

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究 ..... 吴起鑫, 韩贵琳 (2145)

成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建 ..... 岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)

太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析 ..... 饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)

环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征 ..... 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)

南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布 ..... 张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)

青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征 ..... 刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)

城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性 ..... 邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)

基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算 ..... 陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)

浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究 ..... 高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)

福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析 ..... 李雪丁 (2210)

HSPF 水文水质模型应用研究综述 ..... 李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)

城市降雨径流模拟的参数不确定性分析 ..... 黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)

利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度 ..... 姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)

嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定 ..... 谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)

重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价 ..... 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)

南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究 ..... 郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)

宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究 ..... 邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)

影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析 ..... 丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)

大型底栖动物生物评价指数比较与应用 ..... 耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)

青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征 ..... 王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)

青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征 ..... 郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)

用物理-生态集成技术局部控制富营养化 ..... 李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)

太湖氮素出入湖通量与自净能力研究 ..... 陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)

富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应 ..... 袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)

巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究 ..... 温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)

南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究 ..... 方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)

东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究 ..... 林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)

嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征 ..... 蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)

电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源 ..... 王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)

基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究 ..... 李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)

渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响 ..... 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)

崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价 ..... 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)

白洋淀底泥重金属形态及竖向分布 ..... 李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)

西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究 ..... 刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)

氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制 ..... 刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)

Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性 ..... 张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)

声电氧化处理扑热息痛的研究 ..... 戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)

粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究 ..... 白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)

利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究 ..... 张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)

Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究 ..... 王小蓉, 吴平霄 (2432)

核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究 ..... 武国正, 徐宗学 (2438)

A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究 ..... 翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)

系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究 ..... 蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)

氧化还原介体催化强化 *Paracoccus versutus* 菌株 GW1 反硝化特性研究 ..... 李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)

1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析 ..... 刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)

蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化 ..... 秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)

双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放特征及品种筛选研究 ..... 傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄璜 (2475)

闽江河口短叶茳芰湿地 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放对氮输入的短期响应 ..... 牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)

青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征 ..... 彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)

不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律 ..... 吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)

土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响 ..... 吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)

多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应 ..... 潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)

不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究 ..... 梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)

废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究 ..... 伊元荣, 韩敏芳 (2522)

中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析 ..... 卢愿清, 史军 (2528)

《环境科学》征稿简则(2431) 《环境科学》征订启事(2532) 信息(2157, 2271, 2367, 2418)

# 太湖氮素出入湖通量与自净能力研究

陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕\*

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210046)

**摘要:** 为了探索太湖氮素迁移转化过程, 对 2009~2010 水文年环太湖 25 条主要河流及太湖梅梁湾、东太湖等典型区域的各种形态氮素进行分析, 并利用太湖出入湖水量、蓝藻人工打捞量和鱼产量等相关数据, 分析计算太湖氮素流动和转化潜力. 结果表明太湖全年河道输入氮素总量约  $7.00 \times 10^4$  t, 河道出湖氮素总量约  $4.01 \times 10^4$  t. 整个水文年中, 太湖氮素自净量约  $3.22 \times 10^4$  t, 其中反硝化约  $3.02 \times 10^4$  t, 沉积物吸附约  $0.20 \times 10^4$  t. 在反硝化潜力上, 太湖西湖区(如梅梁湾)反硝化潜力远高于东部湖区(如东太湖), 而夏季太湖反硝化潜力又高于其它季节. 因此, 太湖氮素自净作用在湖泊氮素迁移转化中发挥重要作用.

**关键词:** 太湖; 氮素; 环湖河道; 通量; 自净能力; 反硝化作用

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2309-06

## Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu

CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, LIU Tao, YANG Liu-yan

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** The various forms of nitrogen in 25 rivers surrounding Lake Taihu as well as in some typical lake zones such as Meiliang Bay and East Lake Taihu were analyzed during the hydrological year of 2009-2010. Furthermore, the nitrogenous self-purification capacity of Lake Taihu was studied in combined with the investigation of water flow, cyanobacteria salvages and aquatic product outputs. In the whole hydrological year, the inflow and outflow fluxes of total nitrogen (TN) were  $7.00 \times 10^4$  t and  $4.01 \times 10^4$  t, respectively. About  $3.02 \times 10^4$  t and  $0.20 \times 10^4$  t nitrogen in water body were removed by denitrification and sediment adsorption during this hydrological year, respectively, suggesting a strong nitrogen self-purification capacity of Lake Taihu. The potential denitrification is stronger in western Lake Taihu (e.g., Meiliang Bay) than that in eastern Lake Taihu (e.g., East Lake Taihu), and is stronger in summer than that in other seasons. Thus, the nitrogenous self-purification capacity plays an important role in nitrogenous transference and transformation in Lake Taihu.

**Key words:** Lake Taihu; nitrogen; surrounding river; flux; self-purification; denitrification

太湖是我国五大淡水湖泊之一, 具有供水、防洪抗旱、旅游、养殖、航运等多种功能, 但是随着社会发展, 太湖富营养化程度从中营养-中富营养转变为富营养, 并频繁出现大规模的蓝藻水华<sup>[1]</sup>. 为使太湖流域社会经济与水环境保护协调发展, 有效保护太湖水环境, 国内学者对太湖的氮素环境容量进行了大量研究<sup>[2~4]</sup>. 在环境容量的计算中, 湖泊氮素自净能力或自净系数的率定一直是一个难点. 目前, 氮素自净系数主要通过室内实验和野外模拟等方法测定, 或利用数学模型、经验公式进行估算<sup>[5]</sup>. 但是氮素生物地球化学循环是一个包括物理、化学和生物的复杂过程, 这一过程与水体中微生物、藻类和高等水生植物等的种类及数量密切相关<sup>[6]</sup>, 因此这些率定方法难于真实反映湖泊, 尤其是大型湖泊中氮素的自净能力.

本研究对 2009~2010 水文年中环太湖 25 条主要河流及太湖梅梁湾、东太湖等典型区域中氮素年变化进行分析, 并结合太湖出入湖水量、蓝藻人工打捞量和鱼产量等调查, 探索太湖氮素出入湖通量和

水体自净能力.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

太湖流域地形以平原为主, 河道众多, 与湖体相通的河(港)达 224 条, 其中陈东港入湖水量最大, 而太浦河则是湖水最主要的出湖通道<sup>[7]</sup>. 梅梁湾是太湖接纳污染比较严重的区域, 也是藻华易暴发区域, 该区域直接承纳直湖港和武进港等河流中氮素输入, 而东太湖水深较浅, 水草茂盛, 是典型的草型湖区. 本文选择环太湖流量较大的 25 条河流和太湖梅梁湾、东太湖等典型区域进行研究, 分析太湖氮素出入湖通量和自净能力(图 1).

收稿日期: 2011-09-16; 修订日期: 2011-12-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001-02); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2008CB418102)

作者简介: 陈小锋, (1975~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湖泊生态学, E-mail: xfchen@yzu.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: yangly@nju.edu.cn

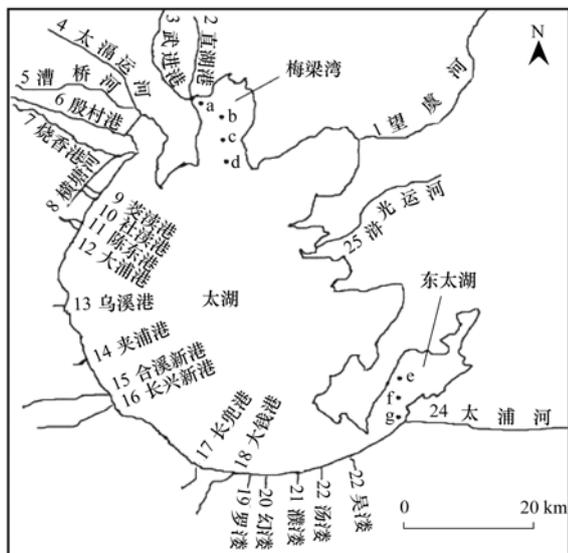


图1 太湖主要环湖河道及典型湖区采样位点示意

Fig. 1 Surrounding rivers of Lake Taihu and the location of sample sites in some typical lake zones

## 1.2 样品采集和分析

分别于2009~2010水文年汛期(7月)、汛后(12月)和汛前(2010年3月)采集太湖主要出入湖河流及特定湖区表层水样(水面下0.5 m)。在藻华暴发期间,收集人工打捞藻类漂浮物,装入洁净的聚碳酸酯袋,同时收集各种鱼类样品。所有样品运到实验室测试前均低温保存。

解剖鱼类样品,收集背部肌肉。将处理过的鱼类样品和已混合均匀的藻类样品冷冻干燥,测定冷冻干燥前后的重量差,计算人工打捞藻类和鱼类样品的含水量。将冷冻干燥后的藻类和鱼类样品磨细后用元素分析仪(德国Elementar Vario MICRO)测定样品中氮素含量。

水样中总氮及各形态氮浓度采用文献[8]方法进行测定,具体为碱性过硫酸钾消解水样,紫外分光光度法测定总氮;紫外分光光度法测定硝氮;纳氏试剂比色法测定氨氮; $N$ -(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定亚硝氮。所有样品平行测定3次,结果以平均值表示。

太湖环湖河道出入湖流量、太湖水容量等数据来自水利部太湖流域管理局2009~2010年各月的《水情月报》,太湖鱼产量等数据来自江苏省海洋与渔业局,蓝藻打捞量数据来自于江苏省水利厅2009年江苏水资源公报。

差异性分析及系统聚类分析均由SPSS 18.0软件得出。环湖河流总氮浓度Q型聚类分析是用平方

Euclidean距离度量样本之间的距离,采用中位数聚类方法生成具有层次结构的聚类树。

## 2 结果与分析

### 2.1 太湖环湖河道氮素输入输出量

太湖西北部为宜兴、武进和无锡市区,这些地区经济发达,工业分布密集,农业集约化程度较高<sup>[9]</sup>,因此该地区入太湖河流中氮污染相当严重,入湖河道总氮浓度在 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右(图2)。出湖河道中总氮浓度在 $0.7 \sim 4.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,显著低于入湖河道总氮含量( $P < 0.01$ )。不同季节下,入湖河流中的总氮浓度没有显著性差异( $P > 0.05$ ),这可能是由于太湖入湖河道来源复杂的各种污染源的综合作用造成。与入湖河道不同,出湖河道总氮浓度在季节上差异显著,具体表现为 $3 \text{月} > 7 \text{月} > 12 \text{月}$ ( $P < 0.01$ )。出湖河道总氮浓度的季节差异性主要由湖泊水质决定,曾庆飞等<sup>[10]</sup>对东太湖水质污染特征进行了研究,发现东太湖水体总氮浓度在2月最高,8月次之,12月最低,这与本研究中出湖河道总氮浓度的季节变化基本一致。

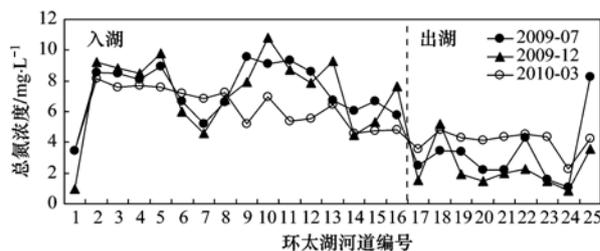


图2 太湖出、入湖河道中总氮浓度变化过程

Fig. 2 Variation of TN concentrations in the surrounding rivers

聚类分析结果(图3)表明,太湖环湖河道按总氮浓度大致可分为3个大类,即总氮浓度高的太湖西部河道、浓度中等的浙江西部河道和浓度低的太湖东、南部河道,该结果与2008~2009年太湖环湖河道水质分类结果基本相同<sup>[11]</sup>。因此,从总氮浓度角度考虑,结合地域因素,可将环太湖河道分为4个区域,即湖西、北区(无锡、常州)、浙西区(长兴县)、杭嘉湖区(湖州)和湖东区(苏州)。其中望虞河是“引江济太”主要河道,其水质好于太湖西部河道,且入湖流量受人为调控,因此参照文献[12]的处理方法,本研究将望虞河列为湖东区。

太湖氮素河道入湖通量计算方法如下:环太湖河道按总氮浓度划分为4个区域,各区域不同时期(汛前、汛期和汛后)氮素输入量为各时期区域内河道的平均总氮浓度与入湖水量的乘积,各区域氮素

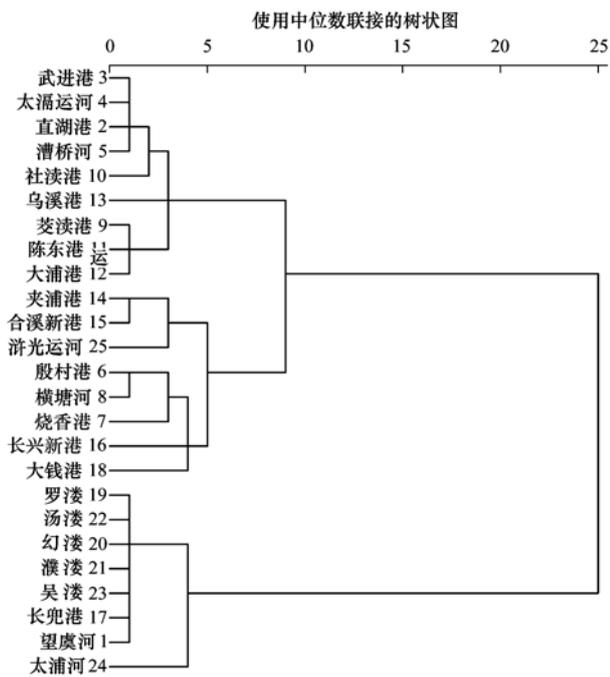


图3 环太湖河道水体总氮数据聚类分析树状图

Fig. 3 Cluster analysis of 25 surrounding rivers of Lake Taihu based on the TN concentrations

表1 太湖出、入湖河道氮素输入输出总量  $\times 10^4/t$ Table 1 Nitrogen fluxes of the Lake Taihu  $\times 10^4/t$ 

地区	汛期(5~9月)		汛后(10~12月)		汛前(1~4月)		全年	
	入湖	出湖	入湖	出湖	入湖	出湖	入湖	出湖
湖西、北区	2.89	0.17	0.76	0.00	1.34	0.20	4.98	0.37
浙西区	0.70	0.27	0.30	0.24	0.58	0.08	1.58	0.59
杭嘉湖区	0.05	0.43	0.00	0.14	0.13	0.24	0.19	0.82
湖东区	0.20	1.03	0.00	0.12	0.06	1.08	0.26	2.23
合计	3.84	1.91	1.06	0.50	2.11	1.61	7.00	4.01

## 2.2 太湖氮素自净能力计算

湖泊的自净能力是指湖泊生态系统通过自然生态过程及物质循环作用,将水体中氮、磷、有机物等富营养物质或有害物质予以吸收、转化、再分配(如进入底泥),从而使水体净化的能力<sup>[16]</sup>.外源输入的氮素从水体中去除主要有3种途径:一是通过常规反硝化或厌氧氨氧化作用生成 $N_2$ 或 $N_2O$ 后从水体去除;二是被沉积物吸附;三是被藻类或者大型水生植物等同化吸收后,随食物链流动,最后部分氮素通过人工方式(鱼类捕捞和蓝藻打捞)输出,前面2个途径属湖泊氮素自净作用.其它输出途径有通过鱼类回游输出、鸟类输出和芦苇等水生植物收割输出等,由于这些途径的氮素输出比例较低,本研究未计,同时也未计通过浅层地下水输移带来的湖泊水体氮素的输入和输出.

整个湖泊水生态系统可近似概括为一个由元素

输入总量为该区域在不同时期的输入量之和,而太湖入湖河道氮素输入总量则为4个区域年输入总量之和.采用同样方法,可计算出氮素河道输出总量.从计算结果(表1)可以看出,太湖全年氮素河道输入总量约 $7.00 \times 10^4 t$ ,通过河道输出 $4.01 \times 10^4 t$ .湖西区 and 浙西区环湖河道是太湖氮素的主要来源,其入湖量分别占河道总输入量的71.2%和22.6%,而湖东区是太湖氮素的主要出口,约占总输出量的55.6%.在入湖河流水流量加大的时期,陆源污染物的带入量也将随之明显增多<sup>[13]</sup>,因此汛期太湖河道氮素通量最大,其氮素入、出湖量分别占总量的54.9%和47.4%.与燕姝雯等<sup>[14]</sup>研究结果相比,环湖河道中总氮浓度变化不大,但入湖水量有较大的差异.2010年1~4月太湖入、出湖水量分别比2009年同期多 $21 \times 10^8 m^3$ 和 $12.2 \times 10^8 m^3$ 左右,而这些入、出湖水量主要由总氮含量较高的湖西及浙西区河道输入、由湖东区排出<sup>[15]</sup>,因此入湖水量的差异可能是2009~2010水文年太湖河道氮素通量远高于2009自然年(入湖 $5.1 \times 10^4 t$ ,出湖 $3.6 \times 10^4 t$ )的主要原因.

输入、同化/矿化、输出等组成的系统.用质量平衡方程,建立外源负荷、水体总量变化、水体自净去除、捕捞输出及河道输出间的定量关系,即:

$$N_I = N_O + N_{SP} + N_C + \Delta N_L \quad (1)$$

式中, $N_I$ 指氮素输入量; $N_O$ 是氮素通过出湖河道流出量; $N_{SP}$ 是湖泊氮素自净量; $N_C$ 是水生生物所含氮素通过人工方法(捕捞或打捞)出湖量; $\Delta N_L$ 为水体氮素年度变化总量.

在大型浅水湖泊富营养化过程研究方面,沉积物的内源负荷量存在争议.秦伯强等<sup>[17]</sup>对太湖沉积物内源营养盐释放模式进行了研究,估算出太湖每年约有 $8 \times 10^4 t$ 氮素从沉积物释放至水体中.逢勇等<sup>[18]</sup>根据太湖沉积物再悬浮通量与风速的相关关系,对太湖年均内源氮素释放量进行估算,结果表明太湖内源氮素只有约 $7700 t \cdot a^{-1}$ .濮培民等<sup>[19]</sup>发现表层底泥间隙水中的营养盐浓度通常比上覆水中浓

度高,但也往往比下层间隙水高,因此认为表层底泥中的营养盐也会向下层底泥释放转移,从而沉积物起到了氮“汇”的作用. 1960年太湖沉积物(50 cm)含氮量约为  $0.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[20]</sup>,而2001~2005年为  $0.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[21]</sup>,这表明太湖沉积物中的氮素含量大约以  $2.1 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$ 的速率在上升,因此在长时间尺度上,沉积物是太湖水体氮素的“汇”. 太湖氮素沉积速率约为  $0.86 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ <sup>[22]</sup>,结合太湖水面面积  $2\,338 \text{ km}^2$ ,可计算出太湖沉积物年均吸附氮素量为  $2\,010 \text{ t}$ 左右.

据调查,2009年太湖人工打捞蓝藻  $60 \times 10^4 \text{ t}$ ,鱼产量  $4.8 \times 10^4 \text{ t}$ ,根据所打捞藻类漂浮物和鱼体氮素含量,可计算出由人工方式(捕捞和打捞)引起的氮素出湖量约  $0.19 \times 10^4 \text{ t}$ (表2). 2009年6月初太湖总氮浓度  $2.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,贮水量  $47.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,

而2010年6月初总氮浓度  $3.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,贮水量  $48.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,因此该水文年中太湖水体总氮增加了约  $0.56 \times 10^4 \text{ t}$ . 大气沉降是湖泊氮素另一大来源,本研究中氮素大气年干湿沉降输入采用杨龙元等<sup>[23]</sup>的研究结果,约  $0.98 \times 10^4 \text{ t}$ . 根据公式(1)可计算得出本水文年中太湖氮素自净总量为  $3.22 \times 10^4 \text{ t}$ ,其中约  $3.02 \times 10^4 \text{ t}$ 通过反硝化过程去除. 太湖主湖区上覆水硝氮浓度为  $1.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时反硝化速率约为  $110 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ <sup>[24]</sup>,而2009~2010年对太湖营养盐进行采样分析时发现,太湖全年平均硝态氮浓度为  $1.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,因此若不计太湖沉积物反硝化速率的空间分布差异,可将该值简单地用于整个太湖,那么整个太湖反硝化去除的氮素潜力约为  $3.15 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ,与公式(1)计算结果(表3)基本吻合.

表2 太湖人工方式(鱼类捕捞和蓝藻打捞)去除氮素量

生物类型	干湿比/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	氮素含量(以干重计)/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	捕捞量/ $10^4 \text{ t}$	氮素输出/ $10^4 \text{ t}$
蓝藻	0.0053	0.124	60	0.04
鱼类	0.24	0.129	4.8	0.15

表3 太湖对外源输入氮素的自净能力

氮源				氮汇			
输入方式	输入量/ $10^4 \text{ t}$	所占质量分数/%	数据来源	输出方式	输出量/ $10^4 \text{ t}$	所占质量分数/%	数据来源
河道输入	7.00	87.7	本研究(表1)	河道输出	4.01	50.3	本研究(表1)
大气沉降	0.98	12.3	[23]	人工输出	0.19	2.4	本研究(表2)
				沉积物吸附	0.20	2.5	[22]
				反硝化去除	3.02	37.8	本研究
				水体增加	0.56	7.0	本研究
合计	7.98	100			7.98	100	

### 2.3 太湖反硝化能力时空差异分析

由表3可看出,该水文年太湖水体中约  $3 \times 10^4 \text{ t}$ 氮素被反硝化作用脱除,远高于沉积物吸附量,因此

反硝化过程是太湖氮素自净最重要的途径. 为研究太湖反硝化能力的时空差异性,对太湖典型湖区不同时期氮素含量进行了采样分析. 图4(a)可看出,

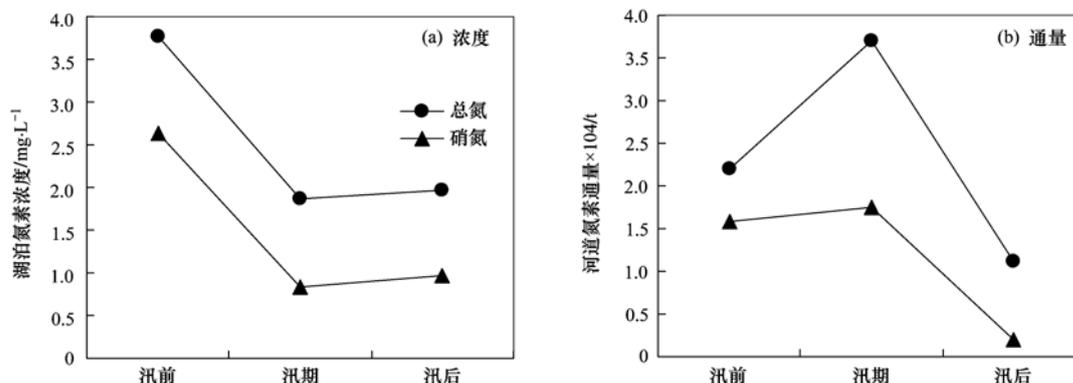


图4 不同时期太湖总氮、硝氮浓度及河道输入通量

Fig. 4 Variation of TN and nitrate concentrations in Lake Taihu and the riverine nitrogen fluxes

湖泊水体总氮和硝态氮的含量在汛前最高,汛期最低. Xu 等<sup>[25]</sup>对此现象进行了分析,认为雨水稀释和浮游植物同化吸收是夏季太湖总氮含量低的最主要原因,而夏季沉积物中反硝化作用只是加速了这一过程.但是汛期河道氮素输入总量远高于汛前和汛后[图 4(b)],因此汛期降雨不能真正对太湖氮素浓度起到稀释作用;另一方面,浮游植物对氮素的同化吸收只是氮素形态的变化,并没有真正地将氮素从水体中脱除,从而浮游植物对氮素的吸收也不能很好地解释夏季水体中总氮浓度下降的原因.因此,反硝化作用可能是夏季太湖总氮和硝态氮浓度降低的最重要原因.

温度是影响反硝化作用的重要环境因素之一,温度上升会加快反硝化速率<sup>[26]</sup>,因此较高的温度促使夏季太湖反硝化速率加快.藻类的存在可促进反硝化作用的进行,例如一些易降解的藻类可为反硝化作用提供大量有机碳源<sup>[27]</sup>;而有些藻类能和反硝化细菌协同作用,提高反硝化速率<sup>[28]</sup>.笔者在测定藻华堆积区水体溶解氧的变化过程时发现,水体在夜间处于极度缺氧状态,在 06:00 时只有约  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,此后溶解氧浓度急剧上升,到中午已达到饱和浓度(图 5).由此推测,在藻华暴发水体中可能存在着一个白天硝化(富氧条件)-夜间反硝化(厌氧条件)的耦合作用,从而大大提高湖泊反硝化速率.因此,藻华暴发可能是太湖夏季反硝化速率较高的另一个重要因素.

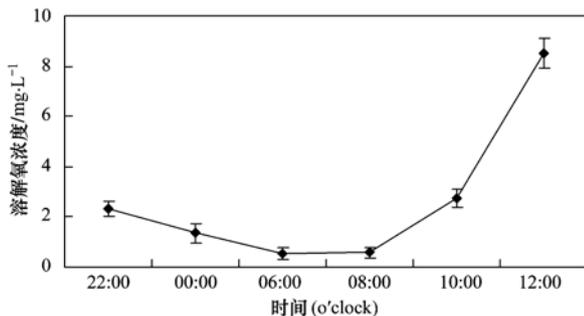


图 5 藻华堆积区溶解氧浓度变化过程(数据为 3 次测定平均值)  
Fig. 5 Variation of the dissolved oxygen in water body with algae covered (data are means  $\pm$  SD,  $n = 3$ )

由图 6 可以看出,在直湖港入湖河口处水体总氮及各形态氮素的浓度最高,且随离河口距离的增加,各种氮浓度不断降低,这表明河道输入的氮素在湖泊中逐渐被稀释或去除.在直湖港及武进港的入湖河口处,亚硝氮浓度相当高,达到  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,表明这些区域存在强烈的硝化或反硝化作用,因此,河口是氮素转化微生物活动最活跃的区域<sup>[29]</sup>.太湖梅

梁湾位点 a 至位点 b,总氮浓度下降了  $2.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,远远高于位点 b、c 或 c、d 间的差值,表明位点 a 至位点 b 是脱氮速率最快的场所,这与 Mccarthy 等<sup>[24]</sup>发现的太湖梅梁湾反硝化速率沿着湖心方向逐渐下降的结论一致.

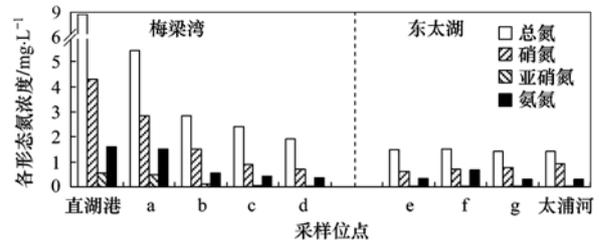


图 6 太湖梅梁湾、东太湖各采样位点总氮及各形态氮年平均浓度  
Fig. 6 Annual average concentrations of various forms of nitrogen in Meiliang Bay and East Taihu

在东太湖,各采样位点间总氮浓度无显著性差异( $P < 0.01$ ),亚硝氮浓度也相当低(图 6),表明东太湖区域反硝化作用相对较低,与曾巾等<sup>[30]</sup>研究结果一致.反硝化过程中,上覆水中硝态氮是反硝化作用中氮素的主要来源,相关研究表明,反硝化速率与上覆水中硝态氮浓度呈显著正相关<sup>[31,32]</sup>,因此,相对较高的硝态氮浓度(图 6)是梅梁湾反硝化速率高于东太湖的最主要原因.

### 3 结论

(1)太湖氮素河道年输入、输出总量约  $7.00 \times 10^4 \text{ t}$  和  $4.01 \times 10^4 \text{ t}$ .

(2)太湖湖西区河道是太湖氮素的主要来源,其氮素输入量占河道总输入通量的 71.2% 左右,而湖东区河道是太湖氮素主要出口,约占河道总输出量的 55.6%.

(3)2009~2010 水文年中,约  $3.22 \times 10^4 \text{ t}$  氮素从太湖水体中去除,其中约  $3.02 \times 10^4 \text{ t}$  氮素是通过反硝化途径去除的,体现出湖泊强大的氮素自净能力.太湖不同湖区、不同季节反硝化潜力存在差异性,需要对氮素自净能力在湖泊氮素迁移转化中的重要作用进行进一步研究.

#### 参考文献:

- [1] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 21-26.
- [2] 宿俊英,刘树坤,何少苓,等. 太湖水环境容量的研究[J]. 水利学报, 1992, 23(11): 22-36.
- [3] 邓小琴. 太湖水域氮、磷环境容量评价[J]. 地质学刊, 2008, 32(3): 249-253.
- [4] 徐前荣,徐其军. 太湖水环境承载力研究[J]. 江西农业学报, 2009, 21(2): 114-118.

- [ 5 ] 刘兰芬, 张祥伟, 夏军. 河流水环境容量预测方法研究[J]. 水利学报, 1998, **29**(7): 16-20.
- [ 6 ] Ostroumov S A. Polyfunctional role of biodiversity in processes leading to water purification: current conceptualizations and concluding remarks[J]. *Hydrobiologia*, 2002, **469**(1-3): 203-204.
- [ 7 ] 郑一, 王学军, 江耀慈, 等. 环太湖河道水质分析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.
- [ 8 ] 国家环保总局. 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.
- [ 9 ] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰. 太湖重金属和营养盐污染特征分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 649-657.
- [ 10 ] 曾庆飞, 谷孝鸿, 周露洪, 等. 东太湖水质污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(8): 1355-1360.
- [ 11 ] 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): 397-702.
- [ 12 ] 许册柱, 秦伯强. 2001~2002 水文年环太湖河道的水量及污染物通量[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(3): 213-218.
- [ 13 ] 逢勇, 颜润润, 李一平, 等. 内外源共同作用对太湖营养盐贡献量研究[J]. 水利学报, 2008, **39**(9): 1051-1059.
- [ 14 ] 燕姝雯, 余辉, 张璐璐, 等. 2009 年环太湖入出湖河流量及污染负荷通量[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 855-862.
- [ 15 ] 水利部太湖流域管理局. 水情月报, 2009-2010. (<http://www.tha.gov.cn>)
- [ 16 ] Vagnetti R, Miana P, Fabris M, *et al.* Self-purification ability of a resurgence stream[J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(10): 1781-1795.
- [ 17 ] 秦伯强, 朱广伟, 张路, 等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法[J]. 中国科学 D 辑, 2005, **35**(Sup. 2): 33-44.
- [ 18 ] 逢勇, 颜润润, 余钟波, 等. 风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2456-2464.
- [ 19 ] 濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? [J]. 湖泊科学, 2000, **12**(3): 269-279.
- [ 20 ] 刘凌, 崔广柏, 王建中. 太湖底泥氮污染分布规律及生态风险[J]. 水利学报, 2005, **36**(8): 900-905.
- [ 21 ] 薛滨, 姚书春, 王苏民, 等. 长江中下游不同类型湖泊沉积物营养盐蓄积变化过程及其原因分析[J]. 第四纪研究, 2007, **27**(1): 122-127.
- [ 22 ] Sun S C, Zhang C. Nitrogen distribution in the lakes and lacustrine of China [ J ]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, **57**(1): 23-31.
- [ 23 ] 杨龙元, 秦伯强, 胡维平, 等. 太湖大气氮、磷营养元素干湿沉降率研究[J]. 海洋与湖沼, 2007, **38**(2): 104-110.
- [ 24 ] Mccarthy M J, Lavrentyev P L, Yang L Y, *et al.* Nitrogen dynamics and microbial food web structure during a summer cyanobacterial bloom in a subtropical, shallow, well-mixed, eutrophic lake (Lake Taihu, China)[J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 195-207.
- [ 25 ] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [ 26 ] Van Kessel J F. Factors affecting the denitrification rate in two water-sediment systems [ J ]. *Water Research*, 1977, **11**(3): 259-267.
- [ 27 ] Sirivedhin T, Gray K A. Factors affecting denitrification rates in experimental wetlands: Field and laboratory studies [ J ]. *Ecological Engineering*, 2006, **26**(2): 167-181.
- [ 28 ] Ishida C K, Arnon S, Peterson C G, *et al.* Influence of algal community structure on denitrification rates in periphyton cultivated on artificial substrata [ J ]. *Microbial Ecology*, 2008, **56**(1): 140-152.
- [ 29 ] Nedwell D B. Estuaries and saltmarshes: the interface between land and sea [ J ]. *Environmental Management and Health*, 1996, **7**(2): 20-23.
- [ 30 ] 曾巾, 杨柳燕, 肖琳, 等. 太湖不同湖区无机氮转化潜力[J]. 生态与农村环境学报, 2008, **24**(1): 63-67.
- [ 31 ] Andersen T K, Jensen M H, Sørensen J. Diurnal variation of nitrogen cycling in coastal, marine sediments [ J ]. *Marine Biology*, 1984, **83**(2): 171-176.
- [ 32 ] Zhong J C, Fan C X, Liu G F, *et al.* Seasonal variation of potential denitrification rates of surface sediment from Meiliang Bay, Taihu Lake, China [ J ]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(7): 961-967.

## CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China .....	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring .....	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements .....	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai .....	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China .....	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao .....	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant .....	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model .....	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i> .....	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years .....	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes .....	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling .....	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake .....	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jiashan .....	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing .....	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China .....	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake .....	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales .....	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-Dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment .....	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau .....	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau .....	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering .....	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu .....	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate .....	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake .....	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing .....	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants .....	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing .....	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area .....	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study .....	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay .....	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming .....	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake .....	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors .....	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Removal in Drinking Water Biofilter .....	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane .....	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation .....	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration .....	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater .....	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN .....	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body .....	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process .....	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System .....	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1 .....	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production .....	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i> .....	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields .....	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary .....	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province .....	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition .....	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils .....	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial .....	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops .....	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid .....	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China .....	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

## 环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年7月15日 33卷 第7期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行