

太湖人工恢复湿地区植物群落建植对 沉积物中氮、磷空间分布的影响

黄玉洁¹, 张银龙¹, 李海东², 孙雅辉¹, 张波¹, 杨均科¹

(1. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 南京 210037; 2. 环境保护部 南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要:采用地统计学与 GIS 相结合的方法,以太湖百渚港湿地植被恢复区为研究区,研究了人工湿地植物群落沉积物中全氮、全磷和有效磷的空间分布特征,阐明了不同植物群落建植对氮、磷的拦截、沉积作用效果,以期为太湖水污染控制和湿地环境保护与修复提供科学依据。结果表明:(1)研究区全氮变化范围为 0.37~5.42 g/kg,全磷为 1.01~9.06 g/kg,有效磷为 150~760 mg/kg,全氮、全磷和有效磷都存在空间上中等程度的变异性。(2)芦苇群落对氮和磷的拦截、沉积效果最好,香蒲群落、茭草群落、荷花群落以及沉水植物群落由于受植物密度、分布位置以及自身生物学等因素的影响,表现出一定的差异性,但都强于分布植物较少的对照区。

关键词:植物群落; 沉积物; 氮、磷; 空间分布; 太湖

中图分类号:S153.6⁺1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)05-0161-05

Influence of Plant Community in Artificial Wetland on Spatial Distribution of N, P in the Sediments of Taihu Lake

HUANG Yu-jie¹, ZHANG Yin-long¹, LI Hai-dong², SUN Ya-hui¹, ZHANG Bo¹, YANG Jun-ke¹

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: Using geostatistical and GIS methods, a case study on the wetland plant community area in the Baidu port of Taihu lake was conducted to examine the artificial plant community for influence of spatial distribution of total nitrogen(TN), total phosphorus(TP) and available phosphorus(AP) in the sediments. Interception and sedimentation effect of the different plant communities was illustrated to provide the scientific basis on Taihu Lake water pollution control and wetland environment protection and restoration. The results showed: (1)in the studied area, variation scopes of TN, TP and AP were 0.37~5.42 g/kg, 1.01~9.06 g/kg and 150~760 mg/kg, respectively. They all had moderate variability in the space. (2)*Phragmites australis* community was the best for effect of intercept and sediment for N, P. *Typha latifolia* community, *Zizania caduciflora* community, *Nelumbo nucifera* community and the submerged plant community were different because of density, area of distribution and original biology characteristics. But they were the better than the contrasted area.

Key words: plant community; sediment; N and P; spatial distribution; Taihu Lake

水体富营养化是一种水体衰老现象,系指氮、磷等植物性营养物大量进入湖泊、海湾等相对封闭、水流缓慢的水体,引起藻类和其它水生植物大量繁殖,水体透明度和溶解氧下降,水质恶化,水生生物大量死亡,水体生态系统和水功能受到阻碍和破坏的现

象^[1-3]。国内外学者对高等水生植物净化富营养化水体进行了大量研究^[4-9],结果显示,高等水生植物能够大量吸收水体中的氮、磷营养物质,能有效地净化富营养化水体,有助于水体生态系统恢复正常的功能。

太湖流域随着工农业生产的迅速发展以及城市

收稿日期:2011-02-15

修回日期:2011-05-31

资助项目:江苏省环保科研项目:太湖竺山湾太滆运河河口湿地修复及其环境效应研究(2008013);江苏省高校自然科学研究重大项目(09KJA180002);林业公益性科研专项(200904001-3)

作者简介:黄玉洁(1982—),女,江苏无锡人,博士研究生,主要研究方向为湿地生态及环境评价。E-mail:yujie2004_h@yahoo.com.cn

通信作者:张银龙(1963—),男,浙江绍兴人,教授,主要研究方向为湿地生态学、生态环境规划与评价。E-mail:yinlongzhang@yahoo.com.cn

化进程的加快,大量含有氮、磷等营养元素工业废水和生活污水直接排入到河流、湖泊中去,使得藻类大量繁殖,造成水体富营养化。湖泊湿地在物质循环、净化水质、降解环境污染、调节气候等方面,具有其它生态系统不可替代的作用^[10-11]。实践证明,人工湿地植物在净化受污染水体,恢复和重建湿地生态系统已经获得了广泛共识。已有文献对沉积物中的氮、磷含量进行了报道、研究^[12-16],结果表明:湿地植物的茎叶可减小水流速度,降低水的输送能力,进而将氮、磷元素通过促淤效应沉积于底泥中,其经化学和生物学过程转化,最终被植物吸收、储存起来;沉积物中氮、磷含量的高低往往与湿地植物类型、密度和生物量密切相关。因此,研究不同湿地植物群落的建植对氮、磷的拦截、沉积作用效果,对太湖流域湿地植被恢复工程建设和水体富营养化防治具有重要意义。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

太湖为我国第三大淡水湖,位于长江下游地区($33^{\circ}55'42''-31^{\circ}33'50''N$, $119^{\circ}53'45''-120^{\circ}36'15''E$),全流域面积 36 900 km²,属亚热带季风气候区,四季分明,雨水丰沛,热量充裕,多年平均气温 15~17℃,降水量 1 177 mm。

研究区位于太湖百渎港,是太湖西北角上唯一的河港,其周边城区和乡镇工厂遍布,大量工业废水、生活污水排入其中,经监测上游太滪运河属于劣 V 类水质^[17],是研究区外源污染物输入的主要通道。2005 年当地政府针对水域污染问题实施了湿地植被恢复工程,工程先进行了一定程度的清淤,后以芦苇(*Phragmites australis*)、茭草(*Zizania caduciflora*)、香蒲(*Typha latifolia*)、荷花(*Nelumbo nucifera*)和沉水植物作为建群种,植物群落从西南向东北大体分布依次为:沉水植物群落、香蒲群落、茭草群落、芦苇群落和荷花群落,并在植物群落周围设置了木桩消浪带,使区域内除河口位置外水流比较平缓,对植物的生长起到很好的保护作用。经过几年后现已基本形成稳定的湿地植物群落,芦苇群落平均高度为 2.8 m,平均生物量(鲜重)4.70 kg/m²,茭草群落平均高度为 1.6 m,平均生物量 3.26 kg/m²,香蒲群落平均高度为 2.3 m,平均生物量 3.68 kg/m²,荷花群落平均高度为 1.3 m,平均生物量 1.25 kg/m²,沉水植物包括马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)、菹草(*Potamogeton crispus*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)等,平均生物量 1.13 kg/m²。

1.2 研究方法

于 2009 年 7 月,在湿地植被建植区(由于植物比较茂密,一些区域难以进入,只能粗略勾绘出采样点的植被分布情况),采用 GPS 定位共设 58 个采样点(图 1),样点的布设充分考虑到湿地植物的类型、群落的分布情况,使各个群落内的采样点基本上能代表该区域沉积物的状况。其中,芦苇群落共有 26 个采样点(样点号为 1—5,16—18,31—32,35—40,44—47,52—56,58),茭草群落共有 10 个采样点(样点号为 6—9,26—28,49—50,57);香蒲群落共有 5 个采样点(样点号为 10—13,48),荷花群落共有 7 个采样点(样点号为 14—15,33—34,41—43),沉水植物群落共有 7 个采样点(样点号为 19—22,29—30,51);并在分布少量植物的开阔水面设 3 个采样点(样点号为 23—25)作为对照区。

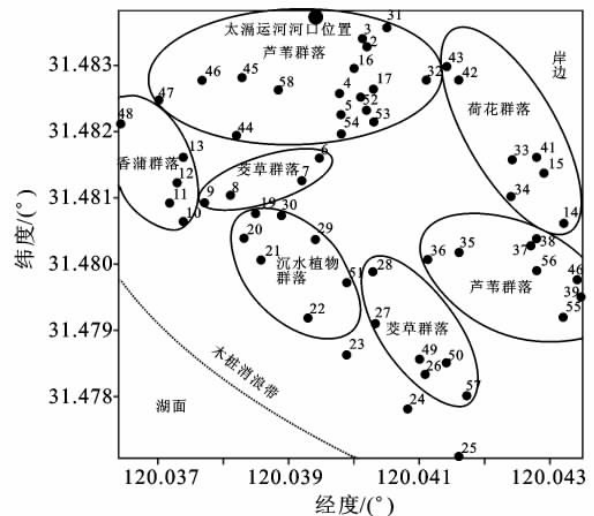


图 1 太湖百渎港采样点分布

用直径 10 cm 的 PVC 塑料管采集湿地上层 10 cm 的沉积物,样品带回实验室,所有样品经风干、剔除杂质、研磨和过筛后,用于测定沉积物的全氮、全磷和有效磷。其中,全氮采用半微量凯氏法;全磷采用硫酸—高氯酸混合酸做消化剂,钼锑抗比色法测定全磷含量;有效磷采用碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定^[18]。

数据处理主要采用地统计学方法的克里格(Kriging)插值法,Kriging 插值方法是利用原始数据和半方差函数的结构性,对未采样点的区域化变量进行最优无偏估值^[19-20]。

2 结果与分析

2.1 沉积物中氮、磷经典统计特征

研究区沉积物中全氮、全磷和有效磷含量的经典描述性统计见表 1,可以看出,全氮、全磷和有效磷含量变化范围分别为 0.37~5.42 g/kg,1.01~9.06 g/

kg,150~760 mg/kg,最大值分别是最小值的 14.65 倍、8.97 倍和 5.07 倍,差异较大。全氮平均值和中值相差较大,全磷和有效磷相差较小,有效磷均值和中值几乎相等。从变异系数来看,全氮变异系数为 79.5%,远大于全磷(33.8%)和有效磷(28.5%),按照变异系数的划分等级:弱变异性, $C_v < 10\%$;中等变异性, $C_v = 10\% \sim 100\%$;强变异性, $C_v > 100\%$ ^[20];全氮、全磷和有效磷均表现为中等程度的变异性。

从统计平均值来看,研究区全氮的平均值为 1.25 g/kg,低于加拿大安大略省环境和能源部发布的具有严重级别生态风险效应沉积物中全氮浓度(4.80 g/kg)^[21],最大值为 5.42 g/kg 也低于富营养化严重的滇池沉积物中全氮的最高值(9.10 g/kg)^[22],可见沉积物中全氮含量不是很高,同时亦表

明湿地水体氮素的富营养化程度也不是特别严重。全磷和有效磷的平均值分别为 5.32 g/kg 和 420 mg/kg,根据加拿大安大略省环境和能源部发布的沉积物中能引起最低级别生态毒性效应的全磷浓度及具有严重级别生态毒性效应的全磷浓度标准(分别为 0.6 g/kg 和 2.0 g/kg)^[23],本研究全磷的平均值远超过严重级别生态毒性效应的浓度,全磷的最小值也高于最低级别生态毒性效应的浓度,全磷变化范围亦比其他非富营养化湖泊沉积物中全磷的变化范围高得多(洱海 0.74~1.60 g/kg^[24]、瓦埠湖 0.29~0.87 g/kg^[25]、梁子湖 0.635~0.824 g/kg^[26]),可见沉积物中全磷含量很高,同时亦表明湿地水体磷素的富营养化程度特别严重。从全氮和全磷在沉积物中的含量来看,其主要来源于外源输入,且对水体的富营养化状况全磷的贡献要比全氮大。

表 1 沉积物中全氮、全磷和有效磷的描述性统计

变量	最小值	最大值	均值	中值	标准	变异 系数 $C_v/\%$	偏度	峰度	KS ₁		KS ₂	
									Z_1	P 值	Z_2	P 值
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.37	5.42	1.25	0.98	0.099	79.5	2.886	8.072	2.420	0.000	1.318	0.062
全磷/(g·kg ⁻¹)	1.01	9.06	5.32	5.60	0.180	33.8	-0.361	-0.137	0.629	0.823		
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	150	760	420	420	0.012	28.5	0.115	0.738	0.559	0.913		

2.2 正态分布性检验及半方差函数分析

数据的正态分布性是使用地统计学方法进行空间分析的前提,为了检验这些实验数据是否符合地统计学插值条件,采用偏斜度法和非参数 Kolmogorov—Smirnov(K—S)正态分布检验概率对全氮、全磷和有效磷进行正态分布检验(见表 1),对不符合正态分布的变量数据进行对数转换后再进行检验。全氮的偏度系数绝对值大于 1,具有偏态趋势。经 K—S 检验,全氮不能满足正态分布的要求,全磷和有效磷均为正态分布形式。对全氮含量进行对数转换后继续检验,达到正态分布的要求。

半方差函数模型的选择是对沉积物全氮、全磷和有效磷空间变异结构分析的关键,采用 GS+ 软件进行半方差理论函数模型选择,经比对不同模型产生的 R^2 、RSS 等参数,分别选择球状模型、指数模型为全

氮、全磷和有效磷的半方差函数理论模型,见表 2。按照区域化变量空间相关性程度的分级标准,当 $C_0/(C_0+C) < 25\%$,表明变量的空间变异以结构性变异为主,变量具有强烈的空间相关性;在 $25\% \sim 75\%$ 之间,说明变量具有中等程度的空间相关性;当比值 $> 75\%$ 时,表明变量以随机性变异为主,变量的空间相关性很弱;如果比值接近于 1,则说明变量在整个尺度上具有恒定的变异^[27]。由表 2 可以看出,全氮的 $C_0/(C_0+C)$ 值为 20.10%,小于 25%,说明结构性因素对其空间变异分布影响较大。全磷和有效磷的 $C_0/(C_0+C)$ 分别为 42.31%和 37.97%,在 $25\% \sim 75\%$ 之间,表明全磷和有效磷含量的空间分布具有中等程度空间相关性,随机效应与结构效应相接近。决定系数 R^2 较大、残差 RSS 较小表明半方差函数理论模型拟合效果较好,适合于采用 Kriging 局部内插法进行空间预测。

表 2 全氮、全磷和有效磷的半方差函数理论模型及其相关参数

项目	理论模型	块金值	基台值	$C_0/(C_0+C)(\%)$	变程	决定系数 R^2	残差 RSS
全氮	指数模型	0.0269	0.1338	20.10	0.0369	0.593	9.362E-4
全磷	指数模型	0.0242	0.0572	42.31	0.036	0.358	2.350E-4
有效磷	球状模型	0.0000978	0.0002576	37.97	0.0147	0.784	1.951E-9

2.3 沉积物中氮、磷空间分布特征

选择上述半方差模型及相关参数,根据有限的空间采样点,运用 Kriging 插值方法对未抽取样点的氮、磷含量进行最优无偏估计,绘制出研究区全氮、全

磷和有效磷空间插值分布图(图 2)。

研究区沉积物中全氮含量自南向北逐渐增加,低值出现在西南部,高值出现在西北部,并形成了几个比较明显的岛状高值区域(见图 2a),以 45、46、58 号

采样点和 31,52 号采样点周边区域最高,其次为 17,52,53 号和 35,37,56,55 号采样点周边区域,最低区域主要分布在 23,24,25 号采样点周边。太漏运河河口位于 1 号采样点附近,该点附近全氮含量并不是最高,因此处水流较快,不利于元素的沉积,而在离河口稍远,水流变平缓的 45,46,58 号和 31,52 号采样点周边的芦苇群落分布区域含量最高;同时分布着芦苇群落的 35,55,56 号采样点周边区域,离河口位置较远,全氮含量却明显高于离河口较近的其他群落分布区,但低于位于河口附近的芦苇群落分布区;由此可以得出影响研究区全氮含量的主要因素有两个,一是湿地植物群落与河口(污染源)的位置关系,靠近河口的植物能先拦截、沉积外源污染物,对比图 1 中茭草群落的两个分布区域也能验证了此结论,离河口较近的茭草群落区大于离河口远的茭草群落区;二是湿地植物的类型,芦苇相比其他几种植物,其茎叶茂密、根系发达、生物量大,这就使芦苇群落对全氮的拦截、沉积能力最强,进而造成研究区芦苇群落沉积物中全氮

含量整体最高。荷花群落分布区与离河口位置较近的茭草群落分布区域(6—9 号采样点周边区域)含量大体相当,高于香蒲群落、沉水植物群落分布区和离河口位置较远的茭草群落分布区域(26—28 号、49—50 号采样点周边区域),后三者之间区分的不是很明显,这都是植物密度、分布位置及自身生物学等因素综合作用的结果。对照区植物较少,拦截、沉积效果差,且离河口最远,其含量自然最低。

全磷总体分布与全氮具有一定的相似性,从西南向东北先增加后降低,在芦苇群落分布区达到最高,之后在荷花群落分布区又有所降低;最高值也形成两个岛状区域,分别是 4,5,18,54 号采样点落在的西北部岛状区域和 35,36,56 号采样点落在的东南部岛状区域;最低值主要在 24,25 号两采样点周边区域(见图 2b)。由此可见,湿地植物对全磷的拦截、沉积效果最好的仍是芦苇群落,其次茭草群落。全氮和全磷分布情况的基本一致性,反映了湿地植物对沉积物中氮、磷含量高低作用原理的共性。

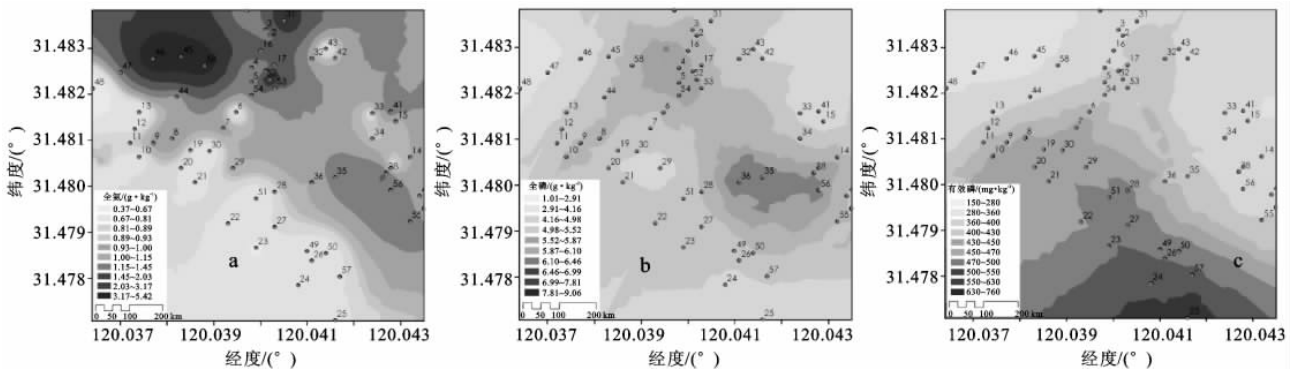


图 2 研究区沉积物全氮、全磷和有效磷插值分布

有效磷在空间分布上与全氮和全磷相差较大,基本趋于相反的方向,从南向北成金字塔形依次减少,高值出现在 23,24,25 号采样点周边区域(见图 2c)。有效磷与全磷、全氮相关分析结果表明,全磷和有效磷在 $\alpha=0.01$ 的水平上具有极显著负相关,相关系数为 -0.316 ,说明有效磷随着全磷的增加而逐渐减少。结合湿地植物分布情况,从茭草群落、沉水植物群落、香蒲群落、芦苇群落到荷花群落有效磷含量大体依次减少,对照区最高。分析原因,有效磷是可被植物吸收的磷组分,在全磷中的比例很小,对照区植物分布较少,对有效磷的吸收能力很弱,有效磷占全磷的比例较大,致使该区含量最高;湿地植物群落分布区全磷含量较高,并且植物根际微生物很活跃,对磷的活化作用也很强,但采样正值植物生长最旺盛的 7 月份,处于对有效磷吸收最强的时期,因此致使湿地植物群落分布区低于对照区。特别是芦苇群落分布区,

全磷含量最高而有效磷较低,说明芦苇群落对有效磷的吸收能力最强。

3 讨论

通过上述分析,人工湿地植物群落的建植明显增大沉积物中氮、磷的含量,湿地植物通过拦截、沉积作用,将氮、磷聚集促积在沉积物中,再经生物和化学转化过程,主要是微生物的降解作用,转化成能够被植物吸收的组分,最后储存在植物体中,起到净化水环境的功能。但氮、磷被拦截、沉积并被吸收、储存到植物体后,并不能保证其就可以从水体中去除,首先,在植物生长周期过程中,凋落、腐烂的代谢体将被吸收氮、磷重新释放到水体中,最终会被再次沉积到沉积物中,通过调查发现,自湿地植被恢复工程以来,一直未对植物进行过收获,这就造成了研究区氮、磷在沉积物中一直处于积累状态;其次,当氮、磷含量超过

临界饱和值时,沉积物反而作为内源污染源,会将它们释放到水体中,引起水体的富营养化。所以,及时更新、收获湿地植物,源源不断地把氮、磷元素转移出湿地,并采取疏浚清理沉积物的方式是防止水体再次被污染的重要措施,这样才能达到最终净化湿地水体,恢复湿地生态功能的目的。

4 结论

(1)全氮、全磷和有效磷含量的变化范围分别为 0.37~5.42 g/kg, 1.01~9.06 g/kg 和 150~760 mg/kg, 差异较大,在空间上均呈中等程度的变异性。沉积物中氮素含量相对不是特别高,全氮平均值为 1.25 g/kg。磷素含量相对很高,全磷平均值为 1.25 g/kg,有效磷平均值为 420 mg/kg。

(2)全氮自南向北逐渐增加,低值出现在西南部,高值出现在西北部;全磷从西南向东北先增加后降低,总体分布与全氮基本一致,说明了湿地植物对氮、磷含量高低作用原理的共性;有效磷分布与全氮和全磷相差较大,基本趋于相反的方向,从南向北成金字塔形依次减少。

(3)人工湿地植物群落的建植明显增大了沉积物中氮、磷含量,芦苇群落对氮、磷的拦截、沉积、吸收作用最强,茭草群落、香蒲群落、荷花群落和沉水植物群落由于受分布密度、位置以及自身生物学等因素的影响,表现出一定的差异性,但都优于对照区。

参考文献:

- [1] 高建平,王珊玲. 水体富营养化评价和防治的一些进展[J]. 农村生态环境,1989(3):55-60.
- [2] 古滨河. 美国 Apopka 湖的富营养化及其生态修复[J]. 湖泊科学,2005,17(1):1-8.
- [3] 史丹. 我国湖泊富营养化问题及防治对策[J]. 资源开发与市场,2005,21(1):17.
- [4] Holland D. Down the riverside[J]. Landscape Design, 2002,11:65-67.
- [5] 谢建华,杨华. 不同植物对富营养化水体净化的静态试验研究[J]. 工业安全与环保,2006,32(6):23-25.
- [6] Robyn A O, David L P. The uptake of uranium by *Eleocharis dulcis* (Chinese water chestnut) in the Ranger Uranium Mine constructed wetland filter[J]. Environmental Pollution,2004,132:307-320.
- [7] Groudeva V I, Groudev S N, Doycheva A S. Bioremediation of waters contaminated with crude oil and toxic heavy metals[J]. International Journal of Mineral Processing,2001,62:293-299.
- [8] Todd L I, Lawrence A R. Nitrate removal in wetland microcosms[J]. Water Research,1998,32(3):677-684.
- [9] 孔繁翔. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报,2005,25(3):589-595.
- [10] 万晓红,周怀东,刘玲花,等. 白洋淀湖泊湿地中氮素分布的初步研究[J]. 水土保持学报,2008,22(2):166-169.
- [11] van Hees P A W, Jones D L, Nyberg L, et al. Modeling low molecular weight organic acid dynamics in forest soils[J]. Soil Biology & Biochemistry,2005,37:517-531.
- [12] 朱元荣,张润宇,吴丰昌. 滇池沉积物生物有效性氮和磷的分布及相互关系[J]. 环境科学研究,2010,23(1):993-998.
- [13] 李文朝. 东太湖水生植物的促淤效应与磷的沉积[J]. 环境科学,1997,18(3):11-13.
- [14] Luijn F V, Boers P C M, Lijklema L, et al. Nitrogen fluxes and processes in sandy and muddy sediments from a shallow lake[J]. Water Research,1999,33(1):33-42.
- [15] Sundby B, Gobeil C, Silberberg N. The phosphorcycle in coastal marine sediment [J]. Limnology and Oceanography,1992,37(6):1129-1145.
- [16] 熊汉锋,谭启玲,王运华. 梁子湖沉积物中氮磷分布特征研究[J]. 华中农业大学学报,2008,27(2):235-238.
- [17] 孙卫红,张利民,刘伟京,等. 漕桥河区域水环境质量现状分析[J]. 环境科学与管理,2009,34(1):48-51.
- [18] 刘焱. 中国林业标准汇编(营造林卷)[M]. 北京:中国标准出版社,1998.
- [19] 雷志栋,杨诗秀,许志荣,等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报,1985(9):10-21.
- [20] 李海东,张波,沈渭寿,等. 苏南山丘区小流域土壤养分特性空间分布[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(9):831-835.
- [21] 陈永川,汤利,张德刚,等. 滇池沉积物总氮的时空变化特征研究[J]. 土壤,2007,39(6):879-883.
- [22] 岳维忠,黄小平,孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. 海洋与湖沼,2007,38(2):111-116.
- [23] 孙惠民,何江,高兴东,等. 乌梁素海沉积物中全磷的分布特征[J]. 沉积学报,2006,24(14):579-584.
- [24] 王雨春,此里能布,马根连,等. 洱海沉积物磷的化学赋存形态研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(2):150-154.
- [25] 潘成荣,李凌,叶琳琳,等. 瓦埠湖沉积物中氮与磷赋存形态分析[J]. 水资源保护,2007,23(4):10-14.
- [26] 熊汉锋,陈治平,黄世宽,等. 梁子湖水体 P 的季节变化与沉积物 P 释放初步研究[J]. 湿地科学,2006,4(3):174-178.
- [27] 郑海龙,陈杰,邓文靖,等. 城市边缘带土壤重金属空间变异及其污染评价[J]. 土壤学报,2006,43(1):40-44.