

碳循环： 深刻了解碳气候反馈，减少未来风险

概要

碳遍布于地球各个角落，所有的生物体内、土壤中、海洋中、大气中，均存在碳。岩石和化石中也储存着碳。碳在这些储层之间不断流动，各个储层之间又通过各种过程相互连接。于是便形成了碳循环。人类活动排放到大气中的二氧化碳 (CO₂) 有一半以上均被自然碳储层（又称“碳汇”）吸收，因此，这在很大程度上抑制了气候变化。然而，我们继续步入了一个前所未有的 CO₂ 排放时代，在此过程中，我们正在破坏碳循环，而这可能会对我们的气候造成严重后果。

对于缩小我们对地球系统的认识差距，以及更加准确地预测 CO₂ 排放对全球气温的影响而言，碳循环研究均可谓至关重要。虽然，人类已对推动碳流动的基本过程有所了解，但仍然存在一些不确定性，尤其是变化幅度方面。了解碳气候反馈过程，也就是气候变化对碳循环的影响，从而进一步改变气候，意义十分重大，因为这些过程是气候变化预测中最大的不确定性来源之一。尽可能加快减少 CO₂ 排放，便可将与大规模碳气候反馈相关的风险降至最低。

思路

- 大自然的碳循环可以吸收人类活动排放的一半以上的碳，从而缓解气候变化及其影响，但很难保持如此大规模的吸收。
- 碳汇的未来将取决于大气中 CO₂ 的水平及其上升或下降的速度，还取决于气候变化的影响，此外还可能取决于人类的直接干预。保护碳汇，尤其是森林，对于其功能的保持至关重要。
- 碳气候反馈预计会放大大气气候变化及其影响，在高碳排放的未来产生最大而且最不确定的影响。
- 对于实现净零排放而言，实施人类干预增强自然碳汇可谓至关重要，具体包括可持续造林、重新造林、农业土壤管理和泥炭地重建。
- 提高对碳循环了解的研究内容应包括：利用现场和卫星数据对大气、陆地和海洋进行连续观测监测；深入了解碳汇的潜在不稳定性，以及开发更加全面地反映碳循环复杂性的模型。
- 加大工作力度，争取到 2030 年将全球排放量减半，并在之后继续大幅减排，将与碳循环不确定性相关的风险降至最低。

1. 气候变化与碳循环

在工业革命（始于 1750 年左右）之前的 80 万年间，冰芯数据显示，大气中的 CO₂ 浓度一直保持在大约 300 百万分率以下，在冰期-间冰期旋回期间，CO₂ 浓度上下波动。2020 年，CO₂ 浓度达到了 415 ppm，而且仍在继续上升。

1.1 碳循环的重要意义

碳循环的过程从根本上来讲与我们星球的气候密切相关。碳在大气、海洋和陆地储层之间不断循环。在人类扰乱环境之前，自然过程（例如有机物分解）排放的碳与所吸收的碳（例如植被生长）大致相等，因此，自一万年最后一次冰期结束以来，大气中的 CO₂ 浓度一直相对稳定。这样也有助于确保地表空气温度保持相对稳定。

然而，碳循环与全球气候之间的平衡十分脆弱，很容易便会被打破。地球历史上的冷暖期已经表明，由地球轴向倾斜和绕太阳轨道的变化引发的冰川作用等自然扰动可能会破坏碳循环，改变大气和其他储层中的 CO₂ 水平，对地球气候产生影响。这种自然波动表明，碳循环的功能十分复杂而且会对气候系统产生影响。

人为或人类产生的排放迅速增加了大气中 CO₂ 的浓度，使其达到了过去 300 万年间前所未有的浓度。其中一些排放能被自然碳循环吸收，但碳循环已遭到破坏，超出了自然波动的范围。因此，为了预测未来的气候变化，有必要加深对碳循环的了解。

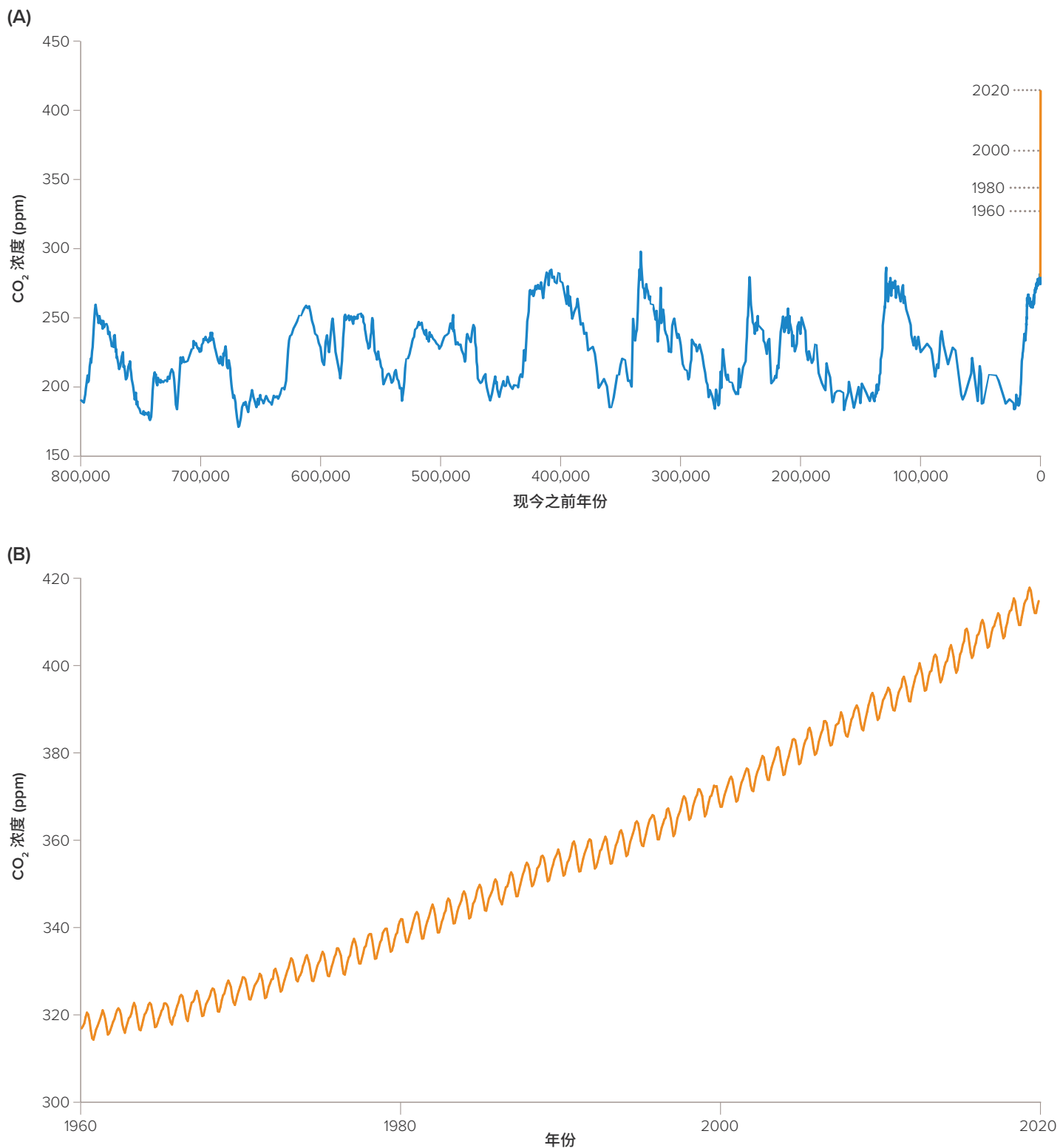
1.2 自然碳循环

地球本身就具有一种活跃的自然碳循环，犹如一个有生命的有机体吸入和呼出碳。在人类燃烧化石燃料、砍伐森林以及对土地进行其他使用（统称为“人为干扰”），从而大规模释放 CO₂ 之前，大气储层储存了大约 2.2 万亿吨 CO₂ (2200 GtCO₂)。每年，陆地上的树木和其他植被通过光合作用可吸收掉大气中大约 400 GtCO₂，而植物和土壤呼吸释放回大气中的二氧化碳量与此相近。在海洋中，大气与地表水之间的交换量每年大约有 330 GtCO₂，高纬度地区的冷水则可吸收更多的 CO₂，部分 CO₂ 被排放到热带海洋中，海洋中富含碳的深水通过海水上涌到达地表¹。

在工业革命（始于 1750 年左右）之前的 80 万年间，冰芯数据显示，大气中的 CO₂ 浓度一直保持在大约 300 百万分率 (ppm) 以下，在冰期-间冰期旋回期间，CO₂ 浓度上下波动。工业革命之前的几个世纪里，CO₂ 浓度约为 270 - 280ppm²。虽然在工业化之前，人类通过火灾和清理土地排放出了一些 CO₂，但排放量非常小；直到工业革命之后，人为排放才开始对碳循环产生严重破坏。

图 1

在过去 80 万年里，随着地球在冰期-间冰期旋回期间的移动，大气中 CO₂ 的浓度一直在波动，但自 1750 年以来，人类活动对 CO₂ 浓度增加所产生的影响达到了前所未有的水平¹ (A)。截至 2020 年，地球大气中的 CO₂ 浓度约为 415 ppm，而且还在以每年约 2.5 ppm 的速度上升。近几十年来，这一增长速度有所加快² (B)。



如果没有陆地和海洋的碳封存，大气中 CO₂ 的水平现在将达到 600 ppm 左右，由此产生的变暖效应大约是目前观测到的两倍。

1.3 1750 年以来的碳循环：“人为干扰”

自 1750 年以来，人为排放的 CO₂ 已开始扰乱全球碳循环，由于燃烧化石燃料和土地利用的变化，人为排放的 CO₂ 从工业革命前可忽略不计的水平上升到了 2019 年大约 42 GtCO₂。CO₂ 排放量的增加是气候变化的主要驱动因素。包括甲烷、一氧化二氮和其他温室气体 (GHG) 在内，年排放量已上升至大约 590 亿吨 CO₂ 当量 (GtCO₂e)⁴ (参见甲烷和氮循环专题)。

在过去十年中，CO₂ 排放主要产生于化石燃料的燃烧，2010-2019 年期间平均每年排放量为 34GtCO₂ (参见图2)。同一时期，土地利用的变化排放量达到了 16 GtCO₂，主要来源为森林砍伐，同时，重新吸收的量大约为 10 GtCO₂，主要来源为废弃农田再生，由此产生的净排放量为 6 GtCO₂。

专栏 1

甲烷和氮循环

稳定全球气候不光取决于 CO₂ 的排放，还有其他温室气体 (GHG) 的排放，而且这类温室气体占总人为 GHG 排放的 25% 以上，其中以甲烷和一氧化二氮为主⁴。2019 年，包括 CO₂、甲烷、一氧化二氮以及其他气体在内的 GHG 总排放量估计达到了 59 GtCO₂e⁴，其中大约 10 GtCO₂e 为甲烷，3 GtCO₂e 为一氧化二氮。据估计，甲烷含量已从 1750 年的 720 百万分率 (ppb) 增加到了 2019 年的 1870 ppb 左右，增幅约为 160%，即 1150 ppb^{5, 6}。据估计，一氧化二氮含量已从 1750 年的 270 ppb⁷ 增加到了 2019 年的 330 ppb 左右，增幅约为 15%，即 60 ppb⁶。两者都达到了 80 万年来的最高水平⁸。这些排放来源独特，其中甲烷来自牲畜、水稻种植、天然湿地、垃圾填埋场和气体生产等来源，而一氧化二氮的排放主要来自于化肥的生产和使用，故而面临着各自的挑战。

化石和土地利用变化排放的总量分别为大气 (19 GtCO₂)、土地 (13 GtCO₂) 以及海洋 (9 GtCO₂)²。

碳汇防止了气候变化的恶化以及影响的加重。如果没有陆地和海洋的碳封存，大气中 CO₂ 的水平现在将达到 600 ppm 左右，由此产生的变暖效应大约是目前观测到的两倍²。

陆地和海洋会对大气中不断增多的 CO₂ 产生反应。土地有助于缓解气候变化，因为大气中 CO₂ 的升高会促进光合作用，而这反过来又会促进更多植物的生长 (尤其是树木)。生长植物的增加会产生更多的生物量，储存在活体植物中的碳量也会增加。植物死亡时，这部分额外增加的生物量中，一部分会变成土壤有机质，从而增加土壤碳储量。陆地碳汇有助于抑制人为气候变化的一个主要原因便在于此。然而，这个过程也存在固有的局限性。陆地碳汇受到水或营养物质可用性等其他因素的限制后，就会饱和，这就意味着它可能会按比例减少未来人类排放的 CO₂。森林干旱、火灾和永久冻土融化等气候变化的影响甚至可能会使碳汇发生逆转。

在海洋中，不断上升的大气 CO₂ 会将额外的 CO₂ 送入海洋，从而导致海洋表面溶解的 CO₂ 量按比例增加。大部分 CO₂ 与海水中的碳酸盐离子发生反应，形成碳酸氢盐，这一过程可以增强海洋吸收碳的能力。

然而，海洋在吸收了大量 CO₂ 后，化学反应的效率便会降低，从而减少海洋对 CO₂ 的吸收，导致海洋发生更严重的酸化。在这个过程之后，各种形式的无机碳便会通过循环被输送到深海。由于海洋环流缓慢，海洋吸收的碳中有 75% 仍然会留在 1000 米的顶层⁹。

海洋浮游生物与陆地生态系统不同，主要的限制因素是有无营养物而非 CO₂，因此浮游生物的生长不会随着海洋中 CO₂ 的增加而增加。然而，海洋酸度的增加已经对许多海洋物种和生态系统产生了不良影响，而生态系统变化对海洋吸收 CO₂ 的间接影响尚不明确。

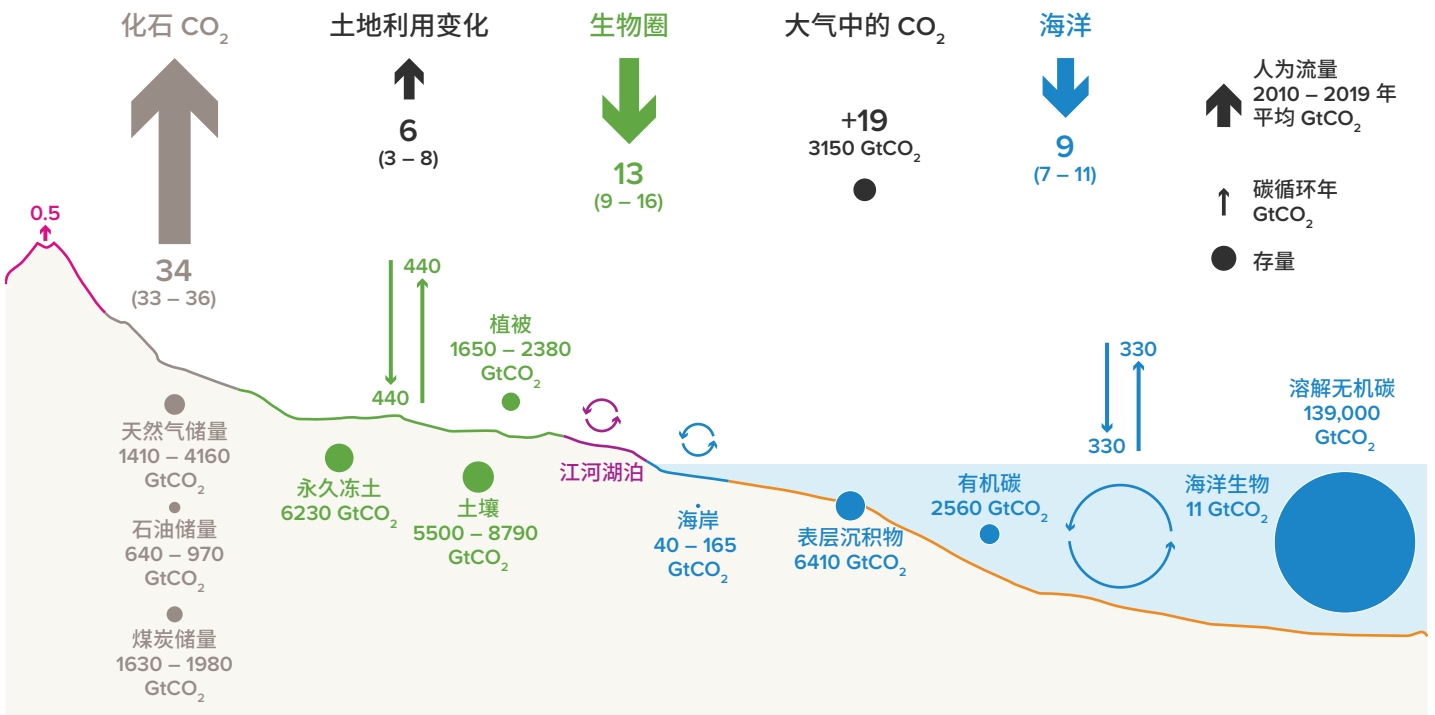
由于 CO₂ 分子在大气中停留时间较长（16-34% 的 CO₂ 会在大气中停留 1000 年以上）¹⁰，因此在确定气候变化水平时，累积排放量要比年排放量更具意义。如果受公共政策影响，以及由此产生的工业和消费者选择发生变化而导致年排放量下降，只要排放到大气中的 CO₂ 多于所有碳汇所吸收的量，则大气浓度仍将上升

（尽管速度会有所减慢）。例如，2020 年，为了抵御 COVID-19 大流行实施了限制措施，据估计，化石燃料燃烧的排放量大约下降了 7%（从大约 36 GtCO₂ 降至 34 GtCO₂）。然而，在此期间，大气浓度上升了 2.6 ppm¹¹，因为排放量仍然远远高出陆地和海洋碳汇每年吸收的碳量。

除了模拟碳循环，检验对碳循环过程的理解之外，通过观测对碳汇进行监测同样格外重要。对于负责管理森林和泥炭地等主要碳汇的政府，以及在全球海洋中拥有共同利益的国际社会而言，这类工作尤为突出。

图 2

“人为干扰”或人类活动对自然碳循环的干扰（2010-2019 年十年全球平均数据）²。陆地和海洋每年分别释放和吸收约 440 GtCO₂ 和 330 GtCO₂。人类活动每年的化石使用排放量约为 34 GtCO₂，土地使用变化排放量约为 6 GtCO₂（其中 16 GtCO₂ 的排放量主要来自森林砍伐，10 GtCO₂ 的吸收量主要来自废弃农田的再生），其中平均每年留在大气中的量为 19 GtCO₂，陆地吸收量为 13 GtCO₂，海洋吸收量为 9 GtCO₂。GtCO₂ 相当于 10 亿吨 CO₂。



2. 推动研究进展的机会

一个关键问题是气候变化对碳汇过程的影响。随着气候变化的破坏，碳汇吸收未来人为排放的比例可能会有所下降，从而导致更大一部分比例的每年排放量停留在大气中。

2.1 了解碳汇的未来 – 已知和未知的未来

CO₂ 的排放量及浓度已达到空前水平，世界正身处未知的领域。对于海水化学对 CO₂ 上升的响应以及通过洋流将碳从表面传输到深处等控制碳汇过程的某些方面，相对较好理解。然而，对于陆地碳汇形成机制等其他过程，则不够明朗，因此无法确信预测未来的碳汇行为。

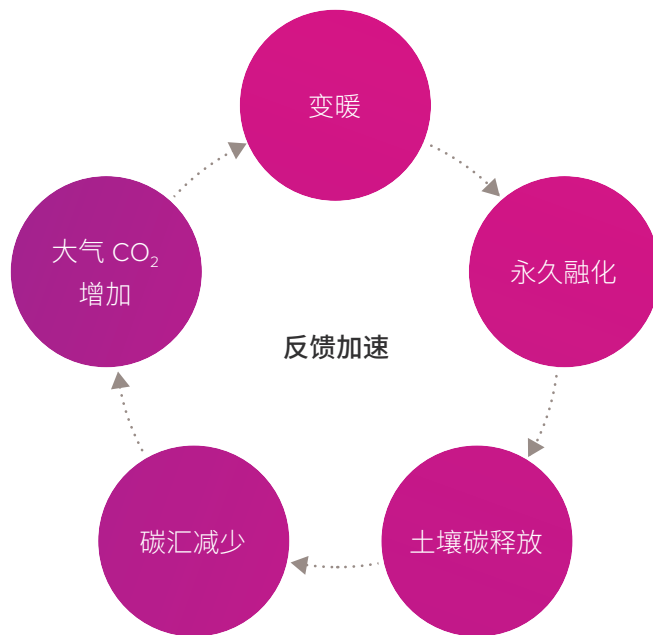
一个关键问题是气候变化对碳汇过程的影响。随着气候变化的破坏，碳汇吸收未来人为排放的比例可能会有所下降，从而导致更大一部分比例的每年排放量停留在大气中。

这就意味着，迄今为止碳汇对气候变化的抑制作用可能会减弱，因而需要采取更大的减排行动才能实现《巴黎协定》的目标。这种减排的潜在速度和规模尚无从得知，因此也就更加迫切地进行减排和加深对碳循环的了解。

科学家们现在的疑问是，既然陆地和海洋碳汇不仅受到大气中 CO₂ 浓度上升的直接影响，而且还受到气候变化本身的影响，那么这些碳汇还能在多大程度上继续吸收碳²。碳气候“反馈”是指气候变化会改变碳汇吸收或释放的碳量，进而抑制或进一步加剧气候变化，由此而表现出的气候变化对碳汇的影响。

图 3

加速气候与碳循环之间的反馈循环可能会加剧气候变暖。本示例显示了这种反馈，其中，融化的永久冻土将土壤碳释放到大气中，加剧变暖，导致进一步融化。人为破坏碳循环可能会释放出可以持续数百年地球变暖的反馈¹²。



普遍认为，陆地是最大的碳气候反馈。生长在前干旱或寒冷地区的植被等部分反馈，会吸收更多的碳，从而减缓气候变化。其他反馈，例如吸收碳的森林的消亡会将碳送入大草原类型的景观，或从融化的永久冻土中释放出碳，从而通过释放碳而加速气候变化（参见图 3）。根据一系列的观测以及目前了解所知，这类反馈会加剧全球气候变暖，但对于影响的时间和规模，以及不同过程的确切影响，十分不明朗¹³。例如，气候变暖所致自然火灾的变化会向大气中释放 CO₂，但至于长期影响，具体还取决于火灾事件后植被的再生情况^{13, 14, 15}。

此外，海洋中的碳气候反馈也很重要。海洋表面变暖会降低碳吸收能力，因为温暖水域所含的 CO₂ 要比寒冷水域少。水循环的变暖和变化可能会影响海洋环流，主要影响就是降低地表水通过与深水交换而更新的速度。这可能会降低热带地区的生态系统生产力以及碳汇。相反，南大洋的风力条件强可能会提高这种更新速度，而这可能导致碳从天然富含碳的深水中释放出来。

这种浅海与深海之间碳转移速率的变化，会影响“锁定”在深海中，以及循环回到大气中的碳量，从而加剧气候变化的严重性。

模型表明，海洋中的综合反馈过程将加剧全球范围变暖，但不同过程的具体影响还十分不明朗¹²。

在某种程度上，当前的气候变化预测中已包含大多数已知的反馈¹⁶。永久冻土融化则属明显的例外情况，IPCC 2013 年发布的报告评估，在高排放情景下，与现有的气候预测相比，永久冻土融化可能会将气候变暖进一步加剧 2.5-12.5%^{17, 18}。

一个有待解决的关键问题是，特定水平的累积排放会对全球地表气温的产生多大的影响。2013 年 IPCC 做出估计，每排放 1 万亿吨碳（相当于 3,664 GtCO₂），全球平均地表温度可能上升 0.8°C 至 2.5°C。三倍范围的温度升幅反映出了气候变化研究的不确定性和气候反馈带来的风险¹²，以及非 CO₂ 排放的不确定性⁹（参见图：甲烷和氮循环）。减少碳循环的不确定性将有助于缩小这一范围（参见简报 1：新一代气候模型）。

虽然我们已对碳循环有了很多的了解，但这些问题说明对于一些重要领域，仍有待进一步研究。开展有针对性的研究，减少未知因素，可以为政策制定者提供关键证据，这样才能做出稳健的决策。

根据一系列的观测以及目前了解所知，这类反馈会加剧全球气候变暖。

为了打造低碳未来，实现净零排放，通过人类干预来提高陆地的自然汇容量已刻不容缓。

2.2 了解低碳及高碳未来

在制定政策时，参考科学可以为我们提供关于低碳和高碳未来碳汇预期行为的知识，具有实用价值。

减少排放的确至关重要，但这也会改变碳汇的行为。如果按照 2015 年《巴黎协定》——低碳未来——的温度目标减少排放，则碳汇吸收大气中 CO₂ 的速度将会减慢。这是因为碳汇的规模——尤其是海洋碳汇，主要与大气中 CO₂ 浓度的上升和/或水平有关。这种低碳的未来将启动一套新的碳循环动态，与未来大气中 CO₂ 水平的升高重新达到平衡，这是先前从未经历过的一种过程。反馈可能会在一定程度上打破稳定性，但由于变暖减缓，反馈将会受到更多限制。无论自然碳循环如何演变，减少人类碳排放对于气候稳定来说都至关重要。

为了打造低碳未来，实现净零排放，通过人类干预来提高陆地的自然汇容量已刻不容缓。

《巴黎协定》的净零目标是“在本世纪下半叶实现温室气体源的人为排放与汇的清除之间的平衡……”。这一声明谈及要对陆地和海洋汇进行积极主动管理和富集，从而加强去除大气中的 CO₂。

具体示例包括恢复森林、红树林和泥炭地，可持续造林，农业土壤的可持续管理以及保护海草生态系统和盐沼等海洋碳汇。如果能够以可持续而经济的方式生产人工汇，也可以提高碳吸收的潜力¹⁹。

如果各国不加强目前的“国家自主贡献”，则高碳未来将带来更高的风险。截至 2020 年 12 月，联合国估计，虽然迄今为止做出了诸多承诺，本世纪全球升温幅度仍然会超过 3°C⁴。如果气候变化以这种规模发展下去，碳汇可能会持续，但在大气 CO₂ 浓度较高的情况下，吸收碳的效率会有所降低，这样我们排放的 CO₂ 便会有更多会留在大气中。还存在另一大额外风险，本简报中所述的碳循环反馈将变得更加强烈，从而进一步降低碳汇效率，造成进一步变暖和气候影响。

气候变化带给碳循环的风险凸显了迅速深入减排实属当务之急。要降低这些风险，我们需要尽快按照联合国的目标降低排放量，也就是到 2030 年，实现人为造成的排放量在 2019 年的基础上减半⁴，并在之后继续大幅减排。

3. 研发重点工作

了解碳循环过程有助于更准确地预测未来大气中的 CO₂ 浓度和相关的温度变化。虽然我们已经开始对碳循环的基本原理有了深刻的了解，但关于碳循环的未来动态以及变化的幅度仍然存在诸多重大问题。既涉及全球循环，又涉及南大洋、北大洋、北极、热带森林、泥炭地和永久冻土区等具体环境。对这些领域的深入了解将有助于我们制定有理有据的适应和减排政策，并更好地了解系统将如何应对气候变化及其可能产生的影响。

除了叶面积指数和海洋颜色等碳循环活动的代理指标之外，通过持续监测全球碳循环的多种特征，扩大长期实地和卫星观测，包括测量大气碳、海洋表面 CO₂ 分压、海洋内有机碳和无机碳、植被和土壤，均可以提高我们的知识。

更加详细的碳循环模型也将有助于提高对汇饱和或逆转风险的了解，例如通过量化永冻层、泥炭地和热带森林的碳释放风险以及海洋酸化对海洋生态系统和海洋碳汇的影响。地球系统模型集成了大气、海洋、陆地、冰川和生物圈的相互作用，而在这种模型中也存在一些需要解决的挑战。机器学习或数据同化技术等数据驱动方法是利用卫星测量和现场数据提供有关碳循环动态的时空信息，因而有助于对模型的改进。

最后，碳循环具有全球性质，这就意味着国家之间以及学科之间的合作至关重要。生态系统生态学、生物地球化学、碳循环和地球系统模拟、过程级观测、机器学习以及其他突出领域的专家，在继续加深我们对这一基本循环的理解方面均发挥着各自的作用。

通过持续监测全球碳循环的多种特征可以提高我们的知识。

4. 总结

工业革命已过去两个多世纪，化石燃料燃烧和土地使用的变化对气候的影响对碳循环产生了切实和广泛的影响，从海洋酸化到广泛的野火，均颇受影响。如此严重的环境变化在人类历史中可谓前所未有。气候变化以及持续的人为排放对碳循环会产生综合影响，这将影响生

态系统、社会和我们减缓气候变化的能力。虽然科学已经取得进展，证明了碳循环的原理和运作，但关于大气中 CO₂ 浓度增加、气温上升和气候反馈对碳循环影响的程度和时间仍然存在很多疑问。因此，未来十年的重点工作就是进一步了解陆地和海洋碳汇及其潜在来源。

本简报只是探讨科学技术在全球实现净零排放和适应气候变化中作用的系列简报中的一篇。世界各国都在制定各自在 2050 年之前实现净零的路线图，该系列简报旨在就科学所能有助于理解和采取行动的 12 个方面，为各国决策者献计献策。

要观看完整系列内容，请访问 royalsociety.org/climate-science-solutions

要查看简报编著人，请访问 royalsociety.org/climate-solutions-contributors

本文中的文本根据《创作共用署名许可协议》(Creative Commons Attribution License) 条款授权使用，该协议允许在注明原作者和出处来源的前提下，进行无限制使用。许可协议访问网址：creativecommons.org/licenses/by/4.0。图片不在本许可授权范围内。

发布日期：2021 年 6 月 DES7639_7 © The Royal Society

参考文献

1. Lüthi *et al.* 2008 High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature* **453**, 379-382 (doi:10.1038/nature06949)
2. Friedlingstein P *et al.* 2020 Global Carbon Budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data* **12**, 3269-3340. (doi:10.5194/essd-12-3269-2020)
3. Joos F, Spahni R. 2008 Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**, 1425-1430. (doi:10.1073/pnas.0707386105)
4. United Nations Environment Programme. 2020 Emissions Gap Report 2020. 参见: <https://www.unenvironment.org/emissions-gap-report-2020>
5. Dlugokencky E. 2021 Trends in Atmospheric Methane. Global Monitoring Laboratory. 参见: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/
6. NASA. 2016 A Global View of Methane. 参见: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/87681/a-global-view-of-methane>
7. Davidson EA, Kanter D. 2014 Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions. *Environ. Res. Lett.* **9**, 105012. (doi:10.1088/1748-9326/9/10/105012)
8. Ciais, P *et al.* 2013 Carbon and Other Biogeochemical Cycles in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker TF *et al.* (eds). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. 参见: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf
9. Gruber N *et al.* 2019 The oceanic sink for anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007. *Science* **363**, 1193-1199. (doi:10.1126/science.aau5153)
10. Joos F *et al.* 2013 Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 2793-2825. (doi:10.5194/acp-13-2793-2013)
11. Tans P and Keeling R. 2021. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Global Monitoring Laboratory. 参见: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>
12. Lowe J, Bernie D. 2018 The impact of Earth system feedbacks on carbon budgets and climate response. *Phil. Trans. R. Soc. A* **376** 20170263 <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0263>
13. Schuur, E., McGuire, A., Schädel, C. *et al.* 2015 Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* **520**, 171-179. (doi:10.1038/nature14338)
14. Hubau W *et al.* 2020 Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* **579**, 80-87. (doi:10.1038/s41586-020-2035-0)
15. Amigo I. 2020 When will the Amazon hit a tipping point? *Nature* **578**, 505-507. (doi:10.1038/d41586-020-00508-4)
16. IPCC. 2013 Summary for policymakers. In: *Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker TF *et al.* (eds). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. 参见: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter12_FINAL.pdf
17. Collins, P *et al.* 2013 Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker TF *et al.* (eds). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. 参见: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/carbon-and-other-biogeochemical-cycles/>
18. Friedlingstein P. 2015 Carbon cycle feedbacks and future climate change. *Phil. Trans. R. Soc. A.* **373**, 20140421.(doi:10.1098/rsta.2014.0421)
19. Royal Society. 2018 *Greenhouse Gas Removal*. London: Royal Society. 参见: <https://www.royalsociety.org/greenhouse-gas-removal>