

# 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)

# 南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究

郝敬锋<sup>1</sup>, 刘红玉<sup>1\*</sup>, 胡和兵<sup>1</sup>, 安静<sup>1</sup>, 张小红<sup>1,2</sup>

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京 210046; 2. 湿地国际-中国办事处, 北京 100029)

**摘要:** 选取 28 个受城市化影响程度不同的典型湿地, 对其水质进行连续监测. 另一方面利用 GIS 技术及景观生态学原理对城市湿地所在集水区不透水类型及林地类型进行景观分析, 并构建城市化影响指数 (UEI), 进一步对区域城市化水平与湿地水质进行相关分析. 结果表明: ①南京仙林新市区湿地水质季节性变化表现为夏季水质较差, 冬季水质相对较好, 春、秋季节差别不大. ②湿地水质与城市化水平有着明显的相关关系, 城市化水平等级越高, 湿地水质越差, 其中高等城市化水平 (HU) 湿地 TP、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、Chla 等富营养化指标质量浓度分别达到 0.27、1.07、0.15、17.94 mg·L<sup>-1</sup>, 而低等城市化水平 (LW) 湿地其质量浓度则分别为 0.12、0.56、0.12、4.85 mg·L<sup>-1</sup>. ③城市化影响指数与湿地水质存在着阈值关系, 整体来看, 当 UEI 值超过 2.2 时, 湿地水质恶化速度加快.

**关键词:** 城市化; 城市湿地; 城市化影响指数; 水质; 南京市

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2259-06

## Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China

HAO Jing-feng<sup>1</sup>, LIU Hong-yu<sup>1</sup>, HU He-bing<sup>1</sup>, AN Jing<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-hong<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Wetlands International-China, Beijing 100029, China)

**Abstract:** 28 typical wetlands were selected to monitor the contaminants in water monthly, that influenced by urbanization in different scales. On the other hand, the land use types such as impervious area and forest area in the catchments of urban wetlands were analyzed by GIS and landscape ecology. And then the effects of urbanization index (UEI) was employed to reveal the relationship between urbanization level and water quality in Xianlin New City of Nanjing. Results indicated that: ① the seasonal variations of water quality showed that water quality in summer was worse than those in other seasons, and the water quality in winter was good. However there were no significant differences between the spring and the autumn. ② the relationship was significant between urbanization level and water quality, and the water quality tended to be getting worse when the urbanization level was getting higher. The concentrations of TP, TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, and Chla were 0.27, 1.07, 0.15 and 17.94 mg·L<sup>-1</sup> respectively in the high urbanization (HU) level wetland while the concentrations were 0.12, 0.56, 0.12 and 4.85 mg·L<sup>-1</sup> in the low urbanization (LW) level wetland. ③ there was a threshold between UEI and the water quality. On the whole, the water quality would get worse quickly when the value of UEI exceeded 2.2.

**Key words:** urbanization; urban wetland; effects of urbanization index; water quality; Nanjing

城市湿地在城市生态系统中发挥着重要作用, 尤其在城市污染物的迁移转化、调节城市微气候、涵养城市水源、补给城市地下水及为人类提供休闲娱乐场所等诸方面发挥着重要功能<sup>[1,2]</sup>. 但是, 近年来随着城市化进程的加快, 城市湿地正受到人类的侵占及破坏<sup>[3,4]</sup>, 特别是湿地水质的恶化导致了其各项功能的严重退化<sup>[5,6]</sup>, 为此, 城市湿地水质与城市化关系研究逐渐引起重视, 并成为当今城市化过程中急需解决的重要问题之一<sup>[7-9]</sup>. 目前对于湿地水质的研究一方面通过定点监测来评价湿地水质时间、空间差异特征<sup>[10]</sup>, 另一方面从流域尺度上揭示土地利用、覆盖类型及景观格局与湿地水质之间相关关系<sup>[11-13]</sup>. 而能够直接反映城市化强度与湿地水

质时空分异特征的研究相对较少. 本研究针对城市化特征, 从湿地集水区尺度, 通过构建城市化强度指数, 揭示了城市化与湿地水质之间的响应关系, 以期协调城市发展与湿地生态保护提供科学依据.

### 1 研究区概况

仙林新市区位于江苏省南京市主城以东, 占

收稿日期: 2011-09-07; 修订日期: 2011-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871084); 江苏省高校“青蓝工程”项目(184080H10240); 江苏省 2010 年度研究生科研创新计划项目(CX10B\_388Z); 南京师范大学优秀博士研究生学位论文培育项目(2010bs0038); 江苏省高校优势学科建设工程项目

作者简介: 郝敬锋(1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市湿地景观及其水环境健康, E-mail: haojingfeng365@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: liuhongyu@njnu.edu.cn

地面积约 85 km<sup>2</sup>, 中心点坐标为 118°56'40"E, 32°5'84"N. 2002 年仙林大学城的筹建标志着仙林新市区由一个以农业为主体的模式迈向城市化进程的第一步, 整个新市区区划边界为: 南至沪宁高速公路、北至宁镇公路、西至绕城公路、东至七乡河, 主要由仙鹤、白象、麒麟及青龙这 4 个片区组成(图 1). 区域内湿地资源丰富, 其中七乡河、九乡河穿境而过, 湿地存在形式以湖泊湿地为主. 据 2003 年快鸟影像统计, 在南京仙林新市区建设初期(2003 年)区域内湖泊湿地数量达 2 600 多个, 密

度为 30 个·km<sup>-2</sup>. 受城市化影响, 区域内湖泊湿地形态、功能特征均发生了变化, 其数量也急剧减少, 至 2009 数量减少至原来的 41.2%, 面积减少至原来的 64.8%. 目前南京仙林新市区在城市化过程中对湿地处理主要包括 2 种方式: 一方面对于不需要保留的湿地直接进行填埋, 作为后备的土地资源, 另一方面对需保留的湿地进行开挖、合并、湖底湖岸固化的方式来实现其休闲娱乐功能. 因此在南京仙林新市区快速形成的过程中, 对区域湿地影响较大.

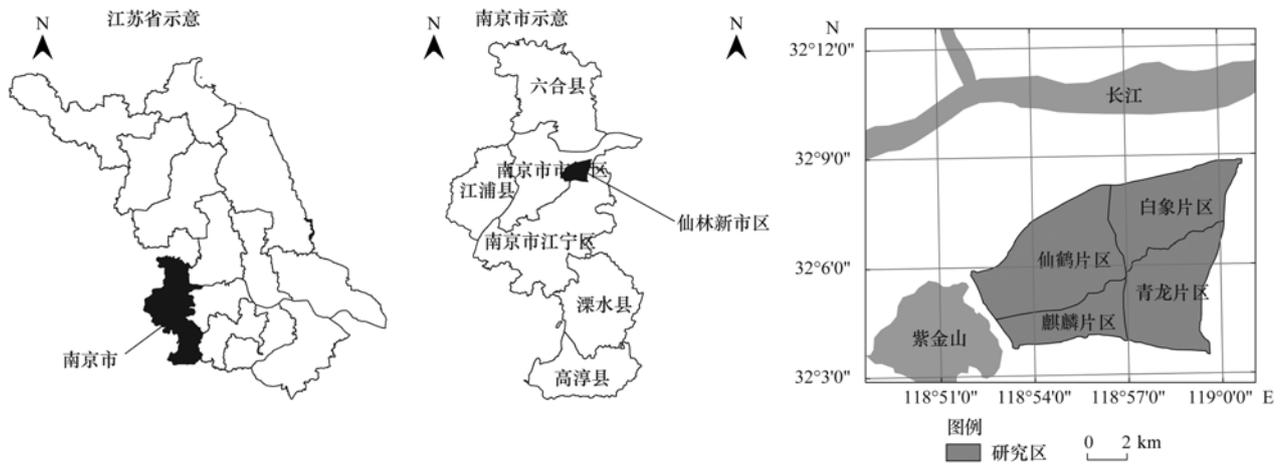


图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of study area

2 数据来源及分析方法

2.1 城市化影响指数构建

城市湿地由于受城市化影响显著而具有区别于自然湿地的显著特征. 本研究选择 28 个典型城市湖泊湿地从集水区尺度特征来确定城市化影响强度, 揭示不同城市化等级状况下的湿地水质季节性变化规律. 相关研究表明城市不透水类型是城市湿地污染物的主要来源, 而林地对城市暴雨径流则有削减作用<sup>[14-17]</sup>, 因此本研究通过对 28 个城市湿地集水区城市不透水面积、林地面积及其形态特征进行分析, 通过构建城市化影响指数(UEI), 对城市湿地所在集水区进行城市化水平划分, 主要划分为高等城市化水平(HU)、中等城市化水平(MU)及低等城市化水平(LU)湿地这 3 个等级. 集水区主要是依靠天然或者人工的分水岭来实现较小区域汇流的累积而被广泛应用于城市湿地景观格局与过程的研究中<sup>[18,19]</sup>, 本研究对集水区的提取是通过南京市 23 m 分辨率 DEM 数据在 ArcGIS 9.2 软件中进行水文分析, 并根据 1:50 000 地形图进行校正, 对于地势较为

平坦地区, 主要是选择湿地周围沟渠、道路等建筑物来对集水区边界进行界定并最终生成与流域产汇流机理相同的水文地理单元. 然后通过与 2009 年区域景观图进行叠加得到集水区景观类型(图 2).

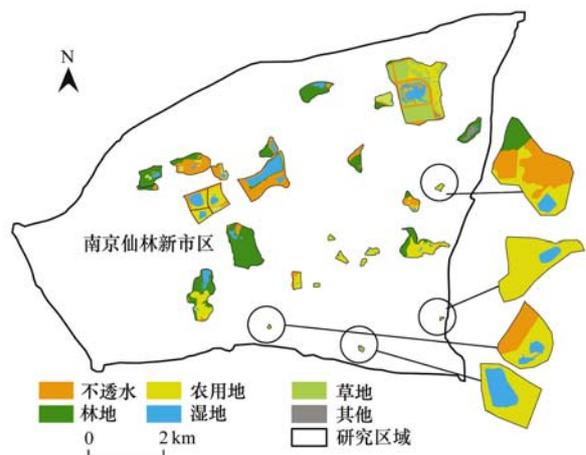


图 2 典型城市湿地集水区景观示意

Fig. 2 Landscape of typical catchments of urban wetlands

相关研究表明流域不透水类型、林地类型及其边界密度对区域内湿地生态系统产生重大影响<sup>[14,20,21]</sup>, 因此在对城市化影响指数进行计算时, 选

择集水区内不透水面积比例、不透水组分边界密度、林地面积比例及其边界密度这 4 个指标,其中景观边界密度在景观分析软件 Fragstats 3.3 的支持下计算得出.接着通过公式(1)、(2)对 4 个指标进行归一化处理.

$$r_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$r_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中, $r_{ij}$ 为标准化后的值, $X_{ij}$ 表示第  $i$  项指标第  $j$  个值, $X_{\max}$ 及  $X_{\min}$ 分别表示该指标的最大值及最小值.其中公式(1)主要用来计算不透水面积比例及其边界密度这种正效影响指标;而公式(2)主要是用于计算林地及其边界密度.然后通过主成分分析法来构建城市化影响指数(UEI)计算模型.在 SPSS 15.0 中通过对 28 个典型样地进行主成分分析,其中巴特利特球度检验相对应的概率  $P = 0.000$ ,KMO 值为 0.672,基本符合因子分析要求.分析结果表明用 2 个主要因子  $F_1$  及  $F_2$  可以综合解释 88.95% 的不透水面积、林地面积比例及其边界密度.具体公式如下:

$$F_1 = 0.51X_e + 0.56X_a + 1.36Y_e + 1.61Y_a \quad (3)$$

$$F_2 = -0.44X_e - 0.49X_a + 1.23Y_e + 1.50Y_a \quad (4)$$

式中, $X_a$ 、 $X_e$ 分别为不透水面积比例及其边界密度,而  $Y_a$ 及  $Y_e$ 表示林地面积比例及其边界密度.最后通过  $F_1$ 及  $F_2$ 的综合模型计算 UEI,即用第一主成分  $F_1$ 中每个指标所对应的系数乘上第一主成分所对应的贡献率再除以所提取 2 个主成分贡献率之和,然后加上第二主成分  $F_2$ 中每个指标所对应的系数乘上第二主成分  $F_2$ 所对应的贡献率再除以所提取 2 个主成分的贡献率之和,即得到城市化影响指数:

$$UEI = 0.089X_e + 0.098X_a + 1.311Y_e + 1.57Y_a \quad (5)$$

根据相关研究结果<sup>[7]</sup>,把不透水面积比例设定为 $[0, 4\%)$ , $[4\%, 20\%)$ , $[20\%, 100\%]$ 为城市化的相关等级,LU 水平, MU 水平及 HU 水平;相应的林地面积比例设定为 $(60, 100]$ , $(20, 60]$ , $(0, 20]$ ;不透水边界密度为 $[0, 30)$ , $[30, 100)$ , $[100, \infty)$ ;林地边界密度为 $(95, \infty)$ , $(15, 95]$ , $(0, 15]$ .进一步对各标准值代入公式(1)、(2)及(5)中进行计算,得出城市化影响强度的标准值: $[0, 1.43)$ 为低等城市化水平标准区间, $[1.43, 2.42)$ 为中等城市化水平区间, $[2.42, \infty)$ 为高等城市化水平区间.

## 2.2 湿地水质监测

选择具有代表性的 28 个城市湿地于 2010 年 3 月~2011 年 2 月对其进行每月水质监测,由于本研究从较小的集水区尺度来揭示城市化过程对水质的影响,因此所选样点内基本无点源污染.主要选取的水质指标有:①富营养化指标主要包括氨氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chla);②反映有机污染类指标包括:高锰酸盐指数、溶解氧(DO);③反映无机盐离子状况指标:电导率、溶解性总固体(TDS).共计 3 种类型 8 个水质指标.一些物理指标如:TDS、电导率、DO 通过便携式多参数水质分析仪(YSI556)测得,具体方法是通过对多参数水质分析仪探头进行浮标控制其监测水深(表层水 20 cm 左右),待示数稳定后,记录数据,连续监测 3 次并取其平均值作为实验数据.一些生物、化学指标 TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、高锰酸盐指数、Chla 等主要是通过采取表层水样(水面下 20 cm 左右)带回实验室进行分析,其中 TN 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法、TP 采用碱性过硫酸钾消解-可见光分光光度法、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用水杨酸分光光度法、高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾消解法、Chla 采用丙酮分光光度法,每个样品设置 3 个平行,取其平均值.

## 3 结果与分析

### 3.1 区域湿地水质基本特征分析

表 1 为南京仙林新市区湿地水质指标的季节性变化统计数据(2010 年).从中可以看出,南京仙林新市区湿地水质整体相对较好,基本为地表水 III~IV 类水水质. TP 季节性变化规律主要表现为夏季质量浓度较高,其平均值达到  $0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,属于地表水 V 类水水质,春、秋季节相差不大,而至冬季略有下降.而 TN 在夏、冬季节质量浓度较高,其中夏季 TN 质量浓度达到  $2.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,处于劣 V 类水平.高锰酸盐指数代表水体受有机物污染和还原性无机物污染的综合指标<sup>[22]</sup>,其质量浓度也是在夏季水平较高, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 也表现出类似情况.这主要与夏季降雨量较大,将地面大量沉积物带入湿地生态系统所致<sup>[23]</sup>. DO 在冬季最高,夏季则较低,DO 一方面与水温有密切的关系,另一方面夏季水体中较高有机污染物及还原性无机物含量也是消耗 DO 主要物质<sup>[24]</sup>. Chla 冬季质量浓度最低,春、夏、秋季较高,这主要与湿地水体温度对藻类生长影响有关,一般在 4~5 月温度升高时藻类生长,而温度较低则停止生长<sup>[25]</sup>.反映无机盐离子的指标电导率在春季、夏

表 1 南京市仙林新市区湿地水质季节性变化(平均值 ± 标准差)

Table 1 Seasonal differences of the water quality in Xianlin, Nanjing(mean ± Stdev)

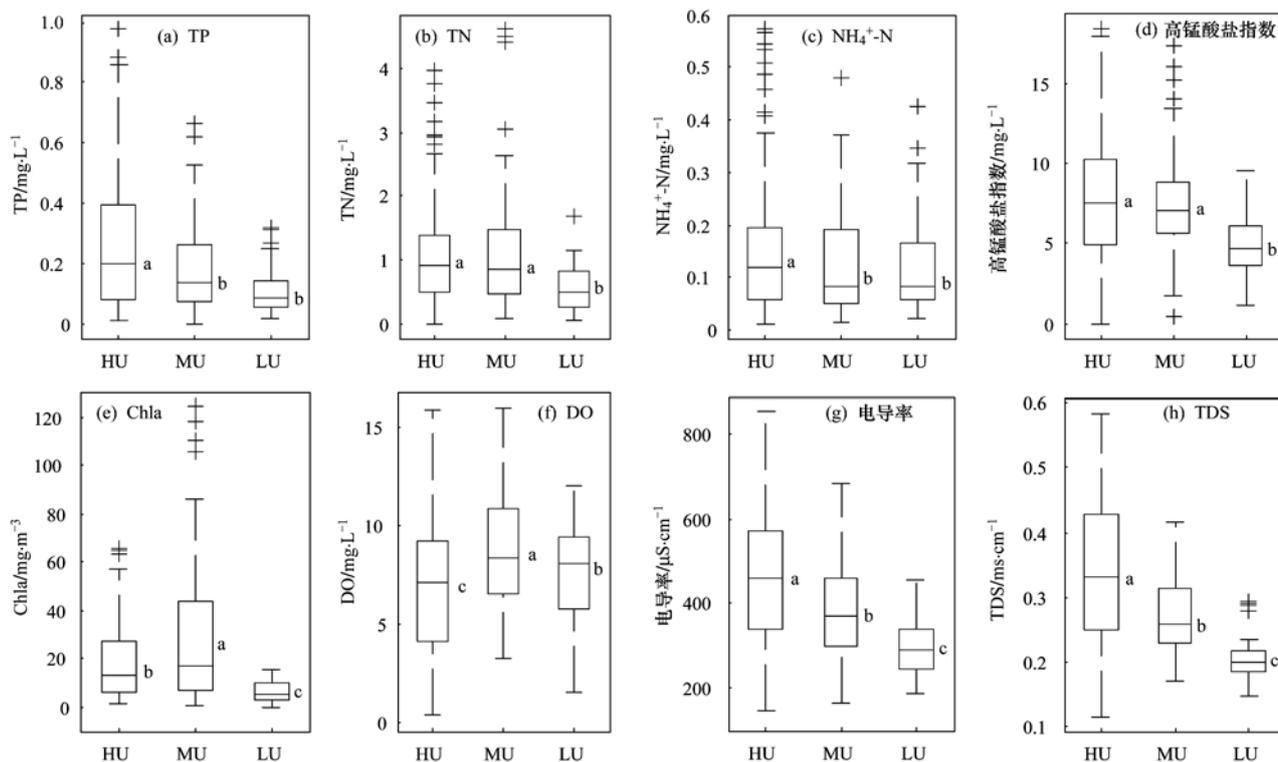
水质指标	春季(3~5月)	夏季(6~8月)	秋季(9~11月)	冬季(12~翌年2月)	年平均
TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.27 ± 0.21	0.33 ± 0.19	0.27 ± 0.23	0.14 ± 0.16	0.25 ± 0.08
TN/mg·L <sup>-1</sup>	1.22 ± 1.01	2.42 ± 1.45	1.32 ± 1.14	1.40 ± 1.50	1.59 ± 0.56
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.14 ± 0.09	0.17 ± 0.10	0.14 ± 0.13	0.10 ± 0.09	0.14 ± 0.03
Chla/mg·m <sup>-3</sup>	21.46 ± 19.15	24.23 ± 18.25	20.99 ± 15.90	10.29 ± 9.31	19.24 ± 6.14
高锰酸盐指数/mg·L <sup>-1</sup>	7.50 ± 2.78	11.31 ± 4.04	7.63 ± 6.56	6.65 ± 2.41	8.27 ± 2.07
DO/mg·L <sup>-1</sup>	9.25 ± 2.35	6.15 ± 2.86	6.63 ± 2.74	9.37 ± 1.42	7.85 ± 1.70
电导率/μS·cm <sup>-1</sup>	474 ± 147	448 ± 117	354 ± 118	380 ± 155	414 ± 56
TDS/ms·cm <sup>-1</sup>	0.31 ± 0.10	0.29 ± 0.08	0.30 ± 0.10	0.32 ± 0.12	0.31 ± 0.01

季质量浓度较高,而 TDS 季节性变化则不太明显。因此从整体来看,南京仙林新市区内湿地水质季节性变化规律主要表现为夏季水质相对较差,冬季则相对较好,这主要与夏季的降雨把集水区内的营养物质带入湿地有关<sup>[23,26]</sup>。

### 3.2 不同城市化等级下的湿地水质特征

通过对典型湿地 UEI 计算,进一步对其进行城

市化等级划分,分为 15 个 HU 水平湿地、8 个 MU 水平湿地及 5 个 LU 水平湿地。通过对不同城市化影响水平下的 28 个样本 12 个月份湿地水质状况统计分析,初步分析去除小于第一四分位数与 1.5 倍四分位距之差的值及大于第三四分位数与 1.5 倍四分位距之和的异常值,然后在 Matlab 2008b 软件中绘制数据的箱线图(图 3)。



框图旁边小写字母为指标均值在 0.05 水平上最小差异性检验(LSD)结果,“+”代表异常值,上方 T 型线表示最大值,下方倒立 T 线表示最小值,框上沿表示数据的第三四分位数,下沿表示数据的第一四分位数,框中央直线表示数据的中心

图 3 不同城市化等级下的湿地水质差异

Fig. 3 Differences of water quality among varied urbanization level

从图 3 中可以看出,不同城市化影响强度下的湿地水质差异明显,具体表现为:①富营养化指标基本表现为 HU 明显高于 MU 水平及 LU 水平湿地,通过对平均值的计算发现,HU 水平 TP 质量浓度平均

值为 0.27 mg·L<sup>-1</sup>,MU 水平为 0.18 mg·L<sup>-1</sup>,LU 水平 TP 质量浓度平均值为 0.12 mg·L<sup>-1</sup>,由此可见随着城市化水平的提高,TP 质量浓度值也呈显著性升高趋势。HU 及 MU 水平湿地总氮质量浓度差别不

大,平均值分别为  $1.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,但是均明显高于 LU 水平湿地总氮质量浓度 ( $0.56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度主要表现出 HU 水平显著高于 LU 水平,在 MU 水平的湿地 Chla 质量浓度显著高于 HU 及 LU 水平湿地,同时 HU 水平湿地 Chla 质量浓度也显著高于 LU 水平湿地。②对于反映水体有机污染类指标的高锰酸盐指数及 DO 变化规律主要表现为:高锰酸盐指数最高平均值出现于 HU 水平湿地,略高于 MU 水平湿地,两者均明显高于 LU 水平湿地;DO 的最小平均值出现于 HU 水平湿地中,明显低于 MU 及 LU 类型。③对于反映无机盐离子的电导率及 TDS 在 3 种不同城市化等级下的差异也具有同样的相似性,进一步通过对 4 个季

节各指标进行 Pearson 相关分析表明,电导率与 TDS 相关系数在  $P = 0.01$  水平上相关系统达到 0.851,而其他各水质指标均在 0.6 以下,因此在以下分析中仅保留 TDS。

### 3.3 城市化影响指数与水质相关关系分析

为进一步揭示城市化水平与湿地水质之间的相关关系,本研究通过把 UEI 与 12 个月份水质指标的平均值进行相关分析,在数据处理过程中同样去除小于第一四分位数与 1.5 倍四分位距之差的值及大于第三四分位数与 1.5 倍四分位距之和的异常值。使用 SPSS 15.0 统计分析软件对分组对 2 组数据进行曲线拟合,选择拟合度较高曲线,并通过 Excel 2007 进行作图,结果见图 4。

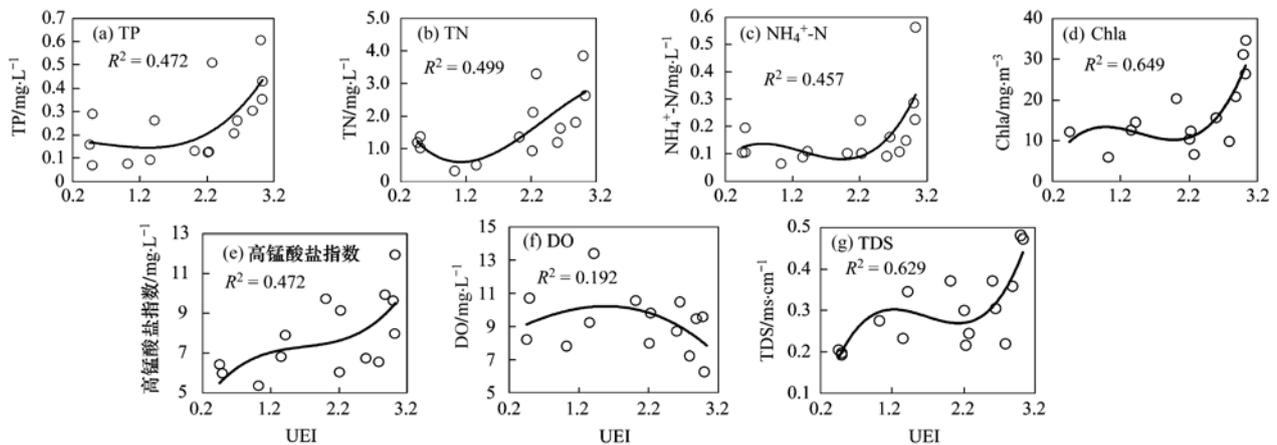


图4 城市化影响指数与水质相关关系

Fig. 4 Relationship between UEI and water quality

从图 4 中可以得出,城市湿地水质随着 UEI 的变化规律特征相对明显,并存在阈值关系。各负效指标总体上都随着城市化指数的升高而升高,DO 则随着城市化指数的升高而降低,表明通过利用集水区尺度内的不透水类型及林地类型的面积及其边界密度能够有效衡量城市化过程对区域湿地水生态过程的影响。进一步对拟合函数进行导函数分析,并对导函数在 0.2 ~ 3.2 区间上求实根来判断不同指标的阈值点,最终结果表明,第一个特征根值分别为 TP 1.29、TN 1.12、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  0.75、Chla 0.98、DO 1.57、TDS 1.21,平均值 1.2,因此第一个阈值点取 1.2;同样方法,另一个阈值点取 2.2。结合图 4 可以看出随着 UEI 的升高 TP 质量浓度升高相对平缓,而当 UEI 超过 2.2 时,TP 质量浓度迅速增加。当 UEI 值  $< 1.2$  时 TN 水平变化较小,甚至略有降低,而当 UEI 超过 1.2 时,TN 质量浓度水平大幅上升。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、Chla 质量浓度变化趋势与 TP 相似,均在

UEI  $\approx 2.2$  时,质量浓度迅速升高。对于 TDS,当 UEI  $\approx (1.2, 2.2)$  时其值变化特征并不明显,而在 0.2 ~ 1.2 或者 2.2 ~ 3.2 时 TDS 值迅速增加,高锰酸盐指数表现出同样的规律。而 DO 则表现出当 UEI  $< 1.2$  时,随着城市化水平的升高,其 DO 略有上升,当 UEI 在区间 (1.2, 2.2) 左右时,DO 变化不明显,而当 UEI  $> 2.2$  时,随着城市化水平的升高,DO 值迅速下降。参照城市化等级划分标准可知,当城市化水平达到 HU 水平时,随着城市化强度的增加,湿地水质指标恶化速度加快。

## 4 结论

(1)南京仙林新市区湿地水质季节性差异较为明显,总体而言,夏季水质劣于其他 3 个季节。其中富营养化指标冬季相对较好,春季、秋季富营养化指标相差不大,并且低于夏季;同时有机污染状况也是夏季较为突出,这也主要是因为区域内的非点源

污染物随着夏季雨水径流逐渐汇入湿地。

(2)不同城市化等级下的湿地水质差异性较大. 高等城市化水平湿地水质显著劣于低等城市化水平湿地水质. 中等城市化水平湿地水质基本上劣于低等城市化水平湿地. 而高等城市化水平与中等城市化水平湿地水质差异不太明显. 因此可得出, 较高城市化等级水平的集水区内土地利用对湿地水质有着负效影响, 特别是集水区内不透水类型对区域污染物截留过程能力较差, 成为湿地集水区内各种污染物的主要来源。

(3)城市化影响指数(UEI)与湿地水质指标之间存在着阈值关系, UEI在阈值控制范围内各指标变化趋势略有差异. 总体来看, 当UEI低于2.2时, 城市湿地水质处于相对良好状态, 且随着城市化水平的提高, 水质恶化速率较为缓慢; 而当UEI达到2.2以上时, 随着UEI值的增大, 城市湿地水质恶化速度也加快。

#### 参考文献:

- [1] Ehrenfeld J G. The expression of multiple functions in urban forested wetlands[J]. *Wetlands*, 2004, **24**(4): 719-733.
- [2] 孙广友, 王海霞, 于少鹏. 城市湿地研究进展[J]. *地理科学进展*, 2004, **23**(5): 95-100.
- [3] Zhang Y R, Gong Z N, Gong H L, *et al.* Investigating the dynamics of wetland landscape pattern in Beijing from 1984 to 2008[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, **21**(5): 845-858.
- [4] Holland C C, Honea J, Gwin S E, *et al.* Wetland degradation and loss in the rapidly urbanizing area of Portland, Oregon[J]. *Wetlands*, 1995, **15**(4): 336-345.
- [5] Bhuiyan M A H, Rakib M A, Dampare S B, *et al.* Surface water quality assessment in the central part of bangladesh using multivariate analysis[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2011, **15**(6): 995-1003.
- [6] 张波, 翟路, 林杰, 等. 南京城市湖泊湿地的水质动态及其评价[J]. *湿地科学与管理*, 2011, **7**(1): 29-39.
- [7] Tu J, Xia Z G, Clarke K C, *et al.* Impact of urban sprawl on water quality in eastern Massachusetts, USA[J]. *Environmental Management*, 2007, **40**(2): 183-200.
- [8] Seilheimer T S, Wei A H, Chow-Fraser P, *et al.* Impact of urbanization on the water quality, fish habitat, and fish community of a Lake Ontario marsh, Frenchman's Bay[J]. *Urban Ecosystems*, 2007, **10**(3): 299-319.
- [9] 宁彤, 高超, 许有鹏. 快速城市化背景下县域尺度农田氮素平衡状况的演变——以江苏省宜兴市为例[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(4): 668-673.
- [10] 何万谦, 黄金良. 澳门半岛近岸海域水质时空变异分析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 606-611.
- [11] 黄金良, 李青生, 洪华生, 等. 九龙江流域土地利用/景观格局-水质的初步关联分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 64-71.
- [12] 岳隽, 王仰麟, 李贵才, 等. 不同尺度景观空间分异特征对水体质量的影响——以深圳市西丽水库流域为例[J]. *生态学报*, 2007, **27**(12): 5271-5280.
- [13] 郝敬锋, 刘红玉, 胡俊纳, 等. 城市湿地小流域尺度景观空间分异及其对水体质量的影响——以南京市紫金山东郊典型湿地为例[J]. *生态学报*, 2010, **30**(15): 4154-4161.
- [14] 林莉峰, 李田, 李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1430-1434.
- [15] Ehrenfeld J G, Cutway H B, Hamilton R, *et al.* Hydrologic description of forested wetlands in northeastern New Jersey, USA—an urban/suburban region[J]. *Wetlands*, 2003, **23**(4): 685-700.
- [16] Donohue I, Megarrigle M L, Mills P. Linking catchment characteristics and water chemistry with the ecological status of Irish rivers[J]. *Water Research*, 2006, **40**(1): 91-98.
- [17] 郭青海, 马克明, 张易. 城市土地利用异质性对湖泊水质的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(2): 776-787.
- [18] 徐秋宁, 马孝义, 姜宗科, 等. 小型集水区降雨径流计算模型研究[J]. *水土保持研究*, 2002, **9**(1): 139-150.
- [19] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(7): 1057-1061.
- [20] Lee S W, Hwang S J, Lee S B, *et al.* Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2009, **92**(2): 80-89.
- [21] Azous A, Horner R R. Wetlands and urbanization: implications for the future[M]. Washington: Lewis Publishers, 2001. 237-255.
- [22] 李玉凤, 刘红玉, 曹晓, 等. 西溪国家湿地公园水质时空分异特征研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 2036-2041.
- [23] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. *生态学报*, 2005, **25**(12): 3225-3230.
- [24] 沙鸥, 马卫兴, 徐国想, 等. 地表水中溶解氧监测及变化规律[J]. *环境监测管理和技术*, 2008, **20**(1): 48-50.
- [25] 王志红, 崔福义, 安全. 水温与营养值对水库藻华态势的影响[J]. *生态环境*, 2005, **14**(1): 10-15.
- [26] 胡俊纳, 刘红玉, 郝敬锋. 城市景观多功能区湿地水质分异及其人类影响[J]. *生态学杂志*, 2010, **29**(7): 1409-1413.

## 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