

三岔湖沉积物揭示的湖泊营养化进程与人类活动的关系

贾滨洋^{1,2}, 付文丽³, 于静⁴, 张聪², 唐亚^{1*} (1.四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610041; 2.成都市环境保护科学研究院, 四川 成都 610072; 3.简阳市环境监测站, 四川 成都 641400; 4.成都理工大学, 四川 成都 610051)

摘要: 在²¹⁰Pb和¹³⁷Cs定年基础上,研究了三岔湖沉积物理化性质的垂直和水平变化格局,揭示了三岔湖沉积物的特性、沉积速率、碳氮磷变化格局与人类活动和湖泊富营养化进程的关系.三岔湖不同时期沉积物的TOC、TN、TP与三岔湖水水质呈现同样的变化格局.建库初期三岔湖水水质为贫营养状态,随着人类活动的加剧,水质不断恶化.沉积物的沉积速率和碳氮磷含量的变化与人类活动密切相关,工、农、渔业、旅游业等人类活动导致三岔湖湖泊营养化进程加快.控制人类活动的强度是改善湖泊水质的关键.网箱养殖是三岔湖沉积物中磷的最重要来源,停养后沉积物中磷含量的下降将是一个相当漫长的过程.

关键词: 三岔湖; 沉积物; 富营养化; ²¹⁰Pb、¹³⁷Cs定年; 网箱养殖

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2013)09-1638-07

Relationship among sediment characteristics, eutrophication process and human activities in the Sancha Lake, Sichuan, Southwestern China. JIA Bin-yang^{1,2}, FU Wen-li³, YU Jing⁴, ZHANG Cong¹, TANG Ya^{1*} (1.College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2.Chengdu Academy of Environmental Protection, Chengdu 610072, China; 3.Environmental Monitoring Station of Jianyang City, Chengdu 641400, China; 4.Chengdu University of Technology, Chengdu 610051, China). *China Environmental Science*, 2013,33(9): 1638~1644

Abstract: Based on the ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating, the article analyzes the vertical and lateral changes in their physical and chemical features that have happened to the lake sediment in Sancha Lake in Sichuan Province, Southwestern China. It shows the changes of Sancha Lake sediment contents and deposition rates are closely related to human activities and lake eutrophication progress. The changes of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total organic carbon (TOC) concentrations in the lake sediment strongly coincide with that of Sancha Lake water quality. When the reservoir was first built, the lake water was in an oligotrophic state. As human activities increased, the water quality started to deteriorate and continued to do so. Human activities such as manufacturing, farming, fishing, and tourism have accelerated the eutrophication of Sancha Lake. The key to improve the water quality lies in limiting human activities. The most important source of phosphorus in sediment is from cage culture. It takes a very long time for the phosphorus concentration in the sediment to actually go down after such practices cease.

Key words: Sancha Lake; sediment; eutrophication; ²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs dating; cage culture

氮磷等营养盐过量输入引起的湖泊水体富营养化问题是环境学的热点问题之一^[1].水体富营养化会引起藻类及其它浮游生物的迅速繁殖,水体溶解氧下降,水质恶化,鱼类及其他水生生物大量死亡.水体中的氮、磷等营养元素来源有外源性和内源性两种,当外源性污染物得到有效控制的情况下,内源性污染物将成为水体营养物负荷的主要来源^[2],而内源性污染物主要来源于沉积物^[3-4].沉积物可以在一定条件下通过间隙水

与上覆水之间实现营养盐的交换,从而影响上覆水中营养盐的含量:它既是水体污染物的源,又是水体污染物的汇^[5-6],对湖泊富营养化具有重要的影响.此外,沉积物能够记录湖泊水体的富营养化过程^[7].通过沉积物年代学研究,可以追溯全球或区域环境演变和气候变化信息及其与人类活动

收稿日期: 2013-01-06

基金项目: 四川省环境保护厅专项资金资助(2012HB002)

* 责任作者, 教授, tangya@scu.edu.cn

的关系,区分人类活动和自然因素引起的气候变化对湖泊环境的不同影响,为湖泊环境整治和生态修复提供科学依据^[8]。 ^{210}Pb ^[9]、 ^{137}Cs ^[10]是沉积物定年应用较为广泛的年代学研究方法,适用于近现代人类活动的研究^[11]; ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 法相互印证^[12],使沉积速率的计算以及年代的确定趋于定量化、精确化,快速省时方便^[13]。四川省三岔湖位于天府新区范围内,是四川省的旅游建设重点区,但对其富营养状态及其与流域人类活动的关系还缺乏了解。本研究采用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 法对近代沉积物定年,建立三岔湖沉积物的年代学序列,分析沉积物物理化学性质的变化格局,结合流域内社会经济事件,揭示三岔湖的富营养化进程及其与人类活动的关系,为以后的湖泊治理指明方向。

1 材料与方法

1.1 样品采集

三岔湖于1977年在绛溪河上筑坝成湖,是四川省第二大人工湖泊,为丘陵湖泊型水库,紧邻成都市东南部,为中亚热带湿润性季风气候。2010年6月和9月对三岔湖表层沉积物进行了两次采样,按均匀布点的原则在湖中布设了30个采样点(图1),用重力采样器(型号:ZH7690)采集表层(0~5cm)沉积物样,每个采样点采集四次,所采样品在现场立即均匀混合成一个样品,然后装入洁净聚乙烯塑料袋;所有样品运回实验室低温(4℃)保存。样品在冷冻干燥机(型号:Eppendorf 5804R)上干燥后,用玻璃棒压散,剔除石砾及动植物残体等杂质,四分法取其1/4作测试样品,经玛瑙研钵研细过200目尼龙筛后,储于聚乙烯瓶中。

沉积湖芯物柱状样的采集选在三岔湖内沉积环境较稳定的中部区域,2010年7月用ZH7690型重力采样器获取柱状湖泊沉积物岩芯42cm,采样点水深24m,采样点位置:30°17'58.682"N,104°16'29.038"E。柱状样品按1cm间隔分样。所有样品低温冷藏后带回实验室,按上述方法操处理后备用。

1.2 样品处理和分析

1.2.1 沉积物的分析方法 沉积物的颜色为肉眼观察,气味用鼻嗅,pH值用pH计测定(型

号:SDT-300),氧化还原电位采用便携式OPR测定仪(型号:OPR-411)测定。含水率用烘箱测定,烧灼率采用马弗炉测定。年代测定在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室完成。 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 测定采用EG&G Ortec公司生产高纯锗低本底 γ 谱分析系统,标准源及活度标定由中国原子能研究院提供。样品密封于样品瓶3周,使其达到放射性平衡,然后分别用46.5和661.6keV的 γ 能谱测量 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 的比活度,测量误差小于5%,采用CRS(恒定放射性通量模式)法定年^[14]。总有机碳(TOC)用岛津TOC-VCPN元素分析仪测定,总氮(TN)采用碱性过硫酸钾氧化法测定,总磷(TP)采用紫外分光光度法测定。

1.2.2 测试结果的数据处理 数据用SPSS 13.0处理,异常值通过统计检验剔除,各种数据的相关性分析采用Pearson相关系数的双尾检验进行。图形制作在Origin8.1和Arcgis9.3中完成。

1.3 沉积物厚度和分布范围的测量

利用HydroBoxTM精密水下回声测深仪测量三岔湖沉积物的厚度和分布范围。测量时测船在三岔湖内呈“之”字型前进,采用GPS测量定位,并利用重力采样仪对测船所经路径进行随机采点测深,与相同位置测深仪声纳系统采集数据相比,误差介于1~2m,因此可认为所测数据是准确的。

2 结果与讨论

2.1 三岔湖沉积物基本理化特性及其对内源污染释放的影响

除东风渠北干渠入三岔湖处的沉积物颜色呈黄褐色、无特殊气味外,其它所有点位的沉积物颜色均为黑色,有恶臭气味。沉积物表层(0~5cm)的平均含水率最高,在78%~87%之间,为黑色流塑状;向下含水率逐渐减小,至底部减至50%。沉积物的烧灼率平均值为13.3%,说明沉积物中含有大量的有机质。丰富的有机物利于微生物的繁殖,微生物能够大量分解有机物,引起氨态氮等营养元素的大量释放^[15],这是水体富营养化重要的潜在影响因子。

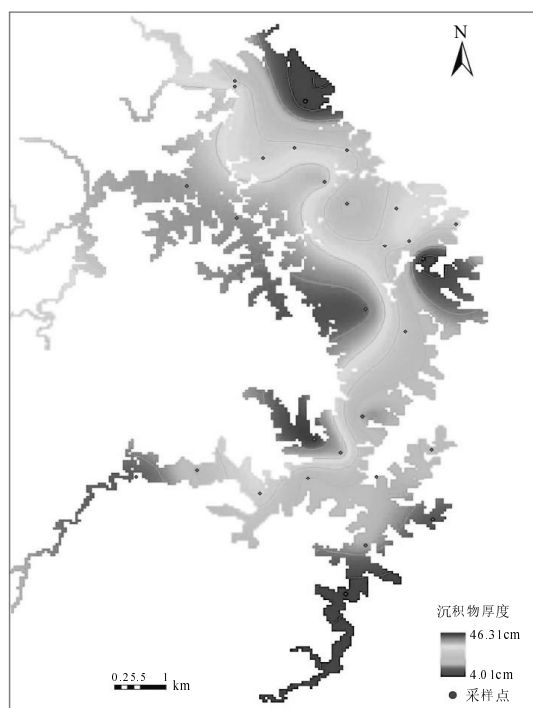


图1 采样点与三岔湖沉积物厚度

Fig.1 Sampling points and sediment thickness in the Sancha Lake

除东风渠北干渠入湖处的沉积物外,其它湖区的沉积物均处于强还原环境,氧化还原电位在 -54mV ~ -239mV 之间(图2),说明沉积物中不含或含极微量游离氧和其它强氧化剂,而富含大量有机残体等还原性物质.在自然水环境中,沉积物中有机质的分解会消耗水环境中的溶解氧,使底层水处于厌氧环境.而厌氧状态可促进磷在沉积物中的迁移和释放^[16],严重时还会引发泛库事件^[17].

pH 值是沉积物的重要性质,直接影响底质磷的释放和铁、锰等金属的赋存形态.研究表明 pH 值过高和过低都会增加磷的释放,只有 pH 值接近中性时底质磷的释放比较困难^[18-19].三岔湖表层沉积物(0~5cm)以微碱性为主,其中 pH 值最大值为 8.3,最小值为 7.3.在此条件下,沉积物中的铁磷不容易释放出来.

内源污染释放还受微生物、温度等环境因子的影响^[20].微生物活动有利于沉积物中 P 向水体释放,细菌分解的直接结果是加快了溶解氧的消

耗,同时微生物可把沉积物中有机态磷转化、分解成无机态磷,把不溶性磷转化成可溶性磷^[21].由于温度升高会增加沉积物中微生物和生物的活动,促进生物扰动、矿化作用和厌氧转化等过程,导致间隙水耗氧作用加强,使表层沉积物呈还原状态,促使 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,加速磷酸盐的释放,因此温度升高有利于沉积物释磷^[22].

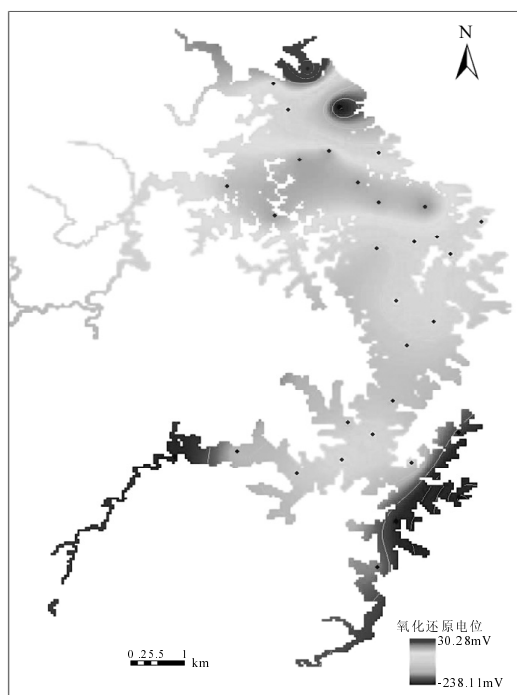


图2 三岔湖表层沉积物(0~5cm)氧化还原电位分布

Fig.2 Redox potential of surface sediments (0 ~ 5cm) in the Sancha Lake

2.2 沉积物的沉积速率与人类活动的关系

根据 ^{210}Pb 测量计算结果,结合 ^{137}Cs 时标,采用恒定放射性通量模式(Constant Rate of Supply, CRS)^[23-24]建立了三岔湖沉积物年代序列,并计算了三岔湖沉积速率(图3).根据年代分析可以得出^[25],样品底部为 1952 年,31cm 处约为建库年代(1977 年),25cm 处为 1990 年,12cm 处为 2005 年,样品顶部为 2010 年.沉积物沉积速率为 $0.24\sim 4.67\text{cm/a}$,质量累积速率为 $0.12\sim 0.67\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{a})$.从 1977 年建库以来,沉积速率逐渐增大,在 2009 年达到顶峰 (4.67cm/a).

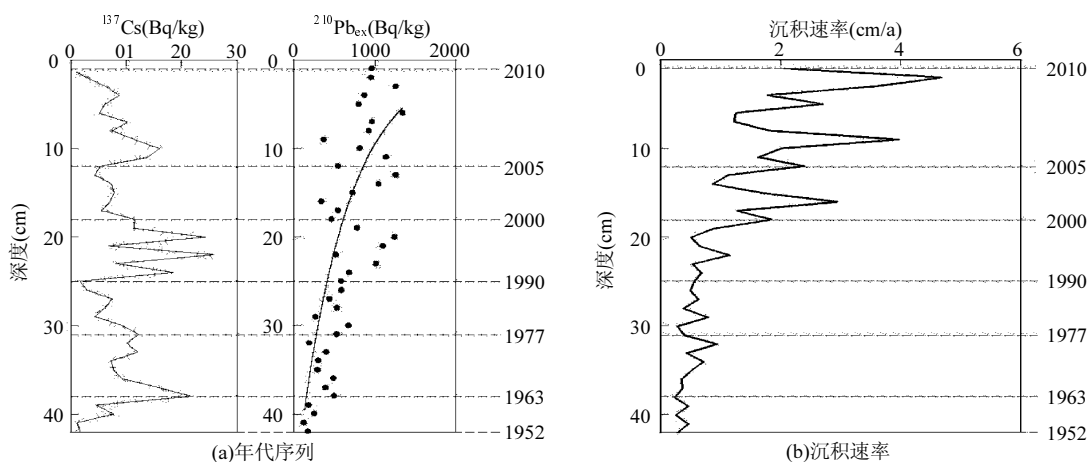


图3 三岔湖沉积物年代序列和沉积速率

Fig.3 Vertical distribution of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ of lake core and sedimentation rate in the Sancha Lake

三岔湖沉积速率的变化与人类活动密切相关.在三岔湖刚建库时,该区域处于自然格局状态,流域内几乎全部为农业(产值约 1000 万元,可比价,下同),总人口约为 7 万,湖水清澈,水质良好^[26-27],沉积速率低.改革开放以后,经济快速发展,三岔湖流域内人口增长较快,旅游业、工业、农业和渔业快速发展.2009 年,总人口为 11.6 万人,生产总值达到 56282 万元,其中农业产值 45379 万元,工业产值 167 万元,第三产业产值 10736 万元,第三产业中旅游业产值约占 50%^[28].但整个流域内污水处理等基础配套工程少,工农渔业等产生的废弃物未经处理或只经简单处理(以化粪池为主)即直排入湖.此外,流域内森林覆盖面积一度由建国初的 20%下降至 1996 年的 4.6%,水土流失加剧,而农药、化肥施用量逐年增加^[26-28],使得三岔湖沉积速率急剧增大.

网箱养鱼对沉积物养分含量有重要影响.从 1990 年左右开始,三岔湖开始发展网箱养鱼,养殖面积逐年增长,到 2005 年达到 7290 箱,面积 378 亩,超过规定标准(《淡水网箱养鱼通用技术要求》(SC/T1006-1992))的 10 倍以上.网箱养鱼的污染物负荷与湖区网箱养鱼年产量和饵料有关^[29],鱼的大量代谢物和排泄物沉积到湖底,成为重要的有机质污染物来源^[30].我国饲料普遍存在悬浮性、保形性较差的缺点,没有被鱼摄食的饲料颗粒及粉末均沉入库底.加上许多网箱饲喂技术水平低,超量投喂饲料,投饲

前没有筛选饲料粉末等技术失误,更多的残余饲料沉积到湖库底部.据估算,2000~2009 年网箱养鱼造成的污染负荷平均约为磷 46.5t/a,氮 324t/a^[25].由于污染物的长期积累,三岔湖在特定环境条件下于 1996 年和 2009 年爆发了泛库事件^[17,31].

2.3 沉积物对三岔湖富营养化历程的记录

通过走访当地居民和对监测资料的分析,三岔湖建库初期水质为贫营养状态,水体透明度可达十几米;随着人类活动的加剧,水质不断恶化,透明度降低,水体呈富营养化状态:1991 年全湖 TP 为 0.05mg/L、TN 为 0.5mg/L,2000 年为 0.16mg/L 和 1.37mg/L,2009 年为 0.09mg/L 和 2.31mg/L(资料来源:简阳市环境保护局).

沉积物中 TOC、TN、TP 及 C/N 随深度变化,结合沉积物放射性测年可以揭示沉积物中碳氮磷随时间的变化格局,从而反映出三岔湖富营养化历程.沉积物中 TOC、TN、TP 在水平方向的变化则可反映湖泊不同区域自然条件和人类利用方式的差异.

2.3.1 垂直分布 从图 4 可以看出,TP、TN 和 TOC 变化趋比较接近,从 1977 年建库到 1990 之间 3 种污染物只有小幅增加,增幅分别为 29.6%、38.7% 和 21.3%;而在 1990 年之后三者迅速增加,至 1996 年前后含量分别为 9.33mg/g、2.16mg/g 和 18.4mg/g,增幅分别达到 426%、370% 和 353%;1996 年之后三者有所下降,但 2000 年后又开

始迅速增加,至 2005 年前后达到顶峰,此时 TP、TN 和 TOC 含量分别达到 16.8mg/g、3.6mg/g 和 29.9mg/g,这一阶段增幅达到 359%、157%和

225%;2005 年之后 3 种污染物又开始下降,至 2010 年含量稳定在 1.46~2.68mg/g、1.2~2.6mg/g 和 9.6~17.1mg/g 之间。

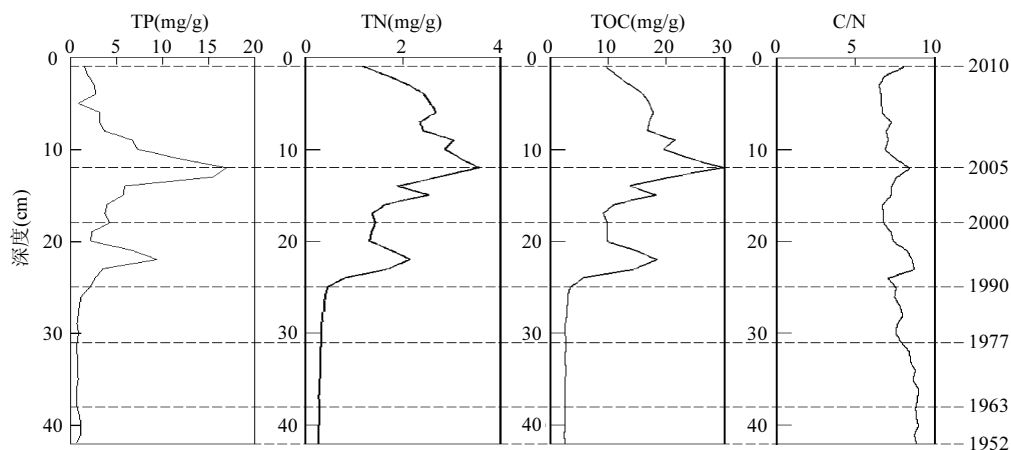


图 4 沉积物中 P、N、C 垂向分布

Fig.4 Vertical distribution of TP, TN, TOC and C/N ratio of sediments in the Sancha Lake

三岔湖沉积物中碳、氮、磷的变化格局反映了不同时期营养盐的不同来源,来源与工业、农业、旅游业和渔业等人类活动相关.从三岔湖营养盐在不同年代的变化格局,结合对三岔湖区社会经济的调查结果推测,在三岔湖建库之前,人为活动影响较小,湖区自然环境良好,湖泊环境主要呈自然沉积状态,沉积物中营养元素较低,而且保持着稳定的状态;从 1990 年代开始,区域人口增加,旅游业、工业和农业发展很快,废水、农药和化肥使用量大大增加,加上从 1990 年开始逐步增长的网箱养鱼,外源物质输入对三岔湖的影响较大,大量的氮、磷输入湖泊,增加了湖泊的初级生产力,沉积物中碳、氮、磷第一次高速增加;2000 年以后湖区网箱养殖业和旅游业得到进一步发展,养殖过程中产生大量的残饵、排泄物和粪便等直接进入水体,除部分被浮游生物利用外,绝大部分最终进入沉积物中累积下来,当浮游生物死亡后,最终也进入沉积物中;除此之外,由于缺乏排水管网和污水处理设施,旅游和生活污水未处理或仅简单处理便直接排入三岔湖.上述这些原因都使输入三岔湖的营养盐大为增加,至 2005 年达到顶峰.2005 年之后,随着网箱养殖被取缔和民众环保意识的提高,碳、氮、磷的输入量逐渐

减少.

沉积物的 C/N 反映了陆地植物(外源)和水生生物(内源)对沉积物中有机质含量贡献的相对大小.若陆地植物对有机质含量的贡献相对增大,或水生生物的贡献相对减小,则 C/N 增高;反之,则 C/N 减低.除 1996 和 2005 年外,三岔湖沉积物的 C/N 从上至下变化不大,一直稳定在 6.49~8.94 之间(图 4),说明沉积物的来源一直较为稳定,以湖泊自生为主.由此推断,三岔湖中外源营养盐可能主要以无机态形式输入^[32],这与作者所进行的沉积物中磷的形态分析结果相符.无机态的营养盐被湖泊浮游植物利用后,增加了初级生产力,从而使得沉积物中有机质的增加主要表现为内源作用.

2.3.2 水平分布 三岔湖沉积物平均厚度为 0.26m,沉积物蓄积量为 $7.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (图 1).全湖沉积物厚度分布不均匀,表现为湖区中西部较厚,最大处沉积物厚度可达 0.46m.沉积物厚度与水体中的初级生产力以及人类活动有很大关系,一般认为人类活动较为剧烈的地方沉积物较多.在三岔湖中西部,湖湾多,是网箱养殖密集湖段,养殖过程中产生的残饵、排泄物和鱼类残体落入湖底沉积下来,增加了沉积速率,而且还增加了营养物

质,从而使得这片湖区的富营养化状态较为严重;此外,这一区域纵横交错的湖湾也不利于湖水流

动和交换,不利于污染物扩散和降解,这也加大沉积物的沉积速率。

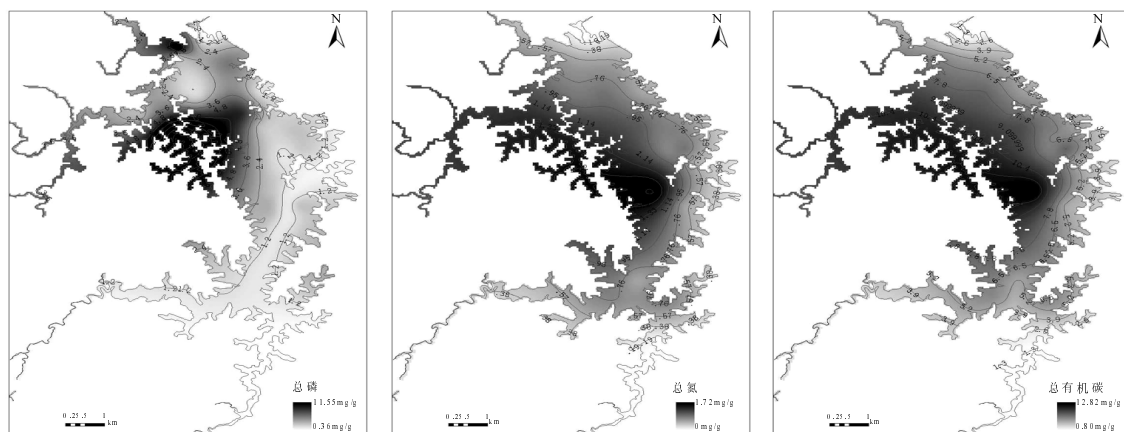


图5 沉积物表层中 TP(左)、TN(中)、TOC(右)的变化

Fig.5 Spatial variation of TP (left), TN (middle) and TOC (right) of sediments in the Sancha lake

沉积物中碳、氮、磷含量的水平分布特征(图5)与沉积物厚度分布相似,都是西部网箱养殖密集区域含量较高(P 的分布更为集中),说明在渔业养殖过程中有大量营养盐类输入。由于 P 没有类似 C、N 的大气储存库,也没有类似反硝化的机制使其形成短时期内的 P 循环,因此水利条件对 P 的迁移转化至关重要^[33]。在这一区域的湖湾多,不利于水流运动,使 P 分布不均匀,容易进入沉积物中而长期积累。因此,相对于氮元素,水体的富营养化进程会对磷的沉积产生明显的影响。三岔湖沉积物中磷主要以无机磷为主,占总磷的 70%^[34],而且网箱养殖集中区域呈现明显的 P 累积现象,这证实磷主要来源于网箱养殖。在养殖过程中只有 10%的氮和 7%的磷能够被利用,其它都以各种形式进入到环境中,大部分沉积下来^[30],使网箱区沉积物中的 P 远高于无大量外源磷的对照点^[34]。沉积物中 Fe-P/Ca-P 的比值在网箱养殖(投饵)区要明显高于邻近的非网箱养殖区^[34],可能是易引起富营养化的养殖废水间接地促进了磷酸盐在铁/铝的氢氧化物/氢氧化物上的结合与吸附^[35]。养殖时间越长,沉积物中磷的累积越明显;而结合态的磷不容易释放出来,所以停养后沉积物中磷含量的下降是一个相当长的过程。

3 结语

三岔湖沉积物的性状与分布揭示了湖泊营养化进程与人类活动的关系;同时,沉积物富含有机质,是水体富营养化重要的潜在影响因子。三岔湖不同时期的沉积物的 TOC、TN、TP 与三岔湖水质呈现同样的变化格局。三岔湖沉积物沉积速率和分布与三岔湖建库以来的社会经济发展水平和人类活动强弱呈正相关。网箱养殖是沉积物中磷的最重要来源。

要减缓甚至阻断湖泊富营养化进程的关键是控制人类活动的强度,使其与水环境承载力相一致,必须坚决取缔超过湖泊水环境容量的渔业养殖活动,尽快完善流域内的环保基础设施,改进农业生产方式,减少农药化肥等的施用量,湖区的旅游开发要控制在合理的范围内。

参考文献:

- [1] Istvánovics V. Eutrophication of lakes and reservoirs [J]. Encyclopedia of Inland Waters, 2009:157-165.
- [2] 金相灿,刘树坤,章宗涉,等.中国湖泊环境(第一册) [M]. 北京:海洋出版社,1995.
- [3] Webb J S, Fortescue J I, Nichol I. Regional geochemical reconnaissance in the Namwala Concession area, Zambia [M].

- London: Geochemical Prospecting Research Centre, 1964.
- [4] Thomson L. Applied Environmental Geochemistry [M]. London: Academic Press, 1983.
- [5] Forstner U, Wittmann G T. Metal Pollution in the Aquatic Environment [M]. Berlin and New York: Springer-Verlag, 1978.
- [6] 叶常明.多介质环境污染研究 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1997.
- [7] 杨 洪,易朝路,谢 平,等.人类活动在武汉东湖沉积物中的记录 [J]. 中国环境科学, 2004,24(3):261-264.
- [8] 贾滨洋,吴艳宏,伍 碧.湖泊沉积物的年代学研究方法在环境科学中的应用 [J]. 环境保护前沿, 2013,3(1):1-10.
- [9] 段凌云,王 张,李茂田,等.长江口沉积物 ^{210}Pb 分布及沉积环境解释 [J]. 沉积学报, 2005,23(3):514-521.
- [10] Appleby P G, Jones V J, Ellis-Evans J C. Radiometric dating of lake sediments from Signy Island (Maritime Antarctic): evidence of recent climatic change [J]. Journal of Paleolimnology, 1995, 13(2):179-191.
- [11] 叶崇开. ^{137}Cs 法和 ^{210}Pb 法对比研究鄱阳湖近代沉积速率 [J]. 沉积学报, 1991.9(1):106-113.
- [12] 王永红,沈焕庭.河口海岸环境沉积速率研究方法 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002,22(2):115-120.
- [13] Ritchie J C, McHenry J R. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review [J]. Journal of Environmental Quality, 1990,19(2):215-237.
- [14] 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 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009,29(6):89-94.
- [15] 范成新,杨龙元,张 路.太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析 [J]. 太湖科学, 2000,12(4):359-367.
- [16] Kamiya H, Ishitobi Y, Inoue T, et al. Effluxes of dissolved organic phosphorus (DOP) and phosphate from the sediment to the overlying water at high temperature and low dissolved oxygen concentration conditions in an eutrophic brackish lake [J]. Japanese Journal of Limnology, 2001,62(1):11-21.
- [17] 张善忠.网箱养鱼泛库和防治方法 [J]. 水利渔业, 2000, 20(1):33-34.
- [18] Kim L H, Choi E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments [J]. Chemosphere, 2003,50:53-61.
- [19] 金相灿,王圣瑞,庞 燕.太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响 [J]. 中国环境科学, 2004,24(6):707-711.
- [20] Gachter R, Meyer J S, Mares A. Contribution of bacteria to release and fixation of phosphorus in lake sediments [J]. Limnology and Oceanography, 1988,33(6):1542-1558.
- [21] 刘玉生,邹 兰,郑丙辉.光照、温度和藻类对底泥释放磷的影响 [J]. 环境科学研究, 1992,5(2):41-44.
- [22] Gonsiorczyk T, Casper P, Koschel R. Variations of phosphorus release from sediments in stratified lakes [J]. Water Air & Soil Pollution, 1997,99(1-4):427-434.
- [23] 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.
- [24] Appleby P G, Richardson N, Nolan P J. Self-absorption corrections for well-type germanium detectors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1992,71(2):228-233.
- [25] Jia Binyang, Tang Ya, Wu Yanhong, et al. Driving effect of human activity on the environmental change of the Sancha Lake [A]. //2012 International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology (ICBEB)[C]. Macao, 2012:1361-1366.
- [26] 三岔区志领导小组编.简阳县三岔区志(内部资料) [Z]. 1986.
- [27] 简阳县水利电力局.简阳县水力电力志 [Z]. 1988.
- [28] 简阳市统计局.简阳市统计年鉴 [Z]. 1990-2010.
- [29] 王福表.网箱养殖水污染及其治理对策 [J]. 2002,26(7):24-26.
- [30] Funge-Smith S J, Briggs M P. Nutrient budgets in intensive shrimp ponds: Implications for sustainability [J]. Aquaculture, 1998,164(1-4):117-133.
- [31] 张守帅.三岔湖“退渔”之变 [N]. 四川日报:成都, 2009-11-23(10).
- [32] 范成新,王春霞.长江中下游湖泊环境地球化学与富营养化 [M]. 科学出版社, 2007.
- [33] Anderson J M. Nitrogen and phosphorus budgets and the role of sediments in six shallow Danish Lakes [J]. Archive fur Hydrobiologie, 1974,74:527-550.
- [34] Jia Binyang, Tang Ya, Zhan Yan. Characteristics of phosphorus in sediments of Sancha Lake in Sichuan province and their relationship with human activity [A]. //International Conference on Earth Science and Environmental Protection (ICSEEP)[C]. 2013.
- [35] 王文强,韦献革,温琰茂,哑铃湾网箱养殖对表层沉积物的污染 [J]. 热带海洋学报, 2006,25(1),56-60.

致谢: 本实验本文在写作过程中得到黄仁豪、夏威夷、王琴、尹德生、罗鸿兵、石有香、艾晓艳等的帮助,谨此一并致谢。

作者简介: 贾滨洋(1971-),女,四川泸州人,高级工程师,主要从事环境规划和环境生态学研究.发表论文近 20 篇。