”项目数据，在该法案实施后的两年内，清洁能源与交通技术制造领域的投资从 220 亿美元大幅攀升至 890 亿美元，2023 年更是实现了高达 156% 的年度增幅¹²⁰。报告撰写者多次指出，处于成长阶段的气候科技企业常常会历经关键政策转折点，进而突破发展瓶颈，实现规模增长。

气候科技产品通常会受到业务惯性（Business as Usual, BAU）的阻碍，需要清晰展示气候科技在经济上相比传统方案具有显著的经济可行性和比较优势。然而，政策干预可以显著加速这一过程。通过激励措施、补贴或监管指令等方

式，政策干预能够增强气候科技解决方案的吸引力，甚至在某些情况下强制使用这些方案。有效的政策可以切实降低企业和消费者的财务风险和成本，为创新技术开辟市场准入路径，并提供规模化发展的可行途径。归根结底，绿色供应链的建设成效，依赖于经济可行性与支持性政策框架之间的协同发力。

因此，政策工具与市场要素之间的相互作用，成为推动气候科技创新与应用的关键驱动力。在这一过程中，风险投资机构与创新者之间的紧密协作同样至关重要。这种合作的意义不仅体现在为气候科技项目提供基础资金支持，更在于能够为项目注入精准的战略方向指导、深入的市场分析见解以及广泛的资源网络，助力项目获取更多发展所需的资源与宝贵机遇。随着气候科技行业的持续发展，众多成功的气候科技企业逐渐展现出应对复杂多重挑战的卓越能力，能够将技术进步与不断变化的监管环境和市场需求有效结合。璞跃中国

教育与人才培养

日益严峻的环境挑战正促使全球政府、机构、企业和公众加强对可持续发展的关注，推动气候科技领域的人才需求迅速增长。领英《2023 全球绿色技能报告》显示，2022 至 2023 年间，全球 48 个国家和地区对至少具备一项绿色技能的岗位需求平均增长 22.4%。尽管绿色人才库不断扩大——其占比从 2015 年的 9.6% 提升至 2021 年的 13.3%，并在 2022 至 2023 年间进一步增长 12.3%¹²¹——但当前的供给仍难以满足需求，仅能覆盖约一半的职位缺口。在这一背景下，教育被视为弥补绿色人才短缺的关键支柱。通过培养环境意识、传授可持续发展知识、塑造责任观念并优化相关技能，教育不仅能推动技术创新与突破，更为通往可持续未来铺设坚实基础。正如昆山杜克大学可持续投资研究项目主任张俊杰博士所言，高校是推动前沿科技发展、实现从零到一突破的核心力量。

22.4%

全球 48 个国家和地区对至少具备一项绿色技能
的岗位需求平均增长

首席执行官徐洁平进一步指出，知名风险投资机构与专业孵化平台所提供的综合性开放创新服务具有重要价值。此类服务一方面能够有效促进大型企业积极采用气候科技成果，另一方面则致力于培育可持续发展的生态系统，确保气候科技在政策的引导与行业丰富资源的有力推动下，得以持续发展并不断接受实践验证。

此外，培育此类合作可启动良性循环：成功的气候科技企业吸引更多风险投资，从而加速全行业创新进程。对市场因素和政策动向有深刻理解的风险投资机构可以显著提升初创企业的战略规划能力。这种战略协同确保初创企业不仅具备技术优势，更能有效把握并影响政策趋势，从而增强其在后续

融资轮次中的吸引力。同时，多家风投机构通过投资组合管理提供配套支持，助力企业适应监管变化。因此，这些合作既增强单个气候科技企业的财务韧性与增长潜力，又推动整个行业朝着减少碳足迹、缓解气候变化的总体目标迈进。

“除资金支持外，绿色转型供应链最重要的助力将来自有利于绿色转型的本地与国际法规。

Nabil Al-Khowaiter
沙特阿美风险投资前首席执行官

气候技术的进步与绿色供应链的发展同样离不开人才支撑。随着各行各业积极采用可持续发展实践以最大限度降低环境影响，市场对具备供应链管理与优化能力的专业人才需求激增。这些人才需掌握环境影响评估、可持续采购以及生态友好型物流管理等核心技能，以推动企业和社会向更绿色的方向发展。

值得注意的是，气候科技教育正在突破传统社会群体的界限。从高校培养全球对话与创业领域的未来领袖，到企业员工接受培训以践行可持续发展原则，再到技术工人在一线实施和维护气候科技基础设施，教育的影响力已延伸至社会各个层面。无论企业规模大小，绿色转型都离不开人才储备，而技术工人作为执行与维护气候科技成果的中坚力量，更是不可或缺。

从“气候变化原住民”到未来领袖的崛起

青年不仅承载着当今世界所面临的气候挑战，同时也肩负着推动代际可持续发展的重任。他们成长于全球气候意识日益增强的时代，可谓“气候变化的原住民 (climate change natives)”。在这样的环境下，他们自幼接受相关教育，享受经济发展的红利，并培养了更广阔的全球视野，使其与前辈们形成鲜明对比。这种拓展的世界观让他们的关注点超越了传统文化和产业的界限，以更加综合和系统的方式审视气候问题。尽管全球对气候变化的认知仍存差异，但这一代人深植于心的环保意识，为他们未来在关键岗位上推动可持续发展带来了希望。

要让青年更有效地参与气候行动，需要采取多管齐下的策略，包括教育、实践和政策倡导。高校课程应进一步拓展，将环境科学、政策制定、经济学、可持续管理及社会正义等内容纳入其中，为青年提供理解可持续发展复杂机制的系统框架。例如，联合国气候变化框架公约 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 的青年组织 YOUNGO 便是提升环境意识的典范。通过网络研讨会、讲习班和青年大会等活动，该组织不仅促进了创新理念和务实战略的交流，也推动了联合国可持续发展目标的实现，进一步增强了青年在全球环境治理中的领导力。

减缓气候变化的影响不仅需要宏大的宣言，更涉及国家、地区、产业和社会阶层之间复杂的资源再分配。这一过程需要深入考量，确保转型的公平性。高校课程应着重培养未来的气候领导者，使他们优先关注受气候变化影响最深的边缘群体，例如因气候灾害而流离失所的人群，以及因政策调整而失业的工人。青年领袖不仅要深刻认识气候变化的严峻性，更需致力于构建社会与经济结构，以保障转型过程中每个群体的权益以及更宏观的社会和经济结构的稳定。

此外，本报告的多数受访者强调，气候领导力教育不仅应通过知识与技能的传授为未来领袖奠定技术基础，还应为青年提供观点表达的平台，使其见解能够有效融入更广泛的气候战略网络与政策制定进程。通过实习与导师制等实践学习，学生能够直接接触前沿可持续发展实践并在真实情境中运用所学，互相协作解决环境问题。这种教育模式不仅帮助学生理解全球气候挑战，更促使他们关注地方现实与伦理议题，

从而掌握在气候科技领域推动变革所需的综合能力，并提升其在环境管理方面的自我效能感。

尽管有效的气候领导力教育能够培养未来的领袖，但公平与包容的参与机会同样至关重要，尤其需要关注不同国家、地区和性别群体的平等性。目前，许多人对“气候科技”仍然持有刻板印象，将其看作是一个与男性更关联的理工类学科 (Science, Technology, Engineering, Mathematics, STEM)。这种观点具有许多错误，其忽视了气候问题本身的跨学科属性，同时影响了女性探索气候科技的兴趣，还阻碍了女性进入自然科学、环境工程等与气候领导相关的专业领域。正如金砖国家青年能源署主席兼总干事 Alexander Kormishin 所指出，在金砖国家等地区，女性在领导力发展方面面临诸多障碍，部分群体更倾向于传统家庭角色。这种性别偏见削弱了女性在能源领域及领导岗位的参与度，也限制了她们对国家经济和环境事业的潜在贡献。

鉴于气候问题的跨学科特性，必须确保所有人——无论性别、国籍和种族——都能平等获取包括理工科在内的各领域的知识与发展机会。为了缩小现存差距并推动气候领导力教育的持续发展，应特别关注青年与女性的社会赋能。通过专项培训，确保他们在可持续发展倡议中得到充分代表，使其能够有同等的机遇成长为未来的气候领袖与能源转型的关键推动者。



阿拉伯青年中心 (The Arab Youth Center, AYC) 在阿拉伯世界广泛推动青年赋权，通过独特的影响评估框架和对创业、职业发展、社区参与及研究的关注，为 30,000 余名青年带来了积极影响。

阿拉伯青年中心的评估体系以数据驱动和以青年为中心的战略见长。其方法强调倾听年轻人的声音，确保各项计划既具有吸引力，又切实回应青年群体的具体需求。例如，在数据收集阶段，AYC 采用“净促进者得分” (Net Promoter Score, NPS) 来衡量青年满意度和期望值，使项目的成效能够被精准跟踪和量化。

在应对全球环境挑战方面，阿拉伯青年中心设立了阿拉伯青年气候变化中心 (The Arab Youth Council for Climate Change, AYCCC)，这一重要举措旨在培养气候领袖。该中心为期两年，提供系统化培训，支持青年领袖开展社区项目，并为他们创造机会，使其在国际论坛上发声，同时与地区决策者和同行建立联系，促进其发展和影响力。根据《阿拉伯青年中心影响评估报告》，78% 的受访者表示，通过参与阿拉伯青年气候变化中心举办的活动，学生们对气候变化的认知有所提升，近 40% 的受访者更是积极投身于减缓气候变化的行动，这表明该中心的举措已产生了实质性影响。

通过提供知识、技能和实践机会，阿拉伯青年气候变化中心为青年赋权的成效提供了可衡量的证据。这一方法不仅帮助年轻人积极参与环境治理，也培养了致力于可持续发展的阿拉伯青年领袖新生代。

资料来源: 阿拉伯青年中心, 2024年



“通过倾听青年们的真知灼见并从他们的建议中获益，我们可以设计并实施创新的解决方案，从而有效减少气候变化带来的挑战并抓住未来的机遇。”

Sultan Saif Al Neyadi 博士阁下 阿拉伯联合酋长国青年事务国务部长

全球每一位青年无论其身在何处、经济条件如何，都应当有平等的权利来接受可持续相关的领导力教育。在推动这一目标的过程中，如何平衡商业化运作与教育使命成为一项重大挑战。志愿服务、夏令营、论坛和实习机会等商业化项目确实促进了青年可持续活动的百花齐放，但许多过度追求利润的项目反而加剧了受教育机会的不均等。因此，在商业合作

中，国际组织、政府及大型企业应将公平性作为优先考量，确保资源分配不因经济壁垒而限制青年参与。项目遴选时，除了考量经济因素，教育者还应关注候选人的气候领导潜力以及其与项目核心价值的契合度。此外，许多组织提供的奖学金在扩大气候领导力教育的可及性方面发挥了重要作用，为更多青年提供了成长与实践的机会。

突破范式的学习方法

随着可持续发展日益成为高等教育的核心议题，全球范围内的高校绿色学位课程数量显著增长。根据联合国环境规划署 (The United Nations Environment Programme, UNEP) 的报告，目前已有 68 个国家和地区的约 1,050 所大学承诺在 2050 年前实现净零排放¹²²，彰显各国对可持续发展倡议的持续投入。在这一背景下，各高校正积极开设涵盖人工智能、绿色能源等前沿领域的绿色学位和研究项目，核心聚焦在可持续发展。例如，牛津大学正在推进一项计划，旨在提升本科生和研究生对气候变化的认知和应对能力。此外，正如伦敦大学学院气候变化与可持续发展教育中心副研究员 Andrew Lee 博士所强调的，当前的关键问题并非个人是否相信气候变化，而在于其对基础科学的理解。通过提供相关课程与研究资源，“绿色高校”赋能青年与从业者应对挑战的知识储备，激发问题解决导向思维。此类具备战略视野与管理能力人才的培养，为企业输送高素质人才库，驱动气候科技进步并培育可持续供应链。

1,050

来自 68 个国家和地区承诺在 2050 年前实现净零排放的大学数量

高校的绿色教育与气候领导力培养的处境相似，需要在课程设计上保持灵活性，以适应行业不断变化的需求。传统僵化、以教科书为中心的教学方法亟需改革，以促进学生的深度参与，并帮助他们全面理解当代气候挑战。同时，教育实践应突破传统课堂的局限，采用实用的跨学科框架，既强调专业技能的培养，又注重学生的全面发展。高校在培养问题意识和解决问题能力方面应发挥核心作用，鼓励学生参与科学研究和实践项目，以提升未来竞争力。此外，教师培训计划和教材更新也需与行业发展保持同步，以确保教学内容与现实需求接轨。

尽管众多高校开设可持续发展课程，但仅具备理论知识远不足以让学生在未来职业生涯中发挥实际影响力，他们仍需掌握推动可持续发展事业所需的实践技能。当前，全球对兼具环境、社会和治理视角，并具备财务、管理和运营等跨学科专业知识的人才需求日益增长。领先企业积极寻求能够将国际环境、社会和治理标准融入战略规划的专业人才，他们需要具备系统性思维、广泛的利益相关者协作能力，以及对长期可持续创新的承诺。这些核心能力主要通过大学教育及实践经验培养而成。因此，高校的角色不仅是提供可持续教育，更在于塑造具有全球视野的复合型人才，以满足环境、社会和治理等多个领域领导力的实际需求。

绿色高等教育的影响力不仅局限于课堂，还体现在校园基础设施的改造与绿色校园的建设。通过采用环保建筑材料和可持续设计理念，大学可以将可持续发展融入师生的日常生活，创造有助于培养环保意识的学习环境。例如，新加坡国立大学 (National University of Singapore, NUS) 在“碳中和新国立 (Carbon Neutral NUS)”、“清凉新国立 (Cool NUS)” 和“零废弃新国立 (Zero Waste NUS)” 等倡议方面取得了重要进展。其教学楼经过重新设计，实现了 80% 的碳减排，校园内种植了约 35,100 棵树，并在建筑表面涂刷降温涂料，以减少吸热和空调使用需求。此外，校园内的资源分类站促进了废物分类和回收，支持“零浪费”运动¹²³。这些基础设施的升级不仅塑造了一种广泛的环境责任文化，也在潜移默化中培养了学生的可持续发展意识，激励他们在未来采取具体行动。

与此同时，现代大学正积极推动跨学科环境教育，促进不同学术部门及外部组织（包括企业）之间的协作。通过建立内部和外部合作伙伴关系，学生能够在多元背景下学习可持续发展知识，培养对气候技术的深入理解，同时确保学术课程与行业需求保持一致。例如，阿卜杜拉国王科技大学（King Abdullah University of Science and Technology, KAUST）

案例 12

超越课堂的气候教育



世界大学气候变化联盟（The Global Alliance of Universities on Climate, GAUC）成立于 2019 年世界经济论坛期间，由清华大学和伦敦政治经济学院牵头，联合八所世界顶尖大学，致力于推动全球高等教育界共同应对气候变化的努力。

世界大学气候变化联盟通过促进跨学科和跨地域的国际对话，提升全球青年在气候行动中的能力，帮助学生掌握解决气候问题的核心技能。如今，该联盟已发展为一个覆盖六大洲、九个国家和地区的跨大学网络，汇集了 15 所高校及相关机构的气候教育资源。学生不仅能够自由获取专家指导的讲座和前沿研究机会，还能在开放的学术环境中探索创新解决方案。

除了提供理论课程，世界大学气候变化联盟还积极与行业、非营利组织和政府机构合作，推动“气候变化协同（Climate X）”项目及实践活动。例如，联盟举办全球青年零碳未来峰会，并组织青年代表团参与第 25 届缔约方大会（The Conference of the Parties 25, COP25）等国际会议，旨在培养未来的气候领导者。为进一步激发青年群体对气候行动的参与热情，世界大学气候变化联盟提议在联合国气候变化框架公约缔约方会议召开前设立为期一周的青年活动，汇聚全球青年围绕气候议题展开深入讨论。在 2023 年的相关活动中，来自六大洲的青年组织携手推进了一系列气候创新项目和政策倡导工作。

世界大学气候变化联盟认识到，应对气候变化需要一系列关键技能。随着气候技术的快速发展，数据分析与人工智能已成为青年解决气候问题的核心能力之一。同时，建立可持续的绿色供应链离不开对绿色金融原则的深入理解。为满足这些需求，全球气候问题大学联盟充分利用内部资源，开设“气候 X 金融”以及“气候 X 人工智能与创新”培训课程，助力年轻人掌握最前沿的技术和专业知识。

资料来源：世界大学气候变化联盟，2023 年



“年轻的一代往往具有更广阔的全球视野，能够跨越传统的文化和产业界限，以更加综合的方式看待气候问题。青年可以被视为气候问题的“催化剂”，加速形成不同的需求和解决方案，并在理解和解决气候问题方面发挥重要作用。确保青年参与气候行动需要通过教育、实践和政策宣传共同努力。”

何超欣 世界大学气候变化联盟首席青年官

与沙特阿美石油公司（Saudi Aramco）、沙特电力公司（Saudi Electricity Company）及隆基太阳能等本地及国际企业建立合作伙伴关系，不仅推动了研究资金的流入，也加速了碳捕集、低碳氢和先进运输等市场相关技术的发展。这种产学研深度融合的模式，为可持续发展领域培养了兼具理论素养和实践经验的创新型人才。

职业教育转型

可持续发展正日益融入各级教育体系，特别是在环境意识相关的技术和职业教育领域，以培养现代劳动力市场所需的绿色技能。访谈结果显示，教育工作者和企业家普遍认可传统职业培训的不足，例如缺乏工业环境中的实践经验，以及毕业生在就业过渡阶段面临较长的适应期。针对这些问题，一种新型的合作模式逐步兴起，即通过跨界联盟将绿色教育与技术和职业培训相结合，以提升学生的实用技能和就业竞争力。

在这一背景下，“产教融合”模式成为推动绿色职业教育的重要路径。教育机构与当地企业建立合作伙伴关系，职业学校提供专业知识，企业则提供资金支持和实践环境。这种协同机制不仅促进了学术活动、论坛和竞赛的开展，还使学生能够掌握智能制造和能源管理等领域的前沿技能。例如，施耐德电气自 2011 年以来持续举办“绿色能效全球创新案例挑战赛（Go Green）”，该赛事已吸引来自 200 多个国家和地区的 16 万多名学生参与，鼓励他们围绕可持续发展理念，在数字化和能源管理领域进行创新。在中国，施耐德电气通过“碧播职业教育计划（BipBop project）”和“绿色产教融合项目”扩展合作网络，覆盖 100 多所职业学校，培训了数千名教师，惠及超过 10 万名学生。此外，许多高校还与国际组织合作，共同提升全球职业教育的质量。这种跨国合作促进了环境技术和知识的交流，显著增强了职业教育毕业生的专业能力和市场竞争力。

然而，尽管大学层面的气候教育蓬勃发展，绿色职业培训仍面临标准化和资金方面的挑战。政府补贴作为职业教育的主要资金来源之一，在某些发展中国家和地区存在分配不均的问题，从而加剧了区域间的不平等。此外，当前的绿色职业培训体系仍缺乏系统化、结构化的课程设计，导致市场上合格技术工人的短缺，难以满足产业需求。职业教育机构的不足、专门培训项目的匮乏，以及缺少经验丰富的教育工作者，都限制了一线工人对绿色技能的理解，降低了他们在实际工作中应用可持续实践的能力。牛津气候校友网络（OxCAN）首席执行官 Ese Owie 博士指出，尽管全球南部的工人展现出提升技能的潜力和意愿，但清洁能源技术的推

广仍然面临投资不足的问题，该地区亟需进一步加强能力建设，以实现可持续发展目标。

“

美国最近出台的法规为加强职业教育提供了重要的激励措施，以支持向可再生能源经济转型。这就形成了一个良性循环，社区和各州竞相吸引可再生能源投资，如电池和电动汽车制造厂。各州在争夺这些投资的同时，也投资于职业培训，以确保当地劳动力掌握必要的技能。

Stan Meiburg 博士

维克森林大学环境与可持续发展中心执行董事

国际合作与技术转让在推动职业教育发展方面发挥了关键作用，尤其是在经济欠发达地区。以女性教育运动（CAMFED）为例，该组织自 2013 年起在撒哈拉以南非洲的边缘化贫困农业社区实施了一项创新项目。该计划已为超过 8,500 名年轻女性提供气候智能型农业培训¹²⁴，该项目将大量参与者转化为“农业创业者（agripreneurs）”，创造了显著的经济价值。

鉴于职业培训在促进社区发展和赋权方面的深远影响，国际组织和非营利资助者的进一步参与至关重要。这类培训侧重于实用技能与可持续实践，不仅有助于提升农业效率，还能增强社区的经济韧性和自主能力，从而推动更广泛的社会经济进步。这一综合方法既满足了当前需求，也为长期增长奠定了基础。

尽管已取得一定成就，可持续职业教育仍需持续关注与改进。为确保培养出既具备环保意识，又符合教育体系要求的技能型人才，学术界与教育机构需加强合作，推动创新，为未来发展奠定更加坚实的基础。



V

结论：未来应当何去何从？

“

尽管技术能够助力实现零碳经济，但在许多领域可能会带来绿色溢价。这意味着仅靠自由市场无法实现脱碳目标。我们需要通过法规、量化目标、碳定价或公共政策工具，平衡传统技术与清洁技术之间的竞争。

Adair Turner 勋爵
英国气候变化委员会主席

对政府和国际组织的建议

首先，进行科学规划，确保各利益相关方的积极参与，以及关注与各领域的协同效应。在设定国际气候目标时，应当全面评估各维度指标，识别其中领先和滞后的指标。在制定气候转型战略、规划投融资责任时，还应促进多边意见交流。其次，实施稳定、一致的政策，以培育良性绿色经济循环。通过监管沙盒和概念验证基金等政府机制，提供市场化激励措施，鼓励绿色供应链的参与者进行投资。提升公众意识并管理意识波动，以维持政策有效性。第三，制定绿色法规，缩小与非绿色替代品之间的差距，避免贸易壁垒和不平等。需认识到颁布法规仅是开始，执行和公众教育同样重要，尤其是在管理环境声明的可信度方面。评估绿色标签，防止自我认证、错误信息和“漂绿”行为，利用区块链和可追溯技术提升可信度并防范欺诈。

第四，减少官僚主义，加强官员的绿色知识教育。对标供应链的国际绿色标准、市场机制和法规，以提高效率并降低风险。

最后，通过专注于城市脱碳来规避“邻避效应”，而不是简单地将非绿色产业迁移到其他地方。

对非营利组织和教育机构的建议

首先，建立包括技术转移办公室在内的机制，推动创新从实验室走向工厂。其次，弥合跨多辖区供应链中的知识、标准和合规差距，建立信任、标准化指标和互认机制。第三，以“气候变化原住民”的语言教育年轻一代。开发多层次、多学科的项目，超越课本和课堂，培养未来的气候领导者、专业人士和技能工人，同时确保性别和社会公平。

对大型企业的建议

首先，通过超越合规要求实现可持续发展的卓越表现，与客户和员工的价值观保持一致，提升品牌竞争力，并通过绿色价值和降低风险来增强投资者和客户的信心。通过监控失业情况并提供向技能型岗位过渡的培训，积极履行企业社会责任。其次，建立可追溯的供应链数据基础设施，确保合规性和影响力。通过合作提供测试设施，并将创新技术整合到大型供应链中。第三，谨慎评估人工智能在供应链中的应用，瞄准小规模、快速见效的场景，同时考虑数据质量和算法局限性。

最后，对于难以减排的行业和传统能源运营商，采用灵活、经济高效的转型策略，如原位转型和碳捕集、利用与封存。在替代燃料方面平衡成本与可持续性，确保适当的认证和数据可追溯性以保护价值。

对金融机构的建议

首先，分析影响气候科技在不同技术成熟度和市场适配度上采用的技术、金融、监管和社会因素。对气候科技产品及其业务惯性场景进行评估，以实现全面的分析。其次，识别金融机构的风险偏好类型（先锋、猎手、推手或稳锚），并根据其类型采取相应的主动或被动策略。金融机构需将气候相关风险和机遇纳入财务和风险预测模型。第三，为促进气候科技企业快速发展，金融机构需提供最佳实践和资源网络的支持，而不仅仅是资金。

对中小企业、初创企业以及个人的建议

首先，在气候科技企业的管理团队中培养多样化技能，不仅限于技术专长，还应包括销售、政府关系和投资者关系。保持持续学习、敏捷应对的能力，迅速适应最新的绿色供应链趋势和政策变化，以充分利用政策优势调整策略。其次，通过考虑与同行、竞争对手及业务惯性案例的差异化因素，建立竞争优势。第三，培养创业敏锐度，秉持“错的快、错的好”的思维方式，加速想法的测试和迭代，以获取有价值的见解并加快学习进程。

编撰机构

联合国训练研究所 (UNITAR) 致力于为个人、组织和机构提供创新的学习解决方案，以提升全球决策能力，并支持各国在国家层面采取行动，共同塑造更美好的未来。UNITAR 的战略重点在于实现可持续发展目标，并协助各国政府推进 2030 议程的落实。

网站：www.unitar.org



支持机构

(按字母顺序排列)

阿拉伯青年中心	上海金桥集团	牛津校友气候行动网络 (OxCAN)
亚洲开发银行	绿色金融 60 人论坛	乐家
绿动资本	伦敦发展促进署	新加坡金鹰集团
Atlantis Blu 集团	路特斯科技	施耐德电气
中国宝武钢铁集团	亚太经济合作组织美国国家中心	中研绿色金融研究院
博世集团	New Energy Nexus (NEX)	瑞再企商保险
世界大学气候变化联盟	耐克	

网站：www.pecc.org



太平洋经济合作理事会 (PECC) 是一个独立的区域机制，拥有 23 个成员国和 2 个成员机构，致力于推动经济合作和市场驱动的区域一体化。自 1980 年以来，PECC 作为亚太地区经济合作的区域论坛，促进政策协调与经济发展。作为亚太经合组织 (APEC) 唯一的非政府官方观察员，PECC 为 APEC 部长级会议和工作组提供信息和分析支持，促进私营部门参与正式进程。

网站：www.shanghaiclimateweek.org.cn



上海气候周 (SHCW) 是由百余家全球生态伙伴共同倡议发起，联合国和中国政府给予支持，政、商、学、社各类组织共同参与，联合打造的具有全球影响力的应对气候变化交流与合作平台。其目标是“中国行动、亚洲声音、世界标准”，促进社会多层次参与中国双碳目标承诺，向世界讲述应对气候变化行动的中国故事，传递绿色转型的亚洲声音，加大气候变化领域国际交流与合作，参与国际规则制定和引领。

网站：www.we-carbon.com

知识合作伙伴

蔚碳科技 (WeCarbon) 是一家全球领先的气候科技企业，致力于以人工智能技术赋能全球供应链从合规、制造、认证、跨境电商到 ESG 管理等各个环节的可持续发展，推动企业创造实际价值和商业影响力，加速全球供应链绿色转型。



法律顾问

光明律师事务所

致谢

本报告由跨学科专家团队共同完成，融合了来自学术界、产业界、金融界、公共政策和可持续发展领域的专业智慧。这个多元化团队为气候科技在金融、教育和人才发展等方面提供了宝贵的见解。通过卓有成效的协作，报告确保了深入的分析与切实可行的建议，凸显了多元视角在应对气候变化和可持续发展挑战中的重要性。

作者

王云昊

上海气候周亚太合作事务首席代表兼青年委员会执行总干事

施怡然

上海气候周执行委员会秘书处副秘书长兼青年委员会秘书长

Antonio Basilio

太平洋经济合作理事会主席兼亚太经合组织工商咨询理事会
全球秘书长

马赢超

蔚碳科技联合创始人兼首席技术官

于嘉丹

联合国训练研究所多边外交司政府与公共事务负责人

孙士淇

上海气候周知识专家

贡献者

(按姓氏字母顺序排列)

作者团队谨向以下来自学术界、工业界、金融界、公共政策和可持续发展等领域的专家致以诚挚的谢意，感谢他们通过内容贡献与战略指导，为本次出版提供了宝贵的洞见：

Suleiman Abdeljawad
Atlantis Blu 集团创始人

Razann Al Ghussein
马斯达尔可持续能源女性先锋

Nabil Al-Khowaiter
沙特阿美风险投资前首席执行官

Butti Almheiri
联合国基金会 Next-generation 气候学者

Sultan Saif Al Neyadi 博士阁下
阿拉伯联合酋长国青年事务国务部长

Nabil Al Saleh 阁下
沙特阿拉伯王国前副国务部长

Sameer Al Shethri
Atlantis Blu 集团首席执行官

Haya Aseer
阿拉伯青年中心项目经理

白波博士
绿动资本董事长

Zayed Bin Rashid Bin Aweidha 阁下
阿布扎比投资集团首席执行官

Josemari Janathiel P. Borla
菲律宾外交部外交事务研究所副研究主管

Khamis Juma Buamim 阁下
迪拜海洋及海事工业委员会主席

常远
耐克大中华区供应链副总裁

陈晓彬
上海气候周青年委员会委员

陈垚卉
启迪之星亚太首席执行官

成守正
罗盛咨询全球合伙人

Graciela Chichilnisky 博士
《京都议定书》首席谈判代表

Helen Clarkson
气候组织首席执行官

Mark Cutis
阿布扎比投资委员会资深顾问

戴明江
蔚碳科技项目经理

Mohammed Dangor 阁下
南非国会议员

高建兵
中国宝武钢铁集团副总经理

Ramon Gonzalez 博士
美国能源部高级研究计划署项目主任

Mohamed Gouali 博士
Blue Capital Advisory 首席执行官

顾蔚博士
中研绿色金融研究院院长

Abdelrhman Hatem
Electrify 创始人

何超欣
世界大学气候变化联盟首席青年官

Matt Kean 阁下
澳大利亚气候变化管理局主席

Mujeeb Khan
Clean Rivers 项目经理

Mohamed Bashir Kharrubi 博士
石油输出国组织 (OPEC) 主席前高级顾问

Alexander Kormishin
金砖国家青年能源署主席兼总干事

Tanner Krueger
亚太经合组织美国国家中心政策主任

蓝虹博士
中国人民大学生态金融研究中心副主任

李坤龙
路特斯首席财务官兼 ESG 委员会主席

Andrew Lee 博士
伦敦大学学院气候变化与可持续发展教育中心副研究员

李政博士
清华大学气候变化与可持续发展研究院院长

楼昱杉
哥伦比亚大学全球能源政策中心研究助理

马欣仪
蔚碳科技咨询顾问

Nick Mabey
E3G 首席执行官

Stan Meiburg 博士
维克森林大学环境与可持续发展中心执行董事

Ese Owie 博士
牛津气候校友网络 (OxCAN) 首席执行官

Guillem Pages
乐家中国董事总经理

Alex Parle
亚太经合组织美国国家中心执行副主席

彭玉成
Midas Innovation 集团首席执行官

Jonathan Rake
瑞士再保险集团瑞再企商亚太区首席执行官

饶威
上海气候周执行委员会秘书处副秘书长

束兰根博士
新加坡金鹰集团中国区财务副总裁

Warwick Smith 阁下
澳大利亚前联邦政府部长

Isaac Smith
Clarendon Capital 董事总经理

孙浩洋博士
英格尔认证副总经理

Twarath Sutabutr 博士
泰国知识管理发展办公室主任

Adair Turner 勋爵
英国气候变化委员会主席

吴彦萱
剑桥大学研究员

张星博士
亚洲基础设施投资银行高级气候政策专家

徐大全博士
博世中国总裁

徐洁平
璞跃中国首席执行官

许秋明
德国 TÜV 莱茵可持续发展服务总经理

叶强生
世界经济论坛循环经济倡议前负责人

张翼翔
新加坡数字绿色交易所 (MVGX) 总裁

张慧中
蔚碳科技咨询顾问

张俊杰博士
昆山杜克大学可持续投资研究项目主任

张君毅
蔚来资本创始合伙人

张开鹏
施耐德电气全球供应链中国区高级副总裁

张伟娜博士
新加坡国立大学可持续与绿色金融研究所副所长

赵冰冰
伦敦发展促进署大中华区首席代表

周一平
联合国南南合作办公室创始主任

朱理立
金桥集团副总经理

Shi Hao Zijdemans
亚洲基础设施投资银行数字与技术专家

参考文献

- 联合国工业发展组织. (n.d). 可持续供应链. 检索自 <https://www.unido.org/our-priorities/sustainable-supply-chains>
- 联合国全球契约与埃森哲. (2023). 解锁 2030 年全球韧性、增长与可持续发展路径: 第 12 届联合国全球契约-埃森哲 CEO 研究报告 [特别专题: 供应链]. 检索自 <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/accenture-com/document/Accenture-UNGC-CEO-Study-Supply-Chain-Feature.pdf>
- Herron, C., & Hicks, C. (2008). 精选精益制造技术通过变革推动者从日本汽车制造业向英国通用制造业的转移. 机器人技术与计算机集成制造, 24, 524–531. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.07.014>
- Wahab, A. N. A., Mukhtar, M., & Sulaiman, R. (2013). 精益制造维度的概念模型. 技术学报, 11, 1292–1298. <https://doi.org/10.1016/j.jprotcy.2013.12.327>
- Forrester, P. L., Kazumi Shimizu, U., Soriano-Meier, H., Garza-Reyes, J. A., & Basso, L. F. (2010). 巴西农业机械领域的精益生产、市场份额与价值创造. 制造技术管理杂志, 21(7), 853–871.
- Martínez-Jurado, P. J., & Moyano-Fuentes, J. (2014). 精益管理、供应链管理与可持续性: 文献综述. 清洁生产杂志, 85, 134–150. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.042>
- Salvador, R., Pieckarski, C. M., & de Francisco, A. C. (2017). 精益与绿色制造的双向影响及其与相关组织领域的联系. 国际生产管理与工程杂志, 5(2), 73. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2017.7013>
- BloombergNEF. (2024). 2024 年能源转型投资趋势. 检索自 <https://about.bnef.com/energy-transition-investment/>
- Ding, H., Zhao, Q., An, Z., & Tang, O. (2016). 环境约束与碳限额下可持续供应链的协作机制. 国际生产经济学杂志, 181, 191–207. <https://doi.org/10.1016/j.ijipe.2016.03.004>
- Sun, H., Wan, Y., Zhang, L., & Zhou, Z. (2019). 政府补贴机制下两级供应链绿色投资的演化博弈. 清洁生产杂志. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.329>
11. Xing, G., Xia, B., & Guo, J. (2019). 财务约束下绿色供应链的可持续合作. 可持续性. <https://doi.org/10.3390/su11215977>
- Pickett-Baker, J., & Ozaki, R. (2008). 环保产品: 营销对消费者购买决策的影响. 消费者营销杂志, 25, 281–293. <https://doi.org/10.1108/07363760810890516>
- Huang, W., Lee, C., & Chen, H. (2022). 企业社会责任对消费者购买环保运动鞋意愿的影响. 可持续性. <https://doi.org/10.3390/su142114400>
- Royne, M., Levy, M., & Martinez, J. (2011). 消费者环保意识及其对环保产品支付意愿的公共卫生意义. 消费者事务杂志, 45, 329–343. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6606.2011.01205.x>
- Kazmi, S., Shahbaz, M., Mubarik, M., & Ahmed, J. (2021). 新兴经济体中消费者对绿色品牌的转换行为. 环境、发展与可持续性, 23, 11357–11381. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01116-y>
- Namkung, Y., & Jang, S. (2013). 餐厅绿色实践对品牌资产形成的影响: 绿色实践真的重要吗? 国际酒店管理杂志, 33, 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2012.06.006>
- Leckie, C., Rayne, D., & Johnson, L. (2021). 促进绿色品牌的顾客参与行为. 可持续性. <https://doi.org/10.3390/su13158404>
- Maniatis, P. (2016). 消费者选择绿色产品时的影响因素研究. 清洁生产杂志, 132, 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.067>
- Papista, E., & Dimitriadis, S. (2019). 消费者与绿色品牌关系: 重新审视利益、关系质量与结果. 产品与品牌管理杂志. <https://doi.org/10.1108/JPBM-09-2016-1316>
- Dear, H., Isejny, S., & Ferati, R. (2020). 绿色营销与消费者对绿色品牌的行为态度. 国际社会科学与应用研究杂志, 23, 04–11. <https://doi.org/10.52155/ijpsat.v23.2.2280>
- Slaš anová, N., Krahulcová, M., Paluš, H., orejová, T., & Križanová, A. (2019). 企业绿色采购行为的应用. 2019 年经济、管理与技术国际会议论文集. <https://doi.org/10.2991/emt-19.2019.19>
- Sreen, N., Purvey, S., & Sadarangani, P. (2018). 文化、行为与性别对绿色购买意愿的影响. 零售与消费者服务杂志, 41, 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2017.12.002>
- Dangelico, R. (2017). 绿色产品开发的驱动因素及其对市场绩效的影响: 对意大利生态标签公司的调查. 商业战略与环境, 26, 1144–1161. <https://doi.org/10.1002/bse.1975>
- Nekmahmud, M., & Fekete-Farkas, M. (2020). 为什么不选择绿色营销? 发展中国家消费者绿色购买决策的影响因素. 可持续性. <https://doi.org/10.3390/su12197880>
- Leire, C., & Dalhammar, C. (2018). 绿色公共采购的长期市场效应. <https://doi.org/10.1017/9781108500128.012>
- Marron, D. (1997). 购买绿色: 作为环境政策工具的政府采购. 公共财政评论, 25, 285–305. <https://doi.org/10.1177/109114219702500302>
- Nielsen, I., Majumder, S., Sana, S., & Saha, S. (2019). 政府激励与博弈结构对单期和两期绿色供应链的比较分析. 清洁生产杂志. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.168>
- Schebesta, H. (2018). 欧盟食品采购与餐饮服务绿色公共采购标准的修订——认证计划作为公共可持续食品采购的主要决定因素. 欧洲风险监管杂志, 9, 316–328. <https://doi.org/10.1017/err.2018.24>
- Rainville, A. (2017). 绿色公共采购标准——促进创新的框架. 清洁生产杂志, 167, 1029–1037. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.088>
- Maxwell, R., & Miller, T. (2017). 绿色文化政策. 国际文化政策杂志, 23, 174–185. <https://doi.org/10.1080/10286632.2017.1280786>
- Kelly, E. (2014). 文化根深蒂固: 解释纽芬兰森林中基于生态系统的管理政策与实践之间的差距. 森林政策与经济, 46, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.forepol.2014.05.005>
- Yan, L., Keh, H., & Chen, J. (2020). 同化与分化: 社会阶层对绿色消费的曲线效应. 消费者研究杂志. <https://doi.org/10.1093/jcr/ucaa041>
- Eckersley, R. (1989). 绿色政治与新阶级: 自私还是美德? 政治研究, 37, 205–223. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9248.1989.tb01479.x>
- 世界经济论坛. (2022, 1 月). 绿色公共采购: 催化净零经济. 使命可能伙伴关系. 检索自 <https://www.weforum.org/reports/green-public-procurement-catalysing-the-net-zero-economy>
- Pullman, M. E., Maloni, M., & Carter, C. R. (2009). 值得深思: 社会与环境可持续实践及绩效结果. 供应链管理杂志, 45, 38–54. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2009.03175.x>
- Evans, L., Nuttall, C., Mouat, A., & Ewing, D. (2010). 国家绿色与可持续公共采购标准及基础计划的评估与比较: 最终报告. 欧洲委员会. <http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/Criteria%20and%20Underlying%20Schemes.pdf>
- Brammer, S., & Walker, H. (2011). 公共部门的可持续采购: 国际比较研究. 国际运营与生产管理杂志, 31, 452–476.
- Walker, H., & Brammer, S. (2009). 英国公共部门的可持续采购. 供应链管理, 14, 128–137. <https://doi.org/10.1108/13598540910941993>
- Preuss, L. (2007). 购买未来: 地方政府采购中的可持续举措. 商业战略与环境, 16, 354–365. <https://doi.org/10.1002/bse.578>
- Lundberg, S., Marklund, P., & Brännlund, R. (2009). 绿色公共采购作为政策工具的评估: 成本效率与竞争考量. 公共采购. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1831089>
- Cheng, W., Appolloni, A., D' Amato, A., & Zhu, Q. (2018). 绿色公共采购: 缺失的概念与未来趋势——一项批判性综述. 清洁生产杂志, 176, 770–784. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.027>
- Vejaratnam, N., Mohamad, Z., & Chenayah, S. (2020). 政府绿色采购实施障碍的系统性综述. 公共采购杂志, 20, 451–471. <https://doi.org/10.1108/jopp-02-2020-0013>
- Sreen, N., Purvey, S., & Sadarangani, P. (2018). 文化、行为与性别对绿色购买意愿的影响. 零售与消费者服务杂志, 41, 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2017.12.002>
- Liu, J., Shi, B., Xue, J., & Wang, Q. (2019). 提升中国地方政府绿色公共采购绩效: 基于官员知识的视角. 采购与供应链管理杂志. <https://doi.org/10.1016/j.jpursup.2018.05.002>
- Liu, J., Liu, Y., & Yang, L. (2020). 揭示高层管理者支持与绿色采购之间的影响机制: 绿色培训的作用. 清洁生产杂志, 251, 119674. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119674>
- Jordan, A. (1998). 氧臭终局: 蒙特利尔议定书在英国的实施. 环境政治学, 7, 23–52. <https://doi.org/10.1080/09644019808414421>
- Beron, K., Murdoch, J., & Vijverberg, W. (2003). 为何合作? 公共产品、经济权力与蒙特利尔议定书. 经济与统计评论, 85, 286–297. <https://doi.org/10.1162/003465303765299819>
- England, M., & Polvani, L. (2023). 蒙特利尔议定书正在推迟首个无冰北极夏季的出现. 美国国家科学院院刊, 120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2211432120>
- Gareau, B. (2010). 《蒙特利尔议定书》成功淘汰CFC与延迟淘汰溴化甲烷的关键评析. 国际环境协定: 政治、法律与经济学, 10, 209–231. <https://doi.org/10.1007/s10784-010-9120-z>
- 专栏 5: 加强印度尼西亚的可持续采购. (2022). 2022 年采购年度报告. 马尼拉: 亚洲开发银行. 第 17 页. © 亚洲开发银行. <https://dx.doi.org/10.22617/SPR230092-2-CC-BY-3.0-IGO>
- IPCC. (2021). 气候变化 2021: 自然科学基础. 第一工作组对 IPCC 第六次评估报告的贡献. 检索自 https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_01.pdf
- 能源研究所. (2024). 世界能源统计评论: 第 73 版. 能源研究所.
- 国际能源署. (2022). 更新至 2050 年净零排放路线图——2022 年世界能源展望——分析. 检索自 <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022-an-updated-roadmap-to-net-zero-emissions-by-2050>
- Sterl, S., Hussain, B., Miketa, A., 等. (2022). 非洲太阳能光伏与风能“供应区域”的全数据集. 科学数据, 9, 664. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01786-5>
- IRENA. (2023). 2022 年可再生能源发电成本. 国际可再生能源机构, 阿布扎比.
- Smith, S. M., Geden, O., Gidden, M. J., 等. (2024). 二氧化碳去除现状 2024——第二版. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/F85QJ>
- Keith, D., Holmes, G., Angelo, D., & Heidel, K. (2018). 从大气中捕获 CO₂ 的工艺. 焦耳. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
- Vuola, M., Korkeakoski, M., Vähäkari, N., 等. (2020). 什么是绿色经济? 束埔寨与老挝国家级绿色经济政策的综述. 可持续性. <https://doi.org/10.3390/su1216664>
- Zhang, L., Xu, M., Chen, H., Li, Y., & Chen, S. (2022). 全球化、绿色经济与环境挑战: 实践意义的最新综述. 环境科学前沿, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.870271>
- Lin, J., Du, M., Chen, L., 等. (2019). 贸易限制对碳与健康的影响. 自然通讯, 10(1), 4947.
- Cooper, R., & Vogel, D. (1995). 向上交易: 全球经济中的消费者与环境监管. 外交事务, 74, 119. <https://doi.org/10.2307/20047393>
- Pastor, L., Stambaugh, R. F., & Taylor, L. A. (2021). 剖析绿色回报. SSRN 电子期刊, 33, 1256. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3567528>
- Lffler, K. U., Petreski, A., & Stephan, A. (2021). 绿色债券发行的驱动因素及“绿色溢价”的新证据. 欧亚经济评论.
- Lau, P., Sze, A., Wan, W., & Wong, A. (2022). 绿色溢价的经济学: 世界愿意为拯救地球支付多少?. 环境与资源经济学, 81(2), 379–408.
- 亚洲开发银行与全球绿色增长研究所 (GGGI). (2022). 东盟绿色债券与可持续金融调查: 机构投资者与承销商的视角. 检索自 <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/840636/survey-green-bonds-sustainable-finance-asean.pdf>
- Bhardwaj, S., Agarwal, S., & Tripathi, V. (2024). 探索影响青年社区对绿色 ICT 创业意愿的因素以促进环境可持续性: 来自新兴经济体的证据. 发展中国家信息系统电子期刊.
- Chen, H., Ni, D., Zhu, S., Ying, Y., & Shen, M. (2022). 国家信用示范政策是否影响城市绿色经济效率? 来自中国长三角地区的证据. 国际环境研究与公共卫生杂志, 19(16), 9926. <https://doi.org/10.3390/ijerph19169926>
- Lu, M., Daixu, L., Peng, W., & Ruiqi, M. (2023). 异质性环境规制工具与绿色经济发展: 来自中国的证据. 环境研究通讯, 5.
- Chen, X., & Zhan, M. (2022). 环境行政处罚是否促进了中国绿色技术创新的数量与质量? 基于同行效应的分析. 环境科学前沿, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1070614>
- Bu, C., & Shi, D. (2021). 每日罚款政策对企业的减排效果. 环境管理杂志, 294, 112922. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112922></

85. Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). 生物炭环境管理导论. 生物炭环境管理科学与技术, 25(1), 15801-15811.
86. Jeffery, S., Verheijen, F. G., Velde, M. V., & Bastos, A. C. (2011). 生物炭应用于土壤对作物生产力的影响: 一项元分析定量综述. 农业、生态系统与环境, 144, 175-187.
87. Keith, D. W., Holmes, G., Angelo, D. S., & Heidel, K. (2018). 从大气中捕获 CO₂的工艺. 焦耳, 2(8), 1573-1594. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
88. De Marigny, B. (2024). 第 45Q 条: 碳捕获与封存联邦税收抵免基本指南. Baker Botts 律师事务所. 检索自 <https://www.bakerbotts.com/~media/files/thought-leadership/publications/2024/july/45q-basic-guide.pdf?la=en&hash=DE139F328E75843664CE21F89D9936FC9CC4E031>
89. Equinor. (2024). 北方之光准备接收 CO₂. 检索自 <https://www.equinor.com/news/20240926-northern-lights-ready-to-receive-co2>
90. 国际能源署. (2021). 各国抽水蓄能水电储能力, 2020-2026. 国际能源署, 巴黎. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/pumped-storage-hydropower-storage-capability-by-countries-2020-2026>, 许可: CC BY 4.0
91. 国际水电协会. (2024). 世界水电展望. 国际水电协会.
92. 国际能源署. (2021, 6 月). 水电特别市场报告: 分析与预测至 2030 年. <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report>
93. 氢能委员会. (2023, 12 月). 氢能洞察 2023: 全球氢能经济现状及可再生氢成本演变深度分析.
94. 国际能源署. (2023). 全球电动汽车展望 2023. 国际能源署. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
95. Koleva, M., & Melaina, M. (2020, 11 月 2 日). 氢燃料加注站成本 (DOE 氢能计划记录编号 21002). 美国能源部.
96. Choi, J., Hur, N., Kang, S., Lee, E., & Lee, K. (2013). 地下停车场燃料电池汽车氢气泄漏的 CFD 模拟. 国际氢能杂志, 38, 8084-8091. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.018>
97. Merilo, E., Groethe, M., Colton, J., & Chiba, S. (2011). 车辆车库氢气泄漏事故的实验研究. 国际氢能杂志, 36, 2436-2444. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.056>
98. Li, S., Djilali, N., Rosen, M., Crawford, C., & Sui, P. (2022). 重型卡车从柴油向氢燃料电池的转型: 机遇、挑战与建议. 国际能源研究杂志, 46, 11718-11729. <https://doi.org/10.1002/er.8066>
99. Liu, F., Mauzerall, D., Zhao, F., & Hao, H. (2021). 中国重型卡车车队从柴油与天然气向氢能转型的温室气体减排潜力. 国际氢能杂志, 46, 17982-17997. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.198>
100. NEOM. (2023, 5 月 22 日). NEOM 绿色氢能公司完成财务结算, 总投资价值达 840 亿美元, 建设全球最大的无碳绿色氢能工厂. 检索自 <https://www.neom.com/en-us/newsroom/neom-green-hydrogen-investment>
101. 沙特阿美. (2023, 10 月 24 日). 电子燃料示范工厂签约. 沙特阿美生活. 检索自 <https://www.aramcolife.com/en/publications/the-arabian-sun/articles/2023/week-43-articles/e-fuel-demonstration-plant-signing>
102. 电子燃料联盟. (2024). 电子燃料生产地图. 电子燃料联盟. <https://www.efuel-alliance.eu/efuels/efuels-production-map>
103. 国际可再生能源机构 (IRENA). (2021). 创新展望: 可再生甲醇. 检索自 https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf
104. Zincir, B. (2022). 氢作为短途航运燃料的环境与经济评估: 案例研究. 国际氢能杂志, 47(41), 18148-18168. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.281>
105. Zhibin, L., Xiao, S., Xiaotian, G., Haizhou, L., & Guangtao, Z. (2023). 碳达峰与碳中和背景下绿色氨能产业的发展前景与应用场景. 南方能源建设, 10(3), 47-54. <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.005>
106. Kexin, Z., Xiaotian, G., Yongchun, F., Zhibin, L., Zhen, L., Yun, Z., & Yun, L. (2023). 氢与甲醇技术在大规模绿色氢能发展中的比较与应用前景. 南方能源建设, 10(3), 63-73. <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.007>
107. 绿色氢、绿氨与绿色甲醇生产技术的科普. (2024, 3 月 3 日). 技工 Vogel. <https://ner.jgvogel.cn/c/1376/1376164.shtml>
108. 欧盟委员会. (2024). 欧洲氢能银行拍卖为欧洲可再生氢生产提供 7.2 亿欧元. 检索自 https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_2333
109. 联合经济委员会民主党. (2024, 4 月). 重型车辆电气化将有益于美国经济、环境与公共健康. <https://www.jec.senate.gov/public/index.cfm/democrats/2024/4/electrifying-heavy-duty-vehicles-will-benefit-the-u-s-economy-environment-and-public-health>
110. O'Connell, A., Pavlenko, N., Bieker, G., & Searle, S. (2023, 2 月 6 日). 欧洲重型车辆与燃料生命周期温室气体排放的比较 [白皮书].
111. 弗劳恩霍夫劳动经济与组织研究所. (2018). ELAB 2.0: 车辆电气化对德国就业的影响: 初步报告, 2018 年 6 月 4 日. 弗劳恩霍夫 IAO.
112. McCollum, D., Wilson, C., Bevione, M., 等. (2018). 消费者偏好与气候政策在全球低碳车辆转型中的相互作用. 自然能源, 3, 664-673. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0195-z>
113. 能源安全与净零部. (2023). 温室气体报告: 2023 年转换因子. 检索自 <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2023>
114. 国际航空运输协会. 开发可持续航空燃料 (SAF). 检索自 <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuels/>
115. 国际航空运输协会. (2022, 6 月 21 日). 需要激励措施以增加 SAF 生产. 检索自 <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-06-21-02/>
116. 欧盟委员会: 环境总司. (2020). 欧盟环境声明: 清单与可靠性评估: 最终报告. 欧盟出版物办公室. <https://circabc.europa.eu/ui/集团/44278090-3fae-4515-bcc2-44fd57c1d0d1/library/b11ba10b-5049-4564-b47a-51a9bc9003c8/details?download=true>
117. 欧盟委员会: 环境总司. (2020). 支持即将出台的欧盟产品政策框架以促进循环经济——最终报告. 欧盟出版物办公室. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/805144ba-6412-11ea-b735-01aa75ed71a1#>
118. Hafner, S., Jones, A., Anger-Kraavi, A., & Pohl, J. (2020). 缩小绿色金融差距——系统视角. 环境创新与社会转型, 34, 26-60.
119. 脚注引用: 世界银行. (2024). 为菲律宾提供自然灾害保险. 检索自 <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Insuring%20the%20Philippines%20Against%20Natural%20Disasters.pdf>
120. Rhodium 集团 LLC, 麻省理工学院能源与环境政策研究中心. (2024). 清洁投资监测: 通胀削减法案两年影响的统计. https://rhg.com/wp-content/uploads/2024/08/Clean-Investment-Monitor_Tallying-the-Two-Year-Impact-of-the-Inflation-Reduction-Act-1.pdf
121. LinkedIn. (2022). 2022 年全球绿色技能报告. <https://economicgraph.linkedin.com/research/global-green-skills-report>
122. 超过 1,000 所大学与学院承诺实现净零目标, 同时推出新的自然倡议. (n.d.). 联合国环境规划署. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/over-1000-universities-and-colleges-make-net-zero-pledges-new-nature#:~:text=Glasgow%2C2028%20October%202021%202D%20Today,initiative%20on%20nature%2Dpositive%20universities>
123. 新加坡国立大学. (2024). 新加坡国立大学 2023 年可持续发展报告. https://sustainability.nus.edu.sg/wp-content/uploads/2024/06/NUS-sustainability-report_2023_Final-Jun-5.pdf
124. 联合国气候变化框架公约. (2020). 变革动力: 女性成果类别——青年女性在气候变化中的基层行动. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Fact%20Sheet%202019_CAMFED.pdf
125. Lam, H. L., How, B. S., & Hong, B. H. (2015). 绿色供应链推动可持续产业发展. 载于 J. J. Klemeš (主编), 评估与测量环境影响及可持续性 (第 409-449 页). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799968-5.00012-9>
126. 联合国工业发展组织. (n.d.). 可持续供应链. 检索自 <https://www.unido.org/our-priorities/sustainable-supply-chains>
127. Ouassou, E. H., Onyeaka, H., Tamasiga, P., & Bakwena, M. (2024). 全球供应链中的碳透明度: 制度与创新能力的调节作用. 能源战略评论, 53, 101405. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101405>

