

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

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

京津冀与长三角区域大气 NO ₂ 污染特征	王英, 李令军, 刘阳 (3685)
2008~2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析	杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)
沧州市大气污染特征观测研究	王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)
华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源	李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)
广州市交通主干道空气中苯系物的测量	叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)
基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究	黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)
柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性	胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)
九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征	余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)
南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价	舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)
天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究	李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)
北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究	李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)
云阳宗海库的分布与来源	张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)
南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究	孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)
三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究	张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)
江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究	单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)
人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果	汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)
潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响	魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)
人工湿地处理含盐生活污水的特性研究	高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)
催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚	刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)
ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究	孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)
微波改性 MWNTs/TiO ₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究	施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)
腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究	丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)
臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究	邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)
复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究	徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)
进水比例对水解反应器出水水质的影响研究	梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)
厌氧-好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)
我国城市污水处理回用调查研究	郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)
快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征	姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)
黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探	马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)
半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应	卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)
广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素	孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)
酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究	王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)
淋洗条件下砂土和粉土盐运移过程的监测研究	付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)
空气注射修复苯污染地下水模拟研究	樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)
不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性	张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)
上海世博园后滩湿地桤木类群落特征及其对环境因子的响应	陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)
耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究	吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)
高效降酚菌株 <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究	陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)
四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究	钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)
长期施用有机和无机肥对黑土 <i>nirS</i> 型反硝化菌种群结构和丰度的影响	尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)
三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究	何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)
多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因素研究	肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)
硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响	刘敬勇, 孙永裕 (3990)
关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究	纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)
第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文	
稻田气溶胶 NH ₃ 和气体 NO _x 排放在线测定研究	龚巍巍, 栾胜基 (4006)
一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制	文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)
基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究	孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)
涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别	丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)
人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析	曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)
基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌	林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)
消毒副产物生成的温度影响和动力学模型	张小璐, 杨宏伟, 王小仵, 付静, 解跃峰 (4046)
一种厌氧微观定量研究新方法	张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)
梧桐树叶作为反硝化碳源的研究	熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)
降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究	崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)
《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)	

天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究

李兆富¹, 刘红玉², 李恒鹏³

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 选择太湖地区天目湖饮用水源地的平桥河流域与中田河流域, 综合利用遥感、GIS技术和野外水质监测、实验室分析等方法, 对流域湿地与河流水质关系进行研究。结果表明: ①平桥河流域与中田河流域湿地数量多, 斑块密度分别为 $7.5 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$ 与 $7.1 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$ 。平桥流域湿地上下游分布广泛, 多位于距离河流 500 m 范围之外, 中田河流域湿地则相对集中于下游河段 500 m 范围内。②湿地对流域氮磷营养盐输出具有显著的截留效果。中田流域湿地对氮具有较强的截留效果, 氮素浓度自上游至下游降低明显, 而对磷的截留效果表现不明显。从季节响应来看, 中田流域湿地在春季和冬季表现出 TN 和 DTN 浓度与流域湿地面积百分比明显的负相关关系, 平桥流域湿地则在秋季对氮输出具有显著影响, 表明湿地对氮磷的截留功效具有强烈的季节效应。③合理恢复一定数量的湿地面积, 特别是增加河道附近湿地面积和数量, 对河流水质具有改善作用。但氮磷营养盐在流域内的输移过程复杂, 湿地的面积、位置、密度、生态系统结构等因素以及流域空间尺度、地形坡度、采样时间间隔及其它土地利用类型等因素都对物质输移过程产生影响, 相关理论与实践研究有待于深入展开。

关键词: 流域; 湿地; 营养盐; 水质; 天目湖; 饮用水源地

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3753-07

Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed

LI Zhao-fu¹, LIU Hong-yu², LI Heng-peng³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 3. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Focused on understanding the function of wetland in improving water quality, Pingqiao watershed and Zhongtian watershed in Tianmu Lake drinking water sources area were selected as the research region. We integrated remote sensing, GIS techniques with field investigation and chemical analysis to analyze the relationship between wetland and water quality in watershed scale. Results show: ① There are many wetland patches in Pingqiao and Zhongtian watershed, wetlands patch densities were respectively 7.5 km^{-2} and 7.1 km^{-2} . Wetlands widely distributed in the Pingqiao watershed with mostly located away from the river of 500 m, whereas wetlands relatively concentrated in the lower reach within 500 meters of riverside in Zhongtian watershed. ② Nitrogen and phosphorus nutrient retention of wetland in watershed scale was significant. The annual mean TN and DTN concentration had a strong relationship with percent area of wetlands in Zhongtian watershed while the weakest relationship was found with TP and DTP concentrations, especially, the mean TN and DTN concentrations in spring and winter had the significantly negative relationship with wetland areas of watershed. The negative relationship was existed for nitrogen in autumn of Pingqiao watershed, which suggested that watersheds varying in area of wetlands have the different nutrient reducing efficiency in seasonal periods. ③ A certain number and area of wetland will improve river water quality in watershed scale, which can instruct water environment treatment. However, considering the complexity of nutrient transport processes in watershed, wetland-related factors such as area, location, density, ecosystem structure and watershed-related factors such as temporal interval, spatial scales, slope and land use will impact on the transport processes, and related theoretical and practical problems need further research.

Key words: watershed; wetland; nutrient; water quality; Tianmu Lake; drinking water sources area

随着流域范围内人类土地利用活动对河流水质的影响越来越大, 湿地作为流域中重要的用地类型和生态系统, 其在流域中的水质净化及削减洪峰等功能得到越来越多的关注^[1~3]。许多研究表明, 流域湿地对提高河流水质具有明显的作用, 尽管削减率变化显著, 湿地最高能削减污染水体中 99% 的氮和 75% 的磷^[4~6]。Mitsch 等^[7]研究表明, 只要建立

或恢复占 Mississippi 河流域面积 0.7% ~ 1.8% 的湿地, 就会显著削减进入墨西哥湾的氮负荷。Arheimer

收稿日期: 2012-01-22; 修订日期: 2012-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171071, 40701174); 中国科学院知识创新工程重要方向项目群(KZCX2-YW-Q10-3); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 李兆富(1977 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为流域非点源污染、资源利用与环境效应, E-mail: lizhaofu@njau.edu.cn

等^[8]对瑞士南部流域研究表明,恢复占流域 0.4% 的 40 块湿地能够减少 6% 氮素进入海岸带。在我国南方多水塘湿地系统的研究表明,水塘和沟渠对溶解态磷和总磷具有较强的截留作用,在径流期间截留率分别可以达到 90.9% 和 93.9%^[9~11]。由此看来,大多数研究表明流域内一定面积和数量的湿地,能够通过截留水分、沉积物质和营养物质而减少下游入湖污染物质量,从而达到改善水质的目标^[12,13]。然而,有关湿地对水质净化功能的有效性还不完善,许多科学问题如流域或区域内的湿地面积、数量、空间分布位置,以及区域自然地理条件(坡度、流域面积等)如何影响入湖河流水质的研究还不够深入^[14~16]。

与国外相比,国内相关研究比较缺乏,尤其对如何利用自然湿地改善水源地流域水质的研究不够重视。在社会、经济快速发展的背景下,位于农业地区的湖库型水源地水质,日益受到流域农业生产过程中过量施肥导致的非点源污染威胁。如何科学建立、恢复并充分利用流域中现有湿地单元,有效保护水源地水质,将成为政府、管理者和研究者关注的热点问题。本研究选择太湖地区天目湖水源地的两个流域为研究区域,从流域尺度和湿地对水质作用认识出发,量化分析湿地面积、数量、空间分布以及子流域面积、坡度等因素在水质改善中的作用,以期在水源地流域水质保护决策提供科学依据。

1 研究区域概况

天目湖流域位于江苏省溧阳市南部,主要由沙河水库流域和大溪水库流域构成,2 个水库是江苏省溧阳市 60 万人口的重要饮用水源地。该区域丘陵地貌发育,最高海拔高度为 532 m,平均地形坡度为 14°。气候属于亚热带季风气候,降水季节差异明显。根据距离天目湖约 8 km 的溧阳国家气象站 1971~2010 年多年日降雨数据统计,春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)与冬季(12 月~次年 2 月)降水占全年降水比例分别为 17.3%、47.9%、22.1% 与 12.7%。

目前,旅游宣传概念上的天目湖是其中的沙河水库,其水面面积为 12 km²,最大蓄水量约为 10⁸ m³^[17]。沙河水库流域土地利用结构比较复杂多样。其中湿地(河流、湖泊、小水库、水塘)数量众多,面积较大,分布于整个流域,是最具特点的土地利用类型之一。中田河和平桥河是沙河水库最主要的入湖河流,其入湖水水质直接影响沙河水库水质状

况^[18]。近年来,受旅游产业及农业开发的影响,沙河水库水质明显下降,由原来的Ⅱ类水降到Ⅲ类水^[19,20]。为了保障区域供水安全,政府和研究者也极其重视沙河水库水质保护与流域治理工作。

2 数据来源与方法

研究选择沙河水库流域的中田流域和平桥流域,根据其自然地理条件和水质监测需要,将中田河流域划分为 5 个子流域(ZT1~ZT5);将平桥河流域划分为 6 个子流域(PQ1~PQ6)(图 1)。子流域边界提取利用 ArcGIS 9.3 的 ArcHydro 模块完成,基础数据为 1:50 000 地形图数字化构建的 DEM。另外,利用 DEM 数据提取坡度图,进一步计算各子流域平均坡度值。

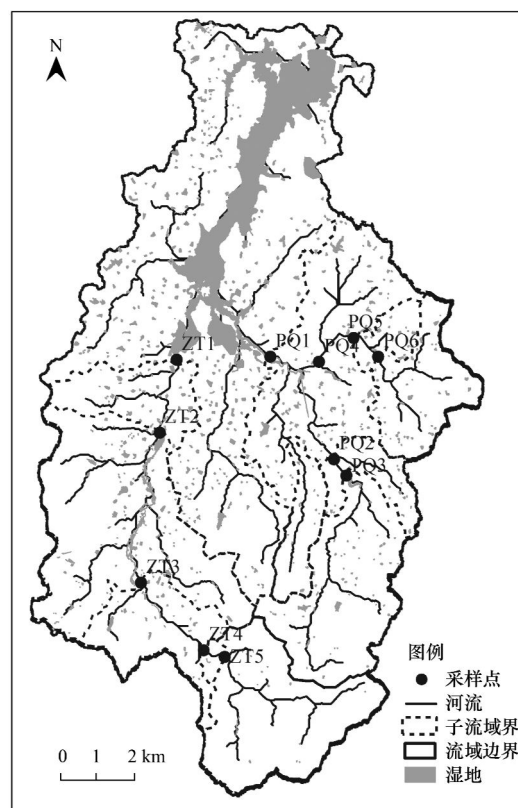


图 1 天目湖(沙河水库)流域及水质监测样点分布示意

Fig. 1 Sketch map of Tianmu Lake (Shahe Reservoir) and water sampling sites

为了全面反映流域自然地理特点和湿地分布状况,首先基于 2009 年 5 月航拍的高精度影像(0.5 m × 0.5 m),利用人工目视解译方法获得各流域湿地空间分布数据,进一步提取和计算湿地面积、数量等信息。此外,以中田河与平桥河的河网为中心,考虑到子流域汇水的嵌套包容关系,进行 0~100 m、0~250 m、0~500 m、0~1 000 m、0~1 500 m 缓冲

区分析,计算不同缓冲区距离内各流域湿地面积和比例。

河流水质监测数据采集时段为 2008 年 10 月 ~ 2009 年 9 月,每月采样 1 次。水质监测样点位置在每个子流域入河河道内,水样采集后立即送到实验室分析(国标常规分析方法)。根据湿地对水质的影响特征,选取的水质参数为总氮(TN)、溶解态氮(DTN)、总磷(TP)和溶解态磷(DTP)。水质数据分析在 SPSS 软件中进行,主要采用相关分析方法揭示流域湿地特征与水质关系。

3 结果与讨论

3.1 流域湿地分布特征

平桥河流域与中田河流域总面积相差不大(3%),分别为 46.98 km² 与 48.43 km²。表 1 为两流域各子流域湿地与地理特征指标。总体来看,流域湿地具有面积小(湿地斑块平均面积 0.002 9 km²)、数量多(共计 695 个)、分布广泛的特征。但是 2 个流域湿地特征存在明显差异性。平桥流域湿

地面积相对较小,比中田河流域少约 20%,而湿地斑块数却略高于中田河流域。因此,从单位面积湿地数量来看,平桥河流域湿地斑块数稍高,破碎化程度较中田河流域明显。

从各子流域湿地空间分布特征来看,平桥河流域内各子流域湿地面积比例变化不大(1.28% ~ 1.83%),说明湿地分布自上游至下游较为均匀分散。PQ4、PQ5、PQ6 子流域湿地大多(64% ~ 79%)分布在距离河流 500 m 之外,PQ1、PQ2 和 PQ3 湿地则集中(61% ~ 80%)分布在距离河流 500 m 范围内。中田河上游子流域(ZT3、ZT4、ZT5)湿地面积较小(低于 1%),下游子流域(ZT1、ZT2)湿地面积比例增大,显示流域湿地集中于下游地区。从距离河流来看,其湿地主要集中分布在 500 m 缓冲区之内,并且越往下游,湿地越集中在 100 m 缓冲区内。如表 1 所示,下游 ZT1 和 ZT2 子流域湿地集中在 100 m 缓冲区内,中游 ZT3 流域湿地分布在 500 m 缓冲区之外,而上游 ZT4 和 ZT5 流域湿地则集中在距离河流 500 m 之外。

表 1 平桥河与中田河流域各子流域湿地与地理特征指标¹⁾

Table 1 Statistics of wetland and geography feature for sub-watersheds in Pingqiao and Zhongtian watersheds

流域	子流域	Slope /(°)	Area /km ²	WPN /个	WA /km ²	WAP /%	WPD /个·km ⁻²	B100 /%	B250 /%	B500 /%	B1000 /%	B1500 /%
平桥河流域	PQ1	10.7	46.98	351	0.86	1.83	7.5	22.03	32.11	60.79	86.32	97.67
	PQ2	13.6	16.63	85	0.18	1.11	5.1	35.15	40.86	71.27	81.71	95.35
	PQ3	13.6	13.28	63	0.15	1.15	4.7	39.77	46.63	80.41	88.68	97.02
	PQ4	8.1	6.36	40	0.12	1.90	6.3	5.97	11.48	21.40	96.64	100.00
	PQ5	11.3	9.40	84	0.14	1.49	8.9	5.19	13.10	35.67	69.86	91.80
	PQ6	11.5	7.30	58	0.09	1.28	7.9	5.23	10.22	27.04	61.11	87.70
中田河流域	ZT1	14.2	48.43	344	1.19	2.45	7.1	54.34	62.86	71.67	88.46	95.71
	ZT2	14.8	42.59	286	0.82	1.94	6.7	51.71	58.24	67.59	86.92	94.85
	ZT3	17.3	21.31	71	0.16	0.75	3.3	30.74	38.99	62.55	80.54	98.10
	ZT4	19.3	14.14	17	0.02	0.12	1.2	10.73	11.58	33.83	66.82	82.10
	ZT5	19.5	13.55	16	0.02	0.11	1.2	0.00	0.95	25.87	62.83	79.94

1) Slope, 流域平均坡度; Area, 子流域面积; WPN, 湿地斑块数; WA, 湿地面积; WAP, 湿地面积百分比; WPD, 湿地斑块密度; B100, 100 m 缓冲区湿地面积比例; B250, 250 m 缓冲区湿地面积比例; B500, 500 m 缓冲区湿地面积比例; B1000, 1 000 m 缓冲区湿地面积比例; B1500, 1 500 m 缓冲区湿地面积比例

3.2 流域水质空间分布特征

表 2 显示了平桥与中田两个流域的水质特征。总体来看,平桥流域各水质参数浓度较高,而中田流域各水质参数浓度相对较低。平桥河流域水质劣于中田河的原因,与流域内人类活动较强直接相关。根据航拍影像数据解译的土地利用统计,平桥河与中田河流域的居民建设用地、茶园、耕地(人类活动相关土地类型)面积比例总和分别为 40.4% 与 28.4%。从流域水质空间分布来看,中田流域 TN 和 DTN 浓度表现为从上游到下游逐渐减少特征。其

中,TN 浓度从上游到下游降低了 43.6%,DTN 浓度降低了 51.6%;而 TP 和 DTP 浓度在整个中田河流域普遍较低,空间规律性不明显。平桥流域各水质参数值空间上变化较小,并且没有明显的规律性。从水质总体质量来看,两流域氮含量较高,磷浓度普遍较低(大多优于国家地表水质 II 类水质标准),说明河流水质主要受氮影响。

3.3 流域湿地对河流水质的影响

3.3.1 湿地面积与水质关系

理论上讲,流域内湿地面积越大,截留水分和营

表 2 平桥河与中田河流域氮磷营养盐浓度年均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Table 2 Annual mean water quality parameters in Pingqiao and Zhongtian watersheds/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

流域	子流域	TN	DTN	TP	DTP
平桥河流域	PQ1	3.02	2.33	0.120	0.033
	PQ2	3.01	2.89	0.053	0.022
	PQ3	3.12	2.97	0.032	0.011
	PQ4	3.06	2.97	0.080	0.042
	PQ5	3.32	3.12	0.083	0.040
	PQ6	3.08	2.86	0.093	0.053
中田河流域	ZT1	1.49	1.26	0.068	0.034
	ZT2	1.57	1.50	0.064	0.023
	ZT3	2.19	2.16	0.053	0.031
	ZT4	2.64	2.60	0.084	0.053
	ZT5	2.45	2.44	0.046	0.029

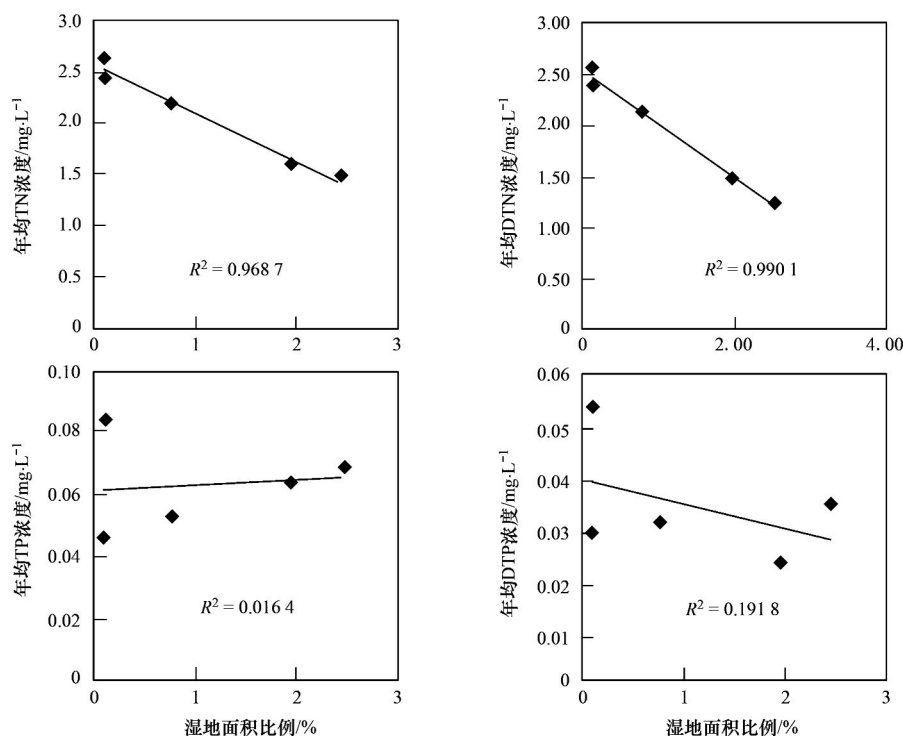


图 2 中田河子流域湿地面积百分比与营养盐参数关系

Fig. 2 Relationships between percent of wetland area and nutrient concentrations in the Zhongtian river sub-watersheds

较近地区,湿地对氮具有较强的截留效果,从而能够明显改善下游入湖水质. 而由于中田河磷素浓度处于较低水平,湿地对磷的截留有效性表现不明显,对下游入湖磷的减少影响较小.

平桥流域内各子流域湿地面积百分比与各水质营养指标均没有表现出显著的相关关系(图3),反映了该流域湿地在截留营养物质上与中田流域的显著差异性. 另外,与中田流域明显不同的是,平桥流域湿地面积与 TN、TP 存在一定的正相关关系,说明一定面积湿地的存在不但不能降低流域营养物质输出,而且可能有助于营养物质释放. 这与平桥河

养物质的功能越强,尤其对溶解性营养物质的截留效果应该更好^[1]. 为了反映中田和平桥这 2 个流域湿地截留营养物质的有效性,采用相关分析湿地面积与各营养物质参数的联系.

如图 2 所示,中田流域内各子流域湿地面积百分比与 TN 和 DTN 关系密切. 随着湿地面积增加,年均 TN 和 DTN 浓度显著性降低;尤其对于溶解性氮浓度 DTN,湿地面积的影响更加显著. 但是湿地面积对 TP 和 DTP 显示出弱相关特征. 其中,流域湿地面积对 TP 浓度影响甚微,而对 DTP 浓度有一定负相关关系,但是相关性不强. 这个结果表明,对于中田流域,湿地多集中分布于流域下游距离河道

流域的湿地位置多分布于距离河流较远的区域,湿地的降解作用不够明显,可能起到了营养盐释放源的效应,从而引起了以上反常现象. 其具体机制有待于进一步深入研究.

3.3.2 湿地面积对水质参数的季节响应

为了进一步反映流域湿地面积对河流营养物质的影响,分别分析中田河流域与平桥河流域湿地面积比例与春(3~5月)、夏(6~8月)、秋(9~11月)、冬(12月~次年2月)各季节氮磷营养盐相关系数(表3). 结果发现,对于中田流域,湿地面积变化对营养物质浓度的季节响应比较突出. 尤其是对

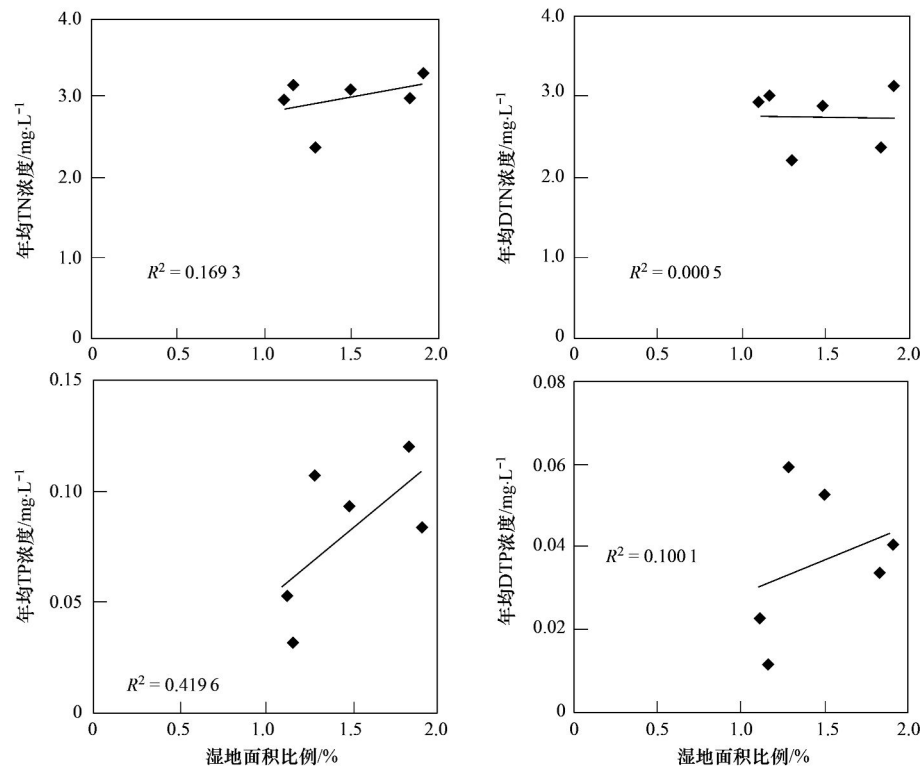


图3 平桥流域湿地面积百分比与营养盐参数关系

Fig. 3 Relationships between percent of wetland area and nutrient concentrations in the Pingqiao watershed

TN 和 DTN 浓度,流域湿地面积在春季和冬季响应十分显著,通过了 $P < 0.01$ 的检验. 对于磷素,流域湿地面积仅对 DTP 在夏季、秋季与冬季表现出弱相关特征.

对于平桥河流域,尽管在年均水平上对各类营养物质均表现出弱相关特征. 但是,对比考虑到中田流域湿地面积与氮浓度存在显著相关关系,因而,进一步分析了平桥流域各季节氮浓度与湿地面积百分比之间的关系. 结果显示,平桥流域湿地面积在

秋季对 TN 和 DTN 具有显著的负相关关系,表明随着流域湿地面积增大,氮浓度在秋季有明显减少. 而对 TP,平桥流域在春季却表现出明显的正相关关系,反映出随着流域内湿地面积增加,将有更多的 TP 释放出来,进入下游水域. 这在一定程度上说明,湿地在不同季节对氮磷营养盐输移表现为“源-汇”功能转变,这应该与不同季节流域水文过程差异及各湿地生态系统季节变化有关. 而且,位于上下游不同空间位置的湿地可能具有源或汇不同的功能角色.

表3 流域湿地面积比例与不同季节水质参数相关系数¹⁾

Table 3 Correlation between wetland area percentage and water quality parameters of different seasons

营养盐	平桥河流域				中田河流域			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
TN	0.565	0.368	-0.824 *	0.444	-0.983 **	-0.829	-0.673	-0.981 **
DTN	-0.045	0.225	-0.810 *	0.436	-0.991 **	-0.823	-0.873	-0.983 **
TP	0.886 *	0.494	0.593	0.084	0.385	-0.098	0.294	-0.364
DTP	0.391	0.042	0.341	0.616	0.319	-0.766	-0.743	-0.658

1) * 相关显著水平 $P < 0.05$ (双尾); ** 相关显著水平 $P < 0.01$ (双尾),下同

3.3.3 河流水质与流域湿地特征相关关系

上述分析表明,湿地面积是影响流域营养盐输出过程的重要因素,但影响机制复杂,因为很多其它相关因素也对河流水质过程具有重要影响. 综合考虑湿地要素和流域地理特征,选择流域湿地面积百分比、湿地斑块密度、不同缓冲区距离内湿地面积

百分比等湿地特征指标,以及子流域面积与流域平均坡度等指标,与平桥河及中田河各子流域氮磷营养盐参数进行相关分析(表4). 结果显示,对于 TN 和 DTN,中田流域湿地特征各指标及流域面积与其基本呈显著负相关,而与地形坡度呈显著正相关关系;而平桥河流域除了子流域面积与 DTN 显著负

相关之外,与湿地特征指标相关性不显著.对于 TP、DTP,除平桥河流域 100、250、500 m 缓冲区湿地面积比例与 DTP 浓度显著负相关之外,其它指标相关性不明显;但比较各影响因素与 TP、DTP 的相关系数,显示湿地对 DTP 的影响比对 TP 的影响大.

总体来看,湿地在流域中对营养盐输移存在显

著影响,但平桥河流域与中田河流域各湿地特征指标与水质参数相关性在不同季节、不同流域表现不同,这与水质输移过程的复杂性及不同流域地理要素特征差异有关,也可能受制于有限的水质采样频率.为了有效地利用流域湿地控制营养盐输移,有待于进一步的深入研究.

表 4 河流水质参数与流域及湿地特征指标相关关系

Table 4 Correlation between water quality parameters and watershed wetland feature index

流域	参数	Slope	Area	WAP	WPD	B100	B250	B500	B1000	B1500
平桥河流域	TN	-0.002	-0.387	-0.048	0.558	-0.398	-0.370	-0.270	-0.406	-0.378
	DTN	0.109	-0.927 **	-0.400	-0.068	-0.179	-0.248	-0.254	-0.183	-0.247
	TP	-0.603	0.521	0.701	0.762	-0.629	-0.560	-0.514	-0.235	-0.153
	DTP	-0.655	-0.222	0.437	0.783	-0.943 **	-0.946 **	-0.925 **	-0.520	-0.510
中田河流域	TN	0.985 **	-0.983 **	-0.984 **	-0.992 **	-0.947 *	-0.941 *	-0.884 *	-0.926 *	-0.751
	DTN	0.985 **	-0.992 **	-0.995 **	-0.989 **	-0.944 *	-0.937 *	-0.875	-0.918 *	-0.730
	TP	-0.093	0.144	0.117	0.083	0.171	0.130	0.058	0.086	-0.086
	DTP	0.487	-0.445	-0.449	-0.512	-0.417	-0.433	-0.439	-0.456	-0.463

4 结论

(1)就 2 个流域湿地特征而言,平桥河较中田河流域湿地面积小,数量多,湿地斑块密度稍大,破碎化明显,湿地呈分散性分布,多位于距离河流 500 m 距离之外;而中田河流域湿地相对集中在下游距离河道 500 m 缓冲区范围内.就两个流域营养盐监测结果看,平桥河流域水质劣于中田河流域;其中氮素水平在 2 个流域普遍较高,而磷的浓度处于较低水平.从子流域来看,平桥河各子流域氮磷浓度空间差异小;而中田河流域氮素浓度自上游至下游显著降低,磷浓度各子流域差异不大.

(2)从营养物质年均水平来看,流域湿地面积、数量和分布的地理位置对营养物质的输出和水质的改善具有重要影响.中田河流域湿地面积比例与氮素输出浓度基本呈负相关关系,而与磷素浓度相关性不甚明显;平桥河流域湿地面积比例与河流营养盐浓度相关性较小.子流域出口营养盐浓度与湿地空间位置分析表明,湿地距离河道越近,其与河流水质参数相关性越明显,也意味着相对集中于河流周边的湿地对营养物质的截留作用越大.流域湿地对水质影响的有效性还依赖于流域形态、坡度、面积等地理因素.

(3)从营养物质季节响应来看,两流域都对营养物质均存在季节性响应特征.平桥流域湿地面积在秋季对 TN 和 DTN 具有显著的负相关关系,对 TP 和 DTP 在春季和冬季则表现出明显的正相关关系.中田流域湿地面积在春季和冬季对 TN 和 DTN 呈现

显著负相关关系,对 TP 和 DTP 则季节性影响也不显著.由于 TP 和 DTP 浓度很小,无论在年均还是季节响应上,两流域湿地和地理特征对其反应都不敏感.不同位置的湿地在不同季节可能具有“源”、“汇”功能的差异.

(4)从保护饮用水源地水质的实践角度,政府管理部门在进行相关土地利用规划时,可以充分考虑湿地对流域内营养物质输出的影响,合理恢复一定数量的湿地面积,尤其通过增加河道近距离缓冲区内的湿地面积和数量,可以充分发挥湿地净化河流水质、减少河流营养物质输入下游汇水区域的作用.流域内一定面积和数量的湿地对提高河流水质具有重要影响,然而,受制于流域营养盐输移过程的复杂性及影响因素的广泛性及有限的水质监测数据等问题,更多相关科学问题值得深入研究.

参考文献:

- [1] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands [M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2007.
- [2] Rücker K, Schrautzer J. Nutrient retention function of a stream wetland complex-A high-frequency monitoring approach [J]. Ecological Engineering, 2010, **36**(5): 612-622.
- [3] Richardson C J, Flanagan N, Ho M. Integrated stream and wetland restoration: a watershed approach to improved water quality on the landscape[J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(1): 25-39.
- [4] Whigham D F, Chitterling C, Palmer B. Impacts of freshwater wetlands on water quality: a landscape perspective [J]. Environmental Management, 1988, **12**(5): 663-671.
- [5] Johnston C A. Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands; effects on surface water quality[J]. Critical Reviews in Environmental Control, 1991, **21**(5-6): 491-565.

- [6] Gilliam J W. Riparian wetlands and water quality[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, **23**(5): 896-900.
- [7] Mitsch W J, Day J W, Gilliam J W, *et al.* Reducing nitrogen loading to the gulf of Mexico from the Mississippi River Basin; strategies to counter a persistent ecological problem [J]. *BioScience*, 2001, **51**(5): 373-388.
- [8] Arheimer B, Wittgren H B. Modelling nitrogen removal in potential wetlands at the catchment scale [J]. *Ecological Engineering*, 2002, **19**(1): 63-80.
- [9] Yin C Q, Shan B Q. Multipond systems: a sustainable way to control diffuse phosphorus pollution[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2001, **30**(6): 369-375.
- [10] Mao Z P, Yin C Q, Shan B Q. Spatial and temporal variability of agricultural pollutants in an agricultural headwater stream within a multi-pond system, southeastern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, **16**(4): 697-704.
- [11] Fu Q, Yin C Q, Ma Y. Phosphorus removal by the multi-pond system sediments receiving agricultural drainage in a headstream watershed[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, **17**(3): 404-408.
- [12] Kanyiginya V, Kansiime F, Kimwaga R, *et al.* Assessment of nutrient retention by Natete wetland Kampala, Uganda [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2010, **35**(13-14): 657-664.
- [13] Díaz F J, O'Geen A T, Dahlgren R A. Agricultural pollutant removal by constructed wetlands: implications for water management and design [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, **104**(1): 171-183.
- [14] Yi Q, Lu W, Yu J, *et al.* Characteristics of nutrient retention in a stormwater wetland during dry and wet days[J]. *Water Science and Technology*, 2010, **61**(6): 1535-1545.
- [15] Fergus C E, Soranno P A, Cheruvilil K S, *et al.* Multiscale landscape and wetland drivers of lake total phosphorus and water color[J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, **56**(6): 2127-2146.
- [16] Hoffmann C C, Kronvang B, Audet J. Evaluation of nutrient retention in four restored Danish riparian wetlands [J]. *Hydrobiologia*, 2011, **674**(1): 5-24.
- [17] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 等. 天目湖 2001~2002 年环境调查及富营养化评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(1): 99-103.
- [18] 黄群芳, 张运林, 陈伟民, 等. 天目湖水文特征变化及其对上游湿地和湖泊生态环境的影响[J]. *湿地科学*, 2007, **5**(1): 51-57.
- [19] 伊平, 张磊, 包健. 天目湖流域农业面源污染控制研究[J]. *污染防治技术*, 2008, **21**(6): 38-40, 43.
- [20] 高永霞, 朱广伟, 贺冉冉 等. 天目湖水质演变及富营养化状况研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 673-679.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	··· WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	····· YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	····· WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	····· LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	····· YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	····· HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	····· HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	····· YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	····· SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	····· LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	····· LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	····· ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	····· SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	····· SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	····· WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	····· WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	····· GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	····· LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	····· SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	····· SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	····· DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	····· XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	····· XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	····· LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	····· GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4- <i>n</i> -Nonylphenol in Soil	····· JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	····· MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	····· WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	····· WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	····· FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	····· FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	····· ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	····· CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	····· WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	····· CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	····· QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	····· YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	····· HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbenazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	····· XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	····· JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU-Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	····· GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	····· WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	····· SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujian Watershed	····· DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	····· CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	····· LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	····· ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	····· ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	····· XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	····· CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《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11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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