

近60年来洪泽湖的碳埋藏特征

戚甲豪, 刘泰北, 赵 华

Carbon burial characteristics of Hongze Lake in the past 60 years

QI Jiahao, LIU Taibei, and ZHAO Hua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202402010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

湘西峒河流域水化学特征及无机碳通量计算

Hydrochemical characteristics and estimation of the dissolved inorganic carbon flux in the Donghe River Basin of western Hunan

霍俊伊, 于, 张清华, 李亮 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 64-72

贵州洪家渡盆地泉水水化学和碳同位素特征及成因

Characteristics and controls of the hydrochemistry and carbon isotope of the spring water in the Hongjiadu Basin of Guizhou

任坤, 潘晓东, 焦友军, 黄宇, 曾洁, 彭聪, 梁嘉鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 9-9

不同赋存环境下碳酸盐岩溶蚀过程试验模拟研究

Experimental simulation of the carbonate dissolution process under different occurrence conditions

林云, 任华鑫, 武亚遵, 贾方建, 刘朋, 梁家乐 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 15-26

鄱阳湖平原地下水重金属含量特征与健康风险评估

Health risk assessment of groundwater heavy metal pollution in the Poyang Lake Plain

饶志, 储小东, 吴代赦, 颜春, 陈婷, 何景媛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 31-37

承德坝上高原东部月亮湖湖面萎缩原因及应对建议

Shrinkage reasons and countermeasures of Moon Lake area in the eastern part of Bashang Plateau, Chengde City

殷志强, 赵磊, 刘文波, 李瑞敏, 邵海, 彭超, 田钰琛 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 57-64

西藏洛隆县巴曲冰湖溃决型泥石流演进过程模拟研究

Characteristics and evolution process simulation of the Baqu gully debris flow triggered by ice-lake outburst in Luolong County of Tibet, China

刘波, 胡卸文, 何坤, 黄涛, 韩玫, 席传杰, 文强, 张晓宇 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 150-160



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202402010

戚甲豪, 刘泰北, 赵华. 近 60 年来洪泽湖的碳埋藏特征 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 66-76.

QI Jiahao, LIU Taibei, ZHAO Hua. Carbon burial characteristics of Hongze Lake in the past 60 years[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 66-76.

近 60 年来洪泽湖的碳埋藏特征

戚甲豪^{1,2}, 刘泰北^{1,2}, 赵 华^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 河北 石家庄 050061)

摘要: 湖泊是重要的陆地生态系统碳汇。目前我国大部分湖泊碳埋藏研究仅考虑有机碳埋藏, 多忽略无机碳埋藏, 这会导致湖泊总碳埋藏能力被低估, 该情况在湿润的东部平原区尤为显著。为了全面了解东部平原湖泊碳埋藏特征, 更加合理地评估有机碳埋藏和无机碳埋藏对总碳埋藏的贡献, 以东部平原区的代表性湖泊洪泽湖为研究对象, 在²¹⁰Pb-¹³⁷Cs 年代序列基础上, 结合沉积物中的 C/N、碳同位素特征等, 对洪泽湖典型岩心 (编号 HZH-12) 以及其他 12 个表层沉积物中的有机碳、无机碳时空变化进行分析, 探究了近 60 a 来洪泽湖沉积物的碳埋藏特征。结果表明: (1) C/N 和 $\delta^{13}\text{C}$ 显示内源有机碳是洪泽湖的主要有机碳来源; 过去 60 a 有机碳和无机碳埋藏速率具有明显协同变化特征 ($R^2=0.76$, $p<0.001$), 意味着无机碳可能源自浮游藻类光合作用导致的次生碳酸盐沉积。(2) 有机碳和无机碳对比结果显示, 洪泽湖无机碳含量 (1.09%) 明显高于有机碳 (0.61%); 无机碳埋藏速率为 $34.27\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 要远高于 $25.27\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的有机碳埋藏速率。总的来说, 洪泽湖有机碳在总碳埋藏中占比为 42.4%, 而无机碳在总碳埋藏中占比高达 57.6%, 这意味着忽略无机碳埋藏可能导致东部平原湖泊碳埋藏能力被极大低估。未来该区域的湖泊碳埋藏研究需要兼顾有机碳和无机碳埋藏。

关键词: 碳埋藏; 有机碳; 无机碳; 洪泽湖

中图分类号: X701; X141

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0066-11

Carbon burial characteristics of Hongze Lake in the past 60 years

QI Jiahao^{1,2}, LIU Taibei^{1,2}, ZHAO Hua^{1,2}

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 2. *Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydrological Environment Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*)

Abstract: Lakes are important carbon sinks in terrestrial ecosystems. Currently, most of lake carbon burial research in China only considers organic carbon burial and has neglected inorganic carbon burial, which will lead to an underestimation of the total carbon burial capacity of lakes. This situation is particularly significant in the humid eastern plain region. In order to comprehensively understand the carbon burial characteristics of lakes in the eastern plain and evaluate the contributions of organic and inorganic carbon burial to total carbon burial more reasonably. This research chooses Hongze Lake as study site, which is a representative lake in the eastern plain

收稿日期: 2024-02-02; 修订日期: 2024-04-30

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221929); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基础 Research 计划 (SK202208; SK202213); 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放式基金项目 (SKLLQG2019)

第一作者: 戚甲豪 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事第四纪地质学研究。E-mail: qijh244@163.com

通讯作者: 刘泰北 (1991—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事第四纪环境演变和湖泊碳埋藏研究。E-mail: liutaibei@126.com

region. Based on the ^{210}Pb - ^{137}Cs chronological sequence, combined with the C/N and $\delta^{13}\text{C}$ characteristics in sediments, the carbon burial characteristics of Hongze Lake sediments in the past 60 years were explored by analyzing the spatiotemporal changes of organic and inorganic carbon content in typical rock cores (numbered HZH-12) and 11 other surface sediments. C/N and $\delta^{13}\text{C}$ shows that endogenous organic carbon is the main source of organic carbon in Hongze Lake. The significant synergistic changes in the accumulation rates of organic and inorganic carbon over the past 60 years ($R^2=0.76$, $p<0.001$) indicate that inorganic carbon may be derived from secondary carbonate deposition caused by the photosynthesis of planktonic algae. Results show that the inorganic carbon content (1.09%) is significantly higher than organic carbon content (0.61%). The accumulation rate of inorganic carbon is $34.27 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, which is significantly higher than that of organic carbon with a value of $25.27 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, too. In general, organic carbon accounts for 42.4% of total carbon burial, while inorganic carbon accounts for up to 57.6% of total carbon burial. This means that ignoring the burial of inorganic carbon may lead to a significant underestimation of the carbon burial capacity of lakes in the eastern plain. And for the lake carbon burial study in this region, it is necessary to consider both organic and inorganic carbon burial in the future.

Keywords: carbon burial; organic carbon; inorganic carbon; Hongze Lake

全球变暖问题一直备受关注, 其中大气 CO_2 浓度升高被认为是导致气候变暖的主要因素^[1]。因此增加碳汇和减少 CO_2 排放成为抑制全球变暖的关键^[2]。而在诸多碳汇途径中, 陆地生态系统碳汇被认为是最经济绿色的碳增汇途径之一^[3-6]。湖泊作为陆地生态系统的重要组成部分, 尽管仅占陆地表面积的 2%, 但是年碳埋藏量可达海洋的 1/4^[7]。湖泊单位面积碳埋藏能力为 $5 \sim 120 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 更是远高于海洋的 $0.2 \sim 0.3 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 、土壤的 $1 \sim 2 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和泥碳的 $20 \sim 25 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ^[8-11]。最近几十年, 在气候变化和人类活动的共同影响下, 湖泊碳埋藏能力出现了显著增长^[12], 表明湖泊具有巨大的增汇潜力。

当前大多数湖泊碳埋藏的研究主要是以湖泊沉积物为基础, 对沉积物中碳来源、碳含量的时空变化和影响因素加以分析。其研究方法多样, 包括对有机质来源进行定性、定量统计^[13], 对影响因子进行室内模拟试验^[14], 还有不同区域尺度的碳埋藏效率对比^[15]等。国外的相关研究开始较早, 在 20 世纪 70 年代 Edmondson 就发现华盛顿湖碳埋藏受人类活动影响而增加^[16]。国内研究虽起步较晚, 但是近年来也在快速发展, 例如青海湖碳埋藏研究^[17-18]等。

尽管针对湖泊碳埋藏已经开展了大量研究, 但现有多着眼于有机碳埋藏^[9, 19], 无机碳埋藏研究相对欠缺, 这可能使得对湖泊整体碳埋藏能力的评价结果产生较大偏差。实际上, 无机碳在很多湖泊碳埋藏中占有相当大的比重, 部分湖泊无机碳埋藏与有机碳埋藏相当, 如异龙湖的无机碳埋藏速率为 $72.70 \pm 49.90 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,

有机碳埋藏速率为 $84.90 \pm 50.00 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ^[20]; 月湖的无机碳埋藏速率为 $29.3 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 有机碳埋藏速率为 $34.4 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ^[21]。有些湖泊无机碳埋藏速率甚至高于有机碳埋藏, 如呼伦湖的无机碳埋藏速率为 $36.15 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 有机碳埋藏速率为 $35.68 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ^[22-23]; 青海湖的无机碳埋藏速率为 $10.94 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 有机碳埋藏速率为 $7.23 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ^[18]; 博斯腾湖的无机碳埋藏速率为 $60.9 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 有机碳埋藏速率为 $25.9 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ^[24]。但上述湖泊均位于干旱-半干旱区和喀斯特等具有较好无机碳沉积条件的地区, 而湿润的东部平原区却鲜有包含有机碳埋藏和无机碳埋藏的全面的湖泊碳埋藏研究。

我国东部平原湖区湖泊面积达 $21\,053.05 \text{ km}^2$, 占我国湖泊总面积的 25.9%^[25]。但是相较于干旱气候区和喀斯特地区, 该区域气候温湿、河湖水文连通性好、湖水 TDS 低等特点并不利于碳酸盐沉积^[26]。来自武汉东湖的数据也显示, 沉积物中无机碳含量极低, 只有 0.3%^[27], 因而该区碳埋藏研究多关注有机碳而无机碳被认为可以忽略^[28]。但是湿润区湖泊中生物活动以及季节性的湖泊水化学变化仍然可能产生碳酸盐沉积^[29-30]; 此外东部平原区水网发达, 河流泥沙运移量高, 湖泊沉积速率高^[31], 使得尽管无机碳含量较低, 无机碳埋藏速率仍可能较高。因此, 在东部平原区开展兼顾有机碳和无机碳的全面湖泊碳埋藏研究很有必要。

洪泽湖作为东部平原湖区的典型湖泊, 是我国第四大淡水湖^[25]。目前洪泽湖碳埋藏研究极少且仅局限于有机碳^[32], 缺乏完善的兼顾有机碳和无机碳的全面

湖泊碳埋藏特征分析。鉴于此,本文以东部平原代表性湖泊洪泽湖为例,开展湖泊无机碳和有机碳埋藏研究,以期为东部平原区湖泊碳埋藏提供新的参考。

洪泽湖位于江苏省西北部,面积 $1\,576.9\text{ km}^2$,最大水深 4.37 m ,平均水深 1.77 m ,蓄水量 $27.9\times 10^8\text{ m}^3$,是我国第四大淡水湖^[25]。所在区域气候受东亚季风控制,年平均温度 $14\text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量 925 mm ,湖泊水

温介于 $3\sim 28\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,平均水温为 $16.3\text{ }^\circ\text{C}$ ^[33-34]。洪泽湖主要依靠降水和河流补给^[34]。入湖河流主要分布在湖泊西侧,其中淮河是洪泽湖主要的入湖河流,占洪泽湖主要入湖水量的 70%;出湖口有三河、苏北灌渠和淮沭新河,其中三河是主要出湖口,湖水从三河流出后注入下游高邮湖最后经长江入海(图 1)。湖泊平均换水周期仅为 27 d ^[35]。

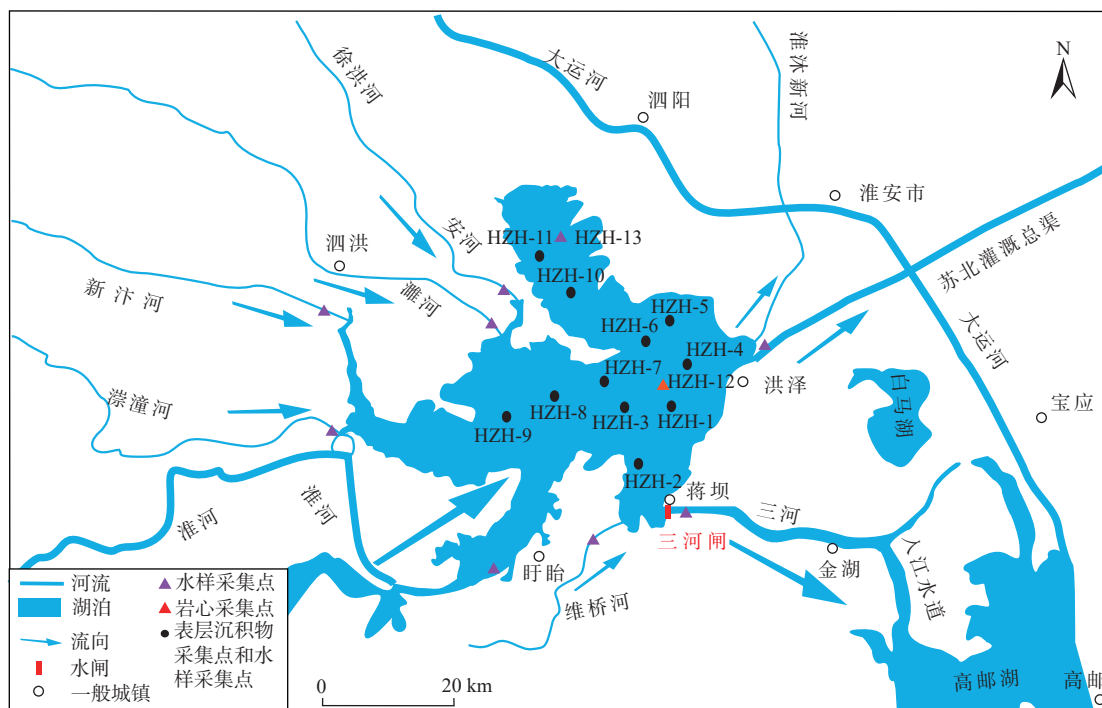


图 1 洪泽湖采样点分布

Fig. 1 Location of sampling sites in Hongze Lake

1 材料和方法

1.1 样品采集

2022 年 6 月,项目组在洪泽湖内部共布设了 13 个样品采集点,其中 12 个沉积物样品点依次编号为 HZH-1 至 HZH-12(图 1),12 个水体样品点依次编号为 HZH-1 至 HZH-11 和 HZH-13(图 1),此外,在入湖和出湖河流还布设有 8 个河流水样点(图 1)。使用重力取芯器采集沉积物岩心。所有岩心沉积物-水体界面清晰,未受到明显扰动。岩心样品均按 1 cm 间隔进行分样,并且冷冻干燥后保存。湖泊及河流水体样品均使用棕色玻璃瓶盛装低温密封保存,并在 10 d 内完成测试。

1.2 样品处理方法

本研究选取 HZH-12 岩心,进行铅铀年代、碳氮含量和有机碳 ^{13}C 测试分析,其余岩心选取最上层 4 cm

进行碳氮含量和有机碳 ^{13}C 分析。 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 比活度采用标准放射性定年法^[36],用美国产 GCW3023 高纯锗伽马能谱仪测量。岩心年代使用复合模式建立年代序列^[37]。总碳含量(total carbon, TC)、总有机碳含量(total organic carbon, TOC)、总氮含量(total nitrogen, TN)使用 Elementar 元素分析仪进行测试,总无机碳含量(total inorganic carbon, TIC)使用 TC 减去 TOC 求得。TC 通过直接对冻干样品进行测试得到,TOC 测试先用 1 mol/L 的盐酸在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 下浸泡 $6\sim 8\text{ h}$ 去除碳酸盐后用蒸馏水洗涤至中性后重新烘干后上机测试^[38]。样品有机碳 ^{13}C 测试前采用和 TOC 前处理一致的酸处理步骤去除碳酸盐后用 MAT253 型气体稳定同位素质谱仪测定^[39]。水体离子含量使用 ICAP6300 电感耦合等离子体发射光谱仪测试。上述测试均在中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成。

1.3 数据计算

(1) TOC 数据校正

由于元素分析仪得到的 TOC 结果为有机碳与样品总量的质量百分比, 而沉积物样品经过盐酸处理后质量会出现损失, 使得测试结果的 TOC 值偏高。

因此本文中的 TOC 数据均由样品盐酸处理前后的称重数据通过如下公式进行校正:

$$c_{\text{TOC校正}} = m_{\text{后}}/m_{\text{前}} \cdot c_{\text{TOC测试}} \quad (1)$$

式中: $c_{\text{TOC校正}}$ ——校正后的沉积物有机碳含量/%;

$c_{\text{TOC测试}}$ ——有机碳元素分析仪测试结果/%;

$m_{\text{前}}$ ——样品酸处理前的干质量/g;

$m_{\text{后}}$ ——样品酸处理后烘干的质量/g。

(2) 铅铀年代计算

复合模式定年^[37], 即根据 1963 年¹³⁷Cs 的深度时标将岩心分为上段和下段, 再结合²¹⁰Pb 的比活度数据计算年代。岩心上下两段采用不同的公式计算, 1963 时标之前的年代计算公式为:

$$T_m = T_0 + \lambda^{-1} \ln[1 + (A_0 - A_m)P^{-1}\lambda] \quad (2)$$

其中, $P = \frac{-\lambda(A_0 - A_w)}{1 - e^{-\lambda(T_0 - 1963)}} A_w = \sum_{x=w}^n C_x \rho_x$

1963 年时标之后的年代计算公式为:

$$T_m = 1963 - \lambda^{-1} \ln(A_w A_m^{-1}) \quad (3)$$

式中: T_m —— m 质量深度对应的年代;

T_0 ——采样年份;

λ ——²¹⁰Pb 的衰变常数, 值为 0.031 14;

A_0 ——整个沉积岩心²¹⁰Pb_{ex} 累积量/(Bq·cm⁻²);

A_m —— m 质量深度以下²¹⁰Pb_{ex} 累积量/(Bq·cm⁻²);

C_x —— x 质量深度的²¹⁰Pb_{ex} 活度/(Bq·kg⁻¹);

ρ_x —— x 质量深度的样品容重/(g·cm⁻³);

A_w ——1963 年所对应的 w 层位以下²¹⁰Pb_{ex} 累积量/(Bq·cm⁻²)。

(3) 碳埋藏速率

钻孔样品的无机碳埋藏速率(inorganic carbon accumulation rate, ICAR)和有机碳埋藏速率(organic carbon accumulation rate, OCAR)按照标准计算方法获得^[40], 即碳埋藏速率(carbon accumulation rate, CAR)等于沉积物沉积速率与碳含量的乘积。计算公式如下:

$$v_{\text{MAR}} = \rho \cdot v_{\text{SR}} \quad (4)$$

$$v_{\text{ICAR}} = v_{\text{MAR}} \cdot c_{\text{TIC}}/100 \quad (5)$$

$$v_{\text{OCAR}} = v_{\text{MAR}} \cdot c_{\text{TOC}}/100 \quad (6)$$

式中: ρ ——沉积物干容重/(g·m⁻³);

v_{SR} ——沉积速率/(m·a⁻¹);

v_{MAR} ——沉积物干质量沉积速率/(g·m⁻²·a⁻¹);

v_{ICAR} ——无机碳埋藏速率/(g·m⁻²·a⁻¹);

v_{OCAR} ——有机碳埋藏速率/(g·m⁻²·a⁻¹);

c_{TOC} 、 c_{TIC} ——有机碳和无机碳的含量/%。

(4) 水体碳酸盐饱和系数

可溶性碳酸盐饱和是自生碳酸盐形成的必要条件, 可以通过比较湖水离子活度积(ionic activity product, IAP)与溶解平衡常数(K_{sp})的大小来判断湖水是否碳酸盐饱和, 离子活度积计算公式如下^[26]:

$$IAP = (Ca^{2+}) \cdot (CO_3^{2-}) = \{r_{Ca^{2+}} \cdot [Ca^{2+}] \cdot r_{HCO_3^-} \cdot K_2 \cdot Alk\} / (H^+) \quad (7)$$

式中: (Ca^{2+}) —— Ca^{2+} 的活度积;

(CO_3^{2-}) —— CO_3^{2-} 的活度积;

$r_{Ca^{2+}}$ —— Ca^{2+} 的活度系数;

$r_{HCO_3^-}$ —— HCO_3^- 的活度系数;

$[Ca^{2+}]$ ——湖水的 Ca^{2+} 浓度/(mmol·L⁻¹);

K_2 —— HCO_3^- 的二级解离常数;

Alk ——湖水碱度(以 $CaCO_3$ 质量浓度计)/(mg·L⁻¹);

(H^+) —— H^+ 活度, 可通过 pH 值转换得到, $pH = -\lg(H^+)$ 。

溶解平衡常数(K_{sp})、 HCO_3^- 的二级解离常数(K_2)和离子活度积(IAP)的值会随温度发生变化。取样时间为夏季, 水温相对较高(>20 °C), 而且温度在 20 °C 以上时, 湖水样品多数产生过饱和的碳酸盐形成环境, 所以在计算过程中这些参数均取 25 °C 条件下的值。综上, 碳酸盐饱和系数即可用 IAP/K_{sp} 表示, 系数 >1 即为过饱和。

2 结果

2.1 年代标尺

²¹⁰Pb-¹³⁷Cs 测年法是湖泊沉积物常用测年方法之一^[41]。由于受到径流和降水、沉积速率等不确定因素的影响, 湖泊²¹⁰Pb 入湖通量并不恒定, 从而导致恒定通量模式的定年精度降低^[41]。大气核武器试验造成的¹³⁷Cs 最大沉降在 1963 年在北半球达到顶峰^[36]。虽然¹³⁷Cs 可能会由于环境影响而经历一些扩散和迁移, 但其峰值位置通常保持稳定(1963 年), 使其成为一个相对可靠的时间标志点^[36]。因此, ²¹⁰Pb-¹³⁷Cs 的复合模式^[37]可以提供更精确的结果。

岩心 HZH-12 的¹³⁷Cs 浓度和年代-深度序列如图 2 所示。HZH-12 的¹³⁷Cs 浓度垂直曲线(红色)呈明显单

峰态模式, 在 34 cm 处达到峰值。年代曲线(蓝色)在 34 cm 处为 1963 年, 与 ^{137}Cs 浓度峰值相对应。

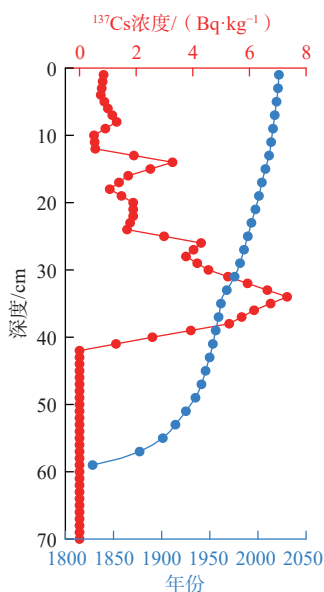


图 2 岩心 HZH-12 的测年结果

Fig. 2 The age result of HZH-12 in Hongze Lake

洪泽湖在 20 世纪 50 年代大量新建水利设施, 主要包括 1953 年建成出水口的三河闸和 1962 年建成的淮河上游蚌埠闸^[30]。由于建闸蓄水会对洪泽湖水文条件产生影响, 并且可能会影响湖泊碳埋藏。因此, 下文将只针对 1962 年蚌埠闸建闸后水文条件相对稳定的时间段展开分析讨论。

2.2 碳含量

如图 3 所示, 洪泽湖表层沉积物的 TOC 含量范围为 0.32% ~ 0.83%, 均值为 0.61%。TIC 含量为 0.54% ~ 1.73%, 均值为 1.09%。除 HZH-1 外, 其余各点的 TOC 含量均明显低于 TIC, 且 TOC/TIC 范围为 0.25 ~ 1.25, 均值为 0.62; 而岩心中的 TIC 含量均值为 0.97%, 也是要高于有机碳含量(均值为 0.73%)。而且 TIC 含量在所有层位的 TC 含量中比重范围为 0.44 ~ 0.80, 均值为 0.57, 可见洪泽湖沉积物中无机碳含量十分可观。图 3 还显示, 表层 TOC 和 TIC 的含量分布并不一致, TOC 含量在东部和西部与 TIC 含量差距相对较小($C_{\text{TOC}}/C_{\text{TIC}} > 0.70$); 而在洪泽湖中部, TOC 含量甚至不足 TIC 含量的一半($C_{\text{TOC}}/C_{\text{TIC}} < 0.50$)。岩心内的 TOC 与 TIC 含量相关性也并不显著(图 4, $R^2=0.43$, $p<0.001$)。

2.3 碳埋藏效率

如图 5 所示, OCAR 取值范围为 15.64 ~ 57.45 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 均值为 25.27 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$; ICAR 与 OCAR 的累积

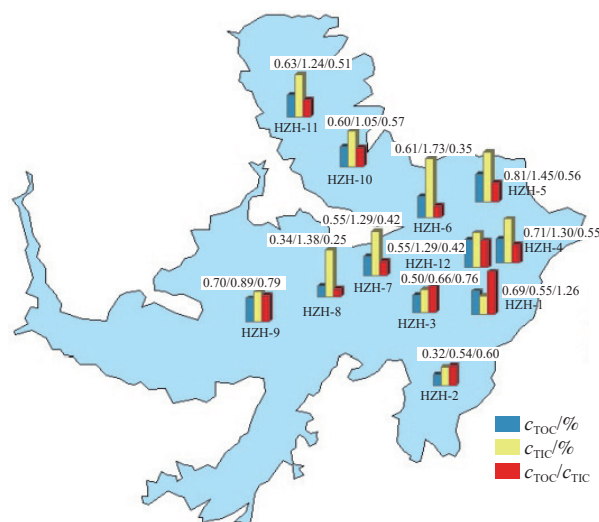


图 3 洪泽湖表层沉积物碳含量分布图

Fig. 3 Carbon content distribution in surface sediments of Hongze Lake

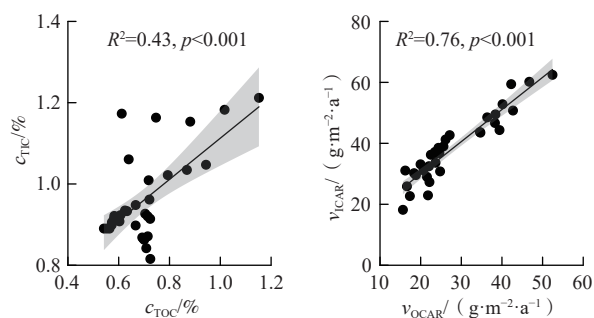


图 4 TOC 和 TIC 之间及 OCAR 和 ICAR 之间的相关性分析

Fig. 4 Analysis of correlation between organic and inorganic carbon content and correlation between accumulation rates of organic and inorganic carbon

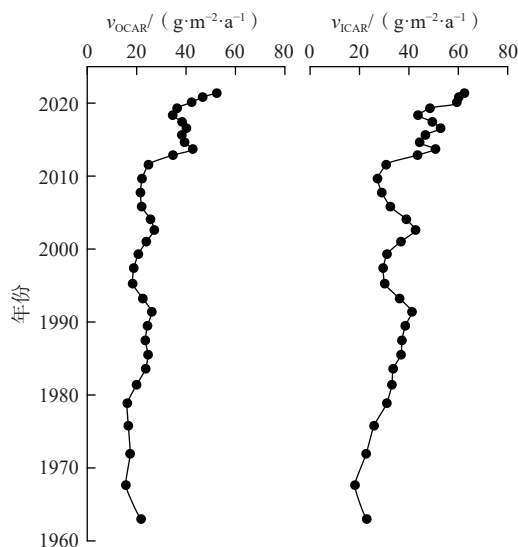


图 5 岩心 HZH-12 的 OCAR 和 ICAR 垂直变化

Fig. 5 The vertical variation curves of OCAR and ICAR in core HZH-12

趋势很相似,取值范围为 $18.18 \sim 62.47 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。ICAR 在近 60 年内的均值为 $34.27 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,明显高于 OCAR。此外,OCAR 与 ICAR 比值的均值为 0.75,且线性回归结果(图 4, $R^2=0.76$, $p<0.001$)也证明,OCAR 与 ICAR 相关性较好,洪泽湖有机碳和无机碳累积存在较好的协同性和一致性。

3 分析与讨论

3.1 洪泽湖碳来源

由于纤维素含量的差异,不同来源有机碳中的 C/N 具有显著差异:湖泊藻类 C/N 通常在 $4 \sim 8$ 之间,沉水和漂浮的大型植物在 $10 \sim 20$ 之间,陆地维管植物则 >20 ^[42]。由于固定 CO_2 的方式不同, C3 类植物 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 $-24\text{‰} \sim -37\text{‰}$ 之间, C4 植物在 $-9\text{‰} \sim -19\text{‰}$ 范围内;并且水生植物多为 C3 植物,而 C4 植物则主要是陆生植物^[42-43]。由于湖泊沉积物包含了多种有机质来源,因此将二者相结合能提供更为准确的结果^[44]。如图 6 所示,洪泽湖沉积物有机质的 C/N 范围为 $6.69 \sim 19.33$,平均 C/N 为 10.78,大部分在浮游藻类($4 < \text{C}/\text{N} < 8$)范围内,少部分 C/N 在 $8 \sim 20$ 之间,接近沉水和漂浮的大型植物,而明显低于陆生维管植物($\text{C}/\text{N} > 20$)。同时,沉积物有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-26.4\text{‰} \sim -24.2\text{‰}$ 之间,大部分都在 C3 植物范围内,而明显低于陆生的 C4 植物。综上,洪泽湖沉积物有机质以内源藻类为主,可能混有部分大型水生植物和少量外源组分。

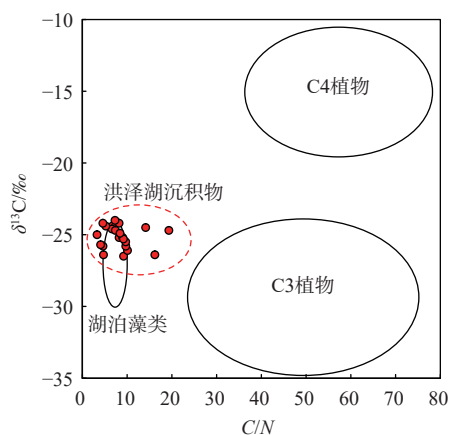


图 6 洪泽湖沉积物有机碳与湖泊典型有机碳来源 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 对照

Fig. 6 Comparison of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ranges between OC in sediment (Hongze Lake), lacustrine algae, C4 plants, and C3 plants

外源碎屑碳酸盐主要通过河流输入湖泊。淮河是洪泽湖的主要入湖河流,也是洪泽湖的主要泥沙来

源^[35]。淮河入湖前的沉积物的矿物鉴定显示碳酸盐主要由方解石和白云石组成,含量为 $1.49\% \sim 2.93\%$ 和 $1.25\% \sim 2.4\%$ (矿物颗粒数量百分比)^[45]。由于白云石多见于古老沉积物中,并且在现代水体中尚未发现自生白云石沉积,因此白云石通常被认为来自基岩碎屑^[46-47]。而洪泽湖下游与高邮湖相连河段中白云石颗粒含量接近 0^[45],说明洪泽湖确实存在一定的碎屑碳酸盐输入。理论上,湖泊受径流补给影响,边缘碎屑碳酸盐沉积较多,向内逐渐减少^[48],但是洪泽湖表层沉积物 TIC 含量并不存在明显的从淮河入湖口逐渐递减的变化趋势,表明除了碎屑碳酸盐,可能还有其他来源。

自生碳酸盐形成的必要条件是可溶性碳酸盐的过饱和^[26]。如表 1 所示,在夏秋季节,水温高于 20°C 的情况下,主要入湖河流除新汴河和维桥河饱和系数大于 1,其他河流(包括占入湖水量 70% 以上的淮河)均小于 1;而湖水样品中有接近一半饱和系数大于 1;同时出湖河流的饱和系数也均小于 1。这意味着在湖泊中存在满足碳酸盐沉积的局部微环境,可以生成碳酸盐沉淀,因而自生碳酸盐可能是洪泽湖无机碳的重要来源。

3.2 洪泽湖有机碳和无机碳协同变化

HZH-12 孔 TOC 与 TIC 相关性较 OCAR 和 ICAR 的相关性差(图 4),这可能是由于碳含量的物理意义不明确的原因。在单位时间内碳埋藏量相同的情况下,由于碳埋藏效率是碳含量和沉积速率的乘积,高沉积速率必然对应更低的碳含量;因此不同位置相同时间段或者同一位置不同时间段沉积速率的变化会导致碳含量在时间上或者空间上出现变化,但这一变化并不代表湖泊碳埋藏效率的变化。因此碳含量与沉积速率相乘后的碳埋藏效率的意义更为清晰。

OCAR 与 ICAR 呈一定比例的共同增长可能意味着洪泽湖无机碳埋藏主要来自于自生无机碳。如果无机碳主要为外源碎屑碳,考虑到有机碳主要为内源有机碳,二者不应该有如此高的相关性。因此对于 HZH-12 孔,推测无机碳主要为自生碳酸盐。尽管季节性的湖泊水化学变化以及生物作用均可能导致自生碳酸盐的沉积^[30,49],但是洪泽湖作为湿润地区的外流湖,湖水平均驻留时间仅有 27d^[35],大量的淡水注入以及极快的湖水更新速率使得类似干旱区封闭湖泊因为夏季湖水蒸发浓缩以及温度升高溶解度下降导致的自生碳酸盐沉积似乎难以实现^[21]。目前已有研究显示,即使在淡水湖泊中,浮游植物的光合作用由于

表 1 洪泽湖内部及几条主要河流入湖、出湖口水化学指标

Table 1 Water chemical indexes of Hongze Lake and inflow, outlet of several main rivers

水样点	总碱度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH值	Ca^{2+} 浓度 ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	HCO_3^- 浓度 ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	饱和系数(不同温度)				
					5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C
淮河	136.7	7.05	2.14	2.73	0.22	0.27	0.31	0.37	0.44
维桥河	185.5	7.26	3.14	3.71	0.51	0.61	0.72	0.85	1.02
新汴河	214.3	7.47	1.94	4.28	0.66	0.79	0.93	1.10	1.32
怀洪新河	200.2	7.21	2.00	4.00	0.35	0.42	0.49	0.58	0.70
徐洪河	161.6	7.18	2.18	3.23	0.31	0.38	0.44	0.52	0.63
老汴河	166.5	7.12	1.96	3.33	0.27	0.32	0.38	0.44	0.53
二河	110.4	7.07	1.81	2.21	0.17	0.21	0.24	0.28	0.34
三河	122.7	7.15	1.93	2.45	0.24	0.28	0.33	0.39	0.47
HZH-1	127.4	7.66	1.93	2.55	0.76	0.91	1.07	1.26	1.51
HZH-2	124.5	7.32	1.93	2.49	0.35	0.43	0.50	0.59	0.71
HZH-3	119.6	7.13	1.92	2.39	0.22	0.26	0.31	0.36	0.44
HZH-4	124.5	7.11	1.92	2.49	0.21	0.25	0.30	0.35	0.42
HZH-5	137.2	7.44	1.96	2.74	0.48	0.57	0.67	0.79	0.95
HZH-6	136.7	7.12	1.96	2.73	0.23	0.28	0.33	0.38	0.46
HZH-7	130.8	7.6	1.85	2.61	0.64	0.77	0.91	1.06	1.28
HZH-8	129.4	7.17	1.91	2.59	0.24	0.29	0.34	0.41	0.49
HZH-9	122.5	7.65	1.84	2.45	0.68	0.82	0.96	1.31	1.36
HZH-10	156.7	7.21	2.19	3.13	0.33	0.40	0.47	0.55	0.66
HZH-11	151.3	7.60	2.14	3.02	0.77	0.93	1.09	1.28	1.54
HZH-13	146.5	7.60	2.11	2.93	0.74	0.89	1.05	1.23	1.48

消耗了水体中大量溶解 CO_2 , 促进了水体碳酸盐矿物饱和度的上升并促使自生碳酸盐的形成, 从而实现水体溶解无机碳向内源有机质和自生碳酸盐的同步转化^[50-51], 使得 OCAR 和 ICAR 具有较好的相关性, 这也可能是洪泽湖无机碳埋藏的主要机制。

但是不同位置的表层沉积物的 $C_{\text{TOC}}/C_{\text{TIC}}$ 并不完全相同(等同于 $v_{\text{OCAR}}/v_{\text{ICAR}}$)(图 4)。沉积过程中的有机质会出现氧化分解, 有机质氧化后释放的 CO_2 也会导致碳酸盐的溶蚀^[52]。尽管这一过程会使得 $v_{\text{OCAR}}/v_{\text{ICAR}}$ 产生变化, 但是对于同一地点来说, 由于水深和水动力条件等因素的相对恒定, 有机碳氧化和无机碳溶蚀作用也会保持相对平衡, 因而并不会显著影响单个岩心中的 $v_{\text{OCAR}}/v_{\text{ICAR}}$ 以及二者的相关性。但对于空间上不同位置的表层沉积物而言, 有机碳氧化和无机碳溶蚀的空间差异会导致 $C_{\text{TOC}}/C_{\text{TIC}}$ ($v_{\text{OCAR}}/v_{\text{ICAR}}$) 产生差异。

3.3 与其他湖泊碳埋藏的对比

如图 7 所示, 洪泽湖 OCAR 为 $25.27 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, ICAR 为 $34.27 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。相应的, 以洪泽湖面积为 1500 km^2 计算, 洪泽湖 OC 埋藏量为 37.91 Gg/a , 占到总碳埋藏量的 42.4%, IC 埋藏量为 51.41 Gg/a , 占总埋藏量的 57.6%。相对于其他湖泊^[15, 20-24], 洪泽湖的 OCAR 并不高, 远低于喀斯特地区异龙湖的 $84.9 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 而与博

斯腾湖的 $25.9 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 、呼伦湖的 $35.68 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 、月湖的 $34.4 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 接近。但是其 ICAR 却能达到 $34.27 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 虽然无法与异龙湖的 $72.7 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和干旱区博斯腾湖的 $60.9 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 相比, 但是与其他湖泊的无机碳累积速率相差不大。而且无机碳比重明显大于有机碳, 除长湖(74.9%)和博斯腾湖(70.1%)外, 洪泽湖的无机碳比重要高于青海湖、月湖、异龙湖和呼伦湖。而相比于内陆地区和喀斯特地区, 洪泽湖既没有干旱气候、封闭状态和高盐度条件, 流域内又缺乏丰富的碳酸盐岩矿物, 却能达到如此高比例的无机碳埋藏, 尽管推断与浮游植物光合作用导致的有机碳-无机碳协同埋藏相关, 但是仍然需要更多的研究进行证实。

洪泽湖无机碳埋藏在碳埋藏总量中的高占比表明东部平原区湖泊除了有机碳汇外, 还存在一个相当庞大的无机碳汇。东部平原湖区湖泊众多, 占到湖泊总面积的 25.9%^[25], 以往的研究多对该区域湖泊的无机碳埋藏忽略不计, 这可能会造成类似区域湖泊碳埋藏能力的极大低估。

3.4 结果的不确定性

本研究样品取样时间为 2022 年 6 月, 是洪泽湖流域的夏季, 气温较高, 相应的湖泊水温也较高。而湖

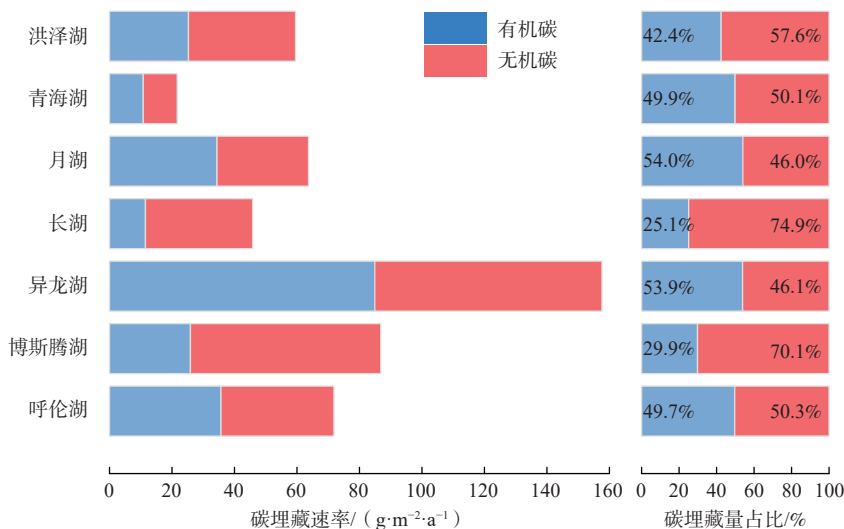


图 7 不同区域湖泊^[15,20-24]碳埋藏速率以及有机碳和无机碳埋藏占比

Fig. 7 Lake carbon burial rates and the proportion of organic and inorganic carbon burial in different regions

水中能否形成碳酸盐的过饱和环境与水温息息相关。不同的水温梯度对应着不同的水体碳酸盐饱和系数(表 1), 当水温 $>20^{\circ}\text{C}$ 时, 洪泽湖部分水体才会形成局部的碳酸盐过饱和环境, 进而生成碳酸盐沉积, 这主要得益于夏季水温较高的条件。但如果在冬季取样, 水温较低, 当水温 $<20^{\circ}\text{C}$ 时, 碳酸盐过饱和环境则很难形成, 进而对结果带来极大不确定性。因此, 不同季节的采样会因为所调查水温不同, 进而造成分析结果的差异。在今后的研究中, 可以进一步完善试验设计, 兼顾不同季节的样品采集, 以提高结果的准确性。

4 结论

(1)通过对洪泽湖表层沉积物以及沉积物岩心的有机碳和无机碳含量分析, 发现碳酸盐在洪泽湖沉积物中普遍存在, 表层沉积物中无机碳含量为 1.09%, 远高于有机碳含量 0.61%; 并且钻孔中无机碳含量占到了总碳含量的 40% 至 80%; 洪泽湖有机碳在总碳埋藏中占比仅为 42.4%, 而无机碳埋藏量在总碳埋藏量中占比达 57.6%, 这一高占比意味着过去对东部平原区湖泊无机碳埋藏的忽略可能造成对该区域湖泊碳埋藏能力的极大低估。

(2)洪泽湖 HZH-12 钻孔中近 60 年来的 OCAR 为 $25.27\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, ICAR 为 $34.27\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 二者之间极强的正相关性($R^2=0.76, p<0.001$), 以及有机碳的内源特征, 表明洪泽湖的无机碳沉积可能与浮游藻类的光合作用密切相关。

(3)相比于干旱-半干旱区和喀斯特地区湖泊, 湿

润平原区的洪泽湖同样具有较高比例的无机碳埋藏。

致谢:感谢姜高磊、王成敏的野外采样工作; 感谢赵红梅、吉云平、刘哲在样品测试方面的贡献; 感谢毛欣、杨劲松对样品处理和软件操作的建议和帮助!

参考文献 (References) :

[1] LEE H, ROMERO J, CALVIN K, et al. Summary for policymakers[R]//Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023: 1 – 34.

[2] YANG Yuanhe, SHI Yue, SUN Wenjuan, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. *Science China (Life Sciences)*, 2022, 65(5): 861 – 895.

[3] 郑吉林, 蔡艳龙, 郭晓宇, 等. 基于 InVEST 模型的晋北土地利用变化与碳储量研究 [J]. 地质通报, 2024, 43(1): 173 – 180. [ZHENG Jilin, CAI Yanlong, GUO Xiaoyu, et al. Study on land use change and carbon stock in northern Shanxi Province based on InVEST model[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(1): 173 – 180. (in Chinese with English abstract)]

[4] 韩云亭, 李思悦, 罗协. 基于 GF-2 影像的武汉市九峰山国家森林公园地上碳储量估算 [J]. 地质通报, 2024, 43(4): 611 – 619. [HAN Yunting, LI Siyue, LUO Xie. Estimation of above-ground carbon storage in the Jiufengshan National Forest Park of Wuhan based on GF-2 images[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4): 611 – 619. (in Chinese with English abstract)]

- [5] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 等. 中国陆地生态系统固碳效应——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展 [J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 848 – 857. [FANG Jingyun, YU Guirui, REN Xiaobo, et al. Carbon sequestration in China's terrestrial ecosystems under climate change—progress on ecosystem carbon sequestration from the CAS strategic priority research program[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 848 – 857. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 付宇佳, 刘晓煌, 孙兴丽, 等. 近 30 年西北内陆荒漠资源大区土地利用驱动下生态系统碳储量时空变化 [J]. 地质通报, 2024, 43(2/3): 451 – 462. [FU Yujia, LIU Xiaohuang, SUN Xingli, et al. Spatial-temporal variation of ecosystem carbon storage driven by land use in northwest inland desert resource region in recent 30 years[J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(2/3): 451 – 462. (in Chinese with English abstract)]
- [7] EINSELE G, YAN Jianping, HINDERER M. Atmospheric carbon burial in modern lake basins and its significance for the global carbon budget[J]. Global and Planetary Change, 2001, 30(3/4): 167 – 195.
- [8] DEAN W E, GORHAM E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands[J]. *Geology*, 1998, 26(6): 535 – 538.
- [9] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440: 165 – 173.
- [10] TRANVIK L J, DOWNING J A, COTNER J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate[J]. Limnology and Oceanography, 2009, 54(6): 2298 – 2314.
- [11] ANDERSON N J, HEATHCOTEET A J, ENGSTROM D R, et al. Anthropogenic alteration of nutrient supply increases the global freshwater carbon sink[J]. *Science Advances*, 2020, 6(16): 1-8.
- [12] HEATHCOTE A J, ANDERSON N J, PRAIRIE Y T, et al. Large increases in carbon burial in northern lakes during the Anthropocene[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 10016.
- [13] 徐福留, 何玘霜, 孔祥臻, 等. 现代巢湖生态系统演化规律的地球化学记录分析 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(增刊 1): 425. [XU Fuli, HE Qishuang, KONG Xiangzhen, et al. Geochemical record analysis of the evolution law of modern Chaohu Lake ecosystem[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(Sup1): 425. (in Chinese)]
- [14] 张风菊, 桂智凡, 薛滨, 等. 温度对呼伦湖沉积物有机碳埋藏及矿化影响研究 [J]. 第四纪研究, 2020, 40(5): 1240 – 1250. [ZHANG Fengju, GUI Zhifan, XUE Bin, et al. Effects of temperature on organic carbon burial and mineralization in sediments of Hulun Lake[J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(5): 1240 – 1250. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 郝盛吞, 周爱锋, 张晓楠, 等. 湖泊沉积有机碳埋藏效率及其影响要素研究进展 [J]. 地球环境学报, 2017, 8(4): 292 – 306. [HAO Shengtun, ZHOU Aifeng, ZHANG Xiaonan, et al. Progress of research on the burial efficiency of organic carbon and its influencing factors in lacustrine sediments[J]. *Journal of Earth Environment*, 2017, 8(4): 292 – 306. (in Chinese with English abstract)]
- [16] EDMONDSON W T. The sedimentary record of the eutrophication of Lake Washington[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1974, 71(12): 5093 – 5095.
- [17] MENG Xianqiang, CHEN Xi, LIN Qi, et al. Spatiotemporal patterns of organic carbon burial over the last century in Lake Qinghai, the largest lake on the Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 860: 160449.
- [18] XU Hai, LAN Jianghu, LIU Bin, et al. Modern carbon burial in Lake Qinghai, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 39: 150 – 155.
- [19] LIN Qi, LIU Enfeng, ZHANG Enlou, et al. Organic carbon burial in a large, deep alpine lake (southwest China) in response to changes in climate, land use and nutrient supply over the past ~100 years[J]. *Catena*, 2021, 202: 105240.
- [20] 李平, 陈光杰, 孔令阳, 等. 近百年来异龙湖有机碳和无机碳埋藏响应水体富营养化的协同变化特征 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(10): 5389 – 5402. [LI Ping, CHEN Guangjie, KONG Lingyang, et al. Synergistic changes of organic and inorganic carbon burial in response to eutrophication in Yilong Lake over the past 100 years[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(10): 5389 – 5402. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王露, 陈光杰, 黄林培, 等. 近百年来湖泊有机碳与无机碳埋藏响应流域开发的协同变化——以石林喀斯特地区为例 [J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1751 – 1764. [WANG Lu, CHEN Guangjie, HUANG Linpei, et al.

- Synchronic changes of lake organic and inorganic carbon burial in response to catchment development over the past century: A case study of Shilin Karst Area[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(5): 1751 – 1764. (in Chinese with English abstract)]
- [22] ZHANG Fengju, XUE Bin, YAO Shuchun, et al. Organic carbon burial from multi-core records in Hulun Lake, the largest lake in northern China[J]. *Quaternary International*, 2018, 475: 80 – 90.
- [23] 张风菊, 薛滨, 姚书春. 1850 年以来呼伦湖沉积物无机碳埋藏时空变化 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(6): 1770 – 1782. [ZHANG Fengju, XUE Bin, YAO Shuchun. Spatiotemporal pattern of inorganic carbon sequestration in Lake Hulun since 1850[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(6): 1770 – 1782. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 于志同, 李广宇, 张恩楼, 等. 1860 年以来博斯腾湖碳沉积过程演变 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(1): 293 – 304. [YU Zhitong, LI Guangyu, ZHANG Enlou, et al. Process variations of sedimentary carbon accumulation in Lake Bosten since 1860[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(1): 293 – 304. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊调查报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 3 – 16. [Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences. Report on lake survey in China[M]. Beijing: Science Press, 2019: 3 – 16. (in Chinese)]
- [26] 陈敬安, 万国江, 汪福顺, 等. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2002, 32(1): 73 – 80. [CHEN Jing'an, WAN Guojiang, WANG Fushun, et al. Study on carbon environmental records modern sediments in lakes[J]. *Science China Earth Sciences*, 2002, 32(1): 73 – 80. (in Chinese)]
- [27] 杨洪, 易朝路, 谢平, 等. 武汉东湖沉积物碳氮磷垂向分布研究 [J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 507 – 514. [YANG Hong, YI Chaolu, XIE Ping, et al. Vertical distribution of carbon, nitrogen and phosphorus of sediments at Stations I and II in Lake Donghu, Wuhan[J]. *Geochimica*, 2004, 33(5): 507 – 514. (in Chinese with English abstract)]
- [28] YANG Hong, XING Yangping, XIE Ping, et al. Carbon source/sink function of a subtropical, eutrophic lake determined from an overall mass balance and a gas exchange and carbon burial balance[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 151(3): 559 – 568.
- [29] MEGARD R O. Planktonic photosynthesis and the environment of calcium carbonate deposition in lakes[J]. *SIL Communications*, 1969, 17(1): 94.
- [30] KELTS K, HSÜ K J. Freshwater carbonate sedimentation [J]. *Lakes*, 1978: 295–323.
- [31] XIANG L, LU X X, HIGGITT D L, et al. Recent lake sedimentation in the middle and lower Yangtze Basin inferred from ^{137}Cs and ^{210}Pb measurements[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21(1): 77 – 86.
- [32] 强柳燕, 张风菊, 陈诗越. 近百年来洪泽湖有机碳垂直分布特征及其影响因素 [J]. *人民长江*, 2021, 52(12): 40 – 46. [QIANG Liuyan, ZHANG Fengju, CHEN Shiyue. Vertical distribution characteristics of organic carbon in Lake Hongze in recent 100 years and its influencing factors[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(12): 40 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 卞宇峥, 薛滨, 张风菊. 近三百年来洪泽湖演变过程及其原因分析 [J]. *湖泊科学*, 2021, 33(6): 1844 – 1856. [BIAN Yuzheng, XUE Bin, ZHANG Fengju. The changes of Lake Hongze and its driving forces over the past three hundred years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(6): 1844 – 1856. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 《洪泽湖志》编纂委员会. 洪泽湖志 [M]. 北京: 方志出版社, 2003. [The Compilation Committee of Lake Hongze Annals. Lake Hongze records[M]. Beijing: Local records Publishing House, 2003. (in Chinese)]
- [35] 贲鹏, 虞邦义, 张辉, 等. 洪泽湖水沙变化趋势和冲淤时空分布及驱动因素 [J]. *湖泊科学*, 2021, 33(1): 289 – 298. [BEN Peng, YU Bangyi, ZHANG Hui, et al. Spatiotemporal runoff and sediment variation, deposition-erosion characteristics and their driving factors in Lake Hongze[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(1): 289 – 298. (in Chinese with English abstract)]
- [36] APPLEBY P G. Chronostratigraphic techniques in recent sediments[M]//Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2005: 171 – 203.
- [37] APPLEBY P G, OLDFIELD F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment[J]. *Catena*, 1978, 5(1): 1 – 8.
- [38] 姚亮, 张四维, 嵇文涛. 土壤样品中 TOC 的测定浅析 [J]. *油气田环境保护*, 2017, 27(4): 46 – 48. [YAO Liang, ZHANG Siwei, JI Wentao. Brief analysis of TOC determination in soil samples[J]. *Environmental*

- [Protection of Oil & Gas Fields](#), 2017, 27(4): 46 – 48. (in Chinese with English abstract)]
- [39] DEL GALDO I, SIX J, PERESSOTTI A, et al. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes[J]. [Global Change Biology](#), 2003, 9(8): 1204 – 1213.
- [40] ALIN S R, JOHNSON T C. Carbon cycling in large lakes of the world: A synthesis of production, burial, and lake-atmosphere exchange estimates[J]. [Global Biogeochemical Cycles](#), 2007, 21(3).
- [41] 刘恩峰, 薛滨, 羊向东, 等. 基于 ^{210}Pb 与 ^{137}Cs 分布的近代沉积物定年方法——以巢湖、太白湖为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 89 – 94. [LIU Enfeng, XUE Bin, YANG Xiangdong, et al. ^{137}Cs and ^{210}Pb chronology for modern lake sediment: A case study of Chaohu Lake and Taibai Lake[J]. [Marine Geology & Quaternary Geology](#), 2009, 29(6): 89 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [42] SMITH B N, EPSTEIN S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants[J]. [Plant Physiol](#), 1971, 47: 380 – 384.
- [43] MEYERS P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. [Chemical Geology](#), 1994, 114(3/4): 289 – 302.
- [44] MEYERS P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes[J]. [Organic Geochemistry](#), 2003, 34(2): 261 – 289.
- [45] 王孟瑶. 淮河洪泽湖段现代沉积物主要碎屑矿物特征研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2019. [WANG Mengyao. Study on characteristics of main detrital minerals in modern sediments of the Lake Hongze reach in the Huai River[D]. Yantai: Ludong University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [46] 姜文英, 吴海斌, 储国强, 等. 内蒙古巴彦查干湖白云石的成因及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2010, 30(6): 1116 – 1120. [JIANG Wenying, WU Haibin, CHU Guoqiang, et al. Origin of dolomite in Lake Bayanchagan, Inner Mongolia and its palaeoclimatic implications[J]. [Quaternary Sciences](#), 2010, 30(6): 1116 – 1120. (in Chinese with English abstract)]
- [47] WARREN J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. [Earth Science Reviews](#), 2000, 52(1): 1 – 81.
- [48] 姜高磊, 王乃昂, 李卓仑, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊表层沉积物盐类矿物分布及对气候环境的指示[J/OL]. 中国地质, (2022-05-24) [2024-01-30]. [JIANG Gaolei, WANG Naiang, LI Zhuolun, et al. Distribution pattern of saline minerals in surface sediments from lakes in the Badain Jaran desert and its implications for climate-environmental reconstruction[J/OL]. [Geology in China](#), (2022-05-24) [2024-01-30]. (in Chinese with English abstract)]
- [49] 刘华琳. 基于形态的呼伦湖无机碳地球化学特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2010. [LIU Hualin. Based on the form of geochemistry character of inorganic carbon in Hulun Lake[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [50] ZHU Tingting, DITTRICH M. Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: A review[J]. [Frontiers in Bioengineering and Biotechnology](#), 2016, 4: 4. DOI: 10.3389/fbioe.2016.00004
- [51] SUN Dayang, HE Yuxin, WU Jinglu, et al. Hydrological and ecological controls on autochthonous carbonate deposition in Lake Systems: A case study from Lake Wuliangsu and the global perspective[J]. [Geophysical Research Letters](#), 2019, 46(12): 6583 – 6593.
- [52] WANG Wanfa, LI Siliang, ZHONG Jun, et al. Carbonate mineral dissolution and photosynthesis-induced precipitation regulate inorganic carbon cycling along the karst river-reservoir continuum, SW China[J]. [Journal of Hydrology](#), 2022, 615: 128621.

编辑: 汪美华