

# 南四湖微山湖区沉积物磷形态分布特征

张志斌<sup>1, 2</sup>, 张学杨<sup>1</sup>, 张波<sup>3</sup>, 李梅<sup>1</sup>, 黄清辉<sup>4</sup>, 李建华<sup>4</sup>

(1. 山东建筑大学市政与环境学院, 济南 250101; 2. 山东大学生命科学学院, 济南 250100; 3. 山东省环境保护局, 济南 250012; 4. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为了解南四湖污染底泥磷形态分布规律, 对南四湖微山湖区 0~25 cm 沉积物分层进行了磷形态连续提取. 结果表明, 湖区沉积物中 Ex-P、At-P、Fe-P、Oe-P、Ca-P、De-P 和 Org-P 平均含量分别为 5.62、4.08、12.25、13.34、116.67、232.36 和 396.79 mg/kg, 不同形态磷含量次序为: At-P < Ex-P < Fe-P < Oe-P < Ca-P < De-P < Org-P. 沉积物中各形态磷含量在垂直方向上呈现明显的规律性, 易交换态磷(Ex-P)、铁结合态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oe-P)、有机磷(Org-P)含量随深度增加而逐渐降低, 而铝结合态磷(At-P)、钙结合态磷(Ca-P)、碎屑磷(De-P)含量则呈逐渐增加趋势. Sum1(Ex-P、At-P、Fe-P 之和)与上覆水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>浓度呈显著正相关, 其中 Fe-P 与水体磷酸盐含量关系相对比较密切, 其相关系数高达 0.72. 沉积物磷形态在空间分布上, Oe-P、Ca-P、De-P 等惰性磷的差异性小于 Ex-P、At-P、Fe-P 等潜在活性磷, Org-P 介于二者之间.

关键词: 沉积物; 磷; 形态分布; 南四湖; 微山湖区

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)05-1345-06

## Distribution of Phosphorus Species in the Sediment from Weishanhu District in Lake Nansihu

ZHANG Zhi-bin<sup>1, 2</sup>, ZHANG Xue-yang<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>3</sup>, LI Mei<sup>1</sup>, HUANG Qing-hui<sup>4</sup>, LI Jian-hua<sup>4</sup>

(1. College of Environmental and Municipal Engineering, Shandong Architecture University, Ji'nan 250101, China; 2. College of Life Science, Shandong University, Ji'nan 250100, China; 3. Shandong Environmental Protection Bureau, Ji'nan 250012, China; 4. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to learn the phosphorus (P) species distribution in sediments of Lake Nansihu, 0-25 cm sediments from Weishanhu district in Lake Nansihu were analyzed with a sequential extraction method. The results show that: the average values of Ex-P, At-P, Fe-P, Oe-P, Ca-P, De-P, Org-P in Weishanhu district sediments are 5.62 mg/kg, 4.08 mg/kg, 12.25 mg/kg, 13.34 mg/kg, 116.67 mg/kg, 232.36 mg/kg and 396.79 mg/kg respectively, and the rank order of P-fractionation for Lake Nansihu is At-P < Ex-P < Fe-P < Oe-P < Ca-P < De-P < Org-P. The vertical phosphorus species distribution exhibits the obvious rule that exchangeable P (Ex-P), Fe-bound P (Fe-P), occluded P (Oe-P), organic P (Org-P) value decrease with depth, while the values of Al-bound P (At-P), authigenic calcium bound P (A Ca-P), detrital apatite P (De-P) increase. The Sum1 content (the sum of Ex-P, At-P and Fe-P) in surficial sediments is remarkably positively correlated with the PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> concentration of overlaying water, to which Fe-P content contributes the most with the correlation index 0.72. In spatial phosphorus species distribution, the discrepancy of potential active species (Ex-P, At-P and Fe-P) is greater than those inert ones (Oe-P, Ca-P and De-P), and Org-P is only second to those potential active species.

**Key words:** sediment; phosphorus; species distribution; Lake Nansihu; Weishanhu district

磷是湖泊富营养化的限制性因素<sup>[1-3]</sup>, 湖泊水体中磷的来源主要包括内源和外源两部分, 当外源磷输入得到有效控制后, 湖泊沉积物中内源磷释放将成为影响湖泊富营养化进程的关键因素<sup>[4, 5]</sup>. 湖泊沉积物中各种形态磷在环境生物地球化学循环中的作用不同, 不同形态磷对湖泊内源磷释放的贡献率有显著差异. 可交换态磷(Ex-P)、铝结合态磷(At-P)和铁结合态磷(Fe-P)是湖泊内源磷负荷的重要来源<sup>[6]</sup>. 而闭蓄态磷(Oe-P)、钙结合态磷(Ca-P)、碎屑磷(De-P)则很难被分解参与短时相的磷循环, 对沉积物间隙水和上覆水的磷含量影响较小<sup>[7-10]</sup>. 有机磷(Org-P)属于不完全被生物利用的磷, 其在矿化过

程中部分释放进入上覆水而被生物所利用, 进而影响湖泊富营养化的进程<sup>[11, 12]</sup>. 因此, 研究沉积物中磷的形态及其含量分布特征对深入揭示湖泊富营养化反应机制具有重要的科学意义.

南四湖位于淮河流域北部, 属大型浅水湖泊, 具有防洪、排涝、灌溉、供水、养殖、通航及旅游等多项功能, 是南水北调工程的重要调蓄水库. 全湖由南阳

收稿日期: 2008-06-04; 修订日期: 2008-09-15

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX07010-009); 山东省环境保护局重点科技项目(2006043); “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC10B03)

作者简介: 张志斌(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向湖泊内源污染生态修复技术, E-mail: zhazhb@163.com

湖、昭阳湖、独山湖和微山湖 4 个湖泊沿 SE-NW 方向串联而成,南北长 126 km,东西宽 5~25 km,面积 1 266 km<sup>2</sup>,防洪库容 47.31 亿 m<sup>3</sup>,占山东省淡水水域面积的 45%,亦是我国第六大淡水湖泊。

对南四湖的研究,早期主要集中在重金属<sup>[13-15]</sup>、有机氯农药<sup>[16]</sup>、二英<sup>[17]</sup>等毒理学方面,对湖泊富营养化的限制性因素磷的研究较少。随着研究的不断深入,近年来对南四湖沉积物磷含量的研究逐渐增多,但主要集中在表层沉积物方面<sup>[18-20]</sup>,有关南四湖不同深度沉积物磷形态空间分布规律的研究还鲜见报道。本研究利用 GPS 精确定位,采用自制无扰动柱状底泥采样器进行样品采集,所采集样品切片后,采用连续提取法进行沉积物磷形态测定,分析了南四湖不同深度沉积物磷形态分布特征,以为将来的湖泊富营养化治理提供理论借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集及处理

根据南四湖的不同生态特征,在微山湖区内布设了 5 个代表性采样点位,各采样点地理位置及其附近区域生态特征分别如图 1 和表 1 所示。2007-04-24~2007-04-26 期间,利用无扰动柱状采样器分别

在各采样点采集厚度 25 cm 沉积物柱状样品,现场切片(5 cm 厚度),避光密封运送至南四湖微山试验站,阴凉处自然风干后用玛瑙研钵磨细过 100 目筛备用。同时分别在各采样点位采集 2 L 上覆水,带回微山实验站分析营养盐指标。

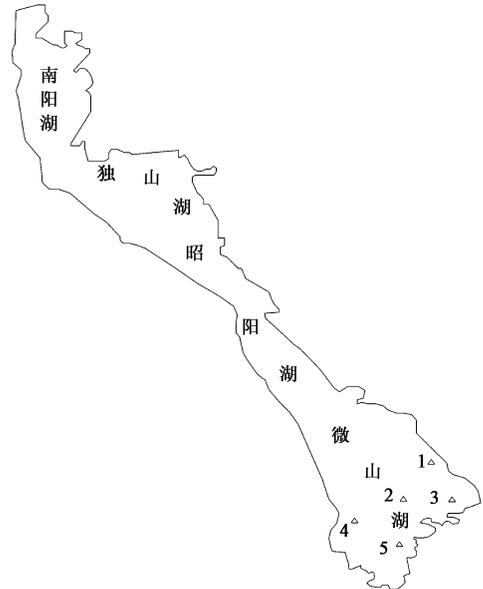


图 1 南四湖采样点布设示意

Fig. 1 Map showing sampling sites of Lake Nansihu

表 1 采样点名称及位置

Table 1 Sampling sites and their geographic characters

样点	经度(E)	纬度(N)	深度/m	透明度/cm	pH	样点描述
1	117.316 2f	34.621 68	2.90	50	8.32	航道附近,无水草
2	117.238 56	34.587 36	2.90	110	8.10	常年禁渔区,水草茂盛,水质好
3	117.316 59	34.588 62	2.80	57	8.34	靠近养殖区,无水草
4	117.176 75	34.564 52	4.10	83	8.15	湖滨带河道,少量水草
5	117.235 6f	34.493 00	2.20	68	8.30	生活区附近,鱼塘,少量水草

### 1.2 分析方法

#### 1.2.1 上覆水测定

TP: 过硫酸钾消解-钼锑抗比色法; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>: 0.45 μm 混合纤维滤膜过滤,钼锑抗比色法; TN: 碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法; COD: 重铬酸钾法。

#### 1.2.2 沉积物各形态磷的连续提取

沉积物各形态磷的提取方法参照文献[21, 22],按照图 2 所示的流程进行连续提取。每次提取后,5 000 r/min 离心 20 min,分离固液相,上清液经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后,测定其磷含量,残渣进入连续提取的下一步提取。试验所用器皿均用稀硝酸浸泡过夜,所用药品均为分析纯。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物磷形态丰度

沉积物各形态磷的丰度见表 2 所示。

从各形态磷组分在总磷中所占比例(表 2)可以看出,沉积物 7 种磷形态平均含量以 Org-P 最高,占总磷的 50.8%,这个规律与太湖<sup>[23, 24]</sup>一致。与周来等<sup>[20]</sup>有关南四湖的研究结论存在差异,其研究结果认为南四湖沉积物中无机磷占主要成分。De-P、Ca-P 的含量次之,分别占总磷含量的 29.74%、14.94%。Oe-P、Fe-P 含量较小,各点不同深度含量均小于 42.0 mg/kg。Ex-P 和 Al-P 含量较低,各采样点平均含

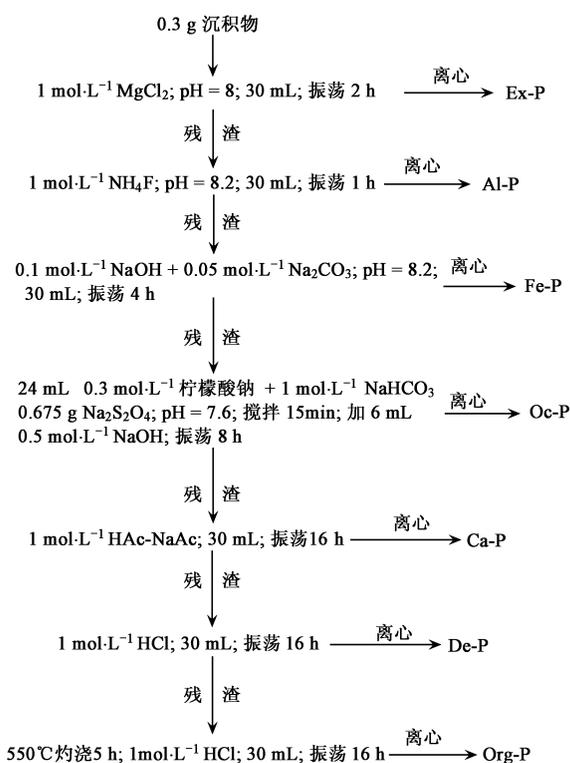


图2 沉积物中磷形态的连续提取方案

Fig. 2 Sequential extraction procedure of phosphorus in sediments

表2 南四湖微山湖区沉积物形态磷丰度统计参数

Table 2 Statistic indexes of sediment phosphorus species in Weishanhu district of Lake Nansihu

形态磷	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准偏差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	相对标准偏差/%	占TP <sup>1)</sup> 比例/%
Ex-P	5.62	18.67	0.062	4.92	88	0.72
Al-P	4.08	7.58	0.17	2.54	62	0.52
Fe-P	12.25	41.48	1.62	13.96	114	1.57
Oe-P	13.34	32.30	1.22	7.85	59	1.71
Ca-P	116.67	220.95	53.25	45.49	39	14.94
De-P	232.36	444.79	158.22	78.97	34	29.74
Org-P	396.79	1011.52	88.94	244.32	62	50.80

1) TP= Ex-P + Al-P + Fe-P + Oe-P + Ca-P + De-P + Org-P

(有水草区) Ex-P 含量均高于 1、3 号点(无水草区)。5 号点由于靠近生活区和鱼塘, 此外源污染较重, 其 Ex-P 含量较高。1 号点靠近航道, Ex-P 在船舶频繁的动力扰动下极易释放进入上覆水, 因此, 该点 Ex-P 含量最低。

在本研究结果中, Al-P 随深度增加呈现递增趋势, 这与戴纪翠和吕昌伟等<sup>[26, 27]</sup>的研究结果均有差异。有关胶州湾沉积物中 Al-P 分布的研究结果显示<sup>[26]</sup>, Al-P 随深度略有减小趋势; 而有关乌梁素海沉积物中 Al-P 分布的研究结果表明<sup>[27]</sup>, Al-P 随深度先减小后增大。因此, 有关沉积物 Al-P 的分布规律及迁移机制还值得进一步深入探讨。

各点 Fe-P 含量在垂直剖面上表现出下降的趋

量均小于 6.0 mg/kg。

在沉积物不同磷形态空间分布上, Oe-P、Ca-P、De-P 等惰性磷在各点之间的差异相对较小, Org-P 稍高, Ex-P、Al-P、Fe-P 等潜在活性磷的差异性较大。De-P 含量在各点不同深度中变异性最小, 其相对标准偏差仅为 34%, 这可能与 De-P 参与磷的生物地球化学循环相对 Fe-P 等组分慢有关。Fe-P 的变异性最大, 其显著的变异性与该组分磷的形态转化能力较大有关。

## 2.2 沉积物磷形态垂直分布

各采样点不同深度沉积物磷形态分布特征见图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 对不同采样点位而言, 尽管不同磷形态及含量在垂直方向上呈现一定的波动, 但其总体变化趋势比较清晰, Ex-P、Fe-P、Oe-P、Org-P 含量随深度增加而逐渐降低, 而 Al-P、Ca-P、De-P 含量则逐渐增加。

各采样点表层 Ex-P 含量较高, 而 5 cm 深度以下其 Ex-P 含量较小(均小于 6.2 mg/L), 这可能与表层 Fe-P、Org-P 含量较高有关。由于水草可以促进沉积物活化, 增加沉积物中 Ex-P 含量<sup>[25]</sup>, 2、4、5 号点

势, 分析其原因, 随着沉积深度增加, 沉积物还原程度逐渐增强, 当  $\text{Fe}^{3+}$  被还原为  $\text{Fe}^{2+}$  时, Fe-P 随着二价铁的溶出也随之释放进入间隙水, 进而在依靠浓度梯度差逐渐上移进入上覆水体, 使沉积物中 Fe-P 浓度减小; 在  $\text{Fe}^{3+}$  被还原为  $\text{Fe}^{2+}$  的同时, 吸附在铁锰氧化物及氢氧化物上的磷也被释放进入间隙水, 导致 Fe-P 含量逐渐降低; 随着沉积物深度的增加, 沉积物中的非晶矿物逐步有序化, 铁的氧化物、氢氧化物与磷的结合能力逐渐降低, 导致 Fe-P 含量逐渐降低。由于受人类生产活动影响, 1、3、4、5 号点的表层 Fe-P 含量均较 2 号点高。

Oe-P 含量随沉积物深度增加而逐渐减小, 其主要原因在于, 随着深度增加, 沉积物还原程度逐渐增

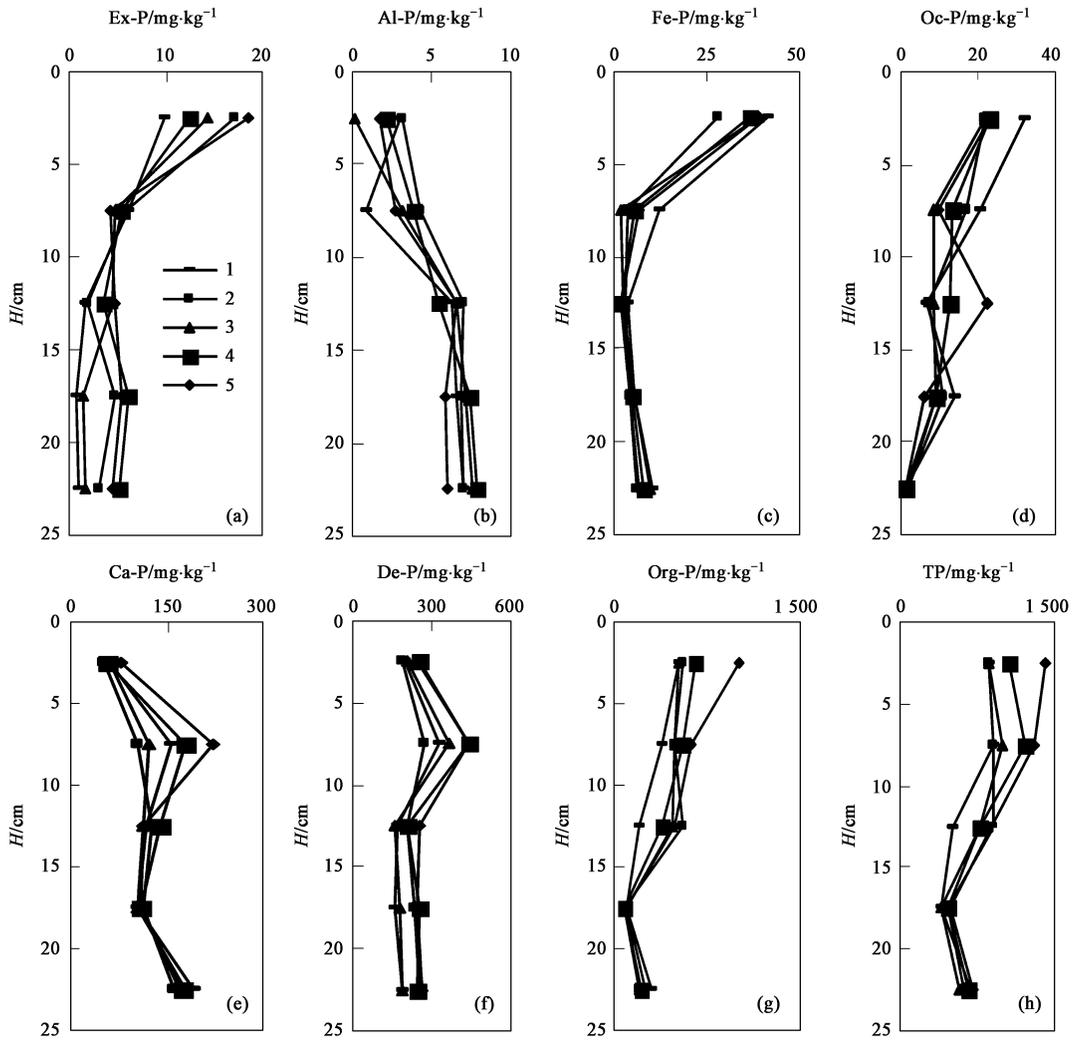


图3 南四湖微山湖区各采样点沉积物磷形态垂直分布曲线

Fig. 3 Vertical distribution of sediment phosphorus species in Weishanhu district of Lake Nansihu

强,在强还原条件下  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  胶膜溶解,  $\text{Oe-P}$  转化为磷酸铁、磷酸铝等潜在活性磷后逐渐向上迁移,导致下层  $\text{Oe-P}$  含量较低. 5号点位于湖区鱼塘,在养殖过程中定期清理上层底泥,影响该采样点沉积物的自然沉积过程,因此,该采样点的  $\text{Oe-P}$  含量在垂直方向上未呈现明显规律性.

$\text{Ca-P}$  含量随着深度增加呈现递增趋势,分析其原因,  $\text{Ca-P}$  主要由  $\text{Org-P}$  转化而来<sup>[28]</sup>,  $\text{Org-P}$  释放的溶解性磷被吸附到铁氧化物上形成磷铁复合体,并不断沉积埋藏于底泥中,在底泥还原环境中,磷与铁复合体中的  $\text{FeOOH}$  逐渐溶解并向上层迁移,而失去铁的含磷颗粒则在底层厌氧环境中逐渐矿化,最终形成了  $\text{Ca-P}$ , 下层沉积物较上层沉积年代更久远,因此,随沉积深度增加,其  $\text{Ca-P}$  含量逐渐提高. 在5个不同采样点位中,2号点  $\text{Ca-P}$  含量最低,其原因可能

是由于2号点水草茂盛,其水生植物根系分泌的有机酸造成沉积物中  $\text{Ca-P}$  向潜在可利用磷的转化.

与  $\text{Ca-P}$  不同的是,  $\text{De-P}$  含量在不同深度变化幅度较小,其原因在于,  $\text{De-P}$  性质稳定,沉积物  $\text{De-P}$  含量由流域地质特征决定,外部环境对其影响较小. 图3(f)显示,在5个不同采样点位,对表层沉积物而言,其  $\text{De-P}$  含量及分布规律与  $\text{Ca-P}$  相似,由于水生植物根系分泌有机酸,有水草的区域  $\text{De-P}$  含量较小.

图3(g)显示,5个采样点不同深度沉积物中,随着沉积物深度增加,有机质矿化程度提高,其  $\text{Org-P}$  含量逐渐减小,  $\text{Org-P}/\text{TP}$  百分比由65% (表层沉积物) 逐渐降至50% (25 cm深). Rydin<sup>[11]</sup> 的研究结果也显示,随沉积物深度增加,  $\text{Org-P}/\text{TP}$  逐渐降低,这与本试验结果比较一致. 由于受船舶动力扰动充氧

和水生植物泌氧的影响, 1、2号采样点水体 DO 浓度较高, 有助于沉积物有机磷的氧化分解, 其 Org-P 含量较低, 5号点 Org-P 含量较高, 这主要是由于受外源有机污染物汇入的影响。

### 2.3 形态磷分布与水体富营养化关系

各采样点表层沉积物不同形态磷含量之间的相关性见表3所示。

从表3中可以看出, 各采样点上覆水 COD 均大

表3 南四湖微山湖区表层沉积物形态磷与水体富营养指标相关关系<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation between phosphorus species of surficial sediments and trophic indexes of water body in Weishanhu district of Lake Nanshu

	Ex-P	At-P	Fe-P	Oe-P	Ca-P	De-P	Org-P	TP	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	TN	COD	Bio-P
At-P	0.15											
Fe-P	0.47	0.68										
Oe-P	0.21	0.08	0.53									
Ca-P	0.18	0.13	0.09	0.12								
De-P	0.47	0.00	0.02	0.01	0.77							
Org-P	0.90*	0.01	0.18	0.10	0.41	0.63						
TP	0.08	0.11	0.19	0.38	0.88*	0.48	0.24					
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.09	0.37	0.72	0.17	0.63	0.26	0.32	0.70				
TN	0.82	0.36	0.51	0.12	0.19	0.54	0.63	0.09	0.01			
COD	0.04	0.63	0.26	0.03	0.48	0.21	0.75	0.42	0.86*	0.01		
Sum1	0.01	0.35	0.39	0.40	0.77	0.31	0.05	0.90*	0.86*	0.00	0.66	
Sum2	0.37	0.02	0.00	0.00	0.90*	0.97**	0.15	0.64	0.38	0.43	0.29	0.47

1) Sum1= Ex-P+ At-P+ Fe-P, Sum2= Oe-P+ Ca-P+ De-P; t 检验, \* 表示  $p < 0.05$ , \*\* 表示  $p < 0.01$

于 20 mg/L, 达不到湖泊地表 III 类水体要求。各点 TP、TN 含量均分别高于 0.030 mg/L 和 0.40 mg/L, 按照国际湖泊富营养划分依据<sup>[29]</sup> (一般认为, TP 0.02 mg/L、TN 0.2 mg/L 是湖泊富营养化的发生浓度), 南四湖为富营养化湖泊, 但作为一种草藻型浅水湖泊, 由于水生植物限制藻类生长, 南四湖并未呈现藻类暴发生长的现象。

表层沉积物中的 Ex-P、At-P 和 Fe-P 均较易释放进入上覆水体, 被藻类利用, 因此, Sum1 可以反映出沉积磷的短期潜在释放量, 且这种潜在的内源性磷负荷与水体富营养化程度有密切关系, 由表3可见, Sum1 与上覆水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 和 TP 浓度呈显著正相关。Ex-P 和 At-P 在表层沉积物中的含量较低, 均小于 20.0 mg/kg, 其与上覆水中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 相关系数分别为 0.088、0.37, 对水体富营养化的贡献率较小。Fe-P 是仅次于 Ex-P 和 At-P 较易释放进入上覆水体的磷形态, 在南四湖沉积物中其含量虽然也不大, 但对外界环境敏感, 尤其对氧化还原电位最为敏感, 从表3中可以看出, Fe-P 与上覆水中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 相关系数为 0.72, 与 Ex-P 和 At-P 相比, 其与上覆水体磷酸盐含量关系相对比较密切。Sum2 为难被生物利用的惰性磷含量, 其不易被生物直接利用, 几乎不再参与磷在水相中的短期循环, 对水体 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 的贡献率较低。与 Oe-P 和 De-P 相比, Ca-P 与上覆水中 TP 浓度呈显著正相关, 这可能是由于自生钙磷源于部分有机磷的转化, 而部分有机磷的释放又会造成水体磷浓度的升高, 因此

Ca-P 与上覆水中 TP 的相关关系较好。Org-P 与 Ex-P 相关系数高达 0.90, 这也表明了 Org-P 通过转化为 Ex-P 进而间接影响水体磷含量。

### 3 结论

南四湖微山湖区沉积物中不同形态磷的含量顺序为: At-P < Ex-P < Fe-P < Oe-P < Ca-P < De-P < Org-P。在沉积物磷形态分布方面, Ex-P、Fe-P、Oe-P、Org-P 含量随深度逐渐降低, 而 At-P、Ca-P、De-P 含量则逐渐增加; Oe-P、Ca-P、De-P 等惰性磷的空间分布差异相对较小, Org-P 稍高, Ex-P、At-P、Fe-P 等潜在活性磷的差异性较大。表层沉积物中 Sum1 (Ex-P、At-P、Fe-P 之和) 与上覆水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 和 TP 浓度呈显著正相关, 其中 Fe-P 与水体磷酸盐含量关系相对比较密切。

参考文献:

- [1] 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(1): 53-61.
- [2] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 38-43.
- [3] Lai D Y F, Lam K C. Phosphorus retention and release by sediments in the eutrophic Mai Po Marshes, Hong Kong[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 57(6-12): 349-356.
- [4] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, et al. Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: spatio-temporal variation in phosphorus pools and release[J]. Hydrobiologia, 2007b, 584: 37-48.

- [ 5 ] Bryan M, Spears B M, Laurence C, *et al.* Effects of light on sediment nutrient flux and water column nutrient stoichiometry in a shallow lake[J]. *Water Research*, 2008, **42**: 977-986.
- [ 6 ] Spears B M, Carvalho L, Paterson D M. Phosphorus partitioning in a shallow lake: implications for water quality management [ J ]. *Water and Environment Journal*, 2007, **21**: 47-53.
- [ 7 ] 金相灿, 庞燕, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其分布特征研究[ J ]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(1): 279-285.
- [ 8 ] Jin X C, Wang S R, Pang Y, *et al.* Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China [ J ]. *Environmental Pollution*, 2006, **139**: 288-295.
- [ 9 ] Li Q M, Zhang W, Wang X X, *et al.* Phosphorus in Interstitial Water Induced by Redox Potential in Sediment of Dianchi Lake, China [ J ]. *Pedosphere*, 2007, **17**(6): 739-746.
- [ 10 ] Anshumali A L. Phosphorus fractionation in surficial sediments of Pandoh Lake, Lesser Himalaya, Himachal Pradesh, India [ J ]. *Applied Geochemistry*, 2007, **22**(9): 1860-1871.
- [ 11 ] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [ J ]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [ 12 ] 张路, 范成新, 朱广伟, 等. 长江中下游湖泊沉积物生物可利用磷分布特征[ J ]. *湖泊科学*, 2006, **18**(1): 36-42.
- [ 13 ] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 南四湖表层底泥重金属污染及其风险性评价[ J ]. *湖泊科学*, 2003, **15**(3): 252-256.
- [ 14 ] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 南四湖表层底泥重金属和营养元素的多元分析[ J ]. *中国环境科学*, 2003, **23**(2): 206-209.
- [ 15 ] 王晓军, 潘恒健, 杨丽原, 等. 南四湖表层沉积物重金属元素的污染分析[ J ]. *海洋湖沼通报*, 2005, **2**: 22-28.
- [ 16 ] 李红莉, 李国刚, 高虹, 等. 南四湖表层沉积物中有机氯农药的含量及分布特征[ J ]. *中国环境监测*, 2005, **21**(6): 11-14.
- [ 17 ] 杨永亮, 史双昕, 潘静, 等. 南四湖沉积物中二 英类化合物的分布[ J ]. *环境化学*, 2004, **23**(5): 549-554.
- [ 18 ] 安文超, 李小明. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[ J ]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1295-1302.
- [ 19 ] 杨丽原, 沈吉, 刘恩峰, 等. 南四湖现代沉积物中营养元素分布特征[ J ]. *湖泊科学*, 2007, **19**(4): 390-396.
- [ 20 ] 周来, 冯启言, 王华, 等. 南四湖表层底泥磷的化学形态及其释放规律[ J ]. *环境科学与技术*, 2007, **30**(6): 37-39.
- [ 21 ] 朱广伟, 秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取方法应用研究[ J ]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(3): 349-352.
- [ 22 ] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 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*, 2004, **24**(3): 381-388.
- [ 23 ] 金相灿, 孟凡德, 姜霞, 等. 太湖东北部沉积物理化特征及磷赋存形态研究[ J ]. *长江流域资源与环境*, 2006, **15**(3): 388-394.
- [ 24 ] 章婷曦, 王晓蓉, 金相灿. 太湖不同营养水平湖区沉积物中磷形态的分布特征[ J ]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(4): 1207-1213.
- [ 25 ] 周小宁, 王圣瑞, 金相灿. 沉水植物黑藻对沉积物有机、无机磷形态及潜在可交换性磷的影响[ J ]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2421-2425.
- [ 26 ] 戴纪翠, 宋金明, 李学刚, 等. 胶州湾不同形态磷的沉积记录及生物可利用性研究[ J ]. *环境科学*, 2007, **28**(5): 929-936.
- [ 27 ] 吕昌伟, 何江, 孙惠民, 等. 乌梁素海沉积物中磷的形态分布特征[ J ]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(3): 878-885.
- [ 28 ] Cha H J, Lee C B, Kim B S, *et al.* Early diagenetic redistribution and burial of phosphorus in the sediments of the southwestern East Sea (Japan Sea) [ J ]. *Marine Geology*, 2005, **216**(3): 127-143.
- [ 29 ] 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.