沉积物中有机磷在 pH 和温度影响下的矿化机制

李楠^{1,2,3},单保庆^{1*},张洪¹,张景来²

(1. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085; 2. 中国人民大学环境学院,北京 100872; 3. 河北省环境科学研究院, 石家庄 050037)

摘要:通过实验室模拟,采用 Bowman-Cole 有机磷分级修正体系研究了 pH 和温度对沉积物中有机磷矿化的影响机制.结果表明,pH 为 6.5、7.5、8.5 时有机磷(TOP)占总磷(TP)比例分别介于 31.71% ~41.73%、30.85% ~43.29% 和 27.25% ~ 56.31%之间,碱性条件促进有机磷矿化,中性条件下矿化速率减缓.15℃、25℃和 35℃的 TOP/TP 分别介于 29.07% ~ 46.62%、27.81% ~46.62%和 34.56% ~46.62%,在 30 d 模拟期内,前 10 d 有机磷矿化随着温度上升而增加,后 20 d 呈相反趋势.在偏酸性和高温条件下,稳性有机磷(NOP)向中活性有机磷(MLOP)的转化,中活性有机磷(MLOP)向活性有机磷(LOP)的转化呈现同步性,LOP 矿化分解很快,使其可能成为上覆水中藻类生长的磷源,潜在影响了富营养化进程.

关键词:沉积物;有机磷矿化;活性有机磷;中活性有机磷;稳性有机磷;pH;温度

中图分类号:X52 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)04-1008-07

Organic Phosphorus Mineralization in the Sediments Under the Impact of pH and Temperature

LI Nan^{1,2,3}, SHAN Bao-qing¹, ZHANG Hong¹, ZHANG Jing-lai²

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 3. Hebei Provincial Academy of Environmental Sciences, Shijazhuang 050037, China)

Abstract: In the simulation, Bowman-Cole modified organic phosphorus fractionation system was used for the analysis of pH and temperature impact on organic phosphorus mineralization. The results showed that when pH were 6.5, 7.5 and 8.5, organic phosphorus (TOP) accounted for 31.71% - 41.73%, 30.85% - 43.29% and 27.25% - 56.31% of total phosphorus (TP) in the sediments respectively. Alkalescent environment accelerated the process of organic phosphorus mineralization which slowed down when environment was neutral. When temperatures were 15%, 25% and 35%, TOP accounted for 29.07% - 46.62%, 27.81% - 46.62% and 34.56% - 46.62% of TP respectively. The process of organic phosphorus mineralization increased with temperature in the first 10 days but decreased in the following 20 days. Under acidic and high temperature environment, labile organic phosphorus (LOP) has a strong influence on the water quality because of the simultaneous processes of transformations from nonlabile organic phosphorus (NOP) to moderately labile organic phosphorus (MLOP) and from MLOP to LOP.

Key words: sediment; organic phosphorus mineralization; LOP; MLOP; NOP; pH; temperature

磷在水体营养元素循环中占有极重要的地位,沉 积物是水体中磷的重要蓄积库.沉积物中的磷以无机 磷和有机磷两大类形式存在,其迁移转化是沉积物-水 界面间磷循环的主要过程^[1-4],直接影响上覆水体富 营养化过程,是富营养化的主要考虑因素之一.

已有研究表明有机磷在土壤中可以迅速迁移转 化,在土壤溶液、渗出液^[5]和坡面漫流中有机磷占 总磷很大部分^[6],在磷酸酶作用下可被矿化为磷酸 盐进入水体,能够促进藻类生长^[7],这对于沉积物 中的磷释放有一定借鉴意义.有机磷在沉积物中的 含量可以占到总磷的 20% ~ 80%^[8-10].短期内,溶 解态无机磷可被水生生物利用,然而,无机磷和有机 磷之间的动态平衡表明有机磷是生物有效磷的二次 磷源和长期磷源.有机磷的矿化过程取决于物理、化 学和生物等一系列因素,最直接的影响因素是上覆水 pH 和外界温度^[11-13].尽管有机磷在磷的迁移转 化过程中有重要作用,对于有机磷的研究至今还不 足^[14],特别是关于有机磷矿化机制方面的认识有待 深入研究.

本实验选取北运河下游水系作为研究区域,针对 沉积物有机磷矿化机制进行室内模拟实验.北运河下 游水系是海河水系典型污灌区,灌渠是河道源水注入 和灌溉用水输出的交界面,有机磷对其上覆水水质及

收稿日期:2010-04-29;修订日期:2010-08-30

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209-010,2008ZX07314-005);国家自然科学基金项目 (20907067)

作者简介:李楠(1985~),女,硕士研究生,主要研究方向为典型农 业污灌区有机磷分布和矿化机制,E-mail:linan.2005@ 163.com

^{*} 通讯联系人, E-mail:bqshan@rcees.ac.cn

灌渠所在水域的影响有关键作用.通过采用经过修正的 Bowman-Cole 有机磷分级修正体系^[15],将有机磷分为活性有机磷、中活性有机磷和稳性有机磷 3 种形态,揭示 pH 和温度对不同形态有机磷相互转化的影响,可真实反映在农业环境下多年未经疏浚的灌渠沉积物中有机磷矿化过程,可为区域磷循环和控制农业污染提供客观依据.基于此,本实验着重研究了北运河水系下游典型灌渠泗村店干渠沉积物中不同活性形态有机磷在 pH 和温度影响下的矿化过程,就各形态有机磷之间的转化进行了探讨.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本实验选取泗村店干渠作为研究区域,泗村店 干渠是北运河水系下游典型污灌区.北运河是海河 九大水系之一,其下游区域位于天津武清区,属农业 污灌区,农业用地占武清区土地 60% 以上.农作物 类型以小麦、玉米为主,部分地区种植水稻及蔬菜. 气候属大陆性季风气候,受季风影响,春季干旱多 风,年降水量约 620 mm,其中 75% 集中在 7~8 月. 为保证农业生产用水,北运河下游地区在 20 世纪 60 年代修建了大量人工渠道,用于农业灌溉.

泗村店干渠总长约 14 km,起点始于北京排污河,途经泗村店村、泗后庄、小陈庄、齐庄、耿庄等村落,出水汇入龙凤河,最终进入北运河.污灌农田分布于干渠两岸,具备了农田排水的完整的汇水特点.

1.2 采样方法

根据泗村店干渠渠系网汇水特点,由于南宫排水 闸的蓄积利用阻断河流自然流动,造成水文条件长期 处于静止状态,水质容易恶化^[16],因此选取南宫排水 闸上游约50 m 处作为采样区域,在河道中央进行采 样,南宫闸位置见图1.现场采样时间为2009年9月 17日,采用4 m 柱状 PVC 管采样器,取新鲜沉积物表 层0~10 cm.在南宫排水闸区域分2组采集沉积物, 每组19个柱样(18个模拟实验柱样+空白柱样),密 封待用.采集过程中避免对沉积物的扰动.

1.3 实验方法

1.3.1 沉积物有机磷矿化实验

(1) pH 模拟实验 泗村店干渠上覆水 pH 呈中 性偏碱性,故根据上覆水 pH 值及其波动范围设定 模拟实验上覆水 pH 为 6.5、7.5、8.5.将 18 个柱样 置于温室中培养,每6 个柱样 1 组,用虹吸法向每组 中分别加入 pH 为 6.5、7.5、8.5 的蒸馏水至高度 为 30 cm(包括沉积物高度),定期(每天 18:00)补



图 1 采样点分布示意 Fig. 1 Schematic graph of sampling sites

充酸碱试剂和蒸馏水使 pH 及上覆水量保持恒定. 每5 d 在同一时间(18:00)取1 个柱样的沉积物(将 柱状沉积物分层处理),实验共持续 30 d.

(2)温度模拟实验 按照水体冬季、春秋季和夏季的温度分布特点,选择 15、25、35℃进行模拟实验.用虹吸法向 18 个柱样加蒸馏水至高度为 30cm(包括沉积物高度),每6个柱样 1 组,分 3 组将模拟装置分别置于 15、25、35℃生化恒温培养箱中,定期(每天 18:00)调节上覆水量使之保持恒定.监测步骤及指标同上.

1.3.2 样品处理及分析方法

沉积物柱样用细薄切板分层处理(按照每2 cm 分层,取0~2 cm、4~6 cm、8~10 cm),然后放置于 阴凉处自然阴干.充分混匀后除去植物和贝类等残 体,研磨,过10 目筛,备用.

沉积物的理化性质测定包括有机质、总磷、无机 磷、有机磷及不同有机磷形态含量.有机质分析方法 采用硫酸重铬酸钾稀释热法^[17].总磷、无机磷、有机 磷及不同有机磷形态采用经过修正的 Bowman-Cole 有机磷分级修正体系^[15].分级流程如图 2 所示.该 方法将有机磷分为活性有机磷,中活性有机磷和稳 性有机磷 3 种形态.活性有机磷(labile organic phosphorus,LOP)主要由核酸、磷酯类、磷糖类化合 物组成;中活性有机磷(moderately labile organic phosphorus,MLOP)包含植酸钙、镁等化合物;稳性有 机磷(nonlabile organic phosphorus,NOP)主要由植酸 铁、铝等化合物以及一些含 P 的螯合物组成.不同 活性有机磷的矿化速率和向上覆水释磷潜力不同.



图 2 有机磷分级流程

Fig. 2 Sequential fractionation scheme for organic P

采样点沉积物理化性质如表1所示. 由表1可知,泗村店干渠南宫闸区域有机质含

量为 5. 53 ~ 7. 21%, 与海河干流地区有机质含量持 平^[18-22]. TP、TOP 和 TIP 的含量分别为1 107. 99 ~ 1 423.57 mg·kg⁻¹、388.39 ~ 668.76 mg·kg⁻¹ 和 713.26~903.01 mg·kg⁻¹.从TOP 含量占TP 的比重 来看,相对于TIP,TOP 明显较低;相对于其他地区 而言,则TOP 含量偏高^[23~25].

表1 沉积物理化性质

Table 1 Characteristics of sediment				
pH	有机质/%	TP∕ mg•kg ⁻¹	TOP∕ mg·kg ⁻¹	TIP∕ mg•kg ⁻¹
7.25~7.44	5. 53 ~ 7. 21	1107.99 ~1423.57	388. 39 ~ 668. 76	713.26 ~903.01

2 结果与分析

2.1 不同环境因素对沉积物有机磷的影响

不同 pH下 TOP/TP 随时间的变化趋势见图 3. pH = 6.5 时, TOP 占 TP 比例介于 31.71% ~ 41.73%之间,在模拟期的前15 d内, TOP/TP 逐步 增加,后15d内逐渐减少并趋于平衡.pH=7.5时, TOP 介于 30.85% ~ 43.29% 之间, 30 d 内基本呈逐 渐减少趋势. pH = 8.5 时, TOP 介于 27.25% ~ 56.31%之间,在0~20 d内变化不大,20~30 d内 表层 0~2 cm 和底层 8~10 cm 先增加后减少,4~6 cm则呈增加趋势.不同温度(15、25、35℃)下 TOP 占 TP 比例分别介于 29.07% ~46.62% 、27.81% ~ 46.62%和34.56%~46.62%, TOP/TP随时间变化 趋势相似,均先减少后缓慢增加并趋于平衡,如图4 所示.在 pH 和温度影响下 TOP 占 TP 比例的范围都 大致介于 25% ~ 55%, 垂直梯度上变化趋势一致. 有机磷矿化随着 pH 的递增而增加,而在温度的影 响下,前10d内随着温度上升而增加,后20d内,则 随着温度上升而减少.





2.2 pH 对沉积物有机磷形态转化的影响

图 5 所示为各有机磷形态在 pH 影响下的变化 趋势.上覆水 pH 为 6.5 时,各有机磷形态占总有机 磷的比例随时间呈现不同的变化趋势,在垂直梯度 上 0 ~ 2 cm、4 ~ 6 cm、8 ~ 10 cm 处活性有机磷





(LOP)占总有机磷的比例范围介于 2.64% ~
18.09%,呈微弱减少趋势,最后趋于平衡至 8%左右;中活性有机磷(MLOP)的比例范围则为 54.69% ~70.16%,其变化趋势为先减少后增加,最后平衡于 67%左右;稳性有机磷(NOP)的比例为 22.35% ~43.35%,呈先增加后减少趋势,垂直分层除 4~6 cm 外,其余在模拟实验后期(15~30 d)始终呈增加 趋势.

pH 模拟值为 7.5 时各形态有机磷占总有机磷 比例变化相对平缓. 从垂直梯度上看,0~2 cm、4~6 cm、8~10 cm 处 LOP/TOP 范围介于 3.62~ 20.61%,表层 0~2 cm 在模拟期(0~15 d)内呈先 增加后减少趋势,然后趋于平衡,而 4~6 cm 和 8~ 10 cm 则基本保持平衡状态. MLOP/TOP 范围介于 53.45%~69.47%,垂直梯度上均呈先减少后增加 趋势,最后趋于平衡.表层 0~2 cm 在第 5 d 达到最 低值 53.45%,4~6 cm 和 8~10 cm 处则均滞后 5 d,在第 10 d 达到最低值 57.95%和 58.71%. NOP 比例为 22.35%~36.02%,呈先增加后减少并趋于 平衡趋势.

pH 模拟值为 8.5 时有机磷形态占总有机磷比 例随时间变化各有不同变化趋势. 在垂直梯度上 0 ~2 cm、4~6 cm、8~10 cm 处 LOP/TOP 的范围介于 1.12%~13.41%,呈现先减少后增加的趋势,最后 平衡于 5% 左右. MLOP/TOP 的范围为 54.25%~ 79.85%,表层 0~2 cm 处在前 15 d 模拟期内基本 不变,然后出现明显差异.4~6 cm 处呈现先减少后 增加趋势,底层 8~10 cm 处则表现为逐渐减少的趋 势. NOP/TOP 的范围介于 16.72%~38.16%,0~2 cm 和 8~10 cm 呈逐渐增加趋势,4~6 cm 则在平稳



图 5 pH 对各有机磷形态矿化的影响 Fig. 5 Impact of pH on mineralization of OP forms

中呈减少趋势.

pH为6.5和8.5时各形态有机磷占总有机磷的比例波动明显高于pH为7.5时,且变化范围基本相似,LOP/TOP介于1%~20%,MLOP/TOP介于50%~80%,NOP/TOP介于15%~45%.同时有机磷形态又呈现出一致的规律性,即3种pH值下

LOP 变化趋势均相对平稳, MLOP 和 NOP 此消彼长的互补趋势明显.

2.3 温度对沉积物有机磷形态转化的影响

有机磷形态在温度影响下的变化过程如图 6 所示.15℃时各有机磷形态占总有机磷的比例随时间呈现不同的变化趋势.LOP 占 TOP 的比例范围介于24.80% ~46.34%,表层 0 ~2 cm 变化平缓,4 ~6 cm 和 8 ~10 cm 呈现先增加后减少的趋势.MLOP/TOP 的变化范围为 43.53% ~55.79%,垂直梯度上 波动剧烈,但是基本上随时间都呈先减少后增加的趋势.NOP/TOP 则介于 14.96% ~22.77%,保持平稳状态.



图6 温度对各有机磷形态矿化的影响

Fig. 6 Impact of themperature on mineralization of OP forms

25℃时各有机磷形态占总有机磷比例随时间变 化幅度较大.LOP/TOP的变化范围介于 23.54% ~ 45.57%,在0~2 cm 和 4~6 cm 处呈增加趋势,在 底层 8~10 cm 处,模拟期前 15 d呈现增加趋势,第 15 d达到最高值 45.57%,后期(15~30 d)则呈递 减趋势. MLOP/TOP 为 38.02% ~ 55.79%, 表层 0 ~ 2 cm 处的变化趋势较平稳, 4 ~ 6 cm 处呈逐渐减少的趋势, 在底层 8 ~ 10 cm 处, 0 ~ 15 d内比例逐渐减少, 第 15 d达到最低值 38.02% 后持续增加. NOP/TOP 则介于 11.41% ~ 22.25% 之间, 逐渐减少后平衡于 18% 左右.

35℃时各有机磷形态占总有机磷比例的变化趋势和 25℃相似,但是波动幅度更加明显.在垂直梯度上 0~2 cm、4~6 cm、8~10 cm 处 LOP 占 TOP 比例范围介于 24.18%~48.04%,呈现先增加后减少最后平衡于 42% 左右,4~6 cm 和 8~10 cm 处出现2 个拐点,分别为 47.05% 和 48.04%. MLOP/TOP 为 35.28%~55.79%,与 LOP/TOP 趋势相反,其变化趋势为先减少然后增加最后平衡于 42% 左右,在4~6 cm 和 8~10 cm 处也分别有 2 个拐点 36.47%和 36.33% 出现. NOP/TOP 则为 13.24%~22.29%,处于平衡状态.

在 15、25、35℃的条件下,各形态有机磷变化幅 度不同,但是变化范围基本相似,LOP/TOP 介于 20 ~50%,MLOP/TOP 介于 35% ~60%,NOP/TOP 介 于 10% ~25%,这种趋势与 pH 相似.有机磷形态转 化也呈现出一定的规律性,即 3 种温度影响下 NOP 变化趋势相对平稳,LOP 和 MLOP 则呈明显的互补 趋势,这与 pH 为外部调节因素时不同.

3 讨论

3.1 pH 对有机磷矿化的影响机制

pH 是影响有机磷矿化的主要因素之一,有机磷 矿化与 pH 呈正相关^[11].本研究发现, pH 不同时, 有 机磷矿化随着 pH 值的升高而加速. 与 pH = 7.5 和 pH=8.5相比,上覆水 pH为6.5时沉积物的有机 磷占总磷的比例呈平缓趋势,在第10d和第20d甚 至出现增加的趋势(见图3),出现这样的变化规律 可能是由于在酸化的环境中, Al3+和 Fe3+的浓度增 加,酸性磷酸酶的数量也随之增加. 虽然 Al³⁺和 Fe³⁺并不直接影响酶的作用,但是在 pH 较低时 Al³⁺和 Fe³⁺会和磷酸盐结合从而阻止酶的水解作 用. pH 在 7 左右时, Fe³⁺可能与溶解的腐殖质反应 将磷绑定在沉积物中^[26],这是图 3 中 pH 为 7.5 时 TOP/TP 波动幅度较小的原因,也是图 5 中各形态 有机磷占总有机磷的比例变化相对平缓的原因.当 沉积物中富含铁和腐殖质时,这个过程将提高沉积 物对有机磷的保持力,从而降低有机磷矿化.在碱性 条件下的有机磷矿化高于中性和酸性.如图3所示,

与 pH = 6.5 和 pH = 7.5 相比, pH = 8.5 时 TOP/TP 下降得最快, 尤其是模拟期第 10~20 d内. 从图 5 可以看出, 当 pH = 8.5 时, 0~2 cm 和 4~6 cm 处的 LOP 由于被矿化而减少, MLOP 相反增加, NOP 则减 少,这可能同 NOP 在碱性条件下转化为 MLOP 有 关. 但是在底层 8~10 cm, 同 0~2 cm 和 4~6 cm 处 刚好相反, 可能是由于距离上覆水较远而 pH 值较 低, MLOP 转化为 NOP. 在高 pH 值条件下, 羟基将和 磷酸盐竞争有机键或者金属-有机键的结合点, 由此 促进了磷的释放. 另外, 通过抑制酸性, 也可以增加 沉积物中微生物的活动, 进而间接促进了有机磷的 矿化过程^[27].

3.2 温度对有机磷矿化的影响机制

温度是影响有机磷矿化的另一个主要因素.有 机磷的矿化随着温度的上升而增加^[12].由图4可以 看出,在不同的温度条件下,模拟期前10d内TOP/ TP均呈现持续下降趋势,然而25℃和35℃时的下 降速率>15℃,说明前10d有机磷被持续矿化, 25℃和35℃的矿化量>15℃.产生这种现象的原因 在于沉积物中的磷酸酶活性随着温度增加而增加, 由植物根部产生的磷酸酶可促使有机磷矿化,从而 在磷循环中起到重要作用.同时,微生物也有通过磷 酸酶矿化有机磷的能力^[28],有机磷能被微生物产生 的有机酸溶解,然后被水解或者在微生物产生的酶 的作用下进行脱磷酸反应.

在模拟实验中后期(第10~30 d内),15℃时 TOP/TP 持续轻微下降,25℃和35℃则持续上升,并 且25℃上升幅度>35℃,说明在后 20d内,15℃条 件下有机磷被持续矿化,25℃和35℃则矿化量下 降,模拟结果同 Ellert 等^[13]的研究结果一致,即在 温度较高的环境下,矿化对温度的反应呈减少趋势. 这是由于随着温度和有机磷矿化量的增加,微生物 的新陈代谢不断加强,不断将无机磷合成磷酸酯 (如磷脂、甘油磷酸盐、卵磷脂和核酸)储存于体内, 另外生长环境中过量的磷可能以多磷酸盐的形式聚 集在细菌和真菌细胞中.

3.3 pH 和温度的综合影响

当 pH 为主要影响因素时 LOP 介于 1% ~ 20%, MLOP 介于 50% ~ 80%, MLOP 和 NOP 的互补趋势明显,随着 pH 的降低,表层 0 ~ 2cm NOP 向 MLOP 的转化量越大(见图 5).在温度为主要影响因素时 LOP 介于 20% ~ 50%, MLOP 介于 35% ~ 60%, LOP 和 MLOP 呈明显的互补趋势,垂直梯度上随着温度的增加转化强度越大,在表层 0 ~ 2cm 均

为 MLOP 向 LOP 转化(见图 6). 从转化强度可以看 出,温度对有机磷矿化的影响强于 pH. 在 pH 和温 度的影响下,尤其是偏酸性和高温条件下,可促进 NOP 向 MLOP 的转化和 MLOP 向 LOP 的转化同步 进行. LOP 矿化分解很快,使其可能成为上覆水中藻 类生长的磷源,潜在影响了富营养化进程.

4 结论

(1) pH 为 6.5、7.5、8.5 时, TOP 占 TP 比例分 别介于 31.71% ~ 41.73%、30.85% ~ 43.29% 和 27.25% ~ 56.31%之间,不同 pH 下 TOP/TP 随时间 有不同变化趋势,酸性条件下抑制有机磷矿化,中性 条件下矿化速率减缓,碱性条件促进有机磷矿化. 15、25、35℃下 TOP 占 TP 比例分别介于 29.07% ~ 46.62%、27.81% ~ 46.62%、34.56% ~ 46.62%, TOP/TP 随时间变化趋势相似,均先减少后缓慢增 加并趋于平衡.在模拟期前期(0~10 d),有机磷矿 化随着温度上升而增加,中后期(第 10~30d)矿化 对温度的反应呈减少趋势.

(2) pH 为 6.5、7.5、8.5 时, LOP/TOP、MLOP/ TOP 和 NOP/TOP 波动范围基本相同,分别介于 1% ~20%、50%~80%、15%~45%, LOP/TOP 相对 平稳, MLOP/TOP 和 NOP/TOP 此消彼长的互补趋 势明显.15、25 和 35℃下, LOP/TOP、MLOP/TOP 和 NOP/TOP 变化范围分别介于 20%~50%、35%~ 60% 和 10%~25%, NOP/TOP 相对平稳, LOP 和 MLOP 则呈明显的互补趋势,这与 pH 为主要影响因 素时不同.温度对有机磷矿化的影响强于 pH.

参考文献:

- [1] 付永清,周易勇.沉积物磷形态的分级分离及其生态学意义
 [J].湖泊科学,1999,11(4):376-381.
- [2] 刘素美,张经. 沉积物中磷的化学提取分析方法[J]. 海洋科学,2001, 25(1):22-25.
- [3] 朱广伟,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.
- [4] 李悦,薛永先. 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,1998, 17(1):15-20.
- [5] Turner B L, Haygarth P M. Phosphorus forms and concentrations in leachate under four grassland soil types [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 1090-1099.
- [6] Shand C A, Smith S. Enzymatic release of phosphate from model substrates and P compounds in soil solution from a peaty podzol
 [J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 24(2): 183-187.
- [7] Whitton B A, Grainger S L J, Hawley G R W, et al. Cell-bound and extracellular phosphatase activities of cyanobacterial isolates
 [J]. Microbial Ecology, 1991, 21(1): 85-98.
- [8] 扈传昱,潘建明.珠江口沉积物中磷的赋存形态[J].海洋环

境科学, 2001,20(4):21-25.

- [9] 唐孟成,朱荫湄.西湖沉积物磷释放影响因子的研究[J].浙 江农业大学学报,1997,23(3):289-292.
- [10] 夏学惠,张灼. 滇池现代沉积物中磷的地球化学及其对环境 影响[J]. 沉积学报,2002,20(3):416-420.
- [11] Harrison A F. Labile organic phosphorus mineralization in relationship to soil properties [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982, 14(4): 343-351.
- [12] Acquaye D K. Some significance of soil organic phosphorus mineralization in the phosphorus nutrition of cocoa in Ghana[J].
 Plant and Soil, 1963, 19(1): 65-80.
- [13] Ellert B H, Bettany J R. Temperature dependence of net nitrogen and sulfur mineralization [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(4): 1133-1141.
- [14] Frossard E, Condron L M, Oberson, A, et al. Processes governing phosphorus availability in temperate soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1): 15-23.
- [15] Pierzynski G. Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters [M]. North Carolina State University, 2000. 54-59.
- [16] 孙娟,阮晓红.引调清水改善南京城市内河水环境效应研究[J].中国农村水利水电,2008,(3):29-31.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.30-34.
- [18] 孟凡德,姜霞,金相灿.长江中下游湖泊沉积物理化性质研究[J].环境科学研究,2004,17(增刊): 24-30.
- [19] Zhou A, Tang H, Wang D. Phosphorus adsorption on natural

sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition [J]. Water Research, 2005, 39(7): 1245-1254.

- [20] 杨洪,易朝路,谢平,等.武汉东湖沉积物碳氮磷垂向分布研 究[J].地球化学,2004, 33(5):507-514.
- [21] 薛联青, 吕锡武, 吴磊. 湖水-沉积物界面内源物质交换动态复 水模拟研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(2):189-192.
- [22] 安敏,黄岁樑.海河干流表层沉积物总磷,总铁和有机质的含量及相关性分析[J].环境科学研究,2007,20(3):63-67.
- [23] 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[J].农业环境科学学报,2007,26(4):1207-1213.
- [24] 金相灿, 庞燕, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖沉积物磷形态 及其分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 279-285.
- [25] 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[J].生态与农村环境学报,2007,23(1):43-47.
- [26] Francko D A. Epilimnetic phosphorus cycling: Influence of humic materials and iron on coexisting major mechanisms [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1986, 43 (2):302-310.
- [27] Pant H K, Reddy K R, Dierberg F E. Bioavailability of organic phosphorus in a submerged aquatic vegetation-dominated treatment wetland [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(5):1748.
- [28] Tarafdar J C, Rao A V, Bala K. Production of phosphatates by fungi isolated from desert soils [J]. Folia Microbiologica, 1988, 33(6): 453-457.