

# 深水人工湖环境生物地球化学过程研究: 以贵州红枫湖-百花湖为例

万国江<sup>1</sup>, 万恩源<sup>1</sup>, 陈敬安<sup>1</sup>, Wan Xi<sup>2</sup>, Bai Z G<sup>3</sup>,  
吴丰昌<sup>4</sup>, 王仕禄<sup>1</sup>, 王敬富<sup>1</sup>

(1. 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, 贵阳 550002;

2. Nijmegen Centre for Molecular Life Sciences (NCMLS), Radboud Universiteit Nijmegen,  
6500 HB Nijmegen, the Netherlands;

3. ISRIC-World Soil Information, 6700 AJ Wageningen, the Netherlands;

4. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 红枫湖和百花湖地处长江支流乌江水系猫跳河流域, 位于黔中人为活动高强度地区, 具低纬度—高海拔的地理区位; 是河道型梯级开发的人工湖, 具碳酸盐岩的地质背景、水寄宿时间小、水深变幅大、水体多功能、农区与覆水区镶嵌等重要特征。红枫湖表层沉积物 Pb 稳定同位素组成表明其污染具多源特征; 剖析百花湖—红枫湖“突发性”水质恶化相互关联水质指标表明“湖泊黑潮”是特定季节、特殊气候条件下, 沉积有机质生物氧化作用的耦合; 脱氮过程受阻的 pH 控制导致亚硝酸根浓度增高; 维护该湖泊水系环境质量需预防工业污染、流域侵蚀、生活污染并综合治理湖区。

**关键词:** 深水人工湖; 沉积物—水界面; 环境生物地球化学过程; 红枫湖; 百花湖

**中图分类号:** P593 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2010)03-0262-09

随着区域环境综合研究的深入, 一些深层次的前缘科学问题急需解决。诸如: 如何辨识人为释放与天然形成的污染物? 在环境中污染物的性质和赋存状态是如何转化? 污染物在环境中具有什么样的运移途径和速率? 污染物在环境中的积累类型和定量关系? 污染物在环境中的降解过程和速率? 一些污染事件发生时的环境条件? 地球化学过程是认识污染机理的关键, 地球化学原理是污染控制技术的科学基础。揭示区域环境的内部特征, 认识环境中元素或化学物质的物理、化学和生物过程是一个重要环节。

区域环境各宿体的界面及界面附近, 发生着重要的物理、化学和生物反应, 进行着频繁的物质交换, 存在着特异的地球化学平衡关系。地—水—气—生界面的生物地球化学过程制约着大气、水体和土壤的污染变化。近代地球化学的发展已经较多地

注意到环境界面的作用。1983年, 编制中国科学院学科发展长远规划时, 笔者建议开展“地质环境的化学界面”研究<sup>[1]</sup>, 并进一步撰文指出地球科学前沿产生了新的重要分支学科—环境界面地球化学<sup>[2]</sup>。环境界面发生的地球化学过程具有三个基本点: ① C-N-P-S 等生源要素的运移和转化是环境界面过程的核心内容; ② 氧化还原变化控制污染物运移和转化的基本条件; ③ 环境核素提供示踪污染物运移过程和转化速率的前提。

认识环境有机污染物、重金属和其它微量物质的含量水平、分布状况、赋存状态、运移特征、转化机理及其生物效应, 在控制环境污染、评估环境质量等方面具有重要意义。环境介质条件是以氧化还原及其关联的酸碱平衡为基础, 氧化还原作用制约着化学元素及污染物赋存状态的转化、运移特征及环境影响。氧化还原变化既是一个化学过程, 又是一个

收稿日期: 2009-12-08; 改回日期: 2010-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助(项目编号: 40873086, 40773071, 49333040)

第一作者简介: 万国江(1940—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事区域环境、环境过程和核素示踪研究。E-mail: wanguojiang@vip.skleg.cn

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

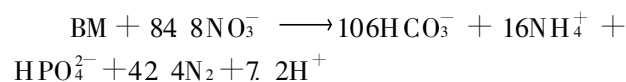
生物过程, 还是一个地质过程。生物, 特别是微生物的参与在氧化还原变化中具有特殊意义。这个过程也称为环境生物地球化学过程。

湖泊沉积物—水界面及其附近发生着复杂的物理、化学和生物作用、进行着频繁的物质交换<sup>[3]</sup>。沉积物—水界面作用既可能使已沉积的污染物回复到上覆水体, 形成二次污染; 又可能改变沉积记录的环境信息(图 1)。认识沉积物—水界面作用机理和速率对实施环境修复、评价环境净化、揭示环境演化、认识全球变化均具重要科学价值。表层沉积物中的大部分有机质经生物氧化作用被分解, 形成还原性化合物或离子  $\text{CH}_4$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  等。生物氧化作用影响着湖泊沉积物—水系统铁—锰循环过程和脱氮过程的季节性变化。

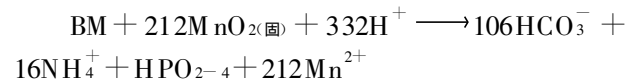
沉积物生物氧化作用的热力学氧化还原方程包括<sup>[4]</sup>:



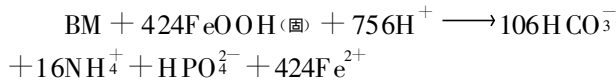
$\text{NO}_3^-$  的还原作用:



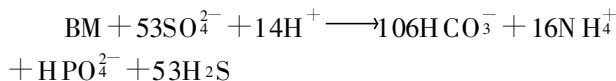
$\text{MnO}_2(\text{固})$  的还原作用:



$\text{FeOOH}(\text{固})$  的还原作用:



$\text{SO}_4^{2-}$  的还原作用:



以上各氧化还原方程式中,  $\text{H}_2\text{O}$  被忽略; BM 代表按雷德菲尔 (Redfield) 化学计算的生物量:  $(\text{CH}_2\text{O})_{106} (\text{NH}_3)_{16} \text{H}_3\text{PO}_4$ 。

深水湖泊通常具有水体分层结构和明显的季节性变化, 具有特殊的污染规律。天然湖泊的水交换周期长, 一旦受到污染后难于恢复治理。较多的深水湖泊分布在边远山区, 汇水面积小, 陆地生态系统对氮沉降吸收少; 湖泊中硝酸盐含量高, 湖水碱度低, 酸中和能力弱, 沉积物中有害微量金属和有机物容易积累, 对气候变化的反应敏感。欧共体继前期《边远山区湖泊酸化—古气候和生态学》及《边远山区湖泊作为大气污染和气候变化的指示剂》两个重要项目完成之后, 上世纪末他们又启动了一个新的重大项目《测量和模拟边远山区湖泊生态系统对环境变化的动力学反应》。该项目的主要研究目标包括: 观测和模拟边远山区湖泊生态系统对硫、氮等的动力学反应; 微量金属和微量有机物的迁移通量和迁移途径等。其创新特色体现在: 湖泊系统的季节性变化、氮沉降及生态影响。

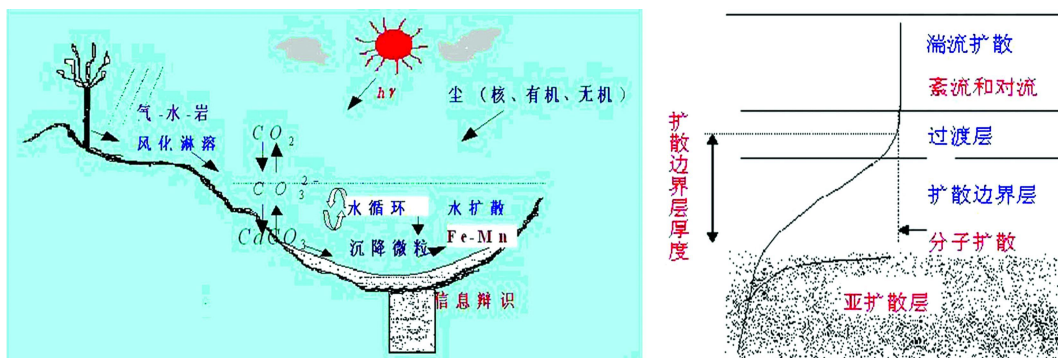


图 1 湖泊沉积物—水系统界面作用示意图(据文献<sup>[3,5]</sup>)

Fig. 1 Diagram of lake sediment-water interface systems (From ref. <sup>[3, 5]</sup>)

## 1 红枫湖—百花湖的重要特征

红枫湖和百花湖分别坐落于贵阳市西南约 32 km 和城西 26 km 处, 是乌江支流猫跳河梯级开发的两级人工湖, 分别于 1960 年 3 月、1966 年 7 月建成蓄水, 属峡谷断陷盆地的河道型水库(图 2), 也是贵阳市供水的重要水源地之一。红枫湖—百花湖的基本特征是:

① 地处人为活动高强度地区。在红枫湖和百花湖汇水区域分布有若干个大、中型工业企业, 是贵州省的重要工业基地。随着黔中地区城市化、工业、农业、养殖业及旅游业的高速发展, 可能对湖区环境—生态带来严重影响; 并对湖泊保护、治理和管理增加难度。

② 低纬度、高海拔的地理区位。该地区气候既受控于西环流南支气流, 又受西环流北支西南气流

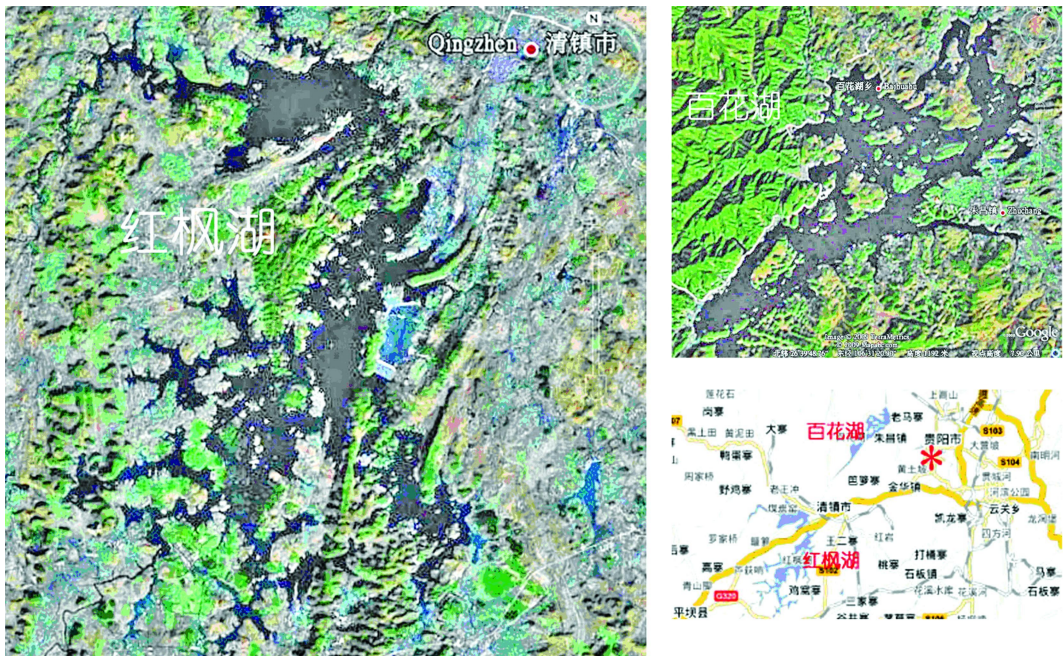


图2 红枫湖—百花湖地理位置及地势(原图采集自 Google Earth)

Fig. 2 Location and surroundings of Lakes Hongfeng and Baihua

的影响;兼受东南季风和西南季风的作用。南北冷暖空气常在此交汇,形成云贵静止锋。区域气候条件的急剧变化,可能对湖泊环境系统带来突发性影响。

③ 河道型梯级开发的人工湖。作为人工湖,湖底地形复杂;覆水深度变化不规则。出口大坝前为深水区,泥沙堆积厚度大,水体分层结构明显;而湖泊内部不同部位的泥沙淤积差异很大,水体结构多变,混合作用随水域而异。

④ 碳酸盐岩的地质背景。具岩溶水化学特征,水化学组成具不稳定性;同时湖水与地下水通道还可能相连。

⑤ 水输送较快,水交换周期短,水寄宿时间小。红枫湖的补给系数为 27.1,水寄宿时间为 0.26 a;百花湖以红枫湖下泄水为主要水源,补给系数达 126.3,水寄宿时间仅 0.16 a。

⑥ 蓄水量波动。湖泊水位兼受自然过程和人为调节的控制;汇水区天然降水量的年际和季节性变化都可能对湖区蓄水构成重要影响。水位变幅可逾 10 m。

⑦ 水体多功能。作为综合性的人工湖,兼具蓄水、供水、发电、养殖、旅游、防洪和调节自然生态等多种功能。其中,在供水方面,包括工业、农业和生活用水的需求。当前,随着城市化进程的加速,城市供水功能被上升到突出地位。

⑧ 农业区与湖泊覆水区镶嵌。湖周大部分地区为农业耕耘,湖泊湿地与滨湖农地犬牙交错。

总之,红枫湖—百花湖坐落区域是全球环境变化的敏感地区,其湖泊既是长江支流乌江水系的上游源地,又具有局地水资源的供给功能。因此,认识红枫湖—百花湖的水环境变化和沉积过程在局地、区域和全球三个层面上都具有重要价值。通过对两湖沉积物—水界面环境生物地球化学过程的系统研究,不仅提供区域水源保护工程和管理科学依据,而且还有益于全球环境变化的系统认识。

## 2 红枫湖具有较高的沉积物堆积速率,泥沙堆积主要源于流域侵蚀

根据红枫湖湖水出口坝前和云南洱海深水湖区采集的沉积物柱芯,采用 $^{137}\text{Cs}$ 时标和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 计年方法获得的沉积物平均堆积速率<sup>[6-8]</sup>(表1)比较可见,红枫湖沉积物平均堆积速率约为洱海的3.6倍。

红枫湖汇水区位于地球化学敏感和生态环境脆弱的碳酸盐岩区域,岩溶石漠化过程可能导致大量泥沙汇入湖体<sup>[9]</sup>。大气散落核素在湖泊沉积物中的蓄积是大气直接散落、流域表土侵蚀和湖泊沉积共同作用的结果。散落沉降到地表环境中的 $^{137}\text{Cs}$ 是研究流域侵蚀作用和湖泊沉积作用的一个独特而有效的示踪剂。红枫湖沉积物中 $^{137}\text{Cs}$ 吸附动力学及离子交换实验表明,其 $^{137}\text{Cs}$ 绝大部分处于固定态,



仅少量处于选择性吸附态和交换态<sup>[10]</sup>。根据红枫湖和洱海沉积物中<sup>137</sup>Cs蓄积的对比研究结果<sup>[11]</sup>:<sup>137</sup>Cs在红枫湖沉积物的蓄积以侵蚀影响为主,侵蚀影响因子为散落影响因子的4.3倍;而<sup>137</sup>Cs在洱海沉积物的蓄积受直接散落控制,其散落影响因子为侵蚀影响因子的1.9倍。上述分析表明,红枫湖汇水区的侵蚀作用远较洱海汇水区严重,表征了红枫湖沉积物泥沙淤积受流域侵蚀来源的重要影响。

表1 红枫湖与洱海沉积物平均堆积速率对比

Table 1 Comparison of sediment accumulation rates between Lakes Hongfeng and Erhai

湖泊名称	沉积物柱芯号	计年方法	沉积物平均堆积速率 /g·cm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup>	资料来源
红枫湖	HF8801	<sup>137</sup> Cs时标	0.17±0.01	文献[6]
	HF980903	<sup>210</sup> Pb <sub>ex</sub>	0.16	文献[7]
洱海	EH940713-2	<sup>137</sup> Cs时标	0.048±0.003	文献[8]
	EH940713-2	<sup>210</sup> Pb <sub>ex</sub>	0.045	

### 3 红枫湖表层沉积物铅稳定同位素组成指示其多源污染特征

受污染沉积物的修复问题是水体污染控制的重要方面。受控自然恢复、疏浚及原位覆盖是污染沉积物修复的三大技术。无论哪种修复技术,都需要了解沉积物中污染物的来源?认识污染物是否会再迁移到上覆水体?这是制定修复方案、选定修复材料、预测水质变化的重要依据。

早年,通过对瑞士 Greifen 湖沉积物垂直剖面及其孔隙水中<sup>210</sup>Pb的示踪考察表明<sup>[12-14]</sup>:季节性缺氧湖泊在Fe-Mn激烈循环的同时,<sup>210</sup>Pb可能通过孔隙水扩散而进入到上覆水体。尔后,我们对红枫湖深水湖区沉积物的研究,表明其沉积物顶部还可能存在<sup>210</sup>Po再迁移作用<sup>[15]</sup>。

一些湖泊沉积物表层几厘米呈现出某些微量金属自一定深度向上递增趋势。

八十年代以前,许多研究者都将这种现象作为工业革命以来人为污染不断加剧的证据。例如,含Pb汽油的使用可能导致Pb的全球性扩散和污染,一些湖泊海湾沉积物顶部出现了Pb浓度增高的现象。这种现象是全球性的?还是区域性的?是污染增高趋势?还是早期成岩过程再迁移作用影响?为

此,首先需要辩认不同地区或不同沉积物中Pb的来源。

根据铅稳定同位素(<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)组成关系(图3),我们辨识出洱海沉积物顶部几厘米内具有稳定的铅来源,而红枫湖污染具多源特征。湖泊沉积物-水界面及界面附近存在激烈的Fe、Mn循环表明,孔隙水Fe、Mn垂直剖面分别与<sup>210</sup>Pb、<sup>210</sup>Po垂直剖面相似。看来<sup>210</sup>Po的沉积后迁移受Mn循环控制;而<sup>210</sup>Pb的扩散迁移与Fe循环有关<sup>[16-18]</sup>。

### 4 百花湖-红枫湖“黑潮”的形成机理

1994年秋,百花湖(及红枫湖部分湖区)出现突发性严重水质恶化事件:湖水pH值和溶解氧降低、亚硝酸根浓度增高、水体变黑发臭、鱼类死亡(图4)。政府决策者和社会民众盼望回答:突发性水质恶化的原因何在?是什么因素触发的?能否可逆好转?

#### 4.1 百花湖突发性水质恶化的沉积物-水界面作用

为查明突发性水质恶化的原因和认识水质恢复的途径,调研重点聚焦于《百花湖水水质突发性恶化的机理》。通过在深水湖心及出湖口上方采集湖水、界

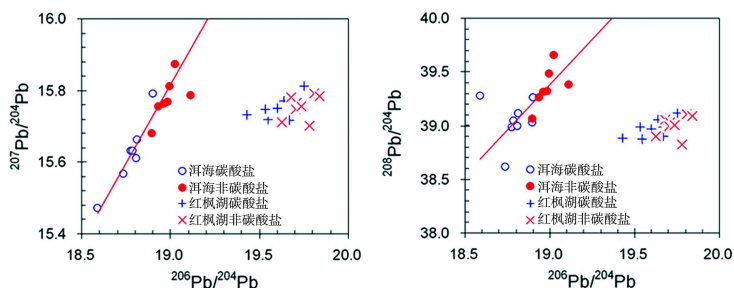


图3 红枫湖与洱海顶部沉积物中Pb稳定同位素组成比较(文献[16-17])

Fig. 3 Pb-isotopic ratios at the top of sediments in Lakes Hongfeng and Erhai(From ref.[16, 17])

面水、沉积物柱芯及孔隙水样品;利用原子吸收光谱、元素分析、多道能谱、电子探针、扫描电镜等多种测试手段,获得了有关水质指标、水体三氮及氮-磷关系、悬浮颗粒与沉积物有关参数。

调查表明:①百花湖系一个底层滞水带季节性缺氧的高氮湖泊;②百花湖富营养过程的限制因子是磷;③沉积物中较高的总磷和有效磷提供了磷自

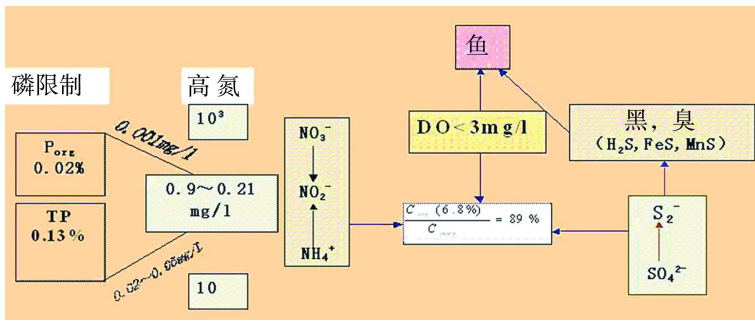


图4 百花湖突发性水质恶化示意图

(下标 org 表示有机的, inorg 表示无机的)

Fig. 4 Diagram of water quality in paroxysmal deterioration at Lake Baihua

沉积物向上覆水体释放的物质来源; ④ 表层沉积物微粒中含较高有机质, 有机质分解的生物氧化作用加剧湖底季节性严重缺氧(图5); ⑤ 沉积物中有机质耗氧分解伴随还原态  $S^{2-}$  的形成,  $H_2S$  及其它硫化物的扩散导致水体变黑发臭; ⑥ 湖水亚硝酸根浓度增高是缺氧状态下硝化与反硝化过程剧烈进行的结果; ⑦ 水体中锰浓度的增高是底层湖水缺氧季节还原态锰自沉积物向上覆水体扩散作用的产物; ⑧ 表层沉积物存在微粒再悬浮作用的可能; ⑨ 汇水区外源性输入是表层沉积物中有机质的重要来源。目前, 对于这种水质恶化事件尚无一个统一的称呼<sup>①</sup>。尽管民间对于类此现象有“黑水团”、“黑臭”等俗称, 但考虑到其景观特征、形成规模和产生机理, 我们在1994年已将这种大面积的突发性水质恶化事件称为“湖泊黑潮”<sup>[19-22]</sup>。

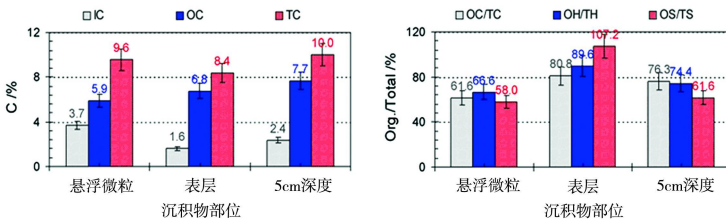


图5 百花湖水质恶化期沉积物不同部位的有机质对比(据文献[19, 20]资料整理, 图中IC, OC, TC, OH, TH, OS和TS分别表示无机碳、有机碳、总碳、有机氢、总氢、有机硫和总硫)

Fig. 5 Comparison of sediment organic matter contents at different depths during the water quality deterioration of Lake Baihua (Modified after ref. [19, 20]. IC: inorganic carbon, OC: organic carbon, TC: total carbon, OH: organic hydrogen, TH: total hydrogen, OS: organic sulfur, TS: total sulfur)

基于上述分析, 可以认为百花湖发生的水质恶化事件具如下过程: 入秋后, 沉降于湖底的有机质分解, 湖底处于缺氧状态, 并导致沉积物磷的释放和还原态硫  $S^{2-}$  的产生。水体磷浓度增高并与水体较高浓度的氮耦合, 可能导致厌氧微生物和藻类的繁演。自九月中旬以来的持续降温和连绵阴雨, 进一步加速厌氧环境的形成和底层磷和  $H_2S$  的释放。恶性循环之后导致水体缺氧加剧, 硫化物的扩散使水体变黑发臭。伴随水体缺氧和 pH 降低, 亚硝酸根浓度增高、锰二次污染, 以及可能存在的沉积微粒再悬浮作用, 都可能加剧水质恶化。

流域侵蚀是山区湖泊(或水库)沉积的主要物质来源。其侵蚀强度不仅制约着下游水体泥沙的沉积速率, 而且影响着上覆水体的水质变化。通过汇水区土层与湖泊沉积物中  $^{7}Be$  累计值的对比(图6), 说明红枫湖—百花湖流域侵蚀的有机质可能进入湖泊沉积物中。

百花湖发生的这种水质恶化事件是有机污染物长期积累与特定季节、特殊气候条件下耦合作用的必然结果。随着水体耗氧与复氧过程的逐渐平衡、水输送以及天气好转, 水质可望在一段时期(如2~3个月)内得到恢复。尔后的观测表明了水质的好转(图7)。

#### 4.2 微生物硝酸盐脱氮作用受 pH 限制

由于自然和人为影响, 红枫湖和百花湖水体三氮总量居云贵高原湖泊之首; 深水湖区下层滞水带季节性缺氧。上述背景导致它们可能多次发生突发性水质恶化事件。但是, 需要回答“湖泊黑潮”发生时, 亚硝酸盐浓度增高、脱氮过程变化的控制因素。图8示意了湖泊沉积物—水界面过程中氮循环的赋存价态关系, 这其中自然包括各种氧化—还原条件下, 微生物参与的生物地球化学作用。

在微生物作用下, 水体中含氮化合物被降解为  $NH_4^+$ 。部分  $NH_4^+$  被细菌同化, 大部分仍存在于水体。有氧时, 在自养微生物作用下  $NH_4^+$  被氧化成  $NO_2^-$  和

① 根据中国科学院文献情报中心科技查新报告(编号: 2005-119): “未见有关研究湖泊突发性水质恶化事件中相互关联水质指标的综合分析及湖泊黑潮提出的文献报道”

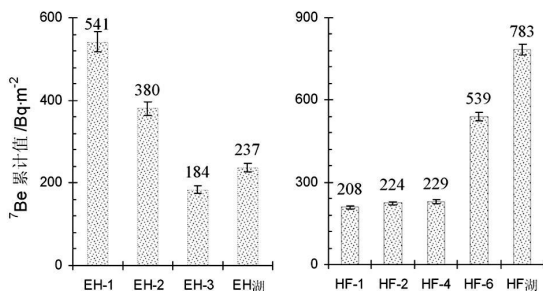


图6 <sup>7</sup>Be在红枫湖和洱海沉积物及其汇水区表土中的累计值比较(据文献[11]资料整理, 图中: EH-洱海汇水区表土, EH湖-洱海沉积物, HF-红枫湖汇水区表土, HF湖-红枫湖沉积物)  
Fig. 6 <sup>7</sup>Be inventories in the sediments and soils of Lake Hongfeng and Erhai catchments

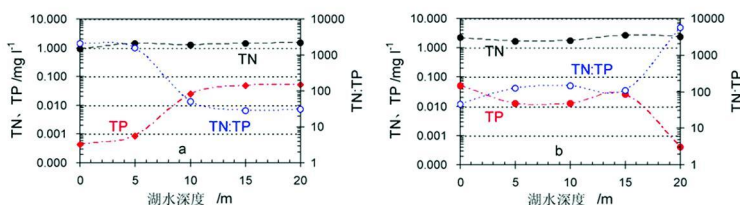


图7 百花湖水水质恶化期(a)与复苏后(b)总氮(TN)、总磷(TP)浓度对比(据文献[19, 20]及后续资料整理)  
Fig. 7 Total N and P and their ratios in Lake Baihua waters during the water quality deterioration (a) and recovery (b) (Modified after ref. [19, 20])

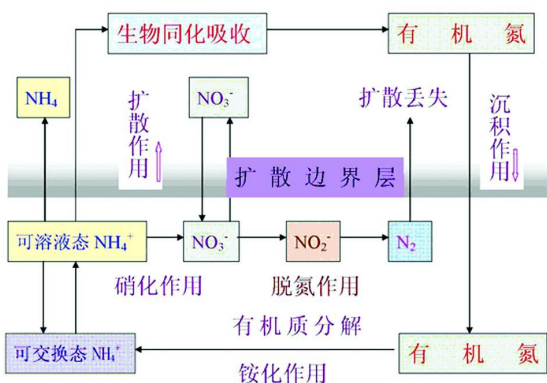


图8 湖泊沉积物-水界面氮循环示意图  
Fig. 8 Diagram of N-cycle at the sediment-water interface of lakes

程中有关酶失活及外源有机物对连续培养中细菌脱氮作用的抑制影响, 细胞量急剧下降, 出现大量  $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  等中间产物积累, 脱氮反应受阻(图9)<sup>[23, 24]</sup>。

脱氮反应受阻的微观机理实验表明, 亚硝酸根浓度增高受  $pH$  值降低的影响。而突发性水质恶化表征的相互关联指标变化(包括  $pH$  值降低)的基本

$\text{NO}_3^-$ ; 缺氧时, 脱氮细菌以  $\text{NO}_3^-$  代替  $\text{O}_2$  作为呼吸链中最终电子受体进行厌氧呼吸, 而产生脱氮反应。

微生物的脱氮作用实质上是酶的催化反应过程。为认识脱氮细菌的适应能力, 在与瑞士联邦环境科学与技术研究院(EAWAG)的合作研究中, 采用恒化连续培养方法, 开展了  $pH$  ( $\geq 7.5$  和  $= 6.8$ ) 变化及好氧-厌氧转换对微生物脱氮作用影响的瞬间动态中间产物产生及抑制的实验观测。实验表明, 脱氮副球菌属(*Paracoccus denitrificans*)的菌株在各种条件下的生理适应能力不同:  $pH = \geq 7.5$ , 好氧与厌氧转换条件下, 混合微生物脱氮作用能顺利进行; 当降低(如  $pH = 6.8$ ), 好氧与厌氧互换时, 导致脱氮副球菌属的菌株和活性沉积物脱氮过

原因是湖底表层沉积物中有机质经生物氧化作用分解的结果。二者综合说明, “湖泊黑潮”发生时可能出现亚硝酸根浓度增高。

## 5 红枫湖-百花湖水体污染的控制途径

为控制红枫湖-百花湖水系统环境质量恶化的进程, 宜采取“三防一治”的措施。即: 防工业污染、流域侵蚀、生活污染并综合治理湖区:

- ① 防工业污染: 湖体中的部分氮来自工业废水; 沉积物中的燃煤微珠及熔融物主要来自工业排放。控制和削减工业废弃物向水体释放是一个至关重要的措施。
- ② 防流域侵蚀: 湖体中的部分氮、磷和有机物来自农田侵蚀, 特别是入秋后农田放水或降雨冲洗, 都可能将上述物质带入湖体。合理施放化肥农药并控制在适当限度是一个重要环节。同时, 本地区的酸沉降也是加剧流域化学侵蚀的重要因素。
- ③ 防生活污染: 猫跳河流域人口密度高于贵州全省平均值的80%左右。人群生活废物排放也是富营养物质的重要来源, 特别是有机物、氮和磷等



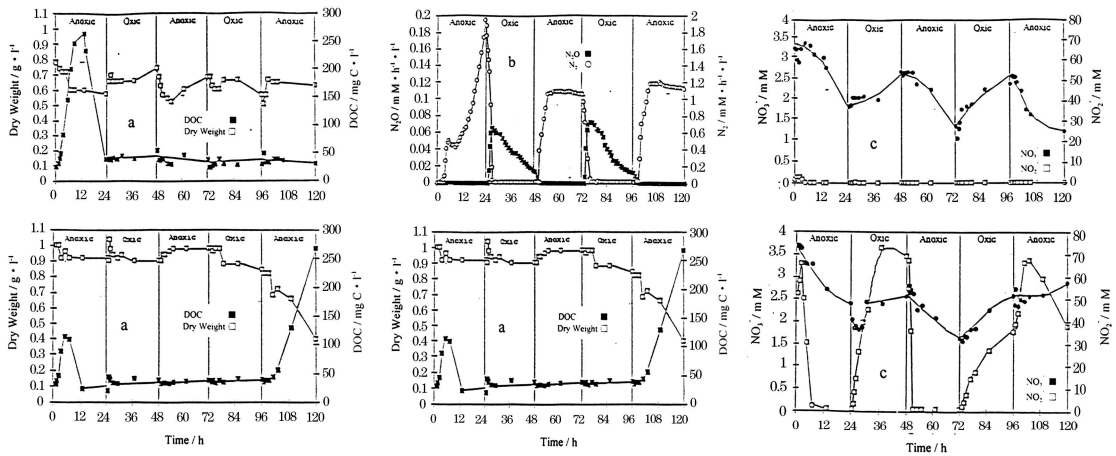


图9 不同pH条件下好氧-厌氧转换对微生物脱氮作用影响的实验观测<sup>[23, 24]</sup> (上图为  $\text{pH} \geq 7.5$ , 温度 =  $30^\circ\text{C}$ , 稀释率 =  $0.03 \cdot \text{h}^{-1}$ ; 下图为  $\text{pH} = 6.8$ , 温度 =  $30^\circ\text{C}$ , 稀释率 =  $0.03 \cdot \text{h}^{-1}$ ) (据文献 [23, 24])

Fig. 9 Experimental results of influence of aerobic and anaerobic transformation on bio-denitrification at different pH values (above:  $\text{pH} \geq 7.5$ ; below:  $\text{pH} = 6.8$ ) (After ref. [23, 24])

的排放。需要加强对居民集中区,特别是汇水区内城/镇生活污水的治理。

④ 治理湖区:需要确定湖区功能、设置保护区、限制各种有损于湖水系统的各种活动,整治湖区和周边环境。同时,进一步加强湖泊/水体环境变化的研究和完善监测体系也是综合治理湖区的重要内容。

## 6 结语:深入环境演化与过程研究

解决区域性环境问题和预测全球性环境变化两个领域中存在的许多重要科学问题,构成了环境学科发展的前沿;环境问题是21世纪全球经济和社会可持续发展的主要障碍。环境问题本身的研究就是环境演化的研究,在研究未来环境演化的时候,更需要认识现在和过去。地球环境是一个非常复杂的系统,各圈层之间的相互作用在时间和空间上都是无比精确。为适应国际科学发展的形势和高层次上满足我国环境保护事业的需要,为了21世纪经济和社

会可持续发展,我们必须认识环境问题、维护环境质量,必须深入开展环境演化与过程的研究。

作为湖泊水体,随着湖泊环境功能的转变,城市供水变成了重要需求。在这种新的环境保护问题中,认识湖泊水环境生物地球化学过程更具有特殊意义。作为人类污染行为在自然特定气候条件下的耦合性而产生突发性灾害事件的认识,显示出突发性事件在环境研究的重要性。本项研究显示出自然生态修复能力的强劲及其对环境污染自净能力的耦合关系,为环境生物地球化学自我修复提供了一个典型范例。特别是对于环境突发事件的认识中,寻求临界变化的预警信号更显得重要。新近 Scheffer 等对突发事件从动力学系统进行了论述<sup>[25]</sup>。

过去的研究工作使我们在全方位、多元化、多角度的了解地球环境系统方面已经迈出了可喜的一步。然而,我们对地球环境的认识还远远不够。我们更要研究人类对地球环境的影响,深入环境演化与过程研究!

## 参 考 文 献

- [1] 万国江. 关于编制中国区域环境平衡纲要的建议[R]. 中国科学院规划攻关办公室编《中国科学院长远规划的专家建议》, 1983, 第四辑, 49-51.
- [2] 万国江. 地球化学环境界面研究[J]. 地球科学信息, 1987, (3): 11-14.
- [3] Santschi P H, Hoehener P, Benoit G, *et al.* Chemical processes at the sediment-water interface[J], Mar. Chem. 1990, 30: 269-315.
- [4] Furrer G, Wehrli B. Biogeochemical Processes at the Sediment-Water Interface: Measurements and Modeling[J]. Applied Geochemistry, 1993, (2): 117-119.

- [ 5 ] 万国江. 云贵高原深水湖库环境过程及水源保护途径[ J ]. 中国工程科学, 2009, 11(5): 60—71.
- [ 6 ] 万国江, 林文祝, 黄荣贵, 等. 红枫湖沉积物<sup>137</sup>Cs垂直剖面的计年特征及侵蚀示踪[ J ]. 科学通报, 1990, 35(19): 1487—1490.
- [ 7 ] 胥思勤. 红枫—百花湖、程海沉积物<sup>210</sup>Pb分布及环境示踪的对比研究[ D ]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1999.
- [ 8 ] 徐经意, 万国江, 王长生, 等. 云南省泸沽湖、洱海现代沉积物中<sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs的垂直分布及其计年[ J ]. 湖泊科学, 1999, 11(2): 110—116.
- [ 9 ] 万国江等著. 碳酸盐岩与环境(卷一)[ M ]. 北京: 地震出版社, 1995: 1—90.
- [ 10 ] 窦明晓. 红枫湖沉积物<sup>137</sup>Cs扩散迁移性研究[ D ]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1992.
- [ 11 ] 万国江, 白占国, 刘东生, 等. <sup>137</sup>Cs在滇西与黔中地区散落的差异—青藏隆起对滇西地区全球性扩散大气污染物散落在屏蔽效应的推断[ J ]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 407—415.
- [ 12 ] Wan G J, Santschi P H, Farrenkothan K, *et al.* Postdepositional remobilization of <sup>210</sup>Pb in freshwater sediments[ J ]. EOS, 1984, 65(45): 941.
- [ 13 ] Wan G J, Santschi P H, Sturm M, *et al.* Natural (<sup>210</sup>Pb, <sup>7</sup>Be) and fallout (<sup>137</sup>Cs, <sup>239,240</sup>Pu, <sup>90</sup>Sr) radionuclides as geochemical tracers of sedimentation in Greifensee, Switzerland[ J ]. Chemical Geology, 1987, 63: 181—196.
- [ 14 ] 万国江, Santschi P H, Sturm M, 等. 放射性核素和纹理工计年对比研究瑞士格莱芬湖近代沉积速率[ J ]. 地球化学, 1986(3): 259—270.
- [ 15 ] 万国江, 黄荣贵, 王长生, 等. 红枫湖沉积物顶部<sup>210</sup>Po<sub>ex</sub>垂直剖面的变异[ J ]. 科学通报, 1990, 35(8): 612—615.
- [ 16 ] 万国江. 湖泊沉积物早期成岩过程中铅的再迁移[ J ]. 自然科学进展, 1992, 2(5): 447—453.
- [ 17 ] 万国江, 刘菊英, 黎秉铭. 洱海沉积物顶部铅的同位素特征和再迁移作用[ J ]. 科学通报, 1992, 37(9): 825—828.
- [ 18 ] 陈振楼, 黄荣贵, 万国江. 红枫湖沉积物—水界面 Fe—Mn 的分布和迁移特征[ J ]. 科学通报, 1992, 37(21): 1974—1977.
- [ 19 ] 白占国, 吴丰昌, 万曦, 等. 百花湖季节性水质恶化机理研究[ J ]. 重庆环境科学, 1995, 17(3): 10—14(5).
- [ 20 ] Bai Z G, Wu F C, Wan X, *et al.* Mechanism of Seasonal Deterioration of Water Quality in Lake Baihua, China[ J ]. Chinese Journal of Geochemistry, 1996, 15(2): 185—188.
- [ 21 ] 吴丰昌, 白占国, 万国江, 等. 贵州百花湖沉积物中磷的再迁移作用[ J ]. 环境科学进展, 1996, 4(3): 58—61.
- [ 22 ] 王雨春, 万国江, 尹澄清, 等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征[ J ]. 湖泊科学, 2002, 14(4): 301—309.
- [ 23 ] 万曦, 万国江, Snozzi M, 等. 微生物脱氮作用及对中间产物的抑制[ J ]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 227—232.
- [ 24 ] Wan Xi, Wan G J, Snozzi M. Microbiological Denitrification and Denitrifying Activity of Paracoccus Denitrificans[ J ], Chinese Journal of Geochemistry, 2000, 19(2): 186—192.
- [ 25 ] Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, *et al.* Early-warning signals for critical transitions[ J ]. Nature, 2009, 461(7260): 53—59.



## A Study on the Environmental Bio-geochemical Process for a Deep-water Artificial Reservoir: As exemplified by Lake Hongfeng and Lake Baihua, Guizhou, China

WAN Guo-jiang<sup>1</sup>, WAN En-yuan<sup>1</sup>, CHEN Jing-an<sup>1</sup>, WAN Xi<sup>2</sup>, BAI Z. G.<sup>3</sup>,  
WU Feng-chang<sup>4</sup>, WANG Shi-lu<sup>1</sup>, WANG Jing-fu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Nijmegen Centre for Molecular Life Sciences, Radboud Universiteit Nijmegen, 6500 HB Nijmegen, the Netherlands; 3. ISRIC-World Soil Information, 6700 AJ Wageningen, the Netherlands; 4. Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Lakes Hongfeng and Baihua, artificial lakes, were located in the catchment of the Maotiao River, a branch of the Wujiang distributary of the Yangtze River with low altitude and high elevation. The area has been intensively intervened by human activities. The lake waters are characterized by short-term residence time, variable water depth and multiple-function services; their catchment is developed on a geological background of carbonate rocks, and mosaicked by lake water surface and agricultural land uses. The Pb stable isotopic composition of the upper sediments indicated that the lakes were contaminated by various sources of pollutants. Analysis of incident cross-correlation water-quality indicators for the paroxysmal deterioration of water quality in Lakes Baihua and Hongfeng, or “*Lake Black Tide*” as a “*dead zone*”, indicated that the deterioration resulted from the coupling of bio-oxidation of depositional organic matter under certain seasonal and climatic conditions. pH-restraints of denitrification processes led to an increase in  $\text{NO}_2^-$  concentrations. To maintain good lake water quality, it is necessary to take an integrated measure to manage the lakes, as well as to prevent pollutions from industry, livelihood and watershed erosion.

**Key words:** Lake Black Tide; deep artificial lake; sediment-water interface; environmental biogeochemical process; Lakes Hongfeng and Baihua