

刘超,朱淮武,王立英等. 2013. 滇池与红枫湖沉积物中磷的地球化学特征比较研究[J]. 环境科学学报, 33(4): 1073-1079

Liu C, Zhu H W, Wang L Y, et al. 2013. Comparative study on the geochemical characteristics of phosphorus in sediments from Lake Dianchi and Hongfeng[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(4): 1073-1079

滇池与红枫湖沉积物中磷的地球化学特征比较研究

刘超^{1,2},朱淮武¹,王立英²,张润宇^{2,*},吴丰昌³

1. 贵州师范大学化学与材料科学学院, 贵阳 550001
2. 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
3. 中国环境科学研究院, 北京 100012

收稿日期: 2012-07-15 修回日期: 2012-08-26 录用日期: 2012-08-27

摘要: 对比研究了滇池与红枫湖表层沉积物中磷的形态含量及其生物有效性. 结果表明, 两湖沉积物总磷含量相当, 分别为 1373.8 ~ 4616.3 mg·kg⁻¹、1194.4 ~ 4324.3 mg·kg⁻¹. HCl-P、Res-P 为滇池沉积物中主要的磷形态, 占总磷的 62.9% ~ 86.4%; 而红枫湖中磷形态顺序为 NaOH-P > Res-P > HCl-P > BD-P > NH₄Cl-P; 两湖沉积物中有机磷均以低活性态为主. 红枫湖沉积物中 NH₄Cl-P、BD-P、NaOH-P 及生物有效磷等平均含量明显高于滇池, 表明其内源磷释放对上覆水体富营养化的贡献更大. Olsen-P 与 NH₄Cl-P、BD-P、NaOH-P 等活性磷形态呈显著正相关, 而与 NaOH-mP、HCl-P、Res-P、TP 等相关性不显著, 因此, 可作为评价两湖沉积物释磷能力及其潜在环境风险的重要指标.

关键词: 湖泊沉积物; 磷; 形态; 生物有效性; 富营养化

文章编号: 0253-2468(2013)04-1073-07 中图分类号: X524, X142 文献标识码: A

Comparative study on the geochemical characteristics of phosphorus in sediments from Lake Dianchi and Hongfeng

LIU Chao^{1,2}, ZHU Huaiwu¹, WANG Liying², ZHANG Runyu^{2,*}, WU Fengchang³

1. School of Chemistry and Materials Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001
2. State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002
3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

Received 15 July 2012; received in revised form 26 August 2012; accepted 27 August 2012

Abstract: Phosphorus (P) forms, contents and its bioavailability in typical surface sediments from Lake Dianchi and Hongfeng was investigated and compared. Results showed that TP contents in sediments from Lake Dianchi were similar to those from Lake Hongfeng, ranging from 1373.8 to 4616.3 mg·kg⁻¹ and 1194.4 to 4324.3 mg·kg⁻¹, respectively. HCl-P and Res-P were the two main P fractions in Lake Dianchi with the relative contribution of 62.9% ~ 86.4% to TP. Oppositely, P fractions in Lake Hongfeng varied in the rank order of NaOH-P > Res-P > HCl-P > BD-P > NH₄Cl-P. Lowly-labile organic P fractions were dominant in those lake sediments. The average contents of NH₄Cl-P, BD-P, NaOH-P and bioavailable P in the sediment of Lake Hongfeng were significantly higher than Lake Dianchi, which suggested that internal P loading was more hazardous in Lake Hongfeng on promoting lake eutrophication than in Lake Dianchi. Olsen-P was significantly positively related to the contents of NaOH-P, BD-P, NH₄Cl-P, but it was not significantly correlated with NaOH-mP, HCl-P, Res-P and TP, indicating the appropriate index for estimating P bioavailability in sediments and its potential release risk into those two lakes.

Keywords: lake sediments; phosphorus; forms; bioavailability; eutrophication

1 引言(Introduction)

湖泊富营养化已成为当今全球水环境面临的热点问题之一, 严重制约了淡水资源的可利用性与

社会经济的可持续发展. 我国是一个多湖泊国家, 面积大于 1 km² 的湖泊有 2600 多个, 湖库贮水总量达 6.38 × 10¹¹ m³, 城镇饮用水源的 50% 以上源于湖泊(马荣华等 2011). 因此, 湖泊在我国水生生态环

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40903052, 41273151); 国家重点基础研究发展计划项目(No. 2008CB418006); 贵州省省长专项资金项目(黔省专合字[2012]7 号); 贵阳市科技计划项目(筑科合[2012103]86 号)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40903052, 41273151), the National Basic Research Program of China (No. 2008CB418006), the Special Research Foundation of the Governor of Guizhou Province ([2012]7) and the Science and Technology Project of Guiyang City ([2012103]86)

作者简介: 刘超(1986—), 男, E-mail: liuchao1393@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: zhangrunyu@mail.gyig.ac.cn

Biography: LIU Chao(1986—), male, E-mail: liuchao1393@163.com; * Corresponding author, E-mail: zhangrunyu@mail.gyig.ac.cn

境和营养物质循环研究中具有独特的地位. 云贵高原是我国淡水湖泊分布较多的地区之一, 共有大小湖泊 73 个, 占全国湖泊总面积的 1.5%. 其中, 滇池为云贵高原面积最大的淡水湖泊, 素有“高原明珠”之称, 兼具供水、渔业、航运、景观和调节气候等诸多功能. 红枫湖系黔中地区最大的人工水库, 是贵阳市及其周边百万居民的主要饮用水源. 近年来, 随着湖泊流域内经济及城镇化的快速发展, 人口不断增加, 生活污水、工业废水的大量排入致使滇池和红枫湖水质恶化, 蓝藻水华频发, 两湖目前均为富营养化湖泊.

磷是水生植物生长所必需的营养元素, 也是造成湖泊富营养化的关键限制性因子 (Schelske, 2009). 研究已证实沉积物是湖泊营养物质的重要蓄积库, 内源磷的释放是水体营养物质的重要来源, 直接关系到富营养化湖泊的恢复成效. 目前不少学者对滇池、红枫湖沉积物中磷的赋存特征、释放机制开展了大量的研究工作 (Hu *et al.*, 2007; 高丽等 2004; 朱元荣等 2010a; 2010b), 但同时两湖磷的地球化学特征的对比研究鲜见报道 (吴峰炜等 2009). 因此, 本文通过综合分析滇池与红枫湖表层沉积物中磷的含量分布、形态组成及其生物有效性, 对比研究两湖沉积物中磷的地球化学特征, 以阐释云贵高原不同类型湖泊富营养化机理, 并为湖泊污染治理和管理保护提供参考依据.

2 材料与方 法 (Materials and methods)

2.1 样品采集与处理

在前人研究工作的基础上 (高丽等 2004; 朱元荣等 2010a; 2010b), 2010 年 8 月利用彼得森挖泥器采集两湖不同典型区域表层 0 ~ 10 cm 沉积物样品, 采样点位具体分布见图 1. 采样时每个点位同步采集两份样品, 将样品混匀后置于封口袋中, 放入

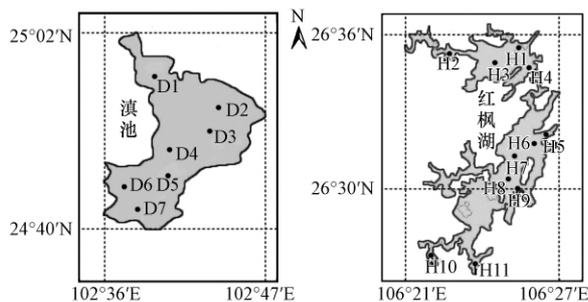


图 1 滇池、红枫湖采样点位图

Fig. 1 Sampling sites in Lake Dianchi and Hongfeng

车载冰箱中冷藏带回实验室, 经真空冷冻干燥 2 d, 然后采用四分法取样, 玛瑙研钵研磨并过 100 目筛, 密封保存备用.

2.2 样品分析

沉积物磷含量分析采用 SMT 方法 (Ruban *et al.*, 2001), 主要步骤为: 称取两份 0.2 g 沉积物样品, 将一份样品在马弗炉中于 450 °C 下灰化 3 h, 然后转移至离心管中, 加入 3.5 mol·L⁻¹ HCl 振荡提取 16 h, 用钼锑抗分光光度法测定上清液中磷含量, 计算得总磷 (TP) 含量; 另一份样品直接用 1 mol·L⁻¹ HCl 提取, 测定无机磷 (Pi) 含量. 有机磷 (Po) 含量通过 TP 与 Pi 相减差值计算.

磷形态分析采用 Hupfer 等 (1995) 提出的连续提取法, 选取滇池全部样品及红枫湖 H1、H3、H6、H8、H9、H10、H11 等样品, 依次采用 1 mol·L⁻¹ NH₄Cl、0.11 mol·L⁻¹ NaHCO₃/Na₂S₂O₄、1 mol·L⁻¹ NaOH、0.5 mol·L⁻¹ HCl 等试剂提取获得 NH₄Cl-P、BD-P、NaOH-P、HCl-P, 残渣经 450 °C 灼烧 3 h 后用 1 mol·L⁻¹ HCl 提取后测定得残渣态磷 (Residual-P, 简写 Res-P). 其中, 沉积物样品残渣经 1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液提取后, 取上清液分成两份, 一份经 K₂S₂O₈/H₂SO₄ 消解后测定提取液中磷含量, 为 NaOH-P; 另一份直接测定磷含量为 NaOH 提取活性磷 (NaOH-extractable reactive phosphorus, NaOH-rP), 两者差值为 NaOH 提取惰性磷 (NaOH-extractable nonreactive phosphorus, NaOH-nrP). 沉积物中有机磷

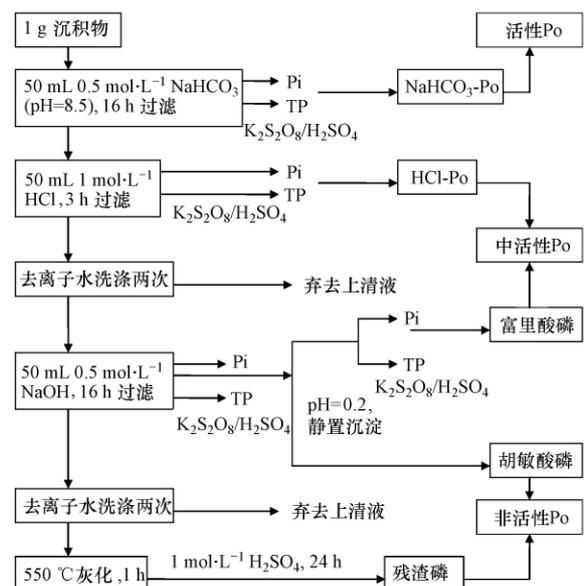


图 2 沉积物中有机磷分级提取程序

Fig. 2 The fractionation procedure of sedimentary Po

形态分级参照 Zhang 等(2008)的方法,取滇池 D1、D4、D7 及红枫湖 H3、H5、H6、H8、H11 等样品,具体步骤见图 2。

沉积物中生物有效磷(Bioavailable Phosphorus, BAP)主要包括水溶态磷(Water Soluble Phosphorus, WSP)、易解吸磷(Readily Desorbable Phosphorus, RDP)、藻类可利用磷(Algal Available Phosphorus, AAP)和 NaHCO_3 可提取态磷(NaHCO_3 Extractable Phosphorus, 也称 Olsen-P)等 4 种形态(Zhou *et al.*, 2001) 样品选取同沉积物磷形态分析,分别用去离子水、 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 、 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$ 和 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ (pH = 8.5) 振荡提取,同上取上清液加以分析。实验中对所有样品均取 3 份平行测定并取其平均值,实验误差小于 5%。

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 表层沉积物中总磷含量的空间分布

两湖沉积物 TP 含量分布见图 3。滇池与红枫湖沉积物 TP 含量相近,分别为 $1373.8 \sim 4616.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1194.4 \sim 4324.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,并且具有明显的空间区域差异性,这与两湖流域的自然背景及不同区域污染源的类型有关。其中,滇池南部昆阳(D7)、海口(D6)含量最高,这是因为周边区域是我国重要的磷化工基地,集中了昆阳、海口、尖山、澄江等著名大型富磷矿区,其磷矿资源储量约为 21 亿 t,约占全国的 12%,近 30 多年来的大规模开采使大量的磷质被带入湖内;东北部区域(D3、D4)是花卉蔬菜的主产区,周边土壤全磷含量范围在 $0.5 \sim 7.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,有效磷为 $26.7 \sim 598.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷和有效磷均高于全国土壤平均值(张乃明等, 2007),因此,大量的农业径流输入使其沉积物磷含量较高;南部湖心(D5)受人为活动影响较小且常年受水动力扰动很难使磷被沉积下来,磷含量最低(朱元荣等, 2010a);红枫湖后午(H5)及其附近(H6)由于网箱养鱼及清镇发电厂排放的粉煤灰的沉降作用,导致沉积物总磷含量最高;南部羊昌河入湖处(H10)接纳了上游平坝县城富含营养盐的生活污水,以及雨水对原天峰化工有限公司磷矿石堆积区淋溶并将污水带入湖库,造成总磷较高的污染特征;猫跳河出口(H1)毗邻北湖网箱养鱼区域及人为活动频繁的旅游公司管理处,污染较为严重,磷含量也相对较高(朱元荣等, 2010b)。钟晓等(2004)研究表明,红枫湖网箱养鱼饵料主要由有机饲料

(豆饼、玉米)、微量元素(钙、磷)和维生素等组成。其中,含粗蛋白 30%,含磷量占总量的 7%。湖库区人工养殖的饵料系数达 3.0~4.0,饵料利用率一般为 40%~80%,人工投放的未被鱼类食用的饵料及鱼类的排泄物给水体带来了大量的磷,成为水体富营养化的又一来源。总体而言,两湖沉积物 TP 含量都处在相当水平,远高于长江中下游湖泊(朱广伟等, 2004)。

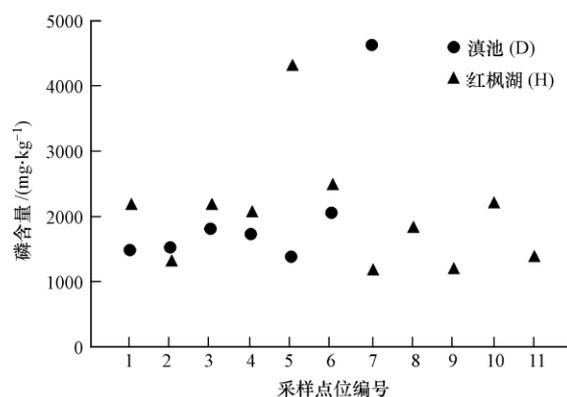


图 3 滇池、红枫湖表层沉积物中总磷含量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of TP in surface sediments from Lake Dianchi and Hongfeng

3.2 两湖沉积物磷形态特征比较

地球化学形态是判别沉积物中磷的迁移能力、生态效应的重要参数。化学连续提取法利用不同性质的化学提取剂,依次提取出沉积物中某种形态的磷而达到分离的目的,能较好地反映出沉积物磷的生物地球化学特征。两湖表层沉积物中各磷形态含量及其比例见图 4 和图 5。滇池不同区域沉积物中磷的形态分布差异较小,总体趋势为 $\text{NH}_4\text{Cl-P} < \text{BD-P} < \text{NaOH-P} < \text{HCl-P}$, Res-P ; 而红枫湖为 $\text{NH}_4\text{Cl-P} < \text{BD-P} < \text{HCl-P} < \text{Res-P} < \text{NaOH-P}$ 。两湖沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 比例不足 3%,但含量差别很大,滇池为

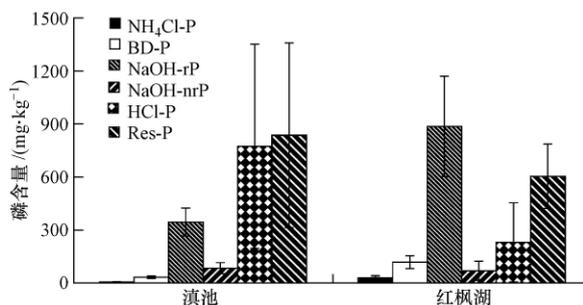


图 4 滇池、红枫湖表层沉积物中各磷形态的平均含量

Fig. 4 Average contents of various P fractions in the surface sediments from Lake Dianchi and Hongfeng

2.8 ~ 7.1 mg·kg⁻¹, 平均 4.9 mg·kg⁻¹, 而红枫湖为 7.8 ~ 65.9 mg·kg⁻¹, 平均 29.9 mg·kg⁻¹. NH₄Cl-P 为弱吸附态磷, 即在沉积物表面呈弱结合态、易于向水体释放的磷形态, 很容易被水生植物所利用, 季节变化明显, 对湖泊初级生产力有直接作用. 因此红枫湖沉积物中 NH₄Cl-P 向水体释放的风险较大.

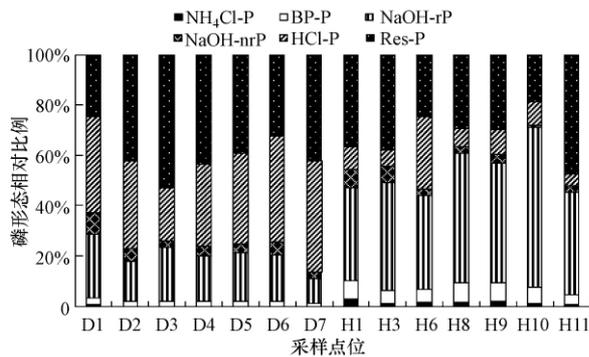


图5 滇池、红枫湖表层沉积物中各磷形态的相对比例

Fig. 5 The relative proportions of P fractions in the surface sediments from Lake Dianchi and Hongfeng

BD-P 是沉积物中易解吸且对氧化还原条件非常敏感的磷形态. 两湖沉积物中 BD-P 占总磷的比例均不高, 但红枫湖沉积物中 BD-P 平均含量大约是滇池的 3.6 倍, 这可能主要与滇池沉积物中有机质含量较高有关 (Ding *et al.*, 2010). 研究表明, 当沉积物有机质含量较高时会与 Fe 竞争成键, 从而抑制 BD-P 的形成 (Kleeberg *et al.*, 1997). 此外, 有机质分解产生的有机酸能以溶解态存在或在矿物表面与铁和铝形成稳定的络合物, 从而使铁、铝结合态磷释放出来 (Haynes *et al.*, 2001). 张路等 (2004) 研究发现, 蓝藻水华暴发的湖区沉积物中 BD-P 通常高于其他湖区. 由图 5 可见, 滇池西北部 D1 沉积物中高 BD-P 比例与该区域频发的蓝藻水华相一致. 与滇池相比, 红枫湖属于高原亚深水型湖泊 (最大水深 45 m, 平均水深 10.5 m), 水体季节性分层缺氧与突发性垂直对流混合并存, 所以沉积物中 BD-P 释放的潜在风险更高.

两湖沉积物中 NaOH-P 含量差异显著, 红枫湖 NaOH-P 占总磷的 39.8% ~ 64.2%, 而滇池仅为 12.6% ~ 33.7%. NaOH-P 包括与 Al、Fe 氧化物结合且易于与 OH⁻ 置换的磷形态 (NaOH-rP) 和多聚磷酸盐、有机磷及与腐殖质结合的磷 (NaOH-nrP). NaOH-rP 常用来评价沉积物中藻类可利用磷的含量, 目前已被人们作为判断沉积物污染程度的重要

依据之一 (康丽娟等, 2012). 当沉积物-水界面为厌氧条件时, 不溶的 Fe³⁺ 结合态的磷就会转换成可溶的 Fe²⁺ 结合态, 进而向上覆水体释放, 并促进浮游植物的生长繁殖. 红枫湖沉积物中 NaOH-rP 含量远高于滇池, 所以对水体富营养化的危害较大. 尽管 NaOH-nrP 通常为相对化学惰性的多聚磷酸盐, 但其中某些磷也可以转化为小分子正磷酸盐 (Rydin *et al.*, 2000). 例如, 在厌氧条件下, 细菌所积聚的多聚磷酸盐会释放 (Hupfer *et al.*, 1995), 强烈吸附于 Fe(OOH) 的肌醇六磷酸也更具迁移性 (De Groot *et al.*, 1993). 红枫湖沉积物中 NaOH-nrP 含量明显高于滇池, 这可能主要与其相对远离城市紧靠乡村, 受农业径流输入的影响更为严重有关 (Zhang *et al.*, 2008).

两湖沉积物中 HCl-P 含量差异也较大. HCl-P 即钙磷, 一般不易释放, 但在 pH 低、酸度增加时可转化为可溶性磷酸盐 (Kaiserli *et al.*, 2002). 滇池沉积物中 HCl-P 占 TP 的比例为 20.9% ~ 44.2%, 平均 35.5%; 而红枫湖仅为 4.7% ~ 29.0%, 平均为 10.9%. 当湖泊沉积物中金属含量 Ca/(Fe + Al) 值 > 0.7 时, 为钙质沉积物 (Ding *et al.*, 2010). 本研究中滇池沉积物中 Ca/(Fe + Al) 值为 0.65 ~ 0.88, 而红枫湖沉积物中 Ca/(Fe + Al) 值为 0.12 ~ 0.51, 表明滇池沉积物为典型的钙质沉积物, 而红枫湖沉积物为非钙质沉积物. 此外, 滇池年平均温度约 17 °C, 水体 pH 为 8.5 ~ 10.3 (Hu *et al.*, 2007), 这些背景值均高于红枫湖年平均温度 14 °C、pH 为 7.4 ~ 8.4 的背景值 (黎文等, 2006). 因此, 滇池湖内正磷酸盐被吸附到 CaCO₃ 沉淀上或者与 CaCO₃ 沉淀发生共沉淀, 共沉淀的作用随着温度和 pH (在 8.0 ~ 10.0 范围内) 的增加而加强 (Boström *et al.*, 1988), 这个自然机制阻碍了滇池沉积物中 HCl-P 的释放.

Res-P 主要为大分子有机磷或其他难溶性磷, 活性较低, 基本不易发生变化, 被认为是永久结合态磷 (Hupfer *et al.*, 1995). 虽然两湖沉积物中 Res-P 含量及所占比例都较高, 但相对较为稳定, 大部分会被沉积物埋藏, 难以再生释放出来.

有机磷作为湖泊沉积物中重要的组成部分, 是不容忽视的潜在生物有效磷源, 因而对湖泊富营养化具有重要作用 (Zhang *et al.*, 2008). 滇池、红枫湖沉积物 Po 含量分别为 444.5 ~ 969.6 mg·kg⁻¹、392.3 ~ 1144.7 mg·kg⁻¹, 占 TP 的 44.0%、50.1%. 各形态有机磷含量顺序为: 残渣磷 > 胡敏酸磷 > 富

里酸磷, $\text{HCl-Po} > \text{NaCO}_3\text{-Po}$, 相对比例见图 6. 两湖沉积物中 Po 的含量明显高于长江中下游湖泊, 但形态组成特征相似, 均以非活性有机磷和中活性有机磷为主, 活性有机磷不足总 Po 的 6% (Jin *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2008). Rydin (2000) 研究发现, 瑞典 Erken 湖沉积物中近 50% 的有机磷可以降解转化为生物可利用的磷形态. 沉积物中有机磷主要通过磷酸酶水解、细菌降解或光解等作用后转化为生物活性磷, 通过间隙水向上覆水体迁移释放 (Reitzel *et al.*, 2007). 所以, 非活性有机磷可能只是化学溶解上的相对“惰性”, 仍具有潜在的生物活性, 但目前这方面的研究十分薄弱 (吴丰昌等 2010).

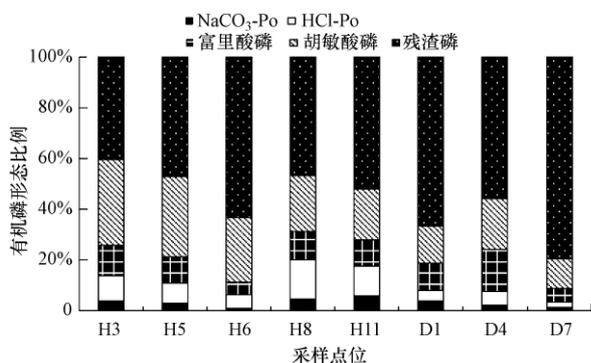


图 6 滇池、红枫湖表层沉积物中有机磷形态的相对比例

Fig. 6 The relative proportions of Po fractions in the surface sediments from Lake Dianchi and Hongfeng

3.3 两湖沉积物生物有效磷分析

BAP 可表征沉积物中潜在的生物可利用磷, 可通过化学和生物作用的转化进入水体, 并与水体磷负荷呈正相关关系 (Mhamdi *et al.*, 1994). 滇池、红枫湖沉积物中生物有效磷含量分别为 $157.7 \sim 348.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $244.7 \sim 1164.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占总磷的 5.7% ~ 18.2%、11.2% ~ 52.5%. 通过对比研究还发现, 红枫湖沉积物生物有效磷比例与太湖相近 (王琦等 2006), 远高于滇池. 综合前面沉积物 TP 含量比较, 以及滇池水体 TP 浓度 ($0.118 \sim 0.317 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 常年高于太湖 ($0.05 \sim 0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的现状 (Hu *et al.*, 2007; 袁和忠等 2010), 发现沉积物仍是水体磷的重要来源, 其内源磷释放对湖泊富营养化及蓝藻水华暴发具有重要作用影响.

两湖沉积物中各形态生物有效磷的相对比例见图 7, 变化顺序为 $\text{AAP} > \text{Olsen-P} > \text{WSP} > \text{RDP}$. 藻类可利用磷 (AAP) 表示有氧条件下湖泊光合层中藻类可利用磷含量, 是两湖沉积物最主要的 BAP 形态. Olsen-P 主要为活性较高的 Ca-P. 研究表明, 当

沉积物中 $\text{Olsen-P} > 46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 沉积物就具有较高的营养水平 (Zhou *et al.*, 2001). 本研究除 D5 外, 其他样点沉积物 Olsen-P 均大于 $46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与两湖所处的重富营养化状态非常吻合. RDP 与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 相似, 为吸附于沉积物表面且极易解析释放的磷形态, 在水动力的影响下会迅速释放. WSP 为水可溶性磷, 是较易释放于水体的磷形态. 尽管两湖沉积物中 RDP、WSP 的含量及比例都较低, 但红枫湖明显高于滇池, 这可能主要与深水湖泊水动力扰动相对较小有关.

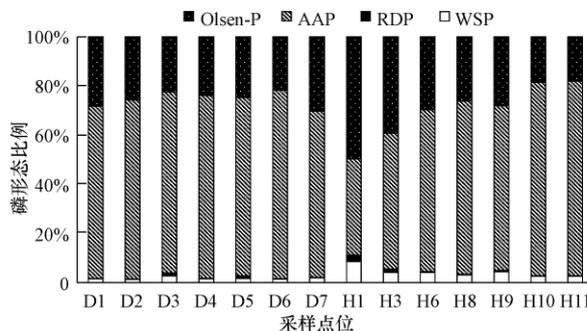


图 7 滇池、红枫湖表层沉积物中各种生物有效磷形态的相对比例

Fig. 7 The relative proportions of bioavailable P forms in surface sediments from Lake Dianchi and Hongfeng

3.4 两湖沉积物中磷形态的相关性分析

在沉积物磷形态分析中, 通常也将 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、BD-P、 NaOH-rP 的加和定义为活性磷 (Kaiserli *et al.*, 2002). 两湖沉积物中不同磷形态之间的相关关系见表 1. 沉积物中 Olsen-P、WSP 与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、BD-P、 NaOH-rP 及活性磷呈显著正相关, 而与 NaOH-nrP 、 HCl-P 、Res-P 等非活性磷形态相关性不显著. 这表明沉积物中不同活性磷形态之间的迁移转化可能具有一致性, 但与非活性磷形态不同. 进一步从 BAP 不同形态与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、BD-P、 NaOH-rP 等的相关性分析可以看出, 活性磷形态之间的相互转化也很复杂. 总体而言, 沉积物 TP 与 BAP 相关性并不显著, 进一步说明不能以 TP 含量来单一评价湖泊的富营养化状况, 需与其他具体的形态分析相结合 (Zhou *et al.*, 2001).

此外, 滇池沉积物中 BAP、AAP 与各种磷形态相关性不显著, 而红枫湖沉积物中 BAP、AAP 与 NaOH-rP 及活性磷显著相关, 这主要与两湖沉积物中磷形态的不同组成有关. 滇池沉积物中 RDP 与 BD-P、 NaOH-rP 及活性磷表现出显著相关性, 而在红枫湖沉积物中分别与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 NaOH-nrP 显著相

关 表明两湖沉积物中磷形态间的迁移转化过程有所不同. 总体来看, Olsen-P 可作为评价两湖沉积物

潜在释磷能力及其环境风险的重要指标.

表 1 滇池、红枫湖表层沉积物磷形态间的相关性

Table 1 Correlations between bioavailable P forms and P fractions in surface sediments from Lake Dianchi and Hongfeng

磷形态		NH ₄ Cl-P	BD-P	NaOH-rP	NaOH-nrP	HCl-P	Res-P	活性磷	TP
BAP	滇池	0.276	0.264	0.643	0.077	0.030	0.181	0.624	0.113
	红枫湖	0.193	0.322	0.808*	0.659	0.092	0.563	0.776*	0.251
AAP	滇池	0.126	0.098	0.513	0.231	0.159	0.092	0.488	0.010
	红枫湖	0.285	0.222	0.764*	0.711	0.044	0.594	0.723	0.173
Olsen-P	滇池	0.915**	0.944**	0.986**	0.612	0.517	0.470	0.989**	0.565
	红枫湖	0.619	0.883**	0.871*	0.336	0.290	0.337	0.915**	0.550
WSP	滇池	0.590	0.616	0.933**	0.286	0.454	0.549	0.926**	0.559
	红枫湖	0.429	0.754*	0.798*	0.272	0.345	0.356	0.828*	0.544
RDP	滇池	0.732	0.760*	0.957**	0.473	0.577	0.561	0.961**	0.634
	红枫湖	0.862*	0.699	0.316	0.882**	0.000	0.607	0.179	0.476

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ $n = 7$.

4 结论(Conclusions)

1) 滇池与红枫湖表层沉积物 TP 含量相近, 高达 $4000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上, 但沉积物中磷的形态组成有所不同, 滇池为 HCl-P , $\text{Res-P} > \text{NaOH-P} > \text{BD-P} > \text{NH}_4\text{Cl-P}$, 而红枫湖中 NaOH-P 最高, Res-P 和 HCl-P 次之, BD-P 、 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 最低. 非活性有机磷均为两湖沉积物中有机磷的主要形态.

2) 红枫湖沉积物中 BAP 含量明显高于滇池, 但各 BAP 形态变化一致, 为 $\text{AAP} > \text{Olsen-P} > \text{WSP} > \text{RDP}$. 其中, Olsen-P 与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 BD-P 、 NaOH-rP 及活性磷呈显著正相关, 可作为评价两湖沉积物潜在释磷能力及其环境风险的重要指标.

参考文献(References):

Boström B, Andersen J M, Fleischer S, et al. 1988. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface [J]. *Hydrobiologia*, 170: 229-244

De Groot C, Golterman H. 1993. On the presence of organic phosphate in some Carmargue sediments: evidence for the importance of phytate [J]. *Hydrobiologia* 252: 117-126

Ding S M, Bai X L, Fan C X, et al. 2010. Caution needed in pretreatment of sediments for refining phosphorus-31 nuclear magnetic resonance analysis: Results from a comprehensive assessment of pretreatment with ethylenediaminetetraacetic acid [J]. *Journal of Environmental Quality* 39: 1668-1678

高丽 杨浩 周健民. 2004. 滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究 [J]. *环境科学学报* 24(5): 776-781

Haynes R J, Mokolobate M S. 2001. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by addition of organic residues: A critical

review of the phenomenon and the mechanisms involved [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 59(1): 47-63

Hu J, Shen Q, Liu Y D, et al. 2007. Mobility of different phosphorus pools in the sediment of Lake Dianchi during cyanobacterial blooms [J]. *Environmental Monitoring Assessment* 132: 141-153

Hupfer M, Gächter R, Giovanoli R. 1995. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis [J]. *Aquatic Sciences* 57: 305-324

Jin X C, Wang S R, Chu J Z, et al. 2008. Organic phosphorus in shallow lake sediments in middle and lower reaches of the Yangtze River area in China [J]. *Pedosphere* 18(3): 394-400

Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. 2002. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia, N, Greece [J]. *Chemosphere*, 46: 1147-1155

康丽娟 孙从军 李小平. 2012. 淀山湖沉积物磷分布特征 [J]. *环境科学学报* 32(1): 190-196

Kleeberg A, Kozerski H P. 1997. Phosphorus release in lake Großer Müggelsee and its implications for lake restoration [J]. *Hydrobiologia* 342/343: 9-26

黎文 吴丰昌 傅平青, 等. 2006. 贵州红枫湖水体溶解有机质的剖面特征和季节变化 [J]. *环境科学* 27(10): 1979-1985

马荣华 杨桂山 段洪涛, 等. 2011. 中国湖泊的数量、面积与空间分布 [J]. *中国科学: 地球科学* 41(3): 394-401

Mhamdi M A, Aleya L, Devaux J. 1994. Phosphorus exchanges between sediment and water in trophically different reservoirs [J]. *Water Research* 28(9): 1971-1980

Reitzel K, Ahlgren J, DeBrabandere H, et al. 2007. Degradation rates of organic phosphorus in lake sediment [J]. *Biogeochemistry* 82: 15-28

Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, et al. 2001. Harmonized protocol and certified referencematerial for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent works [J]. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry* 370: 224-228

Rydin E. 2000. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment

- [J]. *Water Research* 34: 2037-2042
- Schelske C L. 2009. Eutrophication: Focus on phosphorus [J]. *Science*, 324(5928): 722-724
- 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): 120-167
- 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 2010. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性 [J]. *湖泊科学* 22(1): 1-7
- 吴峰伟, 汪福顺, 吴明红, 等. 2009. 滇池、红枫湖沉积物中总磷、分态磷及生物硅形态与分布特征 [J]. *生态学杂志* 28(1): 88-94
- 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 2010. 太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析 [J]. *环境科学* 31(4): 954-960
- 张路, 范成新, 池俏俏, 等. 2004. 太湖及其主要入湖河流沉积物磷形态分布研究 [J]. *地球化学* 33(4): 423-432
- 张乃明, 李成学, 李阳红. 2007. 滇池流域土壤磷累积特征与释放风险研究 [J]. *土壤* 39(4): 665-667
- Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, *et al.* 2008. Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China [J]. *Environmental Pollution*, 152: 366-372
- 钟晓, 廖国华, 孙伟. 2004. 红枫湖、百花湖网箱养鱼对湖库水质的影响分析及水资源保护 [J]. *贵州师范大学学报* 22(4): 34-38
- Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. 2001. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK [J]. *Chemosphere* 42: 221-225
- 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 2004. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系 [J]. *环境科学学报* 24(3): 381-388
- 朱元荣, 张润宇, 吴丰昌. 2010a. 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
- 朱元荣, 张润宇, 吴丰昌, 等. 2010b. 贵州红枫湖沉积物生物可利用磷分布特征及其与粒径的关系 [J]. *湖泊科学* 22(4): 513-520