

1850 年以来呼伦湖沉积物无机碳埋藏时空变化*

张风菊¹, 薛 滨^{2**}, 姚书春²

(1: 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 徐州 221116)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘 要: 湖泊沉积物碳埋藏及其驱动机制是陆地生态系统碳循环及全球变化研究的热点问题之一, 但以往湖泊碳循环的研究大多局限于有机碳, 较少考虑无机碳的地位和作用. 我国干旱—半干旱地区湖泊众多, 无机碳储量丰富, 在区域碳循环过程中的作用日益突出, 因此探讨这些地区湖泊沉积物无机碳埋藏变化对深入理解区域碳循环具有重要意义. 本研究通过对内蒙古高原呼伦湖 15 个沉积岩芯样品无机碳含量(TIC)的测定, 结合沉积岩芯²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 年代标尺, 分析了 1850 年以来呼伦湖无机碳埋藏速率时空变化, 并揭示了影响呼伦湖无机碳埋藏的主要因素. 结果表明, 1980s 之前, 呼伦湖无机碳含量总体维持在相对稳定的低值, 1980s 之后开始快速增加, 且近百年来呼伦湖平均无机碳含量在不同湖区差异不显著. 1850 年以来呼伦湖无机碳埋藏速率变化范围约为 7.10~74.29 g/(m²·a), 平均值约为 36.15 g/(m²·a), 且大体上可分为 3 个阶段, 即 1900s 以前相对稳定的低值阶段、1900s—1950s 期间的快速增加阶段以及 1950s 以来的波动增加阶段, 各阶段无机碳埋藏速率平均值分别约为 10.40、26.29 和 41.00 g/(m²·a). 空间上, 呼伦湖无机碳埋藏速率整体表现为中部高、南北两端低的分布格局, 这可能与湖心水动力条件相对稳定, 有利于碳酸盐沉积有关. 此外, 呼伦湖无机碳埋藏速率与湖区温度变化呈显著正相关, 而与周边人类活动影响关系不明显, 表明在未来全球变暖背景下, 呼伦湖无机碳埋藏速率将进一步增加, 湖泊在区域碳循环中的作用将更加显著.

关键词: 无机碳埋藏速率; 时空变化; 影响因素; 呼伦湖

Spatiotemporal pattern of inorganic carbon sequestration in Lake Hulun since 1850

ZHANG Fengju¹, XUE Bin^{2**} & YAO Shuchun²

(1: School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract: Carbon sequestration and its driving mechanism in lake sediments is one of the hot issues in research of terrestrial ecosystem carbon cycling and global change. However, previous studies on lake carbon burial were often limited to organic carbon, and less work have taken inorganic carbon into account. A large number of lakes are distributed in arid and semi-arid regions of China, and these lakes have a huge potential to sequester inorganic carbon. Therefore, exploring the changes of inorganic carbon burial in lake sediments is of great significance for understanding the regional carbon cycle. In this study, fifteen sediment cores were collected in the Lake Hulun of northeastern Inner Mongolia using a gravity core sampler. The total inorganic carbon (TIC) contents as well as the sediment ages were analyzed to investigate the spatiotemporal changes of inorganic carbon burial and its driving factors over the past century. The results indicated that TIC content of Lake Hulun was remained stable and relatively low before 1980s, and then demonstrated an increasing trend. No significant variation was observed in the average TIC content among all the sediment cores. The inorganic carbon burial rate (ICBR) varied from 7.10 g/(m²·a) to 74.29 g/(m²·a) among the studied sediment cores and the average value was 36.15 g/(m²·a). In general, the changes of ICBR can be divided into three stages. The ICBR was very low before 1900s, followed by an obvious increase between 1900s and 1950s, and exhibited an overall fluctuating upward tendency after 1950s. The average ICBR for the three time periods were 10.40 g/(m²·a), 26.29 g/(m²·a) and 41.00 g/(m²·a), respec-

* 国家自然科学基金项目(41807281, 41573129)和湖泊与环境国家重点实验室开放研究基金项目(2018SKL003)联合资助. 2019-03-11 收稿; 2019-06-17 收修改稿. 张风菊(1988~), 女, 讲师; E-mail: fjzhang8899@163.com.

** 通信作者; E-mail: bxue@niglas.ac.cn.

tively. Spatially, the *ICBR* showed much higher values in the central lake area than in the northern and southern area. This was probably because the central part of the lake was characterized by relatively stable hydrodynamic conditions, leading to more deposition of carbonate minerals. In addition, the *ICBR* was positively linked to temperature rather than human activities in Lake Hulun, implying that *ICBR* will continue to increase and lakes will be an increasingly important carbon pool in the future as global warming proceeds.

Keywords: Inorganic carbon burial rate; spatiotemporal variation; influence factor; Lake Hulun

近年来,温室效应和气候变暖受到人们的高度重视,与其相关的陆地生态系统碳循环也成为目前全球变化研究关注的热点与重点^[1-3]。湖泊作为陆地生态系统的重要碳库,在全球碳循环以及减缓气候变化方面发挥着重大作用,其碳源汇大小及其功能转换可能会对全球碳平衡及气候变化产生重要影响^[4-9]。因此,准确评估湖泊碳储量并揭示其影响机制,不仅有助于了解未来全球升温 and 人类活动影响加剧下湖泊碳源汇潜力变化,同时也能为制定合理的碳排放政策提供重要参考。

湖泊沉积物中的碳主要由有机碳和无机碳两大部分构成,且无机碳在沉积物中占有相当份额,特别是对于约占全球陆地总面积 30% 的干旱—半干旱地区而言,无机碳含量甚至比有机碳含量还要高^[10-13]。然而,过去国内外对湖泊沉积物碳循环的研究往往只针对有机碳,较少考虑无机碳的作用,且已有的研究通常只是利用无机碳总量及其空间分布来恢复和重建地质历史时期不同地区古气候环境演化^[14-23],而非关注无机碳埋藏速率及其时空分布变化,导致难以为其变化过程及其在区域碳循环中作用的研究提供有价值信息。因此,开展干旱—半干旱区湖泊沉积物无机碳埋藏研究将有助于推进该地区湖泊碳循环过程研究,并进而为全球碳循环研究提供新的数据支撑。

内蒙古高原地处内陆干旱—半干旱区,该地区湖泊资源丰富,类型多样,在我国湖泊碳循环研究中占有重要位置。同时,该地区地表径流对湖泊的补给水量少而蒸发量大,湖泊不断向咸水湖或盐湖方向演化,半干旱的气候背景为碳酸盐沉淀创造了有利条件^[24]。呼伦湖作为我国北方地区最大的湖泊,在干旱—半干旱地区具有典型性和代表性。前人对呼伦湖碳循环的研究相对较少,且已有的研究大多局限于利用沉积物中的有机碳和无机碳进行古环境、古气候方面的反演与重建^[25-30],或者对沉积物有机碳埋藏速率和无机碳形态进行研究^[31-34],而对沉积物无机碳埋藏速率时空变化及其影响因素的研究仍较匮乏。鉴于此,本文以呼伦湖为例,开展近百年来沉积物无机碳埋藏的研究,综合分析沉积物无机碳埋藏速率的时空分布特征,揭示影响湖泊无机碳埋藏的主控因子,以期探讨无机碳对湖泊生态系统碳循环的贡献,阐释干旱—半干旱区湖泊无机碳的时空分布格局,评价湖泊沉积物的碳源汇功能和强度研究积累基础资料,并为合理开发与保护利用湖泊资源提供科学依据。

1 区域地理概况

呼伦湖(48.55°~49.33°N, 116.97°~117.81°E)是我国第五大湖,也是我国北方第一大湖,位于呼伦贝尔草原西部新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗和满洲里市之间(图 1)。湖泊水系由呼伦湖、哈拉哈河、贝尔湖、乌尔逊河、克鲁伦河及连通于呼伦湖与额尔古纳河的新开河(达兰鄂罗木河)等组成,主要补给水源为源于蒙古国东部的克鲁伦河、连接贝尔湖和呼伦湖的乌尔逊河以及海拉尔河,排泄河流为中俄界河—额尔古纳河,并经额尔古纳河外流入鄂霍茨克海。湖区东北部的新开河为吞吐性河流,高水位时,海拉尔河通过新开河补给呼伦湖^[35-36]。

当呼伦湖湖水位在 545.3 m 时,蓄水量约 138 亿 m³,水面面积约 2339 km²,最大水深 8 m,平均水深 5.7 m。湖区属中温带大陆性气候,冬季严寒漫长,春季干旱,多大风,夏季温凉短促,秋季气温急降,初霜早,封冻期 6 个月左右,最大冰层厚度 1.30 m。呼伦湖地区多年平均气温为 -0.5~0.5℃,极端最低气温 -42.7℃,极端最高气温 40.1℃。年平均降水量 285 mm,蒸发量 1650~1700 mm,积雪期为 140 天左右,全年盛行西北风,多年平均风速 4.2 m/s^[35]。流域内的土壤主要为栗钙土,植被主要为典型草原植被,由多年生草本组成,其中主要为旱生丛生禾本科植物,其次是根茎类及旱生杂草、草原灌木和半灌木^[37-38]。

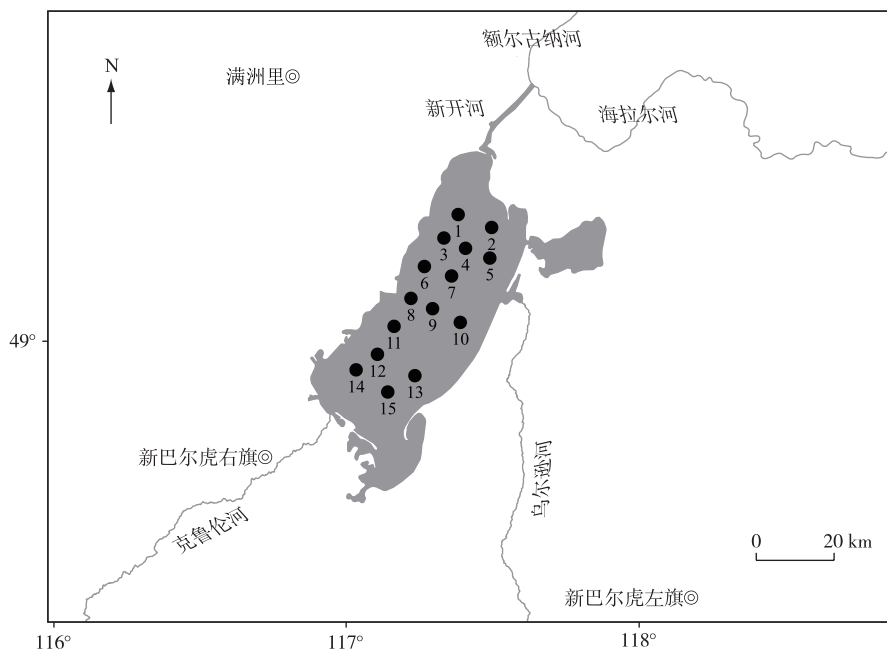


图1 呼伦湖采样点位置(图中3号点位置即为HL2011岩芯采样点位置)

Fig.1 Location of sampling sites in Lake Hulun(the site 3 and HL2011 core are in the same location)

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

2011年12月,利用奥地利产 UWITEC 重力采样器在呼伦湖中心(49.13°N, 117.50°E)采集了一沉积物柱状样 HL2011 孔(岩芯长 74 cm). 2014 年 6 月,利用同一重力采样器在呼伦湖采集了 15 个柱状沉积物样品(岩芯长度为 12~74 cm),采样点位置如图 1 所示. 采样过程中,沉积物—水界面清澈透明,未受扰动. 沉积物样品于室内以 1 cm 间隔分样,样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回实验室于 4℃ 冷藏保存,用于样品测年及各理化指标分析.

2.2 样品分析

2.2.1 样品年代测试 本研究分别选取位于呼伦湖湖中心的 HL2011 孔及 HL-9 岩芯进行年代学分析. 将测年样品低温(<40℃)烘干称重后,采用 γ 分析方法测试 ^{137}Cs 及 ^{210}Pb 比活度,分析仪器为美国 EG & G OrtecG 公司生产的高纯锗井探测器与 Ortec 919 型控制器和 IBM 微机组合构成的 16K 多道分析器所组成的 γ 分析系统. ^{137}Cs 及 ^{226}Ra 标准样品由中国原子能研究所提供, ^{210}Pb 标准样品由英国利物浦大学提供. 用于年代分析的过剩 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) 为 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 与 ^{226}Ra 比活度的差值. 根据 662 keV 处的特征峰作为 ^{137}Cs 的比活度. 利用 ^{137}Cs 比活度随钻孔深度变化的峰值可以确定其特征年代,并与 ^{210}Pb 比活度随钻孔深度变化进行比对验证^[39]. 样品的年代测试在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室进行.

2.2.2 无机碳(TIC)含量测定 将真空冷冻干燥后的沉积物样品研磨成 80 目左右的粉末状,称取适量的样品置于小锡杯中,用美国 EAI 公司生产的 EA-3000 型元素分析仪进行总碳(TC)的测定. 然后称取适量样品加入 10% 的 HCl,多次搅拌直至没有气泡冒出,以除去样品中的碳酸盐,随后反复用蒸馏水清洗离心至中性,低温(40℃)烘干后研磨至 80 目,称取适量处理后的样品置于小锡杯中,用元素分析仪测定样品中的有机碳(TOC)含量,通过每隔 8 个样品插入标样的方法来控制测试结果的质量,测试误差<0.1%. 沉积物中 TIC 的含量即为样品中 TC 与 TOC 的差值,即 $\text{TIC} = \text{TC} - \text{TOC}$. 样品测试在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室完成.

2.2.3 无机碳埋藏速率计算 呼伦湖沉积物无机碳埋藏速率($ICBR, g/(m^2 \cdot a)$)由沉积物 TIC 含量(%)、沉积速率($SR, cm/a$)及干物质密度($DBD, g/cm^3$)计算得出. SR 由沉积物深度—年代模式得出, DBD 由沉积物样品湿重(M_w)和干重(M_d)之差与样品干重体积(V, cm^3)之比得出. 计算公式分别为:

$$ICBR = TIC \cdot SR \cdot DBD \quad (1)$$

$$DBD = (M_w - M_d) / V \quad (2)$$

2.3 数据处理与作图

所有数据均以 Excel 2010 软件进行数据处理及汇总, SPSS 19.0 软件进行统计分析, 呼伦湖采样点位置图由 ArcGIS 9.3 软件绘制, 无机碳含量等指标的空间分布图由 Surfer 10.0 软件绘制 (Kriging 空间插值), 其余图件由 Origin 8.5 软件绘制.

3 结果与讨论

3.1 沉积岩芯年代序列

HL2011 孔及 HL-9 岩芯 ^{137}Cs 及 $^{210}Pb_{ex}$ 结果可知, 两个岩芯的 ^{137}Cs 均具有较为典型的单峰模式, 并且 $^{210}Pb_{ex}$ 比活度随深度增加呈典型的指数衰减 (图 2). 这与众多深水湖中 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 分布特征一致^[40], 表明呼伦湖近百年来沉积环境稳定, 未受明显扰动.

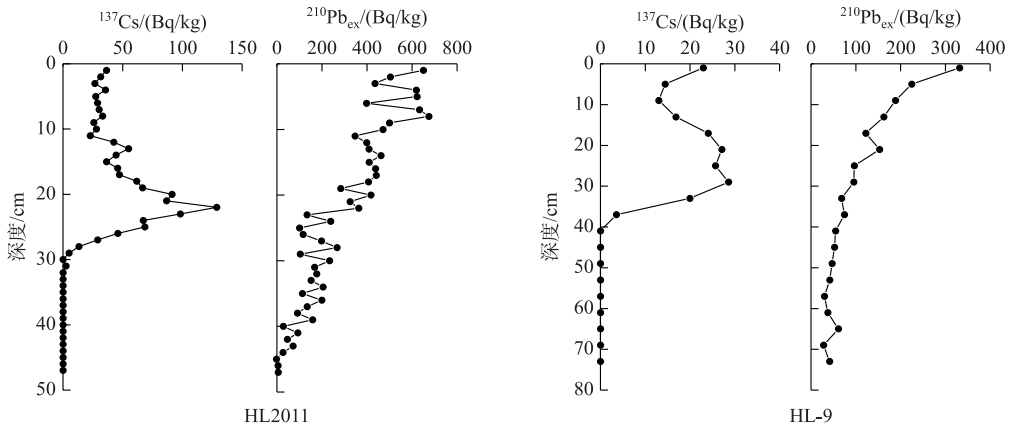


图 2 呼伦湖 HL2011 和 HL-9 岩芯 ^{137}Cs 及 $^{210}Pb_{ex}$ 垂直分布

Fig.2 Vertical distributions of $^{210}Pb_{ex}$ and ^{137}Cs at HL2011 and HL-9 cores in Lake Hulun

通常情况下, 湖底沉积物 (特别是表层沉积物) 常常受到风浪、生物以及人为清淤等干扰, 使得影响 ^{210}Pb 沉积通量的原因很复杂, 采用单一的 CIC (constant initial concentration, 恒定沉积通量) 或者 CRS (constant rate of supply, 恒定放射性通量) 模式计算得到的年代往往偏离 ^{137}Cs 时标, 给最终定年结果带来误差^[41-42]. 因此, 在实际应用中多采用复合模式, 即根据 ^{137}Cs 的 1963 年时标深度, 把沉积岩心分为上、下两段, 利用 $^{210}Pb_{ex}$ 比活度变化数据, 分别采用不同公式进行沉积岩芯年代计算^[43].

岩心表层至 ^{137}Cs 时标 (1963 年) 之间所对应各层位的年代按下列公式进行计算:

$$T_m = T_0 + \lambda^{-1} \ln [1 + (A_0 - A_m) P^{-1} \cdot \lambda] \quad (3)$$

$$P = \frac{-\lambda (A_0 - A_w)}{1 - e^{-\lambda (T_0 - 1963)}} \quad (4)$$

$$A_0 = \sum_{x=1}^n C_x \cdot \rho_x \quad (5)$$

$$A_m = \sum_{x=m}^n C_x \cdot \rho_x \quad (6)$$

$$A_w = \sum_{x=w}^n C_x \cdot \rho_x \quad (7)$$

1963 年以下各层位样品所对应年代的计算公式为:

$$T_m = 1963 - \lambda^{-1} \ln(A_w / A_m) \quad (8)$$

式中, T_m 为 m 质量深度对应的年代, T_0 为采样年份, λ 为 ^{210}Pb 的衰变常数 (0.03114), A_0 为整个沉积岩芯 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 累积量 (Bq/cm^2), A_m 为 m 质量深度以下 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 累积量 (Bq/cm^2), A_w 为 1963 年所对应的 w 层位以下 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 累积量 (Bq/cm^2), C_x 为 x 质量深度的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度 (Bq/kg), ρ_x 为 x 质量深度的样品容重 (g/cm^3).

本文分别采用 CRS 模式和混合模式对 HL2011 孔及 HL-9 岩芯年代进行估算, 结果表明 (图 3), 对于 HL2011 岩芯而言, 两种模式得出的年代结果大体一致, 但对于 HL-9 岩芯而言, CRS 模式估算的年代结果明显较混合模式年轻, 因此, 文中最终采用混合模式计算结果作为 HL 2011 及 HL-9 岩芯的年代数据.

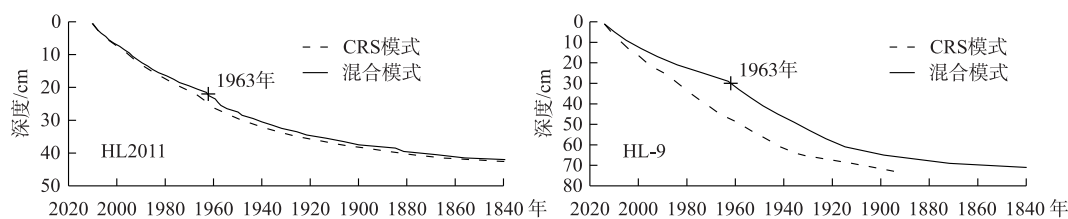


图 3 呼伦湖 HL2011 和 HL-9 岩芯年代结果 (图中的 1963 年为 ^{137}Cs 年代结果)

Fig.3 The sedimentary chronologies of HL2011 and HL-9 cores in Lake Hulun
(the year 1963 represented a ^{137}Cs marker)

对于呼伦湖其他没有测定年代的岩芯, 本文采用将其磁化率和烧失量结果与 HL2011 及 HL-9 岩芯结果进行地层对比的方法, 确定其对应年代, 进而得到呼伦湖所有岩芯的年代及沉积速率结果, 具体对比方法及结果参见文献 [31].

3.2 TIC 含量变化特征

1850 年以来呼伦湖 15 个岩芯 TIC 含量随时间变化及根据局部加权回归散点平滑法得到的整个湖泊 TIC 含量随时间变化趋势分别如图 4 和图 5 所示. 总体而言, 1980s 之前呼伦湖 TIC 含量无明显变化趋势, 维持在较稳定的低值, 1980s 以来 TIC 含量呈现明显增加趋势, 这可能与近几十年来湖区暖干化趋势加剧, 导致大量自生碳酸盐沉淀有关. 从空间变化上来说 (图 6), 1850 年以来各岩芯平均 TIC 含量并无明显差异, 最小值为 1.41% (HL-12), 最大值为 2.89% (HL-13), 平均值为 2.29%. 湖泊东岸靠近乌尔逊河入湖口处 (如 HL-2、HL-5 及 HL-10 点) 平均 TIC 含量略低, 湖泊西岸 (除 HL-11 及 HL-12 点外) TIC 平均含量略偏高, 与之前报道的该湖表层沉积物 TIC 含量表现为东低西高的格局基本一致 [33]. 乌尔逊河入湖口处较低的 TIC 含量可能是由于此处入湖碎屑沉积物的注入对碳酸盐沉淀具有一定的稀释作用, 从而不利于自生碳酸盐沉淀导致的 [34], 而西岸整体相对偏高的 TIC 含量可能与西部岸线较长, 大气沉降及点源污染导致的营养负荷较高有关 [33]. 此外, 不同湖区环境条件及湖泊初级生产力的变化所引起的水体理化参数差异可能也是导致不同湖区 TIC 含量有所差异的重要原因 [34].

此外, 将各岩芯 TIC 含量时空变化与各岩芯 TOC 含量时空变化进行对比 [31], 发现两者变化趋势基本一致, 且表现为较好的正相关关系 ($r=0.378$, $P<0.01$). 一方面, 当有机质含量较高时, 浮游植物以及以浮游植物为食的浮游动物相对较多, 从而生物成因的无机碳固定量亦增多 [33]. 另外, 据前人研究, 沉积物中碳酸盐矿物表面容易吸附大量有机质颗粒, 形成一个密实的薄壳, 引起碳酸盐矿物溶解度降低 [44], 当有机质含量较高时, 往往会限制沉积物中碳酸盐矿物的溶解, 进而引起无机碳在沉积物中的积累 [34], 这可能也是导致呼伦湖无机碳与有机碳浓度显著正相关的原因之一. Schelske 等 [45] 对 Ontario 湖及陈敬安等 [46] 对程海的研究均表明沉积物 TIC 与 TOC 部分或者全部呈现较好的正相关关系, 这与本研究结果基本一致.

3.3 无机碳埋藏速率变化特征

3.3.1 无机碳埋藏速率时间变化 1850 年以来呼伦湖各岩芯无机碳埋藏速率随时间变化差异较大 (图 7), 但总体上仍表现为增加趋势. 具体来说, 1900s 之前各岩芯无机碳埋藏速率均维持在较低的水平; 1900s—1950s 期间开始快速增加; 1950s—1980s 之间波动变化, 但总体相对平稳; 1980s 以来不同岩芯间变化较大,

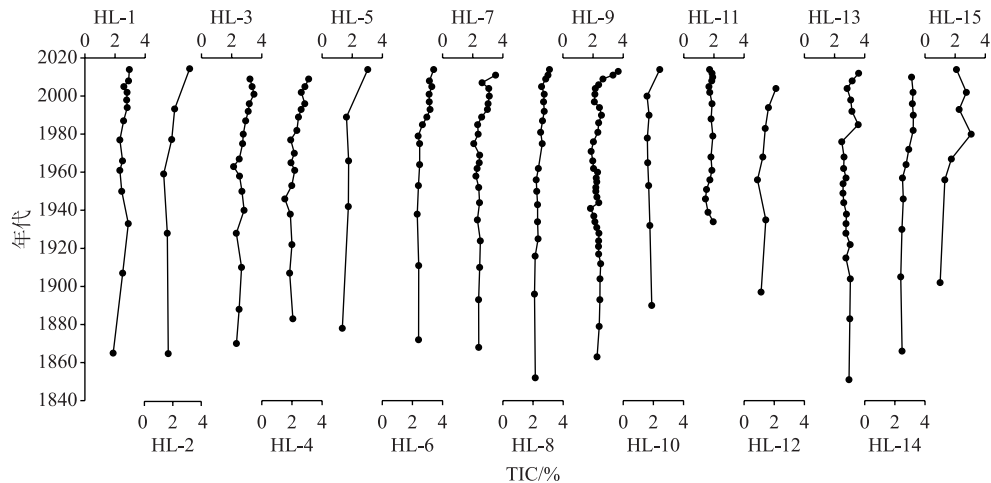


图 4 呼伦湖 15 个短柱状岩芯 TIC 含量随时间变化

Fig.4 TIC content change of the fifteen sediment cores in Lake Hulun

可能主要与近几十年来各湖区沉积速率的空间差异有关. 15 个岩芯平均无机碳埋藏速率的变化范围为 $7.10 \sim 74.29 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 最小值出现在 HL-6 孔, 最大值出现在 HL-11 孔. 根据 15 个岩芯的无机碳埋藏速率, 得出 1850 年以来呼伦湖全湖的平均无机碳埋藏速率约为 $36.15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. 结合呼伦湖面积数据, 进而得出呼伦湖无机碳储量约为 12.68 Tg C ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$). 呼伦湖无机碳埋藏速率及无机碳储量均比有机碳埋藏速率 ($31.42 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) 及有机碳储量 (11.0 Tg C) 高^[31], 这与我我国西北地区湖泊无机碳埋藏速率高于有机碳埋藏速率的结论一致^[10,13], 表明在我国干旱—半干旱地区无机碳埋藏在评价和估算陆地碳循环研究中具有重要影响, 在今后研究中应引起足够重视.

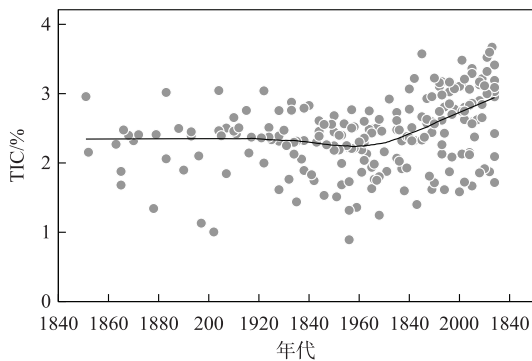


图 5 利用局部加权回归散点平滑法得到的近百年来呼伦湖无机碳含量变化趋势

Fig.5 TIC content changes in Lake Hulun plotted as individual data points with a LOESS (locally weighted smoothing) smoother

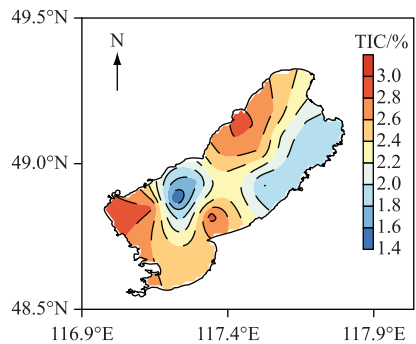


图 6 1850 年以来呼伦湖沉积物无机碳含量空间变化

Fig.6 The spatial distribution characteristics of TIC content in Lake Hulun sediments since 1850

此外, 为定量研究不同阶段呼伦湖无机碳埋藏速率的变化特征, 本文基于不同时期气候变化及人类活动对湖泊影响强弱将 1850 年以来呼伦湖无机碳埋藏速率分为 3 个阶段, 即 1900 年之前的背景值、1900—1950 年间气温升高和人类活动增加的过渡期以及 1950 年以来我国快速升温背景下的工业化时期, 并分别

计算了3个时段的平均无机碳埋藏速率及其增加率. 结果表明(图8), 1900年以前, 呼伦湖平均无机碳埋藏速率约为 $10.40 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 1900—1950年期间上升至 $26.29 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 1950年之后增加到 $41.00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. 1950年以来的无机碳埋藏速率分别是1900年之前和1900—1950年之间的3.94和1.56倍, 表明近百年来呼伦湖无机碳埋藏速率呈现持续增加趋势.

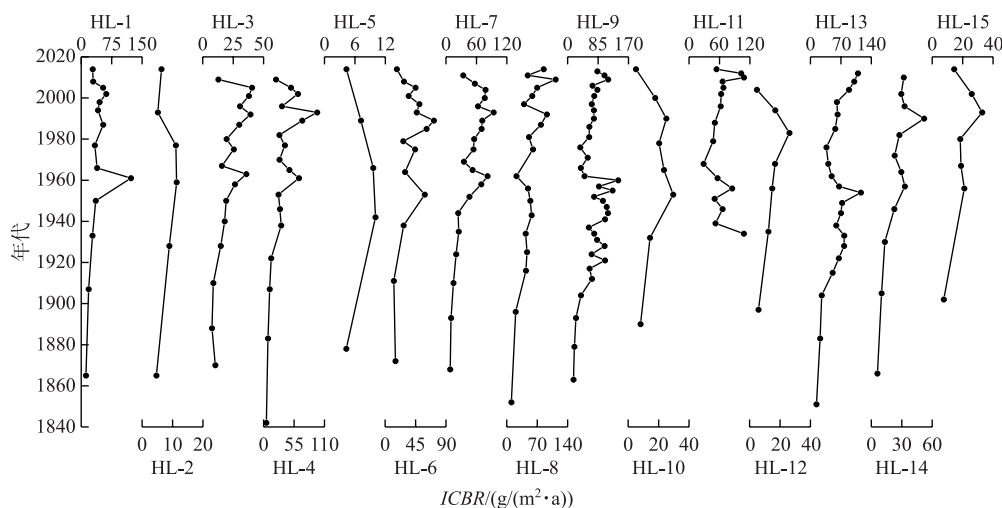


图7 呼伦湖15个短柱状岩芯无机碳埋藏速率

Fig.7 The ICBR changes of the fifteen sediment cores in Lake Hulun

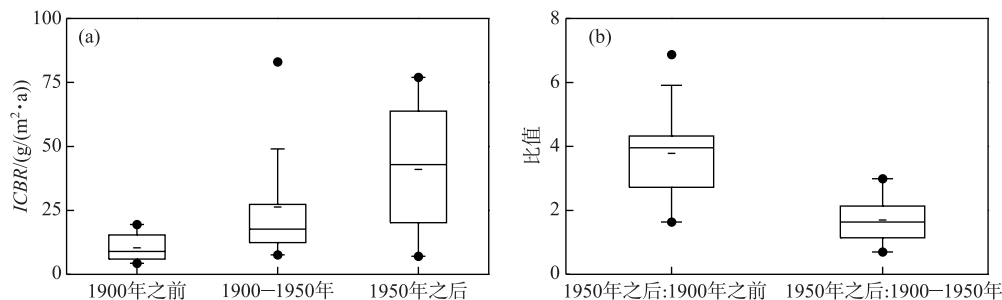


图8 呼伦湖1900年之前、1900—1950年间及1950年以来不同阶段的无机碳埋藏速率变化范围(a)及比值(b)(图中短实线代表平均值)

Fig.8 Box plots of mean ICBR (for all cores) for three time periods: pre-1900, 1900–1950 and post-1950(a); Box plots of comparative ICBR increase ratios for all cores for two time periods: post-1950 to pre-1900 and post-1950 to 1900–1950(b) (The short horizontal line was the mean)

3.3.2 无机碳埋藏速率空间变化 1850年以来呼伦湖各岩芯无机碳埋藏速率差异较大(图9). 高值区大部分集中于湖泊中部, 且整体上湖泊西北部无机碳埋藏速率高于南部及东南部地区. 湖心较高的无机碳埋藏速率可能与该处水力条件相对稳定, 有利于碳酸盐矿物的沉积有关. 而导致呼伦湖西北部无机碳埋藏速率较高的一个可能原因在于湖泊常年以西北风为主导风向, 导致该湖区因大气沉降和干草入湖引起的营养物质增加. 已有研究表明, 呼伦湖每年入湖尘量可达 $6440 \times 10^4 \text{ kg}$, 冰封期每年干草入湖量为 $158 \times 10^4 \text{ kg}$, 其中含氮量 $2.1 \times 10^4 \text{ kg}$, 含磷量 $0.89 \times 10^4 \text{ kg}$, 非冰封期则有 $176.8 \times 10^4 \text{ kg}$ 干草入湖, 折算为入湖氮量 $2.3 \times 10^4 \text{ kg}$, 入湖磷量 $0.97 \times 10^4 \text{ kg}$ ^[47]. 大量营养盐的输入导致该湖区沉积物中来源于藻类等浮游生物残体的有机质能快速氧化分解为无机碳, 进而增加沉积物中无机碳含量^[33]. 同时, 湖泊西北部地表淋溶冲刷及降尘等输

人的增多,也会导致该湖区沉积速率相对较高,因此无机碳埋藏速率也较高.

对近百年来呼伦湖无机碳埋藏速率的进一步分析表明,较高的无机碳埋藏速率往往对应着较高的沉积速率(图 9),而与无机碳含量的变化关系并不十分密切(图 6,图 9).相关性分析也表明,呼伦湖无机碳埋藏速率与沉积速率呈显著正相关($r=0.912, P<0.01$),而与无机碳含量相关性不十分显著($r=0.389, P>0.05$).因此,对于呼伦湖而言,沉积速率可能是导致无机碳埋藏速率空间差异的最重要因素,而无机碳含量的多少则起着相对次要作用.

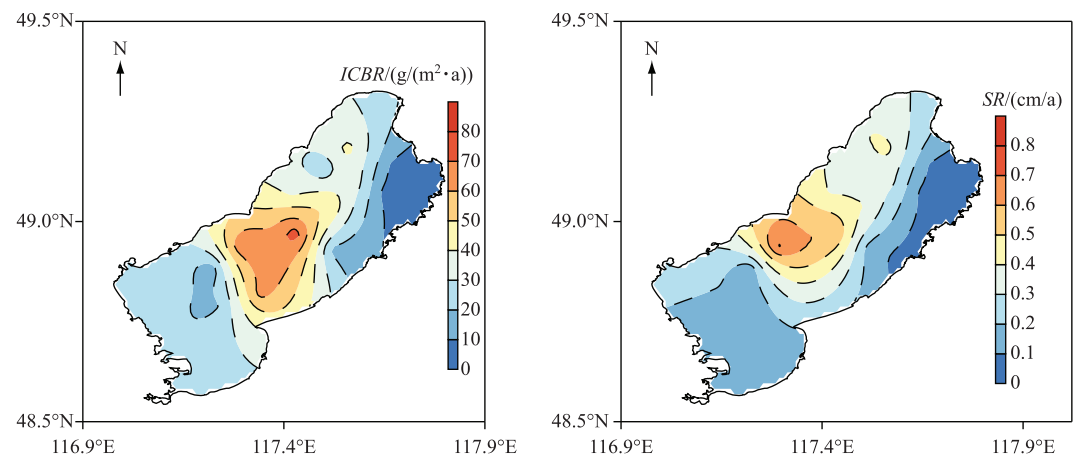


图 9 1850 年以来呼伦湖无机碳埋藏速率及沉积速率的空间分布

Fig.9 The spatial distribution characteristics of ICBR and SR in Lake Hulun since 1850

3.4 区域对比与讨论

1850 年以来呼伦湖沉积物无机碳埋藏速率平均值约为 $36.15\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,与半干旱地区的青海湖 ($48.3\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$) 无机碳埋藏速率差异不显著^[13],高于该地区的艾比湖 ($12.8\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)、巴里坤湖 ($11.4\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$) 及乌伦湖 ($15.1\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)^[13],同时又明显低于博斯腾湖 ($58.3\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)^[10]、岱海 ($124\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)^[13] 和红碱淖 ($111.2\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$)^[13].我国东部平原湖区无机碳埋藏研究相对较少,但从该地区众多湖泊较低的无机碳含量来看^[48-49],无机碳埋藏速率可能也相对较低.比如,近百年来武汉东湖无机碳含量不足 0.5%^[50],云南洱海沉积物无机碳含量也不足 0.5%,仅占总碳含量的 10% 左右^[51].与干旱—半干旱地区相比,我国东部平原湿润区降雨量较多,地表径流发达,湖区蒸发相对较弱,湖泊水体为淡水,不利于碳酸盐的析出与保存,导致东部平原地区大部分湖泊碳酸盐含量很低,有些甚至达不到碳酸盐析出结晶的条件^[12],因此相应的无机碳埋藏速率也较低.

湖区气候变化(温度、降水等)、湖泊自身化学参数(湖水温度、pH 值、盐度等)以及人类活动等多种因素对湖泊沉积物中碳酸盐的沉淀和溶解具有重要的影响^[46,52-53].为揭示近百年来影响呼伦湖沉积物无机碳埋藏的主控因子,本文分析呼伦湖无机碳埋藏速率与湖区气象(温度、降雨)、水文参数(水位)及人类活动(人口数量、耕地面积、渔获量及牲畜量)随时间的变化趋势(图 10),并对无机碳埋藏速率与各参数之间的相关性进行了分析(表 1).结果表明,呼伦湖无机碳埋藏速率和湖区年均温度变化趋势高度一致且呈显著正相关,与湖泊水位呈显著负相关,而与湖区降雨及表征人类活动变化的各参数相关性不明显.

表 1 呼伦湖无机碳埋藏速率与湖区各参数之间的相关性分析

Tab.1 Correlation coefficient between ICBR and various variables in Lake Hulun

参数	ICBR	
	<i>r</i>	<i>P</i>
温度	0.144	0.038 *
降雨	0.078	0.280
水位	-0.335	0.015 *
人口	-0.018	0.841
耕地面积	-0.046	0.844
牲畜量	0.042	0.921
渔获量	0.009	0.904

* 表示在 0.05 水平上(双侧)显著相关.

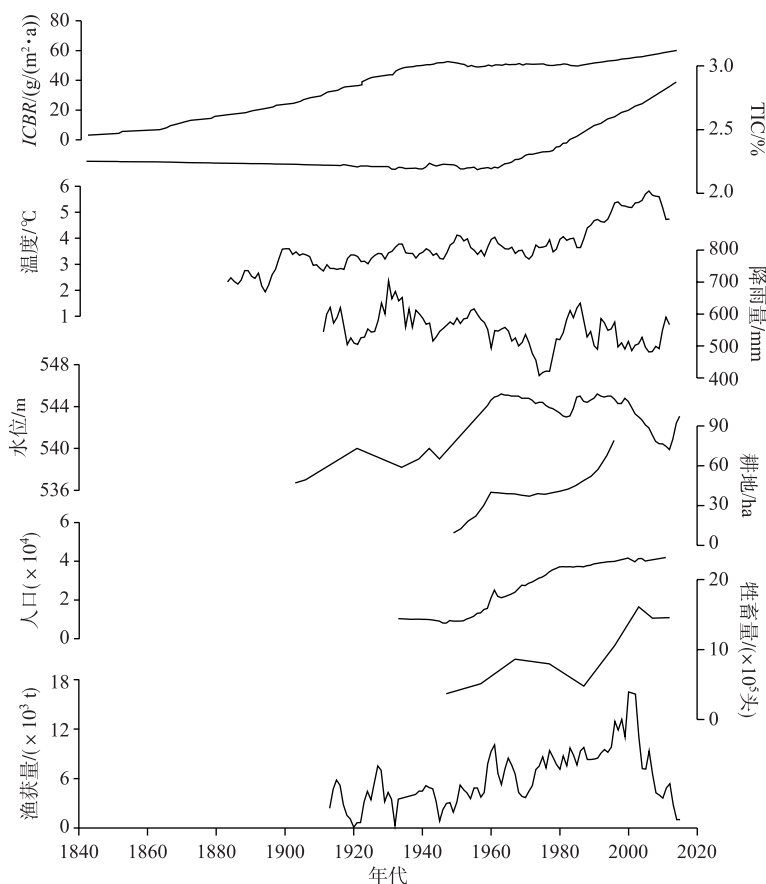


图 10 1850 年以来呼伦湖无机碳埋藏速率、TIC 与气象资料(湖区温度、降雨量)、水文数据(湖泊水位)、人类活动(人口、耕地、牲畜量及渔获量)随时间的变化趋势(温度和降水数据由沈阳气象局提供,为五年滑动平均值;人口及牲畜量数据源于文献[54];耕地数据源于文献[55];湖泊水位及渔获量数据由呼伦湖渔业公司提供)

Fig.10 Time series of the whole-lake inorganic carbon burial rate, TIC, meteorological data (temperature and precipitation), hydrological data (lake level), human activities data (population, livestock, arable land and fishing harvest) (The temperature and precipitation data were records for the Harbin Station provided by the Shenyang Meteorological Center. Both the temperature and precipitation data were five-year moving averages. The data of population and livestock were from reference [54]. The data of arable land were obtained from reference [55]. The data of lake level and fishing harvest were obtained from the Hulun Lake Fishery Co., Ltd.)

先前研究显示人类活动对湖泊无机碳埋藏有着重要影响^[13],但本研究结果表明呼伦湖区人类活动(人口数量、耕地面积、牲畜量及渔获量等指标)对无机碳埋藏影响相对较弱。一方面,尽管近几十年来湖区人口数量呈增加趋势,但总人口数仍然较少。呼伦贝尔统计局(<http://tjj.hlbe.gov.cn/>)数据显示,该地区人口密度不到 7 人/ km^2 ,远低于其他湖泊面积相似的地区(如太湖流域人口密度高达 1000 人/ km^2 ^[56]),且住宅区距呼伦湖均超过 8 km,对湖泊直接影响相对较小。另外,尽管湖区耕地面积在近几十年来也不断增加,但耕地和建筑用地所占面积仍较少,尚不足该地区总面积的 1%。草地作为呼伦湖区最主要的土地利用方式,占陆地总面积的比例超过 86%,其平均放牧密度为 1.7 只/公顷,低于内蒙古地区的草地最大承载力^[57]。鉴于呼伦湖地区较低的人口密度以及土地利用率,我们认为虽然近年来因人类活动增加导致向湖泊排放的生活污水、牲畜粪便等增加,但总体而言人类活动对呼伦湖无机碳埋藏的影响仍相对有限。

已有的湖泊沉积学研究表明,湖泊碳酸盐沉积与气候环境变化密切相关^[58-60]. 呼伦湖无机碳主要来源于湖泊自生碳酸盐沉淀^[33],而温度是控制水体中产生碳酸盐沉淀的重要因素^[52]. 一方面,随湖水温度升高,碳酸盐在水体中的溶解度减小,从而导致其过饱和条件的形成^[53];另一方面,水温升高往往会引起湖水浮游微生物数量增加,它们不但可直接形成湖水 CaCO_3 过饱和的局部微环境,还可作为 CaCO_3 沉淀的结晶核促使 CaCO_3 快速沉淀^[53];再者,温度升高往往伴随着湖水蒸发作用的增强,导致湖水中各种 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 离子浓度随湖水浓缩而增大,进而形成过饱和的条件^[46]. 此外,升温对呼伦湖无机碳埋藏的另一个重要影响在于温度的增加可能会导致流域化学风化加剧,促使流域更多的碳酸盐和硅酸盐风化吸收大气 CO_2 ,产生的无机碳随地表径流输入湖泊中,进而导致无机碳埋藏速率的增加. 这些在国内的很多湖泊研究中已经被证实,比如 Shen 等^[18] 及 An 等^[61] 对青海湖的研究表明,在温度较高的全新世大暖期,沉积物碳酸盐含量显著高于温度相对较低时的末次冰期、冰消期和晚全新世;薛积彬等^[62] 对新疆巴里坤湖沉积物的研究也表明,全新世以来温度是控制该湖泊碳酸盐沉淀的最重要因素. 同时,这也进一步表明在未来全球变暖情境下,呼伦湖无机碳埋藏速率将进一步增加,无机碳在区域碳循环中的作用也将更加显著.

呼伦湖无机碳埋藏速率与水位变化呈显著负相关,可能反映的是其与湖区有效降雨(降雨量-蒸发量)之间的内在联系. 由于缺少长尺度湖区蒸发量数据,在此很难给出两者间的具体对应关系. 尽管呼伦湖无机碳埋藏速率与降雨之间的相关性不明显,但湖区温度变化可通过影响湖水蒸发量进而对水位变化产生重要影响. 如前所述,温度升高时,湖泊蒸发作用增强,导致湖泊水位下降,湖水盐度增大,有利于碳酸盐的化学沉淀,进而可将更多的无机碳搬运至沉积物中^[63]. 同时,对近百年来呼伦湖环境变化与无机碳含量随时间变化趋势的进一步分析还发现(未发表数据),当湖泊水位升高、水深增大时,湖泊离岸边距离变远,陆源碎屑物质向呼伦湖的输入逐渐减少,但呼伦湖沉积物中的无机碳含量却逐渐增加,进一步证明呼伦湖沉积物中的无机碳应该主要来源于湖泊自生碳酸盐沉淀,而非由流域侵蚀带来.

4 结论

1850 年以来呼伦湖无机碳埋藏时空变化研究表明,近百年来呼伦湖无机碳埋藏速率约为 $36.15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,相应的无机碳储量约为 12.68 Tg C . 无机碳埋藏速率整体上随时间变化呈现出增加趋势,1950 年之后的埋藏速率分别是 1900 年之前及 1900—1950 年间的 3.94 和 1.56 倍. 从空间变化来说,无机碳埋藏速率表现为湖泊中部高、南北两端低的分布格局. 此外,无机碳埋藏速率与湖区温度呈显著正相关,而与人类活动的相关性不明显,表明气候变化特别是温度可能是驱动近百年来呼伦湖无机碳埋藏变化的主控因素,而人类活动的影响可能并不十分显著.

5 参考文献

- [1] Fang J, Yu G, Liu L *et al.* Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, **115**(16): 4015-4020.
- [2] Heimann M, Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, **451**(7176): 289-292.
- [3] Cao M, Woodward FI. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, **393**(6682): 249-252.
- [4] Alin SR, Johnson TC. Carbon cycling in large lakes of the world: A synthesis of production, burial, and lake-atmosphere exchange estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, **21**(3): 1-12.
- [5] Cole JJ, Prairie YT, Caraco NF *et al.* Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 2007, **10**(1): 172-185.
- [6] Heathcote AJ, Anderson NJ, Prairie YT *et al.* Large increases in carbon burial in northern lakes during the Anthropocene. *Nature communications*, 2015, **6**(10016): 1-6.
- [7] Tranvik LJ, Downing JA, Cotner JB *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6, part 2): 2298-2314.
- [8] Tranvik L, Cole JJ, Prairie YT. The study of carbon in inland waters-from isolated ecosystems to players in the global car-

- bon cycle. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, **3**(3): 41-48.
- [9] Battin TJ, Luysaert S, Kaplan LA *et al.* The boundless carbon cycle. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(9): 598-600.
- [10] Yu ZT, Wang XJ, Zhao CY *et al.* Carbon burial in Bosten Lake over the past century: impacts of climate change and human activity. *Chemical Geology*, 2015, **419**: 132-141.
- [11] Yu ZT, Li GY, Zhang EL *et al.* Process variations of sedimentary carbon accumulation in Lake Bosten since 1860. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 293-304. DOI: 10.18307/2019.0127. [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. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 293-304.]
- [12] Yu ZT, Wang XJ, Zhao CY *et al.* Spatial variations of inorganic carbon and isotopes in the surface sediment of the Lake Bosten. *J Lake Sci*, 2015, **27**(2): 250-257. DOI: 10.18307/2015.0208. [于志同, 王秀君, 赵成义等. 博斯腾湖表层沉积物无机碳及其稳定同位素空间异质性. 湖泊科学, 2015, **27**(2): 250-257.]
- [13] Lan JH, Xu H, Liu B *et al.* A large carbon pool in lake sediments over the arid/semiarid region, NW China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2015, **34**(3): 289-298.
- [14] Kelts K, Talbot M. Lacustrine carbonates as geochemical archives of environmental change and biotic/abiotic interactions. In Tilzer MM, Serruya C eds. Large lakes: Ecological structure and function. Berlin: Springer-Verlag, 1990: 288-315.
- [15] Maxwell AL. Holocene monsoon changes inferred from lake sediment pollen and carbonate records, northeastern Cambodia. *Quaternary Research*, 2001, **56**(3): 390-400.
- [16] Hammarlund D, Björck S, Buchardt B *et al.* Rapid hydrological changes during the Holocene revealed by stable isotope records of lacustrine carbonates from Lake Igelsjön, southern Sweden. *Quaternary Science Reviews*, 2003, **22**(2-4): 353-370.
- [17] Leng MJ, Marshall JD. Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives. *Quaternary Science Reviews*, 2004, **23**(7/8): 811-831.
- [18] Shen J, Liu XQ, Wang SM *et al.* Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years. *Quaternary International*, 2005, **136**(1): 131-140.
- [19] Fontes JC, Gasse F, Gibert E. Holocene environmental changes in Lake Bangong basin (Western Tibet). Part 1: Chronology and stable isotopes of carbonates of a Holocene lacustrine core. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, **120**(1/2): 25-47.
- [20] Langdon PG, Leng MJ, Holmes N *et al.* Lacustrine evidence of early-Holocene environmental change in northern Iceland: a multiproxy palaeoecology and stable isotope study. *The Holocene*, 2010, **20**(2): 205-214.
- [21] Dean JR, Jones MD, Leng MJ *et al.* Eastern Mediterranean hydroclimate over the late glacial and Holocene, reconstructed from the sediments of Nar lake, central Turkey, using stable isotopes and carbonate mineralogy. *Quaternary Science Reviews*, 2015, **124**: 162-174.
- [22] Votava JE, Johnson TC, Hecky RE. Holocene carbonate record of Lake Kivu reflects the history of hydrothermal activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, **114**(2): 251-256.
- [23] Yang Y, Fang X, Koutsodendris A *et al.* Exploring quaternary paleolake evolution and climate change in the western Qaidam Basin based on the bulk carbonate geochemistry of lake sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, **446**: 152-161.
- [24] Cao JT, Xu AX, Wang SM *et al.* Carbonate content record of climate and environment changes from lacustrine core in Daihai Lake, Inner Mongolia. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 1999, **4**: 21-26. [曹建廷, 徐爱霞, 王苏民等. 内蒙古海湖岩芯碳酸盐含量变化与气候环境演化. 海洋湖沼通报, 1999, **4**: 21-26.]
- [25] Wen R, Xiao J, Chang Z *et al.* Holocene climate changes in the mid-high-latitude-monsoon margin reflected by the pollen record from Hulun Lake, northeastern Inner Mongolia. *Quaternary Research*, 2010, **73**(2): 293-303.
- [26] Xue B, Qu W, Wang SM *et al.* Lake level changes documented by sediment properties and diatom of Hulun Lake, China since the late Glacial. *Hydrobiologia*, 2003, **498**(1-3): 133-141.
- [27] Xiao JL, Chang ZG, Wen RL *et al.* Holocene weak monsoon intervals indicated by low lake levels at Hulun Lake in the monsoonal margin region of northeastern Inner Mongolia, China. *The Holocene*, 2009, **19**(6): 899-908.
- [28] Zhai DY, Xiao JL, Zhou L *et al.* Holocene East Asian monsoon variation inferred from species assemblage and shell chemistry of the ostracodes from Hulun Lake, Inner Mongolia. *Quaternary Research*, 2011, **75**(3): 512-522.
- [29] Xue B, Wang SM, Shen J *et al.* Total organic carbon and its stable carbon isotope and paleoenvironmental evolution of

- Donglutian coalfield profile of Hulun Lake. *J Lake Sci*, 1994, **6**(4): 308-316. DOI: 10.18307/1994.0403. [薛滨, 王苏民, 沈吉等. 呼伦湖东露天矿剖面有机碳的总量及其稳定碳同位素和古环境演化. 湖泊科学, 1994, **6**(4): 308-316.]
- [30] Hu SY, Wang SM, Appel E *et al.* Environmental mechanism of magnetic susceptibility changes of lacustrine sediments from Lake Hulun, China. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 1998, **28**(4): 334-339. [胡守云, 王苏民, Appel E 等. 呼伦湖湖泊沉积物磁化率变化的环境磁学机制. 中国科学: 地球科学, 1998, **28**(4): 334-339.]
- [31] Zhang FJ, Xue B, Yao SC *et al.* Organic carbon burial from multi-core records in Hulun Lake, the largest lake in northern China. *Quaternary International*, 2018, **475**: 80-90.
- [32] Zhang FJ, Xue B, Yao SC. Organic carbon burial and its driving mechanism in the sediment of Lake Hulun, northeastern Inner Mongolia, since the mid-Holocene. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 234-244. DOI: 10.18307/2018.0123. [张凤菊, 薛滨, 姚书春. 中全新世以来呼伦湖沉积物碳埋藏及其影响因素分析. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 234-244.]
- [33] Liu HL. Based on the form of geochemistry character of inorganic carbon in Hulun Lake [Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2010. [刘华琳. 基于形态的呼伦湖无机碳地球化学特征研究[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2010.]
- [34] Sun YY. Forms distribution of inorganic carbon in sediments from Dalinuoer Lake and compared with the other three lakes of Inner Mongolia Plateau, China [Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2012. [孙园园. 达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态分布及对比研究[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2012.]
- [35] Hulun Lake Fishery Co., Ltd ed. Annals of Hulun Lake. Hailar: Inner Mongolia Culture Press, 2008: 18-35. [呼伦湖渔业有限公司编. 呼伦湖志. 海拉尔: 内蒙古文化出版社, 2008: 18-35.]
- [36] Wang SM, Dou HS eds. Lakes in China. Beijing: Science Press, 1998: 317-319. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 317-319.]
- [37] Bai ML, Hao RQ, Shen JG. Effects of climatic change on eco-environment in HuLunHu Lake area in last 46 years. *Journal of Desert Research*, 2008, **28**(1): 101-107. [白美兰, 郝润全, 沈建国. 近 46a 气候变化对呼伦湖区域生态环境的影响. 中国沙漠, 2008, **28**(1): 101-107.]
- [38] Zhao HY, Wu LJ, Hao WJ. Influences of climate change to ecological and environmental evolvement in the Hulun Lake wetland and its surrounding areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(3): 1064-1071. [赵慧颖, 乌力吉, 郝文俊. 气候变化对呼伦湖湿地及其周边地区生态环境演变的影响. 生态学报, 2008, **28**(3): 1064-1071.]
- [39] Yao SC, Xue B, Xia WL *et al.* Lead pollution recorded in sediments of three lakes located at the middle and lower Yangtze River basin, China. *Quaternary International*, 2009, **208**(1): 145-150.
- [40] Last WM, Smol JP. Tracking environmental change using lake sediments, Volume 1: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques. Kluwer Academic Publishers, 2001: 171-196.
- [41] Appleby PG. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last WM, Smol JP eds. Tracking environmental changes using lake sediments. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001: 171-203.
- [42] Wan GJ, Appleby PG. Progress on fallout radionuclides as tracers in environ-ecological systems. *Advance in Earth Sciences*, 2000, **15**(2): 172-177. [万国江, Appleby PG. 环境生态系统散落核素示踪研究新进展. 地球科学进展, 2000, **15**(2): 172-177.]
- [43] Liu EF, Xue B, Yang XD *et al.* ^{137}Cs and ^{210}Pb chronology for modern lake sediment: a case study of Chaohu Lake and Taibai Lake. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, **29**(6): 89-94. [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. 海洋地质与第四纪地质, 2009, **29**(6): 89-94.]
- [44] Chen JA, Wan GJ, Chen ZL *et al.* Recent climatic change and its chemical records in Lake Erhai. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, **20**(1): 83-87. [陈敬安, 万国江, 陈振楼等. 洱海近代气候变化的化学记录. 地理科学, 2000, **20**(1): 83-87.]
- [45] Schelske CL, Hodeli DA. Recent changes in productivity and climate of Lake Ontario detected by isotopic analysis of sediments. *Limnology and Oceanography*, 1991, **36**(5): 961-975.
- [46] Chen JA, Wan GJ, Wang FS *et al.* Study on environmental records in modern lacustrine sediments. *Science in China: Series D*, 2002, **32**(1): 73-80. [陈敬安, 万国江, 汪福顺等. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究. 中国科学: D 辑, 2002, **32**(1): 73-80.]
- [47] Liang LE, Li CY, Shi XH *et al.* Analysis on the eutrophication trends and affecting factors in Lake Hulun, 2006-2015. *J*

- Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1265-1273. DOI: 10.18307/2016.0612. [梁丽娥, 李畅游, 史小红等. 2006-2015 年内蒙古呼伦湖富营养化趋势及分析. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1265-1273.]
- [48] Dong XH, Anderson NJ, Yang XD *et al.* Carbon burial by shallow lakes on the Yangtze floodplain and its relevance to regional carbon sequestration. *Global Change Biology*, 2012, **18**(7): 2205-2217.
- [49] Yang H, Xing YP, Xie P *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. *Environmental Pollution*, 2008, **151**(3): 559-568.
- [50] Yang H, Yi CL, Xie P *et al.* Vertical distribution of carbon, nitrogen and phosphorus of sediments at Stations I and II in Lake Donghu, Wuhan. *Geochimica*, 2004, **33**(5): 507-514. [杨洪, 易朝路, 谢平等. 武汉东湖沉积物碳氮磷垂向分布研究. 地球化学, 2004, **33**(5): 507-514.]
- [51] Wan GJ, Bai ZG, Wang HR *et al.* The geochemical records of CNSP in recent sediments of Lake Erhai, China. *Geochimica*, 2000, **29**(2): 189-197. [万国江, 白占国, 王浩然等. 洱海近代沉积物中碳-氮-硫-磷的地球化学记录. 地球化学, 2000, **29**(2): 189-197.]
- [52] Kelts K, Hsü KJ. Freshwater carbonate sedimentation. In: Lerman A ed. *Lakes: chemistry, geology, physics*. New York: Springer, 1978: 295-323.
- [53] Lan JH, Xu H, Liu B *et al.* Paleoclimate implications of carbonate, organic matter, and their stable isotopes in lacustrine sediments: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(5): 1326-1334. [蓝江湖, 徐海, 刘斌等. 湖泊沉积中碳酸盐, 有机质及其同位素的古气候意义. 生态学杂志, 2013, **32**(5): 1326-1334.]
- [54] Xin Barag Zuoqi Compiling Committee. *Annals of Xin Barag Zuoqi*. Hailar: Inner Mongolia culture press, 2002: 257-305. [新巴尔虎左旗史志编纂委员会. 新巴尔虎左旗志. 海拉尔: 内蒙古文化出版社, 2002: 257-305.]
- [55] Bao YH, Wulan TY, Xiang B *et al.* Studies on the movement of farmland gravity and analyses of its driving forces in Inner Mongolia, China. *Progress in Geography*, 1998, **17**(4): 49-56. [包玉海, 乌兰图雅, 香宝等. 内蒙古耕地重心移动及其驱动因子分析. 地理科学进展, 1998, **17**(4): 49-56.]
- [56] Zhu W. Water scarcity caused by pollution in the Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2003, **15**(2): 133-138. DOI: 10.18307/2003.0206. [朱威. 太湖流域水质型缺水问题和对策. 湖泊科学, 2003, **15**(2): 133-138.]
- [57] Hoffmann C, Funk R, Li Y *et al.* Effect of grazing on wind driven carbon and nitrogen ratios in the grasslands of Inner Mongolia. *Catena*, 2008, **75**(2): 182-190.
- [58] Wang YF. lacustrine carbonate chemical sedimentation and climatic-environmental evolution-a case study of Qinghai Lake and Daihai Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, **24**(1): 31-36. [王云飞. 青海湖、岱海的湖泊碳酸盐化学沉积与气候环境变化. 海洋与湖沼, 1993, **24**(1): 31-36.]
- [59] Li SJ, Wang XT, Xia WL *et al.* The Little Ice Age climate fluctuations derived from lake sediments of Goulu Co, Qinghai-Xizang Plateau. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(5): 578-584. [李世杰, 王小天, 夏威夷岚等. 青藏高原苟鲁错湖泊沉积记录的小冰期气候变化. 第四纪研究, 2004, **24**(5): 578-584.]
- [60] Lei YB, Zhang HC, Li SJ *et al.* Variation of $\delta^{13}\text{C}$ value in authigenic carbonates from Zigetang Co, Tibetan Plateau since 1950 AD. *J Lake Sci*, 2010, **22**(1): 143-150. DOI: 10.18307/2010.0120. [类延斌, 张虎才, 李世杰等. 1950 年以来青藏高原兹格塘错碳酸盐稳定碳同位素变化及其原因. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 143-150.]
- [61] An ZS, Colman SM, Zhou WJ *et al.* Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka. *Scientific Reports*, 2012, **619**(2): 1-7.
- [62] Xue JB, Zhong W. Holocene climate change recorded by lacustrine sediments in Barkol Lake and its regional comparison. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(4): 610-620. [薛积彬, 钟巍. 新疆巴里坤湖全新世环境记录及区域对比研究. 第四纪研究, 2008, **28**(4): 610-620.]
- [63] Zeng C, An ZS, Liu WG *et al.* Quantitative research progress on palaeo-temperature inferred from lacustrine carbonates. *Journal of Salt Lake Research*, 2008, **16**(1): 42-50. [曾承, 安芷生, 刘卫国等. 湖泊碳酸盐记录的古水温定量研究进展. 盐湖研究, 2008, **16**(1): 42-50.]