

瑶湖沉积物中磷的赋存形态及其空间分布特征

江立文 关广禄 廖春玲

(华东交通大学土木建筑学院,南昌 330013)

摘要 利用磷的分级提取分析方法,首先对瑶湖沉积物磷赋存形态进行了分析;其次将瑶湖分成A、B和C 3个区段(其营养状态指数TLI值的大小为:B区>A区>C区),在此基础上,探讨了铁结合态磷(Fe-P)、铝结合态磷(Al-P)、钙结合态磷(Ca-P)和有机磷(OP)的空间分布特征。研究表明:在沉积物磷赋存形态中,无机磷形态(IP)占总磷(TP)的平均比重为75%以上,Fe-P是IP的主要成分,Fe-P占TP比重范围为40.55%~67.63%;各种形态磷的平均含量(或占TP比重)大小为Fe-P>Al-P>OP>Ca-P>DP。Fe-P、Al-P和OP的水平分布特征的结果表明:对于相同的区段,不同磷赋存形态的含量变化具有相同的变化规律,其含量大小为Fe-P>Al-P>OP,而Ca-P含量变化相对稳定;对于不同的区段,相同磷的赋存形态含量的极值变化具有一定的差异,其中Fe-P、Al-P和OP的最大值均出现在B区段,而Fe-P和Al-P最小值出现在A区段,OP则出现在C区段。Fe-P、Al-P、Ca-P和OP的垂直分布特征的结果显示:对于相同的区段,Fe-P、Al-P、Ca-P和OP的含量均随深度呈现递减趋势,当达到25 cm深度时其含量基本稳定;而对于不同的区段,Fe-P、Al-P和OP的含量随深度的变化趋势具有一定的差异性,A区段随深度的变化趋势比B区段和C区段缓慢,而Ca-P变化趋势则没有明显的区分,这一研究结果为揭示瑶湖富营养化发生的机制提供了数据和理论支撑。

关键词 磷赋存形态 沉积物 分布特征 瑶湖

中图分类号 X524 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)05-2756-05 DOI 10.12030/j.cjee.201410190

Phosphorus existing forms and its spatial distribution characteristic in Yaohu Lake sediments

Jiang Liwen Guan Guanglu Liao Chunling

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract First, the various forms of phosphorus existing in the Yaohu Lake sediments were analyzed using classification extraction methods. Second, the Yaohu Lake was divided into three sections (A, B, and C). The order of the values of the eutrophication state index TLI, was B > A > C. The spatial distribution characteristics were investigated for Fe-P, Al-P, Ca-P, and OP, according to the lake sections. The results showed that the inorganic phosphorus (IP) content accounted for more than 75% of TP in sediments, and that Fe-P was the major species in IP. The proportion of Fe-P to TP ranged from 40.55% to 67.63%, and the average content of various phosphorus species (or the proportion of TP), was Fe-P > Al-P > OP > Ca-P > DP. The results of the horizontal distribution characteristic of Fe-P, Al-P, and OP indicated that, for the sections of Yaohu Lake, the contents of various phosphorus species changed even under the same rules. The order of their values was Fe-P > Al-P > OP, but the contents of Ca-P was more uniform among them. In the different sections of the Yaohu Lake, the extremes of content of the same phosphorus species had significant differences. The largest values of Fe-P, Al-P, and OP appeared in Section B, while the smallest values of Fe-P and Al-P were in Section A, and the smallest value of OP was in Section C. The results of the vertical distribution characteristics of Fe-P, Al-P, and OP were such that the contents of Fe-P, Al-P, Ca-P, and OP all decreased with increasing sediment depth, and their contents reached stability when the depth of the sediment was 25 cm. In the different sections, the contents of Fe-P, Al-P, Ca-P, and OP showed substantial differences with variation in depth. The trend of change in Section A was much less than in Sections B and C, except for Ca-P, which showed no obvious difference. This research provides the data and theoretical support needed to reveal the mechanism of eutrophication in Yaohu Lake.

Key words phosphorus existing forms; sediments; distribution characteristic; Yaohu Lake

磷是湖泊富营养化的主要限制性因子^[1],进入湖泊的大部分磷营养盐最终会经过各种作用以颗粒态储存于湖泊沉积物中,形成内源污染^[2]。沉积物中磷的赋存形态对沉积物中磷的迁移转化机制有重要影响^[3-6],沉积物中磷的分布特征已经被证实与

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001)

收稿日期:2014-10-28;修订日期:2015-02-09

作者简介:江立文(1968—),男,博士,教授,研究方向:水环境污染控制。E-mail:jianglw@ecjtu.jx.cn

湖泊内源负荷有直接关系,且沉积物中磷的不同赋存形态及其含量对湖泊发生富营养化所起的作用不同^[7-8],因此,分析湖泊沉积物中磷的不同赋存形态及其空间分布特征,对湖泊富营养化状况的深入研究具有积极意义。

瑶湖(116°01′~116°05′E,28°38′~28°44′N)位于长江中下游江西省南昌市东郊,是集水产养殖和水上娱乐为一体的封闭型城市浅水湖泊,湖面呈长方形,自南向北分为上瑶湖、中瑶湖和下瑶湖,水面总面积约为15.86 km²,平均水深近2 m,其水体

已达到中度富营养化水平^[9]。本研究在对瑶湖进行区段划分基础之上^[10],考察了湖区沉积物中磷的赋存形态及其含量的变化规律,并对磷赋存形态的空间分布(水平方向和垂直方向)特征进行了分析,这为深入揭示瑶湖富营养化发生的机制提供数据和理论支撑。

1 监测布点

在对瑶湖分区研究基础之上^[10],对瑶湖沉积物分区采样。具体分区概况见表1^[10],监测布点分布图见图1^[11]。

表1 瑶湖分区概况

Table 1 Section profile of Yaohu lake

区段	监测点	位置及环境	营养状态指数(TLI)值
A	0909	上瑶湖最南端,距离国际水上运动中心比较近,主要为面源污染,污染源较多	60.10
B	0906、0907、0908	上瑶湖偏北部,周边建有高校园区、氨厂和水产养殖基地,主要为点源污染,污染源多	60.51
C	0902、0903、0904、0905	中瑶湖及下瑶湖偏南段,污染源较少	52.20

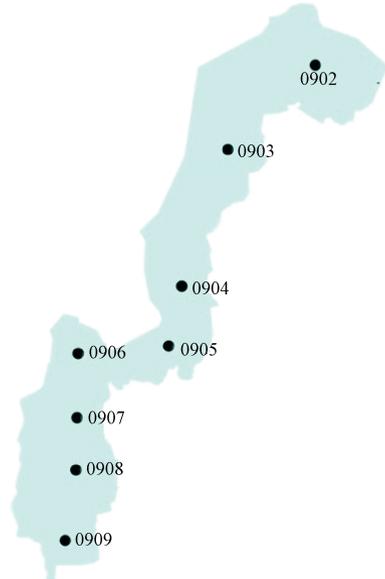


图1 监测布点图

Fig. 1 Monitoring points of Yaohu Lake

2 材料和方法

2.1 样品采集

采用简易柱状采样器采集表层厚度35 cm的沉积物柱状样品,取表层10 cm为表层沉积物样品,进行磷的赋存形态及其水平分布的研究;同时将C区段0905点、B区段0907点和A区段0909点的沉积物柱状样品在现场以5 cm为单位进行切分,进行磷赋存形态垂直分布的研究。将样品装入封口塑料袋

中,在冰盒中存放,运至实验室,冷冻干燥后备用。

2.2 分析方法

沉积物分析指标包括总磷(TP)、水溶性磷(DP)、铁结合态磷(Fe-P)、铝结合态磷(Al-P)、钙结合态磷(Ca-P)以及有机态磷(OP)。按《湖泊富营养化调查规范》的方法进行提取,采用钼锑分光光度法测定提取液中的磷含量。利用PASW Statistics 18软件中Pearson相关性分析法对磷不同赋存形态的数据进行分析。

3 结果与分析

3.1 磷的赋存形态及其特征

通过单因素方差分析表明,表层5 cm和10 cm沉积物不同磷赋存形态Fe-P、Al-P、Ca-P和OP在含量上没有显著差异性,参考文献[2],本研究选择表层10 cm沉积物考察磷赋存形态的特征和磷赋存形态的水平分布。表层沉积物不同磷赋存形态的Pearson相关性分析,见表2;表层沉积物中不同磷赋存形态的描述统计量,见表3。从表2中可以看出,沉积物中TP与Fe-P极显著相关($\alpha=0.01$),TP与Al-P和TP与Ca-P均相关($\alpha=0.1$),而TP与OP之间的相关性较小。这说明沉积物中TP的赋存形态主要为无机磷,就无机磷各赋存形态而言,根据它们的相关系数 γ 的大小可以定性判断,其主要为Fe-P,其次为Al-P和Ca-P,从表3中进一步可以看出,磷赋存形态的平均含量大小为Fe-P > Al-P > OP > Ca-P >

DP, 向速林等^[12]对鄱阳湖表层沉积物磷赋存形态含量大小的分析也得出了类似的研究结果。

Fe-P 和 Al-P 为生物所利用的磷,其来源与人类活动有关,主要来源于生活污水和工业废水^[13]; Ca-P 被认为是生物不可利用的磷,主要来源于碎屑岩或本地自生(生物骨骼)^[14]。从表 3 中可以看出,各种磷形态的标准差 σ 的大小顺序为 Fe-P > OP > Al-P > Ca-P > DP, 且 $\sigma_{\text{Fe-P}}$ 约是 $\sigma_{\text{Ca-P}}$ 的 5 倍, $\sigma_{\text{Al-P}}$ 约是 $\sigma_{\text{Ca-P}}$ 的 3 倍;从表 2 中可以看出,沉积物中 Fe-P 与 Ca-P 和 Al-P 与 Ca-P 分别在 $\alpha = 0.1$ 和 $\alpha = 0.05$ 水平上相关。通过分析可知,表层 10 cm 和 15 cm 沉积物 Ca-P 含量分布在不同深度的表层沉积物中没有显著差异,说明 Ca-P 含量在不同深度的表层沉积物中受人为干扰的影响程度较小;因此,综合以上分析可以认为,瑶湖表层沉积物中 Ca-P 含量在沉积物中相对于 Fe-P 和 Al-P 较稳定,其受人为干扰活动的影响较小,而 Fe-P 和 Al-P 含量的变化受人为活动干扰的影响较大。

沉积物中 Fe-P 与 Ca-P 和 Al-P 与 Ca-P 分别在 $\alpha = 0.1$ 和 $\alpha = 0.05$ 水平上相关(见表 2),且 Ca-P 含量相对稳定,根据数学线性相关的理论,可以得出 Fe-P 与 Al-P 之间亦具较好的相关性(从表 2 中可以看出,其相关系数 $\gamma = 0.473$),根据贾陈忠等^[15]研究磷不同赋存形态之间相关性的方法,可以表明瑶湖沉积物中 Fe-P 和 Al-P 在一定的物理化学条件下可能会相互转化,这与前人的研究结果^[16-18]一致;从表 2 中可知,沉积物中 OP 与 Ca-P 和 OP 与 Al-P 分别在 $\alpha = 0.01$ 和 $\alpha = 0.05$ 水平上显著相关,由于 OP 被认为是部分生物可利用的磷,主要来源于农业面源污染^[19-20],而 Ca-P 主要来源于碎屑岩或本地自生,因此,这一结果说明瑶湖沉积物 OP 的来源具有一定的差异性,这与文献^[13]得出的研究结论相一致。

表 2 表层 10 cm 沉积物不同磷赋存形态 Pearson 相关系数 γ ($n = 8$)

Table 2 Pearson correlation coefficient γ of different phosphorus forms in the surface 10 cm sediments of Yaohu Lake ($n = 8$)

项目	TP	DP	Fe-P	Al-P
DP	-0.028	1		
Fe-P	0.833***	-0.157	1	
Al-P	0.503**	0.395	0.473	1
Ca-P	0.661*	0.429	0.585*	0.884**
OP	0.458	0.366	0.457	0.992**

注: * 在 0.1 水平(双侧)上相关; ** 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; *** 在 0.01 水平(双侧)上极显著相关。

表 3 表层 10 cm 沉积物不同磷赋存形态的描述统计量 ($n = 8$)

Table 3 Descriptive statistics of different phosphorus forms in the surface 10 cm sediments of

磷形态	Yaohu Lake ($n = 8$) (mg/kg)			
	极小值	极大值	平均值	标准差
TP	521.49	1 400.37	987.93	291.75
DP	15.85	41.40	29.64	8.07
Fe-P	352.67	645.31	476.65	102.57
Al-P	102.30	281.25	199.27	55.81
Ca-P	92.25	151.76	125.35	21.07
OP	92.04	270.99	186.44	56.53

3.2 表层沉积物中磷赋存形态的水平分布

各采样点表层沉积物不同磷赋存形态的含量,见图 2。由图 2 分析得出:表层沉积物 Fe-P、Al-P、OP、Ca-P 和 DP 占 TP 含量的比重范围(平均值)分别为:40.55% ~ 67.63% (50.15%)、9.83% ~ 30.69% (21.30%)、8.84% ~ 28.73% (19.95%)、8.86% ~ 21.05% (13.51%) 和 1.52% ~ 7.04% (3.40%),其占 TP 含量比重的大小顺序为 Fe-P > Al-P > OP > Ca-P > DP。从以上分析可以看出,无机磷形态占总磷的平均比重为 75% 以上,OP 约占 20%,而表层沉积物 Ca-P 在无机磷形态中相对稳定,因此,本研究仅对 Fe-P、Al-P 和 OP 赋存形态的水平分布特征进行分析。

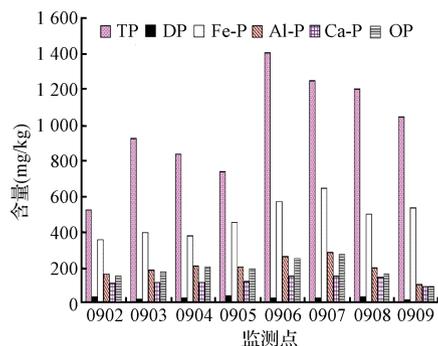


图 2 各采样点表层沉积物不同磷赋存形态的含量
Fig. 2 Concentrations of different phosphorus forms for different sampling points in surface sediments

从图 2 中可以看出,对于不同监测点的 Fe-P、Al-P 和 OP 赋存形态的含量变化具有相同的变化规律,其含量大小均为 Fe-P > Al-P > OP;对于不同监测点相同磷的赋存形态的含量变化具有一定的差异性,Fe-P、Al-P 和 OP 三者含量的最大值均出现在 B 区段 0907 点,这是由于 0907 点周边污染严重所致;C 区段 0902 点周边污染源较少,因此,从图 2 中同

样可以看出, Fe-P 含量的最小值出现在 0902 点; A 区段 0909 点周边污染相对于 C 区段 0902 点略为严重, 但由于 OP 来源的差异性, 以及 Fe-P 和 Al-P 在一定的物理化学条件下相互转化的结果, 可能导致 Al-P 和 OP 含量的最小值均出现在 0909 点。同理, 通过图 2 分析可以得出, 3 个区域 Fe-P、Al-P 和 OP 平均含量最大值均出现在湖区的 B 区段; Fe-P 平均含量最小值出现在湖区的 C 区段, Al-P 和 OP 二者平均含量最小值均出现在湖区的 A 区段。

通过以上分析表明, 磷赋存形态的水平分布状况一方面受湖区周边人为活动干扰的影响较大, 另一方面与湖区沉积物的特性有关。

3.3 沉积物中磷赋存形态的垂直分布

同 3.2 中的研究方法, 本文仅对 Fe-P、Al-P、Ca-P 和 OP 赋存形态的垂直分布特征进行分析。不同湖区段沉积物不同磷赋存形态的垂直分布, 见图 3。

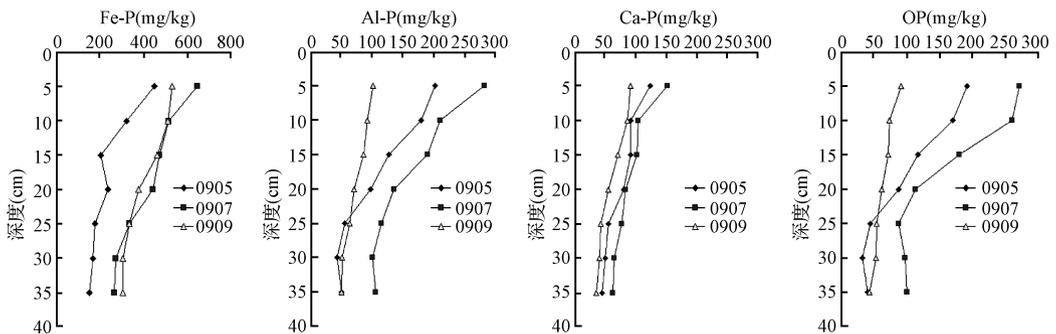


图 3 不同湖区段沉积物不同磷赋存形态的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of different phosphorus forms in sediments of the different lake section

4 结论

(1) 在瑶湖中磷赋存的形态主要为无机磷, 其主要形态为 Fe-P; 各种形态磷的平均含量(或占 TP 比重)大小为 Fe-P > Al-P > OP > Ca-P > DP。

(2) 瑶湖中 Ca-P 的含量在沉积物中相对稳定, 而 Fe-P 和 Al-P 的含量受人为干扰影响较大, 且其在一定的物理化学条件下, 可以相互转化。

(3) 瑶湖磷赋存形态的水平分布特征表明, 相同区段不同磷赋存形态的含量变化具有相同的变化规律, 其含量大小均为 Fe-P > Al-P > OP; 不同区段相同磷赋存形态的含量变化具有一定的差异性。

(4) 瑶湖磷赋存形态的垂直分布特征表明, 相同区段沉积物 Fe-P、Al-P、Ca-P、和 OP 的含量均随深度呈现递减趋势, 当达到一定深度处时其含量基本稳定, 其中 Fe-P、Al-P 和 OP 随深度的变化范围较大, 而 Ca-P 较小; 而对于不同区段, Fe-P、Al-P 和 OP

图 3 表明, A、B、C 3 个区段沉积物磷相同赋存形态的垂直分布特征均随深度呈现递减趋势, 而磷不同赋存形态的垂直分布特征均具有相同的变化规律, 当达到约 25 cm 深度处含量基本稳定; 在 3 个区段中, Ca-P 的含量自上而下随深度的变化范围较小, 而 Fe-P、Al-P 和 OP 的含量随深度的增加而减小, 且变化范围较大。这一方面表明 Ca-P 在垂直方向较为稳定, 从而进一步说明 Ca-P 主要来源于碎屑岩, 受人为干扰的影响较小; 另一方面表明瑶湖流域人类生产活动不断增强, 水体污染日益加重。

在图 3 中表明, Fe-P、Al-P 和 OP 三者含量在垂直方向的变化, 对于不同的区段而言, A 区段 0909 点比 B 区段 0907 点和 C 区段 0905 点随深度的变化趋势较缓慢, 而 Ca-P 变化趋势则没有明显的区分, 结合向速林等^[12]对鄱阳湖污染趋势的研究结果, 这说明湖区中 A 区段水体污染的趋势比 B 区段和 C 区段小。

的含量随深度的变化趋势具有一定的差异性。

参考文献

- [1] Zhang Zhijian, Wang Zhaode, Holden J., et al. The release of phosphorus from sediment into water in subtropical wetlands: A warming microcosm experiment. *Hydrological Processes*, **2012**, 26(1): 15-26
- [2] 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
Zhu Guangwei, Qin Boqiang, Gao Guang, et al. Fractionation of phosphorus in sediments and its relation with soluble phosphorus contents in shallow lakes located in the middle and lower reaches of Changjiang River, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2004**, 24(3): 381-388 (in Chinese)
- [3] Fan Jingyu, Wang Daozeng, Zhang Kun, et al. Experimental study on a dynamic contaminant release into overlying water-body across sediment-water interface. *Journal of Hydrodynamics, Series B*, **2010**, 22(5): 354-357

- [4] Hupfer H., Gächter R., Giovanoli R. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis. *Aquatic Sciences*, **1995**, 57(4): 305-324
- [5] 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素. *环境科学*, **2014**, 35(3): 951-957
Chuai Xiaoming, Yang Liuyan, Cheng Shubo, et al. Characteristics and influencing factors of phosphorus adsorption on sediment in Lake Taihu and Lake Hulun. *Environmental Science*, **2014**, 35(3): 951-957 (in Chinese)
- [6] 李强, 尹俊华, 席北斗, 等. 巢湖入湖河流沉积物中有机磷的形态分级研究. *环境工程学报*, **2014**, 8(2): 441-447
Li Qiang, Yin Junhua, Xi Beidou, et al. Characteristics of organic phosphorus fractions in sediments of inflow rivers of Lake Chaohu, China. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2014**, 8(2): 441-447 (in Chinese)
- [7] 杨柳, 唐振, 郝原芳, 等. 化学连续提取法对太湖沉积物中磷的各种形态测定. *世界地质*, **2013**, 32(3): 634-639
Yang Liu, Tang Zhen, Hao Yuanfang, et al. Morphometry of phosphorus in the lake sediments of Taihu by chemical sequential extraction method. *Global Geology*, **2013**, 32(3): 634-639 (in Chinese)
- [8] 周欣, 郭海涛, 张进忠, 等. 环境因素对长寿湖底泥释磷影响的模拟实验研究. *环境工程学报*, **2013**, 7(5): 1671-1675
Zhou Xin, Guo Haitao, Zhang Jinzhong, et al. Simulated study on phosphorus release from sediment in Changshou Lake influenced by environmental factors. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2013**, 7(5): 1671-1675 (in Chinese)
- [9] 江立文, 林曦, 陈杨, 等. 瑶湖水体营养状态的评价. *安徽农业科学*, **2013**, 41(1): 292-294
Jiang Liwen, Lin Tun, Chen Yang, et al. Trophic state evaluation in water of Yao Lake. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, **2013**, 41(1): 292-294 (in Chinese)
- [10] 陈杨. 瑶湖水体营养化现状及其与环境因子关系的研究. 南昌: 华东交通大学硕士学位论文, **2012**
Chen Yang. Study on relationship between water eutrophication and environmental factors in Yao Lake. Nanchang: Master Dissertation of East China Jiaotong University, **2012** (in Chinese)
- [11] 江立文, 林曦, 陈杨, 等. 瑶湖水体叶绿素 a 的时空分布及其与环境因子的关系. *湖北农业科学*, **2013**, 52(17): 4069-4072
Jiang Liwen, Lin Tun, Chen Yang, et al. Temporal and spatial distribution of chlorophyll-a in Yao Lake and its correlation with environmental factors. *Hubei Agricultural Sciences*, **2013**, 52(17): 4069-4072 (in Chinese)
- [12] 向速林, 周文斌. 鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态及分布特征. *湖泊科学*, **2010**, 22(5): 649-654
Xiang Sulin, Zhou Wenbin. Phosphorus existing forms and distribution characteristic in Lake Poyang sediments. *Journal of Lake Sciences*, **2010**, 22(5): 649-654 (in Chinese)
- [13] Joh H. Fractionation of phosphorus and releasable fraction in sediment mud of Osaka Bay. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, **1983**, 49(3): 447-454
- [14] 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
Hou Lijun, Lu Jianjian, Liu Min, et al. Species and bio-availability of phosphorus in surface sediments from the shoals in the Yangtze Estuary. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2006**, 26(3): 488-494 (in Chinese)
- [15] 贾陈忠, 秦巧燕, 李克华, 等. 荆州市地表水沉积物中磷的形态分析. *环境科学与管理*, **2008**, 33(1): 46-48
Jia Chenzhong, Qin Qiaoyan, Li Kehua, et al. The phosphorus forms analysis in the Jingzhou region Earth's surface water and sediments. *Environmental Science and Management*, **2008**, 33(1): 46-48 (in Chinese)
- [16] 任万平, 李晓秀, 张汪寿. 沉积物中磷形态及影响其释放的环境因素研究进展. *环境污染与防治*, **2012**, 34(9): 53-60
Ren Wanping, Li Xiaoxiu, Zhang Wangtao, et al. Research progress in phosphorus forms in sediments and environmental factors that influence phosphorus releasing. *Environmental Pollution and Control*, **2012**, 34(9): 53-60 (in Chinese)
- [17] 黄清辉, 王磊, 王子健. 中国湖泊水域中磷形态转化及其潜在生态效应研究动态. *湖泊科学*, **2006**, 18(3): 199-206
Huang Qinghui, Wang Lei, Wang Zijian. Advance in the study on phosphorus speciation, transformation and its potential ecological effects in Chinese lakes. *Journal of Lake Sciences*, **2006**, 18(3): 199-206 (in Chinese)
- [18] 王振华, 王圣瑞, 刘元英, 等. Fe 和 Al 对湖泊沉积物中磷赋存形态的影响. *环境科学研究*, **2012**, 25(5): 556-562
Wang Zhenhua, Wang Shengrui, Liu Yuanying, et al. Effects of iron and aluminum on phosphorus fractions in lake sediments. *Research of Environmental Sciences*, **2012**, 25(5): 556-562 (in Chinese)
- [19] Ruban V., López-Sánchez J. F., Pardo P., et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments: A synthesis of recent works. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, **2001**, 370(2-3): 224-228
- [20] 王志齐, 李宝, 梁仁君, 等. 南四湖内源氮磷释放的对比研究. *环境科学学报*, **2013**, 33(2): 487-493
Wang Zhiqi, Li Bao, Liang Renjun, et al. Comparative study on endogenous release of nitrogen and phosphorus in Nansi Lake, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2013**, 33(2): 487-493 (in Chinese)