

湖泊湿地碳汇功能形成机制及碳储量评估方法研究进展

王媛^{1,2}, 黄彬彬^{1,2}, 张真^{1,3}, 王庆贵², 高玉国^{1,3}, 曾武军^{1,3*}, 刘冠成^{1,2*}

¹山东微山湖湿地生态系统定位观测研究站, 山东 济宁

²曲阜师范大学生命科学学院, 山东 济宁

³济宁市南四湖自然保护区服务中心, 山东 济宁

收稿日期: 2026年5月7日; 录用日期: 2026年6月19日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

湖泊湿地是陆地生态系统与水域生态系统相互作用最强烈的生态交错带, 在区域碳循环和全球气候调节中具有重要作用。与森林、草地等典型陆地生态系统相比, 湖泊湿地长期处于水分饱和或季节性淹水状态, 低氧环境能够抑制有机质分解, 促进植物残体、悬浮颗粒有机碳和沉积物有机碳的长期保存, 从而形成重要的碳汇功能。近年来, 随着“双碳”目标和湿地保护修复工作的推进, 湖泊湿地碳固定、碳储量和碳埋藏速率的准确评估逐渐成为湿地生态学和碳循环研究的热点。已有研究表明, 湖泊和水库沉积物有机碳埋藏是内陆水体碳循环的重要组成部分, 且湖泊沉积物在长期尺度上能够将有机碳移出短期生物圈-大气碳循环。全球湖泊和水库有机碳埋藏研究也指出, 内陆水体虽然面积有限, 但其沉积碳汇功能不容忽视。本文从湖泊湿地碳汇功能的形成机制、主要影响因素、碳储量评估方法及未来研究方向等方面进行综述。总体来看, 湖泊湿地碳汇形成主要受植被初级生产、沉积物碳埋藏、水文过程、营养盐输入、氧化还原环境和人类活动共同调控; 碳储量评估方法主要包括样地实测法、沉积柱芯与同位素定年法、遥感反演法、碳收支模型法和多源数据融合方法。未来研究需要加强湖泊湿地植被-水体-沉积物连续体的综合观测, 提升不同时间尺度碳储量与碳汇速率的区分能力, 并将碳储量、温室气体排放和生态修复管理结合起来, 为湖泊湿地碳汇功能提升和生态调控提供科学依据。

关键词

湖泊湿地, 碳汇, 碳储量, 沉积物有机碳, 碳埋藏, 评估方法

Research Progress on the Formation Mechanisms of Carbon Sink Functions and Carbon Storage Assessment Methods in Lake Wetlands

*通讯作者。

文章引用: 王媛, 黄彬彬, 张真, 王庆贵, 高玉国, 曾武军, 刘冠成. 湖泊湿地碳汇功能形成机制及碳储量评估方法研究进展[J]. 地理科学研究, 2026, 15(3): 583-596. DOI: 10.12677/gser.2026.153054

Yuan Wang^{1,2}, Binbin Huang^{1,2}, Zhen Zhang^{1,3}, Qinggui Wang², Yuguo Gao^{1,3},
Wujun Zeng^{1,3*}, Guancheng Liu^{1,2*}

¹Shandong Weishan Lake Wetland Ecosystem Observation Research Station, Jining Shandong

²School of Life Sciences, Qufu Normal University, Jining Shandong

³Jining Nansihu Nature Reserve Service Center, Jining Shandong

Received: May 7, 2026; accepted: June 19, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

Lake wetlands are ecological ecotones where terrestrial ecosystems and aquatic ecosystems interact most strongly, and they play an important role in regional carbon cycling and global climate regulation. Compared with typical terrestrial ecosystems such as forests and grasslands, lake wetlands are in a state of long-term water saturation or seasonal inundation. The low-oxygen environment can inhibit organic matter decomposition and promote the long-term preservation of plant residues, suspended particulate organic carbon, and sediment organic carbon, thereby forming an important carbon sink function. In recent years, with the advancement of the “dual carbon” goals and wetland protection and restoration work, the accurate assessment of carbon fixation, carbon storage, and carbon burial rates in lake wetlands has gradually become a research hotspot in wetland ecology and carbon cycle studies. Existing studies have shown that organic carbon burial in lake and reservoir sediments is an important component of the carbon cycle in inland waters, and that lake sediments can remove organic carbon from the short-term biosphere-atmosphere carbon cycle over long timescales. Global studies on organic carbon burial in lakes and reservoirs have also pointed out that although inland waters occupy a limited area, their sedimentary carbon sink function cannot be ignored. This paper reviews the formation mechanisms, main influencing factors, carbon storage assessment methods, and future research directions of the carbon sink function of lake wetlands. Overall, the formation of carbon sinks in lake wetlands is mainly jointly regulated by vegetation primary production, sediment carbon burial, hydrological processes, nutrient input, redox environment, and human activities. The main methods for assessing carbon storage include field plot measurement, sediment cores combined with isotope dating, remote sensing inversion, carbon budget models, and multi-source data fusion methods. Future research needs to strengthen the integrated observation of the lake wetland vegetation-water-sediment continuum, improve the ability to distinguish carbon storage from carbon sink rates at different temporal scales, and combine carbon storage, greenhouse gas emissions, and ecological restoration management, so as to provide a scientific basis for enhancing the carbon sink function and ecological regulation of lake wetlands.

Keywords

Lake Wetlands, Carbon Sink, Carbon Storage, Sediment Organic Carbon, Carbon Burial, Assessment Methods

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湿地是陆地 - 水域交错带中碳密度较高、碳循环过程较为复杂的生态系统类型，尤其是泥炭地、淡

水沼泽、盐沼和红树林等湿地类型，通常具有较高的有机碳累积能力[1][2]。湿地碳汇功能主要体现在两个方面：一方面，湿地植物通过光合作用固定大气 CO₂，并将其转化为地上和地下生物量碳；另一方面，凋落物、根系残体及外源沉积有机质在淹水、缺氧环境下分解速率较低，促进有机碳在土壤和沉积物中的长期埋藏与保存[3][4]。然而，湿地并非单纯的碳汇系统，其碳循环同时受到水文条件、氧化还原状态、植物生产力、微生物分解、沉积/泥炭累积以及 CO₂ 和 CH₄ 排放等过程的共同调控。Mitsch 等[5]对湿地碳循环和气候效应的研究指出，湿地既是 CO₂ 的重要吸收和储存场所，也可能释放 CH₄。Cui 等[6]的综述也强调，湿地水文波动会通过氧化还原状态、底物供应、电子流动、气体传输和微生物群落结构等途径影响 CH₄ 产生与排放。因此湿地碳汇功能评价不能只关注碳固定量，还需要考虑碳储存的长期性和温室气体排放的综合效应。

湖泊湿地是由湖泊水体、湖滨带植被、沉积物以及周边流域物质输入共同作用形成的水陆复合生态系统，具有明显的水陆交错带属性。湖泊水陆交错带连接陆地生态系统与水体生态系统，在径流调控、营养盐迁移转化、生物栖息地维持和湖泊生态功能稳定中发挥重要作用[7]。相较于一般植被型湿地，湖泊湿地碳循环不仅包括湖滨植被的光合固碳和枯落物输入，还包括水体初级生产、流域外源有机碳输入、沉积物有机碳埋藏以及 CO₂、CH₄ 等温室气体释放等过程[8]-[10]。Cole 等[11]指出，内陆水体不应被视为陆地碳循环中的被动运输通道，而是具有碳转化、输出、埋藏和释放功能的重要组成部分。

湖泊湿地碳汇功能形成机制及碳储量评估方法的概念框架



Figure 1. Conceptual framework of the formation mechanisms of carbon sink function and carbon stock assessment methods in lake wetlands

图 1. 湖泊湿地碳汇功能形成机制及碳储量评估方法的概念框架

为避免不同概念混用，本文首先对“碳储量”“碳汇速率”和“净气候效应”进行界定。碳储量是指某一时间点湖泊湿地植被、水体、土壤或沉积物等碳库中已累积的碳量，通常用于表征碳库大小。碳汇速率是指单位时间内通过植被光合固定、有机质输入、沉积物沉降与埋藏等过程新增固定或保存的碳量，

更强调碳库的动态变化。其中, 植被净初级生产力(NPP)主要反映生物量碳固定过程, 而沉积物碳埋藏速率则更能体现有机碳从短期碳循环中被移除并进入长期保存库的能力。净气候效应则是在碳固定、碳储存和碳埋藏的基础上, 进一步综合 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等温室气体排放后的气候调节结果。因此, 湖泊湿地碳汇功能评价不应仅依据碳储量大小或有机碳埋藏量判断, 还应同时考虑碳汇速率、碳库稳定性以及温室气体排放对净气候效应的抵消或增强作用。基于上述认识, 本文构建了湖泊湿地碳汇功能形成机制及碳储量评估方法的概念框架(见图 1)。该框架以水文过程、营养盐输入、沉积物性质和人类活动等为主要外部驱动因素, 强调湖泊湿地中植被-水体-沉积物连续体对碳输入、转化、埋藏与温室气体排放过程的综合调控作用。其中, 植物固碳与有机质输入为碳汇形成提供物质基础, 微生物分解、沉积物埋藏和矿物保护共同影响有机碳的稳定保存, 而 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体排放则决定湖泊湿地碳汇功能的净气候效应。在此基础上, 样地实测、沉积柱芯与同位素定年、温室气体通量监测、碳收支模型以及多源数据融合等方法可共同用于湖泊湿地碳储量和碳汇功能的综合评估。

2. 湖泊湿地碳汇功能的形成机制

2.1. 植被初级生产是湖泊湿地碳输入的基础

湿地植物通过光合作用吸收大气 CO₂, 将其转化为地上和地下生物量, 是湖泊湿地碳汇形成的直接来源之一[12][13]。湖滨带挺水植物、沉水植物、浮叶植物和湿生草本植物均可通过茎叶、根系和根系分泌物向湿地系统输入有机碳[13]。其中, 地下根系和根状茎对土壤有机碳积累尤为重要, 因为地下生物量更容易进入土壤和沉积物, 并在低氧环境下得到较长期保存[14][15]。淡水湿地碳储存和碳通量综述表明, 湿地碳库形成依赖于植物生产力、残体输入、分解过程和水文条件之间的平衡[5]。

不同生活型湿地植物对碳输入的贡献存在差异[12][16]。以芦苇、香蒲等挺水植物为代表, 其通常具有较高的地上和地下生物量, 能够通过枯落物归还、根系周转和根系分泌物持续向沉积物输入有机碳[15][17]。沉水植物和浮叶植物则更多通过水体初级生产、残体沉降和根际过程影响碳积累过程[18][19]。同时, 植物群落组成、生产力水平和根系分布深度也会影响有机碳进入沉积物后的保存潜力[20]。因此, 植被初级生产不仅决定湖泊湿地碳输入总量, 也会通过植物功能型和地下碳分配方式影响碳汇形成效率[13]。

在湖泊湿地中, 植被恢复通常能够增加有机质输入, 并在一定条件下促进土壤和沉积物有机碳积累[21]。特别是在退化湖滨湿地修复过程中, 大型水生植物恢复可通过改变沉积物有机质组成、微生物群落和沉积环境, 增强湖泊沉积物碳固定潜力[22]; 挺水植物群落恢复则可增加枯落物归还和根系碳输入, 并通过根际过程影响有机质分解和土壤有机质形成[23]。然而, 植物生产力提高并不必然意味着净碳汇增强, 因为高生产力也可能伴随较强的根系呼吸、微生物分解和 CH₄ 产生、氧化及植物介导释放过程[6][24][25]。

2.2. 沉积物碳埋藏是湖泊湿地长期碳汇的核心过程

与植被生物量碳储量相比, 沉积物有机碳埋藏通常更能反映湖泊湿地长期碳汇功能。需要指出的是, 碳储量主要表示某一时间点植被、土壤或沉积物等碳库中已累积的碳量, 而碳汇速率则强调单位时间内新增固定、保存或埋藏的碳量。其中, 沉积物碳埋藏速率表示单位时间内进入沉积物并被保存的有机碳量, 是连接碳储量变化与长期碳汇形成的关键指标。湖泊湿地碳汇功能的长期稳定性主要取决于沉积物有机碳的积累、转化和埋藏过程[9][26]。与植物生物量碳相比, 沉积物有机碳具有更长的周转时间, 一旦进入沉积物深层并脱离频繁氧化分解环境, 便可能在较长时间尺度上从短期生物圈-大气碳循环中被移除[27]。因此, 沉积物有机碳埋藏通常被认为是湖泊及湖泊湿地长期碳汇形成的关键环节[28]。Mendonça 等[9]基于全球湖泊和水库数据指出, 沉积物埋藏能够有效保存有机碳, 并降低其进一步矿化为温室气体

的可能性。

湖泊湿地沉积物有机碳来源具有多源性,既包括湿地植物残体、浮游植物和附着藻类生产形成的内源有机碳,也包括河流输入、地表径流、土壤侵蚀和风尘沉降带来的外源有机碳。进入水体后,这些有机碳会经历沉降、絮凝、吸附、微生物矿化和再悬浮等过程,其中一部分被分解并以 CO_2 或 CH_4 形式释放,另一部分则随颗粒物沉降进入沉积物,并在低氧或厌氧环境下得到较长期保存。Meyers 和 Ishiwatari [29]指出,湖泊沉积物有机质来源及其在沉降和早期成岩过程中的微生物改造,会共同影响最终保存的有机碳数量和组成;Tranvik 等[30]也强调,湖泊和水库通过有机碳矿化、沉积物埋藏以及 CO_2 、 CH_4 交换等过程调节区域乃至全球碳循环。

此外,微生物残体碳是连接有机质分解转化与长期稳定保存的重要中间环节[20]。沉积物中的植物残体、藻源有机质和外源颗粒有机碳可被微生物同化并转化为微生物来源有机质,其中部分微生物残体可通过矿物结合或沉积物微环境保护而稳定保存[31] [32]。湖泊沉积物研究表明,微生物残体碳可占沉积物有机碳的 20%~30%,且以矿物结合态微生物残体碳为主要形式;新生内陆湿地研究也发现,微生物残体碳对矿物结合态有机碳形成和 SOC 稳定化具有重要贡献[32] [33]。

沉积物有机碳保存效率受氧暴露时间、有机质来源、沉积速率、水体扰动强度和矿物结合保护等因素共同影响[26] [34]。Sobek 等[27]认为,较短的氧暴露时间能够降低有机质被氧化分解的机会,而外源颗粒物或矿物颗粒输入可能通过加快沉积过程、缩短氧暴露时间促进有机碳保存;Ferland 等[26]也指出,颗粒有机碳沉降、埋藏效率和长期碳积累之间存在密切联系。浅水湖泊湿地中,风浪扰动和低水位条件容易增强底泥再悬浮,促进沉积物中颗粒物和营养盐重新进入水体,从而增加有机质再矿化和碳释放风险[35] [36]。相反,较高的水生植被覆盖可削弱水动力扰动、降低沉积物再悬浮强度,并有利于颗粒物沉降和有机质积累[37]。因此,稳定水位、较弱风浪扰动、较高植被覆盖和较快沉积速率通常有利于有机碳由“短期周转碳”转化为“长期稳定碳”;而频繁水位波动、底泥再悬浮和长期氧暴露则可能增强微生物矿化和 CO_2 、 CH_4 释放,从而削弱湖泊湿地的长期碳汇功能[38] [39]。

2.3. 水文过程调控碳输入、分解和埋藏

水文条件是湖泊湿地碳汇功能形成的关键控制因子。水位高低、淹水持续时间、水文连通性和干湿交替过程会同时影响植物群落组成、有机质输入、沉积物氧化还原状态和微生物分解强度[13] [40]。就碳储量而言,适度而稳定的淹水环境能够限制氧气向土壤和沉积物中的扩散,降低有机质分解速率,从而有利于土壤和沉积物有机碳的累积与保存。相反,当湿地发生排水、干旱或水位剧烈下降时,沉积物暴露于氧气环境中,有机质矿化过程加快,可能导致 CO_2 释放增加和原有碳库损失[41] [42]。

水文过程不仅影响已有碳库的保存,也调控单位时间内新增碳的固定、输入和埋藏。适宜水位和较长淹水时间可促进湿地植被生长和水体初级生产,提高植物残体、根系输入和水体颗粒有机碳沉降量,从而增强沉积物碳埋藏潜力。水文连通性还决定外源碳和矿物颗粒输入强度。适度的流域径流可将溶解性有机碳、颗粒有机碳和悬浮泥沙输入湖泊湿地,为沉积物碳埋藏提供外源碳源和矿物保护条件;但过强的水文扰动、污染输入或泥沙再悬浮也可能改变湖泊湿地的沉积环境,促进营养盐释放、藻类生长和有机质再矿化[35] [43]。已有研究表明,水文连通性能够显著调控湿地-水体之间的溶解性有机碳交换;在大型浅水湖泊中,风浪和低水位条件容易增强底泥再悬浮,使沉积物颗粒物和营养盐重新进入水体,进而影响水体生产过程和碳循环[36] [44] [45]。

另一方面,水文条件还会通过改变 CO_2 和 CH_4 排放影响湖泊湿地碳汇功能的实际气候效益。长期淹水和低氧环境虽然有利于有机碳保存,但也可能促进产甲烷过程,增加 CH_4 产生和释放;而水位下降或干湿交替则可能增强有机质氧化分解,提高 CO_2 排放。水位波动还会改变沉积物氧化还原环境、产甲烷

和甲烷氧化过程, 从而影响 CH_4 的产生、氧化和释放强度[6]。因此, 水文过程对湖泊湿地碳汇功能具有“双重效应”: 一方面, 适度淹水、稳定水位和较高水生植被覆盖能够维持低氧沉积环境, 促进有机碳积累和沉积物碳埋藏; 另一方面, 频繁干湿交替、长期干旱、剧烈水位波动和强风浪扰动则可能增强有机质氧化分解、底泥再悬浮和温室气体释放, 从而削弱湖泊湿地的净碳汇功能[46] [47]。因此, 评价湖泊湿地碳汇功能时, 应同时区分水文过程对碳储量、碳汇速率和净气候效应的影响, 并将水位调控、水文连通性和干湿交替过程作为解释碳输入、碳保存与温室气体释放差异的重要机制[48] [49]。

2.4. 营养盐输入和富营养化改变碳固定与碳埋藏过程

氮、磷等营养盐输入是调控湖泊湿地碳固定和碳埋藏的重要因素。从碳输入和碳汇速率角度看, 适度的营养盐供应能够缓解水生植物和浮游植物的养分限制, 提高植被净初级生产力(NPP)和水体初级生产力, 进而增加植物残体、藻源有机质和颗粒有机碳输入。这些新增有机碳在沉降、转化和保存过程中, 可在一定条件下促进沉积物有机碳积累[50]。已有研究表明, 湖泊富营养化可显著改变有机碳埋藏过程, 欧洲低地湖泊在长期氮、磷输入增强背景下, 近现代有机碳埋藏速率明显高于背景水平; 农业富营养化蓄水体也表现出较高的沉积物有机碳埋藏速率, 其埋藏碳同时来源于流域外源输入和水体内部初级生产[50] [51]。因此, 在一定营养盐水平下, 富营养化可能通过提高有机碳输入量和沉积物碳埋藏速率, 促进沉积物碳储量增加。

然而, 营养盐增加并不必然意味着湖泊湿地净碳汇功能增强。对于净气候效应来说, 较高的碳固定量或沉积物碳埋藏速率并不一定等同于更强的气候调节效益, 因为富营养化过程可能同时增强有机质分解和温室气体释放。过量氮、磷输入会导致富营养化和藻类大量繁殖, 增加水体有机质负荷, 并在藻类残体沉降和分解过程中加剧底层耗氧和沉积物厌氧环境[52]。富营养化还可能诱发有害藻华、缺氧“死区”、水质退化和温室气体释放增强等生态环境问题, 因此其碳汇效应往往伴随着明显的生物地球化学风险[53] [54]。

值得注意的是, 富营养化可能通过增加藻源有机质沉降和厌氧分解底物供应, 促进沉积物产甲烷过程。Beaulieu 等[55]基于全球湖泊和蓄水体分析指出, 水体生产力即富营养化是静水系统 CH_4 排放的重要驱动因素, 未来营养盐负荷增加可能使湖泊和蓄水体 CH_4 排放显著升高。近期研究也指出, 富营养化湖泊中的浮游植物暴发虽然可通过光合作用吸收 CO_2 , 但大量藻源有机碳最终可能经呼吸和微生物分解重新转化为 CO_2 和 CH_4 释放到大气中, 从而削弱其净气候效益[56]。因此, 富营养化背景下应区分“碳固定量增加”, “沉积物碳储量增加”和“净气候效应增强”三个不同层面。前两者主要反映碳输入和碳库积累, 而后者还需要扣除 CO_2 、 CH_4 等温室气体排放带来的气候效应抵消。

综上所述, 营养盐输入对湖泊湿地碳汇功能具有“双重效应”。一方面, 适度氮、磷供应可促进植物和藻类生产, 提高有机碳输入、沉积物碳埋藏速率和碳储量积累潜力; 另一方面, 过度富营养化可能通过藻类暴发、底层缺氧、有机质快速矿化和 CH_4 释放增强, 削弱湖泊湿地的净碳汇和气候调节功能。因此, 在评价营养盐输入对湖泊湿地碳汇功能的影响时, 不仅需要关注 NPP、有机碳埋藏量和沉积物碳储量, 还应综合考虑富营养化状态、水体缺氧风险、 CO_2 和 CH_4 排放强度及其对净气候效应的影响。

3. 湖泊湿地碳储量与碳汇功能评估方法

3.1. 样地实测法

样地实测法是湖泊湿地碳储量评估的基础方法, 通常包括植被碳储量、枯落物碳储量以及土壤或沉积物有机碳储量三个部分。植被碳储量一般通过样方收获法、异速生长方程或生物量模型估算, 再结合实测碳含量或碳转换系数计算。草本植物、挺水植物、沉水植物和浮叶植物多采用样方收获法测定地上

和地下生物量, 乔灌木湿地则常利用胸径、树高和生物量方程估算地上与地下生物量。该方法能够直接反映植被初级生产和有机碳输入过程, 是评估湖泊湿地碳输入基础的重要手段。

土壤或沉积物有机碳储量通常根据有机碳含量、干容重、采样深度和粗颗粒含量计算。常用公式为[57]:

$$\text{SOC stock (Mg}\cdot\text{C}\cdot\text{ha}^{-1}) = \text{SOC (g}\cdot\text{kg}^{-1}) \times \text{BD (g}\cdot\text{cm}^{-3}) \times \text{depth (cm)} \times 0.1 \times (1 - \text{coarse fragments fraction}) \quad (1)$$

式中, SOC stock 为单位面积有机碳储量, SOC 为土壤或沉积物有机碳含量, BD 为土壤或沉积物干容重, depth 为采样深度, coarse fragments fraction 为砾石、贝壳或其他粗颗粒物所占比例。若样品中粗颗粒物含量较高, 则需要根据细土比例进行校正[58]。

对于湖泊湿地而言, 样地实测法的优势在于数据来源直接、结果可解释性强, 能够较准确地反映不同植被类型、不同恢复阶段和不同土层或沉积层的碳储量差异。但该方法也存在空间代表性有限、采样劳动量大、深层沉积物采集困难等不足。特别是在浅水湖泊湿地中, 植被斑块、水位变化、沉积物再悬浮和湖滨带微地形差异较大, 单一样点往往难以代表整个湿地系统。因此, 在实际评估中应根据湿地类型、植被分布、水深梯度和沉积环境设置合理的样点和采样深度, 以提高碳储量估算的准确性和代表性[58]。

3.2. 沉积柱芯与同位素定年法

沉积柱芯法是评估湖泊湿地长期碳积累和碳埋藏速率的重要方法。研究者通常在湖心、湖滨带或典型湿地区采集沉积柱, 按照固定深度分层测定沉积物干容重、有机碳含量, 并结合 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 或 ^{14}C 定年方法建立沉积年代框架。与实测法相比, 沉积柱芯法不仅能够获得某一时间点的沉积物碳储量, 还能够重建过去几十年至上千年的碳埋藏历史, 因此更适合用于判断湖泊湿地长期碳汇功能的形成过程[59]。

碳埋藏速率通常由沉积物质量累积速率与有机碳含量相乘获得:

$$\text{C burial rate} = \text{MAR} \times \text{OC} \quad (2)$$

式中, C burial rate 为有机碳埋藏速率, MAR 为沉积物质量累积速率, OC 为沉积物有机碳含量。若需要估算某一时期的单位面积碳积累量, 还可结合沉积速率、干容重和有机碳含量进行积分计算。

不同同位素定年方法适用于不同时间尺度。 ^{210}Pb 定年通常适用于近百年尺度的沉积速率和碳积累速率估算, 适合分析近现代人类活动、土地利用变化和湿地恢复对碳埋藏的影响; ^{137}Cs 可用于识别 1963 年左右全球核试验峰值或其他特征沉积层, 常作为 ^{210}Pb 年代模型的辅助验证; ^{14}C 定年则更适用于千年尺度沉积历史和长期碳埋藏过程研究。Arias-Ortiz 等[59]指出, ^{210}Pb 定年是估算沉积物有机碳积累速率的常用工具, 但应充分考虑沉积扰动、沉积物混合、生物扰动和沉积物异质性对年代模型的影响。

对于湖泊湿地而言, 沉积柱芯法的优势在于能够揭示长期碳埋藏过程, 识别气候变化、流域土地利用、营养盐输入和湿地退化修复对碳汇功能的历史影响。其不足在于采样点位代表性有限, 且浅水湖泊中风浪扰动、底泥再悬浮、水位波动和生物扰动可能破坏沉积层序, 从而增加年代模型和碳埋藏速率估算的不确定性。因此, 在湖泊湿地应用沉积柱芯法时, 应尽量结合多个采样点、沉积物粒度特征、放射性同位素验证和现场水动力背景, 提高长期碳埋藏评估的可靠性。

3.3. 遥感反演与空间扩展方法

遥感技术适用于区域尺度湖泊湿地碳储量和碳汇功能的空间扩展评估, 尤其适合监测湿地面积变化、植被覆盖度、水体范围、淹水频率、植被生物量和生态修复成效。遥感数据可结合 NDVI、EVI、LAI、植被覆盖度、土地利用分类和机器学习方法, 估算湿地植被生物量及其碳储量空间分布; 高分辨率卫星影像、无人机遥感和激光雷达数据则能够提高湖滨带植被结构、湿地斑块变化和地上生物量制图精度[60]

[61]。

遥感方法能够较好地反映前文所述的植被恢复和水文调控过程。例如，遥感影像可用于识别湖滨带挺水植物、沉水植物和开放水域的空间格局，监测湿地恢复后植被覆盖度和水体面积的变化，并进一步估算植被净初级生产力和地上生物量[62]。同时，水体遥感还可用于提取水位变化、淹水频率、水体透明度、叶绿素 a 浓度和藻华面积，为分析水文过程和富营养化对湖泊湿地碳循环的影响提供空间数据支持[63]。

但是，遥感技术对土壤和沉积物深层有机碳储量的直接识别能力较弱，通常难以单独用于估算沉积物长期碳埋藏量[64][65]。因此，遥感反演需要与样地调查、沉积物采样、容重测定、有机碳含量分析和模型参数校正相结合，才能实现从点位监测到区域尺度碳储量估算的空间扩展。对于湖泊湿地碳汇评估而言，遥感技术的主要价值不在于直接替代地面采样，而在于扩大空间尺度、提高动态监测能力，并识别植被恢复、水文变化和富营养化过程对碳汇功能的空间影响[66]。

3.4. 碳收支模型与多源数据融合方法

碳收支模型通过整合植被净初级生产力、枯落物和根系输入、外源 DOC/POC 输入、沉积物有机碳埋藏、生态系统呼吸、CH₄ 和 N₂O 排放以及水体横向碳输出等过程，估算湖泊湿地净碳汇功能[9]。与单纯碳储量估算相比，碳收支模型更强调碳输入、碳保存和碳损失之间的平衡，能够从过程角度解释湖泊湿地由碳汇向碳源转变的机制[67]。

在湖泊湿地中，碳收支评估需要同时考虑纵向碳过程和横向碳过程[68]。纵向过程包括植被固碳、植物残体和根系输入、沉积物有机碳积累、微生物分解以及 CO₂、CH₄ 和 N₂O 向大气释放；横向过程则包括流域输入和下游输出的 DOC、POC、DIC 及悬浮泥沙等通量。水位变化、水文连通性、沉积物再悬浮和营养盐输入均会影响这些过程，因此应作为湖泊湿地碳收支模型的重要驱动变量[45]。

IPCC 湿地清单指南为湿地碳库核算和温室气体排放估算提供了不同层级的方法框架，但在具体湖泊湿地应用中，仍需要结合区域植被类型、沉积速率、温室气体通量、水文条件和营养盐输入等实测参数进行本地化修正[69]。未来湖泊湿地碳汇功能评估应采用“样地实测 + 沉积柱芯 + 遥感制图 + 模型模拟”的多源数据融合方法，以同时提高点位精度、空间代表性和过程解释能力，从而更全面地评估湖泊湿地在区域碳循环和气候调节中的作用[67][70]。

4. 当前研究存在的问题与挑战

尽管湖泊湿地碳汇功能及其评估方法已受到广泛关注，但由于湖泊湿地兼具陆地、水体和沉积物多重属性，其碳循环过程复杂，当前研究在概念界定、尺度转换、长期监测和综合评价方面仍存在不足。

(1) 碳储量与碳汇速率的概念仍需进一步区分。碳储量反映某一时间点已有碳库的大小，而碳汇速率强调单位时间内新增固定、保存或埋藏的碳量。高碳储量并不一定代表当前仍具有较强的净碳吸收能力，因此湖泊湿地碳汇评价应同时关注碳库大小、碳埋藏速率、碳库稳定性以及 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放[58][67]。

(2) 空间异质性增加了区域碳储量估算的不确定性。湖泊湿地通常具有明显的水陆梯度，不同水深、植被类型、沉积环境和水文连通条件下的碳积累过程差异较大[71]。Lin 等[72]对大型湖泊沉积物有机碳埋藏的多柱芯研究表明，湖内有机碳积累具有明显空间异质性，主要受水体初级生产、陆源碎屑输入、水动力条件和湖底地形差异影响；若仅依赖单一湖心柱芯，可能导致整湖有机碳储量估算出现明显偏差。因此，仅依赖少数样点，容易忽视湖心沉积区、湖滨植被区、入湖河口和季节性淹水区之间的空间差异。

(3) 长期连续观测数据仍相对缺乏。湖泊湿地碳循环受降水、水位、温度、风浪扰动、营养盐输入和

人类活动共同影响, 具有明显的季节变化和年际波动。短期调查难以判断碳汇功能的长期稳定性, 也难以识别极端气候、水位调控或湿地修复对碳汇过程的持续影响, 因此需要结合长期定位观测、沉积柱芯和同位素定年方法重建历史碳埋藏过程[59]。

(4) 碳储量评估与温室气体排放评估之间的衔接仍然不足。湖泊湿地可能同时具有较高的沉积物有机碳埋藏量和较强的 CH_4 排放强度, 仅关注沉积物碳储量或碳埋藏速率可能高估其净气候效益。Raymond 等[73]对全球内陆水体 CO_2 逸散的估算表明, 内陆水体是大气 CO_2 的重要释放源; Bastviken 等[8]也指出, 淡水生态系统 CH_4 排放可能抵消部分陆地碳汇效应。因此, 湖泊湿地碳汇评价应从单纯的“碳储量评价”转向“净碳汇和净气候效应评价”, 综合考虑 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放与长期碳埋藏之间的平衡关系。

(5) 多源数据融合和模型参数本地化仍需加强。样地实测、沉积柱芯、遥感反演和碳收支模型各有优势, 但单一方法难以全面反映湖泊湿地复杂的碳循环过程。未来需要加强实测数据、遥感产品、历史沉积记录和过程模型的融合, 并结合区域水文条件、植被类型、营养盐输入和温室气体通量进行参数校正, 从而提高湖泊湿地碳汇功能评估的准确性和可比性[45][67]。

5. 研究展望

能使未来湖泊湿地碳汇研究应从机制解析、长期监测、空间评估和修复管理等方面进一步推进, 以提高湖泊湿地碳汇功能评估的准确性和生态管理价值。

(1) 应建立湖泊湿地“植被-水体-沉积物-大气”一体化碳循环观测体系。湖泊湿地碳汇功能并不是单一碳库增加的结果, 而是植被光合固碳、水体有机碳转化、沉积物有机碳埋藏以及 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 释放共同作用的结果。因此, 后续研究应同步监测植被生物量、枯落物和根系输入、土壤或沉积物有机碳、水体 DOC、POC 和 DIC、温室气体通量以及水位变化等指标, 从而更全面地揭示湖泊湿地碳输入、碳保存和碳损失之间的平衡关系。

(2) 应加强不同水文情景下的碳汇形成机制研究。湖泊湿地碳循环对水位波动、淹水持续时间、生态补水和干湿交替过程高度敏感。未来可通过比较长期淹水区、季节性淹水区、退化干化区和恢复补水区的碳储量、碳埋藏速率和温室气体排放差异, 阐明水文过程对植被恢复、有机质分解、沉积物氧化还原环境和 CH_4 释放的综合影响。特别是在气候变化和人为水位调控背景下, 明确适宜水位范围及其对净碳汇功能的影响, 将有助于湖泊湿地生态修复和水文管理。

(3) 应提高湖泊湿地碳储量评估的空间精度和尺度转换能力。湖泊湿地具有明显的水陆梯度和空间异质性, 湖心沉积区、湖滨挺水植物区、沉水植物分布区、季节性淹水区和退化裸露区的植被组成、沉积环境和碳积累过程存在明显差异。因此, 未来研究应结合分区采样、沉积柱芯、遥感分类、无人机监测和地统计模型, 分别估算不同功能区的碳储量和碳埋藏速率, 避免用少数样点或单一平均值代表整个湖泊湿地系统。

(4) 应加强碳储量、碳埋藏速率和温室气体排放的综合评价。湖泊湿地可能同时具有较高的沉积物有机碳埋藏量和较强的 CH_4 排放, 因此仅用碳储量增加来判断碳汇功能可能存在偏差。未来应从净碳汇和净气候效应角度出发, 将 CO_2 吸收、沉积物碳埋藏、 CH_4 和 N_2O 排放以及水体横向碳输出纳入统一评估框架, 明确湖泊湿地在不同恢复阶段和管理情景下是净碳汇还是潜在温室气体源。

(5) 应将湖泊湿地碳汇功能评价与生态修复和管理实践相结合。对退化湖泊湿地而言, 植被恢复、生态补水、水位调控、面源污染削减、富营养化治理和沉积物扰动控制均会影响碳输入、碳保存和温室气体释放过程。因此, 湖泊湿地保护修复不应只关注生物多样性恢复和水质改善, 还应将碳储量提升、碳埋藏稳定性和温室气体减排作为重要生态功能目标。未来可通过多源数据融合和情景模拟, 评估不同修复措施的碳汇效益, 为湖泊湿地增汇管理和“双碳”目标下的湿地生态调控提供科学依据。

6. 结论

湖泊湿地在区域碳循环和气候调节中具有重要作用, 其碳汇功能是植被初级生产、有机质输入、沉积物碳埋藏、水文调控、营养盐输入、微生物分解和温室气体释放等过程共同作用的结果。湿地植物和水体初级生产为碳积累提供物质来源, 沉积物低氧环境和长期埋藏过程决定碳保存的稳定性, 而水位波动、富营养化和人类活动则可能通过改变有机质分解强度及 CO₂、CH₄、N₂O 排放影响湖泊湿地的净碳汇效应。

总体来看, 湖泊湿地碳汇评估应从单一碳储量核算转向“碳储量 - 碳埋藏速率 - 温室气体排放 - 生态修复管理”相结合的综合评价框架。未来通过样地实测、沉积柱芯、遥感制图和碳收支模型的多源融合, 可进一步提高湖泊湿地碳汇功能评估的准确性, 服务湿地增汇管理、“双碳”目标实现和区域生态安全格局优化。

基金项目

山东省自然科学基金青年基金(ZR2025QC226)。

山东省自然资源厅科技创新平台开放课题(南四湖典型还湿措施影响的温室气体排放动态及环境机制)。2025 年山东南四湖省级自然保护区生态保护和高质量发展科研项目。

参考文献

- [1] Nahlik, A.M. and Fennessy, M.S. (2016) Carbon Storage in US Wetlands. *Nature Communications*, **7**, Article No. 13835. <https://doi.org/10.1038/ncomms13835>
- [2] Loisel, J., Gallego-Sala, A.V., Amesbury, M.J., Magnan, G., Anshari, G., Beilman, D.W., *et al.* (2021) Expert Assessment of Future Vulnerability of the Global Peatland Carbon Sink. *Nature Climate Change*, **11**, 70-77. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>
- [3] Adhikari, S., Bajracharaya, R.M. and Sitaula, B.K. (2009) A Review of Carbon Dynamics and Sequestration in Wetlands. *Journal of Wetlands Ecology*, **2**, 42-46. <https://doi.org/10.3126/jowe.v2i1.1855>
- [4] Mcleod, E., Chmura, G.L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C.M., *et al.* (2011) A Blueprint for Blue Carbon: Toward an Improved Understanding of the Role of Vegetated Coastal Habitats in Sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **9**, 552-560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- [5] Mitsch, W.J., Bernal, B., Nahlik, A.M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C.J., *et al.* (2013) Wetlands, Carbon, and Climate Change. *Landscape Ecology*, **28**, 583-597. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>
- [6] Cui, S., Liu, P., Guo, H., Nielsen, C.K., Pullens, J.W.M., Chen, Q., *et al.* (2024) Wetland Hydrological Dynamics and Methane Emissions. *Communications Earth & Environment*, **5**, Article No. 470. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01635-w>
- [7] Dai, T., Liu, R., Zhou, X., Zhang, J., Song, M., Zou, P., *et al.* (2023) Role of Lake Aquatic-Terrestrial Ecotones in the Ecological Restoration of Eutrophic Water Bodies. *Toxics*, **11**, Article 560. <https://doi.org/10.3390/toxics11070560>
- [8] Bastviken, D., Tranvik, L.J., Downing, J.A., Crill, P.M. and Enrich-Prast, A. (2011) Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink. *Science*, **331**, 50. <https://doi.org/10.1126/science.1196808>
- [9] Mendonça, R., Müller, R.A., Clow, D., Verpoorter, C., Raymond, P., Tranvik, L.J., *et al.* (2017) Organic Carbon Burial in Global Lakes and Reservoirs. *Nature Communications*, **8**, Article No. 1694. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01789-6>
- [10] Grasset, C., Mesman, J.P., Tranvik, L.J., Maranger, R. and Sobek, S. (2025) Contribution of Lake Littoral Zones to the Continental Carbon Budget. *Nature Geoscience*, **18**, 747-752. <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01739-8>
- [11] Cole, J.J., Prairie, Y.T., Caraco, N.F., McDowell, W.H., Tranvik, L.J., Striegl, R.G., *et al.* (2007) Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosystems*, **10**, 172-185. <https://doi.org/10.1007/s10021-006-9013-8>
- [12] Květ, J., Pokorný, J. and Čížková-Končalová, H. (2008) Carbon Accumulation by Macrophytes of Aquatic and Wetland Habitats with Standing Water. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B: Biological Sciences*, **78**, 91-98.

- [13] Kayranli, B., Scholz, M., Mustafa, A. and Hedmark, Å. (2010) Carbon Storage and Fluxes within Freshwater Wetlands: A Critical Review. *Wetlands*, **30**, 111-124. <https://doi.org/10.1007/s13157-009-0003-4>
- [14] Trevathan-Tackett, S.M., Kepfer-Rojas, S., Engelen, A.H., York, P.H., Ola, A., Li, J., *et al.* (2021) Ecosystem Type Drives Tea Litter Decomposition and Associated Prokaryotic Microbiome Communities in Freshwater and Coastal Wetlands at a Continental Scale. *Science of the Total Environment*, **782**, Article ID: 146819. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146819>
- [15] Pan, Y., Liu, J., Zhang, M., Huang, P., Hipsy, M., Dai, L., *et al.* (2024) The Below-Ground Biomass Contributes More to Wetland Soil Carbon Pools than the Above-Ground Biomass—A Survey Based on Global Wetlands. *Journal of Plant Ecology*, **17**, rtac017. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtac017>
- [16] Liu, Y., Zhang, H., Gong, Q., Yang, Q., Geng, K., Li, K., *et al.* (2026) Different Life Forms of Macrophytes Have Different Effects on Lake Water Quality and Carbon Sequestration. *Water*, **18**, Article 552. <https://doi.org/10.3390/w18050552>
- [17] Conroy, B.M., Kelleway, J.J. and Rogers, K. (2025) Root Productivity Contributes to Carbon Storage and Surface Elevation Adjustments in Coastal Wetlands. *Plant and Soil*, **513**, 605-631. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07204-0>
- [18] Zhou, X., He, Z., Ding, F., Li, L. and Stoffella, P.J. (2018) Biomass Decaying and Elemental Release of Aquatic Macrophyte Detritus in Waterways of the Indian River Lagoon Basin, South Florida, Usa. *Science of the Total Environment*, **635**, 878-891. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.047>
- [19] Grasset, C., Abril, G., Mendonça, R., Roland, F. and Sobek, S. (2019) The Transformation of Macrophyte-Derived Organic Matter to Methane Relates to Plant Water and Nutrient Contents. *Limnology and Oceanography*, **64**, 1737-1749. <https://doi.org/10.1002/lno.11148>
- [20] Liang, C., Dong, L., Song, A., Wang, L. and Liu, J. (2025) Soil Carbon Storage and Its Driving Factors in Different Plant Communities of Coastal Wetland in the Non-Growing Season. *Journal of Plant Ecology*, **18**, rtaf076. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtaf076>
- [21] Schuster, L., Trevathan-Tackett, S., Carnell, P., Morris, K., Mole, B. and Malerba, M.E. (2025) Restoring Riparian Wetlands for Carbon and Nitrogen Benefits and Other Critical Ecosystem Functions. *Journal of Environmental Management*, **391**, Article ID: 126433. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126433>
- [22] Wu, F., An, S., Liu, J., Lu, Y., He, H., Chang, X., *et al.* (2026) Macrophyte Restoration Alters Sedimentary Organic Matter-Microbes-Environment Interactions and Enhances Carbon Sequestration in Lake Sediment. *Water Research*, **297**, Article ID: 125658. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2026.125658>
- [23] Yarwood, S.A. (2018) The Role of Wetland Microorganisms in Plant-Litter Decomposition and Soil Organic Matter Formation: A Critical Review. *FEMS Microbiology Ecology*, **94**, fty175. <https://doi.org/10.1093/femsec/fty175>
- [24] Laanbroek, H.J. (2010) Methane Emission from Natural Wetlands: Interplay between Emergent Macrophytes and Soil Microbial Processes. A Mini-Review. *Annals of Botany*, **105**, 141-153. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp201>
- [25] Xu, S., Liu, X., Li, X. and Tian, C. (2019) Soil Organic Carbon Changes Following Wetland Restoration: A Global Meta-analysis. *Geoderma*, **353**, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.027>
- [26] Ferland, M., Prairie, Y.T., Teodoru, C. and del Giorgio, P.A. (2014) Linking Organic Carbon Sedimentation, Burial Efficiency, and Long-Term Accumulation in Boreal Lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **119**, 836-847. <https://doi.org/10.1002/2013jg002345>
- [27] Sobek, S., Durisch-Kaiser, E., Zurbrügg, R., Wongfun, N., Wessels, M., Pasche, N., *et al.* (2009) Organic Carbon Burial Efficiency in Lake Sediments Controlled by Oxygen Exposure Time and Sediment Source. *Limnology and Oceanography*, **54**, 2243-2254. <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6.2243>
- [28] Kastowski, M., Hinderer, M. and Vecsei, A. (2011) Long-Term Carbon Burial in European Lakes: Analysis and Estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, **25**, GB3019. <https://doi.org/10.1029/2010gb003874>
- [29] Meyers, P.A. and Ishiwatari, R. (1993) Lacustrine Organic Geochemistry—An Overview of Indicators of Organic Matter Sources and Diagenesis in Lake Sediments. *Organic Geochemistry*, **20**, 867-900. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(93\)90100-p](https://doi.org/10.1016/0146-6380(93)90100-p)
- [30] Tranvik, L.J., Downing, J.A., Cotner, J.B., Loiselle, S.A., Striegl, R.G., Ballatore, T.J., *et al.* (2009) Lakes and Reservoirs as Regulators of Carbon Cycling and Climate. *Limnology and Oceanography*, **54**, 2298-2314. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298
- [31] Ma, T., Zhu, S., Wang, Z., Chen, D., Dai, G., Feng, B., *et al.* (2018) Divergent Accumulation of Microbial Necromass and Plant Lignin Components in Grassland Soils. *Nature Communications*, **9**, Article No. 3480. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05891-1>
- [32] Liu, Y., Nie, X., Ran, F., Wang, S., Liao, S., Zeng, A., *et al.* (2024) The Occurrence and Distribution Characteristics of Microbial Necromass Carbon in Lake Sediments. *CATENA*, **239**, Article ID: 107944.

- <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107944>
- [33] Liu, X., Wang, Y., Zhao, Y., Zhang, X., Wang, Y., Cao, Q., *et al.* (2025) Microbial Necromass Carbon Contributed to Soil Organic Carbon Accumulation and Stabilization in the Newly Formed Inland Wetlands. *Environmental Research*, **264**, Article ID: 120397. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120397>
- [34] Hemingway, J.D., Rothman, D.H., Grant, K.E., Rosengard, S.Z., Eglinton, T.I., Derry, L.A., *et al.* (2019) Mineral Protection Regulates Long-Term Global Preservation of Natural Organic Carbon. *Nature*, **570**, 228-231. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1280-6>
- [35] Tammeorg, O., Niemistö, J., Möls, T., Laugaste, R., Panksep, K. and Kangur, K. (2013) Wind-Induced Sediment Resuspension as a Potential Factor Sustaining Eutrophication in Large and Shallow Lake Peipsi. *Aquatic Sciences*, **75**, 559-570. <https://doi.org/10.1007/s00027-013-0300-0>
- [36] Chao, J., Zhang, Y., Kong, M., Zhuang, W., Wang, L., Shao, K., *et al.* (2017) Long-Term Moderate Wind Induced Sediment Resuspension Meeting Phosphorus Demand of Phytoplankton in the Large Shallow Eutrophic Lake Taihu. *PLOS ONE*, **12**, e0173477. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173477>
- [37] Zhu, M., Zhu, G., Nurminen, L., Wu, T., Deng, J., Zhang, Y., *et al.* (2015) The Influence of Macrophytes on Sediment Resuspension and the Effect of Associated Nutrients in a Shallow and Large Lake (Lake Taihu, China). *PLOS ONE*, **10**, e0127915. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127915>
- [38] Gudasz, C., Bastviken, D., Steger, K., Premke, K., Sobek, S. and Tranvik, L.J. (2010) Erratum: Temperature-Controlled Organic Carbon Mineralization in Lake Sediments. *Nature*, **466**, 1134-1134. <https://doi.org/10.1038/nature09383>
- [39] Praetzel, L.S.E., Plenter, N., Schilling, S., Schmiedeskamp, M., Broll, G. and Knorr, K. (2020) Organic Matter and Sediment Properties Determine In-Lake Variability of Sediment CO₂ and CH₄ Production and Emissions of a Small and Shallow Lake. *Biogeosciences*, **17**, 5057-5078. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5057-2020>
- [40] Miao, G., Noormets, A., Domec, J., Fuentes, M., Trettin, C.C., Sun, G., *et al.* (2017) Hydrology and Microtopography Control Carbon Dynamics in Wetlands: Implications in Partitioning Ecosystem Respiration in a Coastal Plain Forested Wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, **247**, 343-355. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.022>
- [41] Yuan, X., Liu, Q., Cui, B., Xu, X., Liang, L., Sun, T., *et al.* (2021) Effect of Water-Level Fluctuations on Methane and Carbon Dioxide Dynamics in a Shallow Lake of Northern China: Implications for Wetland Restoration. *Journal of Hydrology*, **597**, Article ID: 126169. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126169>
- [42] Hassett, E., Bohrer, G., Kinsman-Costello, L., Onyango, Y., Pope, T., Smith, C., *et al.* (2024) Changes in Inundation Drive Carbon Dioxide and Methane Fluxes in a Temperate Wetland. *Science of the Total Environment*, **915**, Article ID: 170089. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170089>
- [43] Prijac, A., Gandois, L., Taillardat, P., Bourgault, M., Riahi, K., Ponçot, A., *et al.* (2023) Hydrological Connectivity Controls Dissolved Organic Carbon Exports in a Peatland-Dominated Boreal Catchment Stream. *Hydrology and Earth System Sciences*, **27**, 3935-3955. <https://doi.org/10.5194/hess-27-3935-2023>
- [44] Tang, C., Li, Y., He, C. and Acharya, K. (2020) Dynamic Behavior of Sediment Resuspension and Nutrients Release in the Shallow and Wind-Exposed Meiliang Bay of Lake Taihu. *Science of the Total Environment*, **708**, Article ID: 135131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135131>
- [45] Casas-Ruiz, J.P., Bodmer, P., Bona, K.A., Butman, D., Couturier, M., Emilson, E.J.S., *et al.* (2023) Integrating Terrestrial and Aquatic Ecosystems to Constrain Estimates of Land-Atmosphere Carbon Exchange. *Nature Communications*, **14**, Article No. 1571. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37232-2>
- [46] He, T., Ding, W., Cheng, X., Cai, Y., Zhang, Y., Xia, H., *et al.* (2024) Meta-Analysis Shows the Impacts of Ecological Restoration on Greenhouse Gas Emissions. *Nature Communications*, **15**, Article No. 2668. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46991-5>
- [47] Zhang, Y., Zhang, X., Fang, W., Cai, Y., Zhang, G., Liang, J., *et al.* (2025) Carbon Sequestration Potential of Wetlands and Regulating Strategies Response to Climate Change. *Environmental Research*, **269**, Article ID: 120890. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.120890>
- [48] Huang, W., Liu, X., Tian, L., Cui, G. and Liu, Y. (2024) Vegetation and Carbon Sink Response to Water Level Changes in a Seasonal Lake Wetland. *Frontiers in Plant Science*, **15**, Article 1445906. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1445906>
- [49] Zou, J., Ziegler, A.D., Chen, D., McNicol, G., Ciais, P., Jiang, X., *et al.* (2022) Rewetting Global Wetlands Effectively Reduces Major Greenhouse Gas Emissions. *Nature Geoscience*, **15**, 627-632. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00989-0>
- [50] Anderson, N.J., Bennion, H. and Lotter, A.F. (2014) Lake Eutrophication and Its Implications for Organic Carbon Sequestration in Europe. *Global Change Biology*, **20**, 2741-2751. <https://doi.org/10.1111/gcb.12584>
- [51] Downing, J.A., Cole, J.J., Middelburg, J.J., Striegl, R.G., Duarte, C.M., Kortelainen, P., *et al.* (2008) Sediment Organic Carbon Burial in Agriculturally Eutrophic Impoundments over the Last Century. *Global Biogeochemical Cycles*, **22**, GB1018. <https://doi.org/10.1029/2006gb002854>

- [52] Zhang, W., Liu, J., Xiao, Y., Zhang, Y., Yu, Y., Zheng, Z., *et al.* (2022) The Impact of Cyanobacteria Blooms on the Aquatic Environment and Human Health. *Toxins*, **14**, Article 658. <https://doi.org/10.3390/toxins14100658>
- [53] Wurtsbaugh, W.A., Paerl, H.W. and Dodds, W.K. (2019) Nutrients, Eutrophication and Harmful Algal Blooms along the Freshwater to Marine Continuum. *WIREs Water*, **6**, e1373. <https://doi.org/10.1002/wat2.1373>
- [54] Feng, L., Wang, Y., Hou, X., Qin, B., Kutser, T., Qu, F., *et al.* (2024) Harmful Algal Blooms in Inland Waters. *Nature Reviews Earth & Environment*, **5**, 631-644. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00578-2>
- [55] Beaulieu, J.J., DelSontro, T. and Downing, J.A. (2019) Eutrophication Will Increase Methane Emissions from Lakes and Impoundments during the 21st Century. *Nature Communications*, **10**, Article No. 1375. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09100-5>
- [56] Shi, W., Qin, B., Zhang, Q., Paerl, H.W., Van Dam, B., Jeppesen, E., *et al.* (2024) Global Lake Phytoplankton Proliferation Intensifies Climate Warming. *Nature Communications*, **15**, Article No. 10572. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54926-3>
- [57] USDA NRCS (2023) Soil Organic Carbon Stock Monitoring: Conservation Evaluation and Monitoring Activity, CEMA 221. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- [58] Bansal, S., Creed, I.F., Tangen, B.A., Bridgman, S.D., Desai, A.R., Krauss, K.W., *et al.* (2023) Practical Guide to Measuring Wetland Carbon Pools and Fluxes. *Wetlands*, **43**, Article No. 105. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01722-2>
- [59] Arias-Ortiz, A., Masqué, P., Garcia-Orellana, J., Serrano, O., Mazarrasa, I., Marbà, N., *et al.* (2018) Reviews and Syntheses: ²¹⁰Pb-Derived Sediment and Carbon Accumulation Rates in Vegetated Coastal Ecosystems—Setting the Record Straight. *Biogeosciences*, **15**, 6791-6818. <https://doi.org/10.5194/bg-15-6791-2018>
- [60] Zhuo, W., Wu, N., Shi, R., Liu, P., Zhang, C., Fu, X., *et al.* (2024) Aboveground Biomass Retrieval of Wetland Vegetation at the Species Level Using UAV Hyperspectral Imagery and Machine Learning. *Ecological Indicators*, **166**, Article ID: 112365. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112365>
- [61] Fang, Y., Shen, C., Cai, X., Ouyang, Z. and Tian, L. (2025) Multi-Model Estimation of Wetland Vegetation Biomass Combining UAV Lidar, Hyperspectral, and ZY-1 02E Spaceborne 2.5m-Fused Multispectral Data: A Case Study of Qilihai Wetland, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **144**, Article ID: 104944. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104944>
- [62] Sun, Y., Wang, D., Li, L., Ning, R., Yu, S. and Gao, N. (2024) Application of Remote Sensing Technology in Water Quality Monitoring: From Traditional Approaches to Artificial Intelligence. *Water Research*, **267**, Article ID: 122546. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122546>
- [63] Lopez Barreto, B.N., Hestir, E.L., Lee, C.M. and Beutel, M.W. (2024) Satellite Remote Sensing: A Tool to Support Harmful Algal Bloom Monitoring and Recreational Health Advisories in a California Reservoir. *GeoHealth*, **8**, e2023GH000941. <https://doi.org/10.1029/2023gh000941>
- [64] Sharma, R., Mishra, D.R., Levi, M.R. and Sutter, L.A. (2022) Remote Sensing of Surface and Subsurface Soil Organic Carbon in Tidal Wetlands: A Review and Ideas for Future Research. *Remote Sensing*, **14**, Article 2940. <https://doi.org/10.3390/rs14122940>
- [65] Nieto, L., Houborg, R., Tivet, F., Olson, B.J.S.C., Prasad, P.V.V. and Ciampitti, I.A. (2024) Limitations and Future Perspectives for Satellite-Based Soil Carbon Monitoring. *Environmental Challenges*, **14**, Article ID: 100839. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100839>
- [66] Tian, L., Huang, W., Cui, G., Huang, X., Cui, F., Wei, Y., *et al.* (2026) Wetland Restoration Enhances Soil Carbon Sequestration in Lake Ecosystems: Integrating Multi-Source Remote Sensing and Optimized Ensemble Machine Learning to Map Soil Organic Carbon Density. *Ecological Indicators*, **182**, Article ID: 114551. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114551>
- [67] Vachon, D., Sponseller, R.A. and Karlsson, J. (2021) Integrating Carbon Emission, Accumulation and Transport in Inland Waters to Understand Their Role in the Global Carbon Cycle. *Global Change Biology*, **27**, 719-727. <https://doi.org/10.1111/gcb.15448>
- [68] Deemer, B.R., Harrison, J.A., Li, S., Beaulieu, J.J., DelSontro, T., Barros, N., *et al.* (2016) Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience*, **66**, 949-964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>
- [69] IPCC (2013) 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [70] Nugent, K.A., Strachan, I.B., Strack, M., Roulet, N.T. and Rochefort, L. (2018) Multi-Year Net Ecosystem Carbon Balance of a Restored Peatland Reveals a Return to Carbon Sink. *Global Change Biology*, **24**, 5751-5768. <https://doi.org/10.1111/gcb.14449>
- [71] Stewart, A.J., Halabisky, M., Babcock, C., Butman, D.E., D'Amore, D.V. and Moskal, L.M. (2024) Revealing the Hidden

Carbon in Forested Wetland Soils. *Nature Communications*, **15**, Article No. 726.
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-44888-x>

- [72] Lin, Q., Liu, E., Zhang, E., Bindler, R., Nath, B., Zhang, K., *et al.* (2022) Spatial Variation of Organic Carbon Sequestration in Large Lakes and Implications for Carbon Stock Quantification. *CATENA*, **208**, Article ID: 105768.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105768>
- [73] Raymond, P.A., Hartmann, J., Lauerwald, R., Sobek, S., McDonald, C., Hoover, M., *et al.* (2013) Global Carbon Dioxide Emissions from Inland Waters. *Nature*, **503**, 355-359. <https://doi.org/10.1038/nature12760>