

鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态及分布特征*

向速林^{1,2}, 周文斌¹

(1: 南昌大学教育部鄱阳湖湖泊生态与生物资源利用重点实验室, 南昌 330047)
(2: 华东交通大学环境工程系, 南昌 330013)

摘要: 利用分级提取法对鄱阳湖沉积物进行了磷形态的分级提取和测定, 系统研究了沉积物中磷的赋存形态及分布特征. 结果表明, 鄱阳湖表层沉积物中磷的赋存形态主要包括铁磷(Fe-P)、钙磷(Ca-P)、铝磷(Al-P)、可溶性磷(DP)等无机磷(IP)及有机磷(OP), 各形态磷的空间分布基本具有从河口地区监测点向湖区监测点方向升高的趋势, 垂向分布上总磷及各形态磷含量随深度增加而降低. 表层沉积物(0-2cm)中总磷含量为 578.36-813.55mg/kg, 主要由无机磷组成, 无机磷中以 Fe-P 含量最高, 最大值达 350.24mg/kg, 占总磷的 40% 以上, Ca-P、Al-P 含量相当, 约占总磷含量的 20% 左右, 而以 DP 的含量最低, 含量在 5% 以下. 有机磷含量约占总磷含量的 15% 左右. 另外, 沉积物中 TP 含量与 Fe-P、Al-P、Ca-P 及 OP 均具有较好的相关性, 且 OP 含量与 Fe-P、Al-P 也具有较好的正相关关系, 而与 Ca-P 的相关性较弱.

关键词: 沉积物; 磷; 赋存形态; 分布特征; 鄱阳湖

Phosphorus existing forms and distribution characteristic in Lake Poyang sediments

XIANG Sulin^{1,2} & ZHOU Wenbin¹

(1: *Key Laboratory of Lake Poyang Ecology and Bioresource Utilization of MOE, Nanchang University, Nanchang 330047, P. R. China*)
(2: *Department of Environment Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China*)

Abstract: Forms and distribution characteristics of phosphorus in Lake Poyang sediments were studied systematically using the classification extraction methods for extracting various forms of phosphorus. The results showed that phosphorus in surface sediments mainly consisted of inorganic phosphorous species, involving Fe-P, Ca-P, Al-P, DP and organic phosphorous species. The spatial distribution of phosphorus species in surface sediments had depressed trend from the orientation of Lake Poyang to the direction of river into entrance of lake (Longkou, Kangshan), and the content of total phosphorus and phosphorus types in the sediment were obviously decreased with depth. The content of TP of surface sediment (0-2cm) range from 578.36 to 813.55mg/kg, and IP was the major phosphorus species in the sediment. Fe-P was the dominant form of IP, which accounted for greater than 40%, Ca-P, Al-P for 20% respectively, and DP for less 5%. The content of OP was lower which accounted for 15%. TP was positively correlated to Fe-P, Al-P, Ca-P and OP, and OP was positively correlated to Fe-P and Al-P, but only weakly related to Ca-P.

Keywords: Sediment; phosphorus; existing forms; distribution characteristic; Lake Poyang

湖泊作为流域物质输移的归宿地, 接纳了大量来自工农业生产及生活所排放的磷营养盐等物质, 使湖泊营养负荷不断加重, 湖泊富营养化问题日益突出, 但进入湖泊的营养盐磷经过各种作用最终有大部分以颗粒态储存于湖泊沉积物^[1,4]. 湖泊沉积物中的磷, 对湖泊生态系统的初级生产力和营养状况有重要的影响, 尤其在外源污染得到控制时, 沉积物作为内源将成为上覆水体营养物质的重要来源, 但沉积物中能参与界面交换及生物可利用的磷含量取决于沉积物中磷的形态, 其地球化学形态是判别沉积物中磷的迁移能力、生态效应的重要参数^[5-7]. 研究显示, 沉积物在一定程度上能够充当营养源的作用, 被吸附在沉积物中的营养物质能通过解吸、溶解等作用返回上覆水体, 形成湖泊营养盐的内负荷, 进而对湖泊富营养化产生重要

* 国际科技合作项目(2006DFB91920)和国家自然科学基金项目(40672159)联合资助. 2009-12-08 收稿; 2010-03-30 收修改稿. 向速林, 男, 1978 年生, 博士研究生, 讲师; E-mail: slxiang2001@163.com.

影响^[8,9]. 沉积物中磷的生物有效性及对上覆水体富营养化的贡献与其赋存形态密切相关^[10], 但沉积物总磷含量不能有效预测湖泊内源磷负荷的大小, 而可还原态和金属氧化物结合态磷在沉积物中的溶解、迁移是沉积物释放磷的重要机制^[11]. 沉积物中磷的分布特征已被证实与湖泊内源负荷有直接关系, 且沉积物中磷的不同赋存形态与含量对湖泊发生富营养化所起的作用不同^[12], 通过测定湖泊沉积物中磷的不同形态及其含量, 对研究沉积物磷的行为特征和在沉积物与水界面的迁移以及湖泊富营养化状况具有重要意义^[13].

鄱阳湖位于江西省北部, 长江中下游南岸, 是中国的第一大淡水湖, 是一个过水性、吞吐型、季节性的浅水湖泊. 随着经济的迅速发展, 农药和化肥的大量施用, 城镇排污量和人口增加使大量的营养物质不断流入湖泊, 鄱阳湖富营养化程度日渐增加. 因此, 研究鄱阳湖沉积物中磷的不同赋存形态及含量对认识鄱阳湖富营养化进程具有重要的环境意义. 目前有关鄱阳湖磷的研究主要是集中在湖水中磷的含量及其时空分布特征, 而关于鄱阳湖沉积物中不同形态磷的剖面分布特征研究则未见报道. 本研究较为系统地开展了鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态分析及剖面分布特征研究, 为掌握鄱阳湖沉积物中磷的生物地球化学循环规律、研究沉积物作为内源向上覆水体释放磷营养盐及湖泊富营养化发生机制提供依据, 同时为防治湖泊富营养化及合理开发利用鄱阳湖水资源提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

鄱阳湖沉积物样品分别采集于河口区的龙口(S1)、康山(S2)、吴城(S5)站点, 以及湖区的蛇山(S3)、棠荫(S4)和都昌(S6)站点(图1). 采集时用柱状采样器采集厚度约为25–30cm的沉积物柱状样品, 其中表层沉积物样品取每个柱状采样器的顶部0–2cm厚度, 同时在现场将柱状沉积物样品以2cm间隔分层, 装入聚乙烯塑料袋后冷藏保存, 带回实验室保存在冰箱中待进行磷的形态组成分析.

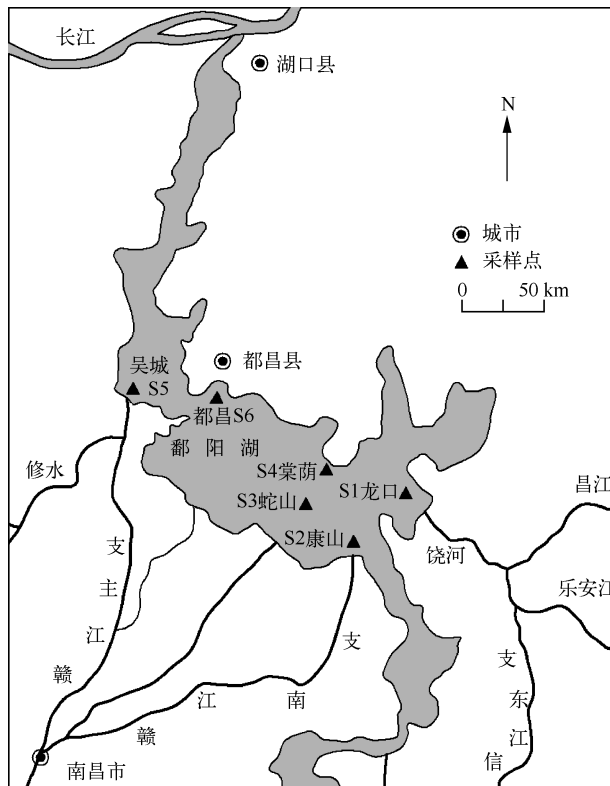


图1 鄱阳湖沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Lake Poyang

1.2 实验方法

沉积物中磷的形态分布研究起始于对土壤中磷的各种形态及有效性探讨,并总结了较为成熟的分步提取和分析方法^[14].近年来,开始将土壤磷的分析方法引入沉积物中磷的研究并加以改进.湖泊沉积物中磷的赋存形态一般分为无机磷(IP)和有机磷(OP),但由于研究方法及目的不同,在沉积物无机磷形态的划分上存在较大差异,因此沉积物中各形态磷的提取方法主要针对无机磷,众多学者对沉积物中无机磷的提取进行了相关研究^[6,14-15].本研究主要根据《湖泊富营养化调查规范》(第二版)^[15]中的有关规定,将沉积物中磷的赋存形态分为铁磷(Fe-P)、钙磷(Ca-P)、铝磷(Al-P)、可溶性磷(DP)及有机磷(OP),进行磷的分级提取.沉积物中磷的分级提取采用《湖泊富营养化调查规范》中规定的分级提取方法,用钼锑抗分光光度法测定溶液中的磷.

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中磷的形态含量及空间分布特征

沉积物中磷的形态一般分为无机和有机两种,其中无机磷又包括 Fe-P、Ca-P、Al-P、DP.由于沉积环境、人为因素、水动力条件及污染状况等的差异,致使不同区域总磷及各形态磷含量存在差异^[9].鄱阳湖各采样点表层沉积物(0-2cm)中总磷及各形态磷的含量表明,鄱阳湖表层沉积物(0-2cm)中总磷含量范围为 578.36-813.55mg/kg,平均含量为 689.34mg/kg,其最大值出现在都昌(S6)监测点,最小值出现在吴城(S5)监测点(图2).TP 主要由 IP 组成,含量在 490.48-732.12mg/kg 之间,其所占 TP 的比重范围在 81.68%-89.99% 之间,而各监测点有机磷含量约占 TP 含量的比重范围为 10.01%-18.32%.IP 中又以 Fe-P 含量最高,占 TP 含量比重范围为 42.43%-47.56%,Fe-P 最大值出现在 S6 监测点,其值为 350.24mg/kg,各监测点 Fe-P 含量都占 TP 的 40% 以上(图3).沉积物中 Fe-P 是与磷在湖泊中迁移转化联系最密切的一种形态,其含量受沉积物的粒度特征及沉积环境的氧化还原特征的影响,在氧化条件下趋于向沉积物沉降,在还原条件下则容易释放到上覆水体中.沉积物 Ca-P 最大值出现在 S6 监测点,含量范围为 70.30-150.39mg/kg,占 TP 含量的比重范围为 11.95%-18.49%.Ca-P 通常被认为是生物难利用磷,主要来源于碎屑岩并有自生源.Al-P 最大值出现也在 S6 监测点,含量范围为 118.98-193.38mg/kg,占 TP 含量的比重为 19.14%-23.77%.Al-P 主要受人为活动和陆源输入的影响,其可以作为沉积环境质量的判别标志^[16].DP 含量最低,各监测点 DP 含量都在 5% 以下,最小值出现在 S5 监测点,其值为 21.56mg/kg.有机磷主要来源于陆源输入和食物链等生物过程,是一种优于总磷的可指示富营养化程度的指标^[17].相关研究显示,安徽巢湖表层沉积物中 TP 的含量范围为 476-690mg/kg^[12],太湖不同湖区沉积物中 TP 的平均含量变化为 606.6-1691.8mg/kg^[18].相比而言,鄱阳湖表层沉积物中磷的含量已属较高水平.

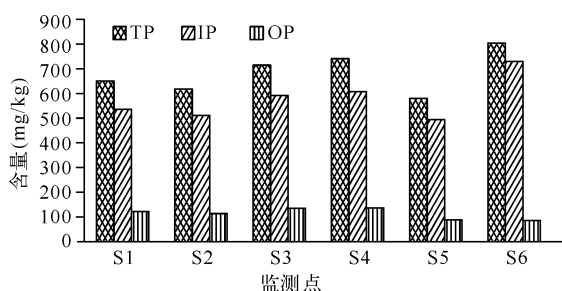


图2 表层沉积物中总磷、无机磷及有机磷含量与空间分布

Fig. 2 Concentrations and spatial distribution of TP, IP and OP in surface sediments

鄱阳湖各监测点表层沉积物(0-2cm)中总磷及各形态磷的空间分布特征基本相似,其含量在空间分布上具有一定的差异性,并且基本具有由河口监测点(S1、S2、S5)向鄱阳湖主湖区监测点(S3、S4)方向逐渐升高的规律,表明总磷及各形态磷的含量分布受环境条件的变化较为敏感(图2,图3).此外,总磷与各形态磷空间分布的相似特征在一定程度上反映了各形态磷与总磷具有较好的相关性,表明鄱阳湖的沉积环境及水

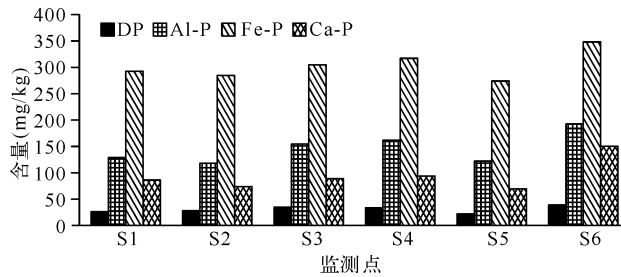


图3 表层沉积物中不同形态无机磷含量与空间分布

Fig. 3 Concentrations and spatial distribution of various forms of inorganic phosphorus in surface sediments

动力条件的变化对各形态磷在沉积物中的积累与分布具有一定的影响^[19]。鄱阳湖表层沉积物中磷含量表现出的空间分布特征,可能是由于河口地区(S1、S2和S5)湖流较为强烈,水动力作用比较明显,对沉积物的扰动剧烈,加剧了沉积物与水界面之间的各形态磷交换与扩散作用,从而导致该地区沉积物中磷含量略低。监测点S3与S4位于岛屿附近,受水流和风力扰动作用不强,湖泊上覆水体对沉积物的扰动相对河口地区不明显,从而增加了上覆水体中磷的沉积量,而S6监测点则位于排污口附近,上游排污中磷含量较高,导致该监测点上覆水体中磷含量显著增加,从而使得该点沉积物中磷的积累量相对最高。另外沉积物中磷的分布差异也可能和各监测点沉积物的特性有关,一般而言,沉积物颗粒越细,其对磷的吸附能力越强,磷的含量越高。

相关性分析结果显示,鄱阳湖沉积物中TP含量与Fe-P、Al-P、Ca-P及OP含量均具有较好的正相关关系,而OP含量与Fe-P、Al-P含量亦具有较好的正相关关系,但与Ca-P的相关性较弱。一般来说,湖泊沉积物中Fe-P、Al-P、DP及OP被认为是潜在的可释放的磷,即生物可利用磷,是在一定条件下能够被藻类直接或间接利用的潜在活性磷。沉积物中生物可利用磷的含量能真正反映沉积物的污染状况及其内源释放能力的大小^[18],可通过化学和生物作用转化为活性磷进入上覆水体,从而影响上覆水水质。已有研究表明,沉积物中生物可利用磷的含量越大,则具有更大的潜在释放量,与水体富营养化程度有密切关系^[20],可能成为水体营养物质的重要来源。此外,沉积物中总磷及各形态磷的含量分布主要受到环境条件的控制,生物可利用磷中Fe-P、Al-P及OP含量都与人类活动有关,其中Fe-P、Al-P主要来源于工业废水和生活污水,而OP主要来源于农业面源污染^[21-22]。鄱阳湖沉积物中各采样点不同形态磷含量差异较大,表明人类活动对湖泊不同区域的影响程度不同。Ca-P主要来源于碎屑岩或本地自生,受人类活动影响较小,被认为是生物不可利用的磷,它对湖泊水体磷含量的贡献也较小。

2.2 柱状沉积物中总磷及各形态磷的垂向分布特征

湖泊沉积物中不同化学形态磷的含量剖面分布特征可能反映了沉积化学过程不同形态磷之间的迁移转化关系^[23],在沉积物磷的厌氧释放过程中,存在着有机磷向无机磷的转化,Fe-P、Al-P向Ca-P转化的趋势^[24]。鄱阳湖各监测点柱状沉积物总磷平均含量随深度的变化范围为689.34-233.32mg/kg,深度方向的平均值为446.92mg/kg。另外,各监测点柱状沉积物OP、DP、Al-P、Fe-P、Ca-P的平均含量随深度的变化范围分别为110.99-28.43mg/kg、30.15-10.55mg/kg、147.62-70.82mg/kg、305.22-138.24mg/kg及150.39-42.65mg/kg。柱状沉积物中TP及各形态磷的平均含量垂向分布表明,鄱阳湖各监测点柱状沉积物中TP及各形态磷的平均含量在垂向分布上随沉积深度的增加而逐渐下降,但达到一定沉积深度以后,其平均含量的下降趋势减缓,表层平均含量明显高于底部平均含量,表现出明显的表层富积(图4),这种分布特征说明近年来鄱阳湖沉积物中TP及各形态磷含量有明显增加的趋势,可能原因是近年来鄱阳湖的污染加重,致使大量含磷物质的输入并转移至沉积物,从而导致表层沉积物TP及各形态磷含量增加明显。

鄱阳湖柱状沉积物各形态磷中DP在TP中含量较小,在垂向分布上变化相对比较稳定。其他形态磷中,Fe-P在沉积物TP中所占比例最大,且其含量随沉积深度增加表现出明显减少的趋势,其垂向分布特征与TP的分布特征类似。Ca-P与Al-P在沉积物TP中所占比例相当,且低于Fe-P含量,但大于OP的含量,其在

垂向分布特征与 TP 相似. 沉积物中 OP 含量比 Fe-P、Ca-P 与 Al-P 都低, 但较 DP 含量高, 同样表现出其含量随沉积深度增加逐渐下降的趋势, 也与 TP 的垂向分布特征相似.

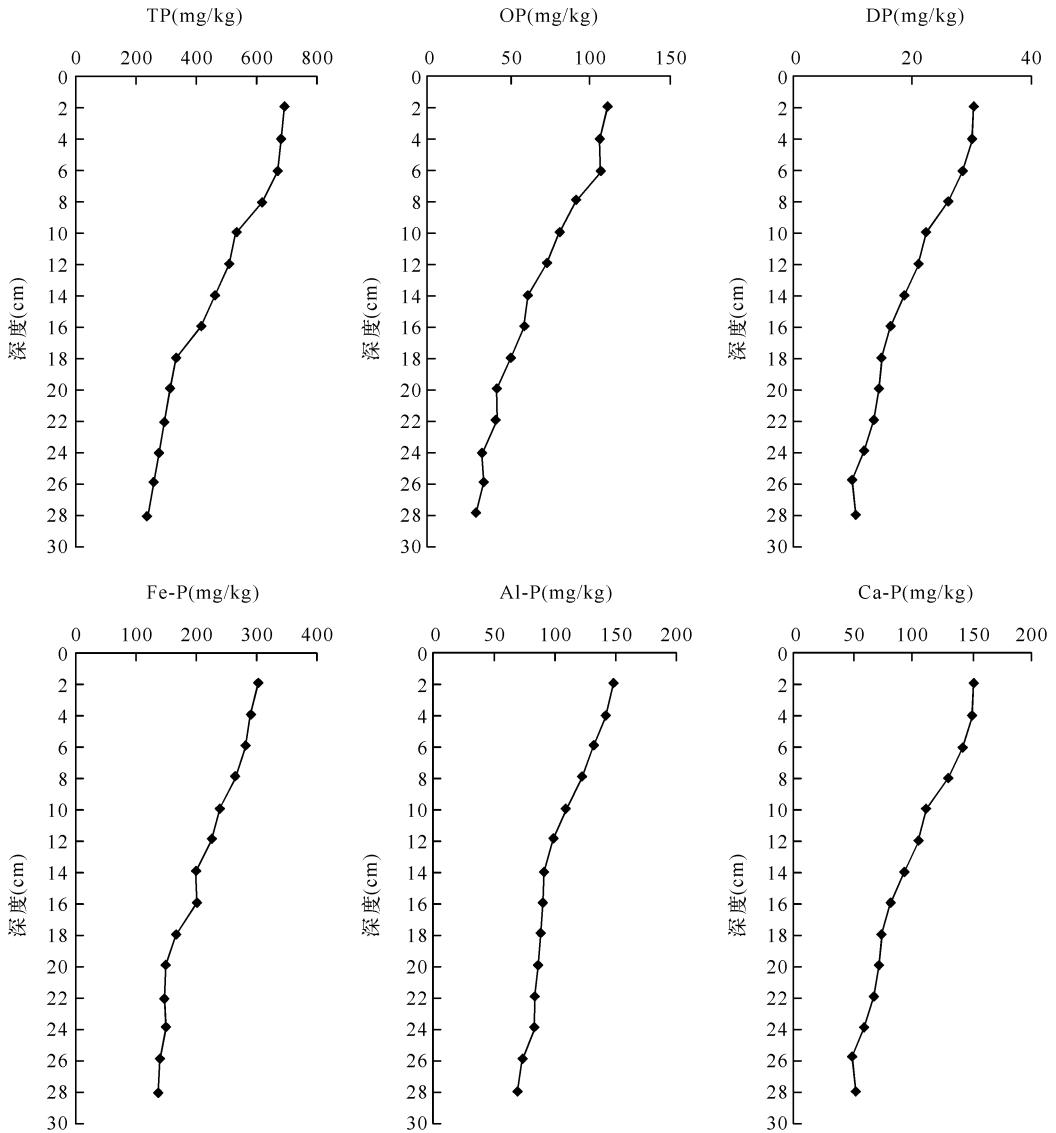


图 4 各监测点柱状沉积物中总磷及各形态磷的平均含量垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of the average content of TP and various phosphorus forms in sediments

3 结论

鄱阳湖沉积物中 TP 含量范围为 578.36 - 813.55mg/kg, TP 主要由 IP 组成, 其所占 TP 的比重范围在 81.68% - 89.99% 之间, 而 OP 含量约占 TP 含量的比重范围为 10.01% - 18.32%. IP 中又以 Fe-P 含量最高, Ca-P 与 Al-P 含量次之, 而 DP 含量最低, 各监测点 DP 含量都在 5% 以下. 相关分析显示, TP 含量与 Fe-P、Al-P、Ca-P 及 OP 均具有较好的相关性, 且 OP 含量与 Fe-P、Al-P 含量也具有较好的正相关关系, 而与 Ca-P 的相关性较弱.

鄱阳湖各监测点表层沉积物(0 - 2cm)中 TP 及各形态磷的空间分布特征基本相似, 其含量在空间分布

上具有一定的差异性,并且基本具有由河口监测点(S1、S2、S5)向鄱阳湖主湖区监测点(S3、S4)方向逐渐升高的规律,表明TP及各形态磷的含量分布受环境条件变化较为敏感.鄱阳湖各监测点柱状沉积物中TP及各形态磷的平均含量在垂向分布上随沉积深度的增加而逐渐下降,但在达到一定沉积深度以后,其平均含量的下降趋势减缓,表层平均含量明显高于底部平均含量,表现出明显的表层富积.

4 参考文献

- [1] 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):382-389.
- [2] 王雨春,王国江,王仕禄等.红枫湖、百花湖沉积物中磷的存在形态研究.矿物学报,2000,20(3):273-278.
- [3] Gao L, Zhou JM, Yang H *et al.* Phosphorus fractions in sediment profiles and their potential contributions to eutrophication in Dianchi Lake. *Environmental Geology*, 2005, 48(7):835-844.
- [4] 孙惠民,何 江,高兴东等.乌梁素海沉积物中全磷的分布特征.沉积学报,2006,24(4):579-585.
- [5] 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.
- [6] Ruttenberg KC. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediment. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(7):1460-1482.
- [7] 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.
- [8] 侯立军,陆健健,刘 敏等.长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性.环境科学学报,2006,26(3):488-494.
- [9] 彭 杜,刘 凌,胡进宝.玄武湖沉积物磷形态的垂向变化和生物有效性.水资源保护,2009,25(1):31-35.
- [10] 孟春红,赵 冰.东湖沉积物中氮磷形态分布的研究.环境科学,2008,29(7):1831-1837.
- [11] Zhou Q, Gibson CE, Zhu Y. Evaluation phosphorus bioavailability in sediment of three contrasting lake in China and the UK. *Chemosphere*, 2001, 42:221-225.
- [12] 潘成荣,汪家权,郑志侠等.巢湖沉积物中氮与磷赋存形态研究.生态与农村环境学报,2007,23(1):43-47.
- [13] 丰茂武,吴云海,龚春生.玄武湖沉积物中磷的形态分布特征.环境监测管理与技术,2007,19(2):19-23.
- [14] 李 悦,乌金斯.沉积物中不同形态磷的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.
- [15] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范(第2版).北京:中国环境科学出版社,1990.
- [16] 戴纪翠,宋金明,李学刚等.胶州湾沉积物中的磷及其环境指示意义.环境科学,2006,24(10):1956-1962.
- [17] Vaalgamaa S. The effect of urbanization on Laajalahti Bay, Helsinki City, as reflected by sediment geochemistry. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48:650-662.
- [18] 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.农业环境科学学报,2007,26(4):1207-1213.
- [19] 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.农业环境科学学报,2007,26(3):878-884.
- [20] Qin BQ. Hydrodynamics of lake Taihu China. *Ambio*, 1999, 28(8):669-673.
- [21] Xu DL, Lei ZX, Wang HJ *et al.* Distribution of phosphorus in sediments of onshore reed areas of Lake Taihu. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 17(4):557-561.
- [22] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment. *Water Research*, 2000, 34(7):2037-2042.
- [23] 熊汉锋,谭启玲,王运华.梁子湖沉积物中氮磷分布特征研究.华中农业大学学报,2008,27(4):235-238.
- [24] 王晓蓉,华兆哲,徐 菱等.环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响.环境化学,1996,(1):15-19.