

红枫湖水库底质污染物富集现状分析

叶 锋^{1,2}, 张明时¹, 刘汉林¹, 李秋华¹

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州 贵阳 550001 ; 2. 贵州师范大学生命科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘要 通过测定红枫湖水库底质样品中有机碳、总氮、总磷、氨态氮、有机氮和亚铁的含量, 对红枫湖水库底质与湖泊富营养化的关系进行了评价分析。结果表明: 有机质质量比平均值为 38.43 g/kg, 含量丰富; 总磷质量分数平均值为 0.140%, 含量高且在湖中各点差异明显; 湖泊底质氮质量分数为 0.574%, 总体偏高; 总有机碳和总氮的相关系数 $r_1 = 0.219$ ($p > 0.05$), 相关性不显著, 有机碳与总磷的相关系数 $r_2 = 0.809$ ($p < 0.01$), 具有显著相关性; 底质有机指数较高; 底质中碳氮比值表明其中的有机质主要来源于藻类等浮游生物, 总氮和总磷主要来源于外源污染物的排入。

关键词 底质; 有机碳; 总氮; 总磷; 富营养化; 红枫湖水库

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2010)03-0008-05

Analysis of organic enrichment in the sediment of Red Maple Lake Reservoir

YE Feng^{1, 2}, ZHANG Ming-shi¹, LIU Han-lin¹, LI Qiu-hua¹

(1. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China ; 2. School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract : By means of measuring the content of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen, organic nitrogen, and ferrous in the sediment of Red Maple Lake Reservoir, the relationship between the sediment and eutrophication was evaluated. The results showed that the average mass ratio of organic matter was 38.43 g·kg⁻¹, quite a high ratio; the average mass ratio of TP was high at 0.140%, and its value was significantly different at different monitoring sites of the lake; the average mass ratio of the nitrogen content in the sediment was 0.574%, and it was on the high side overall; the correlation coefficient between total organic carbon and total nitrogen was $r_1 = 0.219$ ($p > 0.05$), which was a not significant correlation, but there was significant correlation between total organic carbon and total phosphorus, with a correlation coefficient $r_2 = 0.809$ ($p < 0.01$); the organic index of the sediment of Red Maple Lake Reservoir was high; and the carbon-nitrogen ratio in the sediment implied that the organics were mostly input from plankton such as algae, which would mean that TN and TP mainly come from extrinsic pollutants.

Key words : sediment; organic carbon; total nitrogen; total phosphorus; eutrophication; Red Maple Lake Reservoir

红枫湖水库位于贵州省贵阳清镇市、平坝县和安顺市西秀区境内, 地理坐标为北纬 26°26' ~ 26°35'、东经 106°19' ~ 106°28', 属于长江中上游乌江水系。流域面积 1596 km², 水面面积 57.2 km², 湖泊长度 16 km, 湖泊平均宽度 4 km, 最大水深 45 m, 平均水深 10.52 m, 是贵州省最大的高原深水人工河道水

库, 也是贵阳市最重要的饮用水源。红枫湖水库由北湖、南湖及后湖组成, 北湖湖底地形、地势复杂多变, 高低起伏变化大。南湖湖底地形更趋复杂, 湖面狭长, 湖内岛屿及半岛星罗棋布, 湖岸线蜿蜒曲折。后湖在地形上被山体与南湖分隔, 由山体中地下溶洞与南湖连为一体, 其湖面狭小, 不足全湖的 1/10。

基金项目: 国家自然科学基金(20367002), 贵州省贵阳市科技局项目([2007] 筑科农合同字第 21 号)

作者简介: 叶锋(1979—), 男, 陕西安康人, 硕士研究生, 研究方向为水环境化学。E-mail: yefeng@163.com

通讯作者: 张明时(1950—), 男, 吉林长春人, 教授, 硕士, 主要从事水环境化学和色谱分析。E-mail: zhangmingshi@163.com

随着人口数量的增加、工农业的发展以及城市化进程的加剧,红枫湖水库沿库地区入库污染负荷逐年增加,导致库区水体和底质中的污染物不断累积,水体富营养化程度日趋严重,生物种群单一化趋势明显,生态系统正日益退化。自1994年以来“黑水”、“网箱缺氧死鱼”以及严重的“水华”现象等水质事故连年发生,库区水质由建库初期的Ⅱ~Ⅲ类降到Ⅴ类,甚至劣于Ⅴ类。日趋恶化的水环境质量使其丧失了应有的水域功能^[1]。

作为水库、湖泊等水体的三大环境要素之一,底质是水库、湖泊调查研究的重要内容之一。底质作为水库、湖泊的内污染源早已为人们所认识^[2-5]。因为进入湖泊水体的营养性污染物相当一部分经过各种物理、化学和生物过程在底质中累积起来。即使在外源污染得到控制的条件下,底质中蓄积的污染物质也会向上覆水中产生释放,而底质中氮、磷等营养性污染物的释放,会促进水体中藻类的大量繁殖,使水体呈现富营养化态势。因此,底质中的营养盐对水库、湖泊富营养化有很大影响^[6-9]。

本文通过分析红枫湖水库底质中有机质、总氮、总磷的分布及相关特征,综合考虑了沉积物的含量和化学行为以及沉积物的释放条件,评价了底质中有机质及营养盐的污染程度,分析了底质污染物来源及形成的原因,可为红枫湖水库进一步开展污染治理工作提供依据。

1 采样及分析方法

1.1 采样点布置原则

采样点采用GPS系统精确定位,基本按每1 km×1 km网格范围密度布设,并在河流出、入湖口及污染较严重区域局部加密布设。后湖由于受人为干扰影响较小,因此只在后湖设置1个采样点。整个湖区共布设有代表性的采样点16个,具体位置见图1。



1—贵州化肥厂;2—冶炼厂;3—大坝;4—水上运动中心;5—羊昌河口;6—杨家关;7—五七农场;8—将军湾;9—高关;10—喀罗农场;11—凹力;12—小岩坡;13—后午;14—花鱼洞大桥;15—红枫湖管理处;16—后湖

图1 红枫湖采样点分布

1.2 采样方法

采用彼得森采泥器采集湖底表层5 cm的淤泥,除去表面的大块异物后,装入干净的塑料袋中^[10]。带回实验室之后,将样品分为新鲜样和风干样进行处理。新鲜样放置于4℃冰箱中保存,风干样的制备需要先将新鲜样在自然条件下晾干,碾碎后过20目筛,以四分法萃取,留够分析用量,碾碎过100目筛,装瓶备用。

1.3 底质分析项目与分析方法

参照《湖泊富营养化调查规范》^[10],选择的指标为:含水率(烘干法)、pH值(pH计)、亚铁(邻菲罗啉分光光度法)、总氮(过硫酸钾氧化-紫外分光光度法)、总磷(钼锑抗分光光度法)、氨氮(纳氏试剂光度法)、有机氮(高氯酸-硫酸消化法)、有机碳(重铬酸钾法)。

1.4 数据统计分析方法

试验数据均运用Excel2003和SPSS16.0 for Windows程序进行处理。

2 监测结果

2.1 理化指标监测结果

从表1可以看出,红枫湖水库底质含水率在2.9%~5.0%之间,以后午采样点的含水率最高,而将军湾采样点的含水率最低,各点的含水率相差较大,说明各个采样点表层沉积物具有较大的不稳定性。红枫湖水库具有典型季节性水体分层,沉积物与上覆水体间常常以透明的胶质为界面^[11]。夏季分层期间,受温度变化等环境外力影响,底质与上覆水体间的胶质界面受到破坏后底质易发生再悬浮而污染水体。底质呈中性(pH值6.5~7.5)或者微碱性(pH值7.5~8.5)。亚铁质量浓度基本上都在70~85 mg/L之间,含量较高且整体分布比较均匀。亚铁是浮游植物利用氮、磷合成叶绿素和细胞代谢的必需元素,在水体中起着重要的“生物泵”作用,也是限制浮游植物生长的主要因素之一^[12]。

2.2 总氮富集现状

从表1可以看出,红枫湖水库底质总氮质量分数在0.425%~0.809%之间,平均为0.574%。在16个采样点中,所有样点总氮含量丰富,其中最大值出现在贵州化肥厂(质量分数为0.809%),高出湖泊底质总氮含量丰富标准值0.15%^[11,13]近5倍,最小值出现在后湖(质量分数为0.425%),也远远高出湖泊底质总氮含量丰富标准值。由此可知,红枫湖水库底质中总氮含量是非常丰富的。

2.3 总磷富集现状

底质总磷含量丰富的标准值为0.15%,含量中

表 1 红枫湖底质指标监测结果

采样点	含水率/%	pH 值	亚铁质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总氮 质量分数/%	有机氮 质量分数/%	氨态氮 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总磷 质量分数/%	有机碳 质量分数/%
贵州化肥厂	4.6	6.5	82.1	0.809	0.804	50.63	0.181	1.978
冶炼厂	3.5	7.4	79.9	0.567	0.566	6.08	0.132	1.847
大坝	3.1	7.3	80.5	0.604	0.602	31.24	0.144	3.306
水上运动中心	4.4	6.8	76.4	0.587	0.587		0.120	1.733
羊昌河河口	4.1	7.0	79.6	0.701	0.697	43.51	0.184	2.260
杨家关	4.6	7.0	81.2	0.699	0.698	4.06	0.151	1.987
五七农场	3.9	7.6	83.3	0.512	0.500	23.14	0.132	2.453
将军湾	2.9	7.8	39.1	0.429	0.428	10.17	0.087	1.276
高关	3.0	7.6	69.5	0.508	0.517	11.24	0.098	1.320
淳罗农场	3.4	6.9	77.6	0.488	0.484	18.87	0.103	1.540
凹力	4.7	6.8	78.8	0.574	0.573	7.80	0.178	2.978
小岩坡	4.5	7.4	69.5	0.551	0.549	10.84	0.169	3.204
后午	5.0	7.2	83.3	0.620	0.617	29.76	0.215	4.234
花雨洞大桥	3.9	7.3	78.2	0.561	0.558	32.35	0.143	2.262
红枫湖管理处	4.2	7.4	81.8	0.543	0.542	11.14	0.130	2.088
后湖	3.0	7.5	40.4	0.425	0.424	9.82	0.088	1.198

等的标准值为 0.075% ,含量缺乏的标准值为 0.07%^[11,13]。从监测结果(表 1)可以看出,红枫湖水库全库的总磷质量分数在 0.087% ~ 0.215% 之间,平均为 0.140%。16 个采样点中有 6 个采样点的值高于总磷含量丰富标准值,分别是贵州化肥厂(质量分数为 0.181%)、羊昌河河口(质量分数为 0.184%)、杨家关(质量分数为 0.151%)、凹力(质量分数为 0.178%)、小岩坡(质量分数为 0.169%)和后午(质量分数为 0.215%)。大坝、红枫湖管理处等 7 个采样点总磷含量接近丰富标准值。总磷含量最低在将军湾采样点,质量分数仅为 0.087%。在红枫湖水库采集到的全部底质样品中,后午库区底质中总磷平均质量分数为 0.215%,远高于全库平均值 0.140%。红枫湖水库底质研究中的单个样品总磷含量最高值出现在后午湖区(质量分数为 1.002%)。同时红枫湖水库底质总磷含量最大值为最小值的 2.47 倍,说明红枫湖水库底质总磷含量高而且分布存在较大的空间差异。

2.4 有机碳富集现状

有机碳是水库、湖泊底质的主要理化性质指标,它的含量与底质中氮、磷含量密切相关。从表 1 可知,红枫湖水库底质总有机碳质量分数在 1.198% ~ 4.234% 之间,平均为 2.229%,最高值出现在后午湖区,为 4.234%。有机碳和有机质之间存在着以下的换算关系:有机质含量为总有机碳储量乘以 1.724,其中 1.724 为经验常数^[13]。由此可得红枫湖水库底质有机质质量分数为 2.065% ~ 7.299%,平均值为 3.843%,即质量比 38.43g/kg,可以看出,红枫湖水库底质的有机碳和有机质含量均比较高。根

据水体底质有机污染评价标准^[14],红枫湖水库全部 16 个采样点均受有机质污染,其中重污染的有 1 个,为后午采样点,中污染 3 个,为大坝、凹力、小岩坡采样点,其余 12 个采样点中有 6 个采样点为轻污染,有机质检测值评价为未受污染的采样点有 6 个,但是有机质含量均接近未受污染最大值 34,表明底质也受到了一定程度的有机污染。

2.5 总氮、总磷与有机质的相关性

图 2 反应了总有机碳和总氮、总磷的关系,利用 SPSS.16 统计软件分析得出总有机碳和总氮的相关系数 $r_1 = 0.219$ ($p > 0.05$),相关性不显著,而有机碳与总磷的相关系数 $r_2 = 0.809$ ($p < 0.01$),具有极显著的相关关系。这说明红枫湖水库有机碳与总磷的含量变化存在着相互关系。采用有机指数法对红枫湖水库底质肥力状况进行评价,底质有机指数等于有机质和有机氮含量的乘积。由底质肥力评价分级

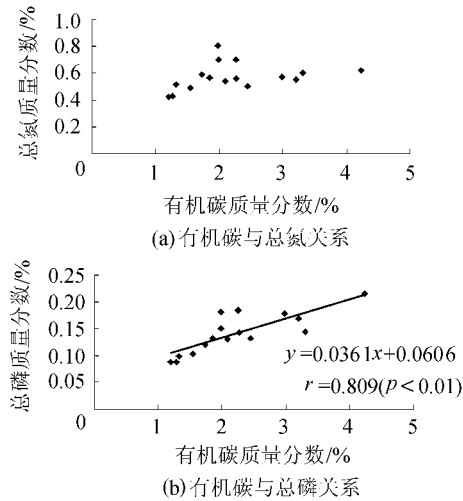


图 2 有机碳与总氮、总磷关系

标准可知,当有机指数小于 0.03 时为Ⅰ级(贫清洁),介于 0.03~0.05 之间时为Ⅱ级(中清洁),而大于 0.05 时为Ⅲ级(肥污染)^[13,15]。通过计算,所有样品的有机指数均大于 0.05,其平均值为 1.35,远远超过肥污染标准值。尤其是在后午采样点,高出标准 50 倍,肥污染现象十分严重。

3 结果分析

3.1 总氮、总磷与有机质的富集

贵州化肥厂和距羊昌河河口 2 km 的天峰公司,均为贵州省大型化工企业。贵州化肥厂和天峰公司的工业废水直接排入红枫湖水库,是红枫湖水库最重要的氮污染源之一。贵州化肥厂和天峰公司年排废水总量约 2462.93 万 m³,其中含总氮 1481.46 t,贵州化肥厂和羊昌河河口采样点总氮含量较高应该与企业的工业污水排放相关。后午毗邻清镇发电厂,因电厂冷却水直接入湖,温暖的湖水适合鱼类生长繁殖,后午成为红枫湖水库主要的水产养殖区,2005 年网箱养鱼被禁止,但该处未被鱼类利用的饵料和鱼类排泄物形成较厚的底层淤泥,是红枫湖水库污染最严重的区域。将军湾、高关采样点可能是由于偏离各入水口较远且靠近后湖,水体中的氮污染相对较轻,因此沉积在底质中的氮较少。湖泊底层水体和底质中相对缺氧,还原条件使得硝化作用强度减弱,底质中有机氮通过氨化作用形成氨态氮,促进藻类生长,加剧水体的富营养化水平^[11]。

红枫湖水库底质沉积磷中,有机态磷所占比例最大(平均约为沉积全磷的 60%),其次为铁结合态磷(约为沉积全磷的 28%),上述 2 种形态的磷大约占了沉积物全磷的 80%~90%^[16]。有机磷可分解为溶解性的小分子有机磷或溶解磷酸根,这些溶解组分通过间隙水,在浓度梯度的驱动下向上覆水体迁移扩散,或是被吸附、络合而转化为其他形态的含磷矿物^[17]。铁结合态磷是红枫湖水库底质总磷中占比例最大的无机态磷^[16]。碳、氮、磷等营养元素在沉积物-水界面附近发生着剧烈的生物地球化学循环,伴随着有机质的降解,沉积物中的有机磷和铁结合态磷可释放到间隙水中,并发生再迁移而进入上覆水体,向湖水提供“源源不断”的磷供给,形成“二次污染”,严重时会造成藻类爆发等突发性水质恶化事件^[18]。

当氮、磷共同作为藻类生长的营养源时,如果氮磷比大于 14,藻类的生长速率不受氮营养的制约,此时,磷浓度的高低成为控制藻类细胞生长的关键因子^[19-20]。红枫湖水库就是典型的磷限制型水库,磷含量的变化为浮游植物的生长提供了矿质营养,

促进了植物的生长,增加了红枫湖水库的有机质负荷,因而总有机碳和总磷表现出了较强的相关关系。可以通过对底质中总磷含量的监测来推算总有机碳和有机质含量的变化。后午湖区高含量的有机质还与后午多年的网箱养鱼有关,大坝处可能是由于湖水滞留时间相对较长,水中有机物质沉积所致。

在深水大型湖库,绝大部分有机质在相对富含溶解氧的上覆水体中即被微生物氧化分解,并重新参加水生生态系统的物质循环,仅有很少一部分有机物能够直接沉积到沉积物中^[21]。万国江^[22]在²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 计年的基础上,对有关数据进行了进一步的分析,认为洱海有机碳垂直剖面具有“沉降—降解—堆积”三阶段分布特征。进入湖泊沉积物-水界面的有机质经过“沉降”“降解”阶段后,总有机质中很大一部分相对“易于分解的有机质”矿化降解,剩余的相对“耐分解的有机质”在沉积物中保存下来^[22]。由此可见,红枫湖水库底质真实的有机质含量应该高于检测值。

3.2 总氮、总磷与有机质的来源

不同来源的有机质其碳氮比值具有明显的差异。水生生物的碳氮比值为 2.8~3.4^[13];大多数细菌等微生物的碳氮比值分布在 3~5 之间;浮游植物的碳氮比值是 5~8^[23-25];藻类的碳氮比值为 5~14^[13];陆地植物具有较高的碳氮比值,通常大于 15^[23-25];土壤有机质的碳氮比值分布在 8~15^[24]。红枫湖水库底质中的碳氮比值大致分布在 2~7 之间,最小值为 2.24,最大值为 6.86,平均值为 4.15,表明红枫湖水库底质中的有机质主要来源于藻类等湖泊浮游生物。可见红枫湖水库生态系统结构比较简单,氮、磷的大量输入为浮游藻类提供了营养,引起藻类等浮游生物的大量增殖,增加了红枫湖水库有机质负荷。

通常情况下,30 a 时间尺度内,湖泊沉积物还处于简单堆积阶段^[26]。红枫湖水库不仅要承受大量的外部污染负荷,而且由于它的多功能性,旅游设施、湖内网箱养鱼以及长期营养盐累积又使它承受着难以削减的内部负荷。红枫湖水库总氮和总磷主要来自于外源污染物的排入,主要外源污染以化工企业为主,后午湖区网箱养殖是最大的内源污染源^[27]。流域的农业面源污染、湖区居民生活及水上娱乐、自然降水等也对湖泊底层沉积物有一定影响。

4 结 论

红枫湖水库底质已经严重污染,总体表现为:总氮含量高,湖水滞留时间长,外源含氮污染物滞留率特别高;底质中总磷含量高且湖中各点差异显著,有

机态磷和铁结合态磷占比例大,为藻类生长提供营养,是湖泊富营养化的重要原因;有机质含量丰富,整个湖泊有机指数偏高,湖泊处在严重的肥污染状态,所有监测点有机质指标全部超标,最大值超过标准50倍,说明红枫湖水底质的有机污染已经十分严重;总有机碳和总磷具有显著相关性;底质中碳氮比值表明其中的有机质主要来源于藻类等浮游生物,总氮和总磷主要来源于外源污染物的排入。

由此看来,红枫湖水库的污染治理,首先应削减营养盐外负荷,控制污染物入湖总量。其次,通过湖内外人工调控手段,调整生态系统的结构与功能,在对营养盐外负荷进行控制的基础上,可以进行大型曝气系统工程,通过向湖底泵气,消除水体“有氧/无氧”的分层结构,控制底质污染物向上释放的方法对污染进行治理,同时,有计划地通过疏浚河道、清除淤泥、湖滨带生态修复等方法减少底泥中营养盐的释放,从而削减内负荷。

参考文献:

[1] 廖国华, 庞增铨, 钟晓, 等. 西部山区河流梯级开发水环境变异的防范对策[J]. 贵州农业科学, 2004, 32(6): 85-86.

[2] WELCH E B, COOKE G D. Effectiveness and longevity of phosphorus inactivation with alum[J]. Lake and Reservoir Management, 1999, 15: 5-27.

[3] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 164-168.

[4] SONDERGAARD M, JENSEN J P, JEPPESEN E. Retention and internal loading of phosphorus in shallow eutrophic lakes[J]. The Scientific World, 2001, 1(1): 427-442.

[5] 程南宁, 李巍, 冉光兴, 等. 浙江东钱湖底泥污染物分布特征与评价[J]. 湖泊科学, 2007, 19(1): 58-62.

[6] 尹大强, 谭秋荣. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 1994, 1(3): 240-245.

[7] 王雨春, 万国江, 王仕禄, 等. 红枫湖、百花湖沉积物中磷的存在形态研究[J]. 矿物学报, 2000, 20(3): 273-278.

[8] 范成新, 张路, 王建军, 等. 湖泊底泥疏浚对内源释放影响的过程与机理[J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1523-1528.

[9] LI Qing-man, ZHANG Wen, WANG Xing-xiang, et al. Phosphorus in interstitial water induced by redox potential in sediment of Dianchi Lake, China[J]. Pedosphere, 2007, 17(6): 739-746.

[10] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 232-241.

[11] 周怀东, 彭文启. 水污染与水环境修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 364-366.

[12] CHEN Meng, DENG Cai-hong, WANG Wan-xia, et al. Marine diatom uptake of iron bound with natural colloids of different origins[J]. Mar Chem, 2003, 81: 177-189.

[13] 余祺, 李海波, 陈红兵, 等. 长湖底质有机物富集现状及评价[J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 2007, 29(2): 203-206.

[14] 李明光, 钟继洪, 李淑仪, 等. 广州市河涌底泥污染现状调查与评价[J]. 广州环境科学, 2005, 20(4): 1-5.

[15] 王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6): 22-26.

[16] 王雨春, 马梅, 万国江, 等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态及沉积历史[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 21-27.

[17] 李大鹏, 黄勇, 李伟光, 等. 再悬浮条件下底泥中磷赋存形态的转化研究[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1289-1294.

[18] WAN Guo-jiang, HUANG Rong-gui, PU Yong. Screening effect the diffusive boundary layer in sediments of Lake Aha in the suburbs of Guiyang City, Guizhou Province[J]. Chinese J Geochem, 1997, 16(4): 347-352.

[19] KOPERSELMAN, W, MEULEMAN, A. F. M. The vegetation N:P ratio a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. J Appl Ecol, 1996, 33: 1441-1450.

[20] 邓建才, 陈桥, 翟水晶, 等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3382-3386.

[21] MUSTAFA E, THOMAS C, JOHN D. Deltaic sedimentation in a modern rift lake[J]. Geological Society of America Bulletin, 1996, 107: 812-829.

[22] 万国江, 白占国, 王浩然, 等. 洱海近代沉积物碳-氮-硫-磷的地球化学记录[J]. 地球化学, 2000, 29(2): 189-197.

[23] ROSTAD C E, LEENHEER J A, DANIEL S R. Organic carbon and nitrogen content associated with colloids and suspended particles from the Mississippi River and some of its tributaries[J]. Environ Sci Technol, 1997, 31: 3218-3225.

[24] KENDALL C, SILVAL S R, KELLY V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States[J]. Hydrol Process, 2001, 15: 1301-1346.

[25] 王静, 吴丰昌, 黎文, 等. 云贵高原湖泊颗粒有机物稳定氮同位素的季节和剖面变化特征[J]. 湖泊科学, 2008, 20(5): 571-578.

[26] 万国江, 许义芳, 李荪蓉, 等. 云贵高原湖泊水库水化学组分研究[J]. 环境科学丛刊, 1988, 9(3): 37-51.

[27] 申德君, 张曼华, 刘燕, 等. 红枫湖水库富营养化现状分析[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2006, 23(2): 175-179.

(收稿日期: 2009-06-25 编辑: 熊水斌)

