

底泥再悬浮条件下 pH 值对磷的形态及其生物有效性的影响

李大鹏^{1,2}, 黄 勇², 李伟光¹

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 苏州科技学院环境科学与工程系, 江苏 苏州 215011)

摘 要: 采用现场采样及室内分析方法, 研究了底泥再悬浮条件下, 不同 pH 值对磷的赋存形态以及生物有效磷(BAP)的影响。结果表明, 底泥再悬浮会促进上覆水中的磷向底泥迁移, 而这种促进作用随着 pH 值的增加逐渐减弱。在底泥再悬浮条件下, pH 值对不同形态磷的数量分布有明显影响: BD-P、NH₄Cl-P 含量随着 pH 值升高而增加, 而 Al-P、NaOH-nrP 和 Ca-P 含量则在不同 pH 值条件下均有所增加, pH 较低时, Al-P、Ca-P 增加量较大。与原底泥相比, pH<8 时, 潜在活性磷(PMP)含量以及 PMP/TP 均显著降低, 而 pH 较高时, 则显著增加, 由此推测, pH<8 时, 底泥再悬浮促进了易释放态磷向难释放态磷转化; pH<8 时, 碳酸氢钠可提取磷(Olsen-P)含量减少, 而 pH 较高时, Olsen-P 含量大幅度增加; 不同 pH 条件下, 藻类可利用磷(AAP)生成量均显著增加, 但随着 pH 值升高, AAP 生成量逐渐减少。线性相关分析表明, AAP 与 PMP、TP 呈显著的负相关关系。

关键词: pH 值; 磷; 赋存形态; 生物有效性; 底泥再悬浮; 底泥

中图分类号: X131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)04-1540-05

Effect of Different pH Values on Forms and Bioavailability of Sedimentary Phosphorus Under the Conditions of Sediments Re-suspension

LI Da-peng^{1,2}, HUANG Yong², LI Wei-guang¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: The effect of different pH values on existing forms and bioavailability of phosphorus in the sediments was studied under the conditions of sediment re-suspension. The results showed that sediment re-suspension could promote phosphorus migration from overlying water to sediments, but the promotion of the phosphorus migration would be weakened at high pH range. Moreover, under the condition of sediment re-suspension, the distribution of the phosphorus existing forms was significantly influenced by pH value; the BD-P and NH₄Cl-P increased with pH increasing and the Al-P, NaOH-nrP and Ca-P increased within a wide range of pH values, but high contents of Al-P and Ca-P were observed at low pH. Compared with that of the raw sediment, the PMP and PMP/TP were reduced evidently at pH<8, however, the PMP and PMP/TP were increased obviously at high pH, indicating that low pH could promote the phosphorus transformation from mobile forms to refractory forms under the condition of sediment re-suspension. Meanwhile, the Olsen-P was decreased at pH<8 but increased obviously at high pH. The AAP was increased at different pHs, compared with that of the raw sediment, but the AAP was reduced with pH increasing. Linear regression analysis indicated that the AAP showed significantly negative correlations with the PMP and TP in the sediments.

Keywords: pH; phosphorus; phosphorus forms; bioavailability; sediment re-suspension; sediment

对于大多数外源磷得到有效控制的水体而言, 内源磷的释放在维持水体富营养化程度方面起着举足

轻重的作用^[1-5]。通常, 磷在上覆水与底泥之间会发生反复多次的交换, 并达到动态平衡, 但底泥与上覆水之间的环境条件一旦改变, 底泥对磷的吸附或释放就会达到一个新的平衡, 从而影响上覆水中磷的浓度。影响底泥释放或吸附磷的环境因素众多, 如温度、溶解氧、pH 值、光照、微生物等^[6-9]。其中, pH 值的改变被认为会对底泥释放或吸附磷产生重要影响^[10]。但迄今

收稿日期: 2007-08-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA601070); 江苏省环境科学与工程重点实验室开放课题(ZD061202)

作者简介: 李大鹏(1975—), 男, 博士研究生, 从事城市受损水体修复研究。E-mail: ustslldp@163.com

为止,有关这方面的研究主要集中在底泥静止方面,而忽略了底泥再悬浮条件下,上覆水 pH 值不同对底泥吸附或释放磷的研究。

研究认为,底泥再悬浮会促进内源磷的释放^[11],增加上覆水磷的浓度,但底泥再悬浮条件下,上覆水中无机颗粒物质含量显著增加,如铁、铝等氧化物胶体以及带羟基基团的粘土矿物等^[12-14],有利于底泥对磷的专属性吸附^[15],从而导致底泥中不同形态磷的数量分布发生改变,而这种改变可能会影响到内源磷的释放。另外,底泥中磷赋存形态的改变,也会促使各形态生物有效磷(BAP)含量发生变化。鉴于此,本文探讨了底泥再悬浮条件下,不同 pH 值对底泥中磷赋存形态的影响以及生物有效磷(BAP)的变化规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料

底泥采自苏州科技学院校园河流,利用柱状采样器采集表层 15 cm 底泥于封口塑料袋中,在冰盒(4℃)中保存。带回实验室,立即进行均化处理。同时采集采样点处的上覆水,根据 2004 年 6 月以来的监测资料,校园河流处于显著的中度营养水平。

1.2 试验方法

12 个 5 L 试剂瓶,每 3 个 1 组,共 4 组。在每个试剂瓶中分别加入 200 g 湿底泥。在加入上覆水之前,分别采用 0.1 mol·L⁻¹ 的 NaOH 和 0.1 mol·L⁻¹ 的 HCl 调节河水 pH 值。4 组试剂瓶中上覆水的 pH 值分别调至 5、7、8 和 9.5,在每个试剂瓶中加入已经调节 pH 值的河水。采用恒速搅拌机分别对每个试剂瓶中底泥进行扰动(60 r·min⁻¹, 10 min·d⁻¹),使底泥处于完全悬浮状态。试验从第 0 d 开始。

每隔 3 d 取 25 mL 上覆水,采用钼酸铵-抗坏血酸法分析溶解性磷酸盐(SRP)和总磷(TP)。29 d 后,将 4 组试剂瓶中的底泥取出,干燥、磨碎,过 100 目筛网,按照 pH5、7、8、9.5 的顺序分别编号为 ES1、ES2、ES3、ES4,取原底泥编号为 ES0。

1.3 样品分析

将底泥中磷划分为弱吸附态磷(NH₄Cl-P)、铁结合态磷(BD-P)、铝结合态磷(Al-P)、有机磷(NaOH-nrP)、钙结合态磷(Ca-P)、残渣磷(Res-P),底泥中总磷含量为以上各步提取磷的总和。各形态磷的具体提取步骤参见 Emil Rydin 总结的方法^[16]。

底泥中生物有效磷(BAP)可分为水溶性磷(WSP)、易溶解磷(RDP)、藻类可利用磷(AAP),碳酸氢钠提

取磷(Olsen-P)。具体的分析方法参见徐玉慧等的分析方法^[17]。

2 结果与讨论

2.1 底泥再悬浮条件下,不同 pH 值对磷迁移的影响

底泥再悬浮条件下,不同 pH 值对上覆水中磷的迁移具有显著的影响(图 1 和图 2)。从图 1 可以看出,第 1 d,不同 pH 值条件下,上覆水中 SRP 浓度迅速下降,pH5 时,上覆水中 SRP 下降幅度最大,而 pH9.5 时,SRP 下降幅度最小。pH8、pH9.5 条件下,SRP 在第 7 d 出现较高值(0.118 mg·L⁻¹ 和 0.111 mg·L⁻¹),而 pH5、pH7 则分别在第 16 d 和第 13 d 出现较高值(0.051 mg·L⁻¹ 和 0.041 mg·L⁻¹)。试验期间,pH5、pH7、pH8、pH9.5 中 SRP 平均值分别为 0.027、0.035、0.051、0.057 mg·L⁻¹。

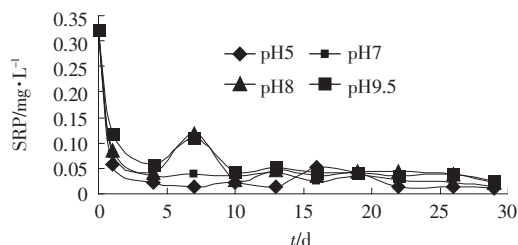


图 1 不同 pH 值条件下上覆水中溶解性磷酸盐的变化规律
Figure 1 Variation of SRP in the overlying water under the conditions of different pH values

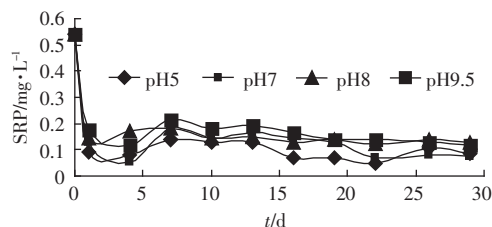


图 2 不同 pH 值条件下上覆水中总磷的变化规律
Figure 2 Variation of TP in the overlying water under the conditions of different pH values

上覆水中 TP 的变化趋势与 SRP 的变化趋势相一致(图 2)。第 1 d,不同 pH 值条件下,上覆水中 TP 浓度迅速下降。pH5 时,TP 下降幅度最大,而 pH9.5 时 TP 下降幅度最小。在第 7 d,不同 pH 条件下,TP 浓度均出现上升趋势,随后下降。试验期间,pH5、pH7、pH8、pH9.5 中 TP 浓度的平均值分别为 0.095、0.118、0.145、0.159 mg·L⁻¹。

2.2 底泥再悬浮条件下,不同 pH 值对磷赋存形态的影响

表 1 显示,底泥再悬浮条件下,不同 pH 值对底泥

表 1 不同 pH 值对底泥中不同形态磷含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 1 Effect of different pH values on different forms of sedimentary phosphorus($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

试验 编号	磷形态						
	TP	$\text{NH}_4\text{Cl-P}$	BD-P	Al-P	NaOH-nrP	Ca-P	Res-P
ES0	1 284.8	174.2	734.3	184.1	36.9	115.5	39.8
ES1	1 084.4	99.5	538.5	198.6	56.2	146.5	45.1
ES2	1 183.1	119.3	632.8	189.3	64.9	127.8	49.0
ES3	1 164.4	133.6	603.7	179.8	73.8	123.1	50.4
ES4	1 464.9	227.1	802.8	190.5	64.7	126.9	52.9

中总磷含量有显著的影响。除 ES4 总磷显著增加外, ES1、ES2、ES3 总磷含量均明显减少,而这与上覆水中磷浓度的变化规律明显矛盾(图 1 和图 2)。其原因是,底泥再悬浮过程中,释放的磷被转化成不同形态磷,其中部分形态磷按目前的方法并不能完全检测,或者部分形态磷被转化成磷化氢释放到大气中^[18,19]。

底泥再悬浮导致不同形态磷的数量分布发生了显著变化。其中, BD-P 占 TP 的比例最大,为 49.7%~54.8%;其他形态磷由大到小依次为: Al-P, 13.0%~18.3%; $\text{NH}_4\text{Cl-P}$, 9.2%~15.5%; Ca-P, 8.6%~13.5%; NaOH-nrP , 4.4%~6.3%; Res-P, 3.6%~4.3%。从表 1 中可以看出, BD-P 发生了明显释放,其中 ES1 释放量最大,而 ES4 中 BD-P 的含量显著增加。 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的变化规律与 BD-P 一致。不同 pH 值条件下, NaOH-nrP 、Al-P 和 Ca-P 均有不同程度的增加,其中, ES1 中 Al-P 和 Ca-P 增加幅度明显高于其他底泥。

通常,上覆水 pH 值降低会引起钙磷酸盐与磷酸钙的溶解^[20,21],即促进 Ca-P 的释放,但试验结果却发现, ES1(初始 pH5)中 Ca-P 含量增加幅度最大。分析其原因是,试验第 1 d,上覆水 pH 值即增加到 7.55,随后呈缓慢下降趋势,试验第 29 d,上覆水 pH 降至 6.38,故没有引起 Ca-P 的释放,而 Ca-P 含量的增加与 BD-P 的释放有关。试验初期, DO 含量显著下降(试验第 1 d,上覆水 DO 为 $0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),促进了 BD-P 的释放,而底泥再悬浮能够促进释放的磷酸盐与铁、铝氧化物及水合氢氧化物和钙离子等的接触几率,进而形成 BD-P、Al-P、Ca-P。但较小的 pH 值抑制了 Fe_{ox} 的生成,从而抑制了 BD-P 的形成,相反促进了 Ca-P 的生成。但是在 ES4(pH9.5)中, BD-P 明显增加,而 Ca-P 增加量较小。研究发现,上覆水 pH 较高时,将会发生 OH^- 与磷酸根竞争 Fe(III) 的现象^[15],由此导致 BD-P 释放。但试验第 1 d, pH 即由 9.5 迅速下降至 8.34,随后缓慢下降,而随着底泥再悬浮时

间的延长,上覆水中 DO 含量明显增加,有利于促进 Fe_{ox} 的生成。因此, BD-P 生成的可能性远大于 Ca-P,而此时生成的 BD-P 提高了对磷的长期持留能力^[22],故 pH9.5 中 BD-P 含量并未减少,而且与原底泥相比有所增加,相反 Ca-P 生成量较小。ES2、ES3 中也发现了类似的现象。

$\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、BD-P、 NaOH-nrP 被定义为潜在活性磷^[16](PMP),其含量可以用来描述底泥中易释放态磷的多少。ES0、ES1、ES2、ES3、ES4 中 PMP 含量分别为 945.4、694.2、817.0、811.2、1 094.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 TP 的 73.6%、64.0%、69.0%、69.7%、74.7%。由此可见,在 $\text{pH}<8$ 时,底泥再悬浮促进了易释放态磷向难释放态磷的转化,并且随着 pH 值的增加,这种促进作用逐渐减小甚至倒转,当 pH 值较高时(pH9.5),这种促进作用被倒转。

2.3 底泥再悬浮条件下,生物有效磷的变化规律

表 2 显示,底泥再悬浮条件下,不同 pH 值对 BAP 的生成量有显著的影响,而对于不同形态 BAP 的影响程度则不同。去离子水(WSP)和 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 (RDP)适用于提取水溶性磷含量高且固磷能力弱的各种土壤^[23]。底泥再悬浮条件下,不同 pH 值均导致各底泥样品中 WSP、RDP 含量有所减少。说明底泥经再悬浮后,对磷的固定能力有所增强,但由于 WSP、RDP 含量较小,故对上覆水富营养化贡献较小。Olsen-P 指活性较高的钙磷^[23],其含量也明显高于 WSP、RDP,是 BAP 的主要组成部分。根据农业土壤标准^[23],当 1 kg 干土中 Olsen-P 含量大于 46 mg 时,则表明底泥具有较高的营养水平。从表 2 中可以看出,各底泥样品均具有较高的营养水平。与原底泥相比, $\text{pH}<8$ 时, Olsen-P 均明显减少,而 pH 较高时则显著增加。说明底泥再悬浮条件下, pH 值对 Olsen-P 的形成影响显著。研究中分析了 Olsen-P 占 Ca-P 的比例,在 ES0、ES1、ES2、ES3、ES4 中分别占 47.84%、35.38%、39.37%、41.24%、50.23%。由此可见, $\text{pH}<8$

表 2 不同 pH 值条件下生物有效磷的形成量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 2 The formation of BAP in sediments under the conditions of different pH values($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

试验编号	WSP	RDP	Olsen-P	AAP
ES0	28.53	7.49	55.25	141.43
ES1	24.60	5.99	51.84	220.65
ES2	23.90	5.04	50.33	202.46
ES3	23.10	4.54	50.75	192.08
ES4	27.11	5.03	63.74	186.88

时,活性钙磷的形成量有所减少,说明底泥再悬浮条件下,较小的 pH 值时,形成 Ca-P 的活性降低,而当 pH 值较高时,活性钙磷的含量显著增加。由此推测,底泥再悬浮过程中,pH 值促使 Ca-P 的组成发生了变化。AAP 表示有氧条件下湖泊光合层中藻类可利用磷含量^[23,24],其也是 BAP 中含量最高的。表 2 显示,底泥再悬浮促进了 AAP 的生成,但随着上覆水 pH 值的升高,AAP 含量呈逐渐下降的趋势。考虑到各底泥样品中 TP、PMP 含量明显不同,本研究探讨了 BAP 与 TP、PMP 的关系(表 3)。

从表 3 可以看出,底泥再悬浮后,不同形态的生物有效磷占总磷、潜在活性磷的百分比明显不同。其中,WSP/TP、RDP/TP 随着 pH 值的升高呈逐渐下降趋势;而 Olsen-P/TP 基本保持不变;AAP/TP 随着 pH 值的升高呈逐渐下降的趋势。通常认为,BAP 与 TP 具有显著正相关关系^[17,25],在本研究中,AAP 与 TP 呈一定的负相关关系,特别是底泥再悬浮条件下,这种负相关关系更加显著($r=-0.764\ 0$)。因此,底泥再悬浮条件下,AAP 含量随着 TP 的增加显著减少。由此可见,对于经常发生底泥再悬浮的水体,如太湖等浅水湖泊,TP 的含量可能并不能很好地表征 AAP 的含量。其原因可能与底泥受到扰动而导致不同形态磷的数量分布发生改变有关。

表 3 BAP 在 TP、PMP 中的含量百分比

Table 3 Percentages of BAP in TP and PMP in sediment

试验 编号	WSP/ TP/%	RDP/ TP/%	Olsen-P/ TP/%	AAP/ TP/%	WSP/ PMP/%	RDP/ PMP/%	Olsen-P/ PMP/%	AAP/ PMP/%
ES0	2.22	0.58	4.30	11.01	3.02	0.79	5.84	14.96
ES1	2.27	0.55	4.78	20.35	3.54	0.86	7.47	31.78
ES2	2.02	0.43	4.25	17.11	2.93	0.62	6.16	24.78
ES3	1.98	0.39	4.36	16.49	2.84	0.56	6.26	23.68
ES4	1.85	0.34	4.35	12.76	2.48	0.46	5.82	17.07

以往的研究中,通常根据不同形态磷的易释放性来衡量磷的可生物利用性^[26],因而会用 PMP 来近似的代替 BAP,即 BAP 与 PMP 呈显著的正相关关系。本研究中,除 WSP 外,RDP、Olsen-P 与 PMP 的相关关系并不显著,而 AAP 与 PMP 则呈显著的负相关关系($r=-0.901\ 1$)。研究认为,AAP 与 BD-P、Ca-P 具有显著的正相关关系^[25],但考虑到本研究中 Ca-P 含量较小,其对 AAP 的贡献有限,则可推断,AAP 大部分来源于 BD-P。但 AAP 与 BD-P 呈明显的负相关关系($r=-0.788\ 3$),这与以往的研究结果不符^[17,25,26]。分析其原因是底泥再悬浮条件下,较高的 pH 值时, Fe_{ox} 的

形成量增加,促进了 BD-P 的形成,形成的 BD-P 对磷具有长期持留能力,从而使 BD-P 很难转化成 AAP。而在较低的 pH 值下, Fe_{ox} 的形成受到抑制,形成的 BD-P 对磷的持留能力有限,导致其易于转化成 AAP。这说明,底泥再悬浮条件下,通过不同形态磷的易释放性来衡量磷的可生物利用性是不恰当的,并且不同形态磷的生物有效性发生了明显的改变。这对于了解水体富营养化的发生机制以及探索内源磷的控制方法具有重要意义。

值得指出的是,为了更深入地了解不同形态磷的生物有效性,有必要通过化学试剂依次提取底泥中不同形态磷,然后分析底泥中 BAP 的含量,以此评估不同形态磷的生物有效性,这可能比仅通过不同形态磷与生物有效磷的相关关系来分析其生物有效性要更具科学意义。

3 结论

(1)底泥再悬浮条件下,pH 值对上覆水中磷向底泥迁移有不同程度的促进作用,这种促进作用随 pH 值的增加逐渐减弱。

(2)底泥再悬浮条件下,pH 值对不同形态磷的数量分布有明显的影响。BD-P、 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量随 pH 值升高而增加。Al-P、Ca-P、NaOH-nrP 在不同 pH 值条件下均有不同程度增加,其中 pH5 时,Ca-P 含量增加幅度最大。pH<8 时,底泥再悬浮促进了潜在活性磷向难释放态磷的转化,而当 pH 值较高时,则恰好相反。

(3)底泥再悬浮条件下,pH 值对不同形态的生物有效磷的形成有着不同的影响。与原底泥相比,WSP、RDP 形成量减少;pH<8 时,Olsen-P 形成量显著减少,而 pH 较高时,Olsen-P 形成量明显增加;AAP 形成量显著增加,并且随着 pH 值的升高逐渐减少。BAP 与 TP、PMP 不具有显著的正相关关系,其中,AAP 与 TP、PMP 呈显著的负相关关系。

参考文献:

- [1] Wallbrink P J, Martin C E, Wilson C J. Quantifying the contributions of sediment, sediment-p and fertilizer-p from forested, cultivated and pasture areas at the landuse and catchment scale using the fallout radionuclides and geochemistry [J]. *Soil and tillage research*, 2003, 69:53-68.
- [2] Jin X C, Wang S R, Pang Y, et al. The adsorption of phosphate on different trophic lake sediments [J]. *Colloids and surfaces*, 2005, 254:241-248.
- [3] Edlund G, Craman R. Distribution and diagenesis of organic and inor-

- ganic phosphorus in sediments of the Baltic proper [J]. *Chemosphere*, 2001, 45: 1053–1061.
- [4] 金相灿, 王圣瑞, 庞 燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 707–711.
JIN X C, WANG S R, PANG Y. The influence of phosphorus forms and pH on release of phosphorus from sediments in Taihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(6): 707–711.
- [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[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 147–150.
HUANG Q H, WANG D H, WANG C X, et al. Vertical variation of the phosphorus form in the sediments of Meiliang Bay and Wuli Lake of Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(2): 147–150.
- [6] Perkins R G, Underwood G J C. The potential for phosphorus release across the sediment–water interface in an eutrophic reservoir dosed with ferric sulphate[J]. *Water Research*, 2001, 35(6): 1399–1406.
- [7] Rydin E, Welch E B. Aluminum dose required to inactivate phosphate in lake sediments[J]. *Water Research*, 1998, 32(10): 2969–2976.
- [8] 史小丽, 王凤平, 蒋丽娟, 等. 光照时间对外源性磷在模拟水生系统中迁移的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 40–45.
SHI X L, WANG F P, JIANG L J, et al. Effect of light period length on the movement of exogenous phosphorus within simulative aqueous ecosystems[J]. *Environmental science*, 2003, 24(1): 40–45.
- [9] Kim L H, Choi E, Gil K I, et al. Phosphorus release rate from sediments and pollutant characteristics in Han River, Seoul, Korea [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 321: 115–125.
- [10] 王圣瑞, 金相灿, 庞 燕. 不同营养水平沉积物在不同 pH 下对磷酸盐的等温吸附特征[J]. 环境科学研究, 2005, 18(1): 53–57.
WANG S R, JIN X C, PANG Y. The sorption isotherms of phosphate to different nutrient levels of sediments in different pH [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(1): 53–57.
- [11] Horppila J, Nurminen L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (Southern Finland)[J]. *Water Research*, 2003, 37: 4468–4474.
- [12] Arias C A, Bubba M D, Brix H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds [J]. *Water Research*, 2001, 35(5): 1159–1168.
- [13] Bastin O, Janssens F, Dufey J, et al. Phosphorus removal by synthetic iron oxide–gypsum compound [J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12: 339–351.
- [14] Ann Y, Reddy K R, Delfino J J. Influence of chemical amendments on phosphorus immobilization in soil from a constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14: 157–167.
- [15] 范成新, 张 路, 包先明, 等. 太湖沉积物–水界面生源要素迁移机制及量化–2. 磷释放的热力学机制及源–汇转换 [J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 207–217.
FAN C X, ZHANG L, BAO X M, et al. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment–water interface of Lake Taihu; II. Chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source–sink transition [J]. *Journal of Lake Science*, 2006, 18(3): 207–217.
- [16] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in lake erken sediments [J]. *Wat Res*, 2000, 34(7): 2037–2042.
- [17] 徐玉慧, 姜 霞, 金相灿, 等. 太湖东北部沉积物生物可利用磷的季节性变化[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 869–873.
XU Y H, JIANG X, JIN X C, et al. Seasonal variation of bioavailable phosphorus in sediments in northeast part of Taihu Lake [J]. *Environmental science*, 2006, 27(5): 869–873.
- [18] Dévai I, Felldy L, Wittner I, et al. Detection of phosphine; new aspects of the phosphorus cycle in the hydrosphere[J]. *Nature*, 1988, 333(26): 343–345.
- [19] Gassmann G. Phosphine in the fluvial and marine hydrosphere[J]. *Marine chemistry*, 1994, 45: 197–205.
- [20] 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[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 199–206.
HUANG Q H, WANG L, WANG Z J. Advance in the study on phosphorus speciation, transformation and its potential ecological effects in Chinese lakes[J]. *Journal of Lake Science*, 2006, 18(3): 199–206.
- [21] 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[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6): 583–586.
HUANG Q H, WANG D H, WANG C X, et al. Relation between phosphorus forms in the sediments and lake eutrophication [J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(6): 583–586.
- [22] Reddy K R, Flaig E G, Graetz D A. Phosphorus storage capacity of uplands, wetlands, and streams of the lake Okeechobee Watershed, Florida[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1996, 59: 203–216.
- [23] 卜玉山, Magdoff F R. 十种土壤有效磷测定方法的比较 [J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 140–146.
BU Y S, Magdoff F R. A comparison of ten methods for determination of available phosphorus in soils[J]. *Acta Pedologica sinica*, 2003, 40(1): 140–146.
- [24] 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[J]. 环境化学, 1999, 18(6): 497–506.
YAN W J, ZHANG S, WU S A, et al. Bioavailable phosphorus loss and its prediction in runoff under simulated rainfall conditions [J]. *Environmental chemistry*, 1999, 18(6): 497–506.
- [25] 王 琦, 姜 霞, 金相灿, 等. 太湖不同营养水平湖区沉积物形态与生物可利用磷的分布及相关关系[J]. 湖泊科学, 2006, 18(2): 120–126.
WANG Q, JIANG X, JIN X C, et al. Distribution of phosphorus fractions and bio–available phosphorus forms and their relationship in the sediments from different regions of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Science*, 2006, 18(2): 120–126.
- [26] 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[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 488–494.
HOU L J, LU J J, LIU M, et al. Species and bioavailability of phosphorus in surface sediments from the shoals in the Yangtze Estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 488–494.