

洱海湖心区沉积柱芯营养盐垂向分布及时间演化特征

陈小华¹, 钱晓雍¹, 李小平², 曾艳³, 胡双庆¹

1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;
3. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002

摘要: 连续的沉积物记录为研究湖泊富营养化的长期过程提供了可能。分析了洱海湖中心沉积柱的营养盐浓度垂向分布和沉积物年代记录, 并结合湖心水质变化情况, 研究了洱海沉积物营养盐的时间演化特征及生态意义。结果显示: Cal. AD 1960 年以前, 洱海沉积物营养盐稳定在较低水平, 总有机碳 (TOC) 平均质量分数为 1.45%, 总氮 (TN) 平均质量分数为 0.20%, 总磷 (TP) 质量分数低于 1 000 mg·kg⁻¹; Cal. AD 1960 年以后, TOC 和 TN 质量分数均急剧升高, 尤其在 1990 年之后呈直线上升态势, 最高值分别为 5.8% 和 0.84%, TP 质量分数从 1 000 mg·kg⁻¹ 左右直线上升至 1 345 mg·kg⁻¹, 反映了洱海近几十年来的人为富营养化加剧过程。沉积物 TP 与 TOC、TN 呈极显著正相关 ($P=0.001$), TOC 与 TN 的 Pearson 相关系数最大。洱海沉积物的 TOC/TN 比值总体比较稳定, 数值在 5.8~11.5 之间波动, 反映出这 3 种营养物质的藻类同源性。沉积物的营养物累积过程伴随水质变化呈不断恶化趋势, 1990 年后沉积物营养盐的时间演变规律与湖心区水质随时间的变化趋势基本一致。洱海表层沉积物 TN、TP 浓度明显高于东部平原湖区的湖泊, 其营养盐内源负荷不容忽视。与同地区湖泊相比, 沉积物 TN 浓度水平与抚仙湖和滇池相当, 而 TP 浓度明显低于这两个湖泊, 说明洱海沉积物对 P 仍具有较强的吸附容量及潜在缓冲能力。

关键词: 沉积柱芯; 营养盐; 垂向分布; 时间演化特征; 水质; 洱海

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.10.014

中图分类号: X524; X142

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2016) 10-1693-06

引用格式: 陈小华, 钱晓雍, 李小平, 曾艳, 胡双庆. 2016. 洱海湖心区沉积柱芯营养盐垂向分布及时间演化特征[J]. 生态环境学报, 25(10): 1693-1698.

CHEN Xiaohua, QIAN Xiaoyong, LI Xiaoping, ZENG Yan, HU Shuangqing. 2016. The vertical distributions and temporal evolution characteristics and of nutrient concentration in the sediment core at the center of Lake Erhai [J]. Ecology and Environmental Sciences, 25(10): 1693-1698.

在气候变化、人类活动等多重压力影响下, 作为地球生物圈重要组成部分的湖泊生态系统正遭受着巨大威胁, 多数湖泊趋于富营养化状态 (Schindler, 2012)。如何科学地描述湖泊富营养化状态的历史演化特征, 并预测其发展趋势, 是当前湖泊保护亟待解决的问题。然而, 目前的资料多是基于有限的现代观测数据, 时间尺度往往较短 (从数年至数十年), 不足以了解湖泊生态系统的长期变化 (Gottschalk, 2011; 徐敏等, 2014)。湖泊沉积物是区域及全球环境变化的记录器, 保存了丰富的生态系统变化信息, 其连续的、高分辨率沉积记录是刻画湖泊和流域长期变化的良好载体 (沈吉, 2009)。

洱海是云南省第二大高原淡水湖泊, 为滇西最大的断陷湖, 处于东经 100°0′~100°17′, 北纬 25°36′~25°55′之间。水面面积 249.80 km², 汇水面积 2 565.0

km², 平均水深 10.5 m, 库容 2.88 × 10⁹ m³ (Hyodo et al., 1999)。洱海是大理州的主要水源地, 具有调节气候、提供生产生活用水、娱乐休闲、渔业生产等多种功能, 是整个流域社会经济可持续发展的基础 (Shen et al., 2006)。随着流域社会经济的高速发展, 洱海的水质总体呈恶化趋势, 目前处于关键的“富营养化初期”阶段 (吴功果等, 2013), 藻华时常威胁到湖泊的基本生态服务功能。洱海富营养化的治理必须建立在对其历史营养演化过程、营养本底状况认识的基础之上。本研究通过采集洱海人为活动干扰最小、沉积环境相对稳定的湖中心沉积物柱芯, 分析沉积物营养盐的垂向分布及其时间演变特征, 并结合湖心水质数据变化分析, 试图揭示洱海的自然富营养化和人为富营养化过程, 这对洱海自身水体富营养化防治和控制具有重大意义。

基金项目: 国家水专项项目 (2009ZX07106-001-006)

作者简介: 陈小华, 男, 高级工程师, 博士。E-mail: shoutfar@aliyun.com

收稿日期: 2016-07-26

1 材料与方法

1.1 样品采集与沉积物计年

2012 年利用中科院地球化学研究所自制的重力采样器 (朱正杰等, 2010) 在洱海的湖心平台 (N25°46'43.01", E100°11'32.82") 采得长 77 cm 的沉积物孔芯柱 (图 1)。湖心处的沉积物一般受人为活动干扰最小, 沉积环境相对稳定, 适合进行沉积物营养状态演变研究 (陈敬安等, 2000; Smol, 2008)。采集的沉积物柱芯顶部悬浮层未受扰动, 界面水清澈透明。沉积物柱芯在野外现场按 1~2 cm 间距分割, 共获得 52 个样品, 密封保存后运回实验室。样品运回实验室后, 先称量样品湿重, 然后将其置于真空冷冻干燥器 (型号: FD-IA-50) 中干燥, 并称量样品干重。随后, 用玛瑙研钵将沉积物研磨至 120 目以下, 以备进一步分析。

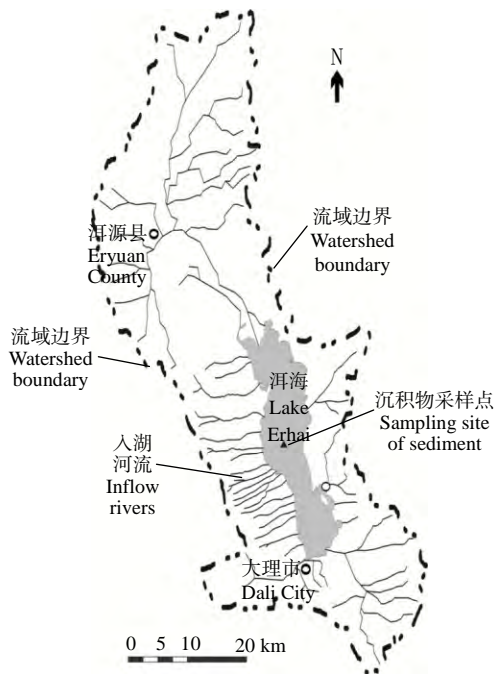


图 1 洱海流域及沉积物采样点

Fig. 1 Lake Erhai watershed and sediment sampling site

基于万国江 (1999) 的洱海中心湖区沉积物平均堆积速率值 $0.046 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a}^{-1})$, 经高分辨率计算得出各样品的沉积年代, 此柱芯记录了过去 400 多年的沉积历史。

1.2 沉积物测试指标与方法

1.2.1 TOC、TN 分析

采用美国 PE 公司生产的型号为 PE2400 II 型元素分析仪对沉积物粉末进行 C、N 分析, 测量误差均小于 5%。无机碳采用气量法测定 (鲍士旦, 2000), 测量误差小于 5%。总碳含量减去无机碳含量得到 TOC 含量。

1.2.2 TP 分析

参考《水和废水监测分析方法(第四版)(增补版)》(国家环境保护总局, 2002), 称取 0.2 g 沉积物样品, 在 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 下灰化 2 h, 加入 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 20 mL, 振荡 16 h 后离心。取适量上清液, 采用钼锑抗分光光度法分析 TP。

1.3 湖心水质数据来源

从云南省环境监测中心站、中国大理洱海湖泊研究中心等环境监测和研究部门收集了洱海湖心监测点位 1990—2012 年的高锰酸盐指数 (COD_{Mn})、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 监测数据 (1993 年、2000—2001 和 2004—2005 年数据缺失)。水质采样频次为每年 6 次或 12 次。各水质指标的主要测试方法如下: TN——过硫酸钾氧化紫外分光光度法, TP——钼锑抗分光光度法, COD_{Mn} ——酸性法 (国家环境保护总局, 2002)。

1.4 数据整理分析

利用 Excel 2007 进行数据整理, 采用 SPSS 16.0 进行基本数据统计并进行 Pearson 相关性分析, 采用 Origin 8.0 作图。

2 结果与讨论

2.1 湖心沉积柱芯的营养盐含量及相关性

就 TOC 指标而言, 其在表层 15 cm 厚沉积物中的含量由 2.0% 陡升至 5.7%, 而在 15 cm 深度以下的沉积物中含量始终稳定在 1.6% 上下。TN 含量的垂向分布类似于 TOC, 在表层 15 cm 厚沉积物中的含量由 0.25% 直线上升至 0.81%, 在 15 cm 深度以下的沉积物中含量稳定在 0.2%~0.3%。TP 含量由底及表呈稳步上升趋势, 表层 TP 含量是底部的 1.7 倍 (图 2)。表层沉积物与湖水直接接触, 容易快速累积营养盐 (李青芹等, 2010)。

对洱海沉积物中的 TP 与 TOC、TN 含量进行两两之间的 Pearson 相关性分析, 发现均呈显著正相关关系 ($P=0.001$) (表 1), 反映出这 3 种营养物质的同源性。TOC 与 TN 之间的 Pearson 相关系数最大, 达到 0.936, 说明两者含量变化的时间同步性强。而 TP 与 TOC、TN 的相关系数都只接近 0.6。三者的相关性反映了各自在湖体中的地球化学循环特征的差异: 碳循环和氮循环都涉及固、液、

表 1 洱海沉积物 TOC、TN 和 TP 之间的 Pearson 相关性

Table 1 Pearson correlation coefficients of TOC, TN, TP in the sediments of Lake Erhai

Indicators	w(TOC)/%	w(TN)/%	w(TP)/(mg·kg ⁻¹)
w(TOC)/%	1	0.936**	0.596**
w(TN)/%		1	0.593**
w(TP)/(mg·kg ⁻¹)			1

$n=52$, **表示差异极显著 ($P<0.01$)

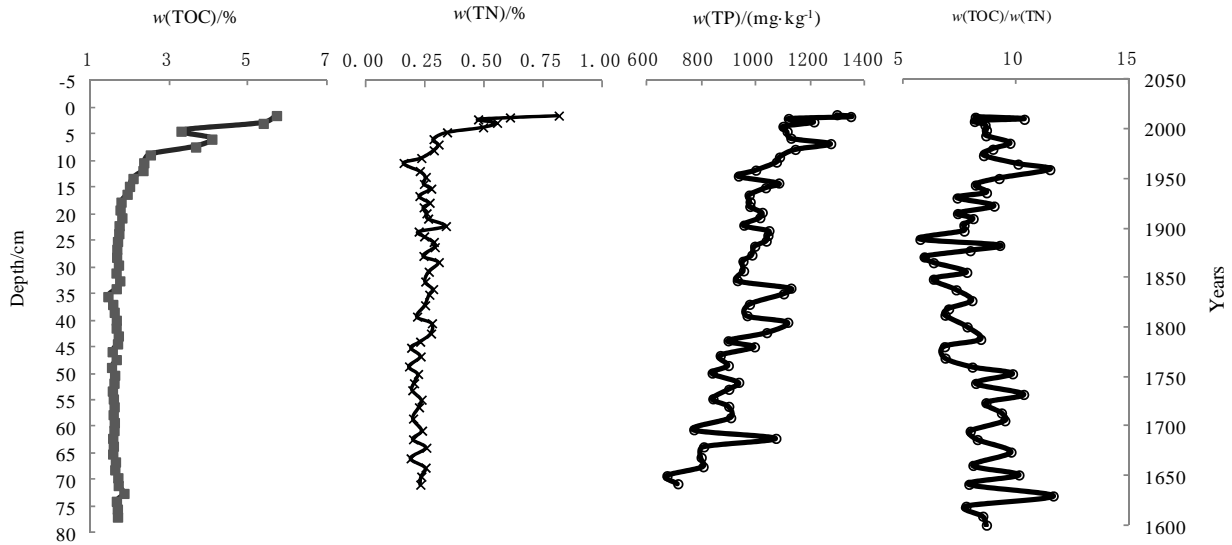


图2 洱海湖心沉积物 TOC、TN 和 TP 及 TOC/TN 的垂向分布及现代计年对应

Fig. 2 The cross-section characteristics of TOC, TN, TP, C/N ratio in the sediment at the centre of Lake Erhai

气 3 个过程, 沉积物中碳和氮通过微生物的分解作用而维持在较低的含量水平, 两者之间的强正相关性从侧面反映出氮以有机氮形式为主 (吴丰昌等, 1996); 而磷的循环过程完全不同于碳和氮, 它属于典型的沉积型循环 (东野脉兴, 1996)。

洱海沉积物的 TOC/TN 比值总体比较稳定, 数值在 5.8~11.5 之间波动 (图 2)。TOC/N 比值是反映湖泊有机质物源的重要参数 (李小平等, 2012; 李文朝, 1997; Meyers et al., 1988)。自生来源的有机质主要是分子量较低的物质组成, 其特点是 H 和 N 的值高, TOC/N 比值低 (原子比一般小于 10); 而外源陆生植物由分子量较大的物质组成, 其特点是 TOC/N 比值高 (原子比一般大于 20) (Meyers et al., 1993)。洱海沉积物 TOC/TN 总体小于 10, 表明沉积物中有机质主要来源于藻类。

2.2 沉积物营养盐时间演化特征及与水质变化的关系

将各层的营养物水平与沉积物计年相对应, 如图 2 所示, 20 世纪 60 年代以前, TOC、TN 含量比较稳定, 波动不明显, 表现出稳定的低值: TOC 平均含量 1.45%, TN 平均含量 0.20%。一方面反映了洱海以浮游藻类为主要来源的 C 和 N 在早期成岩作用过程中更易于降解, 遭受成岩改造作用后, 进入了稳定的堆积阶段; 另一方面也反映了湖泊的初级生产力较低且稳定。而该时段沉积物 TP 含量总体上也处于较低水平, 基本上低于 $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 此阶段 TP 逐步升高的趋势主要反映了湖泊的自然演变过程。20 世纪 60 年代以后, TOC 和 TN 含量都急剧升高, 尤其在 1990 年之后呈直线上升态势,

最高值分别达到 5.8% 和 0.84%。TP 质量分数呈稳步上升态势, 但上升幅度明显低于 TOC 和 TN, 从 $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右上升至 $1345 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。沉积物中的 TP 含量呈稳步上升趋势, 有两个主要原因: 一是近年来洱海流域人类活动剧增, 年平均土壤侵蚀模数为 $64.68 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 属于强度侵蚀, 土壤侵蚀面积占总流域面积的 61.12% (王卫林等, 2015), 泥沙携带大量 P 进入湖体; 二是流域社会经济快速发展, 污染物排放量增大, 同时磷肥施用量增加, 导致大量 P 排入洱海 (倪兆奎, 2011)。

沉积物的营养物累积与水质恶化情况密切相关。郑国强等 (2004) 基于 1971—2000 年洱海水质监测数据计算的水质综合评价指数从 17 逐渐上升至 35 左右, 显示水质呈不断恶化趋势。图 3 所示为上世纪 90 年代以来洱海湖中心的水质变化情况, 由图可知, 有机污染的高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 自 1995 年起呈逐年上升趋势, 2003 年 COD_{Mn} 质量浓度达到峰值, 当年平均值是 1995 年平均值的 2 倍之多, 2008 之后在污染物总量减排措施的推动下呈趋于稳定趋势 (图 3a)。TN 质量浓度的年际变化规律类似于 COD_{Mn} , 在 1990—2000 年期间处于较好的 II 类水质, 但在 2001—2003 期间有一次跳跃式增长, 2003—2013 年区间 TN 质量浓度近似于 1990—2000 年期间的 2 倍 (图 3b)。TP 质量浓度随时间的变化趋势与 TN、 COD_{Mn} 不同, 表现为周期性升降波动, 基本在 II 类水平线上下浮动 (图 3c)。这可能与 P 在自然界中的复杂循环特征有关, 陆域流失的 P 主要以泥沙结合态 P 为主, 固态 P 随着径流进入湖体中, 大多通过泥沙沉积作用和生物作用

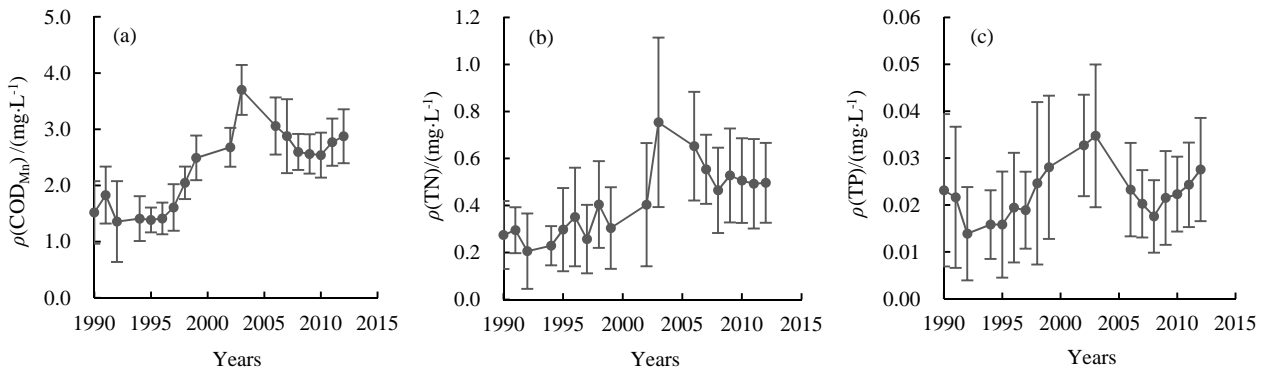


图3 洱海湖心监测点CODMn、TN和TP质量浓度的年际变化(1990—2012)

Fig. 3 The yearly variation of COD_{Mn}, TN and TP content at the central station of Lake Erhai from 1990 to 2012

直接沉积到底泥中,从而退出生态循环。当在风力、湖流及生物作用下,沉积物中的部分P又会向上层水体迁移,再次影响水质(谢平,2008)。因此,随着陆域P的不断输入,沉积物中的P质量浓度陡升,而湖水的TP质量浓度变化受到的影响因素较多,相对波动性比较大。总体来看,洱海水质随时间的变化趋势与沉积物营养盐的时间演变规律基本相同,其中氮和有机物的变化趋势高度一致。

2.3 洱海沉积物营养盐水平与其他湖泊比较

我国湖泊表层沉积物的营养盐研究分析比较常见。洱海表层(深度<20 cm)沉积物的TP质量分数为(1100±200)mg·kg⁻¹,TOC(3.00%±0.72%),TN(0.53%±0.09%)(图2),将其与云贵湖区其他湖库和东部平原湖区湖泊的监测结果进行比较(表2),可知洱海表层沉积物TN浓度水平与同在云贵湖区的抚仙湖(贫营养深水湖泊)和滇池(重度富营养化湖泊)基本相当,而TOC和TP浓度均明显低于这两个湖泊,大致为它们的30%~50%,这表明洱海沉积物对C、P仍具有较强的吸附容量及潜在缓冲能力(高佃涛,2012;焦立新等,2013)。

与东部平原湖区的湖泊相比,洱海沉积物的TN、TP浓度明显高于太湖、巢湖、鄱阳湖、长寿湖、南四湖、淀山湖以及长江中下游其他湖泊。由此可见,洱海沉积物营养盐总体已处于较高水平,其内源负荷和向上覆水体释放的潜能不容忽视。不同湖泊由于其流域的地理地质背景、人类活动强度及湖泊自身的性质(换水周期等)不同,导致各湖泊之间的表层沉积物营养盐浓度差异很大。云贵高原湖区的3个湖泊库容量大、换水周期长(抚仙湖换水周期接近200年,洱海和滇池的换水周期都在3年以上),当污染物进入湖泊后,极易滞留于湖内。东部平原湖区的浅水湖泊换水周期较短,周期最长的太湖也只有200余天,其他湖泊通常数十天,底泥营养盐累积速率可能低于洱海。此外,东部平原湖区的湖泊由于富营养化严重而大多发展成了藻型湖泊,由于藻类大量生长,且生长周期短,水体营养盐维持在较高水平,故表层沉积物中积聚的营养盐要比草型湖泊少,尽管其绝对量是增加的(薛滨等,2007)。而洱海属于草藻共存型湖泊,沉积物中TN、TP含量远高于东部平原的藻型湖。

表2 洱海表层沉积物营养盐水平与国内其他湖泊的比较

Table 2 Comparison of nutrient level in sediment among Lake Erhai and other lakes in China

湖泊 Lakes	w(TOC)/%	w(TN)/%	w(TP)/(mg·kg ⁻¹)	w(TOC)/w(TN)	文献来源 References
洱海 Lake Erhai	2.00~5.72	0.23~0.81	998~1 345	8.2~14.5	本文
抚仙湖 Lake Fuxian	3.64~10.47	0.32~0.34	1 400~1 950	6.7~64.2	王小雷等,2014
滇池 Lake Dianchi	4.0~9.0	0.19~0.32	1 488~3 979	/	彭丹等,2004; 朱元荣等,2010
太湖 Lake Taihu	/	/	292~958	/	王琦等,2006
巢湖 Lake Chao	/	/	706~936	/	温胜芳等,2012
鄱阳湖 Lake Poyang	0.42~3.17	0.03~0.24	100~940	/	王圣瑞等,2012
长寿湖 Lake Changshou	0.08~4.89	0.04~0.36	174~1 038	2.8~14.0	卢少勇等,2012
南四湖 Lake Nansi	/	0.08~0.25	336~535	/	王志齐等,2013
淀山湖 Lake Dianshan	0.23~1.49	0.05~0.22	270~1 150	<10	康丽娟,2012
长江中下游湖泊 Lakes of middle and lower reaches of Yangtze River	/	0.08~0.25	380~1 200	/	张路等,2008

“/”表示未测定

3 结论

在洱海受人类活动干扰最小的湖心区采集沉积物柱芯, 分析营养盐的垂向分布及其所对应的沉积物年代。在 Cal. AD 1960 年以前, 洱海营养盐主要受自然过程控制, 呈缓慢的富营养化趋势; Cal. AD 1960 年以来, 洱海沉积物 TOC、TN 和 TP 明显升高, 尤其在 1990 年之后呈直线陡升态势, 反映了洱海近几十年来的人为富营养化过程。沉积柱芯由底及表的 TP 含量持续稳定上升, 指示了流域 P 向湖体的迁移量在增加。

洱海沉积物 TP 与 TOC、TN 之间存在显著正相关 ($P < 0.01$), 表明 3 种污染物在沉积物中的累积具有同步性。其中 TOC 与 TN 的 Pearson 相关系数最大, 达到 0.936, 两者同源性最强。C/N 比值总体处于 10 以下, 表明沉积物中有机质主要来源于藻类。

沉积物的营养物累积过程伴随着水质变化呈不断恶化趋势。沉积物营养盐的时间演变规律与湖心水质随时间的变化趋势基本相同, 尤其是氮和有机物的变化趋势高度一致。湖水 TP 浓度变化趋势与沉积物 TP 变化趋势之间的差异性, 主要是因为陆域流失的 P 主要以泥沙结合态 P 为主, 大多通过泥沙沉积作用和生物作用直接沉积到底泥中。

洱海表层沉积物 TN、TP 浓度明显高于东部平原湖区湖泊, 其营养盐内源负荷和向上覆水体释放的潜能不容忽视。与同地区湖泊相比, 洱海沉积物 TN 浓度与抚仙湖和滇池相当, 而 TP 浓度明显低于这两个湖泊, 说明洱海沉积物对 P 仍具有一定吸附容量及潜在缓冲能力。

参考文献:

GOTTSCHALK S. 2011. EU reference conditions in Swedish lakes identified with diatoms as palaeoindicators- a review [J]. *Boreal Environment Research*, 16(6): 473-494.

HYODO M, YOSHIHARA A, KASHIWAYA K, et al. 1999. A late Holocene geomagnetic secular variation record from Erhai Lake, southwest China [J]. *Geophysical Journal International*, 136(3): 784-790.

MEYERS P A, BENSON L V. 1988. Sedimentary biomarker and isotopic indicators of the paleoclimatic history of the Walker Lake basin, western Nevada [J]. *Organic Geochemistry*, 13(4): 807-813.

MEYERS P A, ISHIWATARI R. 1993. Lacustrine organic geochemistry— an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 20(7): 867-900.

SCHINDLER D W. 2012. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes [J]. *Proceeding of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 279(1746): 4322-4333.

SHEN J, JONES R T, YANG X D, et al. 2006. The Holocene vegetation

history of lake Erhai, Yunnan province southwestern China: the role of climate and human forcings [J]. *Holocene*, 16(2): 265-276.

SMOL J. 2008. *Pollution of lakes and rivers: a paleoenvironmental perspective* [M]. New Jersey: Wiley-Blackwell.

鲍士旦. 2000. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社.

陈敬安, 万国江, 唐德贵, 等. 2000. 洱海近代气候变化的沉积物粒度与同位素记录[J]. *自然科学进展*, 10(3): 253-259.

东野脉兴. 1996. 湖泊中磷的循环与沉积作用[J]. *化工矿产地质*, 18(4): 258-262.

高佃涛. 2012. 洱海沉积物磷形态、释放通量及其生物有效性研究[D]. 南昌: 南昌大学.

国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测分析方法(第四版)(增补版)[M]. 中国环境科学出版社.

焦立新, 赵海超, 王圣瑞, 等. 2013. 2010年洱海全湖磷负荷时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 26(5): 534-539.

康丽娟. 2012. 淀山湖沉积物碳、氮、磷分布特征与评价[J]. *长江流域资源与环境*, 21(Z1): 105-110.

李青芹, 霍守亮, 咎逢宇, 等. 2010. 我国湖泊沉积物营养盐和粒度分布及其关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 29(12): 2390-2397.

李文朝. 1997. 东太湖沉积物中氮的积累与水生植物沉积[J]. *中国环境科学*, 17(5): 418-421.

李小平, 陈小华, 董旭辉, 等. 2012. 淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立[J]. *环境科学*, 33(10): 3301-3307.

卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 2012. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. *环境科学*, 33(2): 393-398.

倪兆奎. 2011. 湖泊沉积物污染历史及有机质和氮来源研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学.

彭丹, 金峰, 吕俊杰, 等. 2004. 滇池底泥中有机质的分布状况研究[J]. *土壤*, 36(5): 568-572.

沈吉. 2009. 湖泊沉积研究的历史进展与展望[J]. *湖泊科学*, 21(3): 307-313.

万国江. 1999. 现代沉积年分辨的¹³⁷Cs计年——以云南洱海和贵州红枫湖为例[J]. *第四纪研究*, (1): 73-80.

王琦, 姜霞, 金相灿, 等. 2006. 太湖不同营养水平湖区沉积物磷形态与生物可利用磷的分布及相互关系[J]. *湖泊科学*, 18(2): 120-126.

王圣瑞, 倪栋, 焦立新, 等. 2012. 鄱阳湖表层沉积物有机质和营养盐分布特征[J]. *环境工程技术学报*, 2(1): 23-28.

王卫林, 叶燎原, 杨昆, 等. 2015. 基于GIS和RUSLE的洱海流域土壤侵蚀空间特征分析[J]. *湖北农业科学*, 54(13): 3108-3113.

王小雷, 杨浩, 顾祝军, 等. 2014. 抚仙湖沉积物中营养盐和粒度垂向分布及相关性研究[J]. *环境工程技术学报*, 4(5): 353-360.

王志齐, 李宝, 胡向辉, 等. 2013. 南四湖沉积物氮磷和有机质分布特征及其相关性分析[J]. *土壤通报*, 44(4): 867-874.

温胜芳, 单保庆, 张洪. 2012. 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究[J]. *环境科学*, 33(7): 2322-2329.

吴丰昌, 万国江, 黄荣贵. 1996. 湖泊沉积物-水界面营养元素的生物地球化学作用和环境效应 I. 界面氮循环及其环境效应[J]. *矿物学报*, 16(4): 403-409.

吴功果, 倪乐意, 曹特, 等. 2013. 气候变暖 and 营养水平对洱海浮游植物

- 的长期影响(1980—2009年)[J]. 湖泊科学, 25(2): 209-212.
- 谢平. 2008. 太湖蓝藻的历史发展与水华灾害——为何2007年在贡湖水厂出现水污染事件?30年能使太湖摆脱蓝藻威胁吗?[M]. 北京: 科学出版社.
- 徐敏, 董旭辉, 羊向东. 2014. 古湖沼学研究揭示湖泊生态系统服务变化的过程[J]. 湖泊科学, 26(3): 331-339.
- 薛滨, 姚书春, 王苏民, 等. 2007. 长江中下游不同类型湖泊沉积物营养盐蓄积变化过程及其原因分析[J]. 第四纪研究, 27(1): 122-127.
- 张路, 范成新, 王建军, 等. 2008. 长江中下游湖泊沉积物氮磷形态与释放风险关系[J]. 湖泊科学, 20(3): 263-270.
- 郑国强, 于兴修, 江南, 等. 2004. 洱海水质的演变过程及趋势[J]. 东北林业大学学报, 32(1): 99-102.
- 朱元荣, 张润宇, 吴丰昌. 2010. 滇池沉积物生物有效性氮和磷的分布及相互关系[J]. 环境科学研究, 23(8): 993-998.
- 朱正杰, 李航, 任世聪, 等. 2010. 青海湖近800年来沉积物介形虫Li/Ca比值的古环境指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 30(4): 115-121.

The Vertical Distributions and Temporal Evolution Characteristics and of Nutrient Concentration in the Sediment Core at the Center of Lake Erhai

CHEN Xiaohua¹, QIAN Xiaoyong¹, LI Xiaoping², ZENG Yan³, HU Shuangqing¹

1. Shanghai Academy of Environmental Science, Shanghai, 200233, China;

2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, 200062, China;

3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002, China

Abstract: Continuous sediment records provide the possibility to study the long-term process of lake eutrophication. This study conducted an analysis on sedimentary total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), total organic carbon (TOC) and C/N ratio in the sediment core at the central area of Lake Erhai, and their historical evolution characteristics. The results indicated that, before Cal. AD 1960, the nutrient content in sediment was kept low level, with the mean values of TOC, TN and TP were 1.45%, 0.20% and 1 000 mg·kg⁻¹ respectively, which were dominated by natural process. Since Cal. AD 1960s, the contents of TOC, TN and TP in sediment ascended sharply to 5.8%, 0.84% and 1 345 mg·kg⁻¹ respectively. Specially after 1990, the growth rate of nutrient contents in sediment accelerated, reflecting the intensification of anthropogenic eutrophication in Lake Erhai in recent decades. Sediment nutrient accumulation process is accompanied by a deterioration trend of water quality. After 1990, the time evolution of nutrients in the sediment column and nutrient concentration variation over time at the center of the lake area are basically the same. There was a significant positive correlation among TOC, TN and TP in the sediments ($P=0.001$), and Pearson correlation coefficient between TOC and TN was the highest. Moreover, TOC/TN ratio of sediments in Lake Erhai is relatively stable, with values ranging from 5.8 to 11.5, indicating these nutrient indicators had high homology of algae. The nutrient concentration in the surface sediments of Lake Erhai were significantly higher than those of the lakes located in the eastern plain lake region, which indicated that release potential of nutrients in sediment of Lake Erhai can't be neglected. Compared with other lakes in the same geographical region, TN content of Lake Erhai was equivalent to those of Lake Dianchi and Lake Fuxianhu, while TP content was much lower than those of the two lakes. It can be concluded that the sediments of Lake Erhai had high phosphate adsorption capacity and buffer capacity to P input.

Key words: sediment core; nutrient; vertical distribution; temporal evolution characteristics; water quality; Lake Erhai