

# 东太湖沉积物中磷的形态分布特征研究

杨超<sup>1</sup>, 谷孝鸿<sup>2</sup>, 曾庆飞<sup>2</sup>, 蔡春芳<sup>1</sup>, 徐升宝<sup>1</sup>, 张伟业<sup>1</sup>

(1. 苏州大学基础医学与生物科学学院, 江苏 苏州 215123;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

**摘要:**应用化学连续提取法对东太湖沉积物中不同形态的磷进行提取,并分析其形态分布特征。结果表明,东太湖沉积物中磷形态以碎屑态磷(Ca-P)、有机磷(Or-P)、自生磷(De-P)和铁结合态磷(Fe-P)为主,平均含量分别为(188.6 ± 32.5)、(73.1 ± 18.6)、(45.2 ± 3.3)和(34.3 ± 18.5) μg/g;弱吸附态磷(Ex-P)、闭蓄态磷(Oc-P)和铝结合态磷(Al-P)含量较低,分别为(6.7 ± 2.2)、(4.0 ± 1.9)和(1.3 ± 0.4) μg/g;总磷(TP)的平均值为(353.1 ± 46.3) μg/g。4种不易释放的磷Ca-P、Or-P、De-P和Oc-P共占TP的88%,3种易释放的磷Fe-P、Ex-P和Al-P占12%。除Ca-P含量随沉积物深度增加而增大,Al-P含量较低且随深度增加无明显变化之外,其他各形态磷含量大致随深度增加而减少,表现出“表层富集”现象,说明东太湖的内源磷负荷虽然较小,但有增加的趋势。

**关键词:**磷形态;沉积物;东太湖

中图分类号:X142 文献标志码:A 文章编号:1674-3075(2012)01-0005-04

东太湖位于苏州市以南,是太湖东南部东山半岛东侧的一个狭长型湖湾,是长江中下游地区典型的草型湖泊,是太湖的主要出水通道,也是上海市、浙江省杭嘉湖城镇供水取水口的主要水源和江苏省吴江市的供水水源地。近年来东太湖氮(N)、磷(P)浓度呈上升趋势,2002-2003年的N、P浓度已使全湖主要水体呈中、富营养状态(焦锋和黄龙,2010)。水体P来源可以分为外源P和内源P(Kaiserli et al, 2002)。当外源P得到有效控制时,内源P的释放是影响水体P浓度的关键因素(汪艳雯等,2009)。内源P负荷主要来自沉积物的释放,是浅水湖泊形成蓝藻水华的重要因素(黄清辉等,2003),其释放量不仅与各种环境因素有关,且与沉积物中P的形态分布密切相关(汪艳雯等,2009)。分析沉积物中P的形态及其含量,有助于理解沉积物P的行为特征及其迁移转化过程(Sondergaard et al, 2003)。采用改进的七步连续提取法(李悦等,1998;朱广伟和秦伯强,2003),研究东太湖沉积物中P的形态分布特征,讨论其对水体富营养化的影响,为东太湖的治理和改善提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与处理

2010年8月在东太湖选择有代表性的6个采样点(见图1),采集柱状沉积物样品用洁净的塑料袋密封好竖直带回,从沉积物表面向下取30cm的柱芯,按照间隔3cm分段,沉积物样品置于阴凉处在室温下风干,去除石块、枝叶等杂质后用玛瑙研钵研磨,过100目筛,4℃避光保存。

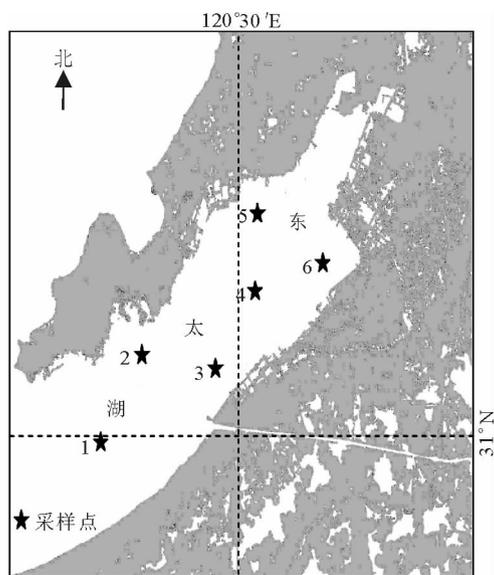


图1 东太湖采样点位置

Fig. 1 Location of sampling sites in East Taihu Lake

### 1.2 磷的提取与分析

采用化学连续提取法(李悦等,1998;朱广伟和

收稿日期:2011-08-04 收修改稿日期:2011-12-18

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-012);中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-YW14)。

通讯作者:蔡春芳,女,副教授,主要从事动物营养学和环境营养学研究。E-mail: szcfc@ yahoo. com. cn

作者简介:杨超,1987年生,男,硕士研究生,研究方向为水生生物学。E-mail: yangchao1015@126.com

秦伯强,2003)提取弱吸附态 P (Ex-P)、铝结合态 P (Al-P)、铁结合态 P (Fe-P)、闭蓄态 P (Oc-P)、自生 P (De-P)、碎屑态 P (Ca-P) 和有机 P (Or-P) 共 7 种形态的 P, 并采用钼锑钨分光光度法测定 P 的含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 磷的形态分布特征

东太湖沉积物中 P 形态以 Ca-P、Or-P、De-P 和 Fe-P 为主, 平均含量分别为 ( $188.6 \pm 32.5$ )、

( $73.1 \pm 18.6$ )、( $45.2 \pm 3.3$ ) 和 ( $34.3 \pm 18.5$ )  $\mu\text{g/g}$ ; Ex-P、Oc-P 和 Al-P 含量较低, 分别为 ( $6.7 \pm 2.2$ )、( $4.0 \pm 1.9$ ) 和 ( $1.3 \pm 0.4$ )  $\mu\text{g/g}$ , TP 平均值为 ( $353.1 \pm 46.3$ )  $\mu\text{g/g}$  (见表 1)。东太湖沉积物中 Ca-P 含量最高, 占 TP 的 53.4%, 其次是 Or-P、De-P 和 Fe-P, 含量较低的是 Ex-P、Oc-P 和 Al-P (见表 1)。4 种不易释放态磷 Ca-P、Or-P、De-P 和 Oc-P 占 TP 的 88%, 而 3 种易释放态磷 Fe-P、Ex-P 和 Al-P 占 TP 的 12%。

表 1 东太湖沉积物中不同形态磷含量及比例

Tab. 1 Content and percentage of phosphorus fractions in sediments of East Taihu Lake

磷形态	各采样点的磷含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$						平均值	比例/ %
	样点 1	样点 2	样点 3	样点 4	样点 5	样点 6		
Ex-P	6.9	5.6	5.8	4.4	10.7	6.6	$6.7 \pm 2.2$	1.9
Al-P	1.5	1.2	1.1	0.6	1.3	2.0	$1.3 \pm 0.4$	0.4
Fe-P	6.2	35.8	45.3	18.8	56.3	43.2	$34.3 \pm 18.5$	9.7
Oc-P	2.4	1.9	2.9	4.5	6.5	5.9	$4.0 \pm 1.9$	1.1
De-P	40.9	44.5	49.2	48.3	46.2	42.2	$45.2 \pm 3.3$	12.8
Ca-P	195.1	168.5	170.5	158.4	190.4	248.6	$188.6 \pm 32.5$	53.4
Or-P	43.3	92.9	85.5	70.1	85.1	61.6	$73.1 \pm 18.6$	20.7
TP	296.3	350.4	360.3	305.1	396.5	410.1	$353.1 \pm 46.3$	100.0

### 2.2 各形态磷的垂直分布特征

东太湖沉积物中主要易释放态的 Ex-P 和 Fe-P 含量随沉积物深度增加而降低, 而易释放态的 Al-P 总体含量较低, 随着沉积物深度的增加无明显变化趋势; 不易释放态的 Or-P、De-P 和 Oc-P 含量随沉积物深度增加而降低, 而不易释放态的 Ca-P 总体含量较高, 随着沉积物深度的增加呈上升趋势; TP 含量随沉积物深度的增加而降低 (见图 2)。

al, 2002), 难以被藻类直接利用及参与短时态 P 的循环, 主要表现出埋藏的特性 (Rydin, 2000), Ca-P 被看作比较稳定的磷形态 (Gonsiorczyk, 1998)。东太湖沉积物中 Ca-P 含量很高, 占总磷 (TP) 的 53.4%, 与袁和忠等 (2010) 的研究结果一致。Ca-P 的形成必须具备很高的磷酸盐浓度, 促使磷灰石晶核形成和晶体沉淀 (李军等, 2004)。人为排放造成上覆水体含高浓度的钙离子和磷酸根, 往往能形成钙磷酸盐沉淀, 在人为 P 输入量较高的湖泊, Ca-P 的含量较高 (王琦等, 2006)。东太湖较高的 Ca-P 含量提示其人为 P 输入量较高, 这可能与近年东太湖大规模的围网养蟹有关。养蟹过程要投入大量的螺类和饵料鱼, 河蟹摄食后剩下的螺壳、鱼磷及骨骼等含磷和钙都较高, 其大量沉积使 Ca-P 水平升高。

Or-P 的含量与其输入量、沉积物沉积特性、早期成岩作用和生物作用等因素有关。Or-P 含量占 TP 的 20.7%, 与章婷曦等 (2007) 和李江等 (2007) 对太湖的研究结果基本一致。东太湖属于草型湖泊, 沉积物中存在大量动物和植物残体腐殖质, 无疑会使沉积物中 Or-P 的平均含量和相对含量较高。

Fe-P 是沉积物中主要的活性磷组分, 对沉积物—水界面磷的循环起着主要作用 (章婷曦等, 2007)。东太湖 Fe-P 含量占 TP 的 9.7%, 远低于章婷曦等 (2007) 对梅梁湾和黄清辉等 (2004) 对五里湖的研究结果。Fe-P 是一种指示环境污染程度的

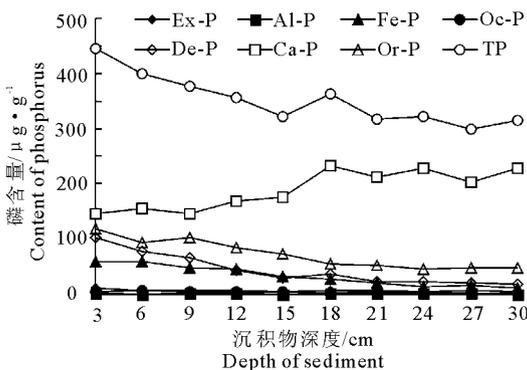


图 2 东太湖沉积物中不同形态磷的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of phosphorus fractions in sediments of East Taihu Lake

## 3 讨论

### 3.1 磷的形态分布分析

Ca-P 主要来源于陆源碎屑岩和由自生  $\text{CaCO}_3$  和水解有机 P 共同沉淀的自生磷灰石 (Kaiserli et

标志(黄清辉等,2004)。富营养化程度较重的湖泊,其中的磷释放50%是Fe-P(Wang et al, 2006)。本研究结果表明,与梅梁湾和五里湖相比,东太湖水体污染程度相对较低。

本研究中东太湖Ca-P和Or-P含量占TP的74%,Fe-P和Al-P含量占10%,而在污染较严重的梅梁湾Fe/Al-P是磷的主要存在形态,远高于Ca-P和Or-P(王琦,2006);TP的平均值为 $(353.1 \pm 46.3) \mu\text{g/g}$ ,与太湖胥口湾处较接近,远低于太湖梅梁湾(章婷曦等,2007)。这可能与东太湖属于草型湖区,优势水生植物苦草(*Vallisneria spiralis* L.)等生长旺盛,水体受污染程度相对较低有关(李江等,2007)。

### 3.2 各形态磷垂直分布形成原因

东太湖沉积物的Ex-P、Fe-P与TP含量随沉积深度增加而降低。究其原因,一方面可能由于下层沉积物形成年代较久,经过多年的矿化、微生物分解和植物吸收利用,其磷含量逐渐降低(Wang et al, 2006);另一方面可能由于近年来湖泊中人为的磷输入量较高,使东太湖沉积物中Ex-P和TP在表层富集,且东太湖表层沉积物氧化还原电位高于深层沉积物(Wang et al, 2006),而在低氧化还原电位环境中,处于还原状态的沉积物很容易使Fe-P表面的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 保护层转化为 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,然后溶解释放出磷(朱广伟等,2003),使沉积物Fe-P含量随沉积深度的增加而降低。

Or-P随着沉积物深度的增加,明显呈现出下降趋势。这可能因为东太湖表层沉积物有机质的沉积速率大,而下层沉积物有机质的沉积速度较低(黄清辉等,2004)。

东太湖Ca-P随着沉积物深度增加呈现出上升趋势。Ca-P是东太湖沉积物磷的主要沉积形式,其主要贡献者是各种难溶性的磷酸钙矿物,比如羟基磷灰石、过磷酸钙等,这些矿物在沉积物中稳定性较高(Gonsiorczyk, 1998),主要表现出沉积埋藏的特性,是沉积物早期成岩过程的最终产物之一,所以在深层沉积物中处于较高水平(Rydin, 2000)。

综上所述,东太湖的内源磷负荷虽然较小,但近年人为的磷输入量较高,使沉积物主要易释放态磷与总磷表现出表层富集的趋势,提示内源污染强度有增加趋势。

### 参考文献

- 黄清辉,王东红,王春霞,等. 2003. 沉积物中磷形态与湖泊富营养化的关系[J]. 中国环境科学, 23(6): 583 - 586.
- 黄清辉,王东红,王春霞,等. 2004. 太湖梅梁湾和五里湖沉积物磷形态的垂直变化[J]. 中国环境科学, 24(2): 147 - 150.
- 焦锋,黄龙. 2010. 东太湖水环境管理框架研究与信息系统构建[J]. 广州环境科学, 25(3): 4 - 7.
- 李江,金相灿,姜霞,等. 2007. 太湖不同营养水平湖区沉积物理化性质和磷的垂向变化[J]. 环境科学研究, 20(4): 64 - 69.
- 李军,刘丛强,王仕禄,等. 2004. 太湖五里湖表层沉积物中不同形态磷的分布特征[J]. 矿物学报, 24(4): 405 - 410.
- 李悦,乌大年,薛水先. 1998. 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[J]. 海洋环境科学, 17(1): 15 - 20.
- 汪艳雯,岳钦艳,刘庆,等. 2009. 山东省南四湖底泥中磷的形态分布特征[J]. 中国环境科学, 29(2): 125 - 129.
- 王琦,江霞,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 - 126.
- 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.
- 章婷曦,王晓蓉,金相灿. 2007. 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, 26(4): 1207 - 1213.
- 朱广伟,高光,秦伯强,等. 2003. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. 水科学进展, 14(6): 714 - 719.
- 朱广伟,秦伯强. 2003. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究[J]. 农业环境科学学报, 22(3): 349 - 352.
- Gonsiorczyk T, Casper P, Koschel R. 1998. Phosphorus-binding forms in the sediment of an oligotrophic and an eutrophic hardwater lake of the Baltic Lake District[J]. Water Science and Technology, 37(3): 51 - 58.
- Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. 2002. Phosphorus fractionation in lake sediments-lakes Volvi and Koronia N[J]. Chemosphere, 46(8): 1147 - 1155.
- Rydin E. 2000. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment[J]. Wat Res, 34(7): 2037 - 2042.
- Sondergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. 2003. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes[J]. Hydrobiologia, 231: 506 - 509.

Wang S R, Jin X C, Zhao H C, et al. 2006. Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in

China[J]. Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects, 273: 109 – 116.

(责任编辑 杨春艳)

## Phosphorus Fractions and Distribution in Sediments of East Taihu Lake

YANG Chao<sup>1</sup>, GU Xiao-hong<sup>2</sup>, ZENG Qing-fei<sup>2</sup>, CAI Chun-fang<sup>1</sup>, XU Sheng-bao<sup>1</sup>, ZHANG Wei-ye<sup>1</sup>

(1. School of Biology and Basic Medical Sciences, Soochow University, Suzhou 215123, China;

2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Various fractions of phosphorus were extracted in sediment samples of East Taihu Lake by using a sequential chemical extraction, and the fractions distribution characteristics of phosphorus fractions in sediments were analyzed. The results indicated that the average concentrations of Ca-bound P (Ca-P), organic P (Or-P), detrital apatite P (De-P) and Fe-bound P (Fe-P) were  $(188.6 \pm 32.5)$ ,  $(73.1 \pm 18.6)$ ,  $(45.2 \pm 3.3)$  and  $(34.3 \pm 18.5)$   $\mu\text{g/g}$  respectively, representing the major existence. While the average concentrations of exchangeable P (Ex-P), occluded P (Oc-P) and Al-bound P (Al-P) were  $(6.7 \pm 2.2)$ ,  $(4.0 \pm 1.9)$  and  $(1.3 \pm 0.4)$   $\mu\text{g/g}$  respectively. The average concentrations of total phosphorus (TP) were  $(353.1 \pm 46.3)$   $\mu\text{g/g}$ . Phosphorus of Ca-P, Or-P, De-P and Oc-P, which are not easy to release, accounted for 88%, while the easy release phosphorus of Fe-P, Ex-P and Al-P accounted for 12%. Ca-P content ascended directly with the depth of sediments, Al-P content being no significant variation, whilst contents of other forms of phosphorus declined with the depth of sediments, which presented surface enrichment phenomenon. The results suggested that the internal phosphorus load in sediment was not very serious yet, but it was increasing.

**Key words:** phosphorus fractions; sediment; East Taihu Lake