

通向零碳世界之路

Detlef van Vuuren^{1,2*}, Jan C. Minx^{3,4,5}, Joyashree Roy⁶, William F. Lamb^{3,4,5} 和 Kaj-Ivar van der Wijst²

¹荷兰环境评估局, 全球可持续发展部 (荷兰, 海牙)

²乌得勒支大学, 哥白尼可持续发展研究所 (荷兰, 乌得勒支)

³墨卡托全球公域与气候变化研究所 (德国, 柏林)

⁴利兹大学 (英国, 利兹)

⁵波茨坦气候影响研究所 (德国, 波茨坦)

⁶亚洲理工学院, SMARTS 中心 (泰国, 曼谷)

少年审稿人



ALEX

年龄: 14



CALEB

年龄: 11



ESTHER

年龄: 14



MARCUS

年龄: 14



MOMO

年龄: 12

人类需要快速削减二氧化碳排放, 以遏制全球变暖并防范危险的气候变化。目前各国已实施的政策还远远不够。好在我们还有很多办法: 首先, 通过使用高效节能技术并转变生活方式来降低能耗; 其次, 使用太阳能、风能和水能等零碳能源; 再次, 投资开发直接从大气中捕获二氧化碳的技术; 最后, 在全球范围内推进森林植被恢复。科研人员构建了融合各种技术、能源与生活方式解决方案的多元未来"情景"模型。这些情景是可以实现的, 但我们必须立即行动, 即使面临艰难抉择, 也需坚定不移地削减二氧化碳排放。

全球减排势在必行

为了发电、供暖及驾驶车辆而燃烧煤炭、石油和天然气等人类活动 (图 1A) 正导致全球气候持续变暖。在 2015 年的《巴黎协定》中, 各国承诺将以工业革命 (即人类开始大规模使用化石燃料的时期) 前的水平

《巴黎协定》 (Paris Agreement)

2015年12月在法国巴黎通过的国际条约, 缔约国承诺共同努力, 将全球变暖幅度控制在比工业化前水平高 2°C 以内, 并力争限制在 1.5°C , 以减缓气候变化。

图 1

(A) 温室气体排放主要源自工业、住宅及交通运输领域的化石燃料燃烧, 发电, 森林砍伐以及其他农业相关活动。(B) 根据现行政策与发展趋势, 排放量将维持现有水平, 而实现《巴黎协定》目标需要大幅减排。(C) 这意味着升温预测值将突破《巴黎协定》设定的“远低于 2°C ”。图示依据 IPCC 报告 [1, 2] 绘制。

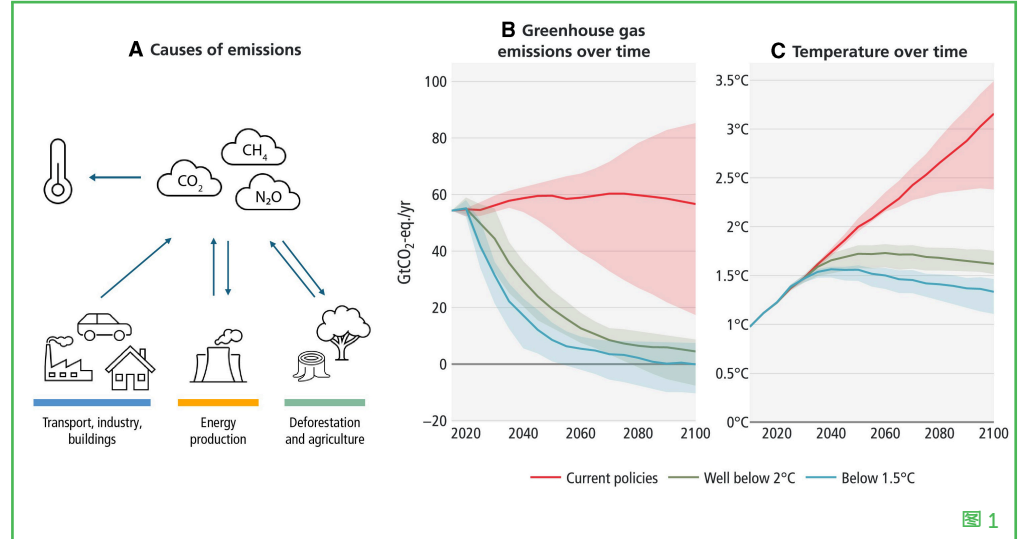


图 1

为遏制全球变暖, 最关键的举措是停止向大气中排放二氧化碳 (主要温室气体) 以及甲烷 (CH_4)、氧化亚氮 (N_2O) 等其他温室气体。二氧化碳累计排放量与全球升温幅度存在直接关联。基于此, 气候科学家提出了“碳预算余额”概念, 即全球变暖幅度超标前的二氧化碳排放量上限。为将升温幅度控制在 1.5°C 以内, 从现在开始, 全球最多只能再排放约 2500 亿吨二氧化碳, 同时还需削减其他温室气体排放。这 2500 亿吨仅相当于 2023 年全年排放量的 6 倍左右 [1]。要实现 1.5°C 目标, 现在就要大幅减排, 并在 2050 年前后实现净零排放 (图 1B); 而要实现 2°C 目标, 则需在 2070 年前后达成净零排放 [1]。这些年份看似遥远, 实际上要求我们现在立即行动起来。显然, 1.5°C 目标比 2°C 目标要难得多, 但若能够实现, 气候变化造成的损害将显著减轻。

目前, 部分国家已开始减排, 但其他国家的排放量仍在增长。总的来说, 全球温室气体排放持续上升。从各国现行措施和政策来看, 本世纪末全球升温幅度可能达到 2.5°C – 3.5°C , 给地球上的所有生命带来负面后果 (图 1C) [1–4]。

二氧化碳排放主要源自化石燃料燃烧与森林砍伐。实现净零排放绝非易事, 因为化石燃料已渗透于社会各个领域, 包括家庭供暖锅炉、煤燃气发电厂、汽车飞机使用的燃油等。我们究竟能以多快的速度淘汰这些技术并转向新技术? 遏制全球变暖需要哪些核心变革? 这正是本文要探讨的主题。

碳预算 (Carbon Budget)

在特定温控目标下, 全球还可向大气中排放的二氧化碳总量。

排放 (Emissions)

人类活动 (如燃烧化石燃料) 向大气中释放温室气体的过程。

净零排放 (Net Zero Emissions)

平衡大气中温室气体的排放量与清除量, 不再加剧气候变化。

计算机模型 (Computer Models)

模拟能源使用与生产、农业、自然生态、气候系统等决定未来气候变化的因素及海平面上升等可能后果的计算机程序,用于探索未来气候变化的可能情景或路径。

情景 (Scenarios)

基于一系列连贯假设(如人口增长、技术发展)构建的未来发展情景,帮助理解不同行动的潜在后果。

生物能源 (Bio-Energy)

通过燃烧木材或作物转化的生物柴油等植物原料产生的能源。

碳捕集与封存 (CO₂ Capture and Storage)

从工业烟气或大气中移除二氧化碳,并将其封存在枯竭天然气田等储库的技术。

实现净零排放

为探索实现净零排放的可行方案,科学家收集可行的技术与社会变革数据,通过**计算机模型**构建**情景**——即在碳预算余额内可供全球选择的行动方案 [5]。接下来,我们将介绍限制温室气体排放的四大关键行动领域。

建筑、交通与工业节能

日常生活中,我们消耗能源为住宅、学校、办公室供暖、制冷、照明,以及满足烹饪等日常需求。工业领域需要能源来制造服装等产品,汽车、轮船和飞机则依赖能源输送货物与乘客。目前,这些能源主要来自化石燃料。我们可通过多种方式降低总能耗:例如加强建筑保温、维持适宜室温(不冷不热)、改用**热泵**等高效供暖系统。到2050年,此类措施共同可减排40%-70%。降低总能耗还能大大提升淘汰化石燃料的速度并降低成本,因为所需的风力发电机、太阳能电池板等可再生能源设施规模将大幅减少。

可再生能源替代化石燃料

过去十年间,风电、光伏等可再生能源成本显著下降,成为零碳排放的优质替代能源。然而,风光发电具有间歇性——日照不足或无风时无法供电,而且部分领域难以电气化,因此需要配套解决方案,包括大容量储能电池、大规模输配电网、以可持续种植作物或树木为原料的**生物能源**等。我们也可结合**碳捕集和封存**技术继续使用化石燃料,或者发展核能。值得注意的是,某些领域的排放仍难以削减。

各行各业全面减排

某些行业的排放尤其难以削减,例如水泥与钢铁生产、长途航空运输及畜牧养殖(科学家称之为"难减排行业")。这些行业为何减排困难?主因在于当前可用的减排技术储备不足。例如,风电和光伏无法为飞机提供动力,因为现有电池太重,储存电量不足以支持长时间飞行。虽然研究人员认为利用可再生能源制备的"绿氢"可用于炼钢炉,但目前绿氢产量有限且成本高昂。还有畜牧业的难题:牛羊在消化过程中产生的甲烷排放,现有技术可以削减一部分,但难以完全消除。

鉴于这些行业的减排难度,我们必须探索替代方案。例如,人们可以改变生活方式,如减少肉类摄入、降低航空出行频率。但科学家认为,要稳定全球气温,我们还需要主动从大气中移除部分二氧化碳,以抵消这些难减排行业的排放。未来我们甚至可能需要清除历史排放的二氧化碳。被捕集的碳可以长期储存于树木、植被、土壤、岩层或地下储库中(可参阅这篇 [Frontiers for Young Minds 文章](#))。

再造林 (Reforestation)

在历史上曾是森林的土地上重新植树造林的行为。

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

由众多科学家组成的国际组织, 负责评估关于气候变化及其影响的科学认知。

路径 (Pathways)

含义等同于“情景”。

图 2

(A) 为将升温幅度控制在 1.5°C 以内, 必须实现多行业协同减排: 包括交通/工业/建筑领域的直接碳排放、能源电力生产的二氧化碳排放、造林与毁林产生的净碳排放, 以及农业和能源生产领域的其他温室气体排放。
(B) 净零排放路径示例。通过再造林等措施从大气中吸收二氧化碳, 可实现负排放。右图展示了三种将升温幅度控制在 1.5°C 以内的情景: 负排放路径 (neg)、低需求路径 (LD) 和可再生能源路径 (ren)。第一个柱状图显示 2019 年排放状况, 第二个柱状图显示现行政策下 2050 年的预期排放 [3]。图示依据 IPCC 报告 [1, 2] 绘制。

停止毁林, 大力造林

砍伐焚烧林木植被会带来巨量碳排放, 而毁林通常是为了拓展农业用地。我们如何解决这一问题? 首先实施护林与再造林工程, 其次以可持续方式提升现有农田生产效率, 在不扩张用地的前提下满足日益增加的粮食需求, 最后减少粮食浪费并转变饮食结构, 特别是在肉类高消费国家推广少油荤饮食, 此举既有益环境, 又有益人类健康。

多种路径的协调整合

情景模拟能帮助我们探索减排的可行方案: 需要多少可再生能源? 如何降低能耗? 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的专家们从海量科学文献的情景研究中提炼出了若干典型路径 [1–4], 称为“示范减缓路径”。这些路径均满足《巴黎协定》目标, 将升温幅度控制在 1.5°C 左右, 但各自蕴含不同风险与影响 (图 2)。

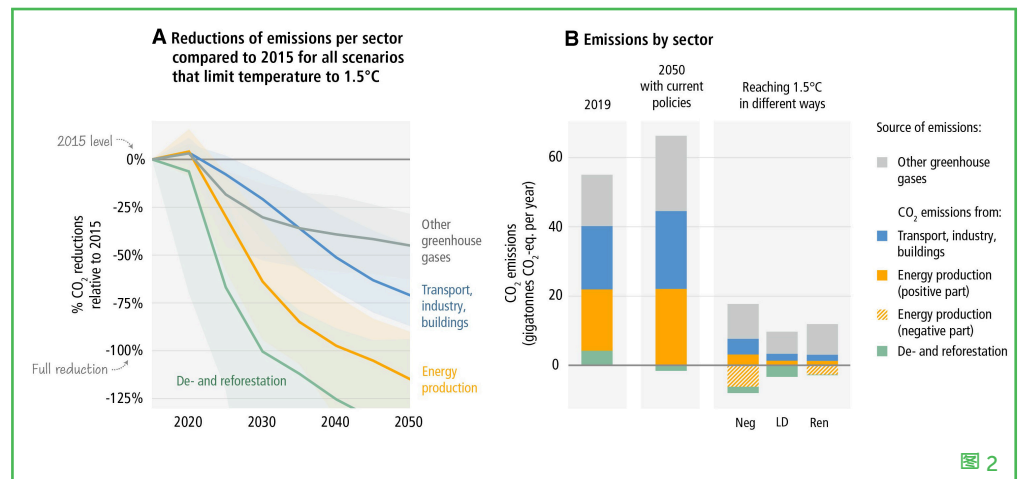


图 2

负排放路径高度依赖碳移除技术, 包括再造林、生物能源结合地下碳封存、直接空气捕碳等。该路径可使我们在当前稍稍放缓过渡速度, 但将碳移除重任转交至后代, 还存在技术失效风险, 而且许多技术需占用土地, 可能挤压农业用地。

低需求路径高度依赖能效提升与生活方式变革, 倡导减少非必要消费、选用耐用产品、降低肉奶摄入、建设紧凑型高效住宅。但其推行速度与社会接受度存在不确定性。

可再生能源路径高度依赖可再生能源, 以储能技术与智能电网为支撑, 推动交通电气化 (电动汽车) 与建筑能源转型 (热泵)。该路径需立即大规模投资于可再生能源基础设施, 虽然会提升特定材料需求, 但同时将削减化石燃料需求。

实现《巴黎协定》气候目标

尽管每一条路径都各有难点,但它们共同证明:实现温控目标具备可行性!这是 IPCC 最新报告的核心结论:我们已掌握实现《巴黎协定》目标的技术与方法。但要实现温控目标,人类社会必须彻底摆脱对化石燃料的依赖,开辟有益地球众生的全新能源路径。

致谢

本研究由欧盟"地平线欧洲"科研计划[协议号 101056873 (ELEVATE 项目)]与"GENIE"项目(协议号 951542)共同资助。

AI 人工智能工具使用声明

本文中所有图表附带的替代文本 (alt text) 均由 Frontiers 出版社在人工智能支持下生成。我们已采取合理措施确保其准确性,包括在可行情况下经由作者审核。如发现任何问题,请随时联系我们。

参考文献

1. IPCC, 2022. "Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change", in *Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds. P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, et al. (Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press). doi: 10.1017/9781009157926
2. IPCC, 2023. "Climate Change 2023: Synthesis Report", in *Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Geneva, Switzerland: IPCC). p. 35–115. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
3. IPCC, 2022. "Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability", in *Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, et al. (Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press). p. 3056. doi: 10.1017/9781009325844
4. IPCC, 2021. "Climate Change 2021: The Physical Science Basis", in *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, et al. (Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press). p. 2391. doi: 10.1017/9781009157896
5. Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., et al. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environ. Change* 42:153–168. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

线上发布: 2025 年 12 月 19 日

编辑: Leila Niamir

科学导师: Stephanie Nebel 和 Karen Holmberg

引用: van Vuuren D, Minx JC, Roy J, Lamb WF 和 van der Wijst K (2025) 通向零碳世界之路. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2024.1395440-zh

英文原文: van Vuuren D, Minx JC, Roy J, Lamb WF and van der Wijst K (2024) Routes to a Carbon-Free World. Front. Young Minds 12:1395440. doi: 10.3389/frym.2024.1395440

利益冲突声明: 作者声明本研究不涉及任何潜在商业或财务关系。

版权 © 2024 © 2025 van Vuuren, Minx, Roy, Lamb 和 van der Wijst. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例, 在注明原作者和版权所有, 及在标明本刊为原始出处的前提下, 允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款, 则不得使用、传播或复制文章内容。

少年审稿人

ALEX, 年龄: 14

Alex 是一名八年级学生, 热爱科学、数学、历史和英语。他喜欢玩电子游戏和《龙与地下城》剧本杀, 还擅长打德州扑克。



CALEB, 年龄: 11

Caleb 喜欢科学、动物、阅读、户外探索、拉小提琴和冰壶运动。长大后梦想成为一名专注生态与动物友好型设计的建筑师。玩过四项体育运动的他始终乐于尝试新事物, 最爱的美食是通心粉奶酪和千层面。他热爱旅行, 尤其向往野生动物保护区。



ESTHER, 年龄: 14

我是 Esther, 今年 14 岁, 课余时间喜欢吹长笛和画画。



MARCUS, 年龄: 14

Marcus 是 STEM 教育的坚定支持者, 目前上八年级。他热衷于研究各类学科, 尤其痴迷生物学和物理学, 同时积极参与模拟法庭、焊接等兴趣活动。





MOMO, 年龄: 12

Momo 喜欢环游世界, 探索新天地, 在家时却自称是标准的"沙发土豆"——这两种特质竟然能在同一个人身上共存! 她最亲密的沙发伴侣是毛茸茸又黏人的爱犬 Lita。

作者



DETLEF VAN VUUREN

Detlef van Vuuren 现任乌得勒支大学教授, 致力于气候政策情景研究, 同时兼任荷兰环境评估局研究员。他曾参与撰写政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第三工作组的减缓气候变化评估报告。*detlef.vanvuuren@pbl.nl



JAN C. MINX

Jan Minx 现任利兹大学客座教授, 专注于气候变化与公共政策研究, 并在墨卡托全球公域与气候变化研究所 (MCC) 任职。



JOYASHREE ROY

Joyashree Roy 博士长期研究发展与气候变化之间的关系, 现任泰国亚洲理工学院特聘教授, 曾任印度加尔各答贾达普大学经济学教授, 同时担任印度社会科学研究委员会国家会士。



WILLIAM F. LAMB

William Lamb 专注于全球排放趋势与气候政策研究, 现任墨卡托全球公域与气候变化研究所 (MCC) 应用可持续性科学工作组副研究员。



KAJ-IVAR VAN DER WIJST

Kaj-Ivar van der Wijst 致力于气候政策的成本与效益研究, 现任哥白尼可持续发展研究所全球建模助理教授。

中文翻译由下列单位提供
Chinese version provided by

