

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0073

马双丽,倪兆奎,王圣瑞,等.2016.鄱阳湖沉积物有机磷形态及对水位变化响应[J].环境科学学报,36(10):3607-3614

Ma S L, Ni Z K, Wang S R, et al. 2016. Organic phosphorus forms in sediments and their relationship with the change of water level in Poyang Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(10):3607-3614

鄱阳湖沉积物有机磷形态及对水位变化响应

马双丽^{1,2}, 倪兆奎², 王圣瑞^{2,*}, 李晓秀¹, 倪栋³

1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048

2. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 湖泊生态创新基地, 国家环境保护湖泊污染控制实验室, 北京 100012

3. 公路交通环境保护技术交通行业重点实验室, 北京 100088

收稿日期: 2015-12-21

修回日期: 2016-02-26

录用日期: 2016-02-26

摘要:选取鄱阳湖枯水期不同高程出露表层沉积物,通过研究有机磷含量及形态差异,试图揭示江湖关系变化引起的水位下降对鄱阳湖沉积物有机磷潜在释放风险的影响.结果表明:①鄱阳湖枯水期表层沉积物有机磷含量($115.2\sim 448.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)占总磷的 19.3%~45.1%,有机磷含量空间分布呈“五河”入湖尾闾区高于湖心区和北部湖区.②鄱阳湖表层沉积物各形态有机磷含量大小顺序为:残渣态有机磷>盐酸提取有机磷>胡敏酸有机磷>碳酸氢钠提取有机磷>富里酸有机磷.③水位下降引起的沉积物出露时间延长是引起鄱阳湖不同高程沉积物有机磷形态变化的重要原因.沉积物出露时间越长,碳酸氢钠提取有机磷、盐酸提取有机磷与富里酸有机磷的含量越低,而胡敏酸有机磷和残渣态有机磷含量越高.同时,水位下降引起的沉积物出露时间延长致使活性有机磷和中活性有机磷占总有机磷比例下降,而非活性有机磷占总有机磷比例增加,反映了沉积物出露时间延长可能会促进有机磷形态由活性向非活性转化,在一定程度上能够降低沉积物有机磷的潜在性风险.

关键词:鄱阳湖;沉积物;有机磷形态;水位变化

文章编号:0253-2468(2016)10-3607-08

中图分类号:X524,X17

文献标识码:A

Organic phosphorus forms in sediments and their relationship with the change of water level in Poyang Lake

MA Shuangli^{1,2}, NI Zhaokui², WANG Shengrui^{2,*}, LI Xiaoxiu¹, NI Dong³

1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Research Center of Lake Eco-environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Beijing 100012

3. China Communications and Transportation Industry Key Laboratory of Environmental Technology, Beijing 100088

Received 21 December 2015;

received in revised form 26 February 2016;

accepted 26 February 2016

Abstract: The content and forms of organic phosphorus (OP) in Poyang Lake from different sediment in dry season were studied, to evaluate the role of water level change on potential release risk of OP in surface sediment. Results show that: ①The content of OP in surface sediment in dry season range between 115.2 to $448.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, accounting for 19.3%~45.1% of TP. OP content of sediment in "Five rivers" lake rump area was more than that in central and northern area. ②The order of OP content with different forms was $\text{Res-P}_o > \text{HCl-P}_o > \text{Hum-P}_o > \text{NaHCO}_3\text{-P}_o > \text{Ful-P}_o$. ③When the water level declined, the sediment exposed time prolonged, which was the most important reason for the change of OP's forms in the different elevations sediments of Poyang Lake. With the increase of exposure time of sediment, the content of $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$, HCl-P_o and Ful-P_o decreased, while Hum-P_o and Res-P_o content increased. Meanwhile, the prolonged sediment exposure time caused by the declining of water level resulted in the proportion of Lab-P_o and Mod-P_o 's content decreased, while the proportion of Non-P_o 's content increased, which reflected the prolonging sediments exposure time may promote OP morphology from active to inactive transformation, to a certain extent can reduce sediment OP's potential risk.

Keywords: Poyang Lake; sediment; organic phosphorus's forms; the change of water level

基金项目: 国家自然科学基金(No.41173118);国家重点基础研究发展规划项目(No.2012CB417004)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.41173118) and the National Key Basic Research Development Plan Project(No.2012CB417004)

作者简介: 马双丽(1991—),女,E-mail:mslyouzhi@163.com; *通讯作者(责任作者),E-mail:wangsr@craes.org.cn

Biography: MA Shuangli(1991—),female,E-mail:mslyouzhi@163.com; *Corresponding author,E-mail:wangsr@craes.org.cn

1 引言 (Introduction)

磷是引起湖泊富营养化的主要限制元素 (Ahlgren *et al.*, 2005). 当湖泊外源磷得到控制后, 沉积物磷的释放将成为水体富营养化的重要来源 (任万平等, 2012). 沉积物磷的释放风险 (即活性) 主要取决于磷的赋存形态 (高海鹰等, 2008), 而内源有机磷是沉积物磷的重要组分, 其分解过程是沉积物磷形态转化的重要环节 (Zhang *et al.*, 2008). 在一定条件下, 有机磷可经生物磷酸酶水解, 细菌降解或光解等作用转化成生物活性较高的无机磷, 经间隙水释放到上覆水, 维持浮游生物的生长, 磷酸脂类等有机磷组分的矿化为浮游藻类提供了重要磷源, 从而对湖泊水质产生影响 (Ahlgren *et al.*, 2005). 然而由于对有机磷释放风险认识不足和测试方法的限制, 导致对沉积物有机磷形态转化、循环机制的研究相对较少 (张路, 2008; 孙静等, 2011). 因此, 对沉积物有机磷及形态转化机制的研究将会进一步加深对湖泊磷循环与水质关系的理解.

鄱阳湖是长江流域最大的通江湖泊, 水位年内、年际变化较大, 尤其是 2003 年以后, 受长江三峡工程运行和气候变化等影响, 鄱阳湖江湖关系发生显著变化, 其水情主要表现出枯水期最低水位出现时间提前并且延长, 沉积物出露水面时间提前和延长 (何宗健等, 2014). 该变化致使鄱阳湖沉积物物理、化学和生物特征等发生一系列改变, 最终导致沉积物磷含量、形态及生物有效性发生显著改变 (Ni *et al.*, 2015; 刘凯等, 2015), 这在一定程度上将增加来年丰水期沉积物覆水后水质下降的风险. 而有机磷是鄱阳湖沉积物磷的重要组分, 约占沉积物总磷的 10.01%~18.32% (向速林和周文斌, 2010), 其潜在释放风险较大. 江湖关系变化引起鄱阳湖枯水期水位持续下降并且持续时间延长, 致使不同高程沉积物出露水面的时间出现差异, 即高程越高, 沉积物出露时间越早, 持续时间越长; 沉积物出露时间延长使其理化性质, 如 DO、Eh、pH、温度和酶活性等发生变化, 进而对有机磷 (OP) 的含量、形态和生物有效性产生影响, 最终对鄱阳湖水质产生潜在威胁.

因此, 本研究选取枯水期不同高程表层沉积物作为研究对象, 通过对比不同高程沉积物有机磷含量及形态和生物有效性差异, 试图揭示由于水位变化引起的沉积物出露时间延长对沉积物有机磷形态和活性及潜在释放风险的影响, 进而揭示该变化对鄱阳湖水质的影响, 以期对鄱阳湖沉积物磷释放

机制及湖泊水环境保护提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区概况

鄱阳湖是中国最大的淡水湖, 位于长江中下游南侧, 江西省北部. 介于 28°22'~29°45'N, 115°47'~116°45'E 之间, 上承“五河” (赣江、抚河、修水、信江、饶河五大水系) 来水, 下接长江. 湖区以松门山为界, 南部宽广, 为主湖区, 水位较浅; 北部狭长, 为入江水道, 水位较深. 鄱阳湖年内丰枯水期水位变化较大, 呈现夏水冬陆的水陆交替景观, 具有“高水是湖, 低水是河”的独特地理特征 (Zhang *et al.*, 2012). 鄱阳湖水质近年来呈现下降趋势 (李博之等, 1996), 营养水平呈上升趋势, 目前维持在中营养水平 (王圣瑞, 2014).

2.2 样品采集及前处理

根据鄱阳湖 1952—2010 年枯水期 (10 月份—次年 3 月) 水位平均范围约在 9.61~13.81 m 之间的实际情况 (闵騫和占腊生, 2012), 本研究枯水期沉积物高程集中在 10~13 m 之间, 均露出水面. 于 2012 年 11 月枯水位期间, 利用高程图及麦哲伦 315 型 GPS 导航仪定位, 选取北部湖区、湖心区及“五河”入湖尾间区 (湖区的划分: 北部湖区是指鄱阳湖靠近湖口和星子的位于鄱阳湖北部的湖区; “五河”入湖尾间区是指鄱阳湖靠近赣江、抚河、信江、饶河和修水入湖口附近的湖泊区域; 鄱阳湖区中除了北部湖区和“五河”入湖尾间区的部分就是湖心区基本位于鄱阳湖的中间位置附近的区域.) 共 14 个出露点位, 采集 0~5 cm 表层沉积物样品, 各采样点高程见表 1, 采样点位如图 1 所示.

表 1 鄱阳湖沉积物采样点所处湖区吴淞高程

采样点	湖区	吴淞高程/m	特点	
N1	北部湖区	12~13	航道区	无植物
N2		11~12	航道区	无植物
N3		10~11	航道区	无植物
N4		10~11	航道区	无植物
C1	湖心区	12~13	畅水区	有植物
C2		11~12	畅水区	有植物
C3		11~12	畅水区	有植物
C4		10~11	畅水区	有植物
C5		10~11	畅水区	沉水植物
S1	“五河”入湖尾间区	12~13	畅水区	无植物
S2		11~12	畅水区	有植物
S3		11~12	畅水区	无植物
S4		10~11	水产区	无植物
S5		10~11	畅水区	无植物

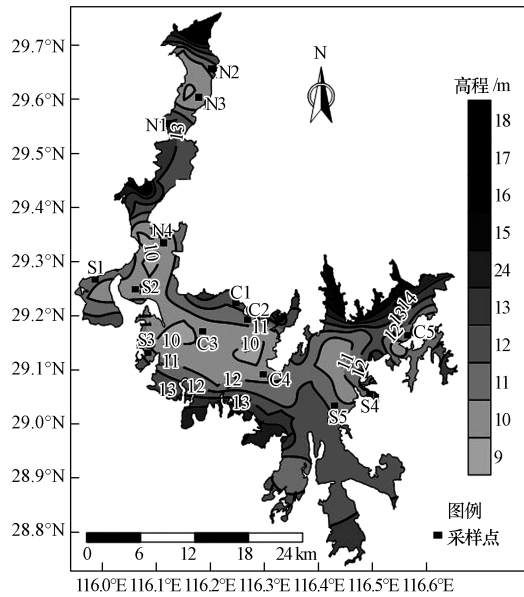


图 1 鄱阳湖采样点高程示意图

Fig.1 The elevations of Poyang Lake sampling sites

采集的样品置于恒温箱内(4 ℃),密封保存,迅速运回实验室冷冻干燥,研磨过 100 目筛,密封保存备用.

2.3 实验方法

沉积物有机磷形态采用 Ivanoff 法进行测试 (Ivanoff *et al.*, 1998).具体方法如图 2 所示.

表层沉积物样品含水率的测定 采用标准烘干法 GB7172-87(国家标准局,1987).

金属含量测定 将沉积物样品用硝酸微波消解进行前处理,然后用美国 Agilent 公司生产的电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定鄱阳湖表层沉积物样品中的 Fe、Al、Ca 金属元素.

2.4 质量控制

每个样品平行测定 2 次,误差小于 5%.

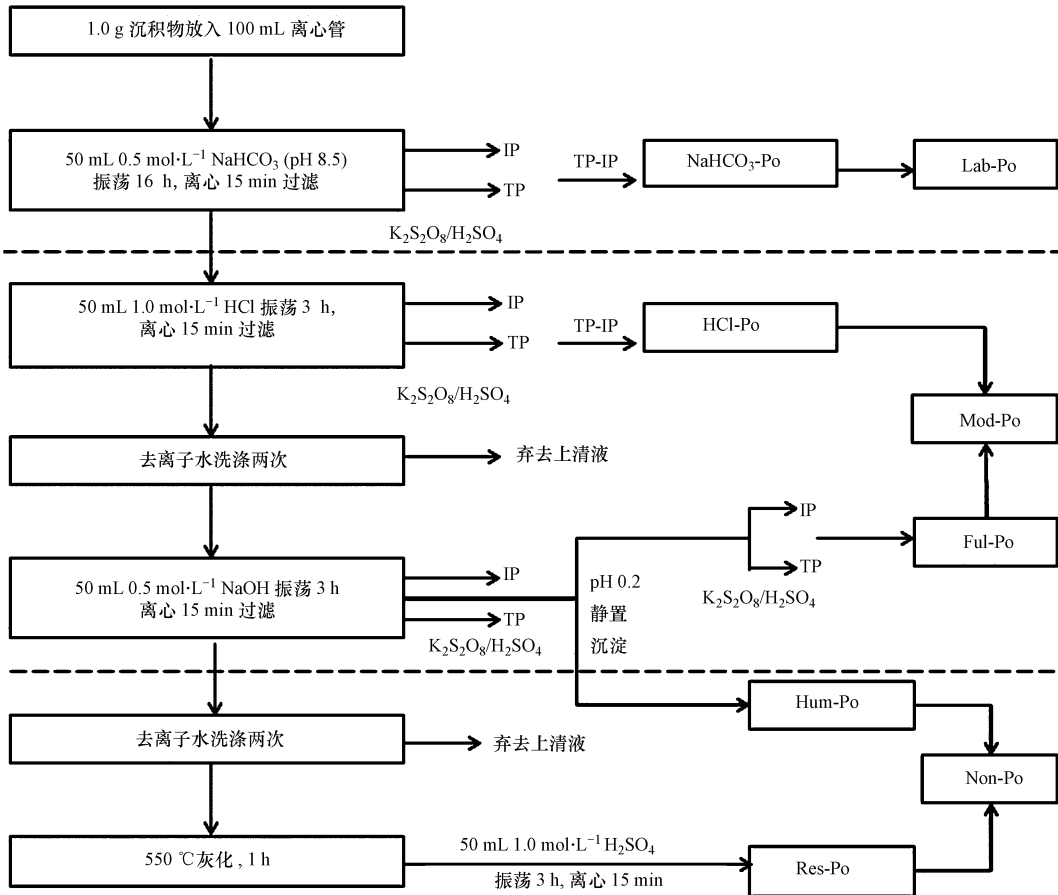


图 2 鄱阳湖沉积物有机磷分级提取流程图(注:图中,TP;总磷,IP;无机磷,NaHCO₃-P_o;NaHCO₃提取有机磷,HCl-P_o;HCl 提取有机磷,Ful-P_o;富里酸有机磷,Hum-P_o;胡敏酸有机磷,Lab-P_o;高活性有机磷,Mod-P_o;中等活性有机磷,Non-P_o;非活性有机磷,Res-P_o;残渣态有机磷)

Fig.2 Extraction process of Poyang Lake sediment organic phosphorus

3 结果(Results)

3.1 鄱阳湖枯水期不同高程表层沉积物 OP 含量分布特征

鄱阳湖枯水期出露表层沉积物 TP 含量在 $373.3 \sim 1072.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $(579.6 \pm 218.5) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,空间分布呈现“五河”入湖尾闾区 ($662.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 湖心区 ($564.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 北部湖区 ($494.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (图 3) 的分布特征.沉积物 OP 含量在 $115.2 \sim 448.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $(203.9 \pm 93.3) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 TP 的 19.3% ~ 45.1%,平均值为 $35.3\% \pm 7.4\%$ (图 3).OP 与 TP 的空间分布特征基本一致,“五河”入湖尾闾区 ($(237 \pm 11.9) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 湖心区 ($(190.6 \pm 9.5) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 北部湖区 ($(179.3 \pm 8.9) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),这可能是由于“五河”来水携带大量工农业废水,从而导致“五河”入湖尾闾区沉积物

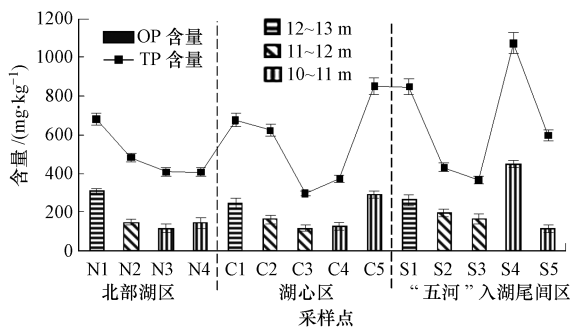


图 3 鄱阳湖不同高程沉积物 TP 和 OP 含量

Fig.3 Content of total phosphorus and organic phosphorus in different sediment of Poyang Lake

OP 含量较高;而北部湖区和湖心区直接入湖污染负荷相对较小,因此,其沉积物 OP 含量相对较低(王圣瑞等,2012).

鄱阳湖 OP 平均含量较高,根据污染程度与 OP 含量的关系可知(廖剑宇等,2010),鄱阳湖沉积物处于中度污染水平.OP 含量的分布特征与不同湖区受污染程度关系密切(霍守亮等,2011).

不同湖区、不同高程出露沉积物 OP 含量均表现出 $12 \sim 13 \text{ m} > 11 \sim 12 \text{ m} > 10 \sim 11 \text{ m}$ 的特点,而湖心区 C5 点含量较高,则是因为该点靠近信江入湖口,信江上游磷矿产生的废水导致该点 OP 含量较高(何宗健等,2014;胡振鹏等,2010).S4 点含量较高,则是因为该点位于饶河附近,靠近养殖业发达的鄱阳县,水产养殖等产生的废水经雨水冲刷,随饶河被携带进入湖区而在该处沉积,从而导致该点位沉积物 OP 含量较高(何宗健等,2014).

此外,通过对比无植物航道区和有植物畅水区和无植物畅水区表层沉积物 OP 含量(见表 2),发现无植物航道区的表层沉积物 OP 含量低于无植物畅水区;可能是随着水位下降,航道区受水体的扰动作用较强导致表层沉积物发生再悬浮等而使得表层沉积物中的 OP 发生迁移;而无植物畅水区表层沉积物 OP 含量高于有植物畅水区,这可能是因为在水位逐渐降低的过程中,有植物的畅水区由于受到植物的作用,使得有植物畅水区表层沉积物 OP 含量较低.各形态 OP 的分布特征则呈现略微差别,除 HCl-P_o 和 Hum-P_o 外,其它形态 OP 均与总有机磷的特征相同.

表 2 鄱阳湖航道区和畅水区表层沉积物有机磷含量对比

Table 2 Comparison of organic phosphorus's content in the surface sediments of channel area with smooth water area in Poyang Lake

不同形态表层沉积物 OP 含量	表层沉积物 OP 平均含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	表层沉积物 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 平均含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	表层沉积物 HCl-P_o 平均含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	表层沉积物 Ful-P_o 平均含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	表层沉积物 Hum-P_o 平均含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	表层沉积物 Res-P_o 平均含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
无植物航道区	167.1	29.4	38.8	12.5	29.6	56.9
无植物畅水区	223.9	46.7	37.7	30.8	28	80.6
有植物畅水区	167	28.3	39.1	11.3	35.9	52.4

3.2 鄱阳湖枯水期不同高程表层沉积物各形态 OP 含量分布特征

鄱阳湖不同高程表层沉积物各形态 OP 含量见图 4.全湖不同形态 OP 含量表现为 $\text{Res-P}_o > \text{HCl-P}_o > \text{Hum-P}_o > \text{NaHCO}_3\text{-P}_o > \text{Ful-P}_o$. 其中, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 为 Lab-P_o , 主要由核酸、磷脂类和磷糖类化合物组成,

在沉积物中结合较为松散,易矿化分解(梁海清,2007).鄱阳湖表层沉积物 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 含量为 $12.6 \sim 92.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $(36.0 \pm 26.2) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 OP 的 10.6% ~ 29.9%,平均值为 $12.95\% \pm 6.8\%$.

HCl-P_o 为 Mod-P_o (包含植酸钙、镁等化合物)的主要组分,多为易分解的生物大分子,稳定性差,在

一定条件下可水解或矿化为小分子 OP 或溶解性正磷酸盐,具有潜在的生物有效性,与湖泊富营养化的关系比较密切(梁海清,2007),组成主要以磷酸酯、磷脂、核酸、磷蛋白和磷酸糖类为主(Ahlgren

et al., 2005). 鄱阳湖表层沉积物 HCl-P_o 含量为 17.9~52.5 mg·kg⁻¹, 平均含量为 (38.7±11.3) mg·kg⁻¹, 占 OP 的 12.1%~31.5%.

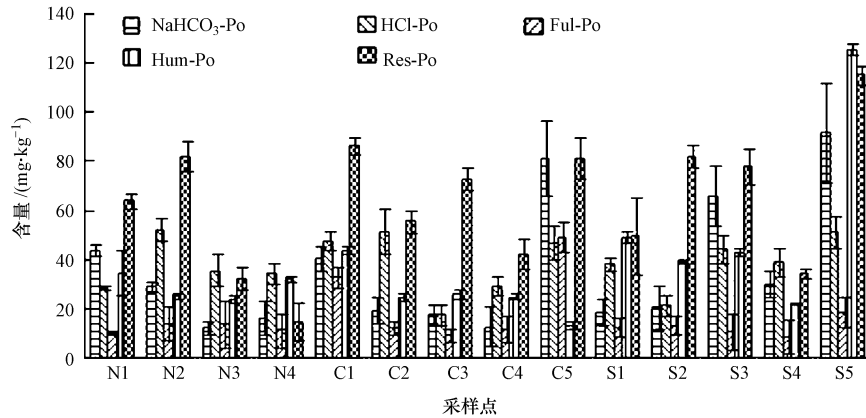


图4 鄱阳湖沉积物各形态 OP 含量分布

Fig.4 Distribution of different organic phosphorus forms' content in sediments from Poyang Lake

Ful-P_o 为 Mod-P_o, 与 NaHCO₃-P_o 相比其生物有效性较低,不易被植物吸收(梁海清,2007). 鄱阳湖表层沉积物 Ful-P_o 含量为 8.8~49.6 mg·kg⁻¹, 平均含量为 (16.6±11.3) mg·kg⁻¹, 占 OP 的 4.4%~18.1%, Hum-P_o 为 Non-P_o (主要由植酸铁、铝等化合物以及一些含 P 的螯合物组成), 主要由肌醇五磷酸和肌醇六磷酸(植酸)组成, 不易分解, 较难矿化(窠森,2010). 鄱阳湖表层沉积物 Hum-P_o 含量为 13.6~125.0 mg·kg⁻¹, 平均含量为 (38.0±27.2) mg·kg⁻¹, 占 OP 的 4.9%~31.2%.

Res-P_o 主要成分为植酸态磷, 是最不易被矿化和降解的 Non-P_o (Bowman and Cole, 1978). 鄱阳湖可提取的 Res-P_o 含量为 15.0~115.6 mg·kg⁻¹, 平均含量为 (64.0±26.9) mg·kg⁻¹, 占 OP 的 13.6%~50.6%.

在形态方面, 由图 5 可见, 枯水期沉积物高程越高, NaHCO₃-P_o、HCl-P_o 和 Ful-P_o 含量越低, 而 Hum-P_o 和 Res-P_o 含量越高. 其中, NaHCO₃-P_o 含量减少较为显著, 而 Res-P_o 增加较为显著, 这与不同形态 OP 受水位下降引起的沉积物理化性质变化密切相关(刘凯等,2015).

在 OP 活性方面, 鄱阳湖沉积物 OP 以 Mod-P_o 和 Non-P_o 为主, 其中 Lab-P_o 占 OP 的 10.6%~29.9%、Mod-P_o 占 OP 的 17.4%~41.8%、Non-P_o 占 OP 的 34.8%~68.7%, 不同湖区、不同高程出露沉积物 OP 活性表现出高程越高, Lab-P_o、Mod-P_o 占 OP

的百分比越低, Non-P_o 占 OP 的百分比越高(图 6).

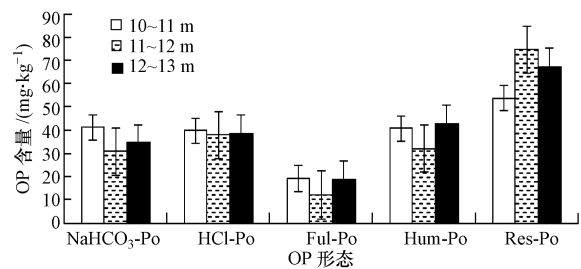


图5 鄱阳湖枯水期表层沉积物不同形态 OP 不同高程含量对比

Fig.5 Compare different elevation content of different organic phosphorus forms in the surface sediments from Poyang Lake in dry season

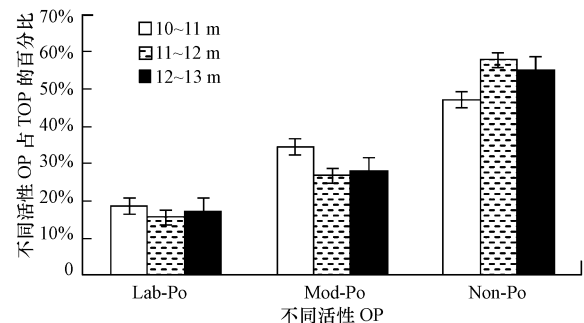


图6 鄱阳湖表层沉积物不同活性 OP 含量占 TOP 百分比

Fig.6 The percentage of different labile organic phosphorus content and total organic phosphorus content in the surface sediments of Poyang Lake

4 讨论 (Discussion)

4.1 水位下降对鄱阳湖表层沉积物 OP 含量及形态的影响

枯水期鄱阳湖不同高程表层沉积物 OP 含量表现出 10~11 m < 11~12 m < 12~13 m 的特点,即随着沉积物高程的升高,OP 含量呈增加趋势,这与枯水期鄱阳湖水位持续下降引起不同高程沉积物出露时间不同密切相关.随着沉积物出露时间的延长,沉积物生物、化学和物理性质均发生显著改变.生物方面,沉积物出露时间越长,表层沉积物暴露在富氧环境中的时间越长,厌氧细菌逐渐死亡,而好氧微生物数量逐渐增加,使得沉积物中的生物有机磷含量越高 (Ergin *et al.*, 1996; 王颖等, 2008).化学方面,随着高程的升高,铁铝钙等金属元素含量增加 (表 3),随着水位的下降,当沉积物处于富氧条件下,高程越高的沉积物,氧含量越高, Eh 升高,使得 Fe^{2+} 被氧化成 Fe^{3+} ,溶解性有机磷转化为不溶性的三价铁有机磷化合物而固定于沉积物中,进而使沉积物中有机磷含量升高 (曹琳, 2011).物理方面,沉积物暴露逐渐变干的过程,促使沉积物颗粒由细变粗,暴露时间越长其颗粒越粗、孔隙度越大,并且导致高程越高的沉积物含水率越低 (表 3),之前存在于水中的 OP 由于水分逐渐减少,而沉积于沉积物中.因此,沉积物高程越高,OP 含量越高.

表 3 鄱阳湖枯水期不同高程表层沉积物 Fe、Al、Ca 含量和含水率对比

Table 3 Comparison of content of Fe, Al, Ca and moisture content in the surface sediments from different elevation in Poyang Lake in dry season

高程/m	Fe 含量/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	Al 含量/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	Ca 含量/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	含水率
12~13	20479.04	28526.22	726.36	24.55%
11~12	21776.82	28241.76	666.84	30.63%
10~11	18300.14	23386.94	565.29	42.95%

鄱阳湖枯水期表层沉积物 OP 形态表现出沉积物高程越高, $NaHCO_3-P_o$ 、 $HCl-P_o$ 和 $Ful-P_o$ 含量越低,而 $Hum-P_o$ 和 $Res-P_o$ 含量越高.沉积物出露时间越长, $NaHCO_3-P_o$ 、 $HCl-P_o$ 和 $Ful-P_o$ 含量越低,这是因为这些形态的 OP 易受环境影响而发生矿化,出露沉积物在逐渐变干的过程中,含水率降低, Eh 升高,处于氧化环境,这些变化有利于活性和中活性有机磷发生矿化,因此,高程越高 $NaHCO_3-P_o$ 、 $HCl-$

P_o 和 $Ful-P_o$ 含量越低 (Paraskova *et al.*, 2014).而 $Hum-P_o$ 主要由肌醇磷酸类物质组成,受微生物影响较大.出露沉积物变干过程会引起厌氧微生物活性减弱甚至死亡 (Gordon *et al.*, 2008),致使沉积物 $Hum-P_o$ 分解作用降低 (Reitzel *et al.*, 2007).最终,沉积物高程越高, $Hum-P_o$ 累积越多. $Res-P_o$ 性质较为稳定,沉积物高程越高, $Res-P_o$ 含量越高,这是因为沉积物出露时间越长,蒸发作用时间越长,将更多的 $Res-P_o$ 由底层沉积物带入到表层,使其在表层呈现出富集现象,导致高程越高的表层沉积物 $Res-P_o$ 富集量越多.综上,水位下降导致的沉积物出露时间差异是引起鄱阳湖不同高程沉积物 OP 形态变化的重要原因之一.

4.2 水位下降对鄱阳湖表层沉积物 OP 形态影响的环境学意义

鄱阳湖沉积物 $Lab-P_o$ 、 $Mod-P_o$ 和 $Non-P_o$ 含量均呈现“五河”入湖尾闾区较高,湖心区和北部湖区较低分布特征,“五河”入湖尾闾区发生富营养化的风险要明显高于湖心区和北部湖区,因此应该重点加强对“五河”入湖尾闾区沉积物内源磷风险的控制.

鄱阳湖枯水期不同湖区、不同高程出露沉积物 OP 含量均呈现 $Non-P_o > Mod-P_o > Lab-P_o$.沉积物高程越高, $Lab-P_o$ 和 $Mod-P_o$ 含量越低,而 $Non-P_o$ 含量越高 (图 7).表层沉积物出露时间越长,与空气中的氧接触时间越长,促使更多的 $Lab-P_o$ 发生矿化作用 (Paraskova *et al.*, 2014),导致其在沉积物中的含量降低. $Mod-P_o$ 主要为植酸钙镁等化合物,有一定的活性,也可以发生部分矿化,而 $Non-P_o$ 主要由植酸铁、铝等化合物及一些含 P 的螯合物组成.随着水位的不断下降,沉积物通气性变好,含氧量增加, Eh 增大,进而促进了沉积物中氧化反应的发生,导致各种金属氧化物含量增加 (Gordon *et al.*, 2008; Reitzel *et al.*, 2007; Gomez *et al.*, 1999),进而使金

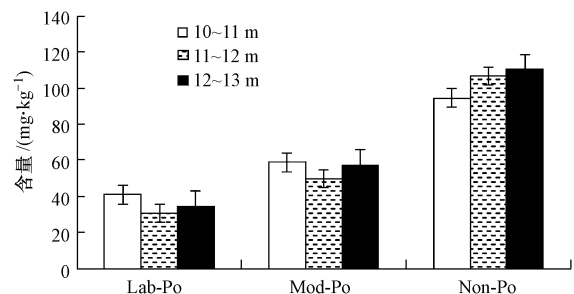


图 7 鄱阳湖不同高程不同活性 OP 含量分布

Fig. 7 The distribution of different active OP content in Poyang Lake

属氧化物结合 OP 的能力增强,最终导致 Non-P_o 含量升高。

此外,水位的下降,直接导致含水率的降低,进而会影响有机磷形态变化,通过分析枯水期鄱阳湖表层沉积物含水率与各形态有机磷之间的相关性(表 4),发现含水率与 OP($r=-0.018, p>0.05$)、Non-P_o($r=-0.242, p>0.05$)、Hum-P_o($r=-0.226, p>0.05$)和 Res-P_o($r=-0.203, p>0.05$)呈不显著的负相关关系。

表 4 鄱阳湖表层沉积物含水率与各有机磷形态之间的相关系数

Table 4 Correlations between moisture content and different forms of OP in the surface sediments from Poyang Lake

	OP	Lab-P _o	Mod-P _o	Non-P _o	HCl-P _o	Ful-P _o	Hum-P _o	Res-P _o	含水率
OP	1								
Lab-P _o	0.904**	1							
Mod-P _o	0.638*	0.632*	1						
Non-P _o	0.911**	0.701*	0.317	1					
HCl-P _o	0.563*	0.504	0.837**	0.327	1				
Ful-P _o	0.505	0.554*	0.837*	0.203	0.401	1			
Hum-P _o	0.749**	0.548*	0.138	0.886**	0.27	-0.039	1		
Res-P _o	0.864**	0.694**	0.424	0.884**	0.309	0.401	0.567*	1	
含水率	-0.018	0.164	0.313	-0.242	0.03	0.495	-0.226	-0.203	1

注:n=14,*表示显著相关 $p<0.05$;**表示极显著相关 $p<0.01$ 。

5 结论(Conclusion)

1) 鄱阳湖枯水期不同湖区表层沉积物总磷和有机磷含量均呈现“五河”入湖尾间区高于湖心区和北部湖区的分布特征。鄱阳湖枯水期表层沉积物各形态 OP 含量大小顺序为:Res-P_o>HCl-P_o>Hum-P_o>NaHCO₃-P_o>Ful-P_o,残渣态有机磷为有机磷的主要组成部分。

2) 水位下降后,出露时间越长,高程越高的表层沉积物 NaHCO₃-P_o、HCl-P_o与 Ful-P_o的含量越低,而 Hum-P_o和 Res-P_o含量越高。水位下降引起沉积物出露时间延长,导致高程越高的表层沉积物 Lab-P_o和 Mod-P_o含量越少,而 Non-P_o含量越多,反映了沉积物出露时间延长可能会促进 OP 形态由活性向非活性转化,在一定程度上能够降低枯水期沉积物有机磷的潜在性风险。

责任作者简介:王圣瑞(1972—),男,研究员,主要从事湖泊生态系统演变和退化机理研究,近年来发表 SCI 论文 40 余篇,核心期刊文章百余篇。E-mail:wangsr@craes.org.cn。

参考文献(References):

Ahlgren J, Tranvik L, Gogoll A, *et al.* 2005. Sediment depth attenuation

枯水期不同高程沉积物不同活性 OP 占 TOP 的比重具有一定的差异,即随着高程的增加,Lab-P_o和 Mod-P_o占 TOP 的比例下降,而 Non-P_o占 TOP 的比例升高,说明水位下降引起的沉积物出露时间延长导致 OP 形态可能由非稳态向稳态转化,在一定程度上降低了 OP 的释放风险。但是沉积物 OP 含量出现显著增加,表明沉积物 OP 的潜在释放风险仍然较大。

of biogenic phosphorus compounds measured by ³¹P NMR [J]. Environmental Science & Technology, 39(3): 867-872

Bowman R A, Cole C V. 1978. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Science, 125(2): 95-101

曹琳. 2011. 三峡库区消落带水-沉积物界面磷干湿交替分布特征及转化机理研究[D]. 重庆:重庆大学

窦森. 2010. 土壤有机质[M]. 北京:科学出版社. 200-300

Ergin M, Gaines A, Galletti G C, *et al.* 1996. Early diagenesis of organic matter in recent Black Sea sediments: characterization and source assessment[J]. Applied Geochemistry, 11(5): 711-720

高海鹰,刘韬,丁士明,等. 2008. 滇池沉积物有机磷形态分级特征[J]. 生态环境, 17(6): 2137-2140

Gomez E, Durillon C, Rofes G, *et al.* 1999. Phosphate adsorption and release from sediments of brackish lagoons: pH, O₂ and loading influence[J]. Water Research, 33(10): 2437-2447

Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D. 2008. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching [J]. Soil Biology and Biochemistry, 40(2): 302-311

国家标准局. 1987. GB 7172-1987 土壤水分测定法[S]. 北京:国家标准局

何宗健,吴志强,倪兆奎,等. 2014. 江湖关系变化对鄱阳湖沉积物氨氮释放风险的影响[J]. 中国环境科学, 34(5): 1277-1284

胡振鹏,葛刚,刘成林,等. 2010. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水水位对其影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 19(6): 597-605

霍守亮,李青芹,咎逢宇,等. 2011. 我国不同营养状态湖泊沉积物

- 有机磷形态分级特征研究[J]. 环境科学, 32(4): 1000-1007
- Ivanoff D B, Reddy K R, Robinson S. 1998. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols[J]. Soil Science, 163(1): 36-45
- 李博之. 1996. 鄱阳湖水体污染现状与水质预测、规划研究[J]. 长江流域资源与环境, 5(1): 60-66
- 梁海清. 2007. 湖泊沉积物有机磷、有机碳形态及其迁移、转化[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学
- 廖剑宇, 王圣瑞, 杨苏文, 等. 2010. 东部平原不同类型湖泊沉积物中有机磷的特征[J]. 环境科学研究, 23(9): 1142-1150
- 刘凯, 倪兆奎, 王圣瑞, 等. 2015. 鄱阳湖不同高程沉积物中磷形态特征研究[J]. 中国环境科学, 35(3): 856-861
- 闵骞, 占腊生. 2012. 1952-2011年鄱阳湖枯水变化分析[J]. 湖泊科学, 24(5): 675-678
- Ni Z K, Wang S R, Zhang L, *et al.* 2015. Role of hydrological conditions on organic phosphorus forms and their availability in sediments from Poyang Lake, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 22(13): 10116-10129
- Paraskova J V, Sjöberg P J R, Rydin E. 2014. Turnover of DNA-P and phospholipid-P in lake sediments[J]. Biogeochemistry, 119(1/3): 361-370
- Reitzel K, Ahlgren J, DeBrabandere H, *et al.* 2007. Degradation rates of organic phosphorus in lake sediment[J]. Biogeochemistry, 82(1): 15-28
- 任万平, 李晓秀, 张汪寿. 2012. 沉积物中磷形态及影响其释放的环境因素研究进展[J]. 环境污染与防治, 34(9): 53-60; 66
- 孙静, 王圣瑞, 曾清如, 等. 2011. 洱海表层沉积物有机磷形态分布特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 24(11): 1226-1232
- 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
- 王圣瑞. 2014. 鄱阳湖生态安全[M]. 北京: 科学出版社. 120-130
- 王颖, 沈珍瑶, 呼丽娟, 等. 2008. 三峡水库主要支流沉积物的磷吸附/释放特性[J]. 环境科学学报, 28(8): 1654-1661
- 向速林, 周文斌. 2010. 鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态及分布特征[J]. 湖泊科学, 22(5): 649-654
- 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
- Zhang L L, Yin J X, Jiang Y Z, *et al.* 2012. Relationship between the hydrological conditions and the distribution of vegetation communities within the Poyang Lake National Nature Reserve, China [J]. Ecological Informatics, 11: 65-75
- 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(2): 366-372