

10 | NEW INSIGHTS IN CLIMATE SCIENCE

气候科学十大新见解

2025/2026

每年，未来地球计划（Future Earth）、地球联盟（Earth League）与世界气候研究计划（World Climate Research Programme, WCRP）联合召集全球顶尖学者，系统梳理并评估气候变化领域最新且最为紧迫的科研进展。其成果凝练为《气候科学十大新见解》，以两种独立形式发布：一篇经同行评审的学术论文，以及一份面向决策者与社会各界的科学政策报告，旨在提供严谨、综合且具有重要价值的科学洞见。本年度报告所依据的科学证据，来自于2024年1月至2025年6月期间发表的研究成果。

对于应对气候危机这一紧迫挑战的决策者而言，《2025/2026 年气候科学十大新见解》为2026年及以后提供了可靠指导。

访问: 10insightsclimate.science

标题：2025/2026 年气候科学十大新见解

出品方：Future Earth, The Earth League, and the World Climate Research Programme

版面设计与插图：Azote

引用本报告：Future Earth, The Earth League, WCRP (2025). *10 New Insights in Climate Science 2025/2026*. Stockholm. doi:10.5281/zenodo.17328963

中文版 翻译与校对协作

审阅委员会：周天军、效存德、成里京、袁文平、翟盘茂、吕永龙、王雪梅、卢晓

召集人：陈逸伦、卢晓

翻译协调：王秭铠

翻译团队：王思怡、钟元莹、王秭铠

futurearth
Research. Innovation. Sustainability.



“未来地球计划”中国委员会
Chinese National Committee for Future Earth



中山大學大气科学学院
SUN YAT-SEN UNIVERSITY SCHOOL OF ATMOSPHERIC SCIENCES





INSIGHTS
AT A GLANCE

要点概览

5

- 关于2023/2024年创纪录高温年的证据、不确定性及关键问题。** 尽管向厄尔尼诺条件的转变在一定程度上加剧了近期气温纪录的突破，但此类年际气候波动本身尚不足以解释这些异常现象。近年来地球系统能量失衡的显著加剧表明，全球变暖进程可能正在加速。这进一步凸显了减少排放和适应投资方面不断扩大的差距的紧迫性。
- 海表增暖加速与海洋热浪加剧。** 海洋表层增暖的速度已达到前所未有的水平，加之海洋热浪的不断加剧，正导致严重的生态损失，损害沿海生计，并加剧了极端天气带来的复合风险，同时也削弱了海洋作为碳汇的功能。越来越多的证据揭示了应对行动的双重紧迫性：亟需加快适应性投资，并强化全球减缓行动，以遏制海洋与气候系统进一步失稳。
- 全球陆地碳汇面临严峻压力。** 2023年全球陆地碳汇的显著下降引发了广泛担忧，即陆地吸收固定大气中CO₂的能力正在减弱，并导致“剩余碳预算”进一步收缩。尤其值得关注的是，曾被认为是相对稳定碳汇的北半球中高纬度陆地生态系统，正日益受到野火频发与多年冻土消融的双重威胁。在当前升温水平下，自然生态系统碳汇的功能可能已出现弱化迹象，这一趋势更加凸显了协同推进深度减排与碳移除行动的紧迫性。
- 气候变化与生物多样性丧失相互加剧。** 不断积累的科学证据表明，气候变化与生物多样性丧失之间存在相互促进的关系，形成破坏性的正反馈循环，对生态系统的碳储存能力与整体韧性构成严重威胁。通过里约三公约推进协同治理，优先保护和恢复高生物多样性生态系统，并维护自然碳汇功能，是实现气候与生物多样性协同效益最大化、避免政策割裂的有效路径。
- 气候变化加剧地下水耗竭。** 相较于过去几十年，全球地下水耗竭速率持续上升。气候变化不仅干扰含水层的自然补给过程，还进一步放大了社会经济活动中的用水需求。由此引发的环境与社会经济风险包括对农业生产和粮食安全的威胁，以及地面沉降、海水入侵等次生灾害的发生。
- 观测与预测：气候驱动下登革热疫情显著上升。** 登革热已发展为有记录以来规模最大的全球性疫情。气候相关的温度变化扩大了蚊虫的栖息范围，延长了病毒传播期，并与城市化进程加快、全球人员流动增强以及废弃物管理不善等社会因素产生叠加效应。尽管当前疫情已对多国卫生系统造成巨大压力，但模型预测显示，本世纪内登革热病例数将持续攀升，增幅可能更为显著。
- 气候变化导致的劳动生产率与收入损失。** 气候变化引发的热压力正严重威胁全球劳动生产率与收入。尽管发展中国家遭受的直接损失最为严重，但通过供应链和国际贸易的放大效应，这种经济影响将波及全球。预测显示，在低排放情景下，年度国内生产总值的损失将显著降低，这进一步凸显了采取更有效减缓行动的紧迫性。
- 亟需安全规模化二氧化碳移除以应对难减排领域与气候风险。** 二氧化碳移除（CDR）的大规模应用对于实现气候目标至关重要，它是快速减排的必要补充而非替代方案。制定强有力的国际准则并加大对研发创新的支持，对于弥合“CDR缺口”以及支撑短期目标与长期气候稳定至关重要，同时还必须确保环境与社会保障机制的落实。
- 碳信用市场：诚信挑战与新兴对策。** 碳信用市场的快速扩张伴随着严峻的诚信挑战。由于系统性缺陷，许多项目存在高估固碳量且缺乏“额外性”的问题。过度依赖低质量碳信用额度存在推迟直接脱碳进程的风险。近期，随着更严格基准、透明度和市场标准的建立，以及理念上转向将碳信用视为一种“贡献”而非直接减排的替代品，市场正朝着更具信誉和建设性的方向发展。
- 政策组合在推动减排方面优于单一政策措施。** 经过系统设计的政策组合，特别是包含碳定价的组合，往往比单一措施能实现更大幅度的减排。其中包含碳定价或取消化石燃料补贴的政策组合尤为有效；然而，政策设计必须与各国国情相匹配。通过协同的跨部门方法和统一的报告机制，有助于实现学习效应与政策影响的最大化。



CONTENTS

目录

要点概览	5
引言	9
Insight 1 关于2023/2024年创纪录高温年的证据、不确定性及关键问题	13
Insight 2 海表增暖加速与海洋热浪加剧	16
Insight 3 全球陆地碳汇面临严峻压力	19
Insight 4 气候变化与生物多样性丧失相互加剧	22
Insight 5 气候变化加剧地下水耗竭	25
Insight 6 观测与预测：气候驱动下登革热疫情显著上升	29
Insight 7 气候变化导致的劳动生产率与收入损失	32
Insight 8 亟需安全规模化二氧化碳移除以应对难减排领域与气候风险	35
Insight 9 碳信用市场：诚信挑战与新兴对策	39
Insight 10 政策组合在推动减排方面优于单一政策措施	42
缩写	46
主要参考文献	47
致谢	49



INTRODUCTION

引言

全球气候指标持续发出令人担忧的信号。2025年初，世界气象组织确认2024年为有记录以来最热的一年，全球平均气温较工业化前水平高出 1.55°C ($\pm 0.13^{\circ}\text{C}$)¹。虽然这尚未突破《巴黎协定》将长期全球变暖控制在 1.5°C 以内的目标，但它清楚地表明世界距离这一目标已近在咫尺。这一年异常的升温伴随着破纪录的海洋热量含量和海平面上升、冰川质量的大幅损失以及南极海冰范围降至第二低值^{1,2}。持续上升的全球气温已导致极端天气事件频次与强度显著增加，包括热浪、干旱、野火、风暴及洪涝，给人类和经济造成了重大损失³。

尽管面临这些不断加剧的风险，但人为温室气体 (GHG) 排放量在2023年和2024年仍在持续增加⁴，进一步推动了大气中温室气体浓度的稳步上升^{2,5}。目前全球的减排努力仍显不足。如果最新一轮的国家自主贡献 (NDCs) 得以全面实施，预计到2030年全球排放量将比2019年减少5.9% (区间: 3.2%-8.6%)，这远远低于将升温控制在 2°C 以下所需的28%的减排量，也远低于本世纪末实现控制在 1.5°C 以内的目标所需的42%的减排量⁶。面对多数缔约方推迟更新其国家自主贡献 (NDC) 的现状，加快缩小气候承诺力度与实际行动之间的落差已刻不容缓。截至2025年10月初，仅

62个国家提交了更新后的国家自主贡献⁷。这些国家的温室气体排放量仅占全球总量的31%。包括中国、印度和欧盟在内的几个主要排放国尚未提交 (注: 截至2026年2月24日，包括中国和欧盟在内的134个国家已提交更新后的NDCs)，全球气候行动在承诺力度与实施方面进展迟缓，已成为即将在巴西贝伦举行的第30届联合国气候变化大会 (COP30) 所面临的关键挑战之一。

随着《巴黎协定》实施细则基本完善，以及科学界不断积累的证据凸显出加速气候行动的紧迫性，第30届联合国气候变化大会 (COP30) 被广泛视为一次“落实型大会”——标志着气候外交进入关键阶段，旨在系统审视并突破减缓与适应行动在实际推进中所面临的持续性障碍。各方亟需就如何将全球盘点⁸(COP28,Dubai)的结果，特别是逐步减少化石燃料的核心共识，转化为具有可操作性的政策措施达成一致，以实现路线修正。在此背景下，关于改革COP机制以适应“后谈判时代”治理需求的讨论将持续深化。气候资金仍然是一个存在争议且尚未解决的关键问题，对于推动集体行动至关重要。第29届联合国气候变化大会(COP29,Baku)确立新的集体量化资金目标为每年3000亿美元，但该数额被普遍认为远不足以满足实际需求⁹，因此巴厘一贝伦路线应运而生，旨在探索实现到2035年每年动员1.3万亿美元资金的可行路径。尽管当前地缘政治形势复杂严峻，上述议程仍迫切要求重振多边主义精神，并强化多层次治理体系的协同效能。

1 WMO. *State of the Global Climate 2024*. World Meteorological Organization (2025).

2 C3S. *Global Climate Highlights. Copernicus Climate Change Service - EU Observation Programme* (2025).

3 Otto, F. et al. *When Risks Become Reality: Extreme Weather in 2024. World Weather Attribution* (2024).

4 Friedlingstein, P. et al. *Global Carbon Budget 2024. Earth Syst. Sci. Data* 17, 965–1039 (2025).

Forster, P. M. et al. *Indicators of Global Climate Change 2024: Annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. Earth Syst. Sci. Data* 17, 2641–2680 (2025).

5 NOAA-GML. *Trends in CO₂, CH₄, N₂O, SF₆*. Global Monitoring Laboratory of the National Oceanic & Atmospheric Administration (2025).

6 UNEP. *Emissions Gap Report 2024*. United Nations Environment Programme: Nairobi (2024).

7 Climate Watch. *Nationally Determined Contributions (NDC) Tracker*. World Resources Institute (2025).

8 UNFCCC. *Outcome of the First Global Stocktake. FCCC/PA/CMA/2023/16/Add.1 Decision 1/CMA.5*. (2023).

9 Bhattacharya, et al. *Raising Ambition and Accelerating Delivery of Climate Finance. Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, LSE: London*. (2024).

科学在支撑国际、国家及地方各级层面气候承诺的实施与治理决策中发挥着不可替代的作用。政府间气候变化专门委员会（IPCC）作为联合国气候变化框架公约（UNFCCC）进程的核心科学支撑机构，以其全面性和权威性著称。然而，受制于其严格的程序规范和综合性要求，每轮IPCC评估报告均需要历时多年才能完成。为此，每年经国际合作开展的《气候科学十大新见解》的倡议，致力于根据最新发表的同行评审文献，对气候变化研究各个领域的关键信息进行整理和综合。本年度综合报告由来自全球70多位研究人员牵头完成，并吸纳了逾150位专家的专业意见。其根本目标在于促进最新科学证据在政策制定过程与国际治理机制中的及时转化与应用。

本年度报告的前四项见解聚焦于地球系统过程，揭示了全球变暖可能正在加速这一令人担忧的趋势。基于对2023年与2024年全球气候指标的最新分析表明，地球能量失衡持续加剧（[Insight 1](#)），海洋热量吸收和海洋热浪显著增加（[Insight 2](#)），全球陆地碳汇急剧下降（[Insight 3](#)）。这些地球物理方面的新证据凸显了最低限度地减少温度过冲、把温升稳定在《巴黎协定》范围内的窗口期正在迅速缩小。此外，新的分析表明，生物多样性丧失本身会加剧气候变化，因为它支撑着碳吸收和储存的生态系统功能（[Insight 4](#)）。这一组科学发现共同凸显了制定强有力的减缓战略并强化实施力度的紧迫性。

随后三项见解重点关注气候变化对水安全、人类健康以及生计与生产力的影响：地下水位加速下降（[Insight 5](#)），登革热的持续和未来扩张（[Insight 6](#)），以及因高温导致的劳动生产率和收入损失增加（[Insight 7](#)）。此类影响已在不同区域显现并对人口构成

实际威胁，且其严重性随温度升高幅度增加而显著提升。为降低不断加剧的社会经济风险，适应行动亟需大规模快速推进。然而，适应能力是有限的，在缺乏强有力的缓解措施的情况下，医疗保健系统可能会不堪重负，经济也会严重受损。

第三组亦为最终一组科学见解，聚焦于强化气候减缓行动的关键路径。碳捕集与封存（CDR）和碳信用市场作为两类具有关键作用且相互补充的减缓手段，在直接减少温室气体排放方面不可或缺。负责任地扩大CDR规模对于实现气候稳定至关重要，尤其在温度超调情景下，但当前部署水平仍远未达到实际需求（[Insight 8](#)）。在自愿碳交易市场（VCM），低质量碳信用的广泛存在是一个关键问题，这可能会导致直接脱碳进程被进一步延宕（[Insight 9](#)）市场。要弥合“CDR实施缺口”并解决自愿碳市场的系统性诚信缺陷，亟需建立全面、协调的政策框架。幸运的是，经过四十余年的政策实践积累以及近期系统性评估研究的深化，现已形成关于高效气候政策设计的丰富知识基础。一个关键的经验教训是，精心设计的政策组合，尤其是包含碳定价的政策组合，往往能够实现显著且可持续的减排效果（[Insight 10](#)）。

我们期望《2025/2026年气候科学十大新见解》报告能够送达至联合国气候变化框架公约（UNFCCC）的各缔约方及观察员代表团，为其立场与政策主张提供科学参考，并最终在巴西贝伦举行的第30届联合国气候变化大会（COP30）及以后的成果中得到体现。特别是：

- 通过强化国家自主贡献（NDC）的透明度与问责机制，推动全球盘点成果落实，确保各国减排路径与《巴黎协定》目标保持一致。特别是通过建立

标准化的进展指标和报告框架来追踪各国摆脱化石燃料转型的实际进展。

- 促进《联合国气候变化框架公约》与《生物多样性公约》之间的整合与协调，以加强森林保护和恢复，切实维护生物多样性和陆地碳汇。具体而言，推进《生物多样性公约》第十六次联合国气候变化大会关于生物多样性与气候协调的决定的落实。
- 最终确定并正式通过在UAE-Belém工作方案下提出的100个适应指标清单，为解决有关“实施手段”相关指标的共同定义和总体概念问题提供必要的政治指导，以解决未决分歧。
- 明确承认碳移除在气候减缓中的独特作用：一方面用于抵消难以减排的剩余排放，另一方面为未来实现净负排放创造条件。为防止对直接脱碳行动造成延迟或削弱，须在政策层面设立独立的减排与碳移除目标，并进行核算，确保在国家自主贡献和第六条交易中的透明报告。
- 在《第六条》框架下落实高诚信度碳市场的过程中，对自愿机制和合规机制均采用严格的质量标准。这需要建立强有力的测量、报告和核查系统，来确保碳储量的长期稳定性，防范可逆性风险。并检验额外性以及防止重复计算。

- 此外，应设立官方知识共享平台，系统整合并综合评估关于有效气候减缓政策及其组合措施的科学证据与实践经验。

本报告中所呈现的每项见解背后的科学依据在以下内容中有更详细的描述，并附有所有相关参考文献：

Ospina, D., Mirazo, P., Allan, R.P., Basnett, S., Bastos, A., Bhattarai, N., Broadgate, W., Broekhoff, D.J., Bustamante, M., Chen, D., Choi, Y., Cox, P., Domeignoz-Horta, L.A., Ebi, K.L., Friedlingstein, P., Frölicher, T.L., Fuss, S., Goessling, H.F., Gruber, N., He, Q., Hebden, S., Hedrich, N., Heilemann, A., Hirota, M., Hodnebrog, Ø., Hugelius, G., Izquierdo-Tort, S., Juhola, S., Kasuga, F., Ke, P., Kelley, D.I., Kilkis, Ş., Kotz, M., Kumarasinghe, N., Lamb, W.F., Lee, S., Liu, J., Maesano, C.N., Martin, M.A., Mazzochini, G.G., Merchant, C.J., Mori, A.S., Morris, J., Persson, Å., Pörtner, H., Probst, B.S., Ramage, J., Razanatsoa, E., Redman, A., Rockström, J., Rodrigues, R.R., Ruehr, S., Ryan, S.J., Sanchez-Rodriguez, R., Schleussner, C., Schlosser, P., Scott, W.A., Semenza, J.C., Seybold, H., Shindell, D.T., Sioen, G.B., Smith, K.E., Sokona, Y., Stechemesser, A.H., Stocker, T., Su, S.H.L., Thiam, D., Trencher, G.P., Virkkala, A., Warszawski, L., Weiskopf, S.R., Wu, H.C., Zhu, S.(2026) Ten New Insights in Climate Science 2025. *Global Sustainability*. doi: [10.1017/sus.2025.10043](https://doi.org/10.1017/sus.2025.10043)



THE INSIGHTS

1 关于2023/2024年创纪录高温年的证据、不确定性及关键问题

关键信息

2023/2024 年见证了创纪录的高温。如此前所未有的升温幅度以及显著加剧的地球能量失衡 (EEI) 表明全球变暖正在加速。

近期的气温飙升不能完全依据长期的变暖趋势和典型的年际波动来解释，尽管 2023/2024 年从拉尼娜现象向厄尔尼诺现象的转变增加了这种可能性。这表明还有其他因素在起作用。

EEI 的升高是由温室气体水平的上升所驱动的，并且由于地球对阳光反射的减少而加剧，这与海洋上空更少且反射率更低的云层（与气溶胶排放减少有关）以及覆冰减少有关。

自2023年以来，全球地表温度持续突破历史极值。尽管拉尼娜向厄尔尼诺的气候态转换预期将导致全球气温上升，但此次升温在强度、空间范围和持续性方面的表现均远超以往记录，且高温态势延续至2025年仍未缓解。这一现象与显著加剧的地球能量失衡 (EEI) 高度一致，即地球吸收的太阳短波辐射能量与其以红外长波辐射形式向外太空释放的能量之间的净差值持续扩大。自2000年起，EEI的上升趋势主要归因于行星反照率的降低，即地球反射回太空的太阳辐射减少，增强了净辐射强迫，加快了全球变暖速率。目前，气候反馈过程、气溶胶颗粒污染减排、海洋内部变率以及其他潜在驱动因子对近期变暖的具体贡献仍存在科学争议。本文系统评估了2023/2024年极端高温事件在气候自然变率背景下的异常程度，探讨了升高的EEI对该异常升温的解释力，并分析了可能导致EEI上升的关键因素，上述结果对预估未来数十年气候变化速率具有重要科学意义。

在2023/2024年期间，全球气温出现显著跃升的可能性增加，主要归因于此前长期拉尼娜状态向厄尔尼诺状态的气候相位转换。然而，近期观测到的升温幅度无法完全由长期变暖趋势与气候系统内部变率共同解释，尤其考虑到此次厄尔尼诺事件的强度弱于历史同类事件。这一不一致性凸显了深入探究其他潜在驱动因子以及系统评估地球能量收支变化的必要性。

从物理机制上看，2022年至2023年的急剧升温主要取决于地球表面层所吸收的热量水平。2022年中至2023年中期间，地球能量失衡 (EEI) 较2006–2020年平均值增长逾一倍，已处于气候模式预测范围的上限。其中约15%至20%的过剩能量用于加热大气和陆地，并在较小程度上促成冰川与冰盖的融化，其余部分则被海洋吸收。然而，仅凭该能量分配尚不足以解释观测到的海表温度上升幅度，除非大部分热量集中于海洋最上层的浅层区域，或在2023年厄尔尼诺发展过程中，海洋表面以下释放了

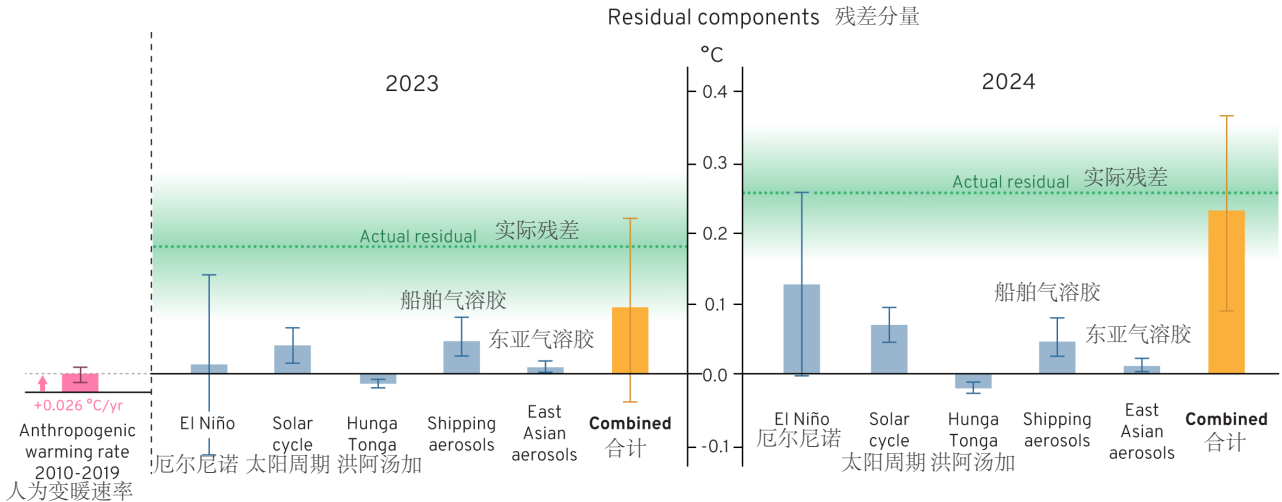


图1. 2023年和2024年导致全球平均气温异常的各因素对年度变暖效应的贡献估计。实际残差（绿色虚线；虚线表示不确定性）是2023/2024年全球平均气温与20年趋势（粉色条）之间的差值，而各个组成部分（蓝色竖条）则是这两年残差的各自贡献（不确定性条大致代表95%的置信水平）。所展示的数据来自世界气象组织（2025年），尤其是图12（参见Forster等人2025年的类似分析，数值略有不同）。需要注意的是，所显示的数据仅具有指示性，代表初步估计。

额外的热量，并与来自上方的更大的EEI产生了共同的加热作用(见Insight 2)。

自2000年以来，地球能量失衡（EEI）的上升主要源于太阳短波辐射吸收的增加，其核心机制是海洋云区反照率下降所致。11年太阳活动周期也对近期变暖产生了适度的增温贡献(图1)。2023年6月发生的火山喷发、野火事件以及撒哈拉沙尘输送减弱等自然扰动，在全球尺度上的气候影响被认为较为有限。2001至2019年间，EEI升高及其伴随的变暖趋势中，硫酸盐气溶胶污染的减少是一个重要驱动因素（图1）。2020年实施的法规使国际航运的硫排放削减约80%，导致硫酸盐气溶胶对云层的影响减弱，进而降低云反射率，反射的阳光减少，增加了地气系统的净辐射收入，从而产生了增温效应。目前评估认为，该效应在全球地表温度变化中的贡献相对适中，但在北半球中纬度海洋区域可能引发较明显的区域性增温响应（图1）。近几十年来，陆地人为气溶胶排放亦呈下降趋势。东亚地区的气溶胶排放于21世纪初达到峰值，随后迅速回落，这一变化在2010–2023年期间显著加剧了全球变暖，并与东北太平洋海域创纪录的海表温度升高密切相关。尽管东亚气溶胶减排所引起的额外太阳辐射吸收与长期变暖趋势有关，但其对2023/2024年水平的影响尚不明确（图1）。

有观点认为，在污染已得到一定程度治理的区域，如东亚或仍相对未受污染的开阔海洋上空减少气溶胶排放，将对减少云层反射的阳光产生更大的影响。

自2023年以来出现的创纪录高温事件，凸显了当前气候变化进程中的关键科学挑战。气溶胶与云之间的相互作用以及云反馈过程在气候模型中仍难以精确模拟，尤其由于全球气候模式的空间分辨率较粗，无法充分解析船舶尾迹等局地效应，从而加剧了对航运硫排放减少所引发辐射强迫变化评估的不确定性。更准确地量化云反馈机制，包括云区缩小如何导致地球反照率降低，对于厘清这些过程在多大程度上推动全球变暖加速具有重要意义。自2000年以来，来自“云和地球辐射能量系统”（CERES）的地球能量收支观测对于改进模式至关重要，但随着卫星老化，这些观测将面临新风险。

综上所述，新的见解进一步证明：全球变暖引发的云反馈响应以及气溶胶排放减少导致云反射阳光能力下降，可能共同促成了自2000年以来地球吸收太阳辐射的长期增加。尽管上述驱动因子的相对贡献权重，以及内部海洋变率在地球能量失衡（EEI）上升中的具体作用尚未完全明确，但这些问题的解决对于缩小

气候敏感性估算范围至关重要，现有分析已表明，极低的气候敏感性估值极不可能成立。2023年异常增强的地表净辐射加热，叠加从持续多年的拉尼娜状态向厄尔尼诺状态的气候相位转换，是解释2023/2024年全球地表温度突破历史极值的核心因素。当前全球

气温水平与全球变暖继续加速的态势相符，突破工业化前水平1.5°C的温控阈值似乎不可避免。证据再次表明，唯有迅速且大规模地削减温室气体排放，方能有效遏制气候变暖，并减轻其对人类社会和自然系统的影

政策启示

- 全球变暖的加速趋势表明，当前在温室气体减排与适应投资方面的现实差距，已超出既有评估的预期水平。为有效缩小这些差距，亟需采取以下行动：
 - 首要任务是提高目标预期并有效落实新的国家自主贡献（NDCs），涵盖经济整体减排目标、分行业的具体措施以及所有主要温室气体的管控。
 - 在新的国家自主贡献中加强适应部分，使其与国家适应计划（NAPs）保持一致。
 - 鉴于迄今减缓行动仍显不足，扩大二氧化碳去除（CDR）规模的重要性日益凸显。然而，现有NDCs中极少明确纳入CDR量化目标或实施路径（见[Insight 8](#)），亟待在新一轮气候承诺中予以补足。
 - 加快各关键领域的结构性转型，以实现2030年全球盘点所设定的基准目标：全面推进能源系统摆脱化石燃料依赖，实现可再生能源容量增长两倍，能源效率提升速率翻倍，并全面遏制或逆转森林砍伐趋势。
 - G20国家作为全球排放主体，应在公平份额原则和成本有效性框架下，进一步加快并深化减排行动，切实遵循联合国环境规划署《排放差距报告》（2024年）所提出的减排路径。
 - 需显著扩大适应资金投入，强化能力建设机制，并推动关键技术国际转让与共享。
- 2023至2024年的观测数据揭示的地球物理变化表明，目前为《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）政策进程提供支撑的大样本集合模式预测，可能系统性低估了全球变暖的实际速率与幅度。因此，降低科学不确定性、改进气候模式性能，特别是深化对气溶胶-云相互作用及其在地球能量收支中作用的理解，应被列为优先科研方向。这要求持续稳定的科研经费支持，并加强对科学研究的保护。
- 对地球能量失衡（EEI）的长期观测，以及高精度云与气溶胶诊断能力的提升，对于改进气候模式模拟和未来预估具有关键意义。各方应致力于维护和资助全球气候监测体系，保障核心观测数据的连续性与可用性。
 - 在此方面，美国国家航空航天局（NASA）的云与地球辐射能量系统（CERES）任务长期以来提供了不可或缺的辐射收支数据，但因卫星平台老化，其观测连续性正面临严峻挑战。为此，世界气象组织（WMO）的全球气候观测系统（GCOS）及系统观测融资机制（SOFF）等倡议应获得进一步支持，以维持和改进EEI观测基础设施，确保未来气候决策建立在坚实、可靠的科学基础之上。

2 海表增暖加速与海洋热浪加剧

关键信息

- 海洋变暖正在加速。从 2023 年 4 月到 2024 年 6 月，全球海表平均温度纪录不断被打破。过去四十年来，全球范围内海洋热浪 (MHWs) 变得愈发频繁、强烈且持久。
- 异常的海表温度往往会加剧极端天气事件 (如热浪、气旋)，并增加飓风 (大西洋、加勒比海和太平洋地区) 增强的可能性。
- 海洋热浪正在造成严重、广泛且在某些情况下可能是不可逆转的生态影响，影响生物多样性以及渔业、旅游业和海岸保护等沿海生计。
- 海洋是重要的碳汇，但随着海面温度升高，其吸收大气中二氧化碳的能力会降低。

全球海洋表面平均温度是衡量气候变化的关键指标之一。2023年4月，该温度达到卫星观测记录以来的最高值，标志着全球海温进入前所未有的异常状态。此后连续13个月，全球海面温度持续刷新同期历史记录：2023年5月超过以往所有5月的记录，6月超过所有6月的记录，依此类推。作为地球系统中吸收和储存热量的最大“热库”，海洋在很大程度上控制着全球变暖，而当前观测表明其调控作用正在加强。同时海洋生物也受到了广泛且深刻的影响，许多变化不仅已经比较严重，甚至在某些情况下可能已不可逆。

2024年全球海表平均温度较1981年至2019年的气候基准期平均值高出 0.6°C ，略高于2023年水平，较工业化前水平约上升 0.9°C 。在2023年4月至2024年3月期间，平均海温比2015至2016年厄尔尼诺事件期间创下的上一个记录高出 0.25°C 。尽管厄尔尼诺年通常伴随海表温度升高，但值得注意的是，2023至2024年的厄尔

尼诺事件强度并未达到最强水平，其引发的温度异常幅度却显著偏大。研究表明，过去十年间地球能量失衡加剧所驱动的变暖趋势增加 ([Insight 1](#))，不仅在符合对物理变化机制的理解，也已在统计上达到显著水平。此外，全球海表平均温度的加速上升趋势与海洋热含量增加及海平面加速上升的观测结果一致，共同印证了气候系统变暖的持续性和广泛性。

全球海洋温度的上升与海洋热浪 (MHWs) 发生频率的增加密切相关。MHWs可持续数天至数月，对海洋生态系统及社会经济系统造成严重甚至灾难性的影响。基于固定基准期 (见方框 1) 检测的结果显示，过去四十年间，海洋热浪的持续时间平均延长了一周，其强度亦显著增强。与此同时，每年发生的海洋热浪天数增加了54%，即从20世纪80年代的每年20至30天上升至2000至2016年的每年40至50天。这些变化在一定程度上归因于海洋表层与深层之间相互作用的减弱，即由于表层海水升温速度

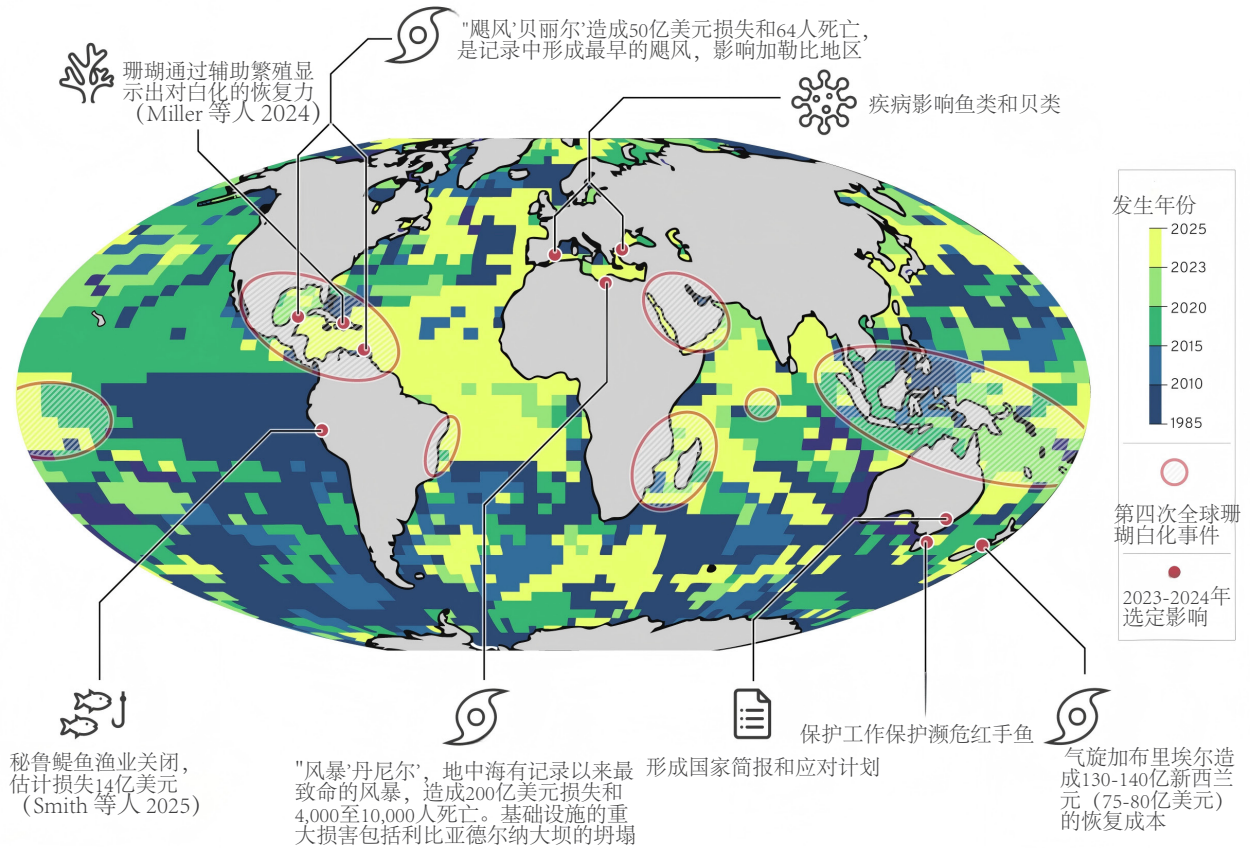


图2.2023至2024年期间异常海洋热浪的影响，也是自1985年以来卫星记录中海表温度（相对于季节正常值）最高的时期。数据：欧洲航天局气候变化倡议海面温度v3 (Embury 等人，2024年)

较快，密度降低，导致海洋垂向密度分层加剧。气候模式普遍预估，在全球持续变暖的趋势下，海洋热浪的发生频率和强度将进一步上升。

MHWs同样出现在海洋次表层，该区域是多数鱼类的主要栖息地，并支持其昼夜垂直迁徙行为。次表层热浪的强度通常高于海表热浪，且大多数事件与海表热浪并不同步发生，其主要驱动机制常为海洋涡旋活动。次表层热浪的增强率可达每十年0.1至1 °C，显著快于背景平均温度的变化速率（每十年约 0.1 °C）。尽管次表层海洋热浪的生态重要性日益受到关注，但由于观测资料匮乏，对其形成机制、时空演变特征及其生态影响的系统性理解仍面临挑战。

海洋变暖的影响不仅局限于海洋系统本身，还深刻影响着人类所经历的天气与季节变化，因为这些过程在很大程度上受控于海洋温度。异常升高的海面温度已被证实可加剧

欧洲地区的热浪事件，并提升大西洋、加勒比海及太平洋区域飓风强度增强的概率。多项研究表明，海洋热浪与飓风、气旋、洪涝以及大气热浪等极端气候事件之间存在显著关联，这些复合型极端事件已造成严重的经济损失。例如，因海洋热浪加剧而增强的飓风“加布里埃尔”，其灾后恢复成本估计达75亿至85亿美元；秘鲁鳀鱼业市场由于物种

方框1. 海洋热浪的定义

海洋热浪 (MHWs) 是指海表温度显著高于长期气候平均状态、持续数天至数月甚至更长时间，并可覆盖数千平方公里海域的极端海洋事件。通常，海洋热浪被定义为连续五天以上海表温度超过基于特定基准期气候统计的第90百分位数阈值的现象。此类事件既可发生于海表，也可出现在次表层水体中，对海洋生态系统、生物地球化学循环以及社会经济活动产生广泛而深远的影响。

分布范围发生改变而被迫关闭，导致经济损失约 14 亿美元；北美多个渔业也频繁因海洋热浪而实施捕捞禁令或削减配额。此外，海洋表面温度升高还削弱了海洋对大气中二氧化碳的吸收能力。据近期研究估算，在1990年至 2019年期间，海洋热浪使全球海洋的净碳吸收量减少了8%，从而降低了其对人为碳排放的缓冲作用。

在全球众多沿海生态系统中，基础性生物类群如大型藻类、海草和珊瑚的数量衰退已被证实与海洋热浪密切相关，如图 2 所示。2024年，全球第四次大规模珊瑚白化事件被正式宣布。珊瑚白化是指珊瑚因热应激导致共生藻类丧失而褪色的现象。即便是在传统上被认为对白化具有较强抵抗力的热带大西洋地区，过去二十年间也因海洋热浪频率和强度的上升而出现广泛白化。在地中海，海洋热浪加剧了鱼类与贝类疾病的暴发，增加了其死亡率；卫星观测还显示，在海洋热浪影响下，波罗的海西部、南大西洋以及东部边界

上升流系统中的浮游植物群落大小和生物量均发生了显著变化。

不同海洋物种对海洋热浪的响应各异，同时也取决于热浪和物种分布的地理位置，这就增加了预测和解释热浪生物效应的复杂性。基于营养动力学的食物网模型揭示了能量与营养物质在生态系统中的传递机制，表明在群落尺度上，海洋热浪会显著降低各级消费者的生物量，且高营养级物种受到的影响最为严重，进而导致生态系统结构与功能的重构。尽管如此，亦有部分积极案例被记录，如某些经培育具备耐热性的珊瑚表现出对白化的较强抵抗力，相关保护措施也显示出缓解濒危物种衰退的潜力。

由海洋热浪引发的生态与社会经济影响正变得愈加频繁且严重，为减少未来在生态、经济和社会层面可能面临的损失，亟需采取迅速而有效的行动，减少温室气体排放，遏制海洋持续变暖的趋势。

政策启示

- 量化海洋热浪对渔业、水产养殖业及旅游业所造成的经济损失，凸显了制定气候智慧型海洋政策、构建早期预警系统以增强“蓝色经济”韧性的紧迫性与必要性。
- 极端海洋热浪频率和强度的持续加剧，进一步表明应将针对海洋的具体目标纳入全球适应目标的指标体系之中，特别是涉及海洋依赖型生计和海洋生物多样性保护的相关目标。
- 为实现主动适应与基于生态系统的综合管理，在海洋空间规划和保护区制度等近岸与大洋治理机制中，需整合海洋热浪风险预测，提升前瞻性应对水平。
- 现有的举措，比如世界气象组织的“全民早期预警”，应扩展其覆盖范围，将海洋热浪及其他海洋灾害纳入预警范畴，尤其加强对全球南方国家的支持，因为这些国家及地区高度依赖海洋资源，且正面临日益加剧且不成比例的气候风险。
- 在多边合作层面，有必要加强国际协调，促进在珊瑚礁生态修复、适应性渔业管理政策以及基于自然的海洋解决方案等领域的最佳实践的交流。此类努力应依托《巴黎协定》第七条确立的适应行动全球目标，并结合《萨摩亚路径》《地中海可持续发展战略》等区域性可持续发展框架予以推进。
- 尽管上述讨论侧重于适应措施，但极端高温事件不断升级也突显出加快全球温室气体减排行动的紧迫性。如前所述，要实现《巴黎协定》设定的温控目标，必须在2030年左右逐步淘汰化石燃料，将可再生能源容量提升两倍，使能源效率提升一倍，全面遏制并扭转森林砍伐趋势。各国提交的新一轮国家自主贡献（NDCs），尤其是G20国家的承诺，亟需体现更高标准，明确设定扩大二氧化碳去除（CDR）能力的目标，并配套更具执行力的实施路径与政策工具。

3 全球陆地碳汇面临严峻压力

关键信息

2023年全球陆地碳汇急剧下降，加深了科学界对陆地生态系统吸收和储存碳的过程正在减弱的担忧。尤其是野火，正日益影响全球陆地碳循环。

研究确认，不仅在热带生态系统中的陆地碳汇逐渐减弱，在曾被视为更稳定碳汇的北半球高纬度地区也出现了碳汇减弱的现象。虽然热带地区的响应主要归因于厄尔尼诺现象，但高纬度地区的变化则预示着更为长期的气候变化趋势。

有迹象表明，在过去十年中，北半球生态系统向大气释放碳的过程正在加速。如果这一趋势持续，全球陆地碳汇总量将低于当前预期，这意味着人类可用的剩余碳预算将进一步缩减。

包括森林和土壤在内的自然陆地碳汇正面临压力。日益频繁的野火、干旱、热浪以及多年冻土融化，正削弱生态系统吸收和储存碳的能力，甚至在部分情况下它们从碳汇转变为净碳排放源。如果这一趋势持续，人类活动排放的碳将更多滞留于大气中，可能对全球变暖的速度产生严重影响。本文评估了全球陆地自然碳汇短期与长期变化的证据，并揭示了北方陆地生态系统脆弱性的新迹象。

全球陆地碳汇规模从20世纪60年代的每年 $1.2\pm 0.5\text{GtC/年}$ （即12亿吨碳）增长至21世纪10年代的 $3.1\pm 0.6\text{GtC/年}$ （图3A）。这一增长主要受以下因素驱动：大气二氧化碳施肥（促进光合作用，尤其在热带森林）、氮沉降、气温升高，以及高纬度地区寒冷限制减弱，从而促进了森林生物量的增加。然而在不久的将来，气候驱动的干扰与极端天气事件或将抵消这些积极效应。

2023年全球年气温创下纪录，且出现了强

厄尔尼诺现象，这与同期全球陆地碳汇的下降趋势相吻合（图3A）。这一下降反映了陆地生态系统对极端事件的负面响应。全球碳计划估计，2023年陆地碳汇为 $2.3\pm 1\text{GtC/年}$ ，远低于2022年拉尼娜导致的强碳汇 $3.9\pm 1\text{GtC/年}$ ，也低于2014至2023年的平均值 $3.2\pm 0.9\text{GtC/年}$ 。然而，关于陆地碳汇规模的研究结果仍存在不确定性，部分研究使用2023年土地利用排放量约为 $1\pm 0.7\text{GtC/年}$ 的数据，因此得出更低的碳汇值。2023年陆地碳汇的减弱并在2024年初有所恢复并非完全不寻常(图3A)：过去发生过的大幅度下降通常与厄尔尼诺年同时发生，并随后回升。长期下降的趋势可能取决于2023-2024年破纪录的高温和广泛的极端事件是反映了长期变暖趋势上的典型波动，还是标志着气候系统发生了更深层次的转变。

2023年，多个陆地生物系统类型释放到大气中的 CO_2 高于平均水平，所有这些都不同的驱动因素和动态。与往年相比，热带生态系

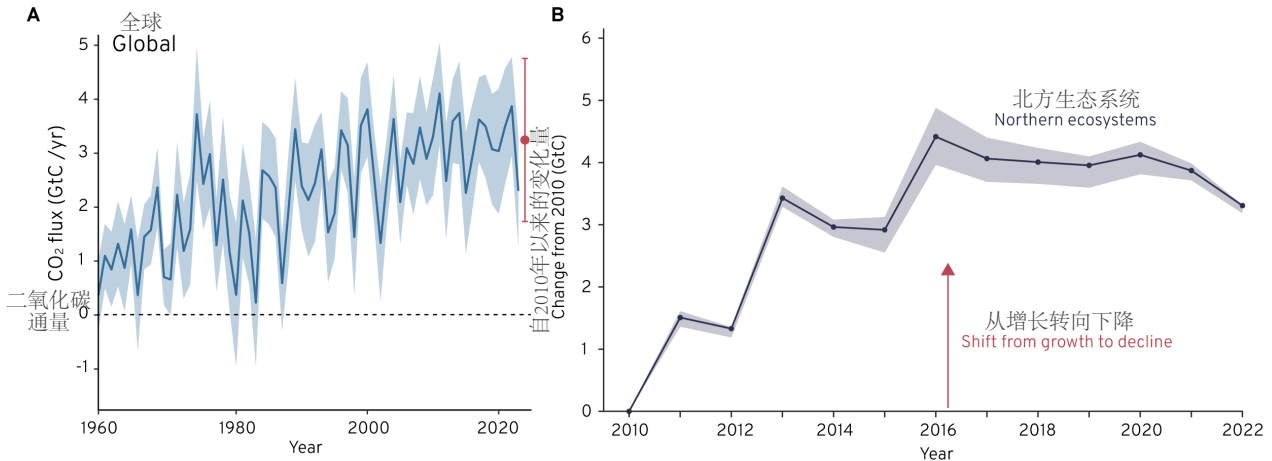


图3.1960-2023年全球陆地碳汇的长期趋势及其不确定性，以及近期北方生态系统生物量的变化。图A：全球CO₂通量（单位：GtC/年），正值表示陆地碳汇。深色线条代表年均净通量，阴影区域表示±1标准偏差的不确定性范围。红色圆点表示2024年陆地碳汇预测值及其不确定性（数据源自Friedlingstein等人, 2025）。图B：北方生态系统植被碳储量的年际变化，以2010年值为基准。2016年成为转折点，此后生物量开始下降（数据源自Li等人, 2025）。

统的碳汇较弱(图3B)，从2022年的2.8GtC/年下降至2023年的1.2GtC/年，降幅达58%。受厄尔尼诺现象影响，气候变暖及干旱化导致萨赫勒地区和非洲南部的植被生产力下降，亚马逊区域的植被碳吸收能力也相应减弱。加拿大北方森林的野火释放了约 0.65 ± 0.08 GtC/年——相当于欧盟全年化石燃料排放总量，抵消了未受干扰的森林生态系统数年累积的碳汇。

2023年北半球高纬度森林经历了破纪录的野火。研究显示，全球温升超过约1°C时，野火发生频率便显著上升，并将影响全球陆地碳汇。随着全球温度持续上升，野火发生面积将不断扩大，其碳排放将进一步压缩实现2°C温控目标下的人为排放空间。加拿大火灾受到高度关注，反映出人们对北半球温带陆地碳汇脆弱性的担忧日益加剧。最新研究证据还表明，曾被认为对气候变化更具适应性的北方陆地生态系统正日趋不稳定。尽管仍是净碳汇，但观测与模型研究均显示，近几十年来北半球温带陆地生态系统的年度碳汇已呈现趋平或下降趋势。尤为重要的是，自2016年以来，北半球高纬度生态系统的生物量（陆地碳汇的重要组成部分）已由增加转变为降低（图3B），这可能是陆地生态系统向大气排放碳加速的标志。

近几十年来，北方森林的碳吸收能力显著降低，除火灾外，虫灾、干旱及异常高温导致的树木死亡等原因也是重要的原因。如果考虑土地利用变化与管理活动产生的排放后，2010至2019年间北方森林的平均碳储量较此前20年下降36%；所幸热带地区森林再生长与温带森林碳汇的增加，使过去十年全球碳汇总量保持稳定。

多年冻土区（涵盖苔原及大部分北半球高纬度生态系统）正在全球变暖的影响下发生深刻变化，其固碳能力显著下降。尽管北方多年冻土区整体仍为碳汇，但约三分之一的北极-北方陆地面积已转变为净碳排放源。有证据表明，苔原生态系统已不具备碳汇功能。若考虑内陆水域、火灾及多年冻土突发性融解产生的净温室气体排放（涵盖CO₂、CH₄与N₂O），该区域已经成为净碳排放源（0.14 GtC/年）。

极端气候事件对陆地碳汇的长期影响仍是重大挑战。火灾与干旱虽能瞬时造成大规模碳损失，但最终滞留大气的净碳量主要取决于生态系统恢复的速度与程度。然而，生态系统恢复的速率尚存在极大的不确定性，导致其碳汇效应难以预测。植被模型因未能准确模拟火后森林生态系统恢复，系统性低估了

北方陆地碳汇约1GtC；同时，因为模型中缺乏磷对于陆地碳汇的限制机制，又高估了热带地区的陆地碳汇。由于决定北方与热带生态系统碳汇驱动机制有着显著的不同，因此对于特定温控目标而言，人为源排放的碳预

算可能远低于预期。这些不确定性表明，在全球持续变暖背景下，陆地生态系统缓冲气候变化的能力并不可靠；深化有关陆地碳汇强度及其变化趋势的认知对制定稳健的气候政策至关重要。

政策启示

- 北半球陆地碳汇的减弱意味着“剩余碳预算”进一步缩减。这从根本上影响了当前《巴黎协定》下现行的排放核算与目标设定，要求我们必须加快温室气体减排步伐，并同步推进碳捕集与封存技术的应用。
- 作为减缓路径、目标和国家计划基础的气候预估应纳入关于自然碳汇状态及其在合理排放情景下稳定性的最新科学理解。
- 尽管多年冻土区储存着全球最大的土壤碳库且可能已成为净碳源，但目前的国家自主贡献普遍未计入冻土排放。因此，亟需建立针对多年冻土碳排放的强制性报告要求。
- 世界气象组织建立的全球温室气体监测计划（G3W）旨在监测、归因和预测温室气体通量（包括土地退化及生物圈-气候反馈产生的排放），该计划在将地球系统观测数据纳入国家清单与全球盘点评估方面具有基础性作用。最新出台的标准化多年冻土监测指南尤为及时且必要。
- 在土地利用规划与生态系统治理中，减缓与适应气候变化的气候政策必须协同推进。作为全球适应目标（GGA）的优先事项，生态系统韧性在当前形势下对减缓工作也愈发重要。通过适当的土壤与土地管理技术提升生态系统抵御野火加剧与冻土融化的能力，将有助于减少碳向大气的释放。与此相关，联合国生态系统恢复十年计划、减少毁林及森林退化所致排放（REDD+），以及联合国森林论坛下的各项倡议，可以重新调整范围，不再局限于森林区域，而是将增强抵御火灾、干旱以及气候变暖对北方森林和热带森林碳汇影响的能力也纳入其中。

4 气候变化与生物多样性丧失相互加剧

关键信息

气候变化正从局部到全球尺度深刻影响着生物多样性，日益增多的科学证据表明，生物多样性的持续丧失可能反过来加剧气候变化，进而引发破坏性的双向反馈机制。

气候与土地利用变化所驱动的植物多样性下降会削弱生态系统的结构与功能，导致生物量累积能力减弱以及碳储存水平降低，从而影响生态系统的长期稳定性。

那些将生态系统完整性和物种组成等方面纳入考量，而不仅仅关注土地覆盖面积的自然气候解决方案举措，能够更有效地保护碳汇功能。

气候变化与生物多样性丧失是当前全球面临的两大紧迫且相互关联的环境挑战。大量研究表明，气候变化对生物多样性的影响遍及从局部到全球的各个空间尺度：即便在中等排放情景下，预计也有300万至600万甚至更多的动植物物种面临威胁。与此同时，日益增多的科学证据表明，生物多样性的持续丧失可能引发不稳定的反馈机制，进而直接削弱气候系统的稳定性。多项研究一致指出，陆地植物多样性越高，生态系统的结构与功能（包括碳储存）越健全，且此类正向效应随时间推移而不断增强（见表1）。

由于较高的植物多样性有助于特定区域长期积累更高的生物量，因此由气候变化和土地利用变化所驱动的植物多样性下降，可能导致生态系统生物量减少以及碳汇能力减弱。一项最新研究显示，未来几十年内，全球植物物种的丧失可能会导致7–146GtC碳排放(见图4)。尽管该估算存在较大不确定性，但高估值占在升温不超过1.5或2°C之前剩余碳预算的相当大一部分。同样，通过实施有效的气候变化减缓措施以保护树木多样性，每年可避免约2–3GtC的潜在排放，对应于可观的减排贡献。

表1. 生物多样性与碳储量关系背后的机制

机制	描述
互补效应	在物种多样的群落中，物种在性状和资源利用方面存在差异，这使得群落能够更充分地利用可用资源。通过生态位分化和促进作用等机制，这可以增强生态系统的功能（例如初级生产力）。
选择效应	在物种更为多样的群落中，包含特别高产或竞争优势明显的物种的可能性更大。这些物种可能对生物量生产和碳储存的贡献不成比例，从而提高整个生态系统的功能。
稳定性和保险效应	物种多样的生态系统在功能（例如碳通量）方面往往表现出更大的时间稳定性，因为物种对环境变化的异步响应可以缓冲整体功能的损失。

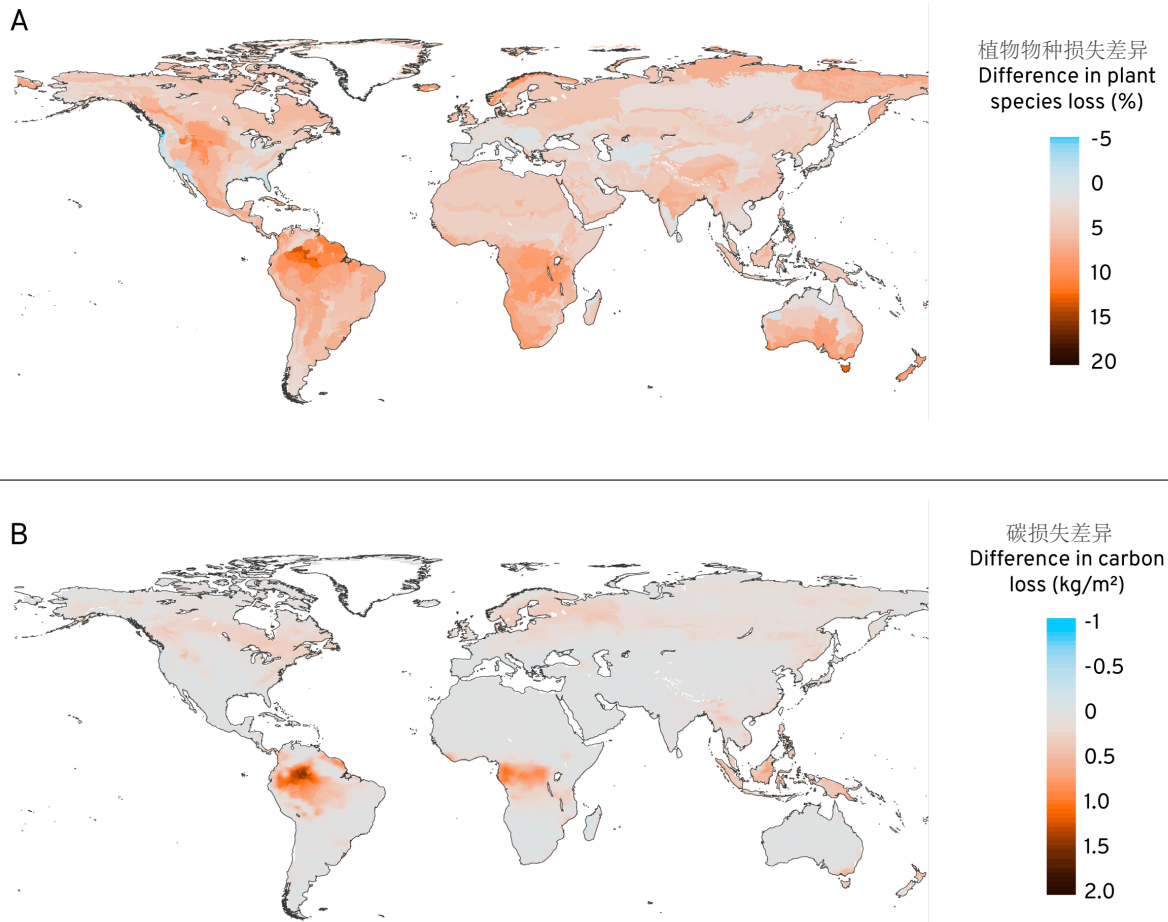


图4.在极高排放情景下植物多样性进一步丧失及由此导致的碳损失。2050年因气候变化和土地利用变化导致的维管植物物种丰富度的长期损失(图A),以在高排放情景(RCP8.5)下相对于低排放情景(RCP2.6)额外丧失的植物百分比表示。剩余栖息地中因植物生物多样性丧失而导致的植被碳减少(图B),以高排放情景(RCP8.5)相对于低排放情景(RCP2.6)额外损失的碳量[kg/m^2]表示(改编自Weiskopf等人2024年的研究)。

尽管树木多样性已被证实可有效增强农林业系统中的碳封存与碳保有能,但在农田农业生态系统中增加植物多样性是否具有类似效应仍尚不明确。一项大规模田间试验通过将覆盖作物与谷类作物间作种植,发现提升农业生态系统的植物多样性可在不降低农业生产水平的前提下,显著增强土壤的碳固持潜力。该结果进一步验证了已有研究结论:调控植物多样性不仅有助于提高植物生产力,还能优化微生物群落间的相互作用,提升微生物生长效率,这一过程被认为是驱动土壤碳储存的一个驱动因素。

虽然植物多样性对生态系统功能的促进作用已得到广泛认可,但其效应强度在不同生物群落和环境条件下存在显著差异。大尺度整合分析表明,生物多样性与生产力之间的正相关关系在低生产力生态系统中尤为突出。类

似地,多项研究表明,在气候较干旱的地区,植物多样性对土壤有机碳储存的促进作用更为明显。为降低现有认知的不确定性,亟需在不同生物群落、环境梯度以及物种组合背景下开展系统性研究,以深入揭示生物多样性与碳储量关系变异背后的生态机制。

植物与动物之间的相互作用,例如通过食物链等机制以及生态系统功能,可能显著改变植被结构和植物物种组成,进而影响地上与地下生物量。研究表明,在非洲森林生态系统中,大象的存在增加了地上生物量;然而在非洲稀树草原,食草动物数量减少反而导致生物量增加。在热带生态系统中,人类活动导致的动物多样性下降可能导致碳储量减少高达26%,主要是通过巴西大西洋森林中的种群数量变化来实现的。一项研究量化指出,在森林覆盖率不低于40%的破碎化景观

中，食果动物（即取食植物果实、坚果、嫩枝、根系及种子的动物）能够显著促进碳的恢复过程。然而，这类关键功能性物种尤其易受气候变化影响，且在热带地区面临更高的风险。尽管上述效应凸显了物种相互作用在碳动态中的潜在作用，但证明陆地动物在气候解决方案中所起作用的证据有限且存在争议。

动物亦在海洋碳循环中发挥重要作用。得益于其巨大的体型，鲸类在其生命周期中可封存大量碳，并在其死亡后以鲸落的形式将碳输送至深海沉积物中，实现长期固存。须鲸种群的恢复及其营养物质循环服务功能的增强，能够提高生产力，并有助于恢复因20世纪大规模捕鲸活动而受损的海洋生态系统的功能。不过，此类生态恢复所带来的碳汇效益正日益受到气候变化的威胁。

为全面评估气候变化与生物多样性丧失之间的破坏性反馈机制，通过采用多学科与跨学科方法，深入理解贯穿于碳吸收、释放与保护过程中的社会、生态及物理过程尤为重

要。此类反馈机制表明，实现《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》(KMGBF) 的目标可直接支持各国履行《联合国气候变化框架公约》下的国家自主贡献，通过遏制生物多样性丧失所引致的碳债务，增强气候减缓行动的成效。因此必须充分认识并积极应对生物多样性保护与恢复同有效气候减缓措施之间的内在关联与协同需求，以统筹推进气候与生物多样性双重政策目标的实现。尽管生物多样性在维持生态系统碳储存功能中具有关键作用，当前许多自然气候解决方案仍主要聚焦于生态系统范围和覆盖面积，而非质量和组成，而这会影响碳汇的有效性。将生态系统质量纳入规划与实施范畴，在维护和恢复生物多样性的同时尊重并整合原住民及地方社区的传统知识体系与生计方式，是应对多重全球环境危机、推动可持续发展的关键路径，亦有助于协同达成KMGBF与NDCs的国际承诺。原住民和地方社区所提供的基于特定地理区域与生物群落的知识，不仅为地方政策提供科学依据，也为实现全球目标提供了不可或缺的支持。

政策启示

- 实现《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》(KMGBF) 的目标可直接促进气候减缓行动，通过减少由生物多样性丧失所引发的碳债务，增强生态系统碳汇的稳定性与可持续性。这一目标的达成依赖于对高生物多样性生态系统的有效保护与恢复，以及对植根于原住民和传统知识体系及其生计方式的生物文化实践的系统性支持。
- 为避免政策碎片化并提升治理效能，应加强《里约三公约》，即《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)、《联合国生物多样性公约》(CBD) 和《联合国防治荒漠化公约》(UNCCD) 之间的协同作用，推动在国家与区域层面实施联合执行机制与整合型融资策略，从而在气候、生物多样性和土地可持续利用三大议程之间创造多重共益效应。
- 应优先激励兼具生物多样性提升与碳储存能力增强双重效益的生态恢复项目，例如以多样化本土森林重建替代单一树种造林的实践。此类项目可通过改革现有融资机制予以支持，确保资金流向具有长期生态韧性和多功能性的自然解决方案。
- 在农业生态系统中实施保护生物多样性与维持关键生态系统功能的管理措施，不仅有助于保障农业生产可持续性，亦构成提升碳封存与碳储存潜力的重要自然气候解决方案。
- 国家碳核算体系应进一步完善，纳入生物多样性状况与生态系统完整性等综合指标，以实现碳储量及其赖以维持的生态过程的系统性监测、报告与核查(MRV)，从而提升环境治理的数据基础与政策透明度。

5 气候变化加剧地下水耗竭

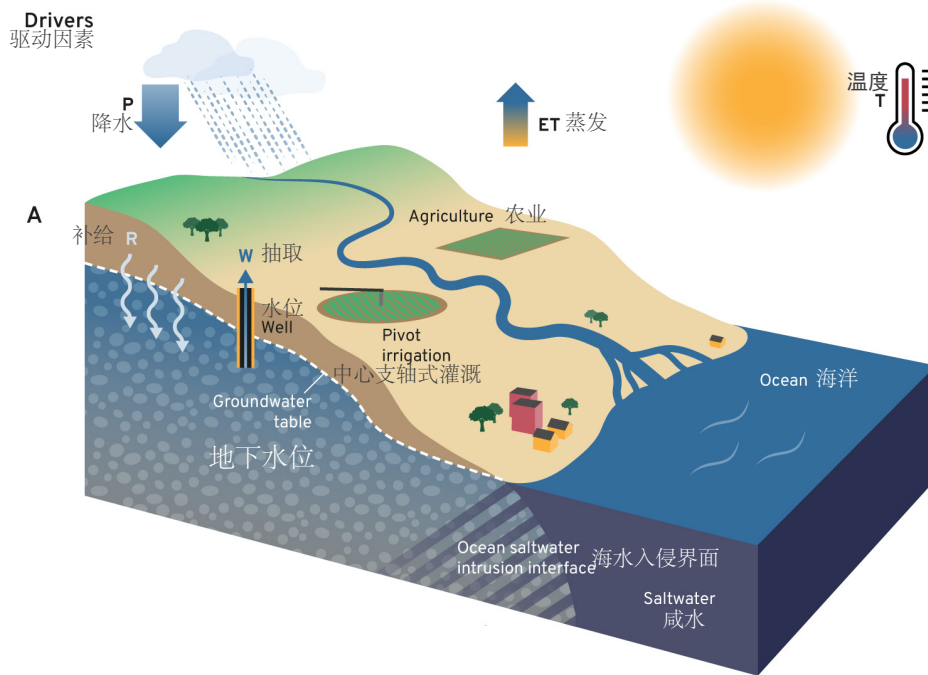
关键信息

- 相对于1980至2000年，全球地下水资源的枯竭速度正在加快。这主要由日益严峻的气候压力与不断增长的社会经济需求共同驱动。
- 地下水是全球水循环中活跃且对气候敏感的组成部分。气候变化正在扰乱地下水的补给过程，日益动摇水文系统的稳定性。与此同时，全球地下水开采率的增速已远超人口增长。未来的需求，特别是粮食生产用水，预计将加剧这一挑战。
- 地下水本是农业应对气候变化影响的重要缓冲。然而，为应对气温升高而增加灌溉抽水，并非可持续的适应之策。
- 除水资源短缺外，地下水枯竭还带来显著的环境与社会经济代价。包括导致农业区和城市地区地面沉降，以及在沿海地区，随着含水层枯竭，海水入侵可能进一步恶化。

地下水是仅次于极地冰川的全球第二大淡水资源，养育着近一半人口。它为数亿人，尤其是降雨不稳定地区的居民，提供了稳定的水源和粮食保障。20世纪初，全球地下水开采量大致与人口增长同步，但自1960年左右起，开采量从约每年312立方千米激增至超过1000立方千米，而全球人口仅增长2.6倍。这表明除人口外，还有其他驱动因素。抽取的地下水主要用于灌溉。联合国粮农组织（FAO）估计，为满足2050年100亿人口的粮食需求，未来几十年灌溉农业将增长30%，尤其在发展中国家。随着许多地区夏季更干旱、降雨更不均，我们对地下水这一稳定资源的依赖将愈加关键。虽然气候变化显著影响灌溉需求，但农业集约化及饮食偏好改变等社会经济因素，在推动长期地下水资源枯竭趋势方面，也至少同等重要。因此，地下

水供应将成为21世纪地球上面临不断增长且日益富裕人口的一项重大挑战。

地下水作为农业抵御气候变化影响的关键缓冲，使干旱地区（如美国亚利桑那州和智利）能够种植苜蓿、鳄梨等高耗水作物，并实现一年多次收获。但若将其作为应对气温升高的适应策略，可能导致灌溉用水增加，从而加速印度等已面临地下水紧张地区的枯竭。2002年启动的“重力恢复与气候实验”（GRACE）卫星任务，标志着全球地下水观测的转折点。它通过监测地球引力变化，首次实现了对大范围地下水储量异常的观测。在此之前，认知主要依赖于钻井和地质记录。GRACE以月度分辨率，揭示了全球主要农业区地下水的显著下降趋势。2003年至2024年间，它观测到美国



Consequences

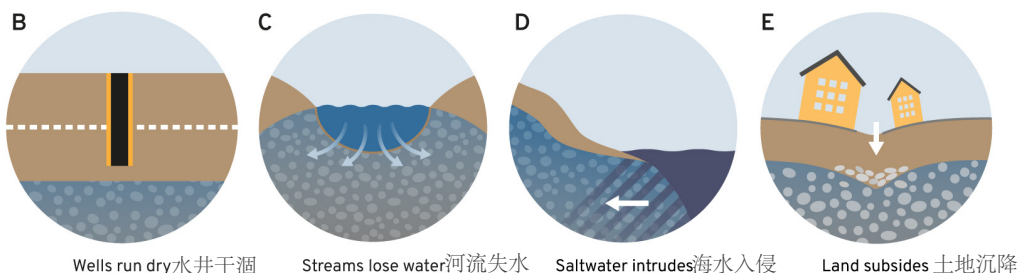


图5. 地下水枯竭的驱动因素及后果。气候变化对陆地水流量的影响（图A部分）。全球许多地区的降水量（P）减少，只有少数地区会略有增加。全球变暖导致气温（T）上升，影响蒸散量（ET），进一步减少地下水补给（R）。最终地下水位下降。此外，气候变化给农业粮食生产带来压力，导致用于灌溉的地下水开采量（W）增加。地下水位下降带来的后果远不止于水资源的可用性：水位越深，钻井成本越高，最终导致井水枯竭（B）；溪流向其周围的含水层渗水（C）；海水侵入沿海含水层（D），以及地面下沉（E）。

中央谷地和南部大平原的地下水储量分别以每年0.26厘米和1厘米的速度减少；同期，印度北部和巴基斯坦则分别以每年0.66厘米和0.44厘米的速度减少。印度西北部和中华北平原也观测到类似现象（译者注：自2015年以来，华北地下水位总体回升）。

近年来，GRACE的局限性也日益显现，如其空间分辨率较低、数据时间跨度有限（2002-2024年），以及难以区分地下水、土壤水、积雪水等不同储水成分。在传统局部地下水测量与遥感观测之间架起桥梁，对采取切实

可行的管理措施至关重要，尤其是在撒哈拉以南非洲等观测井稀缺的脆弱地区。该地区75%的饮用水依赖地下水，且正面临气候驱动的枯竭威胁。2003年，联合国教科文组织和世界气象组织成立了国际地下水资源评估中心，旨在整合全球地下水信息。但二十年过去，各国数据共享政策不一、格式各异，使得建立全球水井数据库仍面临挑战。

一个涵盖40个国家、超过17万组地下水位时间序列（包含近3亿次观测）的数据集，跨越四十年，使我们能够比较1693个含水层在

1980-2000年和2000-2022年两个时期的变化趋势。分析不仅证实了地下水位下降普遍存在，更发现近二十年来，在近一半出现下降的含水层系统中，下降速度还在加快。超过80%的加速下降含水层位于降水减少且农业用地集约化的干旱地区。

近期研究表明，地下水作为全球水循环中动态且对气候敏感的组成部分，其行为在人为压力下已发生关键性变化。全球范围内的地下水补给（即地表水向地下渗透的过程）正日益受到气候变化破坏。补给动态被打乱，在依赖融雪的流域尤为明显：气候变化导致洪峰提前，减少了渗透机会，加剧了储水损失。同时，干旱降低了补给率，而强降雨又常因土壤板结或快速径流而无法下渗。许多干旱地区可能因降水减少和蒸

发增加，出现补给量显著下降（图5A）。

地下水位下降会留下孔隙（图5E），导致地面沉降，这对曼谷、上海、雅加达或马尼拉等特大城市的农田和城市社区构成直接威胁。尽管这是最大的社会经济威胁之一，但沿海地区还面临海水入侵含水层的风险（图5D）。小岛屿尤其脆弱，因为淡水浮于海水之上，过度抽取、补给减少以及风暴潮都可能导致其盐碱化，所有这些都可能因气候变化而加剧。一旦含水层遭海水污染，可能需要数十年才能用淡水恢复。

地下水位下降通常源于水资源浪费和不可持续的开采，这可通过改进灌溉方法和加强水资源管理来缓解。同时，解决跨界治理问题和推广人工回灌含水层（目前其回灌量不足全球开采量的10%）的政策也至关重要。这种综合治理方法承认了地下水、地表水及依

方框2. 水安全综合管理政策与战略的成功案例

A.中国：自2021年《地下水管理条例》（中国首部该领域专门行政法规）实施以来，地下水修复取得显著进展。在水利部与自然资源部指导下，通过分析全国34929口监测井数据（超过2000名专家参与），重新评估了超采区。结果显示，与2015年相比，严重超采区面积减少了51%（约8.83万平方公里），开采量也大幅下降。

B.美国堪萨斯州：2012年建立地方强化管理区框架，允许地下水管理区（GMD）在奥加拉拉含水层枯竭区域实施有针对性的减量用水措施。该方法在某些地区实现了取水量减少高达35%，同时保持了农业净收益。

C.美国加利福尼亚州：针对严重枯竭的中央谷地含水层，2014年通过《可持续地下水管理法案》，以应对超采问题并推广可持续灌溉实践。法案授权地方机构成立地下水可持续管理机构，负责制定管理计划，平衡开采与补给，防止地面沉降与水质恶化等不良后果，确保长期供水可靠性。

D.印度：通过参与式地下水管理计划（阿塔尔布贾尔计划），在地下水严重枯竭的各邦推动社区主导的保护工作，其特点是分散治理、激励参与以及各级机构合作。该计划已取得积极成果，包括增强地方机构能力、激发青年参与、提高对可持续农业实践的认识。近年来，已观察到微灌技术采用率提高和作物多样化等显著案例，反映出农业领域高效利用地下水的趋势正在增强。

赖它们的生态系统之间的相互依存关系。在气候变化加速的时代，这对于减轻对生物多样性和人类水安全的连锁影响至关重要。那些跨界运作、并让各级利益相关方参与的政策被认为更为有效，因其更具灵活性、适应性和包容性，并能兼顾复杂的社会-生态系统相互作用（见方框2）。

在水资源日益紧张的世界中，要实现可持续的地下水未来，需要紧急采取行动，平衡人

类需求与生态系统健康。成功的可持续管理依赖于长期监测，以及利益相关方在规划与政策决策中的实质参与。对加州《可持续地下水管理法案》108项计划的分析显示，多数计划未能全面吸纳利益相关方，导致许多人仍暴露于地下水资源枯竭的风险中。而当利益相关方真正参与时，他们需求能得到更好解决。这凸显了资源监测、包容性政策制定以及整合多元利益相关方对地下水长期可持续性的重要性。

政策启示

- 各方可将地下水保护与可持续农业实践相结合，以增强农业粮食系统的韧性并推动其转型，这与《沙姆沙伊赫农业和粮食安全联合工作方案》目标一致。
- 应将跨界水资源合作纳入气候适应战略。各国可根据《保护与使用跨界水道和国际湖泊公约》协调行动，或建立将跨界水资源管理纳入其中的双边/区域适应框架。虽然一些国家适应计划（NAPs）提及了跨界水资源问题，但通常较为有限，未能充分考虑邻国气候影响对共享生态系统和资源的潜在威胁。在国家适应计划中，需要采取更审慎的方法来识别、评估和应对跨境气候风险。
- 全球水经济委员会已指出，全球水资源管理缺乏有效的全球性工具，存在重大治理缺口。在气候外交中，应重视地下水作为全球公共产品的地位。相应地，适应策略应纳入可持续地下水利用，推动在国家适应计划及全球适应目标的讨论中，涵盖气候适应型水资源管理。
- 在《联合国气候变化框架公约》技术机制与能力建设框架支持下，应通过南南合作和南北合作，加强地下水监测工具的能力建设。
- 在水资源日益紧张的世界，实现可持续的地下水未来需要紧急行动，平衡人类需求与生态系统健康。这要求我们加强资源监测、制定包容性政策，整合各利益相关方的力量。

6 观测与预测：气候驱动下登革热疫情显著上升

关键信息

2024年，全球登革热疫情规模创下历史纪录，报告病例数高达1420万例。

气温变化正在扩大蚊媒的栖息地范围，延长其传播季节，为蚊虫繁殖与存活创造了更有利的条件，直接推高了登革热的发病率。

城市化进程、垃圾处理不善、全球贸易与旅行等因素，与气候变化共同作用，正推动这种传染病向以往未受影响的地区扩散，并整体加剧了传播强度。

登革热疫情已使多国卫生系统不堪重负，并扰乱经济。预测更表明，到2050年乃至2100年，在气候变化影响下，疫情将呈现更为急剧的增长。

过去两年，登革热病例激增。2024年报告的1420万例病例，是世界卫生组织有记录以来全球最大规模的暴发。登革热由黄病毒属的一种RNA病毒引起，该病毒有四种血清型，彼此交叉免疫力有限，因此一个人最多可能感染四次。需指出，2024年的官方数据很可能低估了全球实际负担：在登革热与疟疾共存的地区，可能存在误诊；并非所有国家都具备完善的监测系统以准确追踪大规模疫情；而在登革热非常见国家，可能不会首先怀疑是此病。目前，全球约半数人口面临登革热风险，每年估计有1亿至4亿人感染。虽然约75%-80%的初次感染症状轻微或无症状（导致漏报），但后续感染可能引发登革出血热等严重甚至致命的症状。

作为最常见的蚊媒病毒性疾病，登革热发病率持续上升，主因是气温变化扩大了主要媒

介蚊虫的适宜栖息地，为其繁殖和生存创造了有利条件，尽管一些地区预计适宜性会降低，但登革热仍在增加。对比1951-1960年与2014-2023年两个时期，适合白纹伊蚊和埃及伊蚊传播登革热的气候区面积分别增加了46.3%和10.7%（图6）。这两种蚊子同时也是寨卡、基孔肯雅热及黄热病病毒的传播媒介，因此对其种群的控制至关重要。

登革热疫情对卫生系统与经济的影响日益严峻，而模型预测显示，至本世纪中叶及末叶，疫情增长将更为迅猛。2024年，美洲地区报告病例超过1300万例，其中巴西疫情尤为严重，17个城市宣布进入紧急状态。在美国，加州、佛罗里达州和得克萨斯州均出现本地传播病例，联邦政府已发布健康警报；波多黎各则宣布进入公共卫生紧急状态。近期研究指出，在部分美洲国家，高达40%的

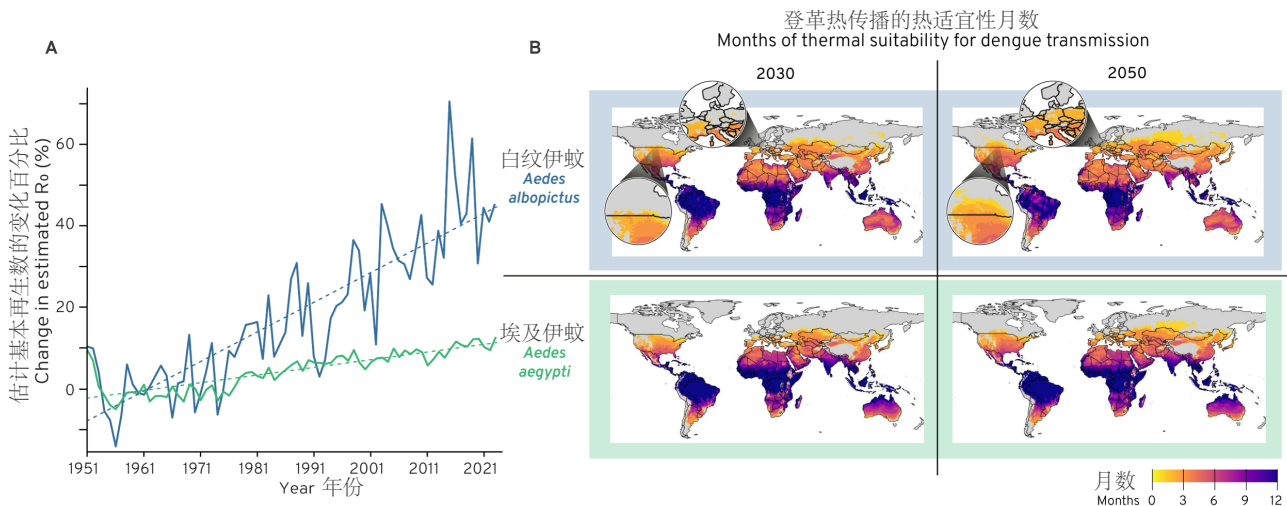


图6. 登革热传播的气候适宜性及全球传播风险的重新分布。登革热传播媒介的气候适宜性变化（图A）： R_0 （基本再生数）表示在一个完全易感的人群中，由一个新病例平均引发的新感染人数（改编自Romanello 等人2024年的研究）。到2030年和2025年，在SSP2-4.5情景下全球登革热传播风险的扩大和重新分布（热适宣传播的月数）（图B）（改编自Ryan 等人2019年的研究，并根据CMIP6投影进行了修改）。

登革热病例可归因于气候变化。气候变化与人类活动共同促使蚊媒重新分布，改变其栖息地，使疾病传播到此前未受影响的地区。蚊子本身对人类的吸引力超过了其他物种，在城市化地区这种现象更为明显。其中，埃及伊蚊作为美洲主要传播媒介，在更炎热的气候中繁殖力增强，已向热带、亚热带地区扩张。它对人类环境适应力极强，即使在少量积水中也能繁殖，加大了防控难度。而白纹伊蚊（“亚洲虎蚊”）凭借强大的环境适应力及通过全球贸易的传播，已将其活动范围扩展至欧洲等温带地区。它在白天亦叮咬活跃，甚至出现在学校操场等场所，构成了新的挑战。需要注意的是，媒介蚊虫的出现与新病例暴发之间通常存在时间差，这增加了公众理解和疫情防控的复杂性。

2023年，非洲报告的登革热病例数达到2019年的九倍。在一些病例激增的国家，本就有限的监测与控制工作，因持续的冲突、大规模人口流离失所及气候因素而更为艰难。与此同时，登革热也出现在以往未曾报告的地区。例如，尼泊尔在2023年3月至11月间观察到病例多峰分布，热点地区遍布全国不同海拔区域，这表明传统的生态与气候屏障可能正在失效。在欧洲，气候是预测蚊媒、蜱媒

等病毒性疾病暴发的关键因素。更长、更炎热的夏季显著增加了风险，尤其是在城市和城郊环境。该地区输入性及本地传播病例持续上升，2024年创下新高：意大利本地病例超过200例，法国85例。自2000年以来，欧洲已累计报告超过4.5万例登革热病例，其脆弱性日益凸显。

气候变化为登革热传播创造了有利环境，而全球旅行与贸易则在将病毒和蚊媒引入新地区方面扮演了关键角色。旅行者可能在不知情的情况下将病毒带入存在易感蚊媒的地区，从而引发本地疫情，美国佛罗里达州就曾出现过此类情况。

登革热的传播并非不可避免，大量实践证明，多种病媒控制方法是有效的。虽然控制蚊虫仍是干预措施的基础（例如新加坡采取措施防止蚊子幼虫生长），但其他策略也在探索之中，比如利用特定细菌抑制蚊子传播登革热的能力。不过，这些策略也伴随着风险。随着人们接触登革热病毒的机会减少，人群的免疫力反而可能下降，而且对防控措施的持续投入往往也随之减少。这就让人对长期防控的可靠性产生疑虑，并在病媒控制与公共卫生干预策略之间造成了紧张关系。

目前，登革热疫苗虽已研发，但尚未广泛普及或得到普遍推荐。因此，监测与早期预警系统对于预防和干预至关重要。利用旅行者自我报告的手机应用等工具进行监测，已成为宝贵的早期预警手段，对卫生监测能力薄

弱的国家尤其有益。面对伊蚊传播疾病的持续扩散，扭转趋势需要强有力的公共卫生干预、创新的病媒控制策略，以及具备强化监测功能的早期预警系统。

政策启示

- 深化气候与健康议程整合。《联合国气候变化框架公约》第28次气候变化大会（COP28）、《阿联酋宣言》中关于气候与健康的条款、COP29主席国延续的气候与健康联盟，以及正在制定的《贝伦健康行动计划》，均反映出将健康全面纳入气候讨论的强劲势头。落实相关计划需加强国际合作，动员必要资金，以建设具有气候韧性的卫生系统。
- 强化全球监测预警。登革热传播范围的扩大要求加强全球卫生监测与早期预警系统。应推动气候数据与卫生监测系统的融合，并制定跨境追踪气候敏感疾病的标准化协议。可以依托世卫组织“全球虫媒病毒倡议”框架，加快实施步伐。
- 在国家适应计划中落实具体行动。尽管登革热已被公认是需优先应对的气候敏感型健康风险，但具体的适应行动应体现在各国国家适应计划（NAPs）中。这需要建立卫生、气象、环境部门的跨部门协调机制；改进监测预警系统；并在地方层面开展脆弱性评估，以精准识别高风险人群与区域。
- 采取“无悔”适应措施，构建卫生系统韧性。为防范疫情压垮卫生系统并造成经济损失，必须积极构建韧性：
 - 推广综合病媒管理（IVM）策略。
 - 实施包括改进储水系统和固体废物管理在内的无悔适应措施，从源头减少孳生地。
 - 加强卫生系统准备，提升病例管理能力和实验室诊断水平。
- 设定并采纳明确的健康适应指标。根据“阿联酋-贝伦工作计划”健康专家小组的建议，应在将于COP30定案的工作计划中，纳入与媒介传播疾病相关的具体指标，用以追踪在“增强对气候相关健康影响的抵抗力、促进气候适应型卫生服务、并大幅减少气候相关疾病发病率和死亡率（特别是在最脆弱社区）”这一目标上的进展。这些指标应力求获得各方的正式采纳。

7 气候变化导致的劳动生产率与收入损失

关键信息

高温对劳动生产率的负面影响，是气候变化影响经济最明确的渠道之一。全球气温每升高1摄氏度，预计热带地区将有超过8亿人面临不安全的高温压力，可能导致其工作时间减少多达50%。

虽然直接影响集中于发展中国家，但全球供应链和贸易网络会将经济损失放大并传导至世界各地。因此，全球性的收入损失并不局限于直接遭受高温压力的区域。

在低排放情景下，因劳动力受损导致的全球年度国内生产总值（GDP）损失可能控制在0.1%至0.8%之间；而在高排放情景下，这一损失可能高达1.4%至4.5%。这为采取更积极的气候行动提供了强有力的经济依据。尽管具体估算值因方法论而异，但气候变暖将对全球收入造成负面影响已成普遍共识。

准确估算气候变化的经济成本，对于制定有效的减缓与适应政策至关重要。这类估算能够揭示影响经济的关键路径，识别不同地区、行业和人群的特定风险，凸显其中的公平正义问题，并为减排行动提供激励。

对经济的主要危害之一，在于气候变化会直接降低劳动生产率（图7A与7B），而未来高温暴露及其影响的加剧已是普遍预期。如何界定高温危害是一大挑战，需要综合考虑湿度等其他因素，而非仅看气温。全球升温1摄氏度，就将使热带地区超8亿人暴露于不安全的高温环境，可能导致其工作时间减少50%，从而影响生产力与劳动力市场的有效供给。值得注意的是，劳动力暴露于高温的风险存在巨大的不平等，发达国家甚至可能通过进口，从日益受高温困扰的发展中国家的生产中获益。近期一项综述得出结论：气温上升3

摄氏度将使非洲户外高暴露行业的劳动效率降低33%，亚洲降低25%，低暴露行业亦会受到显著影响。到2060年，全球贸易与供应链的间接影响，预计将占高温相关全球经济损失的12%至43%，且地区和行业差异显著。近期研究还发现，在高排放情景（RCP8.5）下，仅高温导致的劳动生产率损失就可能使全球年GDP减少1.4%至2.6%；若再计入气候对健康的损害及供应链中断的影响，总损失可能攀升至2.9%至4.5%。反之，若将排放控制在RCP2.6或RCP1.9水平，年GDP损失则可大幅降至0.1%至0.8%。

尽管认知在深化，且对气候变暖损害全球收入已形成共识，但通过所有可能渠道对气候变化总体经济影响的估算仍存在巨大差异（图7C与7D）。首先，估算值高度依赖于所采用的方法，主要分为结构性模型和统计模

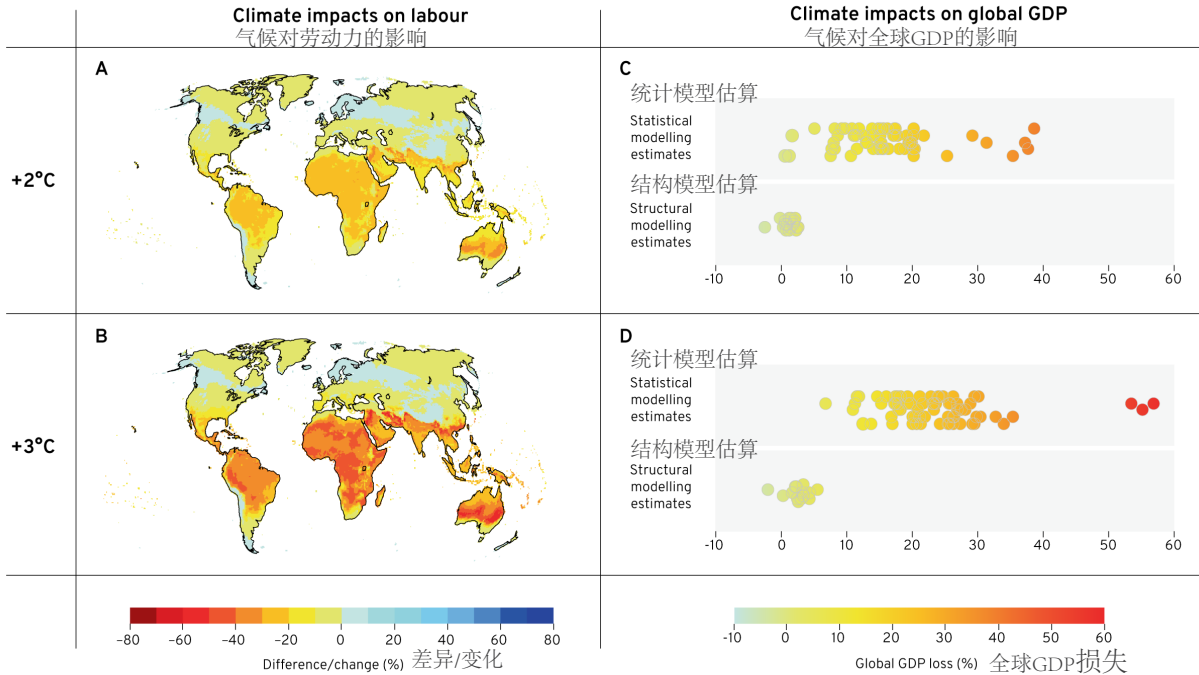


图7. 气候变化对劳动力和全球国内生产总值（GDP）的影响。全球平均气温相对于工业化前水平分别升高 2°C（图 A）和 3°C（图 B）时有效劳动力（劳动力供给和生产率变化的综合）的预计损失（改编自 Dasgupta 等人，2024 年）。全球变暖 2°C（图 C）和 3°C（图 D）对全球 GDP 影响的范围，来自文献中结构模型和统计模型的估计，以相对于未发生额外气候变化情况下的全球 GDP 的年度百分比损失来衡量（改编自 Morris 等人，2025 年）。

型两大路径，二者结论常有分歧。统计方法能捕捉多部门影响机制及其相互作用的总体效应，但对具体机制的相对作用揭示较少。其模型设定的敏感性以及将历史关系外推至不同未来情景的做法，也引发广泛争议。结构性模型通过明确列举具体的影响链条，能提供清晰的机制解释，但其依赖于特定假设，且难以涵盖所有影响渠道。这两种方法不应被视为可简单替代的选项，而应作为互补的证据线索。当前研究正致力于理解和弥合这些分歧。

近年来，对总体经济影响的统计估算经历了重大修订，成本预估通常随时间推移而增加。新研究强调了包括极端天气、气温波动和降水在内的多种气候危害的作用，而非仅关注平均气温。另一研究路径则突出了气候冲击的全球性，发现将全球气温指标纳入分析会使先前估算结果增加一倍以上。此外，在捕捉经济影响持续性方面的模型进展表明，影响至少部分是持续性的，这支持了总

体影响更大的估算。

当前知识空白仍然存在。最大的不确定性源于不同模型间的差异，但其他空白也不容忽视。尽管研究已突出热应激与劳动力等关键影响类别，但干旱、热带风暴和野火等其他气候影响尚未被广泛纳入模型。同样，对生物多样性、犯罪冲突、移民等“非市场”部门的影响成本难以货币化，尽管在核算生态系统服务方面有所进展，但这些成本在很大程度上仍被忽略。此外，需要更多关注复合型气候危害及其在各系统中的连锁反应。最后，适应措施的作用仍是一个重大的不确定性来源，因为基于历史天气观测的统计关系，在未来根本不同的社会经济和气候条件下可能发生变化。虽有证据表明在降低高温相关死亡率方面适应取得了成功，但在其他领域，历史上发生有效适应的证据则不那么明确。为了更准确地预测总体成本，需要在统计和结构模型中更好地理解并整合适应性反应。

有关气候变化损害全球劳动生产率与收入的证据，强化了采取减缓措施的必要性，有助于聚焦适应工作的重点，并为预测损失与损害提供依据。例如，高温对劳动的影响作为一个关键渠道，可直接指导适应策略的制定。统计方法的进步，尤其是在纳入更多气候危害和全球性影响后，提高了对经济成本估算的可靠性。这些成本因地区、行业和人口特征而异，低收入国家由于更依赖气候敏感型产业、适应能力更低且位于更脆弱区域，将面临最高的经济损失。认识到这些脆

弱性对于制定政策至关重要，这些政策不仅要减轻经济损失，更要培育能够抵御未来气候冲击的、具有韧性和公平性的社会经济系统。最后，各国经济不仅会受到国内气候变化的直接影响，还会通过全球贸易，受到其他地区气候影响的间接冲击。在一个相互关联的世界中，这一点尤为重要。随着极端天气事件日益频繁，制定旨在增强供应链主动适应能力的政策与商业策略，以及加强国际合作以减轻经济影响、应对跨境风险，变得愈发紧迫。

政策启示

- 为最小化气候变化对劳动生产率的经济影响而采取的强有力减缓措施，其带来的益处是增强减排雄心并加快实施步伐的有力依据。各方可利用劳动生产率相关数据，强化其国家自主贡献（NDCs），并支持设定进一步的全球目标。
- 将劳动生产率影响评估纳入国家层面气候政策的成本效益分析，将是一个有益的组成部分。同时，综合评估模型应纳入关于气候导致的收入损失和劳动生产率下降的最佳可用知识，以更准确地预测经济影响。
- 在国家层面，政府可利用劳动生产率影响预测，优先投资于工人保护基础设施，例如在极端高温期间安装降温设施、调整工作时间安排。应通过制定特定行业（尤其是高暴露行业）的高温行动方案，提前规范职业性高温压力防护。世卫组织与世界气象组织联合发布的[WHO-WMO Climate change and workplace heat stress guidance](#) 为此提供了关键建议。
- 当前在“公正转型工作计划”下，对劳动力方面的考量主要集中于能源转型带来的就业岗位增减。这一范围应予以扩充，更加关注气候变化对劳动力本身、其福祉和生产率的直接影响。
- 在国家层面，政府应广泛动员雇主、工会、劳动者、医务工作者及地方当局等利益相关方，共同识别与气候相关的工人安全及生产力风险，并协作制定有效且公平的政策应对措施。

8 亟需安全规模化二氧化碳移除以应对 难减排领域与气候风险

关键信息

为实现《巴黎协定》目标，大规模部署二氧化碳去除技术（CDR）与深度、持续的温室气体减排同样至关重要。然而，当前各国的相关计划严重不足，形成一个日益扩大的“CDR缺口”。

大规模部署CDR技术会带来显著的可持续性风险，可能挤占土地、能源和材料资源。因此，其应用应严格限定于补偿那些真正难以削减的“剩余排放”，并最终实现净负排放，而绝不能用于抵消本可通过现有方案轻易减排的额外排放。

新型CDR方法在技术上已具备可行性，并已开始以千万吨级的规模进行部署。它们需要专门的政策与资金支持，以推动研发与示范，加速进展，从而弥合CDR缺口。

此外，全球还需要建立巨大的“预防性碳去除”能力，以便在未来通过实现净负排放来长期稳定气温，这尤其对于防范气候系统的不确定性风险至关重要。

实现《巴黎协定》目标，必须在深度持续减排的同时扩大CDR规模。但这一过程伴随着风险与不确定性。新证据表明，CDR的规模扩张受到可持续性限制，若将其用于抵消本可避免的排放，可能远远无法实现气候目标。此外，为应对“过冲”风险（见方框3）及防范物理气候的不确定性，建立“预防性CDR能力”也必不可少。然而，各国在规划和实施规模化部署方面均显不足（见图8）。

CDR指从大气中捕获二氧化碳，并将其长期封存于地质层、生物圈或产品（如木材）中。“传统”方法（见方框3）主要包括植树造林/再造林和改进森林管理等。而“新型”方法（见方框3）如生物能源碳捕集与

封存（BECCS）、直接空气碳捕集与封存（DACCS）、强化风化、碳矿化和生物炭等，虽技术可行但尚未大规模应用。当前部署主要依赖传统方法，年去除量约20亿吨二氧化碳。然而，土地利用和林业部门的净排放量仍高达约44亿吨二氧化碳，这表明森林砍伐和泥炭火灾造成的碳排放，仍远高于陆地生态系统的碳吸收量。

CDR的一个关键作用，是补偿未来的“剩余排放”（见方框3），使各国、各城市或各企业能够在规定日期前实现净零排放目标（图8A）。帮助各国、城市或企业在其设定的日期前实现净零目标（图8A）。部分排放源（见方框3）因减排成本极高或缺乏替代方

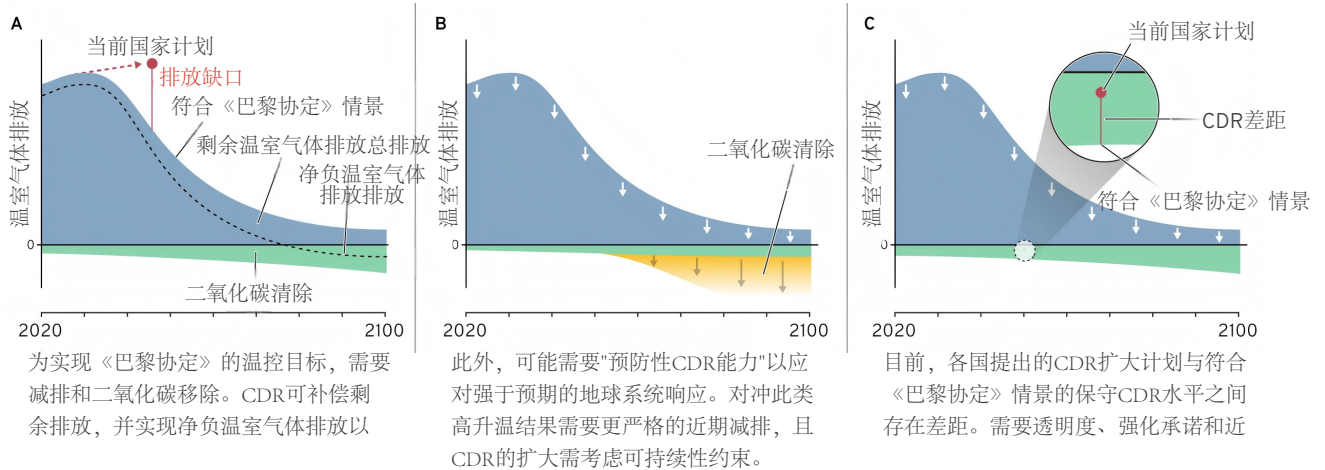


图8. 达到净零二氧化碳和温室气体排放的可能情景路径的示意图。需要减排和二氧化碳去除（CDR）来限制升温。CDR可以补偿“剩余排放”，并允许达到净负温室气体排放以解决超标问题；然而，CDR将受到土地面积和其他可持续性限制的制约（图A）。这意味着需要更快、更深入的减排，仅将CDR用于补偿“关键需求”的剩余排放。可能需要“预防性CDR能力”来应对意外的地球系统响应（图B）。目前，各国关于扩大CDR的提议与情景中保守的CDR水平之间存在差距（图C）。减少对预防性CDR能力的需求将取决于更有力的国家承诺和减排措施的实施（基于Lamb等人2024年的研究）。

案而“难以减排”，如畜牧业、国际航空和部分重工业，这些将成为剩余排放的主要来源。尽管如此，这些行业仍可通过需求侧措施来减少排放。

综合评估模型（IAM）的情景展示了CDR与剩余排放间的互动关系。例如，在81个情景（C2类情景，即1.5°C高度超标）中，2050-2100年间部署的CDR总量，平均上与同期的二氧化碳、氧化亚氮及氟化气体等剩余排放量相平衡。尽管在本世纪后期，CDR部署量通常远超剩余温室气体排放量。而在C1或C3情景（即1.5°C或2°C情景，分别对应无/有限超标）中，模型预测的同期平均CDR部署量较小，因此剩余排放量相对更高。

这些模型所设想的CDR部署水平，带来了巨大的可持续性风险。传统CDR会与粮食生产和生物多样性保护争夺土地，而大规模新型CDR则可能消耗大量能源和材料（图8B）。考虑到这些限制，更为可持续的情景（C1至C3）设定了更低的总体CDR部署水平，并依赖于更严格、更迅速的近期减排行动。

鉴于可持续性限制，我们必须首先将排放降

至最低，以便为服务于关键需求（如图8C所示）的真正难减排行业，留出可实现且有限的CDR能力用于补偿其剩余排放。然而，许多IAM情景却将CDR用于补偿电力等相对容易减排行业的排放，而这些行业本已有成本效益显著的替代方案。同样，自愿碳市场和企业净零目标，也必须根据CDR有限的潜在供应量进行调整。

CDR的另一用途，是在全球气温超过目标后，实现长期的降温。多数研究聚焦于中等变暖情景，例如有50%可能性在2100年将温升控制在1.5°C以内。但评估过冲风险及逆转升温所需的CDR量，必须考虑地球系统反馈的不确定性。若这些反馈强于预期，则可能需要额外去除数百亿吨二氧化碳，远超当前路径的预估。一项研究估计，在不超过1.5°C但考虑高升温可能性（25%概率发生）的情景下，到2100年可能需要部署高达4000亿吨二氧化碳的CDR，这约是政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告（AR6）中部分情景预估值的两倍。

评估各国实施和扩大CDR的国家计划变得日益重要。在《巴黎协定》下的国家自主

贡献（NDCs）和长期低排放发展战略（LT-LEDS）中，各国目前仅计划到2030年通过传统CDR方法每年增加0.05-0.53亿吨二氧化碳的去除量；到2050年，LT-LEDS中提议的年去除增量也仅为1.5-1.9亿吨二氧化碳，其中可能包括新型CDR方法（图8C）。这些计划远低于将温升限制在1.5°C所需的情景水平，即便是那些强调减少需求、限制对CDR依赖的情景也是如此。这表明国家计划与未来所需部署水平之间，出现了一个新兴的“CDR缺口”。要缩小这一差距，需要更宏大的承诺、更早的CDR政策支持，以及更强有力的减排行动，特别是要将剩余排放量最小化。

尽管CDR作用关键，但专门用于支持其部署、融资和政策以实现规模化的举措仍然有限。若无近期强有力且全面的政策行动，在本世纪中叶实现所需CDR水平将极具挑战。需要对多种CDR路径的研发与示范进行投资，以培育多样化的解决方案组合，这有助于应对可持续性限制。政策还应包括对商业

规模部署的激励机制，以及对高质量监测、报告和验证（MRV）的监管支持。决策者必须实施雄心勃勃的减排政策，同时采取行动扩大CDR规模、减少难减排部门的剩余排放并降低能源需求。重要的是，若能充分考虑区域限制、公平公正和程序正义，政策效果最佳。分担“预防性”CDR的责任，也应基于公平与公正原则。

在第28届联合国气候变化大会（COP28）上，各方讨论强调了在全球减排的同时，致力于扩大CDR规模的必要性。强化NDCs中的净减排承诺，并提高CDR在实现目标中作用的透明度和清晰度，是重要的第一步。尽管CDR存在相关的可持续性风险，必须在未来政策和承诺中予以慎重考量，但这些风险必须与不作为的风险相权衡—不作为将对脆弱群体造成不成比例的影响。扩大CDR规模和实现净负排放的紧迫性不容低估，这对缓解气候变化的最严重后果至关重要。

方框3.关键CDR术语的定义

过冲：全球变暖水平暂时超过长期目标值，随后通过减排与CDR使温度回落。

传统CDR方法：经过长期实践验证的成熟技术，如植树造林/再造林、改进森林管理、土壤固碳、修复泥炭地与湿地。

新型CDR方法：处于开发和部署早期阶段的新兴技术，如生物炭、生物能源碳捕集与封存（BECCS）、直接空气碳捕集与封存（DACCS）、强化风化和矿化。

剩余排放：在实现净零二氧化碳排放时，由CDR技术补偿的那部分总排放量。

难减排领域：指减排成本相对较高或缺乏替代方案的经济活动。

氟化气体：含氟的工业化学品，也是温室气体。

负排放：通过人为活动移除的二氧化碳量超过排放量。

政策启示

- 不扩大CDR规模就无法实现《巴黎协定》目标，但扩张不能“不惜一切代价”。必须积极采取措施并设置保障机制，以最小化其社会、经济和环境方面的权衡取舍及意外后果。
- 需要更强有力的国际准则和标准，以确保CDR得到负责任的应用，能有效、透明地为气候目标做贡献，并确保其作为快速减排的补充而非替代。
- 特别是应制定关于在国家自主贡献（NDCs）中体现CDR的最佳实践指南。尽管前两轮NDCs中CDR提及有限，但一些国家在更新版中已明确纳入。
- CDR若纳入碳排放交易体系（ETS）或其他合规机制，需经过仔细考量和严格审查。决策者应与利益相关方合作，制定透明的纳入标准。统一和提高质量标准、改进监测报告与核查（MRV）流程，对于提升CDR的透明度、影响力和避免“漂绿”至关重要。特别是，CDR的核算应仅涵盖新增碳汇，而非已存在的自然碳汇。
- 传统陆基CDR方法是当前最成熟、经济可行的方法，而新型方法则潜力更大，但风险和成本也各异。决策者应依据全面的科学评估，选择最契合本国经济结构、地理条件和资源禀赋的CDR方法，并认真权衡每种方法的长期影响、潜在风险与收益。
- 并非所有CDR都能提供同等程度的持久封存。临时性解决方案不能替代长期减排。应制定明确标准，区分永久性与临时性碳储存，优先考虑更持久的方案，同时认识到暂时持久性较差的方法（传统陆基方法）在当前阶段仍具有重要作用。
- 政府应将采购CDR信用额视为一项公共产品，以加速新型CDR方法的技术成熟，缩小CDR缺口，缩小碳去除缺口，并增强私人购买的信心。

9 碳信用市场：诚信挑战与新兴对策

关键信息

尽管自愿碳市场正在迅速扩张，但围绕碳信用质量和可信度的担忧仍存在。

证据表明，许多宣称“避免”排放的项目缺乏额外性，而基于自然的碳移除项目则普遍高估了碳封存量。

大多数企业买家依赖于低价、低质量的“避免类”信用额度，这引发了人们对“迟滞效应”的担忧，即碳抵消可能导致企业直接脱碳的努力被削弱或推迟。

碳信用市场存在系统性缺陷，但近期在建立质量基准、评级体系与监管框架方面的进展，以及将信用用途从“抵消”转向为减缓行动做“额外贡献”的理念转变，正在逐步提升碳信用市场的整体诚信水平。

碳信用市场允许参与者通过资助减缓气候变化的活动（如森林管理或部署可再生能源）来获取信用额度。这些信用在不同场景下交易：在自愿市场中，企业购买信用以“抵消”自身排放；在强制合规市场中，企业为满足法律要求而交易；此外还有根据《联合国气候变化框架公约》规则进行的国家间减排量转让机制。2024年，近2.5亿个已使用并退出流通的碳信用中，约76%来自自愿碳市场。受政府和企业脱碳政策驱动，碳信用发行量从2020年的约2亿激增至2021年的3.5亿，但到2024年又回落至2.9亿。这一回落趋势折射出市场对信用质量的担忧日益加剧，以及对碳信用在自愿气候行动中所起作用的疑虑不断上升。碳信用在产生、验证和销售环节的系统性缺陷表明，它并非削减化石燃料排放的可靠替代品。然而，各方仍在努力强化验证标准、提高透明度并建立新机制，以通过改善治理来增强信用的完整性与可信度。

碳信用市场在供应侧面临突出的质量挑战。现有标准和方法学一直未能有效保证碳信用对缓解气候变化的实际贡献：对近10亿吨碳信用（约占已发行总量的五分之一）的分析发现，只有不到16%代表了真实的减排量（图9）。项目开发者可能选择有利数据或做出不切实际的假设，而逆向选择、数据过时和方法学不当等问题，都削弱了碳信用的气候效益。许多项目类型，如中国的风力发电和美国的改进森林管理并未显示出统计上显著的额外气候效益；而清洁炉灶和避免毁林项目实现的减排量也往往低于宣称水平（图9）。

关于低质量信用的证据最初多集中于“避免排放”类项目（如森林保护、可再生能源）。然而，新证据表明，包括植树造林和土壤管理在内的“基于自然的碳移除”方法，也普遍存在高估碳封存量和缺乏额外性的问题——这意味着这些项目所实现的碳移除

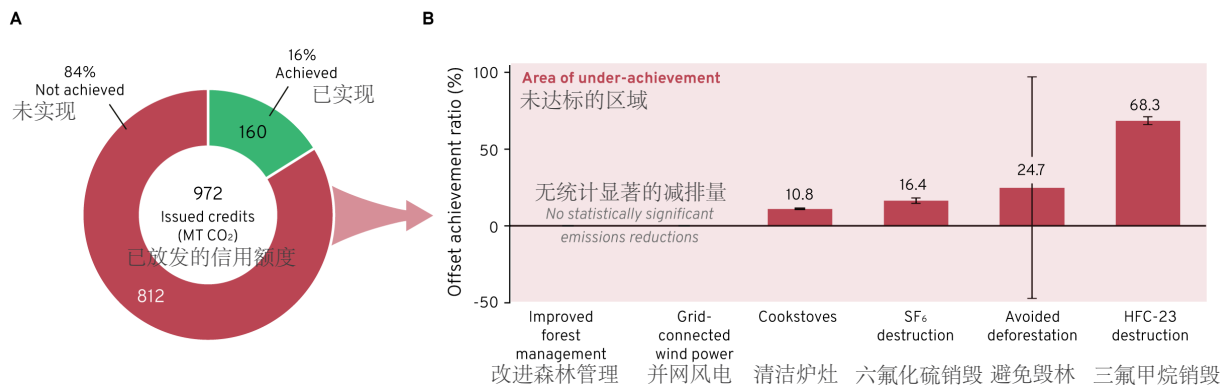


图9.已签发碳信用额的减排实效。图中对比了选定案例研究中实现的减排量（图 A）及其抵消实现率（OAR），即实际可能达到的减排量相对于已签发碳信用数量的比率（图 B）（改编自 Probst 等人，2024 年）。注：HFC-23（三氟甲烷）是生产某常见制冷剂过程中的副产品。

往往并未超出在没有碳信用激励下本就会发生的水平。此外，尽管 IPCC 模型和各国计划中都抱有乐观假设，但陆地碳移除的实际潜力远低于预期。综合这些近期发现可知，基于自然的碳移除既无法成为化石燃料减排的可靠替代方案，也未能解决“避免类”碳信用存在的根本质量问题。

需求侧的市场动态也影响着信用质量。一项针对 2020-2023 年间 20 家最大企业自愿买家的研究发现，多数公司持续依赖低成本、低质量的抵消信用，这些信用存在夸大减排量的风险。由于大部分信用来自十年前甚至更早启动的旧项目，企业的碳抵消支出在很大程度上未能带动新的气候减缓投资。

尽管碳信用常与“净零”或“碳中和”声明关联，但大多数公司并未详细说明其如何在温室气体核算中使用碳补偿。如果企业优先购买碳信用，将资金从内部脱碳和淘汰化石燃料计划中抽离，那么对碳抵消的依赖就可能延缓或削弱脱碳的进程。针对石油巨头净零战略的分析证实了人们对“迟滞效应”的担忧，即碳信用被用于为持续生产和消费常规化石燃料进行辩护。虽然碳信用不会取代大多数公司的内部脱碳努力，但对于航空公司等高排放企业而言，它们可能会挤占本可用于直接减排的大量资金。

碳信用项目一直因过于关注碳中和而受到批

评，导致许多项目未能实现或系统性量化其社会、经济和环境方面的协同效益。一些研究表明，恰当的项目设计可以兼顾减排与社会福利改善，但也有研究指出森林碳项目在成功与公平之间存在内在权衡。许多减排行动的收益不成比例地流向更富裕或对环境破坏更严重的社区，而高昂的前期成本和交易成本也可能将小型项目拒之门外。尽管解决热带地区毁林问题和支持生物多样性等非碳效益亟需资金，但这些挑战凸显了将碳信用作为主要融资手段的局限性。

针对这些问题，碳市场参与者正在多方位响应。例如，“自愿碳市场诚信理事会”（ICVCM）等倡议已建立起治理和质量基准。一些碳信用评级服务机构开始为客户提供项目详情，包括相对质量与协同效益信息。研究表明，对高质量信用的需求正在增长，但其影响尚不确定。为解决需求侧担忧，“科学碳目标倡议”（SBTi）和“自愿碳市场诚信倡议”（VCMi）等标准制定者强调，碳信用不应替代直接的脱碳行动。这进一步支持了正在兴起的共识：碳信用应用于为全球减排做出“额外贡献”，而非直接“抵消”自身排放。理论上，这有助于缓解“迟滞效应”的担忧。

部分政府也开始通过法规和指南做出回应。例如，在现已推迟实施的欧盟《企业可持续发展报告指令》（Toms 等人，2025 年）框

架下，大型公司将被要求阐明其所用碳信用的质量，并说明其在脱碳战略中的作用。2024年，美国联邦政府也发表了支持类似原则的声明（尽管此后政府已更迭）。其他地区也有类似努力。然而，真正的考验还在后面：根据《巴黎协定》第六条，决策者

正在制定国际碳信用标准，这有望为所有碳市场设定质量基准。密切关注现有标准尚未解决的质量挑战，将有助于确保未来体系避免重蹈覆辙，从而使碳市场能加速而非削弱气候行动。

政策启示

- 由健全诚信框架支撑的碳信用市场可以助力减排，但碳信用必须被视为对减排的额外贡献，而非企业内部脱碳与淘汰化石燃料的替代品。
- 为提高自愿碳市场的可信度、透明度与影响力，各行业应广泛采纳ICVCM和VCMI等机构制定的高诚信标准。为使企业气候行动保持一致，标准制定者需就如何将碳信用纳入欧盟CSRD及气候相关财务信息披露工作组（TCFD）框架等报告要求达成共识，以确保额外性、采用恰当的基准方法并避免重复计算。
- 各方应以《巴黎协定》第六条第4款机制（于COP29通过的巴黎协定核证机制）框架为基础，致力于建立全球统一的碳信用质量评估标准。该机制的监督机构将继续审批用于评估额外性、保障可持续发展及量化减排量的可靠方法学。同时，各方应为第六条之外的补充方法（如部门减排协议、产业政策、技术转让）保留谈判空间，这些方法可能对碳核算面临固有挑战的部门更为有效。
- 应更加重视并利用全球盘点这一机制，以增强国家及非国家行为体气候行动的透明度与问责制。这可建立在COP29相关进展的基础上，例如英国宣布新的自愿碳市场原则、国际证监会组织（IOSCO）发布关于提升自愿碳市场金融诚信的指南，以及东盟共同碳信用框架的启动。

10 政策组合在推动减排方面优于单一政策措施

关键信息

精心设计的政策组合往往比单一措施效果更佳，能实现更大的减排量。不同政策工具之间会产生相互作用，可能带来协同增效，也可能出现相互抵消，因此必须统筹考量政策的重叠与反弹效应。

政策组合能够同时应对多种市场失灵，提升政策整体力度与可信度，从而有效引导消费者和投资者的预期。

包含碳定价或削减化石燃料补贴的政策组合，通常比单纯依赖非价格型工具的组合实现更大的减排。即使适度的碳价也能显著提高整个政策组合的成本效益。

有效的政策组合因行业和国家背景（包括经济发展阶段）而异，必须针对特定的目标群体、技术条件和机构能力进行量身定制。

全球各地采用了多样化的气候政策以减排温室气体。传统经济理论主张“一种市场失对应一种政策工具”：对气候损害征收碳价，为知识外溢提供研发资助，并为锁定效应和网络外部性提供针对性激励。然而，鲜有辖区实施接近于碳社会成本的明确碳价，更不用说采用协调一致的政策组合来解决所有市场失灵了。现实中复杂的政策工具箱是在多年、多届政府及不同层级辖区的渐进过程中形成的，往往导致协调不足与政策重叠。

政策间的相互作用会改变其总体效果，可能大于或小于各政策独立效果之和。例如，在法国，对住宅供暖的模拟表明，禁止燃气锅炉与补贴计划相结合，既能增加实现碳中和

的可能性，又可降低整体系统成本并缓解分配不公问题。政策的互补性可能源于空间、时间或功能关联，但单一政策的作用范围有限且易产生反弹效应，往往需要定价类工具等其他措施配合才能实现目标。此外，政策组合能应对多种失灵、增强政策整体严格性与可信度，从而塑造市场预期。确定哪些工具组合能最有效促进深度减排，哪些会与其他政策目标产生权衡，已成为气候政策研究快速发展的前沿领域。

一项对过去二十年间41个国家实施的1500项气候政策的系统评估发现，实现零碳路径上的显著减排是可能的，但亟需扩大规模。该研究识别出63项成功的大规模减排措施，平均减排19%，总计减排6至18亿吨二氧化碳。

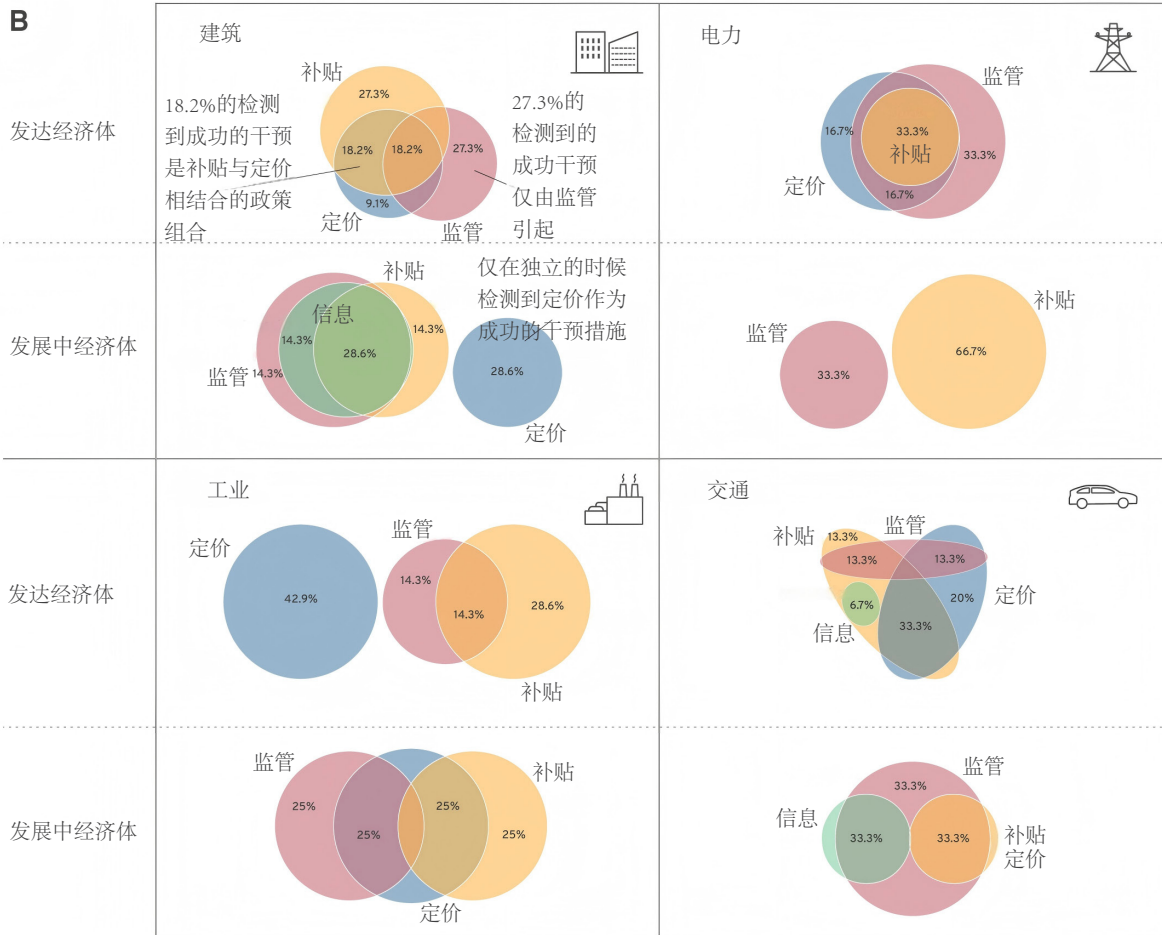
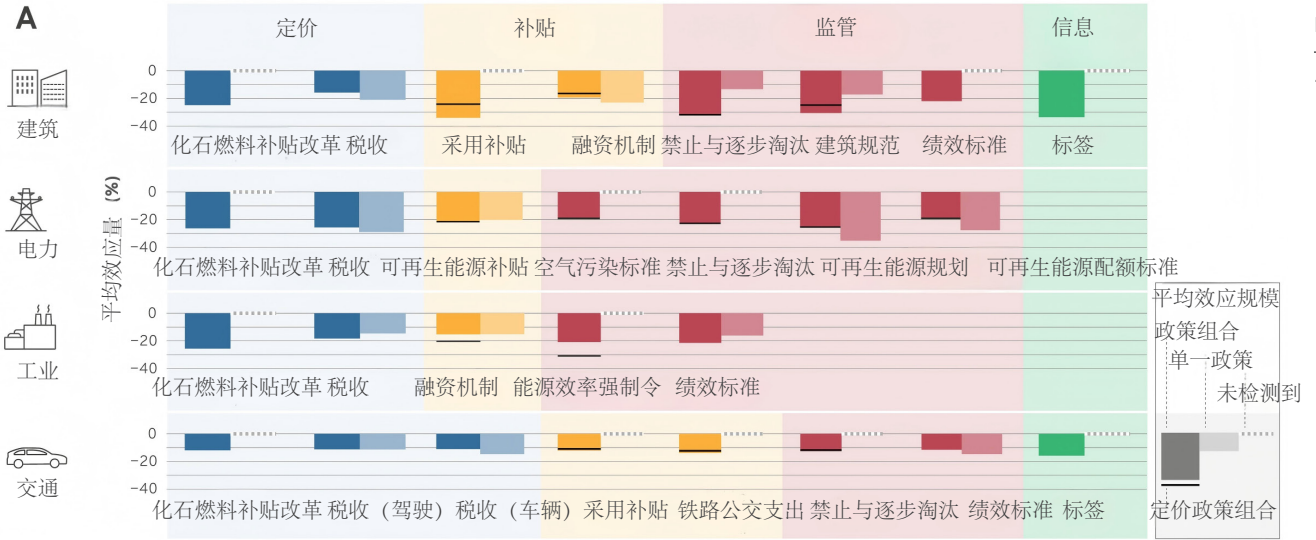


图10.单独政策与政策组合的有效性比较：若某项政策工具单独实施成功与在政策组合中实施成功时平均减排量的对比（图 A）。对于非价格型政策，黑色粗线表示包含价格工具的组合的平均效果大小。政策组合通常比单独实施产生更大的减排效果。价格工具（税收或减少化石燃料补贴）与受欢迎的补贴计划以及诸如禁令、建筑规范和能效指令等监管工具共同构成成功的组合。政策组合的有效性因部门、国家背景和经济发展阶段而异（图 B）。每个圆圈的面积表示该部门成功干预措施中特定单独政策类型或特定政策类型组合所占的比例（改编自 Stechemesser 等人 2024 年）。

这些成功案例构成了可供借鉴的集体证据库，可通过[Climate Policy Explorer](#)进行查阅。研究表明，精心设计的政策组合通常比单一工具表现更优（图10A）。许多受欢迎的工具，如禁令、建筑规范、能效指令和补贴，要么需与其他政策结合才能实现更大减排，要么单独使用时影响有限。包含碳定价或削减化石燃料补贴的组合，通常比仅依赖非价格工具的组合减排更多（图10A，黑色条形）。税收是唯一作为单一工具即能带来大规模减排的措施。

有效的政策组合因行业、国家背景及发展阶段而异（图10B），必须针对目标行为体、技术特征和机构能力进行定制，并在实施中不断学习与调整。强大的治理结构、数据收集、透明度、监测体系及持续评估，是确保政策长期有效并能适应变化条件的关键。当气候政策跨多个辖区和层级实施时，还会面临额外挑战。

尽管不存在放之四海而皆准的“万能”政策组合，但关于常用工具相互作用效果的证据正在积累，为决策者提供了关键洞见。迪曼切夫和克尼特尔（2023年）提出了一个评估政策相互作用与权衡的框架，并证明即使很低的碳价，若与绩效标准结合，也能显著提升政策组合的成本效益。这种关系是非线性的，随着对定价依赖增加，边际收益会递减。定价的重要性得到了现实排放轨迹的支持：近期研究发现，发达国家成功实现大规模减排，有赖于税收与价格激励措施的整合。尽管碳定价常遇政治阻力，但绩效标准因获得更广泛支持且更具政策持久性而得以推广。要平衡多目标间的权衡并发挥不同工具优势，离不开精心设计的政策组合。

政策工具的类型与设计从根本上决定其与其他工具的互动方式。当新增政策与固定数量型工具（如排放总量上限）重叠时，可能无法产生额外减排，因为允许排放的总量未变。因此，此类工具需纳入动态调整机制以响应市场变化。例如，欧盟排放交易体系的市场稳定储备机制，能在其他政策降低需求时自动减少配额供应，从而抵消潜在影响。若不考虑这些相

互作用，新增政策甚至可能因排放转移至未受监管的来源而增加总排放。与之不同，固定价格型工具（如碳税）提供的价格激励不会因政策重叠而改变，从而持续提供减排动力。在日益复杂的政策环境中，决策者必须考量政策间的相互作用与综合效应，以推动产生积极协同效应的组合，避免负面抵消效应。利用现实世界的证据，为我们从那些已引发排放轨迹结构性转变的实践中学习提供了宝贵机会。

最后，气候政策组合很少仅追求单一减排目标。它们通常旨在或逐渐兼顾成本效益、分配公平、促进创新、保障能源安全及政治可行性等多个目标。政策接受度是关键因素，政策推出的先后顺序也起作用。近期证据表明，公众对既有政策效益的感知，与对后续更高碳价的支持度呈正相关。需要进一步研究以扩展关于多目标、跨时期的政策组合及其相互作用的知识。因此，设计有效组合需要理解特定行业的政策互动、妥善管理权衡取舍，并根据辖区实际需求调整工具——这既是一个缩小排放差距的关键机遇，也是填补政策有效性知识空白的重要途径。

政策启示

- 在《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）及国家层面的气候行动报告框架中，应明确纳入并评估各项政策与措施之间的相互作用，超越对孤立政策的追踪，转向更系统、更综合的评估方法——这一关键缺口已为政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告所指出。为确保政策组合产生预期协同效应并避免意外的抵消或负面权衡，必须在政策设计之初就嵌入系统性、持续性的政策评估机制。
- 各方可参考制定统一的报告指南，明确量化政策影响的核心指标与应提供的背景信息。采用统一的基准年和报告周期，将显著增强各国政策效果的可比性，促进UNFCCC框架下的同行学习，并使政策设计本身更具效力和针对性。标准化数据已被证明有助于精准识别真正驱动减排的政策变化。
- 在政策选择上，各国政府应优先采用具有已知协同效应的政策组合。例如，将禁令与补贴相结合，或将碳定价与行业性能标准相结合，这些组合已被证实能比单一措施实现更大幅度 and 更持久的减排。
- 在国家治理层面，气候目标的设定与落实亟需强化跨部门协调。气候政策不应局限于单一机构或部门，而必须考量其对经济、社会、环境的多重溢出效应以及除减排外的协同效益（如改善公共健康、促进社会公平）。反过来，有效的跨部门同步协调也将催生更显著的整体减排成效。因此，政策评估标准也应超越单一的减排指标，全面涵盖健康、公平、社会福祉等多维成果。
- 在拥有大量有效政策工具信息的背景下，需投入更多关注以确保政策组合的政治可行性与公正性。这包括深入分析决策障碍、公众舆论、分配效应以及公平正义考量，以确保雄心勃勃的政策组合得以成功落地实施。像 [Climate Policy Explorer](#) 这类工具，能提供不同政策如何驱动减排的实证见解，其所汇聚的国际经验与教训，可为各国决策者提供宝贵参考。
- 任何政策组合都必须根据本国的关键行为体、技术储备与机构能力进行量身定制，并通过强有力的治理体系、透明的监测机制和迭代的学习反馈系统来实施，以确保其长期适应性与有效性。

缩写

BECCS – Bioenergy with Carbon Capture and Storage 生物质能碳捕集与封存技术

CBD – Convention on Biological Diversity 《生物多样性公约》

CDR – Carbon Dioxide Reduction 二氧化碳减排

CH₄ – Methane 甲烷

CO₂ – Carbon Dioxide 二氧化碳

COP – Conference of the Parties 缔约国会议

C1 – Category 1 scenarios: no or limited overshoot of 1.5°C by 2100 (with >50% chance), as defined by the IPCC AR6 到2100年全球升温不超过1.5摄氏度或仅小幅超出(可能性大于50%)，依据IPCC AR6的定义

C3 – Category 3 scenarios: to limit peak warming to below 2°C by 2100 (with a >66% chance), as defined by the IPCC AR6 根据IPCC AR6的定义，到2100年将升温峰值控制在2°C以下(可能性大于66%)

DACCS – Direct Air Carbon Capture and Storage 直接空气碳捕获和储存

EEl – Earth's energy imbalance 地球能量收支

GDP – Gross Domestic Product 国内生产总值

GGA – Global Goal for Adaptation 全球适应目标

GRACE – Gravity Recovery and Climate Experiment 重力恢复与气候实验

GST – Global Stocktake 全球盘点

GtC – Gigatonnes of Carbon 十亿公吨碳

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change 政府间气候变化专门委员会

KMGBF – Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework 昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架

LT-LEDS – Long-Term Low-Emission Development Strategies 长期低排放发展战略

MHW – Marine Heatwaves 海洋热浪

MWP – Mitigation Work Programme 减缓工作方案

NAP – National Adaptation Plan 国家适应计划

NDC – Nationally Determined Contributions 国家自主贡献

NCQG – New Collective Quantified Goal 新集体量化目标

N₂O – Nitrous Oxide 一氧化二氮

RCP – Representative Concentration Pathway 代表性浓度路径

SSP – Shared Socioeconomic Pathway 共享社会经济路径

UNCCD – United Nations Convention to Combat Desertification 联合国防治荒漠化公约

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change 联合国气候变化框架公约

VCM – Voluntary Carbon Markets 自愿碳市场

WHO – World Health Organization 世界卫生组织

WMO – World Meteorological Organization 世界气象组织

主要参考文献

如需查看每条见解的完整参考文献列表，请参阅 Ospina 等人（正在审核）《气候科学2025年十大新见解》 *Global Sustainability*. doi: [10.5281/zenodo.17457864](https://doi.org/10.5281/zenodo.17457864)

见解 1

- Allan, R. P. & Merchant, C. J. Reconciling Earth's growing energy imbalance with ocean warming. *Environ. Res. Lett.* **20**, 044002 (2025).
- Forster, P. M. *et al.* Indicators of Global Climate Change 2023: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth Syst. Sci. Data* **16**, 2625–2658 (2024).
- Goessling, H. F., Rackow, T. & Jung, T. Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science* **387**, 68–73 (2025).
- Hodnebrog, Ø. *et al.* Recent reductions in aerosol emissions have increased Earth's energy imbalance. *Commun. Earth Environ* **5**, 1–9 (2024).
- Min, S.-K. Human influence can explain the widespread exceptional warmth in 2023. *Commun. Earth Environ.* **5**, 1–4 (2024).
- Myhre, G., Hodnebrog, Ø., Loeb, N. & Forster, P. M. Observed trend in Earth energy imbalance may provide a constraint for low climate sensitivity models. *Science* **388**, 1210–1213 (2025).

见解 2

- Capotondi, A. *et al.* A global overview of marine heatwaves in a changing climate. *Commun. Earth Environ.* **5**, 1–17 (2024).
- Cheng, L. *et al.* Record high temperatures in the ocean in 2024. *Adv. Atmos. Sci.* 1–18 (2025) doi:10.1007/s00376-025-4541-3.
- Lee, C., Song, H., Choi, Y., Cho, A. & Marshall, J. Observed multi-decadal increase in the surface ocean's thermal inertia. *Nat. Clim. Chang.* **15**, 1–7 (2025).
- Merchant, C. J., Allan, R. P. & Embury, O. Quantifying the acceleration of multidecadal global sea surface warming driven by Earth's energy imbalance. *Environ. Res. Lett.* **20**, 024037 (2025).
- Terhaar, J., Burger, F. A., Vogt, L., Frölicher, T. L. & Stocker, T. F. Record sea surface temperature jump in 2023–2024 unlikely but not unexpected. *Nature* **639**, 1–5 (2025).

见解 3

- Burton, C. A. *et al.* Fire weakens land carbon sinks before 1.5 °C. *Nat. Geosci.* **17**, 1108–1114 (2024).
- Friedlingstein, P. *et al.* Global carbon budget 2024. *Earth Syst. Sci. Data* **17**, 965–1039 (2025).
- Ke, P. *et al.* Low latency carbon budget analysis reveals a large decline of the land carbon sink in 2023. *Natl. Sci. Rev.* **11**, nwae367 (2024).
- Li, X. *et al.* Large live biomass carbon losses from droughts in the northern temperate ecosystems during 2016–2022. *Nat. Commun.* **16**, 4980 (2025).
- Ramage, J. *et al.* The net GHG balance and budget of the permafrost region (2000–2020) from ecosystem flux upscaling. *Global Biogeochem. Cycles* **38**, e2023GB007953 (2024).

见解 4

- Brodie, J. F. *et al.* Defaunation impacts on the carbon balance of tropical forests. *Conserv. Biol.* **39**, e14414 (2025).
- Domeignoz-Horta, L. A. *et al.* Plant diversity drives positive microbial associations in the rhizosphere enhancing carbon use efficiency in agricultural soils. *Nat. Commun.* **15**, 8065 (2024).
- Pfenning-Butterworth, A. *et al.* Interconnecting global threats: climate change, biodiversity loss, and infectious diseases. *Lancet Planet. Health* **8**, e270–e283 (2024).
- Weiskopf, S. R. *et al.* Biodiversity loss reduces global terrestrial carbon storage. *Nat. Commun.* **15**, 4354 (2024).

见解 5

- Ao, Z. *et al.* A national-scale assessment of land subsidence in China's major cities. *Science* **384**, 301–306 (2024).
- Bhattarai, N. *et al.* Warming temperatures exacerbate groundwater depletion rates in India. *Sci. Adv.* **9**, eadi1401 (2023).
- Jasechko, S. *et al.* Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature* **625**, 715–721 (2024).
- Kuang, X. *et al.* The changing nature of groundwater in the global water cycle. *Science* **383**, eadf0630 (2024).

见解 6

- Barcellos, C., Matos, V. P., Lana, R. & Lowe, R. Climate change, thermal anomalies, and the recent progression of dengue in Brazil. *Sci. Rep.* **14**, (2024).
- Childs, M. L., Lyberger, K., Harris, M., Burke, M., & Mordecai, E. A. (2024). Climate warming is expanding dengue burden in the Americas and Asia. [pre-print in medRxiv]
- Farooq, Z. *et al.* Impact of climate and *Aedes albopictus* establishment on dengue and chikungunya outbreaks in Europe: a time-to-event analysis. *Lancet Planet. Health* **9**, e374–e383 (2025).
- Feng, F. *et al.* Temperature-driven dengue transmission in a changing climate: Patterns, trends, and future projections. *GeoHealth* **8**, e2024GH001059 (2024).
- de Souza, W. M. & Weaver, S. C. Effects of climate change and human activities on vector-borne diseases. *Nat. Rev. Microbiol.* **22**, 476–491 (2024).

见解 7

- Dasgupta, S. *et al.* Heat stress and the labour force. *Nat. Rev. Earth Environ.* **5**, 859–872 (2024).
- Li, M. *et al.* Inequitable distribution of risks associated with occupational heat exposure driven by trade. *Nat. Commun.* **16**, 537 (2025).
- Morris, J. *et al.* Reconciling widely varying estimates of the global economic impacts from climate change. *Nat. Clim. Chang.* **15**, 124–127 (2025).

Neal, T., Newell, B. R. & Pitman, A. Reconsidering the macroeconomic damage of severe warming. *Environ. Res. Lett.* **20**, 044029 (2025).

Sun, Y. *et al.* Global supply chains amplify economic costs of future extreme heat risk. *Nature* **627**, 797–804 (2024).

见解 8

Deprez, A. *et al.* Sustainability limits needed for CO₂ removal. *Science* **383**, 484–486 (2024).

Ganti, G. *et al.* Evaluating the near- and long-term role of carbon dioxide removal in meeting global climate objectives. *Commun. Earth Environ.* **5**, 1–7 (2024).

Lamb, W. F. *et al.* The carbon dioxide removal gap. *Nat. Clim. Chang.* **14**, 644–651 (2024).

Schleussner, C.-F. *et al.* Overconfidence in climate overshoot. *Nature* **634**, 366–373 (2024).

Shindell, D. & Rogelj, J. Preserving carbon dioxide removal to serve critical needs. *Nat. Clim. Chang.* **15**, 1–6 (2025).

见解 9

Naef, A., Friggens, N. L. & Njeukam, P. Carbon offsetting of fossil fuel emissions through afforestation is limited by financial viability and spatial requirements. *Commun. Earth Environ.* **6**, 1–11 (2025).

Probst, B. S. *et al.* Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects. *Nat. Commun.* **15**, 9562 (2024).

Trencher, G., Nick, S., Carlson, J. & Johnson, M. Demand for low-quality offsets by major companies undermines climate integrity of the voluntary carbon market. *Nat. Commun.* **15**, 6863 (2024).

见解 10

Cocker, F. G. Mixes of Policy Instruments for the Full Decarbonisation of Energy Systems: A Review. *Energies* **18**, 148 (2025).

Dimanchev, E. & Knittel, C. R. Designing climate policy mixes: Analytical and energy system modeling approaches. *Energy Econ.* **122**, 106697 (2023).

Scott, W. A. Cost, innovation, and emissions leakage from overlapping climate policy. *Energy Econ.* **139**, 107949 (2024).

Stechemesser, A. *et al.* Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades. *Science* **385**, 884–892 (2024).

致谢

本报告的编制工作由未来地球组织、地球联盟和世界气候研究计划牵头完成。

我们感谢以下人员在其各自职责范围内所做出的贡献：

编委会名单

Ana Bastos – Leipzig University, Germany
Wendy Broadgate – Future Earth Secretariat, Sweden
Mercedes Bustamante – University of Brasilia, Brazil
Deliang Chen – Tsinghua University, China
Peter Cox – University of Exeter, United Kingdom
Kristie L. Ebi – University of Washington, United States
Pierre Friedlingstein – University of Exeter, United Kingdom
Sabine Fuss – Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany; Humboldt-University of Berlin, Germany
Nicolas Gruber – ETH Zurich, Switzerland
Marina Hirota – Federal University of Santa Catarina, Brazil
Sirkku Juhola – University of Helsinki, Finland
Fumiko Kasuga – Future Earth Secretariat, Japan
Şiir Kılıç – Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK), Türkiye
Shih-Yu Lee – Academia Sinica, China
Åsa Persson – Stockholm Environment Institute, Sweden; Linköping University, Sweden
Hans-Otto Pörtner – Alfred Wegner Institute, Germany
Johan Rockström – Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany; University of Potsdam, Germany
Regina R. Rodrigues – Federal University of Santa Catarina, Brazil
Roberto Sanchez-Rodriguez – El Colegio de la Frontera Norte, Mexico
Peter Schlosser – Arizona State University, United States
Youba Sokona – African Climate Policy Centre, Mali
Thomas Stocker – University of Bern, Switzerland
Djiby Thiam – University of Cape Town, South Africa

编辑协调员

Paula Mirazo – Arizona State University, United States
 Daniel Ospina – Future Earth Secretariat, Sweden

章节作者

INSIGHT 1

Richard P. Allan – University of Reading, United Kingdom
Helge F. Goessling – Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Germany
Øivind Hodnebrog – CICERO Center for International Climate Research, Norway
Insight Coordinator
Maria A. Martin – Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany

INSIGHT 2**Yeonju Choi** – Yonsei University, South Korea**Thomas L. Frölicher** – University of Bern, Switzerland**Qinyou He** – Chinese Academy of Sciences, China**Christopher J. Merchant** – University of Reading, United Kingdom**Kathryn E. Smith** – Marine Biological Association of the United Kingdom, United Kingdom*Insight Coordinator***Sophie Hebden** – Future Earth Secretariat, Sweden; European Space Agency, United Kingdom**INSIGHT 3****Gustaf Hugelius** – Stockholm University, Sweden**Piyu Ke** – Tsinghua University, China; University of Exeter, United Kingdom**Douglas I. Kelley** – UK Centre for Ecology & Hydrology, United Kingdom**Justine Ramage** – Stockholm University, Sweden**Sophie Ruehr** – University of California Berkeley, United States**Anna-Maria Virkkala** – Woodwell Climate Research Center, United States*Insight Coordinator***Lila Warszawski** – Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany**INSIGHT 4****Luiz A. Domeignoz-Horta** – French Institute for Agricultural Research, France**Guilherme G. Mazzochini** – Federal University of Rio de Janeiro, Brazil**Akira S. Mori** – The University of Tokyo, Japan**Estelle Razanatsoa** – University of Cape Town, South Africa**Sarah R. Weiskopf** – United States Geological Survey National Climate Adaptation Science Center, United States*Insight Coordinator***Adrian Heilemann** – Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany**INSIGHT 5****Nishan Bhattarai** – University of Oklahoma, United States**Junguo Liu** – North China University of Water Resources and Electric Power, China**Hansjörg Seybold** – ETH Zurich, Switzerland; Austrian Academy of Sciences, Austria; Tsinghua University, China*Insight Coordinator***Smriti Basnett** – Future Earth South Asia Hub, India; Divecha Centre for Climate Change, India; Sikkim Commission on Glacier Hazards, Department of Science and Technology, India**INSIGHT 6****Nadja Hedrich** – University of Zurich, Switzerland**Sadie J. Ryan** – University of Florida, United States**Jan C. Semenza** – Umeå University, Sweden*Insight Coordinator***Giles B. Sioen** – Sustainable Society Design Center, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Japan; Future Earth Secretariat, Japan**INSIGHT 7****Maximilian Kotz** – Barcelona Supercomputing Centre, Spain; Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany**Jennifer Morris** – Massachusetts Institute of Technology, United States**Shupeng Zhu** – Zhejiang University, China*Insight Coordinator***Aaron Redman** – Arizona State University, United States**INSIGHT 8****William F. Lamb** – Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany; University of Leeds, United Kingdom**Cara N. Maesano** – Rocky Mountain Institute, United States

Carl-Friederich Schleussner - International Institute for Applied Systems Analysis, Austria
Drew T. Shindell - Duke University, United States

Insight Coordinator

Henry C. Wu - Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Hereon, Germany

INSIGHT 9

Derik J. Broekhoff - Stockholm Environment Institute, Sweden

Santiago Izquierdo-Tort - The University of British Columbia, Canada

Benedict S. Probst - Max Planck Institute for Innovation and Competition, Germany; ETH Zurich, Switzerland;
University of Cambridge, United Kingdom

Gregory P. Trencher - Kyoto University, Japan

Insight Coordinator

Nilushi Kumarasinghe - Future Earth Secretariat, Canada; Sustainability in the Digital Age, Canada

INSIGHT 10

William A. Scott - Simon Fraser University, Canada

Annika H. Stechemesser - Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany

Insight Coordinator

Sophie H.L. Su - Future Earth Secretariat, China

POLICY REVIEWERS

Roberta Boscolo - World Meteorological Organization, Switzerland

Alexandra Buylova - The Swedish Institute of International Affairs, Sweden

Jamie Cummings - Woodwell Climate Research Center, United States

Axel Eriksson - Youth Negotiators Academy, Germany; Stockholm Resilience Centre, Sweden

Damon Matthews - Concordia University, Canada



CUSTODIAN ORGANISATIONS



MEMBERS



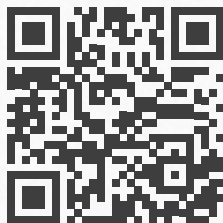
SPONSORS







10 | NEW INSIGHTS IN
CLIMATE SCIENCE



10insightsclimate.science