

主动清理: 二氧化碳移除的意义

Sabine Fuss^{1,2*}, Chris D. Jones^{3,4}, Ingrid Schulte¹ 和 Naomi Vaughan⁵

¹墨卡托全球公域与气候变化研究所 (MCC) (德国, 柏林)

²柏林洪堡大学, 地理研究所 (德国, 柏林)

³英国气象局哈德利中心 (英国, 埃克塞特)

⁴布里斯托大学, 地理科学学院 (英国, 布里斯托)

⁵东英吉利大学, 环境科学学院, 丁铎尔气候变化研究中心 (英国, 诺维奇)

少年审稿人



LEAF

年龄: 10



SHANMUKH

年龄: 15

最新的科学研究表明, 要阻止全球变暖, 我们必须在 2050 年前实现“净零”排放。这意味着在 2050 年被排放至大气的二氧化碳 (CO_2) 需要通过从大气中捕获并封存等量 CO_2 来抵消。这种从大气中移除 CO_2 的过程称为“二氧化碳移除 (CDR)”。本文将解释我们为什么需要 CDR, 并介绍多种 CO_2 移除方法及其优缺点。我们能做的有很多, 其中不少措施能带来大量额外效益, 也有一些措施存在局限性, 但总体而言, 二氧化碳移除对于人类成功应对气候变化意义重大。

什么是二氧化碳移除?

众所周知, 由人类活动排放到大气中的二氧化碳 (CO_2) 正在导致气候变化 (更多内容可参阅这篇文章), 我们必须采取行动应对。科学界明确表示, 要阻止全球变暖, 必须在 2050 年前实现“净零”排放 [例如 [1]、[2]]。换言之, 我们必须确保不再向大气中增加 CO_2 。本文将阐述二氧化碳移除 (CDR) 如何成为有效应对措施之一。想象一个正在注水的浴缸:

二氧化碳移除 (CDR)
(Carbon Dioxide Removal (CDR))

人类从大气中移除并封存 CO_2 的行为。

排放 (Emissions)

由人类活动释放到大气中并危害地球的温室气体（如 CO₂）。

图 1

能否守住 1.5°C 的温控目标？浴缸水位代表地球大气中的 CO₂ 含量，水龙头象征人类活动源源不断地产生的 CO₂ 排放。如果 CO₂ 排放过量，水就会从浴缸中溢出。根据科学家预测，如果我们不减排，最快 6 年内就会出现这种情况。CDR 就像“拖把”，可以把溢出的水擦干。我们也可在排放时捕获 CO₂（就像用水桶接水），阻止大气中的 CO₂ 增加。

如果不关闭水龙头，浴缸内的水很快就会溢出来，这正是当前地球大气中 CO₂ 排放的现状（图 1）。如果维持现有排放量不变，距离“水溢出来”只剩不足 6 年时间，这意味着要将全球变暖控制在 1.5°C 以内，我们应当减少 CO₂ 排放量。设定 1.5°C 目标是因为一旦超过这个数字，气候变化造成危害的风险将加剧，人类社会与地球甚至可能遭受不可逆的损害。好在 CDR 技术能从大气中捕获并封存部分 CO₂，就像用拖把擦干溢出来的水。

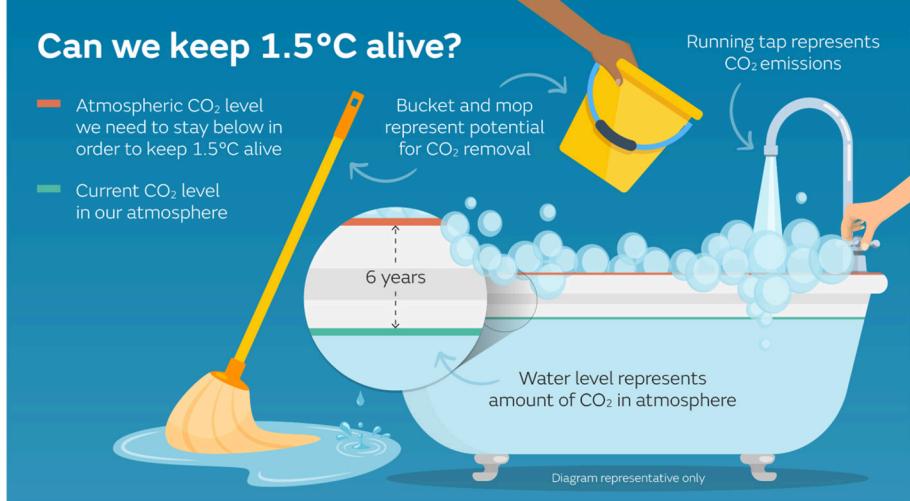


图 1

CDR 主要通过两种方式发挥作用：首先，它能处理难以完全消除的 CO₂ 排放。用浴缸比喻来说，就是当水龙头仍在缓慢流水时，用水桶舀出一些水来阻止水位上升；其次，如果 CO₂ 排放已超标，导致全球升温超过 1.5°C，CDR 可尝试逆转这部分额外升温，相当于擦干从浴缸溢出来的水。

不过，我们还是要优先避免水溢出来。关闭水龙头远比事后清理更有效，如果持续溢水，清理能力终究有限！因此，我们必须优先减排而非过度依赖 CDR。要知道，某些气候变化影响（如物种灭绝）具有不可逆性，即使能控制升温趋势也无法挽回。所以，我们的核心目标应是预防 CO₂ 排放过量，而非事后补救。现在有多种从大气中移除 CO₂ 的方法（图 2），后文将简要介绍其中部分方法。这些方法都各有其优缺点 [3]，如图 3 所示。

植树吸收 CO₂

造林 (Afforestation)

在原本无森林的土地或遭砍伐的林地上种植树木。

最直接的 CDR 方法是造林，就是多种树，利用光合作用移除大气中的 CO₂。该方法存在若干优势：植树无需复杂材料，操作简单方便，成本也远低于其他 CDR 方法。造林还有多重附加效益，例如扩大并连通野生动物栖息地，促进生物多样性，以及降温和净化空气，以改善局部气候。

图 2

CDR 方法包括: (A) 植树吸收 CO₂; (B) 种植吸收 CO₂ 的作物并燃烧发电; (C) 向海洋添加矿物碎末吸收 CO₂; (D) 加速岩石矿物风化; (E) 向土壤添加生物炭; (F) 用过滤器从空气中直接捕获 CO₂ 并掩埋封存。这些方法各具优势, 但也存在劣势, 没有完美解决方案, 我们可能需要组合使用多种方法。

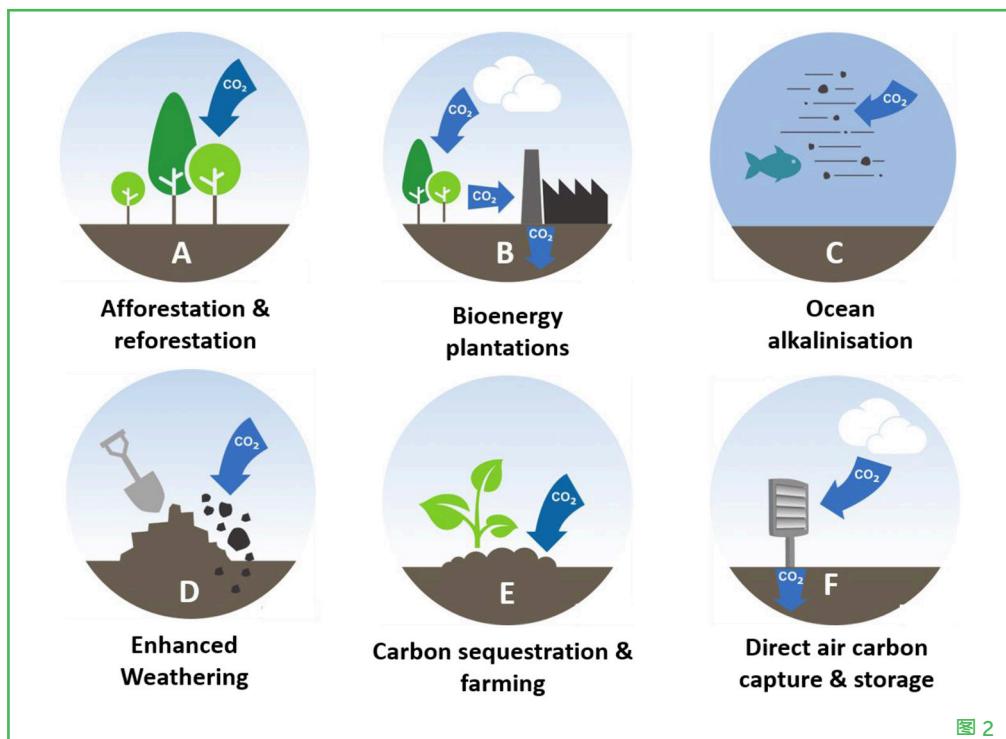


图 2

生物质能碳捕集与封存 (BECCS) (Bioenergy With Carbon Capture and Storage (BECCS))

生物质能指通过燃烧植物 (而非化石燃料) 产生的能量。碳捕集与封存则是在 CO₂ 进入大气前将其捕获并埋存于地下的技术。

除植树外, 我们还可种植能源作物来替代化石燃料发电, 这种方法称为**生物质能碳捕集与封存 (BECCS)**。在这一过程中, CO₂ 被作物吸收并用于发电, 关键是在燃烧作物发电时要捕获 CO₂ 并封存至地下。BECCS 的优势在于既能发电又能永久封存 CO₂, 但目前运输与封存 CO₂ 所需的基础设施尚未完全成熟。如果政府能出台支持政策, 推动这项技术社会化应用, BECCS 将发挥更大效益。

BECCS 也存在一些劣势: 如果实施不当, 可能破坏森林提供的生物多样性、水流量等重要生态要素。森林本来就面临气候变化威胁, 一旦发生野火或树皮甲虫等虫害导致树木死亡, 封存的 CO₂ 又将立刻释放。此外, 大规模实施 BECCS 需占用大量土地, 与全球日益增加的粮食需求和野生动物栖息地保护需求产生冲突。

将碳埋起来

热解 (Pyrolysis)

在无氧条件下加热木材等材料, 使其无法燃烧, 最终产生可长期保存的特种木炭, 埋起来可实现碳封存。

生物炭 (Biochar)

通过无氧燃烧树木和植物生成的一种木炭。

其他基于土地的 CDR 方法包括将碳储存于土壤中: 例如在农田中种植覆盖作物, 或减少翻耕频率。这些方法可提升粮食产量, 让农民受益, 又因成本低廉且无需额外占用土地, 相比造林和 BECCS 更具优势。

在无氧环境中加热生物质 (称为**热解**) 可产生**生物炭**。这种特殊木炭能储存大量 CO₂, 可混入土壤或建材等产品。如果在大型设施中制备生物炭, 这一过程中产生的气体和热量还可用于发电。将生物炭埋入土壤可带来多重附加效益, 包括改善土质、过滤雨水中的有害物质等。早在 4000 年前, 南美洲原住民就会用生物炭来改良土壤!

图 3

图 2 列出的所有 CDR 方法均存在优势与劣势, 如这张表格所示。

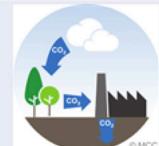
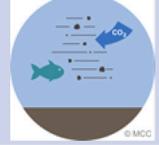
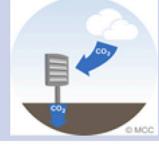
			
		Advantages	Disadvantages
Growing plants			
	<ul style="list-style-type: none"> Simple and easy Can be done right away Large potential, cheap Good for biodiversity and nature 	<ul style="list-style-type: none"> Might compete with food production Might be vulnerable to fire 	
	<ul style="list-style-type: none"> Produces energy and replaces fossil fuels Permanently stores CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> Might compete with food production Need to bury the carbon 	
Burying carbon			
	<ul style="list-style-type: none"> Can be done on agricultural land Can improve yields Does not compete with food production 	<ul style="list-style-type: none"> Limited capacity 	
Using chemistry to absorb carbon			
	<ul style="list-style-type: none"> Could increase crop yield 	<ul style="list-style-type: none"> Not well understood how to scale up Expensive and needs lots of energy 	
	<ul style="list-style-type: none"> Could make the ocean less acidic 	<ul style="list-style-type: none"> Unknown side-effects on ocean ecosystems Hard to do on huge scales – needs millions of tonnes of rocks! 	
Using technology to capture carbon			
	<ul style="list-style-type: none"> Does not need large amounts of land 	<ul style="list-style-type: none"> Expensive! Needs lots of energy and storage requirements underground 	

图 3

发挥化学之力

风化 (Weathering)

矿物分解并吸收 CO₂ 的自然过程, 通常需要数千年时间。加速风化可能有助于减少大气中的 CO₂。

地球矿物（如岩石中的矿物）的自然分解过程称为风化, 通常十分缓慢（需要数千年），这一过程会吸收大气中的 CO₂。研磨矿物可增强自然风化作用, 通过增大表面积使矿物在更短时间内吸收更多 CO₂。若将研磨后的矿物撒在田里, 还能提高作物产量。但目前需要更多实验来验证

大规模应用的效果和副作用。此外，研磨过程需消耗大量能源，生产这些能源时必须实现零碳排放。

碱化 (Alkalisation)

通过向海洋添加矿物质来提高海水吸碳能力的化学过程。

直接空气碳捕集与封存 (DACCs) (Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCs))

直接从空气中过滤 CO₂ 并将其封存于地下的技术。

还可利用海洋吸收 CO₂。碱化作用的具体做法就是向海洋投放可吸收 CO₂ 的矿物碎末（和增强风化的原理差不多），此举还能降低海洋酸度，保护海洋生物免受溶解 CO₂ 的危害。但同样需要进一步研究该方法对生态系统的潜在影响以及可能造成的意外损害。

运用技术

直接空气碳捕集与封存 (DACCs) 是一种对土地需求极低的 CDR 方法。其工作原理是：将含 CO₂ 的空气吸入收集装置，通过特殊过滤器吸附其中的 CO₂；当过滤器饱和后，系统会封闭并加热至 100°C，使 CO₂ 从过滤器中释放并进行捕获封存。与 BECCS 类似，DACCs 的大规模应用需要配套建设 CO₂ 运输和地下封存设施。该技术目前面临的主要挑战是能耗较高，并且依赖的能源尚未完全实现脱碳，导致运营成本居高不下。但值得注意的是，DACCs 正获得巨额资金支持和多家企业的研发投入，发展势头强劲。

关于可持续性的思考？

正如前文所述，所有碳清除方法都存在劣势：有的需要大量土地（这些土地本可用来种粮食），有的能耗巨大，还有的因潜在副作用未知而无法大规模推广。最终解决方案很可能是根据地理条件、时机和碳清除目标，组合使用多种方法。但最重要的一点是：只有通过快速彻底的减排，才能从根本上减少需要处理的 CO₂ 量。再次借用浴缸比喻，预防溢水远比事后清理更重要！拥有碳清理技术绝不意味着我们可以继续加剧污染。因此，在推进 CDR 技术发展的同时，我们必须不断努力从源头上减少 CO₂ 排放。

致谢

感谢英国气象局的 George Burningham 负责图 1 设计，以及 MCC 的 William Lamb 协助完成图 2。Ingrid Schulte (IS) 感谢德国联邦教育与研究部 (BMBF) 资助的 CDRSynTra 项目（资助编号：01LS2101A）提供的资金支持。Sabine Fuss (SF) 感谢欧盟“地平线欧洲”研究与创新计划（资助编号：101081521, UPTAKE 项目）的资金支持。

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. 2021. "Summary for policymakers", in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. 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: Cambridge University Press).
2. IPCC. 2022. "Summary for policymakers", in *Climate Change 2021: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group I 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: Cambridge University Press).
3. Smith, P., Davis, S., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., et al. 2016. Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nat. Clim. Change* 6, 42–50. doi: 10.1038/nclimate2870

线上发布: 2025 年 11 月 05 日

编辑: Antonio Olita

科学导师: Balasubrahmanyam Kottapalli 和 Xiaoming Wan

引用: Fuss S, Jones CD, Schulte I 和 Vaughan N (2025) 主动清理: 二氧化碳移除的意义. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2024.1345470-zh

英文原文: Fuss S, Jones CD, Schulte I and Vaughan N (2024) Cleaning Up After Ourselves: The Role of Carbon Dioxide Removal. *Front. Young Minds* 12:1345470. doi: 10.3389/frym.2024.1345470

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 Fuss, Jones, Schulte 和 Vaughan. 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者，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

LEAF, 年龄: 10

我今年上四年级, 最喜爱的科目是艺术和科学。我很喜欢观察世界的变化, 担任少年审稿人让我能使用科学家的设备观察到更多奇妙变化。课余时间我爱和朋友们一起徒步、游泳和骑行。





SHANMUKH, 年龄: 15

我是 Shanmukh, 今年 15 岁, 对科学与数学特别感兴趣, 希望未来能从事数据科学方面的工作。

作者



SABINE FUSS

Sabine Fuss 担任柏林墨卡托全球公域与气候变化研究所 (MCC) 联合主任, 同时是柏林洪堡大学“可持续资源管理与全球变化”教授。她曾任职于奥地利国际应用系统分析研究所 (IIASA), 目前主要研究方向为二氧化碳移除 (CDR)。作为 IPCC《全球升温 1.5°C 特别报告》主要作者, 她于 2021 年当选欧洲科学院院士。Sabine 与团队发表了多篇 CDR 评估论文, 包括 2018 年在《环境研究快报》上的三部曲, 目前正开展多个 CDR 部署项目。[*fuss@mcc-berlin.net](mailto:fuss@mcc-berlin.net)



CHRIS D. JONES

Chris Jones 现任位于埃克塞特的英国气象局哈德利中心气候研究员, 兼布里斯托大学气候科学教授。他拥有 30 余年气候建模经验, 专注于研究气候对自然生态系统的影响及碳循环对大气 CO₂ 污染的调节作用。他主持与巴西合作的研究项目, 曾深入亚马逊雨林考察。此图拍摄地点为夏威夷莫纳罗亚火山口, 是全球最重要的 CO₂ 监测点。



INGRID SCHULTE

Ingrid Schulte 现任柏林墨卡托全球公域与气候变化研究所 (MCC) 博士后研究员, 研究方向为二氧化碳移除及基于自然的气候变化解决方案。她曾任职于柏林洪堡大学人类 - 环境系统转型研究所, 并参与国际应用系统分析研究所 (IIASA) 青年科学家暑期项目。过去十年间, 她参与了横跨四大洲的生态保护、社区发展与可持续性项目。



NAOMI VAUGHAN

Naomi Vaughan 博士现任东英吉利大学气候变化副教授与丁铎尔中心“零排放目标”研究课题联合负责人。她采用跨学科方法研究从大气中移除及长期封存温室气体 (如二氧化碳) 的技术, 曾任英国自然环境研究理事会 (NERC) 资助的“造林和生物质能碳捕集与封存可行性”项目的首席研究员, 向英国下议院提供专业证词, 并担任气候变化委员会《净零排放报告》专家顾问。

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

