

# 长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其分布特征研究

金相灿, 庞 燕, 王圣瑞, 周小宁

(中国环境科学研究院湖泊生态环境研究中心, 北京 100012)

**摘要:**对长江中下游 7 个浅水湖泊的表层沉积物,应用淡水沉积物中磷形态的标准测试程序(SMT)测定了其中的总磷、无机磷、有机磷、铁/铝磷和钙磷等 5 个部份,分析了各形态磷之间以及各形态磷与沉积物理化性质如总氮、有机质、主要氧化物组成之间的相关性。结果表明,研究区域内,表层沉积物总磷含量在  $217.8\sim 3337.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,城市湖泊总磷含量总体上高于太湖等五大淡水湖;表层沉积物中的磷以无机磷为主,有机磷为辅,前者占总磷的比例多数处于 60%~80%之间;从各形态磷含量的变化范围来看,Fe/Al-P>OP>Ca-P,而从百分含量的变化范围来看,则是 Fe/Al-P>Ca-P>OP。表层沉积物中 TP 含量的增加主要来自 Fe-P 部分,其次来自 OP 部分;OP 含量与 Ca-P 和 Fe/Al-P 的含量均有较好的正相关关系,而 Ca-P 与 Fe/Al-P 只有很弱的相关性。TN、有机质含量与 OP、TP、Ca-P 和 Fe/Al-P 均呈极显著正相关。TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Fe/Al-P、TP、OP 呈极显著正相关,而与 Ca-P 的相关性较弱;CaO 与 Ca-P 呈极显著正相关,与 OP 有一定的正相关,与其他形态的磷则没有或只有微弱的相关性。

**关键词:**浅水湖;沉积物;磷形态;理化性质;分布特征

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2008)01-0279-07

## Phosphorus Forms and Its Distribution Character in Sediment of Shallow Lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

JIN Xiang-can, PANG Yan, WANG Sheng-ru, ZHOU Xiao-ning

(Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environment Science, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Total phosphorus (TP), inorganic-phosphorus (IP), organic-phosphorus (OP), Fe/Al-bound phosphorus (Fe/Al-P) and Ca-bound phosphorus (Ca-P) in surface sediment of the seven shallow lakes along the middle-lower reaches of the Yangtze River were measured, using the standard measurement and test(SMT)procedure of phosphorus forms in the freshwater sediments. Correlation coefficients between phosphorus forms and sediment geochemical characteristics, such as total nitrogen, organic matter and major components were analyzed. In the study area, the TP content in surface sediment varied from  $217.8\sim 3337.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and the TP content in urban lake sediment was generally higher than in five-big freshwater lakes sediment, such as Taihu. The IP was the major phosphorus species in surface sediment, and accounted for 60%~80% of TP. In terms of the range of phosphorus forms content, Fe/Al-P>OP>Ca-P, whereas the range of percent content, Fe/Al-P>Ca-P>OP. The increase of surface sediment TP content was mainly due to Fe/Al-P and secondly to OP. OP was significantly and positively correlated to Fe/Al-P and Ca-P, Fe/Al-P was only weakly related to Ca-P. Total Nitrogen (TN), organic matter content were significantly and positively correlated to OP ( $r=0.931, 0.933$ ), TP ( $r=0.854, 0.862$ ), Ca-P ( $r=0.817, 0.826$ ), and to Fe/Al-P ( $r=0.697, 0.708$ ). TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was significantly and positively correlated to TP ( $r=0.867$ ), Fe/Al-P ( $r=0.856$ ) and to OP ( $r=0.702$ ), but only weakly related to Ca-P. CaO was significantly and positively correlated to Ca-P ( $r=0.734$ ), definitely correlated to OP ( $r=0.569$ ), but not or only weakly correlated to the other phosphorus forms.

**Keywords:** shallow lake; sediment; phosphorus forms; geochemical characteristics; distribution character

收稿日期: 2007-03-13

基金项目: 国家重点基础研究计划(973)项目(2002CB412301)

作者简介: 金相灿(1945—),男,浙江人,研究员,主要从事湖泊富营养化研究。E-mail: [Jinxiang@public.bat.net.cn](mailto:Jinxiang@public.bat.net.cn)

联系作者: 庞 燕 E-mail: [birdpangyan@hotmail.com](mailto:birdpangyan@hotmail.com)

磷在湖泊生态系统中的循环是人们极为关注的问题,这是因为磷一方面是湖泊生态系统中必不可少的营养元素,另一方面过剩的磷又会导致湖泊的富营养化,从而使湖泊生态平衡遭到破坏<sup>[9]</sup>。而通过测定沉积物中磷的不同化学形态及其含量,有助于研究水体中磷的形态、动态循环以及磷在水-沉积物界面的迁移转化过程<sup>[2]</sup>。

浅水湖泊是我国大部分湖泊的基本特色<sup>[9]</sup>,而沉积物-水界面磷的循环在浅水湖泊富营养化中比在深水湖中扮演了更为重要的角色<sup>[10]</sup>,因而研究浅水湖沉积物中磷的形态及其分布特征,对我国湖泊内源治理及富营养化的防治具有重要的现实意义。因此,本实验以长江中下游几个浅水湖泊的表层沉积物为研究对象,分析了样品的理化性质和磷形态,探讨了表层沉积物中磷形态的分布特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 沉积物样品的采集

选择了位于长江中下游的太湖、巢湖、鄱阳湖、洞庭湖、洪泽湖五大淡水湖以及南京玄武湖、武汉月湖两个城市湖泊的表层沉积物样品共 25 个作为研究对象。样品具体位置及采样时间详见表 1。

研究所用 25 个样品均为用彼得森采样器采自各湖泊约 10 cm 的表层沉积物。样品经冷冻干燥处理,分别过 18、60、100 目筛后,贮存在带塞的玻璃瓶中备用。

### 1.2 实验方法

沉积物主要元素组成用电感耦合等离子体发射光谱仪测定<sup>[4]</sup>,沉积物有机质总量用重铬酸钾法测定<sup>[5]</sup>,总氮用硒粉-硫酸铜-硫酸消化法测定<sup>[6]</sup>。

沉积物中各形态磷的测定采用 Ruban 等<sup>[11,12]</sup>在

表 1 采样点位置

Table 1 The location of sampling sites

样品号	所在湖泊	位置	特点状况
T-m1-33	太湖梅梁湾	梅梁湖犊山大闸入湖河口处	入湖口附近
T-m2-4	太湖梅梁湾	北纬 31°31' 325", 东经 120°09' 340"	湖中, 水厂附近
T-x1-4	太湖西山	苏州木渎东太湖——3 号桥附近	湖中
T-x2-4	太湖西山	北纬 31°10' 206", 东经 120°19' 477"	湖中
T-g1-3	太湖贡湖	贡湖, 三元大酒店附近	湖中
T-g2-4	太湖贡湖	北纬 31°24' 843", 东经 120°15' 242"	湖中
T-w-8	太湖五里湖	北纬 31°31' 23", 东经 120°16' 35"	湖中
H1-6	洪泽湖	北纬 33° 19' 23.8", 东经 118° 50' 57.1"	湖中
H2-6	洪泽湖	北纬 33° 19' 26.9", 东经 118° 48' 41.11"	湖中
H3-6	洪泽湖	北纬 33° 18' 43.6", 东经 118° 48' 3.8"	湖中
C-S4-2	巢湖	马尾河入湖口左上方湖内	湖中
C-S18-2	巢湖	马尾河入湖口右上方湖内	湖中
C-H14-2	巢湖	马尾河入湖河道内	航道
B-A1-4	鄱阳湖	北纬 29° 37' 72", 东经 116° 08' 419"	主航道
B-A2-4	鄱阳湖	北纬 29° 37' 505", 东经 116° 08' 739"	主航道
B-B2-4	鄱阳湖	北纬 29° 38' 176", 东经 116° 09' 103"	主航道
B-C1-3	鄱阳湖	北纬 29° 36' 617", 东经 116° 07' 841"	主航道
B-C2-3	鄱阳湖	北纬 29° 36' 520", 东经 116° 08' 059"	主航道
X1-10*	南京玄武湖	北纬 32° 04.141', 东经 118° 47.200'	湖中
X2-10*	南京玄武湖	北纬 32° 04.148', 东经 118° 47.417'	湖中
Y1-17	武汉月湖	梅子山, "七" 字围墙正前方约 100 m 处	湖中
Y2-20	武汉月湖	油脂化学厂排污口正前方约 100 m 处	湖中
D1-9	西洞庭湖	北纬 28° 54' 47", 东经 112° 07' 10"	坡头, 沅水入湖口处
D2-7	南洞庭湖	北纬 28° 51' 5", 东经 112° 18' 26"	小河嘴
D3-8	西洞庭湖	北纬 29° 03' 48", 东经 112° 17' 45"	南嘴, 澧水入湖口处

注: (1)T:太湖;H:洪泽湖;C:巢湖;B:鄱阳湖;D:洞庭湖;X:玄武湖;Y:月湖;m:梅梁湖;x:西山东太湖;g:贡湖。(2)带\*号的样品为底泥已经过疏浚。

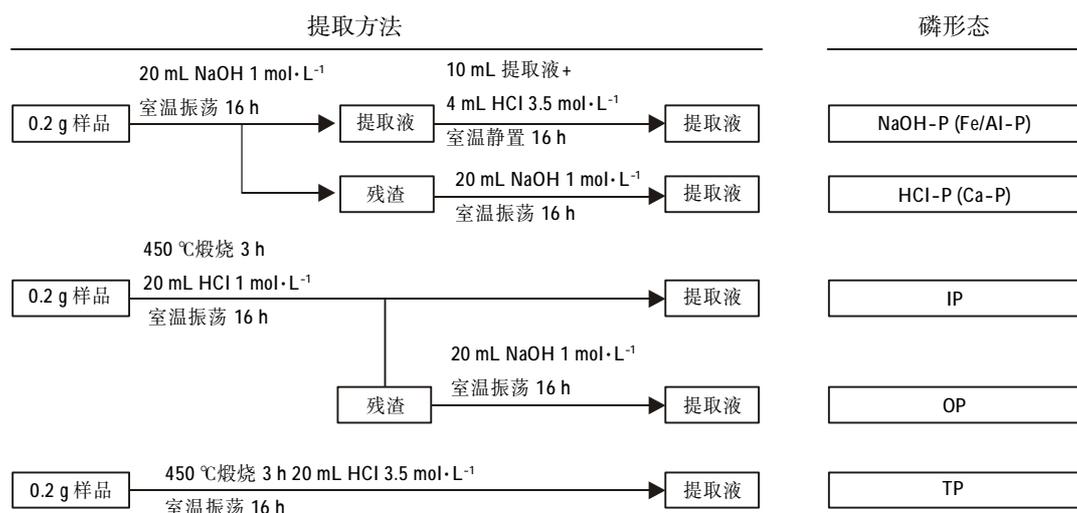


图 1 淡水沉积物磷形态分离 SMT 法

Figure 1 SMT protocol for phosphorus forms sequential extraction in freshwater sediment

欧洲标准测试委员会框架下发展的淡水沉积物磷形态分离 SMT 法, 该法将沉积物中的磷分为 Fe/Al-P、Ca-P、IP、OP 和 TP, 具体步骤见图 1。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物的性质

本研究所有沉积物部分样品的理化性质, 在本实验室已有专人进行了分析研究, 详见文献[6], 这里只对其进行简单的描述。

研究样品中 TN 含量在 251.3~5 190.0 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, 其最大值出现在武汉月湖的 Y2-20, 最小值出现在巢湖的 C-H14-2, 最大值与最小值相差约 50 倍; 有机质含量在 0.24%~10.66% 之间, 最大值出现在太湖的 T-m1-33, 最小值出现在巢湖的 C-S18-2, 其最大最小值相差也近 50 倍, 与 TN 变化范围相近; 二者变化趋势基本一致, 即 TN 含量高的沉积物, 其有机质的含量也相应高, 城市湖泊中 TN 和有机质含量总体上高于太湖等五大淡水湖。

沉积物样品中主要元素组成的大小顺序总体为 SiO<sub>2</sub>>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>CaO>TiO<sub>2</sub>>MnO。其中 SiO<sub>2</sub> 的含量在 46.74%~78.92% 之间; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在 8.25%~17.93% 之间; TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在 2.53%~11.52% 之间; CaO 在 0.22%~5.20% 之间; TiO<sub>2</sub> 在 0.67%~0.95% 之间, MnO 在 0.05%~0.18% 之间。其中 SiO<sub>2</sub> 与 TN 等的变化趋势相反, 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 则与 TN 等的变化趋势基本一致。

### 2.2 沉积物中磷的赋存形态

研究区域内, 不同沉积物样品中磷形态测定结果见表 2, 沉积物样品中各形态磷的分布情况见图 2。

分析研究结果, 在所有研究样品中, 总磷含量在 217.8~3 337.2 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, 最大值出现在太湖的 T-m1-33, 最小值在巢湖的 C-S4-2, 最大最小值相差约 15 倍。除了太湖的 T-m1-33 外, 五大淡水湖其余样品中 TP 含量均低于 1 000 mg·kg<sup>-1</sup>, 而来自两个城市湖泊的样品其 TP 含量均超过 1 000 mg·kg<sup>-1</sup>, 可见城市湖泊沉积物的营养水平总体上要高于太湖等五大淡水湖, 这与其受人类活动干扰更大有关。下面对各形态磷分别加以讨论。

(1) 无机磷。所有样品中, 无机磷含量在 144.7~2 912.6 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, 最大值出现在太湖的 T-m1-33, 最小值出现在巢湖的 C-S4-2, 最大最小值相差约 20 倍, 含量变化趋势与总磷基本一致。无机磷所占总磷比重范围在 54.1%~89.2% 之间, 大部分在 60%~80% 之间, 表明研究区域内沉积物中的磷以无机磷为主。

(2) Fe/Al-P (NaOH-P)。这里所测出的 Fe/Al-P 是指被 Al、Fe、Mn 的氧化物及其水合物所包裹的磷, 被认为是可为生物所利用的磷, 与人类活动有关, 主要来源于生活污水和工业废水<sup>[11]</sup>。在所有研究样品中, Fe/Al-P 含量在 34.4~2 470.6 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, 最大值出现在太湖的 T-m1-33, 最小值出现在太湖的 T-x1-4, 最大值与最小值相差近 80 倍, 变化范围非常大, 表明人类活动对各湖泊以及同一湖泊不同区域的影响程度不同。随着沉积物中 TP 含量的增加, Fe/Al-P 含量总体上也在增加。Fe/Al-P 所占 TP 比重范围在 8%~74% 之间, 其中在 T-m1-33 中的比重最大, 在 T-x1-4 中的比重最小, 两者相差约 9 倍, 变化幅度较大。

(3) Ca-P。也称为磷灰石磷, 来源于碎屑岩或本

表 2 沉积物样品中各形态磷的含量  
Table 2 Concentration of phosphorus forms in sediment samples

样品号	TP		Fe/Al-P		Ca-P		IP		OP	
	/mg · kg <sup>-1</sup>	/mg · kg <sup>-1</sup>	占 TP%	/mg · kg <sup>-1</sup>	占 TP%	/mg · kg <sup>-1</sup>	占 TP%	/mg · kg <sup>-1</sup>	占 TP%	
T-m1-33	3 337.2	2 470.60	74.03	391.5	11.73	2 912.63	87.28	402.53	12.06	
T-m2-4	404.8	59.40	14.67	203.78	50.34	255.43	63.10	117.58	29.05	
T-x1-4	420.5	34.41	8.18	333.48	79.31	365.98	87.03	42.75	10.17	
T-x2-4	451.3	56.28	12.47	316.67	70.17	359.11	79.57	52.81	11.70	
T-g1-3	306.8	61.70	20.11	110.99	36.18	165.95	54.09	119.58	38.98	
T-g2-4	420.2	128.76	30.64	124.53	29.64	241.11	57.38	135.71	32.30	
T-w-8	809.2	338.12	41.78	264.36	32.67	594.28	73.44	191.10	23.62	
H-1-6	631.7	121.53	19.24	295.65	46.80	413.15	65.40	182.58	28.90	
H-2-6	639.9	148.46	23.20	283.05	44.23	432.78	67.63	175.74	27.46	
H-3-6	654.6	145.21	22.18	298.10	45.54	441.43	67.44	182.94	27.95	
C-S4-2	217.8	59.28	27.22	94.05	43.18	144.76	66.46	63.15	28.99	
C-S18-2	232.5	37.24	16.02	150.20	64.60	189.95	81.70	43.39	18.66	
C-H14-2	221.0	150.73	68.20	57.31	25.93	197.12	89.19	26.17	11.84	
B-A1-4	486.1	255.11	52.48	100.96	20.77	314.37	64.67	130.93	26.93	
B-A2-4	427.6	172.97	40.45	117.08	27.38	288.57	67.49	123.15	28.80	
B-B2-4	397.7	188.26	47.34	127.99	32.18	310.91	78.18	65.11	16.37	
B-C1-3	323.7	108.98	33.67	89.31	27.59	200.50	61.94	109.25	33.75	
B-C2-3	291.2	134.12	46.06	66.04	22.68	171.17	58.78	79.88	27.43	
X1-10	1 062.4	294.44	27.71	435.90	41.03	726.76	68.41	280.93	26.44	
X2-10	1 035.6	304.06	29.36	485.50	46.88	794.40	76.71	201.14	19.42	
Y1-16	1 640.0	591.20	36.05	565.62	34.49	1 155.66	70.47	413.22	25.20	
Y2-20	2 051.0	981.63	47.86	627.79	30.61	1 569.88	76.54	397.59	19.39	
D1-9	947.6	425.64	44.90	201.89	21.30	622.35	65.70	261.92	27.60	
D2-7	739.8	286.10	38.70	214.74	29.00	504.40	68.20	202.57	27.40	
D3-8	775.0	173.99	22.50	315.16	40.70	500.67	64.60	213.83	27.60	

地自生<sup>[11]</sup>,被认为是生物不可利用的磷。研究区域内,其含量在 57.3~627.8 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,最大值出现在武汉月湖的 Y2-20,最小值出现在巢湖的 C-H14-2,两者相差 10 倍左右,变化范围比 Fe/Al-P 要小的多,表明沉积物中 Ca-P 的含量相对较稳定,这与其来源特征相符合。Ca-P 所占 TP 比重在 11.7%~79%之间,其中在样品 T-x1-4 中的比重最大,在 T-m1-33 中的比重最小,两者相差近 7 倍,变化幅度较 Fe/Al-P 小些。同时发现,五大淡水湖沉积物中 Ca-P 含量基本处于 100~300 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,这可能是该地区 Ca-P 含量的背景值范围。

(4)OP。被认为部分可为生物所利用,与人类活动有关,主要来源于农业面源<sup>[11]</sup>。其含量在 26.2~413.2 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,最大值出现在武汉月湖的 Y1-16,最小值出现在巢湖的 C-H14-2,两者相差近 16 倍,变化范围介于 Fe/Al-P 与 Ca-P 之间。所有样品中 OP 占 TP 比重范围在 10.2%~39%之间,其中在样品 T-g1-3 中的比重最大,在样品 T-x1-4 中的比重最

小,两者相差约 4 倍,变化幅度比 Fe/Al-P 和 Ca-P 都小。

从实验结果还可看出,所有采自航道上的沉积物样品,其中无机磷以 Fe/Al-P 为主,其原因可能与人类活动的影响有关,但具体原因还有待深入研究。而位于入湖河口的样品,由于受上游人类活动影响不同,其沉积物中磷形态相对分布没有一定的规律性。比较两个城市湖泊,由于玄武湖已经过疏浚,其无机磷含量以 Ca-P 为主,而未疏浚的武汉月湖,其无机磷含量以 Fe/Al-P 为主,而疏浚对沉积物中磷形态分布的影响尚需进一步研究。

### 2.3 沉积物中磷形态分布特征

了解沉积物中磷形态的分布特征对于治理湖泊富营养化有着重要的意义,而分析沉积物中各形态磷之间的关系以及它们与沉积物的某些理化性质之间的相关关系,有利于认识磷形态分布特征,从而更好地为湖泊治理及管理服务,这方面的研究前人已做了大量的工作<sup>[7,8,10,13-16]</sup>。这里我们分析了各形态磷之间

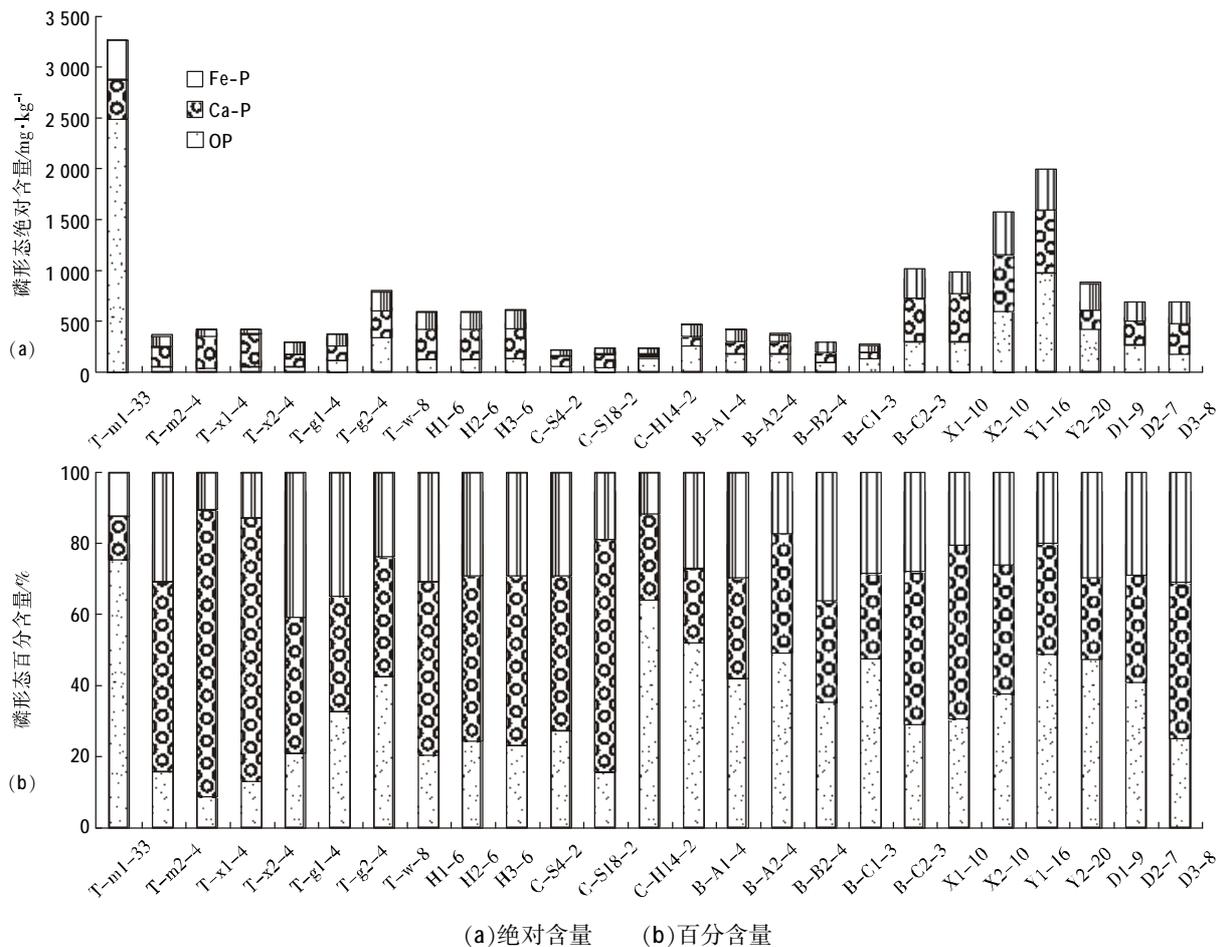


图 2 沉积物样品中各形态磷的分布

Figure 2 Distribution of phosphorus forms in sediment samples

的相关性以及沉积物中 TN、有机质含量和主要氧化物组成、与沉积物中各形态磷的相关性,以期更深入地了解长江中下游浅水湖表层沉积物中磷形态的分布特征。

由沉积物中各形态磷含量间的相关性分析结果(见图 3)可以看出,湖泊表层沉积物中 TP 含量与 Fe/Al-P 的相关性最好,与 OP 含量也有较好的相关性,两者均达到极显著水平,与 Ca-P 的相关性相对较差,只达到了显著水平,表明沉积物中 TP 含量的增加,主要来自 Fe/Al-P,其次是 OP,这与前人研究结果一致<sup>[2]</sup>,当然也有部分来自 Ca-P。在各形态磷中,OP 与 Fe/Al-P、Ca-P 均呈较好的正相关关系,都达到了极显著水平,表明 OP 含量对 Fe/Al-P、Ca-P 的含量均有影响。而 Ca-P 与 Fe/Al-P 的相关性很小,表明两者的含量相对独立,可能是因为二者来源不同所致。

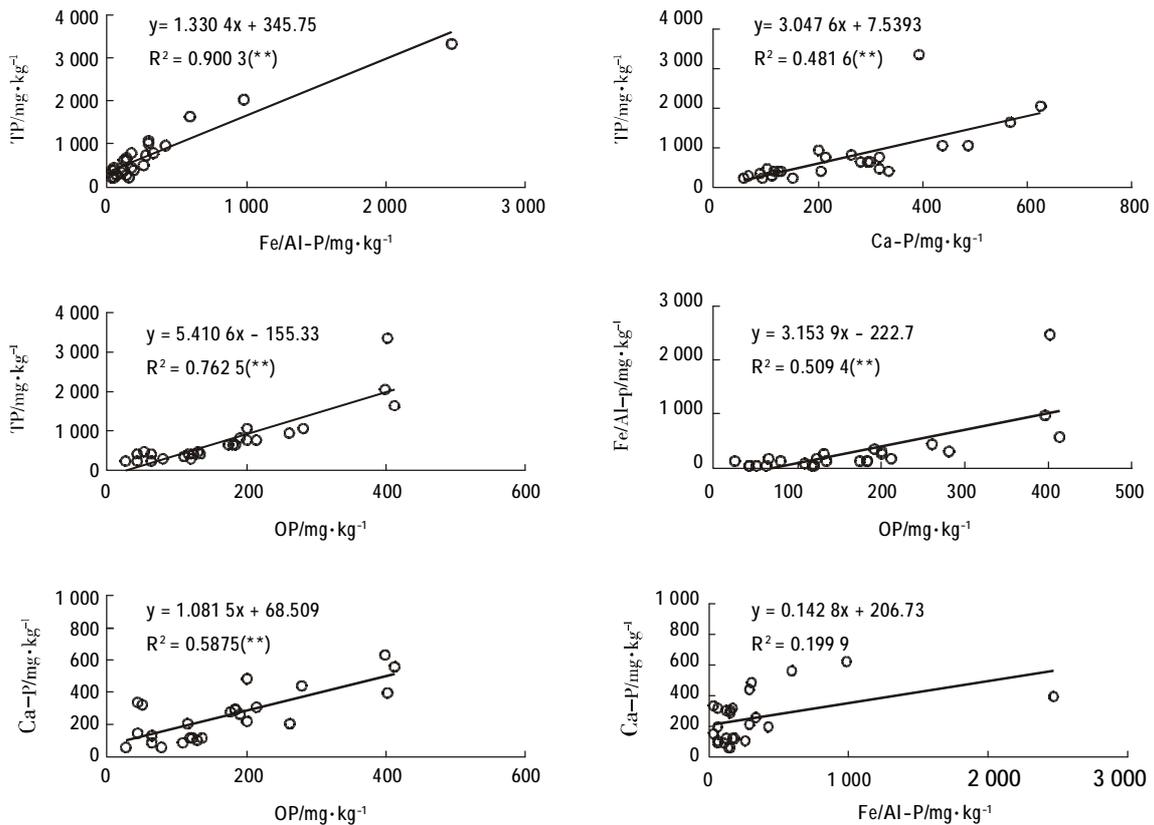
通过分析沉积物中磷形态与其沉积物的理化性

质如有机质含量、主要氧化物组成等之间的关系可以用来推断沉积物中磷的特性<sup>[6]</sup>。Williams 等<sup>[7]</sup>在研究 Erie 湖的表层沉积物时发现沉积物性质与其中磷形态具有相关性。Ostrofsky<sup>[8]</sup>在研究美国东北部湖泊表层沉积物时发现铁与无机磷形态之间、有机质与有机磷之间具有显著的相关性。

本研究分析了沉积物样品各形态磷与总氮含量、有机质含量及 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO 的相关性,结果见表 3。

由表 3 可以清楚地看到,沉积物样品中 TN 含量与各形态磷之间均呈极显著正相关关系,其中与 OP 的相关性最好,与 TP 和 Ca-P 的相关性也较好,与 Fe/Al-P 相关性相对较差;有机质的含量与各形态磷含量均呈极显著正相关关系,其中与 OP 的相关性最好,与 TP 和 Ca-P 的相关性较好,与 Fe/Al-P 的相关性相对较差,结果与 TN 相一致。这表明,TN 和有机质的输入,影响着沉积物中磷形态的分布。

在主要氧化物组成中,主要是 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO 与



(\*\* 极显著相关  $P < 0.01$ , \* 显著相关  $P < 0.05$ ; 样品数  $n = 25$ )

(\*\*excellentlly correlated  $P < 0.01$ , \*significantly correlated  $P < 0.05$ , samples number  $n = 25$ )

图3 沉积物样品中各形态磷含量之间的相关关系

Figure 3 The correlations of various phosphorus forms in sediment samples

表3 沉积物样品中各形态磷与总氮、有机质、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$  和 CaO 之间的相关性

Table 3 Correlation coefficients between phosphorus forms and TN, OM,  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  and CaO in sediment samples

	TP	Fe/Al-P	Ca-P	OP
TN	0.854**	0.697**	0.817**	0.931**
有机质	0.862**	0.708**	0.826**	0.933**
$\text{TFe}_2\text{O}_3$	0.867**	0.856**	0.536	0.702**
CaO	0.249	0.014	0.734**	0.569*

注: \* 在 0.05 水平上显著相关, \*\* 在 0.01 水平上显著相关, (双尾检验); TN 样本数  $n = 19$ , 有机质样本数  $n = 22$ ;  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  和 CaO 的样本数  $n = 13$ 。

各形态磷含量的关系较密切。 $\text{TFe}_2\text{O}_3$  与 TP、Fe/Al-P 和 OP 均呈极显著正相关关系,这与前人的研究结果一致<sup>[9,19]</sup>,而与 Ca-P 相关性较小。CaO 与 Ca-P 有较好的正相关性,与 OP 也有一定的相关性,而与 TP、Fe/Al-P 的相关性很小或没有。这一结果也表明了各形态磷的来源的差异。

### 3 结论

通过对所有 25 个浅水湖表层沉积物样品的研究分析,可以得出如下结论:

(1) 研究区域内,总磷含量在 217.8~3 337.2  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,城市湖泊总磷含量总体上高于太湖等五大淡水湖;沉积物中磷以无机磷为主,有机磷为辅,前者占总磷的比例多数处于 60%~80%之间。从各形态磷含量的变化范围来看,Fe/Al-P>OP>Ca-P, 而从百分含量的变化范围来看,则是 Fe/Al-P>Ca-P>OP。

(2) TP 含量的增加主要来自 Fe-P 部分,其次来自 OP,当然也有部分来自 Ca-P;OP 与 Ca-P 和 Fe/Al-P 均有较好的正相关关系,而 Ca-P 与 Fe/Al-P 只有很弱的相关性。

(3)研究样品中, TN、有机质与各形态磷均呈极显著正相关关系, 比较而言, 二者与 OP 的相关性最好, 与 Fe/Al-P 的相关性最差; 在沉积物主要氧化物中, TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Fe/Al-P、TP 的相关性较好, 而 CaO 则与 Ca-P 的相关性较好。

#### 参考文献:

- [1] 翁焕新. 滨海沉积物和间隙水中的磷研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(2): 148-153.
- [2] 扈传昱, 等. 珠江口沉积物中磷的赋存形态[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(4): 21-25.
- [3] 赵生才. 我国湖泊富营养化的发生机制与控制对策[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 138-140.
- [4] SY/T5163-1995. 沉积岩粘土矿物相对含量 X 射线衍射分析方法[S].
- [5] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978.
- [6] 孟凡德, 等. 长江中下游湖泊沉积物理化性质研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(增刊): 24-29.
- [7] 高效江, 等. 长江口滨岸潮滩沉积物中磷的环境地球化学特征[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 711-715.
- [8] 郑丽波, 等. 东海特定海区表层沉积物中磷的形态、分布及其环境意义[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(3): 274-282.
- [9] 翁焕新. 河流沉积物中磷的结合状态及其地球化学意义[J]. 科学通报, 1993, 38(13): 1219-1222.
- [10] Martin Sondergaard, Jorgen Windolf and Erik Jeppesen. Phosphorus fractions and profiles in the sediment of shallow Danish Lakes as related to phosphorus load, sediment composition and Lake chemistry[J]. *Wat. Res.*, 1996, 30(4): 992-1002.
- [11] Ruban V, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments - A synthesis of recent works [J]. *Fresenius J Anal Chem*, 2001, 370: 224-228.
- [12] 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 [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, 1(4): 403-407.
- [13] Frankowski L, Bolalek J, Szostek A. Phosphorus in bottom sediments of pomeranian Bay (Southern Baltic-Poland), Estuarine [J]. *Coastal and Shelf Science*, 2002, 54: 1027-1038.
- [14] William A House, Frank H Denison. Total phosphorus content of river sediments in relationship to calcium, iron and organic matter concentrations [J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 282-283: 341-351.
- [15] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments - Lakes Volvi and Koronia, N Greece [J]. *Chemosphere*, 2002, 46: 1147-1155.
- [16] Andrieux-Loyer F, Aminot A. Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics in French coastal areas, Estuarine [J]. *Coastal and Shelf Science*, 2001, 52: 617-629.
- [17] Williams J D H, Jaquet J-M, Thomas R L. Forms of phosphorus in the surficial sediments of lake Erie [J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canadian*, 1976, 33: 413-429.
- [18] Ostrofsky M L. Phosphorus species in the surficial sediments of lakes of Eastern North America [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1987, 44: 960-966.
- [19] Hisashi J. Fractionation of phosphorus and releasable fraction in sediment mud of Osaka Bay [J]. *Bull Jap Soc Sc Fish*, 1983, 49(3): 447-454.