区域陆-水-气碳收支与碳平衡关键过程对地球系统碳中和的意义

高扬^{1,2*}, 王朔月^{1,2}, 陆瑶^{1,2}, 刘建宝³, 吕斯丹¹, 孙昆¹, 贾琚杰^{1,2}, 李兆喜^{1,2}, 于贵瑞^{1,2*}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

3. 中国科学院青藏高原研究所高寒生态重点实验室, 北京 100101

* 通讯作者, E-mail: gaoyang@igsnr.ac.cn

† 通讯作者, E-mail: yugr@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2021-03-10; 收修改稿日期: 2021-11-12; 接受日期: 2022-01-05; 网络版发表日期: 2022-02-24

国家自然科学基金碳中和专项项目(批准号: 42141015)和国家优秀青年科学基金项目(编号: 41922003)资助

摘要 衔接陆地-海洋的区域陆-水-气碳收支与碳平衡是地球系统碳中和的关键过程, 因此定量解析陆-水-气的碳运移与碳交换协同过程对于深入理解陆地生态系统“丢失”的碳汇具有重要意义. 本文集成分析了全球陆-海-气碳运移与碳收支变化及其影响机制, 重点探讨内陆水体碳收支与碳循环过程在陆-水-气碳收支的重要作用, 揭示全球变化下陆-水-气碳收支与碳平衡的调控机制, 并进一步评估中国区域陆-水-气碳收支现状及其湖泊固碳潜力, 提出定量人类活动对陆-水-气碳运移与碳交换过程的确切影响与幅度对于全球碳平衡与碳中和具有重要意义.

关键词 碳收支, 碳平衡, 碳中和, 陆-水-气交换, 陆海交互

1 引言

全球内陆水体的表面积为 $3.6 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Raymond等, 2013), 其每年释放的 CO_2 量相当于全球陆地生态系统吸收温室气体的79%, 几乎可以补偿海洋全年的碳(C)吸收量(Regnier等, 2013; Wanninkhof等, 2013), 由此可见内陆水体是全球C循环中的一个重要组成部分(Tranvik等, 2009; Bastviken等, 2011). 湖泊C循环其本质是大气和流域供给与初级生产者净需求之间的平衡减去大气、沉积物储存和下游河流的损失(Einarsdottir等, 2016; Mendonça等, 2017). 全球湖泊和水库每年

释放的 CO_2 量约为 0.32 PgC (Raymond等, 2013), 并且约有 $5.1 \times 10^{-2} \text{ PgC a}^{-1}$ 的总有机碳(Total organic carbon, TOC)滞留在湖泊中, 其中 $3.5 \times 10^{-2} \text{ PgC a}^{-1}$ 是来源于大气 CO_2 (Downing等, 1993). 另外, 内陆水体的浮游植物和水生植物(挺水植物、浮叶植物、沉水植物和漂浮植物以及湿生植物)、异养生物(浮游动物、鱼类和贝类等)以及微生物等固C潜力巨大(Galy等, 2015), 可分担陆地生态系统的碳中和压力. 同时, 营养状态良好的湖泊, 由于生物群落极为丰富, 生产力水平较高, 有着比较活跃的光合作用和呼吸作用能够促进湖泊C循环(Jia等, 2020; Wang等, 2021).

中文引用格式: 高扬, 王朔月, 陆瑶, 刘建宝, 吕斯丹, 孙昆, 贾琚杰, 李兆喜, 于贵瑞. 2022. 区域陆-水-气碳收支与碳平衡关键过程对地球系统碳中和的意义. 中国科学: 地球科学, 52(5): 832–841, doi: [10.1360/SSTe-2021-0060](https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0060)

英文引用格式: Gao Y, Wang S, Lu Y, Liu J, Lyu S, Sun K, Jia J, Li Z, Yu G. 2022. Carbon budget and balance critical processes of the regional land-water-air interface: Indicating the earth system's carbon neutrality. Science China Earth Sciences, 65(5): 773–782, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9883-3>

陆地生物圈颗粒态有机碳(Particle Organic Carbon, POC)固定与岩石圈有机碳(Organic Carbon, OC)氧化之间的平衡调节着大气C库和氧气库, 而河流从岩石储层向海洋输送沉积POC使陆-气储存层间的C脱离, 所以运移过程中的C氧化则意味着另一种形式的“C逃逸”(Blair等, 2004; Bouchez等, 2010). 河流控制着陆地对近海的净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)输送, 而NPP主要输出形态为POC和溶解性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)(Schlünz和Schneider, 2000), 其中DOC在河口通过氧化作用会快速返回大气中, 而POC则会长时间埋藏在沉积物中, 据估算每年全球从陆地向海洋输送的POC通量高达 $1.25 \times 10^{-7} \sim 3.35 \times 10^{-7} \text{PgC a}^{-1}$ (Galy等, 2015).

陆地生态系统的陆-水-气C收支与C平衡过程对于揭示陆-气和陆-海的C“丢失”过程以及地球系统的碳中和起到了至关重要的作用. 因此, 衔接陆地-海洋的区域陆-水-气C收支与C平衡过程是地球系统碳中和关键过程, 解析其陆-水-气的碳交换与运移耦合过程, 定量评

估其C收支与C平衡机制, 将为深入理解全球变化下陆地生态系统在碳中和过程的中作用提供重要科学依据.

2 陆-水-气碳交换与运移过程

如图1所示, 衔接陆-气交换与陆-海交互过程的陆-水-气耦合过程是涉及4个成分(溶解性无机碳(Dissolved Inorganic Carbon, DIC)、DOC、POC及 CO_2)在三个界面(水-陆界面、水-气界面和底泥-水界面)的复杂循环过程. CO_2 从内陆水体转化到大气中, 即所谓的“C逃逸”, 是全球C循环的一部分(Le Quéré等, 2009), 但目前缺少一个估算全球水体表面积和气体交换速率的框架和全球 CO_2 数据库(高扬和于贵瑞, 2020). 全球内陆水体的水-气界面的溪流和河流的C通量为 1.8PgC a^{-1} ($1.5 \sim 2.1 \text{PgC a}^{-1}$), 湖泊和水库的C通量为 0.32PgC a^{-1} ($0.06 \sim 0.84 \text{PgC a}^{-1}$)(Raymond等, 2013), 其净 CO_2 逃逸率达 1PgC a^{-1} . 全球的大湖泊由于表面积和气体交换速率较大, 约占了50%的排放量; 高纬度和热

图1 全球陆-水-气碳运移与碳收支

陆-水-气C循环是涉及4个成分DIC、DOC、POC及 CO_2 在三个界面(水-陆界面、水-气界面和底泥-水界面)的循环过程, 主要包括以下几个源: DOC、DIC和POC的河流和地下水的输入; DOC、DIC和POC的河流和地下水输出; DIC、DOC和POC的大气沉降输入; CO_2 的吸收与排放; DIC、DOC和POC通过光合作用、矿化作用、絮凝作用的相互转化, POC沉积于底泥以及底泥中的C释放等. C通量等于C浓度(水文和生物地球化学反应)乘以C释放量(降水-土壤水分蒸散发总损失量. 数据源见: 于贵瑞等(2017, 2018)、Bauer等(2013)、Ciais等(2013)、Gao等(2021)、Jia等(2022, 未出版). $1 \text{Pg}(\text{皮克})=10^{15} \text{g}(\text{克})$)

带地区湖泊和水库的 CO_2 通量较大, 其中仅占全球湖泊面积2.4%的热带湖泊却排放了34%的 CO_2 , 这可能是因为更高频率的洪水和暴雨事件增加了热带湖泊的陆-水C传输(Regnier等, 2013). 此外, 由于内陆水体pH和碱度差异, 容易导致评估 CO_2 通量时存在偏差和误差, 同时水体中有机酸的存在, 也很引起 CO_2 通量被高估(Raymond等, 2008).

陆地生态系统通过全球河流输送的C量达 1.7PgC a^{-1} , 其中 0.2PgC a^{-1} 沉积埋藏于内陆水体, 约 0.85PgC a^{-1} 输送至近海(Bauer等, 2013). 河流输送的DOC通量理论上相当于4000~6000年的全球海洋的DOC积累量(Bauer等, 1992), 其中90%以上的DOC成分为芳香反应型, 其在输送过程中通过光催化反应逐步降解, 剩余的DOC高度稳定并长期储存在海洋大陆架(Stubbins等, 2010). 陆地生物圈的POC输出主要受河流的控制和运输影响, 对地面初级生产力不敏感(高扬和于贵瑞, 2020), 即生物圈POC输出率主要取决于河流是否能够将POC从流域调动和运输, 受输沙率的控制, 即物理侵蚀控制, 而不是流域内的POC生产(Galy等, 2007). 物理

侵蚀率影响生物圈POC在海洋沉积物中埋藏的速度, 其作用比硅酸盐风化引起的C固存更强烈(Hilton等, 2012). 因此, 增加物理侵蚀速率有利于生物圈POC的有效转移和埋藏, 同时加强了生物POC的保护(即减少氧化), 从而限制了POC向大气储层返回(Bouchez等, 2014). 全球生物圈POC产量评估为 $0.99\times 10^{-9}\sim 2.14\times 10^{-9}\text{PgC km}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 这转化为全球生物圈POC通量为 $1.07\times 10^{-7}\sim 2.31\times 10^{-7}\text{PgC a}^{-1}$ (Galy等, 2015). 陆地生物圈OC储层通过光合固碳不断补充, 使得生物圈的POC输出增长可以长期持续(Galy和Eglinton, 2011; 张甘霖等, 2019), 所以生物圈埋藏的POC将成为大气 CO_2 长期汇的主要来源, 而构造和气候胁迫的物理侵蚀有利于生物圈POC封存而不是硅酸盐风化(Blair等, 2003; Hilton等, 2011).

3 内陆水体碳收支与碳循环过程

内陆水体的C库主要分为永久性和活动性C库, 一般认为, 底泥表层1m以下的C储存被称为永久性C库,

图2 内陆水体碳收支与碳循环过程

IC库转化过程主要包括: 水-气界面, 大气 CO_2 通过溶解形成DIC(包括 $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ 、 H_2CO_3 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-}), 同时水体DIC也可分解向大气释放 CO_2 ; DIC与PIC之间通过沉淀或溶解进行转化; PIC最终沉积在底泥中, 也可从底泥中释放到水体. OC库的转化过程主要包括: 植物、动物、微生物本身为OC库组成的一部分; 植物残体能够被微生物降解, 动物能够摄食植物以及水体中的DOC和POC, 同时能被微生物降解; 之后POC、DOC既可通过沉积作用埋藏在底泥中, 也可以通过生物地球化学作用释放到水体中

其C含量不随时间变化而改变(Jiao等, 2010; Passow和Carlson, 2012), 但永久C库的深度并无完全定论, 有些湖泊底泥表层30~40cm以下C含量已经达到相当的稳定性(Henson等, 2012). 水柱和底泥表面为活动性C库, 这些C在水-陆界面、水-气界面和水-底泥界面通过无机C库转化过程、有机碳库转化过程、无机与有机碳库之间的转化过程进行C的固定和释放(Barker等, 2013)(图2). 内陆水体生态系统固C过程主要包括植物通过光合作用将无机碳(Inorganic carbon, IC)转化为OC、水体固C及底泥固C(Deng等, 2017). 无机与有机碳库之间的转化过程主要包括: 浮叶植物、挺水植物直接利用大气CO₂, 而浮游植物利用水体中的CO₂ (CO_{2(aq)})和HCO₃⁻进行光合作用产生总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP); 浮游植物和挺水植物通过呼吸作用直接向大气释放CO₂, 而浮游生物、动物通过呼吸作用释放CO₂形成水体的DIC(Bogard等, 2017; Song等, 2018); 同时微生物对OC库的降解和矿化过程也能将OC转化为IC. 上述转化过程影响着内陆水体的固C能力, 进而影响大气及径流C供给与初级生产者净需求之间的平衡(Gao等, 2021).

水体中内源性DOC主要来源于浮游植物光合作用产物的释放以及内源性碎屑物质的分解, 而外源主要是流域陆源的输入(土壤淋溶以及污水排放等)(Larsen等, 2011). 陆源OC的大量输入及其随后的矿化作用被认为是CO₂的主要驱动因素(Raymond等, 2013). POC按来源可分为外源输入(河流输入、大气沉降)和内源降解(水生生物体及代谢、沉积物再悬浮以及DOC转化)(Gao等, 2021). POC对于C封存具有重要意义, 影响OC和IC循环, 并且对于太阳辐射衰减也起到十分重要的作用(Larsen等, 2011). 另外, 包括POC在内的TOC含量是衡量水体有机污染程度的一项综合指标, 对湖泊有机污染起重要指示作用.

大气与水体之间CO₂生物泵和溶解度泵决定水-气界面的CO₂交换(Gao等, 2021), 水体的溶解泵会受到风速、水温、碱度及碳酸盐的分解等因素的影响(Biswas等, 2004), 而生物泵主要依靠水生生物(尤其是浮游植物)的光合作用和呼吸作用(Raymond等, 2013). 内陆水体水-气界面CO₂交换是个复杂的过程, 耦合了化学、生物和物理过程, 涉及很多相关因子(高扬和于贵瑞, 2020). 虽然许多海洋方面的研究认为水-气界面CO₂交换与水体中的碱度、pH和DIC相关性很高, 但

在淡水湖泊中却没有发现很高的相关性. 随着内陆水体C循环研究的深入, 常规获取水体中C浓度的方法往往无法胜任大范围、高频率的水体C循环研究, 如漂浮箱法、梯度法(薄边界层法)、可调谐二极管激光吸收法以、涡度相关. 近年来, 卫星遥感观测因具有覆盖范围广、实时同步等优势, 其水温、叶绿素浓度、初级生产力、风场等遥感产品已经全球化运行, 逐渐成为观测水-气界面CO₂交换通量的重要手段. 另外, 利用生物光学模型结合水色遥感估测水体水色要素成为生物地球化学一种新的研究手段(Moore等, 2014), 并且随着SeaWiFS(宽视场海洋观测传感器)、MODIS(中分辨率成像光谱仪)和MERIS(中等分辨率成像光谱仪)的不断发展(Zhao等, 2014), 以及水色卫星的空间分辨率、时间分辨率以及光谱分辨率显著提高, 为遥感反演提供更好的技术支持, 使短周期的动态监测成为可能. 然而, 由于光学信号较弱, 并受制于现有的传感器波段设置, DOC、POC和CO₂的遥感模型方面研究目前还不是十分成熟(段洪涛等, 2019).

4 全球变化下陆-水-气碳收支与平衡调控机制

4.1 气候变化下陆-水-气碳运移与碳交换

气候变化是河流C输送的重要推动力, 受河流运输的限制, 降水高的流域有更高的C释放率, 快速的河流运输将导致几倍的陆地C输送并干扰沿海C收支(高扬和于贵瑞, 2018; 朴世龙等, 2019). 热带区域风暴引起的极端降雨事件造成大量的河流OC输送, 尤其物理侵蚀过程造成山区大部分POC从流域输送至近海(Bianchi, 2011)(图3). 另外, 水体的DOC浓度增加也是由于降雨频率与极端降雨事件引起, 如单次热带风暴可以导致超过40%的年均河流的DOC输出(Yoon和Raymond, 2012), 而在年际时间尺度上, 单次大洪水可以导致山区80~90%的POC输出(Bianchi和Bauer, 2011). 因此, 预测风暴频率与降雨变化对准确了解流域C吞吐量、水流路径、溶解率、流域C储量, 以及对评估陆地-河流C输送至沿海的DOC和POC量至关重要(Liu等, 2010). 温度同时控制陆-水-气C循环的重要生物和非生物过程(Bianchi等, 2013), 对C通量的净效应可以区分不同地区OC和IC的形式差异(Laruelle等, 2013). 温度对于水-气界面CO₂通量的影响主要通过有机物质分解速度和水中植物生长的影响起作用, 同

样由于底泥呼吸作用占到相当 CO_2 释放量, 所以底层水体的温度对 CO_2 通量也有一定贡献(Rantakari和Kortelainen, 2005). 温度升高会促进底泥的呼吸, 其次水温也会影响 CO_2 在水体中的传输速度、溶解能力和水合速率, 所以温度越高, CO_2 在水中的溶解度也就越低, 释放量也就越大(Soumis等, 2004). 气候变化下永久冻土消融、海平面上升及湿地退化等引起生物地球化学循环改变都会导致陆-水-气界面的OC和IC源、汇的方向与大小、 CO_2 排放量以及大陆架上输出的OC和IC的大小变化.

4.2 人类活动变化下陆-水-气碳运移与碳交换调控

人类活动引起水平衡的改变将导致流域C储量及C流动变化, 如植被盖度变化和灌溉作用都是调控地表蒸散发和地表温度的重要手段(Raymond等, 2007) (图3). 因此, 人类对土地利用变化与管理被认为是改变河流C通量到近海的主要推动力. 农业活动导致沉积物和POC运移增加, 陆源物质会重新贮存到土壤中或者被人造的水库和农业蓄水沟拦截(Beaulieu等, 2012), 将减少河流POC的通量输出接近90%左右(Laudon等, 2012; Yoon和Raymond, 2012). 同时, 农业活动增强了河流碳酸氢盐以及硫酸盐的输入将导致全球DIC通量上升, 而由于降水机制和土地河流管理方式的变化可能导致POC通量下降(Hilton等, 2008). 森林

景观输出的OC对光化学和微生物降解有更低的敏感性, 而湿地和泥炭地系统向其他土地利用的转变也会影响OC输出的数量和时间(Yoon和Raymond, 2012). 城市污水排放的氨和OC经微生物氧化生成酸, 造成非常低的pH和高 $p\text{CO}_2$ 条件, 引起河口水体中 CO_2 排放增加, 以及生产力强、富营养的河口水域或河流OC呼吸作用的水平提高(Godsey等, 2009). 因此堤岸建设、城市污水排放、疏浚、航道蓄水等人类活动也逐渐成为影响陆-水-气C源、C循环和C收支的重要因素. 此外, 人类活动造成的水体富营养化对于水-气界面的 CO_2 交换也具有重要作用, 并且这种作用是双重的. 例如, 高营养水平的湖泊无论是外源输入还是内源产生的有机物质都较高, 其相应分解和矿化作用也高(Huttunen等, 2003); 同时高营养水平湖泊的水生植物和浮游藻类生长旺盛, 如藻型湖泊水体中的叶绿素通常可达到 $100\sim 200\mu\text{g L}^{-1}$, 可以固定相当数量的 CO_2 (Scheffer和van Nes, 2007). 富营养化湖泊中的高营养负荷刺激了有机物矿化、增加了 CO_2 排放(Kortelainen等, 2006; Perga等, 2016), 而外部C输入进一步增强了湖泊的 CO_2 排放(McDonald等, 2013; Wilkinson等, 2016).

5 中国区域陆-水-气碳收支现状及潜力

如图4所示, 整个中国区域的陆地C汇量为(0.41

图3 全球变化下陆-水-气碳循环调控机制

图4 中国区域陆-水-气碳运移与碳收支

单位: PgC a^{-1} , 数据源见: 于贵瑞等(2017, 2018)、Bauer等(2013)、Ciais等(2013)、Gao等(2021)、Jia等(2022, 未出版)

± 0.12) PgC a^{-1} , 而通过河流输送的陆地C量为 $7.5 \times 10^{-2} \text{PgC a}^{-1}$, 水-气界面的 CO_2 净逃逸量为 $4.0 \times 10^{-3} \text{PgC a}^{-1}$. 目前仅有湖泊C沉积的评估量为 $2.0 \times 10^{-3} \text{PgC a}^{-1}$, 而河流及水库沉积C评估的缺失导致陆-水以及陆-海C运移存在极大的不确定性, 也是整个全球C循环与C“丢失”评估缺失监测数据的重要环节. 由于中国湖泊众多尚未形成覆盖全国、标准化、系统性的湖泊C汇观测体系, 导致对部分高原湖泊及碱性湖泊观测数据缺失, 从而水-气界面的C通量存在被严重低估. 所以只有建立科学完善的内陆水体C汇计量标准体系, 才能更加清晰地认识内陆水体的C源汇特征以及更加准确地评估湖泊的C增汇潜力.

由于浮游植物的生长受光限制的影响, 河流输送的C多来自土壤侵蚀, 河流C通量的大小反映了流域内的土壤侵蚀状况(朱先进等, 2012). 中国主要河流的多年平均径流量约为 $8.12 \times 10^9 \sim 9.03 \times 10^{12} \text{m}^3$, 多年平均输沙量约为 $0.08 \times 10^7 \sim 7.78 \times 10^9 \text{t}$. 研究表明水蚀引起的中国土壤C迁移为 $7.46 \times 10^{-2} \text{PgC a}^{-1}$, 其中OC为 $5.15 \times 10^{-2} \text{PgC a}^{-1}$, IC为 $2.31 \times 10^{-2} \text{PgC a}^{-1}$ (Gao等, 2011). 截止2017年底, 中国已建成水库98795座, 水域总面积接近 $7.0 \times 10^4 \text{km}^2$, 与湖泊水域面积相当, 中国水库目前水体 CO_2 通量 $1.94 \times 10^{-13} \text{PgC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 略高于全球平均水平 $1.20 \times 10^{-13} \text{PgC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ (Li等, 2018). 中国天然湖泊总面积高达 $9.1 \times 10^4 \text{km}^2$, 湖泊的区域分布极不均衡, 东部平原湖区和青藏高原湖区的湖泊面积占到了全国湖泊总面积的77.2%, 是中国湖泊分布最为集中的区域(马荣华等, 2011). 中国天然湖泊每年的

CO_2 交换量达 $3.99 \times 10^{-3} \text{PgC a}^{-1}$ (Wen等, 2017), 而GPP为 $1.94 \times 10^{-2} \text{PgC a}^{-1}$ (Gao等, 2021), 可见其C汇潜力巨大. 由于不同湖泊对浮游植物生长的限制因素不同, 使得湖泊生产力并没有达到最大, 如果改进或消除这些限制因素, 将极大地提高湖泊的GPP, 进而增加其吸收大气 CO_2 的能力. 如图5所示, 中国云贵高原湖区和东部平原湖泊的GPP水平较高, 最高达到了 $1697.25 \text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 而青藏高原地区的GPP平均在 $62.05 \text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 左右, 处于较低水平(图5), 上述区域都是中国具有C汇潜力的关键区域. 根据碳中和战略, 预计中国将在2030年左右达到峰值, 排放量为每年113亿吨, 意味着中国每年还有约40亿~80亿吨的 CO_2 当量需要依靠替代能源或者负排放来中和(焦念志, 2021). 因此, 科学评估中国关键区域陆-水-气的C收支对于提高陆地生态系统的C汇潜力具有重要意义.

6 展望

全球变化下陆-水-气C收支评估存在复杂性和不确定性, 很难区分自然或者人类活动如何影响陆-水-气C循环变化. 尽管人类活动调控陆-水的C通量、陆-气及水-气的C交换等一系列驱动力都已确定, 但是定量分析这些人为活动干扰对C通量的影响却很困难. 所以了解不同人类活动对陆-水-气C运移与C交换过程的确切影响方向与幅度不仅对于全球C收支平衡具有重要意义, 而且对于衡量全球陆地C汇(定义为 CO_2 收支的剩余部分)也很重要. 陆-海OC输送研究表明: 陆

图5 中国湖泊总初级生产力分布特征

数据源见: 于贵瑞等(2017, 2018)、Bauer等(2013)、Ciais等(2013)、Gao等(2021)、Jia等(未出版)

地生态系统的C输出中有不可忽视的一部分游离C储存在水域和沉积物中, 从而导致综合的陆地C储量可能被高估了. 为了支持国家碳中和政策战略, 陆-水-气C输送与C交换及其通量的时空演化与量化以及沿海地区C过程在地球系统模型中的整合十分必要.

此外, 中国湖泊、河流、水库数量众多、资源丰富, 淡水的渔业养殖也具有相当可观的增汇潜力, 我们也应当大力推动湖泊等淡水的C汇渔业发展, 让湖泊C汇渔业为中国的碳中和贡献更多的力量. 针对内陆水体酸化和富营养化的问题, 通过建立基于微生物碳泵、生物泵和碳酸盐泵原理的综合负排放途径, 其主要原理是在缺氧、酸化的环境里, 通过施加矿物、增加碱度, 提高自生碳酸盐产量, 并与OC一起埋葬, 实现综合储C增量的效果(Schrag等, 2013). 对于水体生产力较低的区域, 通过调控方式适当增加养分供给量提高水体生产力, 从而提高水体的C汇水平. 另外, 合理的措施改变河流路径、增加河道宽度、河道及水库拦截等都是提高流域C储量的有效途径. 最后, 提倡科学管理土地与农业活动相结合, 如植被变化、湿地和泥炭地变迁与农业活动合理结合, 如提高灌溉作用效率以及减少碳酸氢盐以及硫酸盐输入等. 目前中国

学者已经对陆-水-气碳中和的一些相关领域展开了广泛研究, 但是还有很多重要的科学问题亟需学者们进一步探索, 例如: 如何更好的统筹陆-水-气碳收支, 将水体由C源转变为C汇; 如何在减排的同时更好地增汇, 使更多的水体负排放途径与技术更好地在全国范围内推广; 如何使水产养殖更好地兼顾环境保护与经济发展, 使养殖区更有效地进行增汇减排.

参考文献

- 段洪涛, 罗菊花, 曹志刚, 薛坤, 肖启涛, 刘东. 2019. 流域水环境遥感研究进展与思考. 地理科学进展, 38: 1182–1195
- 高扬, 于贵瑞. 2018. 流域生物地球化学循环与水文耦合过程及其调控机制. 地理学报, 73: 1381–1393
- 高扬, 于贵瑞. 2020. 区域C-N-H₂O耦合循环过程及其驱动机制. 中国科学: 地球科学, 50: 1195–1205
- 焦念志. 2021. 研发海洋“负排放”技术 支撑国家“碳中和”需求. 中国科学院院刊, 36: 179–187
- 马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 姜加虎, 王苏民, 冯学智, 李爱农, 孔繁翔, 薛滨, 吴敬禄, 李世杰. 2011. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 41: 394–401
- 朴世龙, 张新平, 陈安平, 刘强, 连旭, 王旭辉, 彭书时, 吴秀臣. 2019. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响. 中国科学: 地球科

- 学, 49: 1321–1334
- 于贵瑞, 孙晓敏, 等, 著. 2017. 陆地生态系统通量观测的原理与方法 (第2版)——17章中国通量观测研究网络建设、研究进展及发展方向. 北京: 高等教育出版社. 534–535
- 于贵瑞, 赵新全, 刘国华, 主编. 2018. 中国陆地生态系统增汇技术途径及其潜力分析. 北京: 科学出版社
- 张甘霖, 朱永官, 邵明安. 2019. 地球关键带过程与水土资源可持续利用的机理. 中国科学: 地球科学, 49: 1945–1947
- 朱先进, 于贵瑞, 高艳妮, 王秋凤. 2012. 中国河流入海颗粒态碳通量及其变化特征. 地理科学进展, 31: 118–122
- Barker P A, Hurrell E R, Leng M J, Plessen B, Wolff C, Conley D J, Keppens E, Milne I, Cumming B F, Laird K R, Kendrick C P, Wynn P M, Verschuren D. 2013. Carbon cycling within an East African lake revealed by the carbon isotope composition of diatom silica: A 25-ka record from Lake Challa, Mt. Kilimanjaro. *Quat Sci Rev*, 66: 55–63
- Bastviken D, Tranvik L J, Downing J A, Crill P M, Enrich-Prast A. 2011. Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science*, 331: 50
- Bauer J E, Cai W J, Raymond P A, Bianchi T S, Hopkinson C S, Regnier P A G. 2013. The changing carbon cycle of the coastal ocean. *Nature*, 504: 61–70
- Bauer J E, Williams P M, Druffel E R M. 1992. ^{14}C activity of dissolved organic carbon fractions in the north-central Pacific and Sargasso Sea. *Nature*, 357: 667–670
- Beaulieu E, Goddérès Y, Donnadieu Y, Labat D, Roelandt C. 2012. High sensitivity of the continental-weathering carbon dioxide sink to future climate change. *Nat Clim Change*, 2: 346–349
- Bianchi T S, Bauer J E. 2011. Particulate Organic Carbon Cycling and Transformation. In: Wolanski E, McLusky D, eds. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. London: Academic Press. 69–117
- Bianchi T S, Garcia-Tigreros F, Yvon-Lewis S A, Shields M, Mills H J, Butman D, Osburn C, Raymond P, Shank G C, Dimarco S F, Walker N, Reese B K, Mullins-Perry R, Quigg A, Aiken G R, Grossman E L. 2013. Enhanced transfer of terrestrially derived carbon to the atmosphere in a flooding event. *Geophys Res Lett*, 40: 116–122
- Bianchi T S. 2011. The role of terrestrially derived organic carbon in the coastal ocean: A changing paradigm and the priming effect. *Proc Natl Acad Sci USA*, 108: 19473–19481
- Biswas H, Mukhopadhyay S K, De T K, Sen S, Jana T K. 2004. Biogenic controls on the air-water carbon dioxide exchange in the Sundarban mangrove environment, northeast coast of Bay of Bengal, India. *Limnol Oceanogr*, 49: 95–101
- Blair N E, Leithold E L, Aller R C. 2004. From bedrock to burial: The evolution of particulate organic carbon across coupled watershed-continental margin systems. *Mar Chem*, 92: 141–156
- Blair N E, Leithold E L, Ford S T, Peeler K A, Holmes J C, Perkey D W. 2003. The persistence of memory: The fate of ancient sedimentary organic carbon in a modern sedimentary system. *Geochim Cosmochim Acta*, 67: 63–73
- Bogard M J, Vachon D, St.-Gelais N F, del Giorgio P A. 2017. Using oxygen stable isotopes to quantify ecosystem metabolism in northern lakes. *Biogeochemistry*, 133: 347–364
- Bouchez J, Beyssac O, Galy V, Gaillardet J, France-Lanord C, Maurice L, Moreira-Turcq P. 2010. Oxidation of petrogenic organic carbon in the Amazon floodplain as a source of atmospheric CO_2 . *Geology*, 38: 255–258
- Bouchez J, Galy V, Hilton R G, Gaillardet J, Moreira-Turcq P, Pérez M A, France-Lanord C, Maurice L. 2014. Source, transport and fluxes of Amazon River particulate organic carbon: Insights from river sediment depth-profiles. *Geochim Cosmochim Acta*, 133: 280–298
- Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Le Quéré C, Myneni R B, Piao S, Thornton P. 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press
- Deng Y B, Zhang Y L, Li D P, Shi K, Zhang Y B. 2017. Temporal and spatial dynamics of phytoplankton primary production in Lake Taihu derived from MODIS data. *Remote Sens*, 9: 195
- Downing J P, Meybeck M, Orr J C, Twilley R R, Scharpenseel H W. 1993. Land and water interface zones. *Water Air Soil Pollut*, 70: 123–137
- Einarsdottir K, Wallin M B, Sobek S. 2016. High terrestrial carbon load via groundwater to a boreal lake dominated by surface water inflow. *J Geophys Res-Biogeosci*, 122: 15–29
- Galy V, Eglinton T. 2011. Protracted storage of biospheric carbon in the Ganges-Brahmaputra basin. *Nat Geosci*, 4: 843–847
- Galy V, France-Lanord C, Beyssac O, Faure P, Kudrass H, Palhol F. 2007. Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system. *Nature*, 450: 407–410
- Galy V, Peucker-Ehrenbrink B, Eglinton T. 2015. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion. *Nature*, 521: 204–207
- Gao Y N, Fang H J, Yu G R. 2011. Spatial distribution and temporal dynamics of soil carbon removal caused by water erosion in China. *J Resour Ecol*, 2: 210–216
- Gao Y, Jia J J, Lu Y, Yang T T, Lyu S D, Shi K, Zhou F, Yu G R. 2021. Determining dominating control mechanisms of inland water carbon

- cycling processes and associated gross primary productivity on regional and global scales. *Earth-Sci Rev*, 213: 103497
- Godsey S E, Kirchner J W, Clow D W. 2009. Concentration-discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments. *Hydrol Process*, 23: 1844–1864
- Henson S A, Sanders R, Madsen E. 2012. Global patterns in efficiency of particulate organic carbon export and transfer to the deep ocean. *Glob Biogeochem Cycle*, 26: GB1028
- Hilton R G, Galy A, Hovius N, Chen M C, Horng M J, Chen H. 2008. Tropical-cyclone-driven erosion of the terrestrial biosphere from mountains. *Nat Geosci*, 1: 759–762
- Hilton R G, Galy A, Hovius N, Kao S J, Horng M J, Chen H. 2012. Climatic and geomorphic controls on the erosion of terrestrial biomass from subtropical mountain forest. *Glob Biogeochem Cycle*, 26: 2012GB004314
- Hilton R G, Meunier P, Hovius N, Bellingham P J, Galy A. 2011. Landslide impact on organic carbon cycling in a temperate montane forest. *Earth Surf Proc Land*, 36: 1670–1679
- Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, Juutinen S, Larmola T, Hammar T, Silvola J, Martikainen P J. 2003. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions. *Chemosphere*, 52: 609–621
- Jia J J, Gao Y, Zhou F, Shi K, Johnes P J, Dungait J A J, Ma M Z, Lu Y. 2020. Identifying the main drivers of change of phytoplankton community structure and gross primary productivity in a river-lake system. *J Hydrol*, 583: 124633
- Jia J J, Gao Y, Qin B Q, Dungait J J, Liu Y, Lu Y, Shi K, Yu G R. 2022. Evolving geographical gross primary productivity patterns in global lake systems and controlling mechanisms of associated phytoplankton communities since the 1950s. *Earth-Sci Rev*, under review
- Jiao N, Herndl G J, Hansell D A, Benner R, Kattner G, Wilhelm S W, Kirchman D L, Weinbauer M G, Luo T, Chen F, Azam F. 2010. Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nat Rev Microbiol*, 8: 593–599
- Kortelainen P, Rantakari M, Huttunen J T, Mattsson T, Alm J, Juutinen S, Larmola T, Silvola J, Martikainen P J. 2006. Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO₂ evasion from small boreal lakes. *Glob Change Biol*, 12: 1554–1567
- Larsen S, Andersen T, Hessen D O. 2011. Climate change predicted to cause severe increase of organic carbon in lakes. *Glob Change Biol*, 17: 1186–1192
- Laruelle G G, Dürr H H, Lauerwald R, Hartmann J, Slomp C P, Goossens N, Regnier P A G. 2013. Global multi-scale segmentation of continental and coastal waters from the watersheds to the continental margins. *Hydrol Earth Syst Sci*, 17: 2029–2051
- Laudon H, Buttle J, Carey S K, McDonnell J, McGuire K, Seibert J, Shanley J, Soulsby C, Tetzlaff D. 2012. Cross-regional prediction of long-term trajectory of stream water DOC response to climate change. *Geophys Res Lett*, 39: L18404
- Le Quéré C, Raupach M R, Canadell J G, Marland G, Bopp L, Ciais P, Conway T J, Doney S C, Feely R A, Foster P, Friedlingstein P, Gurney K, Houghton R A, House J I, Huntingford C, Levy P E, Lomas M R, Majkut J, Metzl N, Ometto J P, Peters G P, Prentice I C, Randerson J T, Running S W, Sarmiento J L, Schuster U, Sitch S, Takahashi T, Viovy N, van der Werf G R, Woodward F I. 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nat Geosci*, 2: 831–836
- Li S Y, Bush R T, Santos I R, Zhang Q F, Song K S, Mao R, Wen Z D, Lu X X. 2018. Large greenhouse gases emissions from China's lakes and reservoirs. *Water Res*, 147: 13–24
- Liu K K, Atkinson L, Quiñones R, Talaue-McManus L. 2010. Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins. Berlin: Springer
- McDonald C P, Stets E G, Striegl R G, Butman D. 2013. Inorganic carbon loading as a primary driver of dissolved carbon dioxide concentrations in the lakes and reservoirs of the contiguous United States. *Glob Biogeochem Cycle*, 27: 285–295
- Mendonça R, Müller R A, Clow D, Verpoorter C, Raymond P, Tranvik L J, Sobek S. 2017. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs. *Nat Commun*, 8: 1694
- Moore T S, Dowell M D, Bradt S, Ruiz Verdu A. 2014. An optical water type framework for selecting and blending retrievals from bio-optical algorithms in lakes and coastal waters. *Remote Sens Environ*, 143: 97–111
- Passow U, Carlson C A. 2012. The biological pump in a high CO₂ world. *Mar Ecol Prog Ser*, 470: 249–271
- Perga M E, Maberly S C, Jenny J P, Alric B, Pignol C, Naffrechoux E. 2016. A century of human-driven changes in the carbon dioxide concentration of lakes. *Glob Biogeochem Cycle*, 30: 93–104
- Rantakari M, Kortelainen P. 2005. Interannual variation and climatic regulation of the CO₂ emission from large boreal lakes. *Glob Change Biol*, 11: 1368–1380
- Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, Sobek S, McDonald C, Hoover M, Butman D, Striegl R, Mayorga E, Humborg C, Kortelainen P, Dürr H, Meybeck M, Ciais P, Guth P. 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 503: 355–359
- Raymond P A, McClelland J W, Holmes R M, Zhulidov A V, Mull K, Peterson B J, Striegl R G, Aiken G R, Gurtovaya T Y. 2007. Flux and age of dissolved organic carbon exported to the Arctic Ocean: A carbon isotopic study of the five largest arctic rivers. *Glob Biogeochem Cycle*, 21: GB4011

- Raymond P A, Oh N H, Turner R E, Broussard W. 2008. Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River. *Nature*, 451: 449–452
- Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P, Mackenzie F T, Gruber N, Janssens I A, Laruelle G G, Lauerwald R, Luyssaert S, Andersson A J, Arndt S, Arnosti C, Borges A V, Dale A W, Gallego-Sala A, Goddris Y, Goossens N, Hartmann J, Heinze C, Ilyina T, Joos F, LaRowe D E, Leifeld J, Meysman F J R, Munhoven G, Raymond P A, Spahni R, Suntharalingam P, Thullner M. 2013. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nat Geosci*, 6: 597–607
- Scheffer M, van Nes E H. 2007. Shallow lakes theory revisited: Various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia*, 584: 455–466
- Schlnz B, Schneider R R. 2000. Transport of terrestrial organic carbon to the oceans by rivers: Re-estimating flux- and burial rates. *Int J Earth Sci*, 88: 599–606
- Schrag D P, Higgins J A, Macdonald F A, Johnston D T. 2013. Authigenic carbonate and the history of the global carbon cycle. *Science*, 339: 540–543
- Song C, Dodds W K, Regg J, Argerich A, Baker C L, Bowden W B, Douglas M M, Farrell K J, Flinn M B, Garcia E A, Helton A M, Harms T K, Jia S, Jones J B, Koenig L E, Kominoski J S, McDowell W H, McMaster D, Parker S P, Rosemond A D, Ruffing C M, Sheehan K R, Trentman M T, Whiles M R, Wollheim W M, Ballantyne I v F. 2018. Continental-scale decrease in net primary productivity in streams due to climate warming. *Nat Geosci*, 11: 415–420
- Soumis N, Duchemin , Canuel R, Lucotte M. 2004. Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States. *Glob Biogeochem Cycle*, 18: GB3022
- Stubbins A, Spencer R G M, Chen H, Hatcher P G, Mopper K, Hernes P J, Mwamba V L, Mangu A M, Wabakanghanzi J N, Six J. 2010. Illuminated darkness: Molecular signatures of Congo River dissolved organic matter and its photochemical alteration as revealed by ultrahigh precision mass spectrometry. *Limnol Oceanogr*, 55: 1467–1477
- Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, Loiselle S A, Striegl R G, Ballatore T J, Dillon P, Finlay K, Fortino K, Knoll L B, Kortelainen P L, Kutser T, Larsen S, Laurion I, Leech D M, McCallister S L, McKnight D M, Melack J M, Overholt E, Porter J A, Prairie Y, Renwick W H, Roland F, Sherman B S, Schindler D W, Sobek S, Tremblay A, Vanni M J, Verschoor A M, von Wachenfeldt E, Weyhenmeyer G A. 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnol Oceanogr*, 54: 2298–2314
- Wang S Y, Gao Y, Jia J J, Sun K, Lyu S D, Li Z X, Lu Y, Wen X F. 2021. Water level as the key controlling regulator associated with nutrient and gross primary productivity changes in a large flood-plain-lake system (Lake Poyang), China. *J Hydrol*, 599: 126414
- Wanninkhof R, Park G H, Takahashi T, Sweeney C, Feely R, Nojiri Y, Gruber N, Doney S C, McKinley G A, Lenton A, Le Qur C, Heinze C, Schwinger J, Graven H, Khattiwala S. 2013. Global ocean carbon uptake: Magnitude, variability and trends. *Biogeosciences*, 10: 1983–2000
- Wen Z D, Song K S, Shang Y X, Fang C, Li L, Lv L L, Lv X G, Chen L J. 2017. Carbon dioxide emissions from lakes and reservoirs of China: A regional estimate based on the calculated $p\text{CO}_2$. *Atmos Environ*, 170: 71–81
- Wilkinson G M, Buelo C D, Cole J J, Pace M L. 2016. Exogenously produced CO_2 doubles the CO_2 efflux from three north temperate lakes. *Geophys Res Lett*, 43: 1996–2003
- Yoon B, Raymond P A. 2012. Dissolved organic matter export from a forested watershed during Hurricane Irene. *Geophys Res Lett*, 39: L18402
- Zhao W J, Wang G Q, Cao W X, Cui T W, Wang G F, Ling J F, Sun L, Zhou W, Sun Z H, Xu Z T, Hu S B. 2014. Assessment of SeaWiFS, MODIS, and MERIS ocean colour products in the South China Sea. *Int J Remote Sens*, 35: 4252–4274

(责任编辑: 朴世龙)