

近百年来洱海沉积物有机碳埋藏时空变化*

刘会基^{1,2}, 刘恩峰^{1,3**}, 于真真^{1,2}, 张恩楼¹, 林琪^{1,2}, 王荣¹, 沈吉¹

(1: 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)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 山东师范大学地理与环境学院, “人地协调与绿色发展”山东省高校协同创新中心, 济南 250358)

摘要: 湖泊沉积物有机碳埋藏是陆地碳循环中重要的环节, 对全球碳平衡起着重要的作用。洱海是云贵高原第二大淡水湖, 目前对洱海生态环境变化、重金属与营养盐污染等已展开了较为深入的研究, 但对近百年来沉积物有机碳埋藏时空变化与驱动因素缺乏系统的分析。本文通过对洱海北部湖区典型岩芯(编号 EH2012)以及其他湖区 13 个沉积岩芯中有机碳(OC)含量的分析, 结合湖泊生态环境与气候因子变化, 研究了近百年来沉积物有机碳埋藏时空变化特征与影响因素。C/N 摩尔比值表明洱海沉积物中 OC 以湖泊内源为主, 不同湖区岩芯中 OC 含量变化趋势基本相似。以 EH2012 岩芯为例, OC 含量历史变化可分为 3 个阶段: 1970 年以前, 表现出较稳定的低值; 1970—2000 年, OC 含量逐渐增加; 2000 年以来, OC 含量增加更加明显并达到近百年来最大值。近百年来, EH2012 岩芯有机碳累积速率(OCAR)呈逐渐增加趋势, 变化范围为 7.9~87.2 g/(m²·a), 平均 OCAR($\overline{\text{OCAR}}$)为 24.1 g/(m²·a); OCAR 变化与 OC 含量和区域气温呈显著正相关, 全球变暖与营养驱动下的湖泊生产力提高可能是近年来 OCAR 增加的主要原因之一。基于重金属 Cd 污染初始时间建立的时标, 1982 年以来不同湖区 $\overline{\text{OCAR}}$ 为 17.1~44.7 g/(m²·a), 采用克里金插值得到的全湖 $\overline{\text{OCAR}}$ 均值为 31.4 g/(m²·a); 不同湖区 $\overline{\text{OCAR}}$ 与磷累积速率呈显著正相关, 指示了湖泊营养水平对有机碳埋藏空间变化的重要影响。

关键词: 洱海; 沉积物; 有机碳埋藏; 时空变化; 驱动机制

Spatio-temporal patterns of organic carbon burial in the sediment of Lake Erhai in China during the past 100 years

LIU Huiji^{1,2}, LIU Enfeng^{1,3**}, YU Zhenzhen^{1,2}, ZHANG Enlou¹, LIN Qi^{1,2}, WANG Rong¹ & SHEN Ji¹

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

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R. China)

(3: Collaborative Innovation Center of Human-Nature and Green Development in Universities of Shandong, College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250358, P.R. China)

Abstract: Organic carbon (OC) burial in lake sediments plays important roles in the terrestrial carbon cycle and global carbon balance. Lake Erhai is the second largest freshwater lake in the Yunnan-Guizhou Plateau. There have been many studies on the changes in the lake ecological environment and pollution of trace metals and nutrients, but limited knowledge is available on the spatio-temporal patterns in OC burial in sediment. Based on the analysis of OC content in core EH2012 and other 13 sedimentary cores in Lake Erhai, the characteristics in temporal and spatial variations of OC burial in recent 100 years were studied, and their relationships with the climatic, anthropogenic and ecological factors were discussed. The C/N molar ratio indicated that the sedimentary OC in Lake Erhai were mainly autochthonous in source, and they displayed similar vertical trends in the cores from different lake areas. In core EH2012, for example, the OC content displayed three stages variations. The OC content were low before 1970 AD, followed by a gradual increase between 1970 and 2000 AD, then increased sharply after 2000 AD and reached the maxima in re-

* 国家科技基础性工作专项(2014FY110400)和国家自然科学基金项目(41672354, 41271214)联合资助。2018-05-13 收稿; 2018-06-27 收修改稿。刘会基(1992~), 女, 硕士研究生; E-mail: liuhuiji16@mails.ucas.ac.cn.

** 通信作者; E-mail: liufenfeng@sdu.edu.cn.

cent years. The organic carbon accumulation rate (OCAR) increased gradually over the past 100 years as shown in core EH2012, and ranged from 7.9 to 87.2 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, with an average value ($\overline{\text{OCAR}}$) of 24.1 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. The OCAR variations in cores EH2012 were positively correlated with the OC content and regional temperature, suggesting that the enhancing lake primary productivity driven by both nutrients levels and temperature should be one of major factors responsible for rising OCAR. Using the 1982 chronology mark established by initial time of Cd pollution in the cores, the $\overline{\text{OCAR}}$ since 1982 AD showed large diversity in different lake areas, ranging from 17.1 to 44.7 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and it averaged 31.4 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ for the whole lake based on the Kriging interpolation. The spatial variation in $\overline{\text{OCAR}}$ is positively correlated with the phosphorus accumulation rate, which also suggests the driving mechanism of nutrient levels on the OC burial.

Keywords: Lake Erhai; sediment; organic carbon burial; spatio-temporal variations; driving mechanism

湖泊沉积物作为有机碳(OC)的储存库之一,在区域与全球碳循环与碳平衡中发挥着重要的作用. 研究表明,全球内陆水体沉积物中 OC 累积速率在 150~600 Tg/a 之间^[1-3],其中湖泊 OC 累积速率平均约为 42~90 Tg/a ^[3-4]. 近百年以来受到人类活动的强烈影响,外源有机质入湖通量增加明显^[5],大量外来营养盐的输入使得湖泊初级生产力升高,富营养化问题日益突出,由此导致部分湖泊“碳汇”效应更为明显^[6-7]. 如北美爱荷华州富营养湖泊有机碳累积速率高达 200 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^[6],欧洲富营养湖泊有机碳累积速率超过 50 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^[7]. 除营养盐输入之外,全球变暖也可引起水体初级生产力的提高;然而,增温背景下水体与沉积物中微生物呼吸作用与有机质矿化速率增强^[8],可导致有机碳埋藏率的下降^[8],湖泊沉积物可能由“碳汇”变为“碳源”,全球变暖与湖泊营养水平提高对碳埋藏的影响可能存在一定的区域差异. 因此,深入研究湖泊沉积物中有机碳埋藏的时空变化及其与湖泊生态、气候环境与人类活动等关系,不仅有利于更加深刻地了解湖泊生态环境演化,而且可以更加科学地评估湖泊有机碳埋藏在全球碳循环中的作用.

湖泊有机碳埋藏与流域人类活动强度、沉积特征、水文生态等生态环境因子密切相关^[5,9-10],不仅不同湖泊之间有机碳累积速率存在很大差异^[5-6],而且同一湖泊的不同湖区有机碳累积速率可能表现出较大的空间差异性^[10]. 目前全球及区域湖泊有机碳埋藏的估算主要是基于单一或者少数岩芯资料,这会导致全湖有机碳埋藏量估算结果存在较大偏差^[11],进而影响到全球湖泊有机碳埋藏量估算的精度^[3]. 对于大型湖泊而言,单个或少量岩芯数据在多大程度上能代表全湖的有机碳埋藏情况还有待进一步评估.

我国大于 1 km^2 的湖泊总面积约 81415 km^2 ,据估算,近 150 年来有机碳埋藏量为 269.5 Tg ^[11]. 目前,针对我国湖泊碳埋藏的研究多集中在全新世和近 150 年两个阶段^[12-14],研究内容上主要侧重于有机碳埋藏历史变化^[12-13]. 如张风菊等^[15]对中国不同气候区 64 个湖泊的研究表明,近 150 年来有机碳累积速率为 1.4~259.5 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,平均为 21.7 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. 长江中下游浅水湖泊研究表明^[13],1850 年以来,有机碳累积速率约为 5~373 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,同时期该地区湖泊有机碳埋藏总量约为 80 Tg ,相当于土壤埋藏量的 11%. 云贵高原是我国五大湖区之一,据估算,云贵高原九大湖泊 1850 年以来的有机碳平均累积速率为 27.4 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ^[15]. 洱海是云贵高原第二大淡水湖,20 世纪末期以来富营养化问题日益突出^[16]. 针对洱海水质和生态环境等方面已开展了较为深入的研究^[17-18],但是关于洱海有机碳埋藏时空变化与影响因素的研究还十分薄弱. 本文在前人研究的基础上,通过对洱海 14 个沉积岩芯中有机碳含量时空分布特征进行分析,研究了有机碳埋藏时空变化规律及其与湖泊水环境和主要气候因子等的关系,评估了沉积空间异质性对全湖有机碳埋藏估算的影响,以期为全面深入地认识洱海生态系统演化、科学评估湖泊沉积物碳埋藏对区域及全球碳循环的贡献提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洱海位于云南省大理市,湖泊面积 249 km^2 ,汇水面积 2785 km^2 ,最大水深 20.7 m,平均深度 10.2 m^[19]. 洱海是典型的构造断陷湖,主要靠降水和冰雪融水补给,其中大部分来自流域西部的苍山山脉,南部的西洱河是洱海主要的出湖河流(图 1). 1950—2012 年,环洱海地区年平均气温和降水变化范围分别是 14~16℃和 647~1453 mm,平均为 15℃和 1055 mm;年平均气温呈现出升高的趋势,而年平均降水量呈现微弱降低的

趋势^[20]. 从 1990s 开始, 洱海水体趋于富营养化, 包括总磷 (TP) 和总氮 (TN) 在内的营养指标均呈上升趋势, 至 2003 年, TP 浓度达到了 30 $\mu\text{g/L}$, 随后有所下降, 但 TN 一直保持在较高水平 (2006 年达到峰值, 浓度为 0.66 mg/L)^[21]. 较高的营养盐浓度诱发了蓝藻等浮游植物的大量生长, 密度由 1995 年的 2×10^6 cells/L 升高到 2003 年的 2×10^7 cells/L, 并且引发了严重的藻华灾害^[21]. 总体上, 洱海的水环境与生态环境演变以 1970s、1980s 和 1990s 为界可划分 3 个阶段, 经历了大型水生植物扩张、衰退, 由贫营养到富营养, 水质不断下降的过程^[22]. 洱海环境变化与人类活动密不可分, 其中 1970s 西洱河水电站放水发电、1990s 网箱养殖、近年来旅游业与农业发展及氮磷等营养盐输入都对洱海的生态环境产生了巨大的影响^[23].

1.2 样品采集

2012 和 2014 年, 使用奥地利产 UWTEC 重力采样器在洱海不同湖区共采集了 14 个沉积岩芯 (图 1). EH2012 岩芯以 0.5 cm 间隔现场分样, 其他沉积岩芯以 1 cm 为间隔分样, 所有样品均装入聚乙烯自封袋中密封保存, 带回实验室储存在 4°C 的冷库中.

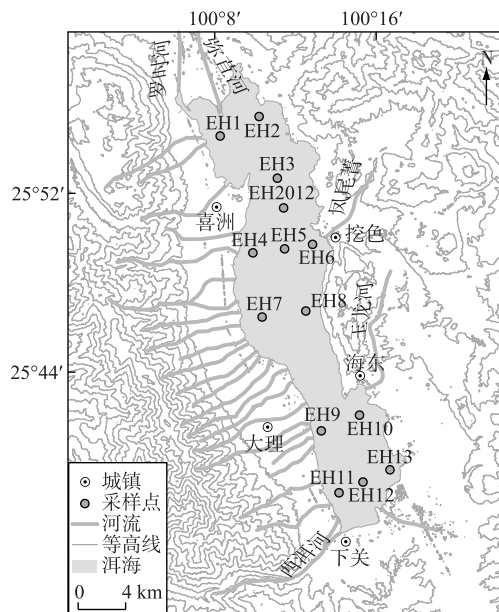


图 1 洱海沉积岩芯采样点位置与编号

Fig.1 Sampling sites and codes of the cores in Lake Erhai

1.3 样品分析

沉积物样品经冷冻干燥后分别用于各项指标分析. 本文主要对 EH2012 岩芯进行年代学指标分析, ^{210}Pb 、 ^{226}Ra 及 ^{137}Cs 活度采用美国 EG&G Ortec 公司生产的高纯锗井型探测器 (HPGe GWL-120-15) 测定, 根据 ^{210}Pb 与 ^{226}Ra 差值计算获得过剩 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$).

取 0.5 g 左右沉积物样品经 1 M HCl 去除碳酸盐并用蒸馏水洗至中性后进行冷冻干燥, 研磨后采用 Flash EA 1112 元素分析仪测定有机碳 (OC) 和总氮 (TN) 含量. 称取研磨后的沉积物样品约 0.1 g 置于聚四氟乙烯烧杯中, 经 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 中温 (180°C 左右) 完全消解并蒸干后, 再加入 2.5 ml 1 mol/L 的硝酸和 5 ml 超纯水, 加热溶解残渣, 冷却后定容至 25 ml^[11], 采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (Leeman Labs, Profile DV) 测定总磷 (TP) 含量, Cd 含量采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Agilent 7700) 测定. 分析过程中采用 GSS-9 和 GSS-13 标准物质进行精度控制, 测量值均在标准值误差范围内. 上述测试均在中国科学院湖泊与环境国家重点实验室完成, EH2012 岩芯中样品的分析间隔为每 1~2 cm 一个样品, 其他岩芯中 0~20 cm 样品的分析间隔为每 2 cm 一个样品, 20 cm 以下样品的分析间隔为每 4 cm 一个样品, 上下样品间 OC 含量采用内插方法计算有机碳累积速率.

1.4 有机碳累积速率计算

有机碳累积速率(organic carbon accumulation rate, OCAR, $g/(m^2 \cdot a)$)采用如下公式计算^[15]:

$$OCAR = SARs \cdot OC(\%) \quad (1)$$

式中, $OC(\%)$ 为每层沉积物的有机碳含量, $SARs$ 为每层沉积物沉积速率($g/(m^2 \cdot a)$).

平均 OCAR 计算公式为:

$$\overline{OCAR} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot \Delta t_i \cdot (OC\%)_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (2)$$

式中, \overline{OCAR} 为一定时间内的平均 OCAR, F_i 为第 i 层沉积物沉积速率, Δt_i 为第 i 层和 $i+1$ 层的年代间隔, $(OC\%)_i$ 为第 i 层沉积物的有机碳含量. 全湖沉积物碳埋藏量基于公式(2)、湖泊面积以及沉积年代结果, 采用克里金插值法进行计算.

1.5 数据分析

文中数据统计分析采用 SPSS 22.0 软件进行, OC 等指标的空间分布图采用 Surfer 10.0 (Golden Software Inc.) 软件进行绘制 (Kriging 空间插值).

2 结果与讨论

2.1 沉积岩芯年代

EH2012 岩芯中 $^{210}Pb_{ex}$ 活度自上而下总体上呈指数下降 ($R^2 = 0.8, P < 0.01$), ^{137}Cs 活度在约 17 cm 处呈现明显的峰值 (图 2); 参考北半球大气 ^{137}Cs 沉降通量^[24], EH2012 岩芯中 ^{137}Cs 峰值对应于 1963 年. 岩芯底部 (31 cm 以下), $^{210}Pb_{ex}$ 活度小于 10 Bq/kg, ^{210}Pb 衰变已基本达到平衡 (图 2). 根据 $^{210}Pb_{ex}$ 活度, 采用 CRS 模型建立沉积岩芯年代^[24], 深度 17 cm 处年代为 1964 年 (图 2), 这与 ^{137}Cs 时标 (1963 年) 吻合, 说明根据 $^{210}Pb_{ex}$ 活度建立的沉积岩芯年代具有较高的精度. 沉积岩芯 31 cm 处对应年代为 1825 年, 由于 ^{210}Pb 测年方法本身的局限性, ^{210}Pb 衰变平衡点附近年代结果误差较大^[24], 可能对有机碳累积速率计算有较大影响, 因此本文重点对近百年 (对应于 EH2012 岩芯深度 28~0 cm) 沉积物中碳累积速率进行分析.

除了 EH2012 岩芯之外, 其他沉积岩芯年代时标建立采用地层对比法^[25]. EH2012 岩芯中 Cd 污染开始出现于 1982 年前后 (图 2), 结合其他沉积岩芯中 Cd 污染开始出现的层位, 建立各岩芯 1982 年时标所对应的深度, 进而估算近年来不同湖区有机碳累积速率与累积量.

2.2 洱海沉积物有机碳时空变化特征

2.2.1 洱海沉积物中有机碳含量历史变化 EH2012 岩芯 OC 等指标变化如图 3 所示. OC 含量为 1.8%~12.5%, 平均值为 3.8%. OC 含量变化可分为 3 个阶段: 1970 年以前, OC 含量无明显变化趋势, 维持在较稳定的低值; 1970—2000 年, OC 含量逐渐增加; 2000 年以来, OC 含量快速增加并达到整个岩芯的最高值, 这与水体中叶绿素 a 浓度变化阶段相似^[26]. TN 含量变化趋势与 OC 基本一致, 二者呈显著正相关 ($r = 0.997, P < 0.01$). C/N 摩尔比值为 9.9~14.9, 总体上由下向上呈逐渐降低趋势. 沉积岩芯中 TP 含量总体上呈向上增加的趋势, 可分为 3 个阶段: 1970 年以前其含量逐渐增加, 1970—2000 年无明显变化趋势, 2000 年以来磷含量快速增加.

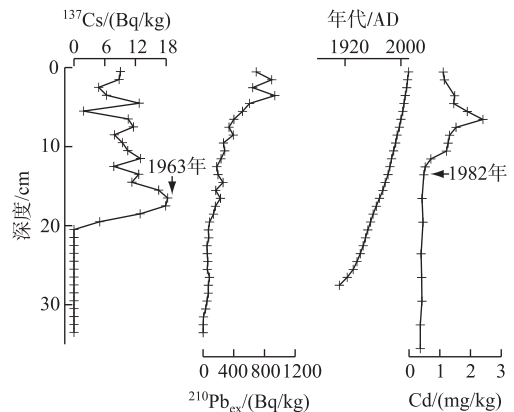


图 2 洱海 EH2012 岩芯 ^{137}Cs 与 $^{210}Pb_{ex}$ 活度、年代—深度对应关系以及镉 (Cd) 含量

Fig.2 Activities of ^{137}Cs and $^{210}Pb_{ex}$, the age-depth relationship and the content of Cd in the core EH2012 from Lake Erhai

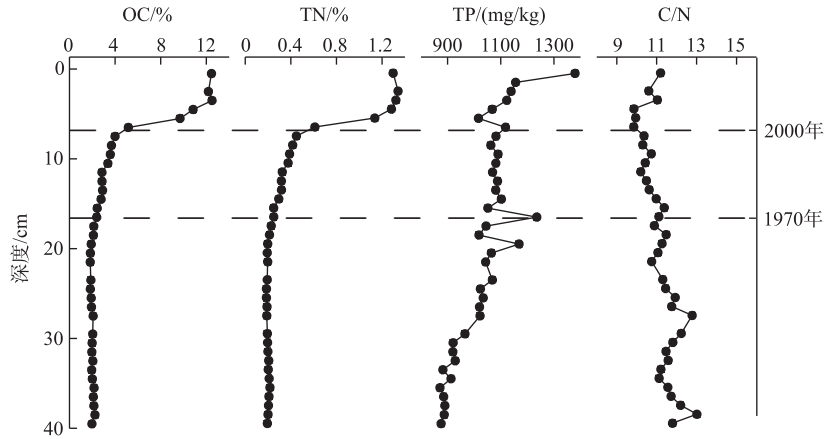


图3 EH2012 岩芯有机碳(OC)、总氮(TN)、总磷(TP)含量及C/N摩尔比值变化

Fig.3 Vertical variations of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus contents and C/N molar ratio in the core EH2012

洱海其他沉积岩芯中 OC 含量变化如图 4 所示. 各岩芯中 OC 平均含量介于 2.5%~6.6%之间. 垂向上, EH1~EH14 岩芯中 OC 含量变化趋势与 EH2012 相似, 但各岩芯 OC 含量开始出现变化的深度有所不同, 可能主要与各湖区沉积速率的空间差异有关. 总体上, 各岩芯下部 OC 含量较为稳定; 岩芯中部 OC 含量缓慢增加, 岩芯上部 OC 含量呈快速增加趋势. 14 个岩芯中 C/N 摩尔比值均值为 9.2~10.6.

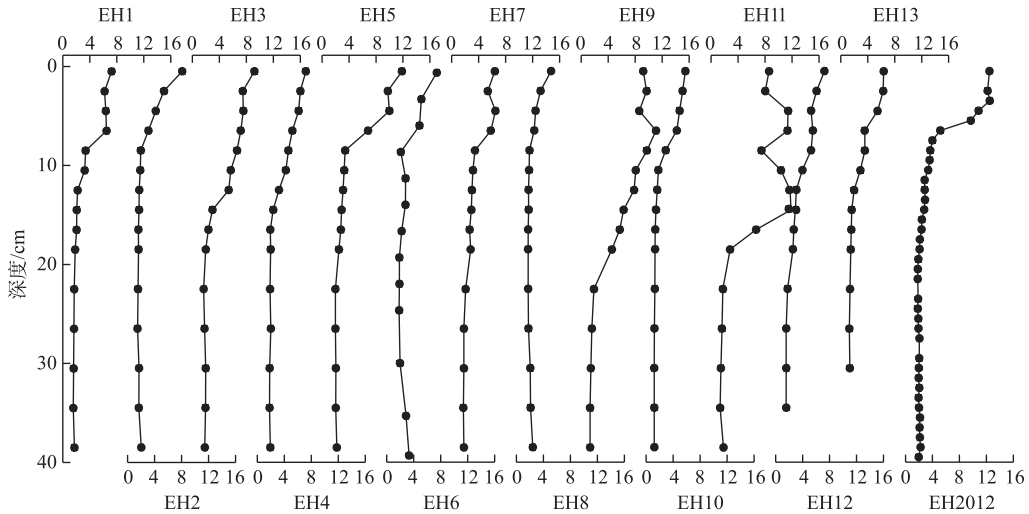


图4 洱海沉积岩芯有机碳(OC)含量(%)垂向变化

Fig.4 Vertical variations of organic carbon content (%) in sediment cores from Lake Erhai

2.2.2 沉积物中有机碳含量空间变化 由于受到年代资料的限制, 本文只建立了各岩芯 1982 年时标, 这基本上对应于洱海营养程度开始升高、生态系统类型开始发生变化的时段^[22]. 因此, 重点对表层沉积物与 1982 年以来沉积物中 OC 含量等空间变化进行了分析(图 5).

表层沉积物中 OC 含量为 5.1%~12.5%, 平均为 7.6%; C/N 摩尔比值在 9.0~11.2 之间, 平均值为 10.1 (图 5). 空间上, 表层沉积物中 OC 含量高值区主要位于中北部和西南部湖区(图 5). 与云贵高原地区其他湖泊相比, 洱海表层沉积物中 OC 平均含量低于富营养程度较高的杞麓湖(OC 含量为 9.2%), 但高于中营养

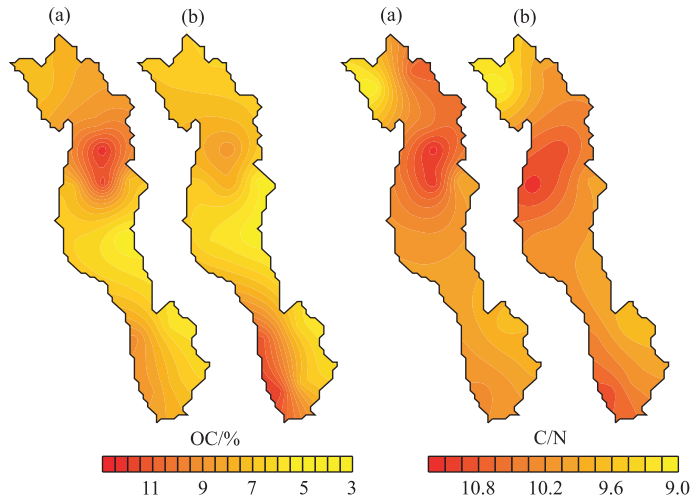


图5 洱海表层(a)与1982年以来(b)沉积物中有机碳(OC)含量和C/N摩尔比值空间变化
Fig.5 Spatial variations of organic carbon content and C/N molar ratios in surface (a) and recent sediments after 1982 (b) in Lake Erhai

的程海(OC含量为2.8%)和贫营养的泸沽湖(OC含量为6.6%)^[27]. 1982年以来,洱海不同湖区沉积物中OC平均含量为3.2%~9.9%,平均为5.6%(图5);C/N摩尔比值为9.2~10.6(图5),平均值为10.0,变异系数为0.04,表明有机质来源空间差异较小. 1982年以来沉积物中OC平均含量以及C/N摩尔比值空间分布特征与表层沉积物基本一致,说明近年来洱海各湖区沉积物中有机质累积与来源等较为稳定.

2.3 有机碳埋藏时空变化与影响因素

2.3.1 近百年来洱海沉积物中有机碳埋藏变化 EH2012岩芯记录的OCAR变化趋势与OC总体一致,约1970年以前OCAR较为稳定,1970年以来OCAR呈逐渐增加趋势,尤其是2000年以来OCAR达到近百年的最高水平(图6). EH2012岩芯中OCAR变化范围为7.9~87.2 g/(m²·a),基于公式(2)估算得到近百年来 \overline{OCAR} 为24.1 g/(m²·a),与泸沽湖1920年以来沉积物 \overline{OCAR} (23.9 g/(m²·a))相近^[25],与云贵高原地区9个湖泊1850年以来的 \overline{OCAR} 结果(27.4 g/(m²·a))^[15]相当,远高于长江中下游湖泊同时期的OCAR(如太湖为5 g/(m²·a))^[13],略低于美国(除阿拉斯加和夏威夷州)的湖泊与水库沉积物OCAR(31 g/(m²·a))^[28],远低于北美和欧洲富营养湖泊(50~150 g/(m²·a))^[6-7]和爱荷华州富营养化水库的OCAR(150~17000 g/(m²·a))^[29]. 上述不同地区湖泊OCAR的差异可能更主要的取决于人为活动导致的湖泊富营养化与水体生产力水平^[7],除此之外,还可能与气候和水体理化性质不同造成的水体与沉积物有机质矿化速率^[8,30-32]、湖泊形态、水深及有机质来源差异等因素有关^[3,30].

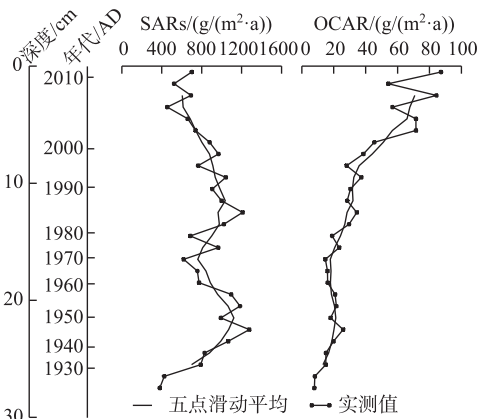


图6 EH2012岩芯沉积速率(SARs)与有机碳累积速率(OCAR)

Fig.6 The sediment accumulation rates (SARs) and organic carbon accumulation rates (OCAR) in the core EH2012

近百年来,EH2012岩芯记录的OCAR与OC含量呈显著正相关($n=28, r=0.937, P < 0.01$)(图7),这与全新世大暖期研究结果相似^[15];而OCAR与沉积物累积速率无显著相关性($n=28, r=0.179, P=0.362$)

(图 7). EH2012 岩芯记录的有机碳累积速率与沉积物沉积速率在 1980s 以前趋势相同, 随后总体趋势相反, 说明在 1980s 以前, 沉积速率对有机碳累积速率具有较大影响, 这可能与较高沉积速率条件下有利于沉积物中有机质的保存有关^[31]; 而在 1980s 以后, 洱海有机碳累积速率主要取决于水体 OC 供给的变化, 沉积速率影响降低.

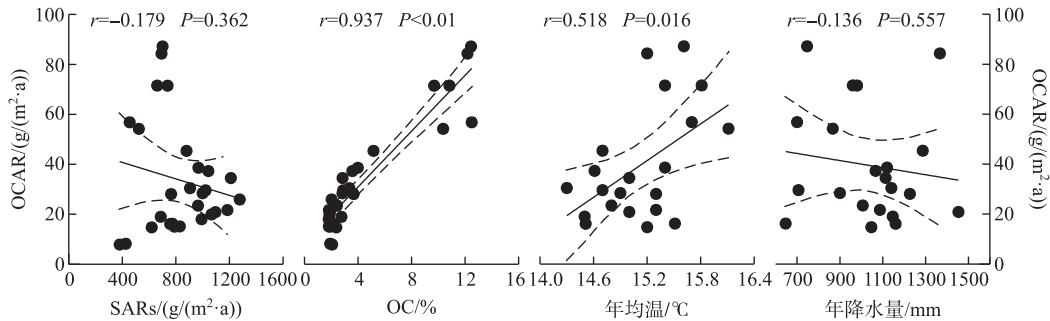


图 7 EH2012 岩芯有机碳累积速率与沉积速率(SARs)、有机碳(OC)含量、区域年均温和降水量^[20]之间的关系(虚线为 95% 置信区间)

Fig.7 Plots of OCAR against SARs and organic carbon content in core EH2012, and the regional annual temperature and precipitation (Dashed line shows the 95% confidence interval)

2.3.2 沉积物有机碳埋藏历史变化的影响因素分析 流域人类活动强度与气候变化^[5]、有机质来源^[30-31]、水体生产力水平与生态类型转变^[8]、水体-沉积物界面环境条件^[30-31]、水体与沉积物中有机质的降解^[29]等因素对沉积物有机碳累积速率有重要影响. 本文基于 EH2012 岩芯结果, 对洱海沉积物 OC 埋藏历史变化的主要因素进行了分析.

湖泊沉积物中有机质来源分为内源和外源, 内源有机质主要包括水生生物残体, 而外源有机质主要为入湖径流携带的以颗粒态和溶解态存在的陆生植物有机质. 研究表明, 藻类等低等水生植物具有较低的 C/N 摩尔比值, 一般小于 7; 陆生高等植物 C/N 摩尔比值一般大于 20^[33]. 根据洱海各岩芯中 C/N 摩尔比值, 沉积物中有机质均以湖泊内源为主, 这与倪兆奎根据 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 和 C/N 摩尔比值得到的研究结果一致^[34]. 洱海各湖区沉积物中 C/N 摩尔比值差异较小(图 5), 反映了全湖较为相似的有机质来源.

研究认为, 当湖泊沉积物中有机质以内源为主时, 其埋藏通量高低通常反映了湖泊生产力水平^[7]. 1970 年以前, 洱海流域经济发展水平不高, 人类活动对洱海影响较小, 喜爱清洁水体的云南飞燕角甲藻、暗丝藻等藻类较为常见^[34], 湖泊初级生产力保持在较低水平, 有机碳累积速率处于较低水平(图 6). 1970s 之后, 西洱河水电站建成使用, 造成洱海水位下降(1973—1982 年平均水位下降 1.2 m)^[35], 水生植物向湖心区扩展, 沉水植物生物量大幅增加^[17]; 这一时期, 洱海流域农业快速发展, 农业及生活废水排放的人为营养盐输入增加使得湖泊生产力上升^[36], 沉积物中 OC 含量与有机碳累积速率升高(图 6). 1990 年以后, 沉积物中 OC 含量与 OCAR 增加趋势明显加快并在 2000 年后达到最高水平; 这一时期, 网箱养鱼面积大幅度增加, 旅游业日益兴旺, 进入洱海的营养物质质量增加, 水体逐渐过渡到富营养水平^[22]. 根据相关研究, 1996 年洱海出现了大面积的“水华”^[26, 34], 枝角类研究也表明约 1996 年以后, 喜爱富营养水体的象鼻溞替代喜好贫营养水体的象鼻溞成为优势种^[37], 洱海生态环境恶化. 2000 年以来, 洱海环境治理, 大型水生植物有所恢复, 但水体浮游藻类生物量增高^[23], OC 含量与累积速率快速增加(图 3、图 6). 近百年来 EH2012 岩芯 OC 含量及 OCAR 的变化与洱海生态环境演化过程吻合. EH2012 岩芯中 OC 与 TP 含量具有显著的相关关系($r=0.536$, $P<0.01$), 营养盐输入是沉积物中 OC 含量与累积通量升高的主要影响因子之一, 同时也说明洱海沉积物有机质与营养盐沉积通量可反映湖泊营养水平与生产力变化^[38].

除了湖泊营养水平之外, 温度和降水量对湖泊生产力以及沉积物有机碳的保存也有重要影响. 目前研究认为有机碳埋藏对温度存在两种反馈作用, 一方面温度升高有利于有机质的矿化分解, 从而降低有机碳累积速率^[39]; 另一方面随着温度的升高, 湖泊及流域的初级生产力也升高, 进而有利于湖泊有机碳的供给和

累积^[13]. 降水量的增加会提升流域植被和土壤碳储量,增加湖泊沉积物有机碳的输入^[15];但洱海沉积物中有机质以湖泊内源为主,外源有机质输入变化对沉积物有机质累积速率的影响应较弱. 本研究选择环洱海地区 1951—2014 年 6 个基本站点(洱源、大理、弥渡、漾濞、祥云、宾川)气温和降水数据^[20]与有机碳累积速率进行线性拟合,结果表明 OCAR 与年均温度有正相关关系($n=21, r=0.518, P=0.016$),而与降水量未表现出显著相关关系($n=21, r=0.136, P=0.557$)(图 7). 考虑到增温过程与洱海富营养化过程在时间上的同步性,为更准确地刻画温度与有机碳埋藏的关系,以 TP 为控制变量,对 OCAR 与温度进行偏相关分析,二者具有相关性($n=21, r=0.473, P=0.035$),因此认为近年来的增温过程对洱海水体生产力提高和碳埋藏影响显著,与其他研究结果一致^[6,13].

沉积到湖底的一部分活性有机质经微生物降解和矿化作用生成二氧化碳(CO_2)和甲烷(CH_4)^[40],另外一部分将被埋藏在沉积物中^[41],但有机碳降解一般发生在初始沉积后的 5~30 年内并呈指数衰减^[30,41];与外源有机质为主的湖泊相比,以内源有机质为主的湖泊中沉积物中 OC 的降解对碳埋藏效率影响较小^[9]. 研究还表明,清水的“草型湖”转变为浊水“藻型湖”后,由于沉积物氧化还原电位的降低,有机质降解速率减小,有利于沉积物中有机质的保存^[9]. 与历史上时期相比,上述因素可能导致表层沉积物中有机碳累积速率被高估^[42],但还有待进一步深入研究.

2.3.3 洱海碳埋藏空间变化与全湖碳埋藏量估算 基于不同湖区沉积岩芯 1982 年时标所对应的深度、单位面积沉积物干重及有机碳含量,估算得到 1982 年以来各岩芯 $\overline{\text{OCAR}}$ 介于 17.1~44.7 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间,采用克里金插值得到的全湖 $\overline{\text{OCAR}}$ 平均值为 31.4 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,略低于同时期滇池有机碳累积速率(55.6 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)^[43],这可能与滇池富营养化较重,水体生产力较高以及较多的外源有机碳输入有关. 空间上,洱海各湖区 $\overline{\text{OCAR}}$ 存在一定差异,南部湖区与北部湖区的 $\overline{\text{OCAR}}$ 相对较低,而中部偏北湖区较高(图 8),这与 OC 含量空间变化基本一致. 总体上, $\overline{\text{SARs}}$ 、 $\overline{\text{OCAR}}$ 与 TP 含量均呈由南部湖区和北部湖区向中部偏北湖区逐渐升高的规律(图 8). $\overline{\text{OCAR}}$ 与 $\overline{\text{SARs}}$ 呈显著相关关系($r=0.738, P=0.05$),并与磷累积速率显著相关($r=0.667, P<0.01$).

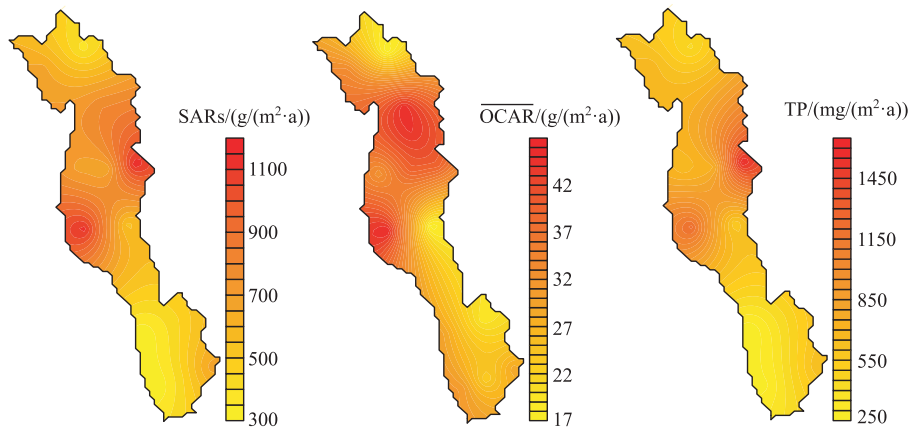


图 8 1982 年以来洱海沉积速率($\overline{\text{SARs}}$)、 $\overline{\text{OCAR}}$ 及总磷(TP)累积速率等值线图

Fig.8 Contour maps of the $\overline{\text{SARs}}$, $\overline{\text{OCAR}}$ and phosphorus accumulation rates in sediments after 1982 in Lake Erhai

洱海沉积物中有机质以内源为主, $\overline{\text{OCAR}}$ 与 $\overline{\text{SARs}}$ 具有典型相关性,这与 EH2012 岩芯 1980s 之前结果一致,可能与较高沉积速率环境下有机质埋藏效率较高有关^[32]. 相关研究表明,洱海中北部湖区黏土含量较高^[44],沉积物粒径越小对磷的吸附作用就越强^[10];中北部湖区沉积物中磷的累积速率较高除了受外源输入的影响之外,还可能与沉积物质地组成较细有关. 沉积物中磷含量的变化在一定程度上反映了湖泊水体的营养变化^[38],中北部湖区较高的营养条件使得水体生产力较高,沉水植物在洱海北部湖区具有最深的分布水深和分布范围^[45],可以有效地反映浮游植物生物量的叶绿素 a 在洱海北部也有较高的浓度^[46]. 因此,

OCAR空间变化可能与不同湖区营养状况及初级生产力的差异有关。

实际研究中,由于受采样条件或工作量等因素的制约,往往采用单一岩芯代表全湖的碳埋藏情况,为进一步评价其可靠性,分别以洱海各个单岩芯OCAR代表全湖有机碳埋藏特征,估算得到1982年以来全湖沉积物中的碳埋藏量为0.13~0.34 Tg;基于14个岩芯OCAR估算的全湖沉积物碳埋藏量为0.23 Tg,偏差为-45%~44%。由此可见,沉积环境与碳埋藏的空间异质性可能会导致基于少数钻孔估算的区域及全球湖泊碳埋藏误差的增大。

3 结论

通过对洱海沉积物近百年碳埋藏时空变化的研究,得出以下结论:

1)近百年以来,洱海沉积物中有机质以内源为主,EH2012岩芯记录的有机碳累积速率与OC含量变化趋势一致;1970年前较低,1970年以来呈逐渐升高的趋势,2000年来快速增加并达到最高值,与洱海生态环境变化吻合。磷输入导致的湖泊营养程度升高、初级生产力增加是洱海有机碳累积速率升高的主要原因之一,除此之外还可能受全球变暖的影响。近百年以来洱海有机碳平均累积速率与云贵高原地区其他湖泊相当,但远高于长江中下游湖泊,低于北美和欧洲的富营养湖泊。

2)空间上,洱海表层以及1982年以来沉积物中平均OC含量和有机碳累积速率高值区域主要分布于中部偏北湖区,与TP含量空间分布呈现出较好的一致性;有机碳累积速率呈由南部湖区和北部湖区向中部偏北湖区逐渐升高的规律。洱海有机碳埋藏空间变化主要受到湖泊营养程度的影响。

3)基于单一岩芯估算的洱海碳埋藏与多岩芯估算结果相比,偏差可达-45%~44%,指示了沉积空间异质性对全湖碳埋藏估算的影响。1982年以来,全湖有机碳平均累积速率为 $31.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,碳埋藏量为0.23 Tg。

致谢:袁和忠博士、纪明博士、罗文磊、宁栋梁等参加野外采样,朱育新副研究员、夏威岚高工、刘一兰、蔡艳杰等协助完成实验室测试,在此深表感谢。

4 参考文献

- [1] Battin TJ, Luysaert S, Kaplan LA *et al.* The boundless carbon cycle. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(9): 598-600. DOI: 10.1038/ngeo618.
- [2] 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. DOI: 10.1007/s10021-006-9013-8.
- [3] Mendonça R, Müller RA, Clow D *et al.* Organic carbon burial in global lakes and reservoirs. *Nature Communications*, 2017, **8**(1): 1694. DOI: 10.1038/s41467-017-01789-6.
- [4] Dean WE, Gorham E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. *Geology*, 1998, **26**(6): 535-538. DOI: 10.1130/0091-7613(1998)026<0535:MASOCB>2.3.CO;2.
- [5] Dietz RD, Engstrom DR, Anderson NJ. Patterns and drivers of change in organic carbon burial across a diverse landscape: Insights from 116 Minnesota lakes. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, **29**(5): 708-727. DOI:10.1002/2014GB004952.
- [6] Heathcote AJ, Downing JA. Impacts of eutrophication on carbon burial in freshwater lakes in an intensively agricultural landscape. *Ecosystems*, 2012, **15**(1): 60-70. DOI: 10.1007/s10021-011-9488-9.
- [7] Anderson NJ, Bennion H, Lotter AF. Lake eutrophication and its implications for organic carbon sequestration in Europe. *Global Change Biology*, 2014, **20**(9): 2741-2751. DOI: 10.1111/gcb.12584.
- [8] Song C, Dodds WK, Rütger J *et al.* Continental-scale decrease in net primary productivity in streams due to climate warming. *Nature Geoscience*, 2018, **11**(6): 415-420. DOI: 10.1038/s41561-018-0125-5.
- [9] Brothers, SM, Hilt S, Attemeyer K *et al.* A regime shift from macrophyte to phytoplankton dominance enhances carbon burial in a shallow, eutrophic lake. *Ecosphere*, 2013, **4**(11): 4849-4849. DOI:10.1890/es13-00247.1.
- [10] Mackay EB, Jones ID, Folkard AM *et al.* Contribution of sediment focussing to heterogeneity of organic carbon and phosphorus burial in small lakes. *Freshwater Biology*, 2012, **57**(2): 290-304. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2011.02616.x.
- [11] 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. DOI: 10.1016/j.quaint.2017.12.005.
- [12] Zhang FJ, Yao SC, Xue B *et al.* Organic carbon burial in Chinese lakes over the past 150 years. *Quaternary International*, 2017, **438**: 94-103. DOI: 10.1016/j.quaint.2017.03.047.
- [13] 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. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02697.x.
- [14] 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. [张风菊, 薛滨, 姚书春. 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.]
- [15] Zhang FJ. A first estimate of organic carbon burial in Holocene Megathermal lake sediments in China [Dissertation]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. [张风菊. 大暖期中国湖泊沉积物碳埋藏的初步研究[学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2014.]
- [16] Han T, Peng WQ, Li HE *et al.* Evolution of eutrophication in the Erhai Lake and its relevant research progress. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2005, **3**(1): 71-73. [韩涛, 彭文启, 李怀恩等. 洱海水体富营养化的演变及其研究进展. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, **3**(1): 71-73.]
- [17] Wu GG, Ni LY, Cao T *et al.* Patterns and controls of dynamics of macrophytes and phytoplankton changes in Lake Erhai From 1977 to 2009. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(5): 912-918. DOI: 10.7541/2013.118. [吴功果, 倪乐意, 曹特等. 洱海水生植物与浮游植物的历史变化及影响因素. 水生生物学报, 2013, **37**(5): 912-918.]
- [18] Zheng GQ, Yu XX, Jiang N *et al.* The cause for change of water quality of Erhai Lake and prediction of water quality. *Journal of Northeast Forestry University*, 2004, **32**(1): 99-102. [郑国强, 于兴修, 江南等. 洱海水质的演变过程及趋势. 东北林业大学学报, 2004, **32**(1): 99-102.]
- [19] Wang SM, Dou HS eds. China lakes record. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [20] Ding WR. A study on the characteristic of climate change around the Erhai area, China. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(4): 599-605. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201604009. [丁文荣. 环洱海地区气候变化特征研究. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(4): 599-605.]
- [21] Wang R. Complex dynamical changes in the trophic status of Erhai Lake, China, based on palaeolimnology and modelling [Dissertation]. Southampton: University of Southampton, 2013.
- [22] Ni ZK, Wang SR, Jin XC *et al.* Study on the evolution and characteristics of eutrophication in the typical lakes on Yunnan-Guizhou Plateau. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(12): 2681-2689. [倪兆奎, 王圣瑞, 金相灿等. 云贵高原典型湖泊富营养化演变过程及特征研究. 环境科学学报, 2011, **31**(12): 2681-2689.]
- [23] Li JJ. Research and countermeasures for Erhai Lake eutrophication. *J Lake Sci*, 2001, **13**(2): 187-192. DOI: 10.18307/2001.0214. [李杰君. 洱海富营养化探析及防治建议. 湖泊科学, 2001, **13**(2): 187-192.]
- [24] Appleby PG. Chronostratigraphic techniques in recent sediments//Last MW, Smol PJ eds. Tracking environmental change using lake sediments. Vol 1: Basin analysis, coring and chronological techniques. London: Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [25] Lin Q. Sedimentary environment change in Lugu Lake during the last two hundreds years [Dissertation]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. [林琪. 云南泸沽湖近200年沉积环境变化研究[学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2016.]
- [26] Chen XH, Qian XY, Li XP *et al.* Long-term trend of eutrophication state of Lake Erhai in 1988-2013 and analyses of its socio-economic drivers. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 70-78. DOI: 10.18307/2018.0107. [陈小华, 钱晓雍, 李小平等. 洱海富营养化时间演变特征(1988-2013年)及社会经济驱动分析. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 70-78.]
- [27] Li QQ, Huo SL, Zan FY *et al.* The distribution of nutrients and particle size, their correlations in surface sediments of different lakes, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(12): 2390-2397. [李青芹, 霍守亮, 曾逢宇等. 我国湖泊沉积物营养盐和粒度分布及其关系研究. 农业环境科学学报, 2010, **29**(12): 2390-2397.]
- [28] Clow DW, Stackpoole SM, Verdin KL *et al.* Organic carbon burial in lakes and reservoirs of the conterminous United States. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(13): 7614-7622. DOI: 10.1021/acs.est.5b00373.
- [29] Downing JA, Cole JJ, Middelburg JJ *et al.* Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over

- the last century. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, **22**(1):1-10. DOI: 10.1029/2006GB002854.
- [30] Ferland M, Prairie YT, Teodoru C *et al.* Linking organic carbon sedimentation, burial efficiency, and long-term accumulation in boreal lakes. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2014, **119** (5): 836-847. DOI: 10.1002/2013jg002345.
- [31] Katsv S, Crowe SA. Organic carbon burial efficiencies in sediments: The power law of mineralization revisited. *Geology*, 2015, **43**(7): 607-610. DOI: 10.1130/g36626.1.
- [32] Sobek S, Durischkaiser E, Zurbügg R *et al.* Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source. *Limnology & Oceanography*, 2009, **54** (6): 2243-2254. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6.2243.
- [33] Meyers PA. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 1994, **144**(3/4): 289-302. DOI: 10.1016/0009-2541(94)90059-0.
- [34] Ni ZK. Studies on the history pollution and the sources of organic matter and nitrogen in sediments of lake [Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011. [倪兆奎. 湖泊沉积物污染历史及有机质和氮来源研究[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.]
- [35] Yuan JX, Wang YZ. Level in Erhai Lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1985, (3): 9-14. [袁静秀, 王银珠. 洱海的水位. 海洋湖沼通报, 1985, (3): 9-14.]
- [36] Pan HX, Wang YF, Dong YS. Factor analysis of eutrophication in Erhai Lake. *J Lake Sci*, 1999, **11**(2): 184-188. DOI: 10.18307/1999.0217. [潘红玺, 王云飞, 董云生. 洱海富营养化影响因素分析. 湖泊科学, 1999, **11**(2): 184-188.]
- [37] Lu HB, Chen GJ, Cai YF *et al.* Cladoceran community responses to eutrophication, fish introduction and macrophyte degradation over the past century in Lake Erhai. *J Lake Sci*, 2016, **23**(1): 132-140. DOI: 10.18307/2016.0115. [卢慧斌, 陈光杰, 蔡燕凤等. 近百年来枝角类群落响应洱海营养水平、外来鱼类引入以及水生植被变化的特征. 湖泊科学, 2016, **23**(1): 132-140.]
- [38] Carnero-Bravo V, Merino-Ibarra M, Ruiz-Fernandez AC *et al.* Sedimentary record of water column trophic conditions and sediment carbon fluxes in a tropical water reservoir (Valle de Bravo, Mexico). *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, **22**(6): 4680-4694. DOI:10.1007/s11356-014-3703-0.
- [39] Gudasz C, Bastviken D, Premke K *et al.* Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature*, 2010, **466**(7305): 478-482. DOI: 10.1038/nature09186.
- [40] Gudasz C, Sobek S, Bastviken D *et al.* Temperature sensitivity of organic carbon mineralization in contrasting lake sediments. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, **120**(7): 1215-1225. DOI:10.1002/2015jg002928.
- [41] Sobek S, Söderbäck B, Karlsson S *et al.* A carbon budget of a small humic lake: an example of the importance of lakes for organic matter cycling in boreal catchments. *Ambio*, 2006, **35**(8): 469-475. DOI:10.1579/0044-7447(2006)35.
- [42] Gälman V, Rydberg J, De-Luna SS *et al.* Carbon and nitrogen loss rates during aging of lake sediment: Changes over 27 years studied in varved lake sediment. *Limnology & Oceanography*, 2008, **53**(3):1076-1082. DOI: 10.2307/40058220.
- [43] Huang C, Yao L, Zhang Y *et al.* Spatial and temporal variation in autochthonous and allochthonous contributors to increased organic carbon and nitrogen burial in a plateau lake. *Science of The Total Environment*, 2017, **603/604**(Supplement C), 390-400. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.118.
- [44] Li Y, Li RW, Shang YM *et al.* The environment sedimentological study of Erhai Lake—Correlation between nutrients and particle size distribution in superficial sediments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, **18**(3): 346-348. [李原, 李任伟, 尚榆民等. 洱海环境沉积学研究—表层沉积物营养盐与粒度分布. 沉积学报, 2000, **18**(3): 346-348.]
- [45] Chu ZS, Ye BB, Tian GP *et al.* Spatial distribution characteristics and estimation of submerged plant biomass in Lake Erhai. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(1): 1-5. [储昭升, 叶碧碧, 田桂平等. 洱海沉水植物空间分布及生物量估算. 环境科学研究, 2014, **27**(1): 1-5.]
- [46] Yang W, Deng DG, Zhang S *et al.* Seasonal dynamic and spatial distribution of chlorophyll-a concentration in Lake Erhai. *J Lake Sci*, 2012, **24**(6): 858-864. DOI: 10.18307/2012.0608. [杨威, 邓道贵, 张赛等. 洱海叶绿素 a 浓度的季节动态和空间分布. 湖泊科学, 2012, **24**(6): 858-864.]