

28 条环太湖河流沉积物氮的分布特征

许梦爽^{1,2}, 卢少勇^{2*}, 黄国忠¹, 金相灿², 王 强^{1,2}, 王 佩², 陈 丽²

(1.北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2.中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊环境研究中心, 湖泊工程技术中心, 北京 100012)

摘 要:测定了太湖流域不同污染控制区中 28 条主要环湖河流河口处表层 0~10 cm 沉积物中氨氮(NH₃-N)、硝氮(NO₃-N)、有机氮(Org-N)及总氮(TN)含量,揭示氮的空间分布并分析各形态氮之间的相关性。结果表明,环湖河流表层沉积物中 TN 含量由高到低依次为东部污染控制区>北部区>湖西区>浙西污染控制区,平均 958.70 mg·kg⁻¹,且以东部污染控制区中吴淞河口最高,污染最重。NH₃-N 含量远高于 NO₃-N,平均 200.29 mg·kg⁻¹;Org-N 含量及分布与 TN 相似,平均 758.40 mg·kg⁻¹,占 TN 的 39.27%~95.12%。NH₃-N 是可交换态氮(EN)的主要存在形式,Org-N 是沉积物中氮的主导形态,沉积物中 TN 只有极少部分在成岩过程中发生矿化。

关键词:太湖;河流;沉积物;氮;分布特征

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)07-1381-06

Distribution Characteristics of Nitrogen in Sediments of 28 Rivers Around Tai Lake, China

XU Meng-shuang^{1,2}, LU Shao-yong^{2*}, HUANG Guo-zhong¹, JIN Xiang-can², WANG Qiang^{1,2}, WANG Pei², CHEN Li²

(1.Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2.Engineering and Technology Centre of Lake, Research Centre of Lake Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to reveal spatial distribution characteristics of nitrogen in the surface(0~10 cm) sediments of 28 main rivers in different pollution regions around Tai Lake, the content of ammonia nitrogen(NH₃-N), nitrate nitrogen(NO₃-N), organic nitrogen(Org-N) and total nitrogen(TN) of these surface sediments samples were determined. The correlation of various nitrogen forms has also been analyzed. The results showed that the content of TN from high to low in order was: eastern pollution control region>northern pollution control region>pollution control region of western Tai Lake>pollution control region of western Zhejiang Province, which was 958.70 mg·kg⁻¹ in average. The highest content of TN was located in Wulou River in eastern pollution control region, with the most serious pollution problem. The average content of NH₃-N and Org-N were 200.29 mg·kg⁻¹ and 758.40 mg·kg⁻¹ respectively. The content and distribution of Org-N were very similar with TN, accounting for 39.27% to 95.12% of it. Org-N was the dominant form of nitrogen in sediments. That only a very small part of TN in sediments could be mineralized during diagenesis has also been proved.

Keywords: Tai Lake; river; sediments; nitrogen; distribution characteristics

太湖是我国第三大淡水湖泊,水域面积 2 338 km²,流域总面积 3.65×10⁴ km²,地处长江三角洲平原,沪、宁、杭三角带中心,在区域和社会经济发展中有举足轻重的地位^[1]。但近年来,随着流域经济迅速发展,

环太湖河流水质均有不同程度恶化^[2-3]。资料表明,环太湖河流 200 多条,其中,江苏省 15 条主要入湖河流的污染负荷占太湖流域江苏部分入湖污染总负荷的 80%以上^[4]。河流作为氮磷等的主要输入通道,其所携污染物综合体现了受纳湖泊的外源污染^[5],未经处理的工业废水、生活污水及污水处理厂排水流经河道后入湖,与湖水混合,导致河口附近区域成为氮磷等的汇;同时,部分污染物沉积下来,形成湖泊潜在的内部污染源^[6-8],在有效控制外源的情况下,沉积物中的氮磷等在条件合适时仍能释放。

收稿日期:2011-09-28

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-001,2009ZX07101-009);国家高技术研究发展计划项目(2005AA60101005)

作者简介:许梦爽(1987—),女,河南固始人,硕士研究生,主要从事水环境生态修复研究。E-mail:xumengshuang@163.com

* 通讯作者:卢少勇 E-mail:lushy2000@163.com

氮是水生生态系统新陈代谢必不可少的元素,也是引起湖泊富营养化的重要元素之一^[9-11]。沉积物中氮形态研究始于20世纪60年代,氮赋存形态和含量直接影响沉积物-水体系统中氮的地球化学循环及其环境质量状况^[12]。含氮污染物经河口入湖,通过在沉积物-水界面的吸附沉积、矿化(氨化)、硝化和反硝化等系列复杂的生物地球化学作用分布在沉积物、间隙水和上覆水中,并以多种形式参与水体生物过程^[9,13]。目前,已展开许多结合环太湖河流水质及沉积物磷形态研究^[14-17],但对于河流沉积物中氮形态的研究少见报道,特别是环太湖河流沉积物中氮形态研究。本文分析了环太湖28条河流沉积物各形态氮的含量及空间分布特征,分析了环太湖主要河流沉积物的总体特征,可供相关研究借鉴。

1 材料与方法

1.1 采样点的布设与样品采集

综合考虑环保、水利等部门对太湖流域的划分,结合行政区将太湖流域分为北部重污染控制区、湖西重污染控制区、浙西污染控制区、南部污染控制区和东部污染控制区5个区,下文简称北部区、湖西区、浙西区、南部区和东部区^[17]。

2010年7—8月,实地考察环太湖28条主要河流(麦哲伦315型定位仪导航定位,具体分布见图1)。在

各河口处用彼得森采泥器采集表层(0~10 cm)沉积物样,现场混匀后装入洁净的聚乙烯自封袋中密封,运回实验室处理分析。其中,太滬运河、直湖港、武进港、望虞河位于北部区;沙塘港、烧香港、殷村港、漕桥河、社渚港、官渚港、洪巷港、大浦港、陈东港、乌溪港、大港河位于湖西区;大钱港、小梅港、长兜港、杨家埠港、合溪新港、长兴港、濮湊、幻湊位于浙西区;金墅港、浒光运河、胥江、太浦河、吴淞位于东部区。南部太浦区因与太湖大堤不直接相连,故未调查此区内河流。

1.2 样品处理与分析

所采沉积物样,部分测定氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)(KCl提-钠氏试剂比色法)和硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)(饱和硫酸钙提取-紫外分光光度法),剩余样品经冷冻干燥机干燥后去除杂质,再经玛瑙研钵研磨后过100目尼龙筛,测定总氮(TN)(半微量凯氏定氮法)。因半微量凯氏定氮法测定的TN中基本不包含固定态铵及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和亚硝态氮($\text{NO}_2\text{-N}$),故有机氮(Org-N)含量用TN与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的差值表示。具体方法见文献[18]。

2 结果与分析

2.1 环太湖河流表层沉积物总氮的分布特征

环太湖河流及不同分区河流表层沉积物TN含量及空间分布分别见图2和图3。

不同河流TN含量不同且空间分布差异显著,其



图1 环太湖河流采样点分布图

Figure 1 Location of sampling sites in the rivers around Tai Lake

变化范围为 287.23~2 881.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均 958.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),最高值位于东部区的吴淞河口处(图 2),根据课题组现场调研情况可知,该河道竹笼、竹箱、网箱养殖太湖大闸蟹,为提高产量而投放复合饲料及粪便,因此导致大量氮进入河道不能有效输出,河口底泥中 TN 含量显著增加。

结合表 1,不同污染控制区的 TN 含量差异明显。

其中,北部区含量介于 308.23~2 364.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间,平均 1 027.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,含量由高到低依次为直湖港>望虞河>太滬运河>武进港;湖西区 TN 含量介于 287.23~1 613.85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间,平均 882.12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,由高到低为殷村港>漕桥河>陈东港>沙塘港>官渎港>社渎港>大港河>大浦港>乌溪港>烧香港>洪巷港;浙西区 TN 含量介于 385.03~1 597.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间,平均

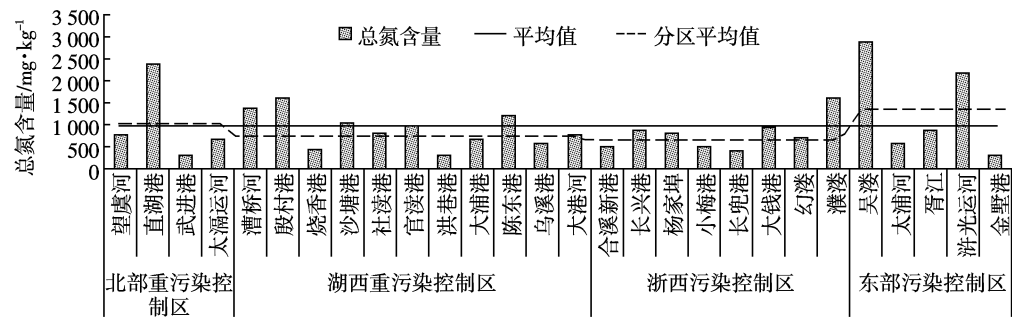


图 2 环太湖河流表层沉积物总氮含量及空间分布

Figure 2 Content and distribution of TN in the surface sediments of rivers around Tai Lake

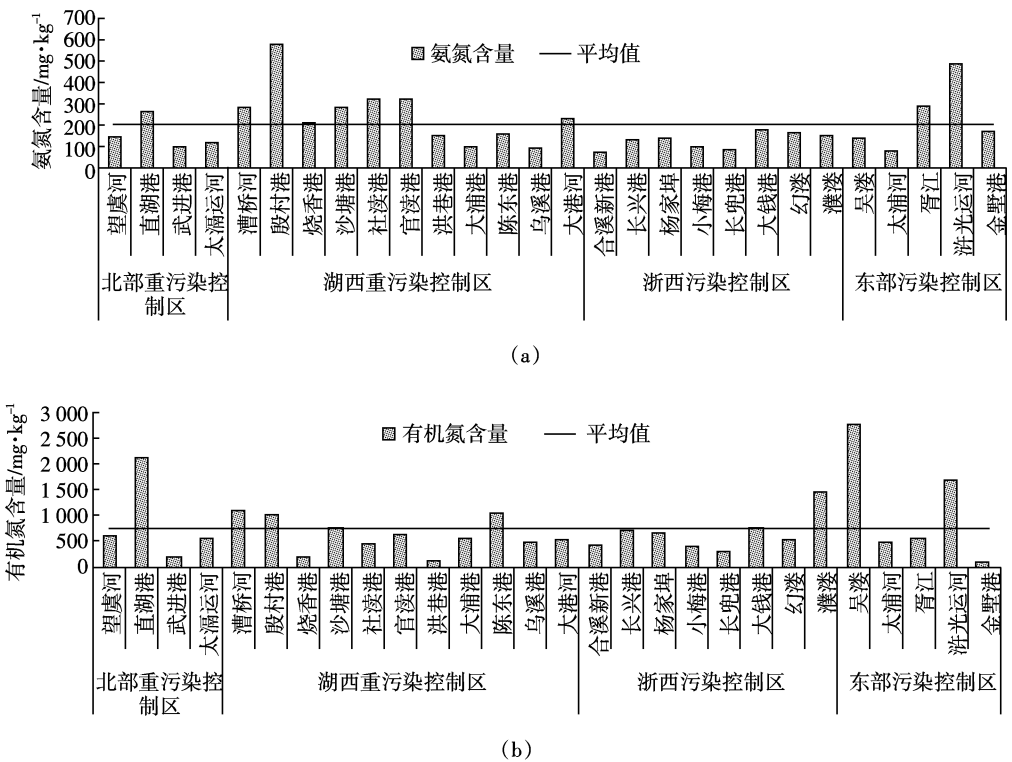


图 3 环太湖河流表层沉积物氨氮和有机氮含量及空间分布

Figure 3 Content and distribution of total nitrogen and ammonia in the surface sediments of rivers around Tai Lake

表 1 不同污染控制区河流表层沉积物 TN 含量

Table 1 Content and distribution of TN in the surface sediments of rivers in different pollution regions

控制区	北部区	湖西区	浙西区	东部区
总氮含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1 027.69±912.36	882.12±405.22	782.18±382.10	1 354.40±1 120.91

782.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,由高到低为濮淙>大钱港>长兴港>杨家埠>幻淙>小梅港>合溪新港>长兜港;东部区 TN 含量介于 288.90~2 881.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间,均值最高达 1 354.40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,污染程度由高到低依次为吴淞>浒光运河>胥江>太浦河>金墅港。

据美国 EPA^[19]中沉积物 TN 污染评价标准,太湖东部区与北部区内河流表层沉积物 TN 平均含量均超过 1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,达中污染水平;而湖西区与浙西区河流沉积物 TN 平均含量低于 1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属轻度污染水平。

袁旭音等^[20]研究表明,太湖沉积物和湖岸土壤具相似物质组成,相同物源,通过补给区的径流,营养元素和重金属元素随土壤入湖。根据课题组同期监测结果,东部子流域土壤中 TN 平均为 1 459.82 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,北部子流域土壤中 TN 平均为 2 026.66 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均高于河口沉积物。说明土壤中氮随补给区径流入湖,并在河口沉积,近年来东太湖湖区内水生植物繁盛,不少植物死后沉入湖底;多年来种植业大强度及不合理的施肥导致该区域土壤 TN 含量高^[21],土壤中氮会随入湖河流进入湖体^[20],因此该区河流沉积物中 TN 含量高。这说明太湖河流沉积物 TN 分布与湖泊区域特点和人类活动密切相关,与文献[22]研究结果基本一致。

2.2 环太湖河流表层沉积物各形态氮的分布特征

可交换态氮(EN)是沉积物氮的较“活跃”部分^[23],包括 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 。是沉积物-水界面交换最频繁的形态、湖泊初级生产力的直接氮源,在沉积物氮循环中扮演重要角色。因为 $\text{NO}_2\text{-N}$ 是硝化反硝化反应中间体,极不稳定,所以沉积物中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量通常很低可忽略^[24],本文只研究环太湖河流表层沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及 Org-N。各形态氮含量及空间分布见图 3。

结合图 3(a)可知,各河沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量介于 75.14~586.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间,平均 200.29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这与采样季节相关,7、8 月研究区温度高促进微生物活性而死藻量多,加快沉积物中 Org-N 矿化再生,使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量较高^[25]。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 最低和最高值分别位于浙西区的合溪新港和湖西区的殷村港,且湖西区内河流表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量普遍较高。据调查,该区内种植业发达,农田多建于河道及湖荡边,因排水分散、氮污染削减路径较短、湿地水质净化功能降低等造成传统农业污染排放较大^[26-27],大量氮沉积于河口底泥。

据图 3(b),环太湖河流表层沉积物 Org-N 含量

介于 113.46~2 740.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间,平均 758.40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于 EN 含量,空间分布与 TN 相似。结合图 2,Org-N 占 TN 的 39.27%~95.12%,平均 75.01%,可见 Org-N 为环太湖河流沉积物中的主要氮形式,沉积物中 TN 极少在成岩中矿化,与文献[28-29]一致。Org-N 含量和其所占 TN 的质量分数均以东部区吴淞河最高,说明目前养殖业等污染对沉积物中氮含量增加有重要影响。

3 结论

(1)环太湖河流表层沉积物 TN 分布差异显著,变化范围为 287.23~2 881.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 958.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,吴淞河口最高。不同区 TN 含量由高到低依次为东部区>北部区>湖西区>浙西区,东部区和北部区均已达中污染水平,沉积物 TN 分布与区域特点和人类活动密切相关。

(2)环太湖河流表层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量远高于 $\text{NO}_3\text{-N}$,介于 75.14~586.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间,平均 200.29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其最低和最高值分别位于浙西区的合溪新港和湖西区的殷村港;Org-N 含量及分布与 TN 相似,变化范围为 113.46~2 740.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均 758.40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TN 的 39.27%~95.12%,其含量和所占 TN 的质量分数均以东部区的吴淞河口最高,说明在有效控制工业排放等外源情况下,必须合理发展种植业及养殖业,防止大量营养物质沉积于河口。

(3) $\text{NH}_3\text{-N}$ 是 EN 的主要存在形式,Org-N 是沉积物中氮的主导形态,而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 受沉积环境影响较大,沉积物中 TN 仅极少部分在成岩过程中矿化。

参考文献:

- [1] 焦伟,卢少勇,李光德,等.环太湖主要进出河流重金属污染及其生态风险评价[J].应用与环境生物学报,2010,16(4):577-580.
JIAO Wei, LU Shao-yong, LI Guang-de, et al. Heavy metal pollution of main inflow and outflow rivers around the Taihu Lake and assessment of its potential ecological risk[J]. *China J Appl Environ Biol*, 2010, 16(4): 577-580.
- [2] 余辉,燕姝雯,徐军.太湖出入湖河流水质多元统计分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(6):696-702.
YU Hui, YAN Shu-wen, XU Jun. Multivariate statistical analysis of water quality in the inflow and outflow rivers of Lake Taihu[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(6): 696-702.
- [3] Zhou F, Liu Y, Guo H. Application of multivariate statistical methods to water quality assessment of the water courses in Northwestern New Territories, Hong Kong [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*,

- 2007, 132:1-13.
- [4] 张利民, 孙卫红, 程 炜, 等. 太湖入湖河流水环境综合治理[J]. 环境监测管理与技术, 2009, 21(5):1-5.
ZHANG Li-min, SUN Wei-hong, CHENG Wei, et al. Overall treatment of water environment for inflow rivers of Lake Taihu[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2009, 21(5):1-5.
- [5] 金相灿. 中国湖泊环境(第二册)[M]. 北京:海洋出版社, 1995.
JIN Xiang-can. Lake environment in China (Volume II)[M]. Beijing: Ocean Press, 1995.
- [6] 金相灿, 辛玮光, 卢少勇, 等. 入湖污染河流对受纳湖湾水质的影响[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4):52-56.
JIN Xiang-can, XIN Wei-guang, LU Shao-yong, et al. Effect of polluted inflow river on water quality of Lake Bay[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(4):52-56.
- [7] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
JIN Xiang-can, LIU Hong-liang, TU Qing-ying, et al. Lake eutrophication in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [8] 金相灿, 徐南妮, 张雨田, 等. 沉积物污染化学[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1992.
JIN Xiang-can, XU Nan-ni, ZHANG Yu-tian, et al. Sediment pollution chemistry[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992.
- [9] 王毛兰, 艾永平, 周文斌. 鄱阳湖三江口柱状沉积物氮的垂直分布特征[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(36):18086-18088.
WANG Mao-lan, AI Yong-ping, ZHOU Wen-bin. Vertical distribution characteristic of nitrogen in the core sediments of three rivers estuary in Poyang Lake[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2009, 37(36):18086-18088.
- [10] Camargo J A, Alvaro A. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen in aquatic ecosystem: A global assessment[J]. *Environment International*, 2006, 32(6):831-849.
- [11] 楼台方, 夏中明. 氮与水质富营养化[J]. 化肥设计, 1996, 34(5):61-62.
LOU Tai-fang, XIA Zhong-ming. Nitrogen and water eutrophication[J]. *Chemical Fertilizer Design*, 1996, 34(5):61-62.
- [12] 叶琳琳, 潘成荣, 张之源, 等. 瓦埠湖沉积物氮的赋存特征以及环境因子对 NH_4^+-N 释放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5):1333-1336.
YE Lin-lin, PAN Chen-rong, ZHANG Zhi-yuan, et al. Characteristics of N forms in Wabu Lake sediments and effects of environmental factors on NH_4^+-N release[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1333-1336.
- [13] Jansson M, Andersson R, Berggren H. 湿地和湖泊: 氮的储集库[J]. *AMBIO-人类环境杂志*, 1994, 25(6):320-325.
Jansson M, Andersson R, Berggren H. Wetland and lake: Storehouse of nitrogen accumulation[J]. *AMBIO-Human Environmental Magazine*, 1994, 25(6):320-325.
- [14] 郑 一, 王学军, 江耀慈, 等. 环太湖河道水质与入湖污染物负荷量估算[J]. 地理学与国土研究, 2001, 17(1):40-44.
ZHENG Yi, WANG Xue-jun, JIANG Yao-ci, et al. Analysis on water quality of river around Tai Lake and estimation of total pollutant load into Tai Lake[J]. *Geography and Territorial Research*, 2001, 17(1):40-44.
- [15] 张 路, 范成新, 池俏俏, 等. 太湖及其主要入湖河道沉积物磷形态分布研究[J]. 地球化学, 2004, 33(4):423-431.
ZHANG Lu, FAN Cheng-xin, CHI Qiao-qiao, et al. Phosphorus species distribution of sediments in Lake Taihu and its main inflow rivers[J]. *Geochimica*, 2004, 33(4):423-431.
- [16] 翟淑华, 张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000—2002年)[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3):225-230.
ZHAI Shu-hua, ZHANG Hong-ju. Water quality and waste load variation of rivers around Lake Taihu From 2000 to 2002[J]. *J Lake Sci*, 2006, 18(3):225-230.
- [17] 卢少勇, 焦 伟, 王 强, 等. 环太湖河流水质时空分布特征研究[J]. 环境科学研究, 2011, 24(11):1220-1225.
LU Shao-yong, JIAO Wei, WANG Qiang, et al. Spatial-temporal distribution characteristics of water quality of rivers around Taihu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(11):1220-1225.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000.
- [19] A guidance manual to support the assessment of contaminated sediments in freshwater ecosystems[P]. US EPA, 2002.
- [20] 袁旭音, 陈 骏, 季峻峰, 等. 太湖沉积物和湖岸土壤的污染元素特征及环境变化效应[J]. 沉积学报, 2002, 20(3):427-434.
YUAN Xu-yin, CHEN Jun, JI Jun-feng, et al. Characteristics and environmental changes of pollution elements in Taihu Lake sediments and soils near the lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(3):427-434.
- [21] 赵彦峰, 史学正, 黄 标, 等. 太湖流域 20 年来的施肥变化与土壤属性演变: 以无锡为例[J]. 土壤通报, 2009, 40(2):297-301.
ZHAO Yan-feng, SHI Xue-zheng, HUANG Biao, et al. The fertilizer application and soil properties evolution in Taihu Lake Region during last 20 years: A case study of Wuxi[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(2):297-301.
- [22] 丁 静. 太湖氮磷分布特征及其吸附-解吸特征研究[D]. 南京:南京理工大学, 2010.
DING Jing. Studies on distribution of nitrogen and phosphorus and their adsorption/desorption characteristics in Taihu Lake[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010.
- [23] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态氮的赋存特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(1):37-43.
WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, JIN Xiang-can, et al. Distribution of total exchangeable and fixed nitrogen in the sediments from shallow lakes in them middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(1):37-43.
- [24] 王雨春, 万国江, 尹澄清, 等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定态氮的赋存特征[J]. 湖泊科学, 2002, 14(4):301-309.
WANG Yu-chun, WAN Guo-jiang, YIN Cheng-qing, et al. Distribution of total exchangeable and fixed nitrogen in the sediments of two lakes in Guizhou Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(4):301-309.

- [25] 孟春红, 赵冰. 东湖沉积物中氮磷形态分布的研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7):1831-1837.
MENG Chun-hong, ZHAO Bing. Vertical distribution of species of nitrogen and phosphorus in the sediments of Donghu Lake[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(7):1831-1837.
- [26] 江苏省统计局. 江苏统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
Statistics Information Network of Jiangsu. Jiangsu statistical yearbook [Z]. Beijing: China Statistics Press, 2008.
- [27] 许梅, 任瑞丽, 刘茂松. 太湖入湖河流水质指标的年变化规律[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, 31(6):121-124.
XU Mei, REN Rui-li, LIU Mao-song. Annual changes of water quality in an upstream river of Taihu Lake[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 2007, 31(6):121-124.
- [28] 吴丰昌, 万国江, 黄荣贵. 湖泊沉积物-水界面营养元素的生物地球化学作用和环境效应: I. 界面氮循环及其环境效应[J]. 矿物学报, 1996, 16(4):403-409.
WU Feng-chang, WAN Guo-jiang, HUANG Rong-gui. Biogeochemical processes of nutrition elements at the sediment-water interface of lakes: I. Nitrogen cycling and its environmental impacts[J]. *Acta Mineralogical Sinica*, 1996, 16(4):403-409.
- [29] 张彦, 张远, 于涛, 等. 太湖沉积物及孔隙水中氮的时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2010, 23(11):1333-1342.
ZHANG Yan, ZHANG Yuan, YU Tao, et al. Spatial and temporal distribution of nitrogen species in sediment and interstitial waters of Taihu Lake[J]. *Research Environmental Sciences*, 2010, 23(11):1333-1342.