

太湖东北部沉积物生物可利用磷的季节性变化

徐玉慧^{1,2}, 姜霞², 金相灿^{2*}, 王琦^{2,3}, 马小凡¹

(1. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130026; 2. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 北京 100012; 3. 西北农林科技大学生命科学院, 杨凌 712100)

摘要: 对太湖东北部营养水平不同的梅梁湾、贡湖湾和胥口湾 3 湖区表层(0~10cm)沉积物中总磷与 4 种生物可利用磷的季节性变化进行了研究. 结果发现, 各湖区沉积物中总磷及各形态生物可利用磷的含量与其水体营养水平相一致; 不同点位沉积物中总磷与各生物可利用磷含量存在较大差异, 同一点位不同季节沉积物中总磷与生物可利用磷的含量也显著不同. 表层沉积物中各生物可利用磷始终与总磷有很好的相关性并且随季节变化. 建议评估沉积物对藻类的供磷能力及潜在释放危险时, 以不同季节的总磷含量为依据进行比较分析更为确切.

关键词: 太湖; 沉积物; 生物可利用磷; 季节性变化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)05-0869-05

Seasonal Variation of Bioavailable Phosphorus in Sediments in Northeast Part of Taihu Lake

XU Yur-hui^{1,2}, JIANG Xia², JIN Xiang-can², WANG Qi^{2,3}, MA Xiao-fan¹

(1. College of Environment and Resource, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; 3. College of Life Science, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: The concentrations of total phosphorus (TP), bioavailable phosphorus (BAP) and their seasonal changes in the surface sediments (0~10 cm) from three different regions of northeast of Taihu Lake were investigated. The results show that the concentrations of TP and BAP in the sediment are coincided with the corresponding trophic level of the overlying water. The concentrations of TP and BAP in the sediments varied widely not only between sampling sites but also between seasons. There is a significant correlation between BAP and TP in surface sediments, and their regression analysis equation varies with seasons. It is suggested to evaluate potential phosphorus release risk of the sediment based on the TP concentration of the corresponding seasons.

Key words: Taihu Lake; sediment; bioavailable phosphorus; seasonal variation

太湖位于长江三角洲南翼的太湖平原上, 以平均水位 3.0m(吴淞基面)计算, 其水面面积为 2 338.1 km², 平均水深为 1.89m, 是一个典型的浅水湖泊^[1]. 近十几年来在太湖流域社会经济快速发展的同时, 生态环境也遭到了严重破坏, 目前太湖面临的最主要的问题是水体富营养化和藻类水华频频暴发^[2].

水体磷浓度是评价水体富营养化的主要指标之一, 也是藻类水华暴发的重要限制因素^[3]. 近年来, 在外源磷得到控制的同时, 沉积物内源磷的释放引起人们越来越多的关注^[4~7]. Boström 等认为在某些富营养水平的水体中, 沉积物中的磷释放可能超过磷沉降, 使得水体中磷的浓度保持较高水平, 沉积物由“汇”变为“源”^[8], 为水生植物生长提供了内在持续的磷源. 水生植物(浮游植物和大型水生植物)的生长是与季节变化密切相关的周期性过程^[9], 在不同的生长阶段, 对磷的利用程度和方式也应有所不同, 因此沉积物中总磷和各形态生物可利用磷

的含量与水生植物生长周期以及对应的季节变化之间应该密切相关.

为了解沉积物内源磷对不同营养水平湖泊水生植物生长过程所起的作用及其季节性变化, 准确地评价不同季节沉积物中 BAP 的含量, 预测沉积物的潜在释磷风险, 选择太湖东北部营养水平和生态类型不同的 3 个湖区: 梅梁湾(藻型)、贡湖湾(藻型)与胥口湾(草型)为研究区域^[10,11], 测定其不同季节表层沉积物中的 BAP 含量, 分析 TP 与 BAP 在湖泊水生植物生长过程中的作用及其季节性变化特点.

1 材料与方法

1.1 沉积物样品的采集与处理

收稿日期: 2005-05-07; 修订日期: 2005-08-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412304);

国家自然科学基金项目(20507017)

作者简介: 徐玉慧(1981~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊富营养化, E-mail: mengdie0369@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: Jinxiang@public.bta.net.cn

利用彼得森采泥器,于 2004-03,2004-06,2004-09,2004-12 分别在太湖东北部的梅梁湾(M1,M2,M3),贡湖湾(G),胥口湾(X)3 个湖区的 5 个点位采得表层 10cm 沉积物样品.沉积物样品经冷冻干燥后,用木棒分散、研磨过 100 目筛,保存在封口袋中备用.所有点位均用木桩固定,使用全球卫星定位系统(GPS)进行采集定位,同时结合 1:50 000 地形图进行采集定位,采样点位见图 1.

梅梁湾属于富营养化程度较高的藻型湖泊,其采样点 M1 位于小丁湾内,表层沉积物质地较硬,颜色呈灰黑色;M2 位于航道附近,表层沉积物多为淤泥,颜色呈青灰色;M3 位于梁溪河口,表层沉积物为较软的淤泥,颜色呈黑褐色.胥口湾属于草型湖泊,其采样点 X 位于航道附近,水质较好,表层沉积物为砂质,颜色呈乌黑色.贡湖湾也属于藻型湖泊,富营养化程度介于梅梁湾与胥口湾之间,其采样点 G 位于湖岸边,岸边生长大量的水生植被,表层沉积物质地较软,颜色呈黄褐色.

1.2 样品分析

沉积物中的总磷(TP)应用淡水沉积物中磷形态的标准测试程序(SMT)^[12]测定:450℃灰化 3h,



图 1 太湖东北部采样点位置
Fig. 1 Sampling sites in the northeast of Taihu Lake

转移至离心筒,加入 20mL 3.5 mol/L HCl 振荡 16 h,10 000r/min 离心 10min,磷钼蓝比色测定上清液中的磷浓度^[13].沉积物中 BAP 的分析基本按照周启星等^[14~16]总结改进的方法,具体步骤见表 1.

表 1 沉积物中生物可利用磷的提取方法
Table 1 Extraction method of bioavailable phosphorus in sediments

形态	代码	提取方法
水溶性磷	WSP	0.50g 沉积物加入 100mL 去离子水,25℃220r/min 振荡 2h,10 000r/min 离心 10min 获取提取液,抽滤过 0.45μm 滤膜,磷钼蓝比色测定提取液中的磷浓度.
易解吸磷	RDP	1.00g 沉积物加入 50mL 0.01mol/L CaCl ₂ ,25℃220r/min 振荡 1h,10 000r/min 离心 10min 获取提取液,抽滤过 0.45μm 滤膜,磷钼蓝比色测定提取液中的磷浓度.
藻类可利用磷	AAP	0.50g 沉积物加入 200mL 0.1mol/L NaOH,25℃220r/min 振荡 4h,10 000r/min 离心 10min 获取提取液,抽滤过 0.45μm 滤膜,磷钼蓝比色测定提取液中的磷浓度.
NaHCO ₃ 可提取磷	Olseir P	1.50g 沉积物加入 50mL 0.5mol/L NaHCO ₃ pH=8.5,25℃220r/min 振荡 0.5h,10 000r/min 离心 10min 获取提取液,抽滤过 0.45μm 滤膜,磷钼蓝比色测定提取液中的磷浓度.

2 结果与讨论

2.1 太湖东北部湖区表层沉积物中 TP 与 BAP 的分布

根据国家环境监测总站 2003 年全国质量报告中对太湖水体营养状态指数的报道:梅梁湾为 63.0,东部沿岸区为 49.8.因此,梅梁湾为富营养湖区,东部沿岸区胥口湾为相对清洁湖区.在任何季节条件下,表层沉积物中 TP 和 BAP 含量与其湖泊水体的营养水平一致(表 2),即梅梁湾>贡湖湾>胥口湾,梅梁湾各点位的 TP 和 BAP 含量均高于其它 2 个湖区,这与梅梁湾是富营养湖区相对应.梅梁湾位于无锡工业区、旅游区,生活与工业污染严重,水

体严重富营养化.胥口湾属于草型湖泊,为清洁湖区,水生植物的生长使得水体与沉积物中的 BAP 被大量吸收^[11],从而保持较好的水质和较低的营养水平.对于同一湖区梅梁湾不同点位的表层沉积物,TP 和 BAP 含量也有很大的差别:春夏大体为 M2>M3>M1,秋冬大体为 M3>M2>M1,这主要与该区域水体的富营养化程度,所受干扰程度以及生态类型有关.

不同浸提剂表示不同环境条件下沉积物中潜在 BAP 的含量状况.0.1mol/L NaOH 是一种较弱的浸提剂,它所提取藻类可利用磷(AAP)表示有氧条件下湖泊光合作用中藻类可利用磷含量^[17~18],梅梁湾各采样点的表层沉积物 AAP 含量都很高.0.5

mol/L 的 NaHCO_3 可提取磷 (Olsen-P) 主要为活性较高的钙磷^[18], 根据农业土壤标准, 当每 kg 干土中 Olsen-P 的含量大于 46mg 时, 表明沉积物具有较高的营养水平^[17], 按照这一标准, 梅梁湾采样点 M2 与 M3 区域的沉积物具有较高营养水平. 去离子水与 0.01mol/L CaCl_2 适用于提取水溶性磷含量高且固磷

能力弱的各种土壤^[18], 梅梁湾采样点 M2 与 M3 的水溶性磷 (WSP) 含量相对较多, 贡湖湾采样点 G 与胥口湾采样点 X 的 WSP 含量相对较小. 研究区域内 5 个样点的易解吸磷 (RDP) 都很小, 对于 TP 含量较低的采样点 M1, G 与 X, 冬季 RDP 的含量低于检测限, 这说明此区域沉积物的固磷能力较强.

表 2 不同季节沉积物中生物可利用磷及总磷含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Seasonal changes of the concentrations of BAP and TP in the sediments/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

P 形态	采样时间	M1	M2	M3	G	X
AAP	春: 2004-03-13~ 2004-03-15	100.8±0.0	258.3±2.4	155.6±1.1	64.3±1.8	33.7±1.2
	夏: 2004-06-15~ 2004-06-17	118.1±0.0	285.5±3.0	113.1±2.1	64.5±0.7	16.8±1.2
	秋: 2004-09-24~ 2004-09-26	112.4±0.6	244.8±1.0	405.2±12.5	65.2±1.2	46.9±0.1
	冬: 2004-12-20~ 2004-12-23	118.9±3.7	226.5±0.5	452.9±9.8	63.0±0.6	85.6±3.7
Olsen-P	春: 2004-03-13~ 2004-03-15	26.2±0.5	56.6±1.1	34.3±0.4	14.6±0.0	5.9±0.1
	夏: 2004-06-15~ 2004-06-17	28.3±0.9	72.3±0.6	29.5±0.4	11.7±0.1	5.9±0.1
	秋: 2004-09-24~ 2004-09-26	32.7±1.4	61.1±1.2	55.3±2.1	17.0±0.9	8.0±0.3
	冬: 2004-12-20~ 2004-12-23	32.2±0.5	47.4±0.3	64.3±1.0	14.4±0.9	18.6±0.8
WSP	春: 2004-03-13~ 2004-03-15	7.5±0.3	21.6±0.0	14.5±0.0	5.4±0.0	3.0±0.0
	夏: 2004-06-15~ 2004-06-17	5.1±0.3	31.0±0.2	7.5±0.3	3.6±3.6	1.8±0.0
	秋: 2004-09-24~ 2004-09-26	9.4±0.3	26.5±0.7	13.8±0.0	4.2±0.0	2.1±0.3
	冬: 2004-12-20~ 2004-12-23	2.7±0.3	7.5±0.3	10.8±0.0	2.4±0.0	1.2±0.0
RDP	春: 2004-03-13~ 2004-03-15	0.3±0.0	1.1±0.2	0.5±0.0	0.3±0.2	0.2±0.0
	夏: 2004-06-15~ 2004-06-17	0.2±0.0	1.7±0.0	0.2±0.0	0.2±0.0	0.0±0.0
	秋: 2004-09-24~ 2004-09-26	0.3±0.0	1.2±0.0	0.5±0.0	0.2±0.0	0.2±0.0
	冬: 2004-12-20~ 2004-12-23	低于检测限	0.2±0.1	0.3±0.1	低于检测限	低于检测限
TP	春: 2004-03-13~ 2004-03-15	493.0±1.3	835.5±17.1	677.4±5.8	478.8±4.4	455.7±6.0
	夏: 2004-06-15~ 2004-06-17	496.2±13.1	821.4±3.7	481.2±5.5	408.2±3.0	301.4±7.1
	秋: 2004-09-24~ 2004-09-26	539.2±1.3	777.0±3.9	1026.1±7.6	461.3±4.2	379.1±18.8
	冬: 2004-12-20~ 2004-12-23	510.3±38.1	732.0±13.0	958.4±13.0	427.4±15.8	345.4±12.5

各采样点 4 种不同 BAP 在 TP 中所占比例大小顺序是一致的, 即 $\text{AAP} > \text{Olsen-P} > \text{WSP} > \text{RDP}$. 尤其是 AAP, 在 TP 中占有很大的比例, 对于上覆水体营养水平较高的 M3 采样点, 表层沉积物中 AAP/TP 可达到 40% ~ 50%, 说明该采样点沉积物的释磷潜力很大, 能够有效维持上覆水体较高的营养水平. 因此 AAP 与 Olsen-P 可能更宜于描述沉积物的释磷能力.

由于采样点位于太湖的不同湖区, 自然因素与人为因素造成沉积物中 TP 和各 BAP 含量的差异较大, 但相似的土壤背景和环境条件导致各采样点 BAP 与 TP 之间存在非常好的相关性(表 3), 因此沉积物中各 BAP 含量可以通过 TP 来描述, 沉积物中的潜在释磷风险可以用 TP 含量来评估.

2.2 太湖东北部湖区表层沉积物中 TP 与 BAP 的季节性变化

对于同一采样点, 不同季节之间 BAP 和 TP 的含量有不同程度的变化(表 2), 特别是富营养化严重的藻型湖泊——梅梁湾, 其沉积物中的 TP 含量

在夏季下降, 表现出“源”的特征, 而在秋季明显升高, 表现为“汇”的特征, 与藻型湖泊水华暴发现象相呼应. 由于影响沉积物中磷含量变化的原因很多, 外源磷的输入可能也是导致其变化的重要原因. 因此为了更充分地表达 BAP 在不同季节之间的变化, 对于 BAP 含量变化明显的沉积物, 结合 BAP 在 TP 中的比例变化来描述其利用程度的季节性分布.

从不同季节 TP 含量及 BAP 含量来看(表 2, 图 2), 梅梁湾采样点 M3 的变化最大, 3 月由于藻类开始萌发^[18] 导致磷含量下降; 6 月, 由于夏季温度升高, 促进微生物活性, 生物作用强烈, 导致磷释放过程加剧, 同时藻类进入嗜长时期^[10], 表层沉积物中的 BAP 被藻类大量利用从而进一步促进磷的释放; 水华过后, 藻体分解, 加之冬季有机物分解, 释放作用减少^[20], 而藻类处于休眠期, 导致沉积物中磷的大量积蓄, 所以 9 月与 12 月表层沉积物中的磷含量又大幅度增加. 与此相对应, AAP/TP 在 3 月与 6 月很小, 12 月大幅度增大, 体现出 AAP 利用程度的变化; Olsen-P/TP 也是 3 月小, 12 月大幅度增大, 6 月

稍长可能是在夏季对钙磷的利用程度减小,更多地利用更易于转化的磷形态,但其绝对含量在夏季还是减少的,表明了沉积物中 BAP 从春夏季到秋冬是一个由消耗到累积的变化过程.需要说明的是 RDP 呈现出四季基本持平的特点,这可能是由于其本身含量很小,所以在季节之间没有表现出明显变化.

梅梁湾采样点 M2 变化较大,并且不论 BAP 的含量还是 BAP/TP 都是以夏季居多,这种变化可能是因为采样点 M2 处在航道附近,夏季人为活动和自然环境中的生物活动都比较活跃,营养物质交换更为频繁,水体中的磷在被利用的同时能够得到新的补充,减小了对沉积物中 BAP 的利用程度.

梅梁湾采样点 M1 与贡湖湾采样点 G 的变化程度比较小(表 2).采样点 M1 处于相对开放湖区,沉积物表层悬浮颗粒少,底质较硬,沉积物较为稳定;其上覆水体营养水平低于采样湖区 M2 与 M3, M1 区域藻类水华现象不明显,岸边分布少量芦苇,水生植物对沉积物磷交换的影响相对较小,沉积物 BAP

的季节性变化不大.采样点 G 位于湖岸边,上覆水体营养水平相对较低,沉积物中 TP 与 BAP 含量夏季与冬季较小,秋季较大.夏季湖区上会出现一些漂移的藻类水华,它们的生长与死亡可能是导致 TP 与 BAP 含量夏季少秋季多的原因;采样点 G 岸边有大量挺水植物,即使在冬季也有生长,这可能是冬季磷含量略有减少的原因.胥口湾采样点 X 是 5 个采样点中唯一属于草型湖泊的采样点,大型水生植物在夏季生长旺盛,对水体和沉积物中磷的需求很大,使沉积物中有效磷被植物大量吸收^[11], Olsen-P 可能较难利用,含量没有变化之外,TP 含量及其他 BAP 含量在夏季都有很大的下降,秋季伴随着植物的死亡和分解,磷含量开始增大(表 2).AAP/TP 与 Olsen-P/TP 在冬季明显增大(图 2),表明沉积物中磷的利用程度大大下降,进一步说明大型水生植物的生长、死亡与沉积物中的磷有着密切的联系,对其有很大的影响.

由此可见,水生植物的行为对沉积物中的 TP

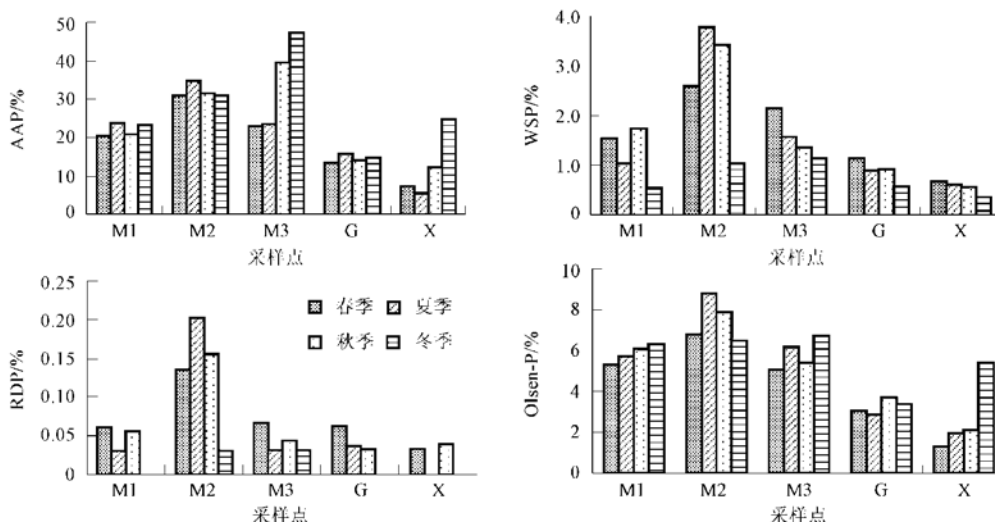


图 2 生物可利用磷在总磷中的含量百分比

Fig. 2 Percentage of bioavailable phosphorus forms of TP in lake sediments

与 BAP 有着重大的影响,水生植物的生长过程是一个典型的季节性过程,从而导致 TP 与 BAP 的季节性变化很大,对于不同的沉积物,由于湖泊水生植物的组成以及人类活动造成的干扰程度有所不同,磷的季节性变化规律也不尽相同,仅仅以某一季节或是年平均的磷含量对沉积物的释磷潜力进行评价,必然使分析结果与实际不符,因此要客观评价沉积物对藻类生长的潜在供磷能力,考虑季节性变化这一因素是非常有必要的.

2.3 沉积物中 BAP 与 TP 的季节性相关关系

根据所有点位 3 月,6 月,9 月与 12 月的实验结果,建立相应春季,夏季,秋季与冬季表层沉积物中各 BAP 与 TP 的线性回归方程,结果表明,各季节表层沉积物中各 BAP 与 TP 之间存在显著正相关关系,除沉积物中的 RDP 与 TP 是在 $\alpha < 0.02$ 的水平上显著正相关,其它 BAP 与 TP 都是在 $\alpha < 0.01$ 的水平上显著正相关.但不同季节之间各 BAP 与 TP 的回归方程有很大不同,存在明显的季节性变化,尤其对于可以被生物直接利用的 WSP 和 RDP,很难通过单一季节的线性回归方程加以拟合.

不同季节 TP 与 BAP 相关关系见图 3. 可以看出各形态 BAP 与 TP 含量在不同季节之间的变化: 可能是受到水生植物生长的影响, AAP 含量在夏季和秋季的变化不大, 而在春季和冬季的变化显著; Olsen-P 的季节性变化较为复杂, 对于 TP 含量不同的沉积物, 其 Olsen-P 含量的季节性变化趋势也不

尽相同; WSP 与 RDP 的季节性变化最为显著, 并且注意到沉积物中的 TP 含量越大, 不同季节的 WSP 与 RDP 的含量变化就越大. 如果采用单一季节沉积物中的 TP 含量来描述各季节 BAP 的水平显然是不科学的, 应该根据实际评估需要, 用不同季节的 TP 来描述各 BAP, 从而更加客观地衡量沉积物对

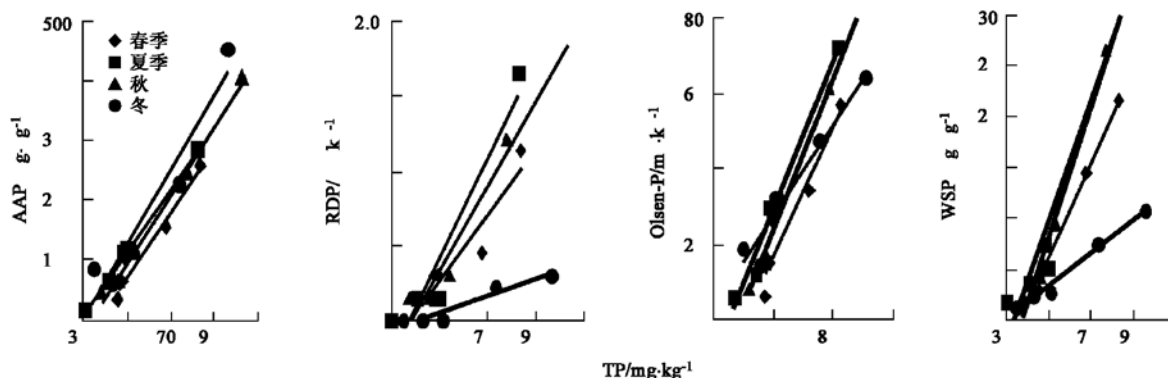


图 3 太湖东北部表层沉积物 BAP 与 TP 的季节性相关关系

Fig. 3 Seasonal correlation of TP and BAP in the surface sediments of northeast Taihu Lake

上覆水体营养水平的贡献。

3 结论

太湖东北部不同湖区表层沉积物中 BAP 与 TP 含量与其湖泊营养水平相一致, 其含量分布不但在湖区之间有很大的差别, 而且在季节之间也有显著的变化. 各季节沉积物中 BAP 与 TP 之间存在显著正相关关系, 但不同季节 BAP 与 TP 的线性回归方程存在较大差异. 鉴于这种季节性差异, 为了更加准确完全地描述沉积物对水生植物生长的供磷能力以及沉积物潜在的释磷风险, 应以不同季节的 TP 含量为依据进行评估。

参考文献:

- [1] 金相灿, 刘树坤, 章宗涉, 等. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995. 108~112.
- [2] 朱光伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 1~9.
- [3] 秦伯强. 太湖水环境面临的主要问题, 研究动态与初步进展[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 1~9.
- [4] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 303~316.
- [5] 焦念志. 关于沉积物释磷问题的研究[J]. 海洋湖沼通报, 1989, (2): 80~84.
- [6] 王晓蓉, 吴重华. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境化学, 1996, 15(1): 15~19.
- [7] Van Raaphorst W, Kloosterhuis H T. Phosphate sorption in superficial intertidal sediments[J]. Marine Chemistry, 1994, 48: 1~16.
- [8] Boström B, Jens M, Anderson, et al. Exchange of phosphorus across the sediment-water interface[J]. Hydrobiologia, 1988, 170: 229~244.
- [9] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 176~197.
- [10] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 262~321.
- [11] 朱光伟, 高光, 秦伯强, 等. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 714~719.
- [12] 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.
- [13] 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 246~248.
- [14] Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK[J]. Chemosphere, 2001, 42: 221~225.
- [15] Andrieux F, Aminot A. A two-year survey of phosphorus speciation in sediments of the Bay of Seine (France) [J]. Continental Shelf Research, 1997, 17: 1229~1245.
- [16] Gonsiorek T, Casper P, Koschel R. Phosphorus binding forms in the sediment of an oligotrophic and a eutrophic hardwater lake of the Baltic lake district (Germany) [J]. Water Science and Technology, 1998, 37: 51~58.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] MAFF. Fertilizer Recommendations for Agriculture and Horticultural Crops[M]. London: UK Ministry of Agriculture Fisheries and Food, HMSO, 1991. 209.
- [20] 潘建明, 扈传昱, 陈建芳, 等. 南海海域海水中各形态磷的化学分布特征[J]. 海洋学报, 2004, 26(1): 40~47.