

# 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\*

王琦<sup>1,2</sup>, 姜霞<sup>2</sup>, 金相灿<sup>2\*\*</sup>, 徐玉慧<sup>2,3</sup>

(1:西北农林科技大学 生命科学学院, 杨凌 712100)  
(2:中国环境科学研究院 湖泊生态环境创新基地, 北京 100012)  
(3:吉林大学环境与资源学院, 长春 130026)

**摘要:**采用 EDTA 螯合剂法和不同的化学提取法, 研究了太湖 3 个不同营养水平湖区中 8 个位点表层沉积物总磷、各组分磷及生物可利用磷的含量分布, 探讨了太湖不同营养水平湖区表层沉积物的释磷潜力和生物可利用磷的来源。结果表明, 太湖不同营养水平湖区表层沉积物总磷、无机磷和生物可利用磷含量分布差异较大, 且与各湖的营养水平相一致。有机磷含量与有机质和含水率显著相关; 沉积物中 Fe-P 和 Ca-P 对生物可利用磷的贡献较大, 这部分磷具有较大的潜在释放风险。

**关键词:**太湖; 沉积物; 磷形态; 生物可利用磷

## Distribution of phosphorus fractions and bio-available phosphorus forms and their relationship in the sediments from different regions of Lake Taihu

WANG Qi<sup>1,2</sup>, JIANG Xia<sup>2</sup>, JIN Xiangcan<sup>2</sup> & XU Yuhui<sup>2,3</sup>

(1: College of Life Science, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, P. R. China)  
(2: Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, P. R. China)  
(3: College of Environment and Resource, Jilin University, Changchun 130026, P. R. China)

**Abstract:** Concentrations of total phosphorus (TP), their fractions and the bio-available phosphorus (BAP) in the surface sediments from three different regions of Lake Taihu are investigated. In addition, the potential release capacity of P from the surface sediment and their sources were discussed. The concentrations of TP, P fractions and BAP are coincided very well with their trophic states. The concentrations of organic P in the sediments have a good relationship with organic matter and moisture content. BAP is mainly from Fe bound P (Fe-P) and Ca bound P (Ca-P), which show the highest potential risk of release.

**Keywords:** Lake Taihu; sediment; phosphorus forms; bio-available phosphorus

太湖流域是我国经济发达和城市化程度较高的地区之一, 也是人类活动与湖泊关系最为密切的地区。目前, 该地区湖泊主要面临严重富营养化问题<sup>[1]</sup>。磷是植物包括藻类细胞生长和提供细胞动能的重要组成部分, 同时也是我国长江中下游湖泊富营养化的主要限制因素。沉积物磷的内源释放是维持浅水湖泊富营养水平的一个重要因素, 因此在评价沉积物的潜在释磷能力以及释放的不同形态的磷对藻类生长的可利用性等方面, 采用不同的化学提取方法比单一估计总磷 (TP) 含量更有意义<sup>[2]</sup>。同时通过选择适合的沉积物磷组分连续分级提取的方法, 通过总磷及各组分磷之间的相关关系探讨各生物可利用磷的来源, 对于选择合

\* 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412304) 资助。2005-05-08 收稿; 2005-09-30 收修改稿。

王琦, 男, 1981 年生, 硕士研究生。E-mail: wq-soaring@yahoo.com.cn.

\*\* 通讯联系人。

理的富营养化防治措施,控制湖泊的富营养化水平有重要的实践意义。

目前研究沉积物磷形态连续分级提取的方法很多<sup>[3-9]</sup>,这些方法大部分以强酸或强碱作为提取剂,有可能破坏粘土结合态磷或有机磷<sup>[3]</sup>,而利用螯合剂法<sup>[6,10-12]</sup>可以很好的解决这类问题,并通过近 20 年的改进完善和实践验证,已经被广泛接受和认可。本文选取太湖北部的梅梁湾、东北部的贡湖、东部的胥口湖作为研究对象,采用不同的化学提取方法研究沉积物鲜样中生物可利用磷的分布,客观预测沉积物的释磷潜力;同时采用螯合剂法对选择湖区中 8 个位点的表层沉积物中总磷和各磷组分含量进行分析;通过生物可利用磷与总磷和各磷组分含量之间的相关关系分析,探讨生物可利用磷的来源,为客观评价沉积物磷的潜在释放能力及其对湖泊富营养化水平贡献,以及揭示浅水湖泊富营养化发生机制提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集与处理

2004 年 12 月采用彼得森采泥器收集太湖北部的梅梁湾、东北部的贡湖、东部的胥口湖表层沉积物样品 8 个,各采样点的位置如图 1 所示。根据 2003 年国家环保总局全国环境质量概要,梅梁湾处于重度富营养化状态,属藻型湖泊;东部沿岸的胥口湖为相对清洁湖区,属草型湖泊;贡湖的营养水平介于二者之间。因此三个不同营养水平湖区中,胥口湖采样点 X1 水质最好,湖底有大量的沉水植物,底部有黑色植物残渣;X2 位于航道附近,水质略差;贡湖采样点 G 点位于湖岸边,有大量挺水植物,水质相对较好;梅梁湾属于超富营养化湖区,每年都有水华发生的报道,采样点 M1 位于小丁湾内,底质较硬,属梅梁湾污染较轻区域;M4 位于近岸处,周围有少量芦苇等挺水植物;M2、M3、M5 分别位于主航道、远航道和鼋头渚公园,沉积物呈灰黑色,质底稀软,污染严重。各采样点的基本理化性质见表 1。

沉积物样品被混匀后密封在封口袋中,低温保存,运回实验室分析。沉积物样品采回后,将沉积物鲜样粗筛,以除去植物残体和贝类物质,保持沉积物的均一性。沉积物样品分为两部分,一部分鲜泥样用于沉积物各种生物可利用磷的分析,另一部分沉积物经真空冷冻干燥,研磨、过筛(100 目)后,用于沉积物磷形态连续分级提取。

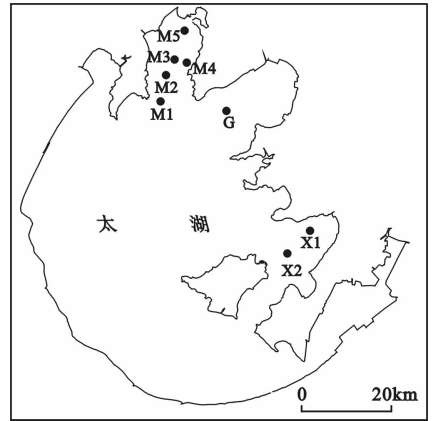


图 1 太湖调查各采样点位置示意图

Fig. 1 Study area and sampling sites in the Lake Taihu

表 1 采样点基本理化特征

Tab. 1 Basic characteristics of the sampling sites

项目	胥口湖		贡湖	梅梁湾				
	X1	X2	G	M1	M2	M3	M4	M5
上覆水水温(℃)	10.3	10.3	7.8	6.5	6.8	6.7	8.0	8.5
pH	7.95	7.37	8.02	8.10	-	8.25	-	7.29
Eh	323.7	410.8	350.8	323.4	-	329.9	-	381.9
沉积物含水率(%)	81.82	44.22	57.20	59.65	56.19	63.57	67.35	60.15
有机质(%)	8.68	1.72	2.41	1.70	2.94	3.11	4.12	3.12

\* - 未测量。

### 1.2 分析方法

1.2.1 沉积物中总磷及各组分磷的连续提取方法 沉积物中总磷及各组分磷的连续提取方法,除残渣磷和总磷的测定采用 SMT 总磷的测定方法外<sup>[13]</sup>,都按照 Colterman<sup>[10-12]</sup>提出的 EDTA 连续提取法。为了保证各步的提取效率,对每一步均重复提取 2-3 次。碱可提取有机磷(Org-Palk)需先采用过硫酸钾高压消解<sup>[14]</sup>,再测定消解后的 SRP 含量。每个采样点样品做 3 个平行提取,数据用均值和标准差表示。

1.2.2 沉积物中各种生物可利用磷的提取方法 利用化学方法从新鲜沉积物中提取与生物可利用性有关的磷大致可分为:水溶性磷(WSP)<sup>[15]</sup>、易解吸磷(RDP)<sup>[16]</sup>、藻类可利用磷(AAP)<sup>[17,18]</sup>、NaHCO<sub>3</sub>提取磷(Olsen-P)<sup>[19]</sup>。具体方法见表2。最后的分析结果通过公式换算成沉积物干重含量: $P_{f(dw)} = P_{f(ww)} / (1 - Mc / 100)$ ,  $P_{f(dw)}$ 和 $P_{f(ww)}$ 分别表示沉积物中磷的干重含量和湿重含量,  $Mc$ 表示沉积物含水率<sup>[2]</sup>。

表2 沉积物中生物可利用磷的提取方法

Tab. 2 Extraction method of bioavailable phosphorus in the sediments

磷形态	提取方法
水溶性磷 WSP	1.00g 沉积物鲜样加 100ml 去离子水, 25℃ 220 转/min 振荡 2h, 10000 转/min 离心 20min 获取上清液, 磷钼蓝比色测定提取液中的磷浓度。
易解吸磷 RDP	2.00g 沉积物鲜样加 50ml 0.01mol/L CaCl <sub>2</sub> , 25℃ 220 转/min 振荡 1h, 10000 转/min 离心 20min 获取上清液, 磷钼蓝比色测定提取液中的磷浓度。
藻类可利用磷 AAP	0.80g 沉积物鲜样加 200ml 0.1mol/L NaOH, 25℃ 220 转/min 振荡 4h, 10000 转/min 离心 20min 获取上清液, 磷钼蓝比色测定提取液中的磷浓度。
NaHCO <sub>3</sub> Olsen-P 提取磷	2.50g 沉积物鲜样加 50ml 0.5 mol/L NaHCO <sub>3</sub> pH = 8.5, 25℃ 220 转/min 振荡 0.5h, 10000 转/min 离心 20min 获取上清液, 磷钼蓝比色测定提取液中的磷浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同营养水平湖区沉积物中 TP 和各组分磷含量分布

表3中列出了采用EDTA方法分析的不同湖区沉积物TP和组分磷的含量。梅梁湾各位点沉积物总磷含量(510.25–958.44 mg/kg)高于其它两个湖区,这与梅梁湾位于无锡工业区和旅游区,生活污水与工业废水对湖泊富营养化影响较大有关。与此同时这五个点的Ca-P、Fe-P和酸可提取有机磷(Org-Pac)含量也高于其它两个湖区。

沉积物中Ca-P通常被认为是生物难利用磷<sup>[10]</sup>,主要来源于碎屑岩并有自生源,后者与钙磷酸盐化合物的形成或者与碳酸钙共沉淀的磷有关。人为排放造成的上覆水体高浓度的钙离子和磷酸根往往能够形成钙磷酸盐沉淀<sup>[20]</sup>。因此,在人为磷输入量较高的太湖梅梁湾M2和M5采样点的沉积物中, Ca-P含量很高。Fe-P为相对易于释放,且易被生物利用的有效磷<sup>[10]</sup>,因此在水质较好的草型胥口湖和贡湖沉积物中, Fe-P含量相对较低。X1点水草丰茂,其Fe-P含量最低(22.79 mg/kg),而与其相隔不远位于航道附近的X2点Fe-P含量却是X1点的两倍多,这是由于草型湖区沉积物中有效磷被植物大量吸收,水草对沉积物磷的活性有很好的控制作用<sup>[7]</sup>,表4中生物可利用磷的数据也说明了这一点。对藻型湖泊梅梁湾,受人类活动影响较大的M2和M5点,沉积物中Fe-P含量相对较高;而近岸区的M4点虽然受面源污染和周围人类活动影响较大,但由于植物的吸磷作用,导致沉积物中总磷含量低于鼋头渚公园和主航道,同时由于植物根部的放氧作用导致沉积物表层氧化层的增厚,吸附了大量的Fe-P,导致Fe-P含量相对较高。Org-Pac含量与上覆水体的pH值密切相关,属较易释放和分解的磷,其含量分布也与其所处湖区的营养水平一致<sup>[6]</sup>。总之不同湖区以及同一湖区不同点沉积物磷组分之间存在的较大差异,主要与人类活动对其干扰程度以及所处湖区的生态类型相一致。

太湖不同营养水平湖区沉积物中磷组分占总磷的百分组成如图2所示。对于相对清洁(胥口湖)和轻微富营养湖区(贡湖),沉积物中的磷组分以有机磷为主,而对富营养化湖区梅梁湾,沉积物中的磷组分以无机磷为主,有机磷百分含量随污染水平呈相反变化。这次采样正值冬季,富营养水平低的湖区中分布的大量水生植被死亡(如X1点),使沉积物中各种动、植物残体、腐殖质类有机物含量增加,导致有机磷含量升高,含水率和有机质含量也相应增加;另外有机磷只有在有机物矿化以后才能被释放出来,也相对较难生物利用<sup>[9]</sup>,使得有机磷在沉积物中大量蓄积。因此出现冬季沉积物中有机磷的百分含量随营养水平的增加而降低的现象。如水质最好的胥口湖X1点有机磷含量高达72.8%,除X1外其余各点有机磷含量与有机质、

含水率的相关系数分别为:0.849、0.856,均为显著正相关( $\alpha = 0.05$ ).所以,通过对沉积物有机质、含水率的测定,可以近似反映出有机磷含量的大小.黄清辉<sup>[6]</sup>等认为酸可提取有机磷在一定条件下可水解或矿化为SRP,具有潜在的生物可利用性,与湖泊富营养化的关系可能更为密切,酸可提取有机磷与总有机磷的比值(EI)可以大致反映出不同湖泊的营养水平差异.我们通过对此实验EI值的计算,除X1点EI值为0.185外,其余各点的EI值在0.371–0.556之间,也较好的反映了各湖区的营养水平.

表3 沉积物中TP及各组分磷含量

Tab. 3 Concentrations of different phosphorus fractions and TP in the sediments (mg/kg)

项目 编号	胥口湖		贡湖	梅梁湾				
	X1	X2	G	M1	M2	M3	M4	M5
Fe-P	22.79 ± 1.21	57.07 ± 3.33	63.25 ± 3.73	115.24 ± 7.03	159.04 ± 4.57	258.32 ± 4.52	274.27 ± 0.52	211.68 ± 14.49
Ca-P	35.94 ± 1.19	63.21 ± 2.10	60.62 ± 2.25	112.59 ± 8.90	277.02 ± 7.28	81.16 ± 3.67	123.07 ± 1.15	427.61 ± 6.88
Org-Pac	39.33 ± 0.42	106.10 ± 2.12	133.03 ± 1.13	93.50 ± 2.28	167.27 ± 0.95	143.87 ± 0.65	121.05 ± 3.16	144.58 ± 0.37
Org-Palk	173.83 ± 5.90	92.31 ± 10.90	124.47 ± 14.56	158.60 ± 17.53	133.81 ± 1.60	154.84 ± 1.67	191.62 ± 11.68	153.54 ± 2.20
Res-P	18.70 ± 3.12	24.46 ± 5.16	40.98 ± 3.03	41.38 ± 3.73	7.51 ± 1.22	11.02 ± 0.71	16.47 ± 1.22	16.03 ± 1.41
TP	292.47 ± 3.68	345.35 ± 12.47	427.36 ± 15.77	510.25 ± 38.14	749.23 ± 2.88	654.15 ± 1.45	732.00 ± 14.70	958.44 ± 12.98

表4 不同沉积物中生物可利用磷含量\*

Tab. 4 Concentrations of bio-available phosphorus in the sediments (mg/kg)

项目 编号	胥口湖		贡湖	梅梁湾				
	X1	X2	G	M1	M2	M3	M4	M5
WSP	2.20 ± 0.77	5.02 ± 0.65	1.87 ± 0.33	2.74 ± 0.36	4.57 ± 0.33	4.95 ± 0.02	5.52 ± 0.77	7.52 ± 0.74
RDP	0.97 ± 0.51	0.36 ± 0.13	0.35 ± 0.00	0.49 ± 0.17	0.46 ± 0.08	0.62 ± 0.17	1.07 ± 0.11	1.01 ± 0.09
AAP	41.32 ± 0.10	64.88 ± 1.95	51.51 ± 4.46	113.05 ± 2.23	224.28 ± 6.21	199.32 ± 16.83	266.30 ± 2.48	452.36 ± 7.20
Olsen-P	2.21 ± 0.39	10.62 ± 0.47	6.45 ± 0.17	16.18 ± 0.36	23.50 ± 2.39	24.38 ± 1.87	34.33 ± 1.88	44.24 ± 3.95

\* 表中数据均为换算后沉积物干重含量.

残渣磷的具体形态尚不清楚,是各提取剂难以提取的磷,这种磷的具体性质、作用以及生物地球化学作用尚未见详细报道,依据其难以提取的性质以及相对较低的含量,其可能属于较难释放,且难以被生物利用的磷.

## 2.2 不同营养水平湖区沉积物中生物可利用磷的分布

对于沉积物生物可利用磷的分析,采用沉积物鲜样,以接近自然条件下沉积物中生物可利用磷的含量(表4).不同的浸提剂表示不同环境条件的潜在生物可利用磷的含量状况.0.1mol/L NaOH 所提取 AAP 表示湖泊在有氧条件下的光合层中藻类可利用磷<sup>[21]</sup>,能很好的表征沉积物中藻类可利用磷<sup>[22]</sup>;0.5mol/LNaHCO<sub>3</sub>提取的 Olsen-P 主要为活性较高的钙磷<sup>[22]</sup>;去离子水

(WSP)与0.01mol/L CaCl<sub>2</sub> (RDP)适用于提取水溶性磷含量高且固磷能力弱的各种土壤<sup>[22]</sup>.由表4可知,太湖不同营养水平湖区生物可利用磷含量表现为:梅梁湾 > 贡湖 > 胥口湖,即污染越重、总磷含量越高的区域其生物可利用磷含量也越高.胥口湖X1点所有四种生物可利用磷的含量都普遍偏低,这可能与该点总磷含量低且处于草型湖区有关,该湖区根生植物茂盛,使得沉积物中有效磷被植物大量吸收蓄积<sup>[7]</sup>.不同湖区以及同一湖区的不同位点,各生物可利用磷含量表现出一致的规律:AAP > Olsen-P > WSP > RDP,四种生物可利用磷与总磷的相关系数分别为0.9638、0.9589、0.7832、0.4056(表6),除RDP外均与总磷呈显著正相关,研究结果基本与周启星等人<sup>[2]</sup>一致.

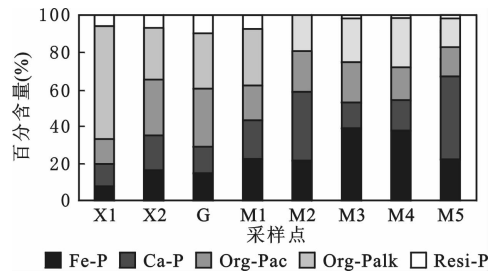


图2 沉积物中磷组分的百分含量  
Fig. 2 Percentage composition of P forms in lake sediments

通过对不同生物可利用磷占 TP 的百分含量分析(表 5), WSP、RDP、Olsen-P 除个别位点外, 占不同湖区总磷的比例相对稳定, 分别为  $(0.76 \pm 0.31)\%$ 、 $(0.13 \pm 0.09)\%$  和  $(3.10 \pm 1.38)\%$ . 而 AAP 在不同湖区占总磷比例变化较大, 变化趋势与沉积物的污染程度一致, 随湖区污染程度的增加, 其所占比例升高. 因此, AAP 可以作为评价沉积物潜在释磷能力一个指标.

表 5 沉积物中生物可利用磷的百分含量  
Tab. 5 Percentage of bio-available phosphorus in lake sediments

项目编号	胥口湖		贡湖	梅梁湾				
	X1	X2	G	M1	M2	M3	M4	M5
WSP	0.76	1.46	0.44	0.53	0.61	0.76	0.76	0.79
RDP	0.33	0.10	0.08	0.09	0.06	0.10	0.15	0.11
AAP	14.22	18.91	12.20	21.69	30.12	30.70	36.66	47.45
Olsen-P	0.76	3.10	1.53	3.10	3.16	3.76	4.72	4.64

表 6 沉积物 TP、不同形态磷与生物可利用磷相关关系  
Tab. 6 Correlation of TP and various phosphorus fractions and bio-available phosphorus in the sediments

	WSP	AAP	RDP	Olsen-P	Fe-P	Ca-P	Org-Pac	Org-Palk	Res-P	TP
WSP	1									
AAP	0.870 **	1								
RDP	0.419	0.552	1							
Olsen-P	0.883 **	0.974 **	0.517	1						
Fe-P	0.691	0.726 *	0.435	0.859 **	1					
Ca-P	0.718 *	0.883 **	0.305	0.789 *	0.429	1				
Org-Pac	0.524	0.572	-0.258	0.600	0.600	0.569	1			
Org-Palk	0.044	0.329	0.809 *	0.352	0.481	0.058	-0.261	1		
Res-P	-0.610	-0.519	-0.436	-0.483	-0.523	-0.399	-0.319	-0.220	1	
TP	0.787 *	0.965 **	0.409	0.959 **	0.820 *	0.861 **	0.719 *	0.311	-0.488	1

\* 显著性水平  $\alpha = 0.05$ , \*\* 显著性水平  $\alpha = 0.01$ ,  $n = 8$ .

### 2.3 TP、各形态磷含量与生物可利用磷相关性分析

通过将 TP、各形态磷含量分布与生物可利用磷含量分布进行相关性分析(表 6), 发现表层沉积物中除了 RDP、Org-Palk 和 Res-P 外, 其余各形态磷含量与总磷含量均显著相关, 其中与总磷相关性最好的是 AAP 和 Olsen-P, 分别达到了 0.965、0.959 ( $\alpha = 0.01$ ), 呈极显著相关, 也就是说沉积物总磷含量高的湖泊, 其生物可利用磷含量也大, 潜在释磷的风险也高. 这一研究结果可能与研究区域有关, 本研究选择同一湖泊的不同湖区, 其沉积物的一些基本理化性质区别不大, 因此沉积物中的生物可利用磷的含量变化趋势与人为活动造成的沉积物中 TP 含量的增加趋势相一致.

Golterman<sup>[10]</sup>、Grobler<sup>[23]</sup> 和 Fabre<sup>[24]</sup> 等人曾分别用不同的整合剂估算沉积物 AAP 的含量, 认为 Ca-NTA 提取的 Fe-P 可作为估算 AAP 的指标. 根据本研究发现 AAP 的含量不仅与 Fe-P 呈显著的正相关关系(0.726), 而且与 Ca-P 的相关关系更好(0.883), 也就是说 AAP 可能来自 Fe-P 和 Ca-P. Olsen-P 的主要来源也为 Fe-P(0.859) 和 Ca-P(0.789). 氧化还原电位的降低能够导致 Fe-P 释放, 微生物代谢过程能够引起 Ca-P 的溶解及有机磷的矿化分解, 这些反应都与生物可利用磷的关系密切<sup>[25]</sup>. 通常认为 Ca-P 是生物难利用磷, 但 Ca-P 却与三种生物可利用磷之间都存在较好的相关性. 实际上 Ca-P 主要是由磷酸二钙(Ca<sub>2</sub>-P)、磷酸八钙(Ca<sub>8</sub>-P)、磷酸十钙(Ca<sub>10</sub>-P)、羟基磷灰石和氟磷灰石组成, 其中 Ca<sub>2</sub>-P 与土壤有效磷相关性最高, 一般被认为是土壤有效磷的最直接磷源<sup>[26,27]</sup>, 而利用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> (pH8.5) 作为提取剂可以把 Ca<sub>2</sub>-P 的

浸提量提高 2 倍,这也许就是 Olsen-P 与 Ca-P 相关性较好的原因.并且在酸性条件下,沉积物中  $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  的溶解能力增强,向  $\text{Ca}_2\text{-P}$  的转化能力增加<sup>[26]</sup>.在富营养化湖区,Fe-P 和 Ca-P 的总含量占总磷的 50% 以上,由沉积物 Fe-P 和 Ca-P 释放的生物可利用磷对湖泊的营养化水平贡献巨大,充分说明了具有高含量 Fe-P 和 Ca-P 的沉积物其上覆水发生富营养化的风险更大.因此今后在利用沉积物磷形态考察评价湖泊富营养化时,应重视 Fe-P、Ca-P、酸可提取有机磷与生物可利用磷以及上覆水、间隙水中的磷之间的关系.其中 Ca-P 在沉积物中的生物学机制有待于进一步研究.

### 3 结论

对太湖三个不同营养水平湖区的 8 个位点表层沉积物磷的赋存形态及其相互关系的研究表明:太湖不同营养水平湖区表层沉积物总磷和无机磷分布与各湖的营养水平相一致,随着各湖区营养水平的提高而增加;有机磷与沉积物中总磷的关系密切,且与沉积物有机质含量、含水率的大小密切相关;太湖不同营养水平湖区沉积物中生物可利用磷含量也表现为:梅梁湾 > 贡湖 > 胥口湖,这与人为活动造成的沉积物中 TP 含量的增加趋势相一致,即总磷含量越高、营养水平越高的区域其生物可利用磷含量越高;沉积物中 Fe-P 和 Ca-P 对生物可利用磷贡献较大,具有高含量 Fe-P 和 Ca-P 的沉积物其上覆湖水更易发生富营养化.

### 4 参考文献

- [1] 秦伯强,胡维平,陈伟民等.太湖水环境演化过程与机理.北京:科学出版社,2004:19-23.
- [2] Zhou Qixing, Christopher E Gibson, Zhu Yinmei. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK. *Chemosphere*, 2001, **42**:221-225.
- [3] 付永清,周易勇.沉积物磷形态的分级分离及其生态学意义.湖泊科学,1999, **11**(4):376-381.
- [4] 金相灿,屠清瑛.主编湖泊富营养化调查规范.第二版.北京:中国环境科学出版社.1990:226-229.
- [5] 黄清辉,王东红,王春霞等.太湖梅梁湾和五里湖沉积物磷形态的垂向变化.中国环境科学,2004, **24**(2):147-150.
- [6] 黄清辉,王东红,王春霞等.沉积物中磷形态与湖泊富营养化的关系.中国环境科学,2003, **23**(6):583-586.
- [7] 朱广伟,高 光,秦伯强等.浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征.水科学进展,2003, **14**(6):714-719.
- [8] 李 悦,乌大年,薛永先.沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义.海洋环境科学,1998, **17**(1):15-20.
- [9] 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.环境科学学报,2004, **24**(3):381-388.
- [10] Golterman H L. Sediments as a source of phosphorus for algal growth. In: H L Golterman ed. Interaction between sediments and fresh water. The Hague: Dr W Junk, 1977:286-293.
- [11] Golterman H L. Fractionation of sediment phosphate with chelating compounds: a simplification, and comparison with other methods. *Hydrobiologia*, 1996, **335**:87-95.
- [12] Golterman H L, Paing J, Serrano L, et al. Presence of and phosphate release from polyphosphates or phytate phosphate in lake sediments. *Hydrobiologia*, 1998, **364**(1):99-104.
- [13] Ruban V, Brigault S, Demare D, et al. An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir, France. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(4):403-407.
- [14] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法国家水质监测标准.北京:中国环境出版社,2002:243-244.
- [15] Andrieux F, Aminot A. A two-year survey of phosphorus speciation in sediments of the Bay of Seine (France). *Continental Shelf Research*, 1997, **171**:229-1245.

- [16] Reddy K R, Overcash M R, Khaled R, Westerman P W. Phosphorus adsorption-desorption characteristics of two soils utilized for disposal of animal wastes. *Journal of Environmental Quality*, 1980, **9**:86 – 92.
- [17] Dorich R A, Nelson D W, Sommers L E. Availability of phosphorus to algae from eroded soil fractions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1984, **11**: 253 – 264.
- [18] Dorich R A, Nelson D W, Sommers L E. Estimating phosphorus in suspended sediments by chemical extraction. *Journal of Environmental Quality*, 1985, **14**:400 – 405.
- [19] Gonsiorczyk T, Casper P, Koschel R. Phosphorusbinding forms in the sediment of an oligotrophic and a eutrophic hardwater lake of the Baltic lake district (Germany). *Water Science and Technology*, 1998, **37**:51 – 58.
- [20] Huang Q H, Wang Z J, Wang D H, *et al.* Origins and Mobility of Phosphorus forms in the Sediments of Lakes Taihu and Chaohu, China. *Journal of Environmental Science & Health, Part A*, 2004, **40**(1): 91 – 102.
- [21] 晏维金, 章 申, 吴淑安等. 模拟降雨条件下生物可利用磷在地表径流中的流失和预测. *环境化学*, 1999, **18**(6):497 – 506.
- [22] 卜玉山, Magdoff F R. 十种土壤有效磷测定方法的比较. *土壤学报*, 2003, **40**(1):140 – 146.
- [23] Grobler D C, E Davies. The availability of sediment phosphate to algae. *Wat S Afr*, 1979, **5**:114 – 122.
- [24] Fabre A, A Qotbi A Dauta, V Baldy. Relation between algal available phosphate in the sediments of the River Garonne and chemically-determined phosphate fraction. *Hydrobiologia*, 1996, **335**:43 – 48.
- [25] 张斌亮. 浅水湖泊沉积物 – 水界面磷的行为特征与环境风险评价. 华东师范大学硕士学位论文. 2004:63 – 69.
- [26] 李孝良, 于群英, 陈世勇等. 土壤无机磷形态生物有效性研究. *安徽农业技术师范学院学报*, 2001, **15**(2): 17 – 19.
- [27] 林治安, 谢承陶, 张振山等. 石灰性土壤无机磷形态转化及其有效性研究. *土壤通报*, 1997, **28**(6): 274 – 276.