

人类活动对全球碳循环的影响与环境响应

杜 兰

江苏第二师范学院 江苏南京

【摘要】全球碳循环是地球系统中最重要生物地球化学循环之一，对气候调节和生态系统功能具有关键作用。近年来，人类活动尤其是化石燃料燃烧、土地利用变化、工业化发展和农业生产，对全球碳循环产生了显著影响，导致大气二氧化碳浓度持续升高，碳汇功能受损，海洋酸化加剧，生态系统结构和功能发生变化。本文综合分析人类活动对大气、陆地和海洋碳循环的干扰机制，探讨了不同生态系统对碳输入和排放的响应特征，并评估了全球碳循环变化对环境的反馈作用。研究表明，人类活动不仅改变了碳储量的空间分布和流动路径，也加剧了气候变化和生态环境压力。本文进一步讨论了碳管理和减缓策略，为实现可持续发展和低碳转型提供科学依据。

【关键词】全球碳循环；人类活动；环境响应；碳储量；生态系统

【收稿日期】2024 年 11 月 14 日 **【出刊日期】**2024 年 12 月 18 日

【DOI】10.12208/j.jesr.20240004

The impact of human activities on the global carbon cycle and environmental responses

Lan Du

Jiangsu Second Normal University, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】The global carbon cycle is one of the most important biogeochemical cycles on Earth, playing a critical role in climate regulation and ecosystem functioning. In recent years, human activities, particularly fossil fuel combustion, land-use change, industrial development, and agricultural practices, have significantly impacted the global carbon cycle, resulting in increased atmospheric carbon dioxide concentrations, impaired carbon sinks, ocean acidification, and altered ecosystem structure and function. This study provides a comprehensive analysis of the mechanisms by which human activities disrupt carbon cycling in the atmosphere, terrestrial, and marine systems, explores ecosystem responses to carbon inputs and emissions, and evaluates the feedback effects of carbon cycle changes on the environment. The findings indicate that human activities have not only altered the spatial distribution and flow pathways of carbon stocks but also intensified climate change and ecological pressures. Furthermore, this study discusses carbon management and mitigation strategies, providing scientific support for sustainable development and low-carbon transitions.

【Keywords】Global carbon cycle; Human activities; Environmental response; Carbon stock; Ecosystem

引言

全球碳循环是地球系统中最基本的生物地球化学过程之一，包括大气、陆地、海洋及生物体内碳的储存与转化，其稳定性对气候调节和生态系统功能具有至关重要的作用。随着工业化进程加快和人口增长，人类活动对碳循环的干扰日益显著，对生态系统、气候系统以及社会经济系统带来了深远影响。已有研究表明，氮沉降对草地温室气体排放和植被

生产力具有显著调控作用^[1]。

人类活动通过多种途径影响碳循环。首先，化石燃料燃烧和工业排放是大气二氧化碳快速增加的主要原因，这不仅改变了大气碳浓度，也影响了全球温室效应和气候模式。其次，土地利用变化、尤其是农田开垦、森林砍伐与城市化，改变了陆地生态系统的碳储量和碳通量，对土壤碳库及微生物群落结构产生深远影响。此外，海洋开发、沿海污染和近

海水体碳通量变化也体现了人类活动对海洋碳循环的直接干扰。森林生态系统的碳响应与人类活动密切相关^[2]。

陆地生态系统是全球碳循环的重要调控环节。森林、草地和农田等生态系统不仅是碳储量的重要来源，也是二氧化碳吸收和释放的关键载体。研究表明，过去几十年中国陆地生态系统碳储量呈现显著时空变化，这与气候变化、土地利用和生态修复措施密切相关。在微生物驱动的土壤碳循环过程中，微生物多样性、土壤呼吸和根际碳流动是调控土壤碳储量和转化速率的核心因素。人工林、农田和草地的土壤碳库对外界环境变化具有不同的响应机制，例如氮沉降、灌溉和耕作方式对土壤有机碳库及呼吸有显著影响。农田土壤微生物多样性直接决定了碳循环效率^[3]。

气候变化进一步加剧了碳循环的动态性。全球气温升高、降水格局变化以及极端气候事件的频发，不仅改变了植被生长季长度和净初级生产力，还影响了碳的固定与释放过程。同时，人类对土地资源的开发利用，如煤炭开采和水利工程建设，也改变了区域碳通量模式和土地碳效应。流域和河网系统中的有机物可溶性碳与人类扰动活动密切相关，这些变化通过水-气-土壤界面反馈影响整个区域碳循环。区域碳分布格局的演变也受到地球关键带作用机制的深刻影响^[4]。

历史气候事件与沉积记录为理解碳循环对环境变化的响应提供了重要参考。例如古新世-始新世热事件期间的湖相沉积显示，增强的降水和碳输入对区域碳储量和循环模式产生了重要影响，这为现代环境下碳循环变化提供了类比。同时，污染物排放和大气设计策略也对碳排放控制与减缓产生了指导意义。在土地利用规划和低碳优化方面的研究进一步显示，通过合理配置土地类型和管理措施，可以有效调控区域碳储量和碳效应。此外，气候变化对地下水资源及其碳含量的影响也是全球碳循环研究中不可忽视的环节。

综上所述，人类活动通过直接和间接途径深刻影响全球碳循环，改变碳储量空间分布和碳通量模式，同时加剧气候变化和生态压力。尽管已有大量研究揭示了碳循环的基本规律及人类干扰的作用机制，但对不同生态系统、不同空间尺度以及人类活

动类型的响应特征仍存在不完全理解的空白。为实现碳循环的科学管理与低碳发展，需要系统分析人类活动对大气、陆地和海洋碳循环的综合影响机制及其环境反馈。

基于此，本文旨在：

(1) 综合分析人类活动对全球碳循环的主要干扰机制；

(2) 探讨陆地与海洋生态系统对碳输入和排放的响应特征；

(3) 评估碳循环变化对环境的反馈作用，并提出相应的碳管理和减缓策略。

通过这些分析，本文为全球碳循环科学研究提供系统的理论框架，并为应对气候变化和推动可持续发展提供决策依据。

1 全球碳循环基础及人类活动影响机制

1.1 全球碳循环概述

全球碳循环是地球系统中碳在大气、陆地、海洋和生物体之间持续转化和循环的过程。它涉及碳的固定、释放、转化和储存，对地球气候调节、生态系统功能以及人类社会的可持续发展具有核心作用。在自然状态下，碳在各储库间保持动态平衡：陆地植物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，将碳固定于生物体和土壤中，同时通过呼吸作用释放部分碳回到大气；土壤有机质在微生物作用下分解，形成二氧化碳、甲烷等温室气体；海洋通过物理溶解、化学反应和生物泵吸收和储存碳，形成海洋碳库。碳在各储库间的流动和储量变化直接影响大气二氧化碳浓度，从而影响全球温度、降水和生态系统生产力。已有模型计算表明，近海海-气碳通量显著受人类活动影响^[5]。

大气是碳循环的核心媒介，是全球碳交换的主要通道。大气中二氧化碳的浓度变化不仅影响温室效应，还直接调控陆地和海洋生态系统的碳吸收能力。陆地生态系统中的森林、草地和农田是碳固定的关键储库，净初级生产力决定了生态系统的碳吸收能力，而土壤中的有机碳则通过微生物分解和根际呼吸不断释放碳。海洋则承担着大气碳的长期吸收功能，通过表层海水吸收大气二氧化碳，随后通过浮游生物的光合作用、沉积和深海碳泵将碳转移至深海，形成长期碳储库。全球碳循环的完整性依赖于各储库之间的平衡，一旦人类活动干扰该平衡，

将产生连锁环境效应。

1.2 人类活动对碳循环的主要影响

随着工业化进程和人口增长，人类活动成为全球碳循环的重要驱动因素。主要影响机制包括以下几个方面：沉积物中有机碳的埋藏过程进一步限制了污染物在海洋系统中的迁移^[6]。

1.2.1 化石燃料燃烧与工业排放

能源消耗尤其是煤炭、石油和天然气的燃烧是大气二氧化碳快速增加的主要来源。工业活动和交通运输进一步加剧了温室气体排放，导致大气二氧化碳浓度持续上升，增强了温室效应，并影响了全球气候系统的稳定性。这种人为碳排放不仅改变了大气碳浓度，还通过温度和降水模式的变化影响陆地和海洋的碳循环效率。中国陆地生态系统碳储量在过去 40 年呈现明显时空差异^[7]。

1.2.2 土地利用变化

土地利用变化是人类活动对碳循环干扰的重要途径。森林砍伐、农田开垦、城市化和湿地开垦等活动会直接减少陆地生态系统的碳储量。原本高碳储量的森林和湿地被转化为农田或建设用地后，土壤和植被中的碳迅速释放到大气中。此外，土地利用变化改变了植被类型和覆盖结构，影响了生态系统的净初级生产力和碳通量模式。土地管理措施如施肥、灌溉和耕作方式，也会改变土壤有机碳的储存和矿化速率，进而影响整个碳循环过程。这一趋势已通过多源遥感与模型模拟得到验证^[8]。

1.2.3 农业活动

农业活动通过土壤扰动、作物种植和畜牧业排放影响碳循环。耕作、收割和施肥过程增加了土壤有机碳的矿化速率，释放更多二氧化碳和甲烷。同时，农田管理改变了土壤微生物群落的结构和功能，影响碳的固定与释放效率。畜牧业排放的甲烷和氧化亚氮是重要非二氧化碳温室气体，这些气体与碳循环密切相关，通过增强温室效应进一步影响生态系统碳吸收能力。高纬度海域的有机碳交换同样受到污染物干扰^[9]。

1.2.4 城市化与基础设施建设

城市化和基础设施建设改变了地表覆盖类型和生态系统结构，减少了自然植被面积和碳储量。城市热岛效应和建筑物的能源消耗增加了局地碳排放，同时改变了城市及周边地区的碳通量模式。道路、

工厂和港口等基础设施建设不仅直接消耗土地碳储量，还通过改变水文条件和土壤结构间接影响碳循环。植被模型研究也揭示了微生物过程与植被生长之间的相互作用^[10]。

1.2.5 海洋碳循环干扰

人类活动对海洋碳循环的影响主要包括海洋污染、近海开发和气候变化。污染物输入改变了海水化学性质，影响浮游生物光合作用和有机碳沉积效率。海洋捕捞和海岸开发破坏了生态系统结构，减少了海洋碳泵效率。温室气体排放导致的全球变暖和海洋酸化，进一步改变了海水碳溶解度和生物碳固定能力，使海洋碳循环功能受到影响。近年来对土壤微生物作用的研究进一步深化了这一理解^[11]。

1.3 人类活动干扰的综合效应

人类活动不仅改变了碳储量和通量，还通过复杂的反馈机制影响全球气候系统。大气二氧化碳浓度升高导致温度升高，影响陆地生态系统的光合作用和土壤呼吸，进一步改变碳储量和排放速率。海洋吸收能力受温度、酸化和营养盐供应变化的影响，可能导致长期碳储库功能减弱。土地利用变化和城市化活动的空间分布差异，使全球碳循环呈现高度异质性，区域碳通量和储量差异显著。人工林生态系统的实验模拟显示土壤呼吸对氮沉降极为敏感^[12]。不同生态系统的水分利用效率差异是碳循环调控的重要机制^[13]。草地土壤呼吸动态研究也证明了这一点^[14]。水-碳过程的模拟实验也表明管理措施深刻影响碳循环^[15]。

总之，全球碳循环基础稳定，但受到人类活动干扰后，其平衡机制被打破，导致大气、陆地和海洋碳储量及流动模式发生深刻变化。理解这些干扰机制是预测未来碳循环趋势、评估环境响应以及制定碳管理和减缓策略的基础。

2 人类活动对陆地碳循环的影响

2.1 森林生态系统碳循环变化

森林生态系统是陆地碳储量的主要组成部分，占全球陆地碳库的大部分。森林通过光合作用固定大气二氧化碳，将碳储存在植物体和土壤中，并通过呼吸、落叶和枯木分解将部分碳释放回大气。人类活动对森林碳循环的干扰主要包括森林砍伐、土地开垦和森林管理措施。研究显示，雪盖和融化过程也会改变森林土壤碳固存效率^[16]。

森林砍伐直接减少了生物量碳储量，尤其是成熟森林的碳储量损失显著。砍伐后的土地如果转为农田或牧场，其碳固定能力显著下降，土壤碳储量也随之减少。同时，森林管理措施如人工林种植、间伐和施肥，会改变森林生长速率和碳储量动态。人工林通常生长快速、碳固定能力强，但土壤碳库稳定性低，长期碳储存效果可能不及天然林。

此外，气候变化与人为干扰的耦合作用对森林碳循环具有复杂影响。温度升高和降水变化会影响森林生长季长度和净初级生产力，从而改变碳固定效率。极端气候事件如干旱、暴雨和风害还可能引发大规模碳损失，加剧森林生态系统的不稳定性。

2.2 草地生态系统碳循环变化

草地生态系统主要分布在温带和高原地区，是土壤碳库的重要组成部分。草地碳储量中土壤碳占比通常高于地上生物量碳，因此土壤过程对草地碳循环至关重要。人类活动对草地碳循环的主要影响包括放牧、土地利用变化和农业开发。东北地区的生态修复与气候变化共同作用影响了区域碳循环^[17]。

过度放牧会导致植被覆盖度下降，土壤裸露增加，土壤侵蚀和有机质流失加快，碳释放量增加。草地转化为农田或建设用地，则会显著降低土壤碳储量。与此同时，草地管理措施如轮牧、施肥和灌溉，可以改善草地生产力和土壤碳储量，但管理不当可能破坏土壤结构，导致碳循环效率下降。

气候变化同样对草地碳循环产生重要影响。降水变化影响土壤水分和植被光合作用效率，温度升高则可能加速土壤呼吸，导致土壤碳释放增加。草地碳循环的季节性和年际波动显著，因此人类活动对碳储量和通量的影响具有区域差异性。

2.3 农田生态系统碳循环变化

农田是人类活动干扰最直接的陆地生态系统类型，其碳循环特征受土地管理方式、作物类型和农业投入的影响。耕作活动破坏土壤结构，增加有机碳矿化速率，使碳从土壤释放到大气。不同作物轮作和施肥策略会改变土壤微生物群落组成，进而影响土壤碳循环过程。藻类生理研究也提供了理解生态系统对干扰差异响应的间接证据^[18]。

施用有机肥和秸秆还田可以增加土壤有机碳储量，提高碳固定能力；而高强度机械耕作和化肥过量则可能导致土壤碳矿化加速，降低土壤碳稳定性。

农田灌溉和排水工程改变土壤水分状况，也会对碳通量产生影响。畜牧业与农田耦合的综合管理模式中，畜禽粪便投入、放牧与作物种植的相互作用，使碳循环呈现复杂动态特征。

2.4 土壤碳及微生物作用

土壤是陆地碳循环的核心环节，储量占陆地碳库的大部分。土壤碳循环受微生物活动、土壤理化性质和环境因素调控。微生物通过分解有机质释放二氧化碳或甲烷，是土壤呼吸的主要来源，同时也参与有机碳的固定和转化。人类活动通过改变土壤温度、水分和养分状况，影响微生物群落结构和代谢活性，从而改变土壤碳储量和通量。

土地开垦、施肥和农田管理会改变土壤碳库结构。例如氮肥增加可促进微生物矿化速率，但过量施肥可能抑制微生物多样性，使碳循环效率下降。土壤扰动和植被变化还会影响根际碳流，改变碳在土壤中的稳定性和转化路径。

2.5 碳通量与生态系统生产力变化

人类活动不仅改变碳储量，还直接影响生态系统碳通量和净初级生产力。森林砍伐和草地退化导致碳释放增加，降低生态系统碳吸收能力。农田耕作和灌溉改变碳输入和输出模式，使生态系统生产力呈现地域和季节差异。不同生态系统对干扰的响应速度和方向不同，形成陆地碳循环空间异质性。

区域尺度上，土地利用强度、气候条件和管理措施的差异导致碳通量和储量变化存在明显差异。例如热带地区森林砍伐释放大量碳，而温带农田管理可通过施肥和轮作增加土壤碳储量；高原草地对放牧强度敏感，过度放牧会显著降低土壤碳库。

2.6 区域差异及驱动因素分析

陆地碳循环的变化呈现明显的区域差异，主要受气候条件、土地利用模式和人类活动强度驱动。高纬度地区温度升高对碳固定和释放的影响显著，导致土壤碳释放加快；干旱和半干旱地区水资源限制成为碳循环的关键因素；城市化和工业化地区碳排放量高，生态系统碳储量下降。不同区域的碳循环响应特征与植被类型、土壤性质及管理模式密切相关，使全球陆地碳循环呈现复杂的空间格局。

综合来看，人类活动通过直接改变生态系统结构和间接影响碳通量，显著改变了陆地碳储量和循环模式。森林、草地和农田的碳储量与通量受到土

地管理、气候变化和微生物活动等多重因素调控，呈现高度异质性。这些变化不仅影响局地生态系统功能，也通过大气二氧化碳浓度和气候反馈作用，影响全球碳循环的稳定性。

3 人类活动对海洋碳循环的影响

3.1 海洋碳循环概述

海洋碳循环是全球碳循环的重要组成部分，占全球碳储量的约三分之二。海洋通过物理、化学和生物过程吸收大气二氧化碳，并将其转化或储存在海水及沉积物中。表层海水通过气体交换吸收大气中的二氧化碳，随后通过浮游植物光合作用，将碳固定在生物体内，形成生物碳泵。部分碳随有机颗粒下沉进入深海，形成长期碳储库，部分通过食物链释放回大气或沉积在海底。这些过程调节大气二氧化碳浓度，对缓解全球温室效应具有重要作用。

海洋碳循环可分为无机碳循环和有机碳循环。无机碳循环涉及溶解无机碳在水体中的转换，包括二氧化碳、碳酸氢盐和碳酸盐的平衡；有机碳循环则由浮游生物、海洋植物和微生物驱动，涉及光合作用、呼吸、分解和沉积等过程。这两个循环通过海水溶解度、温度、盐度和营养盐供给相互作用，决定了海洋碳库的动态稳定性。

3.2 人类活动对海洋碳循环的干扰

随着人口增长、工业化和海洋资源开发，人类活动对海洋碳循环产生了显著影响，主要体现在以下几个方面：

3.2.1 海洋污染

工业废水、农业径流和城市生活污水向海洋排放大量营养盐和污染物，改变了海水的化学性质。高浓度氮、磷等营养物质可导致局部海域浮游植物过度生长，形成赤潮或富营养化事件，改变碳的固定效率和有机碳沉积速率。污染物还可能抑制微生物群落多样性，影响有机碳的降解和转化过程，从而改变海洋碳通量和储量。实验模拟表明，潮间带环境条件直接决定了土壤呼吸速率^[19]。

3.2.2 海洋开发与资源利用

人类对近海和沿海的开发，包括港口建设、填海造地和海洋采矿活动，会破坏原有生态系统结构，减少碳固定能力。海底沉积物被扰动后，长期储存在沉积物中的碳可能释放到水体和大气中，增加局地碳排放。渔业捕捞对食物链的干扰也会影响生物

碳泵效率，减少有机碳下沉到深海的比例。煤炭开采对土地利用和碳固定能力造成显著影响^[20]。

3.2.3 气候变化引起的海洋变化

人类活动导致的温室气体排放引发全球变暖，对海洋碳循环产生间接影响。海水升温降低二氧化碳溶解度，减弱海洋对大气碳的吸收能力。同时，温度升高和极端事件（如海洋热浪）会影响浮游植物生长季、光合作用效率和生物碳泵功能。此外，海洋酸化改变碳酸盐平衡，使某些生物（如贝类和浮游生物）碳固定能力下降，进一步影响碳储存。阿尔卑斯地区的研究显示，人类活动增强了溶解有机碳的可利用性^[21]。

3.2.4 海洋生态系统响应

海洋生态系统对人类干扰表现出多样化的响应。沿海湿地、红树林和海草床作为重要碳汇，对环境变化和人为扰动高度敏感。湿地开垦和红树林砍伐会直接减少碳储量，海水污染和温度升高会降低光合作用效率和生物碳泵功能。深海碳库虽受表层扰动影响较小，但长期温度升高和洋流变化可能改变深海碳沉积模式，影响长期碳储存能力。

3.3 海-气界面碳通量变化

海洋与大气之间的碳交换是全球碳循环的关键环节。大气二氧化碳浓度升高会增强海洋吸收能力，但受温度、风速、盐度和污染物影响，海-气碳通量呈现空间和时间异质性。人类活动改变了海洋温度结构和营养盐供应，影响海洋对大气二氧化碳的净吸收量。一些沿海地区由于污染和土地开发，海-气碳通量可能发生反转，从碳汇转为碳源，进一步加剧大气二氧化碳浓度增加。古新世-始新世热事件的沉积物记录为当代研究提供了重要类比^[22]。

3.4 综合效应分析

人类活动通过污染排放、资源开发、温室气体排放和生态系统干扰，改变了海洋碳吸收和储存效率，破坏了海洋碳循环的自然平衡。这不仅影响局地和区域碳通量，也通过海-气界面反馈作用，改变全球大气二氧化碳浓度，对气候变化产生加速效应。海洋碳循环的空间异质性和生态系统的响应差异，使碳储量和通量在不同海域表现出复杂的动态特征。

综上所述，人类活动对海洋碳循环的干扰具有多重机制和综合效应，涵盖物理、化学和生物过程，对全球碳循环稳定性产生深远影响。理解这些机制

对于预测未来碳循环趋势、评估环境响应以及制定海洋碳管理策略具有重要意义。

4 全球碳循环变化的环境响应

4.1 大气变化与气候反馈

全球碳循环的变化直接影响大气成分和气候系统。大气中二氧化碳浓度的持续升高增强了温室效应，导致全球气温上升、降水格局改变及极端气候事件频发。气温升高不仅改变了陆地和海洋的碳吸收效率，还通过水分蒸发、风速变化和气候模式调控碳通量。例如，高温加速土壤有机碳矿化，增加二氧化碳和甲烷排放，同时干旱地区植被生长受限，碳固定能力下降，形成正反馈效应。减少排放的污染控制设计已被提出用于缓解大气碳负荷^[23]。

降水变化也是碳循环的重要驱动因素。降水增加的地区可能促进植被生长和碳吸收，而降水减少则导致土壤水分不足，微生物活性降低，碳释放增加。此外，极端气候事件如暴雨、干旱、飓风等可破坏生态系统结构，直接释放大量碳，增加大气二氧化碳浓度，加剧气候变化。

4.2 陆地生态系统响应

陆地生态系统对碳循环变化表现出复杂的响应特征。森林、草地和农田在碳储量、净初级生产力和碳通量上呈现高度异质性。碳循环变化引发的环境响应主要包括以下几个方面：区域土地利用优化评价模型证明其在减碳中的潜力^[24]。

(1) 植被结构变化：气候变化和人类干扰可导致森林退化、草地退化和农田产量下降。植被覆盖度下降会减少碳固定，同时增加土壤暴露面，加速土壤碳流失。

(2) 生物多样性变化：碳循环变化通过改变生态系统碳通量和资源可利用性影响物种分布和群落结构，降低生态系统功能稳定性。

(3) 土壤功能退化：土壤水分、养分和微生物活性变化会影响土壤碳储量和矿化速率，降低碳储存效率，并可能引发土壤退化和沙化问题。

长期来看，陆地生态系统的碳循环变化会改变生态系统生产力和碳储量动态，形成局地与区域差异明显的环境响应，对生态服务功能产生广泛影响。

4.3 海洋生态系统响应

海洋生态系统对碳循环变化同样敏感。海水温度升高、酸化以及污染物输入改变了海洋生物的生

产力和碳泵效率。主要响应包括：

(1) 浮游植物和海藻生产力变化：光合作用效率受温度、营养盐供应和污染物影响，导致生物碳泵功能变化。

(2) 沉积碳释放与储存变化：沉积物扰动和酸化降低了碳固定能力，使部分长期碳储库释放到水体和大气中。

(3) 沿海生态系统退化：红树林、海草床和湿地作为重要碳汇，其面积减少会导致碳储量下降，弱化海洋碳循环缓冲能力。

海洋碳循环的变化通过海-气界面反馈影响全球大气二氧化碳浓度，使气候变化与生态响应形成交互作用。

4.4 土壤退化与水体环境反馈

土壤碳循环与水文条件密切相关。人类活动导致土壤结构破坏、侵蚀加剧和水分调控失衡，增加了土壤碳流失和二氧化碳排放。水体环境的变化，如湖泊富营养化和河流水质恶化，也会改变有机碳输入和分解速率，影响水体碳储存和流动。湿地、河口和湖泊碳循环的扰动会进一步通过水-气交换反馈至大气，形成跨介质的碳循环响应。

4.5 综合环境效应

全球碳循环变化的环境响应是陆地、海洋和大气多系统交互作用的结果。主要表现为：

(1) 气候加速反馈：碳循环失衡加速大气二氧化碳浓度升高，增强温室效应，进一步影响陆地和海洋碳吸收能力。

(2) 生态系统功能减弱：植被覆盖度下降、生物多样性降低、土壤退化和水体环境恶化均削弱生态系统的碳储存和调控能力。

(3) 空间异质性：不同生态系统和区域对碳循环变化的响应存在显著差异，高纬度地区和干旱半干旱地区表现出更强的碳通量敏感性。

总体而言，人类活动引起的全球碳循环变化不仅改变碳储量和通量模式，还通过多重反馈机制影响气候系统和生态系统功能。理解这些响应机制对于预测未来碳循环趋势、评估生态与气候风险、制定低碳管理策略具有重要意义。

4.6 极端事件对碳循环的影响

极端气候事件是全球碳循环变化的重要驱动因素，其频率和强度随全球气候变化显著增加。干旱、

暴雨、洪水、热浪和风暴等极端事件对碳循环具有直接和间接影响：

(1) 干旱：减少土壤水分，限制植被光合作用，降低陆地净初级生产力 (NPP)，导致碳吸收能力下降。干旱还会增加土壤微生物对有机碳的分解，释放二氧化碳。

(2) 暴雨和洪水：破坏土壤结构，促进土壤碳和有机质的流失；同时冲刷植被和腐殖质，造成碳通量瞬时增加。

(3) 热浪：提高土壤温度，加速有机碳矿化速率，提高二氧化碳排放；同时抑制植物生长，降低碳固定效率。

(4) 风暴和飓风：破坏森林和植被，释放大量的碳储量至大气，并增加地表碳暴露，影响后续生态系统碳吸收能力。

极端事件不仅局部影响碳循环，还可能通过跨区域传递效应对全球碳储量产生累积作用，形成负向反馈，进一步加速气候变化。

4.7 生物多样性变化与碳循环

生物多样性是维持生态系统碳固定和储存能力的重要因素。碳循环变化导致的环境干扰会引起物种丧失、群落结构变化和功能退化，进而影响碳循环效率：

(1) 物种丧失：关键物种消失会破坏生态系统的生产力和营养循环，降低碳固定能力。

(2) 群落结构改变：物种比例和功能型变化会改变碳流动模式，例如落叶林向针叶林转变，可能改变土壤碳矿化速率。

(3) 生态功能退化：植物和土壤微生物多样性下降会降低生态系统对环境变化的适应能力，影响碳循环稳定性。

长期来看，生物多样性下降可能导致生态系统碳储量减少，降低全球碳循环缓冲能力。

4.8 土壤碳与微生物响应

土壤碳储量是陆地碳循环的重要组成部分，其变化受温度、水分、土地利用和微生物活动影响显著。全球综合研究也指出气候变化对地下水碳含量具有持久影响^[25]。

(1) 土壤有机碳分解加速：气温升高和土壤湿度变化会促进微生物分解活动，释放二氧化碳和甲烷。

(2) 微生物群落结构变化：人类活动导致土壤微生物群落多样性和功能改变，影响有机碳矿化速率和土壤碳固定能力。

(3) 土壤退化：过度耕作、土地开垦和水土流失减少碳储量，同时影响水文循环和养分供应，形成负向反馈。

(4) 土壤碳与微生物的响应机制在不同生态系统间差异显著，干旱和半干旱地区的土壤碳更易受温度和水分变化影响，高纬度地区则更敏感于温度升高。

4.9 水体碳循环变化与环境反馈

水体是碳循环的重要调节系统，湖泊、河流、湿地和近海区域在碳吸收、释放和沉积中起关键作用。人类活动和气候变化对水体碳循环的影响包括：

(1) 营养盐输入增加：农业径流和生活污水增加水体富营养化，刺激浮游植物生长，但过度富营养化可能导致水体缺氧，影响有机碳沉积。

(2) 水温升高与酸化：提高水体中有机物矿化速率，增加二氧化碳释放，同时影响水生生物碳固定能力。

(3) 湿地碳循环扰动：湿地开垦和干扰降低碳储量，破坏水-气界面碳交换，影响全球碳循环稳定性。

水体碳循环变化不仅影响局地生态系统，还通过河流输送、海洋吸收和大气交换对区域乃至全球碳通量产生反馈。

4.10 综合反馈机制

全球碳循环变化的环境响应是多系统交互作用的结果，形成复杂的反馈机制：

(1) 正向反馈：碳储量下降和碳通量增加进一步提高大气二氧化碳浓度，加剧温室效应，推动全球气温升高。

(2) 负向反馈：部分生态系统在碳循环干扰下通过生长增强、碳固定增加或微生物调控部分缓解碳排放。

(3) 跨系统联动：陆地碳通量变化影响大气二氧化碳浓度，进而改变海洋碳吸收；海洋碳循环异常反过来影响陆地生态系统生产力，形成跨介质的耦合效应。

这些综合反馈机制强调了全球碳循环系统的复杂性和动态性，不同区域和生态系统在碳循环变化

下表现出高度异质性。

4.11 展望与研究意义

理解全球碳循环变化的环境响应对科学预测气候变化趋势、评估生态系统功能和制定碳管理政策具有重要意义。未来研究应：

(1) 建立多尺度监测与模拟系统，揭示陆地、海洋和大气碳循环动态及反馈机制。

(2) 聚焦极端事件和突发干扰对碳循环的短期和长期影响。

(3) 探索生态系统适应性管理和碳循环优化策略，提高生态系统韧性和碳储量稳定性。

(4) 将人类活动、政策干预和自然碳循环整合，支持科学决策与全球低碳发展。

通过系统研究全球碳循环环境响应，有助于完善碳管理措施，降低碳排放风险，实现可持续发展目标。

5 人类活动碳管理与减缓策略

5.1 概述

随着全球气候变化加剧和大气二氧化碳浓度持续上升，人类活动对碳循环的干扰日益显著。为维持全球碳循环平衡，降低温室效应风险，制定科学的碳管理与减缓策略至关重要。碳管理策略不仅包括减缓排放，还涉及碳储量保护、碳循环优化和跨系统协调。有效的碳管理体系需要从能源结构调整、陆地和海洋碳汇保护、政策与经济激励、技术支持及国际合作等多个方面同时推进，实现长期、可持续的全球碳减排目标。

5.2 能源减排与低碳转型

能源系统是全球二氧化碳排放的主要来源。煤炭、石油和天然气的大规模使用不仅增加了大气二氧化碳浓度，也直接加速了温室效应。因此，能源减排是碳管理的核心策略之一。

可再生能源推广是关键途径，包括太阳能、风能、水能、地热能 and 生物质能等。通过替代高碳能源，实现能源结构优化，能够显著减少二氧化碳排放。能源效率提升也是重要措施，例如工业生产设备优化、建筑节能设计和智能电网建设，有助于降低单位能源消耗碳排放强度。

此外，低碳交通系统建设同样不可忽视。推广电动车、氢燃料车辆和公共交通体系，减少交通燃料燃烧产生的碳排放，是城市和区域碳管理的重点。

能源减排和低碳转型不仅降低了大气碳浓度，也为其他生态系统提供减轻压力的空间。

5.3 陆地碳管理策略

陆地生态系统碳储量占全球碳库的重要比例，对碳循环调控具有关键作用。因此，陆地碳管理策略主要集中在碳汇保护与生态修复、土壤碳管理和土地利用优化三个方面。

5.3.1 森林与草地保护

森林是陆地最大的碳储库，砍伐、退化和火灾会造成大量碳释放。森林保护包括防止非法砍伐、控制火灾风险、实施森林可持续管理和生态恢复项目。人工造林和自然恢复相结合，可以增加生物量碳储量，同时改善土壤碳稳定性。

草地作为土壤碳库的重要组成部分，其管理策略包括合理放牧、轮牧制度、退化草地恢复和湿地保护。通过增加植被覆盖和改善土壤结构，可提高草地碳固定效率，降低土壤碳流失。

5.3.2 土壤碳管理

土壤碳是陆地碳储量的核心部分，受耕作、施肥和水分管理影响显著。有效的土壤碳管理策略包括：

(1) 减少耕作：减少土壤扰动，降低有机碳矿化速率。

(2) 有机肥和秸秆还田：增加土壤有机质，改善碳储存能力。

(3) 轮作与多样化作物种植：优化土壤微生物群落，提高碳固定效率。

(4) 水分与养分管理：通过灌溉和水分调控，提高土壤微生物活性，稳定碳循环过程。

5.3.3 土地利用优化

土地利用变化是陆地碳管理的重要环节。通过退耕还林、退牧还草、湿地保护和生态农业推广，可以同时提高碳储量、提升生态服务功能和增强生态系统韧性。科学规划土地利用，避免过度开发和生态破坏，是维持陆地碳循环平衡的基础策略。

5.4 海洋碳管理策略

海洋碳循环占全球碳循环的重要份额，其管理策略主要包括沿海湿地保护、海洋污染控制、生物碳泵强化及可持续开发。

(1) 沿海湿地保护：红树林、海草床和盐沼湿地是高效碳汇，保护其面积和生态功能可增加碳储

量。湿地保护包括防止填海造地、污染排放控制和生态恢复项目。

(2) 海洋污染控制: 减少工业废水、农业径流和生活污水进入海洋, 降低营养盐过剩和富营养化, 保证浮游植物和海洋生态系统正常碳循环。

(3) 生物碳泵强化: 通过恢复海洋生物多样性、保护浮游植物及底栖生物, 增强有机碳向深海沉降能力, 提高长期碳储存。

(4) 可持续开发: 合理规划渔业捕捞、港口建设和海洋采矿活动, 减少对沉积物扰动, 保护海洋碳储库功能。

5.5 碳经济政策与技术支持

除了自然生态管理, 碳经济政策和技术手段在碳管理中同样关键。

5.5.1 碳交易与经济激励

碳交易、碳税和绿色金融政策可通过市场机制激励减排行为。企业和地区通过参与碳交易市场, 实现成本最小化与碳减排目标的兼顾。经济激励不仅推动低碳技术应用, 也促进社会整体碳排放水平下降。

5.5.2 技术支持

(1) 碳捕集与封存 (CCS) 技术: 直接从工业排放源捕集二氧化碳并储存于地质层或海底沉积层, 减少大气碳排放。

(2) 生态系统监测技术: 利用卫星遥感、无人机和地面观测网络监测碳储量、通量及生态系统健康状况, 为碳管理提供科学依据。

(3) 模型预测与决策支持: 通过碳循环模拟和预测模型, 评估不同管理策略对全球碳循环的长期影响, 指导政策制定。

5.6 国际合作与全球协同

碳管理和减缓策略具有全球性, 需要国际合作和跨国协调。主要措施包括:

(1) 国际减排协议: 落实巴黎协定及后续国际气候协议, 明确国家减排责任和目标。

(2) 低碳技术共享: 通过技术转让和经验分享, 帮助发展中国家提升碳管理能力。

(3) 跨区域碳管理协同: 协调跨界河流流域、沿海海域及生态区域的碳管理, 防止局地减排影响被邻近地区抵消。

5.7 综合策略与未来展望

有效的碳管理策略应综合陆地、海洋和能源系统, 通过政策、技术、经济和生态措施协同作用, 实现全球碳循环的稳定。未来的发展方向包括:

(1) 多系统协同管理: 将陆地、海洋和大气碳管理整合, 形成跨系统碳平衡策略。

(2) 低碳社会转型: 推动产业结构优化、绿色能源发展和可持续消费模式, 减少碳排放根源。

(3) 生态系统适应性管理: 增强生态系统对碳循环扰动的韧性, 提高碳固定效率, 降低碳释放风险。

(4) 长期监测与智能决策: 建立全球碳循环长期监测网络 and 智能决策系统, 提高碳管理的精准性和应对能力。

通过多层次、多维度的碳管理与减缓策略, 可以在保障经济发展的同时, 降低人类活动对全球碳循环的负面影响, 为应对气候变化和实现可持续发展提供科学支撑。

6 结论

6.1 研究总结

本研究系统分析了人类活动对全球碳循环的影响及其环境响应, 并提出了综合的碳管理与减缓策略。研究得出以下主要结论:

(1) 人类活动对全球碳循环的干扰显著

工业化、城市化、土地利用变化、农业生产、海洋开发及能源消耗等活动, 显著改变了陆地和海洋的碳储量及通量模式。大气二氧化碳浓度持续升高, 加剧了温室效应, 并形成了对碳循环和生态系统的正反馈效应。

(2) 陆地碳循环对干扰敏感

森林砍伐、草地退化、湿地开垦及农田管理改变了植被结构、生态系统生产力和土壤碳储量。土壤微生物活性变化导致碳矿化加速, 碳固定效率下降。区域差异性显著, 高纬度及干旱半干旱地区碳通量对环境扰动尤为敏感。

(3) 海洋碳循环受到多重压力

海洋污染、海水温升、酸化及海洋开发改变了浮游植物生产力和生物碳泵效率。沿海红树林、海草床及湿地面积减少, 沉积碳释放增加, 海-气界面碳通量空间和时间异质性显著增强, 对全球大气二氧化碳浓度产生反馈作用。

(4) 全球碳循环变化引发环境反馈

碳储量减少和通量异常不仅加速气候变化,还导致生态系统功能下降、土壤退化和水体环境恶化。陆地、海洋和大气之间的反馈作用使碳循环呈现复杂动态,形成跨系统、多尺度的环境响应。

(5) 碳管理与减缓策略的必要性与可行性

综合分析表明,科学实施碳管理策略,包括能源减排、陆地与海洋碳汇保护、技术支持和国际合作,是维持全球碳循环平衡、减缓气候变化和提升生态系统韧性的关键。多维度、跨系统的策略能够同时提高碳储量、优化碳通量和降低环境风险。

6.2 全局性结论

全球碳循环变化及其环境响应呈现出以下特点:

(1) 跨系统相互作用复杂

陆地、海洋和大气碳循环通过多重反馈机制紧密联系。陆地碳储量变化影响大气二氧化碳浓度,进而影响海洋吸收能力;海洋碳循环异常反馈至大气,影响陆地生态系统生产力。碳循环干扰具有跨系统、跨时空的复杂性。

(2) 环境响应高度异质

不同生态系统和区域对碳循环干扰的响应存在显著差异。热带森林、沿海湿地和高纬度地区是碳储量和碳通量变化最为敏感的区域。干旱、半干旱及极端气候区域的生态系统对碳循环扰动的适应能力较弱。

(3) 人为干预具有长期影响

土地开发、海洋利用、能源消耗和工业排放对碳循环的影响具有长期累积效应。短期干扰可能导致局地碳释放,但长期累积作用会改变全球碳储量分布和通量模式,对气候系统产生持久影响。

6.3 对未来研究的启示

(1) 多尺度碳循环研究

未来研究需进一步关注不同时间和空间尺度下的碳循环动态及反馈机制,包括极端气候事件和突发性干扰对碳通量的短期和长期影响。

(2) 生态系统适应性评估

不同生态系统在碳循环干扰下的韧性和恢复能力是评估环境风险的重要指标。研究应结合生态功能、多样性和生态服务能力,建立适应性管理策略。

(3) 跨系统碳管理与政策优化

碳管理需考虑陆地、海洋和大气的整体效应,并与能源、经济和社会发展相结合。未来研究应加

强政策与科学的衔接,通过模型模拟和监测系统优化碳管理方案。

6.4 总结性评价

总体而言,人类活动对全球碳循环的影响是深远而复杂的,涉及能源、生态、气候及经济多重因素。科学的碳管理与减缓策略能够有效降低碳排放、增强生态系统碳储量、改善环境响应,并为全球气候治理提供可行路径。未来应在全球视角下推动多维度、跨系统的碳管理,协调人类发展与自然生态系统的平衡,实现全球可持续发展目标。

参考文献

- [1] 王玉珏.大气氮沉降对中国北方草地两种主要非 CO₂ 温室气体及植被生产量的影响与机制[D].中央民族大学,2024.
- [2] Hogan A J ,Lichstein W J ,Helmer H E , et al. Anthromes and forest carbon responses to global change[J].Plants, People, Planet,2024,7(4):1027-1042.
- [3] 彭子恒.中国旱地农田土壤微生物多样性模式及其与农业土地利用方式的关系研究[D].西北农林科技大学,2024.
- [4] 王志强.汉江下游丘陵-平原过渡区地球关键带有机碳空间分布格局及影响机制[D].中国地质大学,2024.
- [5] 申霞,林伟波,周云鹏.近海区域海水二氧化碳分压及海-气碳通量计算模式[C]//中国海洋学会海洋工程分会.第二十一届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上).南京水利科学研究院;江苏省海涂研究中心;连云港市港航事业发展中心,;2024:421-427.
- [6] 贾梦娇,白亚之,杜佳宗,等.渤海有机碳埋藏对近百年沉积汞的约束[J].海洋地质与第四纪地质,2024,44(05):129-139.
- [7] 王少剑,周诗洁,方创琳. 1980~2020 年中国陆地生态系统碳储量时空格局与演进规律[J].中国科学:地球科学,2024,54(10):3323-3339.
- [8] Wang S ,Zhou S ,Fang C . Spatial-temporal patterns and evolution of carbon storage in China's terrestrial ecosystems from 1980 to 2020[J].Science China Earth Sciences,2024,(prepublish):1-18.
- [9] 刘瀚阳.多环芳香化合物在高纬度背景海域中赋存特征、

- 介质交换及关键影响因素研究[D].中国科学技术大学,2024.
- [10] 李思其,张旭,陆正遥,等. 植被模型研究进展与展望[J]. 中国科学:地球科学,2024,54(09):2762-2782.
- [11] 占奥丽,黄敏,尹龙,等. 土壤碳循环微生物作用研究进展[J].华中农业大学学报,2024,43(04):70-81.
- [12] 朱涛.柳杉人工林土壤有机碳库及土壤呼吸对模拟氮沉降的响应[D].贵州民族大学,2024.
- [13] 刘心怡.蒙古高原典型生态系统水分利用效率的时空变化及其驱动机制研究[D].内蒙古师范大学,2024.
- [14] 汪雪琴.科尔沁沙丘-草甸土壤呼吸动态及其影响机制研究[D].内蒙古农业大学,2024.
- [15] 康雪儿.科尔沁沙丘-草甸生态系统 GSPAC 水碳过程及影响机制[D].内蒙古农业大学,2024.
- [16] 蔡莹.除雪对灌丛和草本泥炭沼泽根际土壤碳固存的影响机制[D].东北师范大学,2024.
- [17] 张泽宇.气候变化及生态修复主导下东北地区植被绿度变化研究[D].辽宁师范大学,2024.
- [18] Tianyi Q ,Yan S ,Tongfei Q , et al. Study on gender differences between male and female *Sargassum thunbergii* based on metabolomic analysis and physiological functions[J]. Algal Research,2023,75
- [19] Xiaotong W ,Jiazheng H ,Jian L . Response of Land Use and Net Primary Productivity to Coal Mining: A Case Study of Huainan City and Its Mining Areas[J].Land, 2022,11(7): 973-973.
- [20] Peng W ,Xia S ,Lin Z H , et al. Laboratory simulation of soil respiration response to environmental conditions in intertidal zones of Jiangsu Province, China[J].Water Science and Engineering,2022,15(2):
- [21] Thibault L ,Pascal P ,Nicolas E , et al. Enhanced bioavailability of dissolved organic matter (DOM) in human-disturbed streams in Alpine fluvial networks[J]. Biogeosciences,2022,19(1):187-200.
- [22] Xiaohua T ,Chunlian W ,Chenglin L , et al. Paleocene-Eocene Thermal Maximum lacustrine sediments in deep drill core SKD1 in the Jiangnan Basin: A record of enhanced precipitation in central China[J].Global and Planetary Change,2021,205
- [23] Marco R .Pollution and the Atmosphere:Designs for Reduced Emissions[M].Apple Academic Press:2017-01-12.
- [24] Xiaowei C T Z X H R Z . Carbon effect evaluation and low-carbon optimization of regional land use[J].Editorial Office of Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(17):220-229.
- [25] Holger T ,Luis J B M ,J. J G .Climate Change Effects on Groundwater Resources:A Global Synthesis of Findings and Recommendations[M].CRC Press:2011-12-02:
- 版权声明:** ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS