

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

**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

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立 ..... 李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)

矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性 ..... 席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)

小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用 ..... 张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)

湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析 ..... 张红, 黄勇, 李莹 (3323)

基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究 ..... 姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)

基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价 ..... 杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)

东海无机氮排海通量年际变化估算 ..... 吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)

海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响 ..... 于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)

北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布 ..... 孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)

湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究 ..... 余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)

降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析 ..... 杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)

三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较 ..... 张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)

三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应 ..... 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)

山地城市地表径流源区水质特征监测研究 ..... 李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)

唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究 ..... 张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)

西藏地表水中砷的分布 ..... 王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)

锡林河流域地表水痕量元素的时空分布 ..... 薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)

天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险 ..... 卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)

松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价 ..... 聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)

长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 ..... 李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)

烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征 ..... 杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)

黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义 ..... 姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)

含藻水中壬基酚的光降解转化研究 ..... 彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)

硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化橙黄 IV ..... 张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)

Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究 ..... 还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)

曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究 ..... 李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)

以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究 ..... 王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)

光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子质量变化特征 ..... 贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)

短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究 ..... 孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)

CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响 ..... 付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)

MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究 ..... 曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)

活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究 ..... 袁冬琴, 王毅力 (3522)

有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响 ..... 刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)

厌氧污泥降解解动力学与生物多样性研究 ..... 曹新垵, 杨琦, 郝春博 (3535)

雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响 ..... 张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)

近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究 ..... 张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)

甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究 ..... 韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)

聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性 ..... 王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)

土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd ..... 汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)

基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险: 以连霍高速郑州—商丘段为例 ..... 谷蕾, 仝致琦, 宋博, 马建华 (3577)

生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险 ..... 卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)

沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响 ..... 吴艳阳, 吴群河, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)

阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲑鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究 ..... 唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)

预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响 ..... 梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)

铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究 ..... 张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)

1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究 ..... 王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)

PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究 ..... 史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)

青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究 ..... 彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)

华北平原玉米-小麦轮作农田 N<sub>2</sub>O 交换通量的研究 ..... 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)

影响南京地区的两次典型空气污染过程分析 ..... 王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)

济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究 ..... 刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)

活性炭分解臭氧机制研究 ..... 刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)

大气 O<sub>3</sub> 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响 ..... 王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)

铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响 ..... 王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)

锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染 ..... 郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)

《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)

## 山地城市地表径流源区水质特征监测研究

李立青<sup>1</sup>, 单保庆<sup>2</sup>, 赵建伟<sup>3</sup>, 郭树刚<sup>1</sup>, 高勇<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 华中农业大学植物营养与生态环境研究室, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 2010 年通过对山地城市重庆江北城区 10 个地表源区 5 次地表径流过程水样的采集与分析, 研究城区地表径流水质特征及其影响因素, 以期对地表径流污染源区控制提供科学依据。结果表明, 山地城市重庆地表径流污染过程具有明显的初期冲刷效应, 降雨强度影响地表径流水质的变化, 地表径流水质的波动同雨强的变化呈同步趋势, 雨强增加, 污染物浓度下降, 表现出水质变化的随机性。山地城市重庆地表径流 COD、TP 与 TSS 具有显著的正相关性。悬浮物是城市地表径流污染的主要污染物, 而且是有机物质和磷素的载体。有机物质与磷素主要以颗粒态的形式存在, 而氮素以溶解态的氨和硝酸盐为主。山地城市地表径流水质 TSS、COD、TN、TP 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在各个源区的差异显著, 商业区和城市交通主干道 TSS、COD 和 TP 的浓度最高, 其次为城市支路、居民区道路、停车场和屋顶。不透水地表功能、交通流量、人流量和卫生管理是影响地表径流水质的主要因素。城市商业区、交通主干道和人流量高的居民区道路是城市地表径流污染的关键源区。

**关键词:** 地表径流; 水质; 源区监测; 空间分异; 山地城市

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3397-07

## Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring

LI Li-qing<sup>1</sup>, SHAN Bao-qing<sup>2</sup>, ZHAO Jian-wei<sup>3</sup>, GUO Shu-gang<sup>1</sup>, GAO Yong<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Laboratory of Plant Nutrition and Ecological Environment Research of Huazhong Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Stormwater runoff samples were collected from 10 source areas in Mountain City, Chongqing, during five rain events in an attempt to investigate the characteristics of runoff quality and influencing factors. The outcomes are expected to offer practical guidance of sources control of urban runoff pollution. The results indicated that the stormwater runoff of Mountain City presented a strong first flush for almost all events and constituents. The runoff quality indices were also influenced by the rainfall intensity. The concentration of TSS, COD, TN and TP decreased as the rainfall intensity increased. The concentrations of COD and TP in stormwater runoff were highly correlated with TSS concentrations. Suspended solid matter were not only the main pollutant of stormwater runoff but also served as the vehicle for transport of organic matter and phosphorus. Organic matter and phosphorus in stormwater runoff were mainly bound to particles, whereas nitrogen was predominantly dissolved, with ammonia and nitrate. A significant difference of stormwater runoff quality was observed among the ten monitored source areas. The highest magnitude of urban stormwater runoff pollution was expected in the commercial area and the first trunk road, followed by the minor road, residential area, parking lot and roof. Urban surface function, traffic volume, population density, and street sweeping practice are the main factors determining spatial differentiation of urban surface runoff quality. Commercial area, the first trunk road and residential area with high population density are the critical sources areas of urban stormwater runoff pollution.

**Key words:** stormwater runoff; water quality; source area monitoring; spatial differentiation; mountain city

城市化进程中大量不透水地表的出现, 不仅在量上改变了区域地表径流, 而且在质的方面也对其产生深刻的影响, 地表径流中含有相当数量的悬浮颗粒物、营养盐、重金属和有机污染物。由于城市地表径流往往直接排入城市河流、湖泊或是海湾, 恶化接纳水体水质和破坏水生生态系统。自 20 世纪 80 年代以来欧美国家相继开展城市地表径流污染的监测, 以获取不同尺度(源区和集水区)地表径

流水质<sup>[1~3]</sup>。目前国际上对地表径流污染的控制研究中, 低影响发展技术是新一代城市地表径流污染控制最佳管理措施, 非常重视地表径流污染源区的

收稿日期: 2011-09-21; 修订日期: 2012-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(40801207); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07315-001, 2008ZX07209-003)

作者简介: 李立青(1977~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为城市地表径流污染控制, E-mail: li-liqing@163.com

水量、水质控制<sup>[4-6]</sup>。我国近年来,陆续开展北京、西安、武汉、上海、镇江、澳门等城市地表径流的水质监测分析,积累了大量的数据<sup>[7-19]</sup>,为地表径流污染源区控制提供了科学依据。本研究选取山地城市重庆,开展源区地表径流水质的监测,通过积累山地城市地表径流水质监测数据,获取山地城市地表径流污染的基本特征,分析山地城市地表径流主要污染物及主要影响因素,以期为山地城市地表径流污染负荷预测和开展地表径流污染源区控制提供

科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 监测源区的基本特征

本次对地表径流污染的监测研究主要集中在重庆市江北城区,根据地表功能、交通流量、土地利用共选取了 10 个地表径流监测源区,其中 2 个屋面,1 个居民区庭院,7 个路面,各监测源区汇水面积的变化范围在 60 ~ 200 m<sup>2</sup>,基本环境特征见表 1。

表 1 重庆江北城区 10 个地表径流监测源区的基本特征

Table 1 Characteristics of 10 source areas for monitoring stormwater in Chongqing City

序号	测点位置	编号	周围土地利用/功能	环境特征
1	大竹林水泥屋面	W1	居住区	位于城郊区,为居民区屋顶雨水出水
2	大竹林沥青屋面	W2	居住区	位于城郊区,为居民区屋顶的雨水出水
3	聚信广场停车场	T1	小型商业区	位于龙脊路旁边,主要为酒店服务业
4	大竹林庭院地表	SJ1	居住区	居民区庭院,少有车辆通行
5	大庆小区道路	DJ2	居住区	居民区内道路,主要为人行,车辆少,路边有小商店、理发馆等
6	长安厂路	CAG1	居住/工业区	长安汽车厂桥上,车流量小,主要为汽车厂进出车辆
7	大竹林居民区路	SZL1	居住区	居民区道路,车流量较小,人流量较大
8	龙华支路	LHL2	交通区	城市次级道路,车流量相对较少
9	红石大道	HSL3	交通区	城市主干道,交通量较大
10	观音桥路	GS1	商业/交通	位于江北商圈,人类活动频繁车流量大

### 1.2 径流水样采集与分析

2010 年 4 ~ 8 月监测研究期间,对上述 10 个源区进行地表径流污染监测,共采集 5 场降雨,基本特征见表 2。从降雨产生径流开始每隔 5 min 或 10

min 取径流水样 1 个,直至径流水质趋于稳定。由于在地表径流污染源区采样,不易进行流量的测定,因而利用自动雨量计监测的降雨过程反映径流流量的变化。

表 2 2010 年监测降雨的基本特征

Table 2 Characteristics of rainfall events sampled in 2010

降雨事件	降雨日期 (年-月-日)	降雨量 /mm	降雨历时 /h	降雨强度 /mm·h <sup>-1</sup>	最大降雨强度 /mm·h <sup>-1</sup>
1	2010-04-10	21.7	10.3	2.1	3.3
2	2010-05-05	57.3	23.0	1.2	9.9
3	2010-07-04	68.1	17.8	3.8	24.5
4	2010-07-09	59.9	4.0	15.0	53.6
5	2010-08-21	6.8	11.5	0.6	2.6

城市地表径流污染物组成复杂,本研究主要分析的水质指标为 TSS、COD、TN、TP、DTN(溶解性 TN)、DTP(溶解性 TP)、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N。TSS、COD、TN 和 TP 原样直接测定,过 0.45 μm 滤膜测定 DTN、DTP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N。水质分析测定均采用标准分析方法进行<sup>[20]</sup>。

### 1.3 数据处理

本研究的主要目的是对山地城市重庆地表径流水质的调查,并分析影响城市地表径流水质的主要因素。由于监测的是城市不透水地表源区小汇水单元的径流水质,屋面采样点是在落水管口,而路面采样点是在径流汇入雨水篦子前收集,不易测定流量,

因而仅利用降雨强度过程反映地表径流的流量,由于汇水单元范围多在 60 ~ 200 m<sup>2</sup>,汇流时间短,雨强基本可以反映流量的变化过程。因此在水质指标的分析过程中,没有计算单次降雨的流量加权平均浓度(EMC),每个源区水质的表征是利用多次降雨多次取样水质监测分析结果的中值。

## 2 结果与分析

### 2.1 次降雨城市地表径流水质变化过程

图 1 ~ 3 是 2010 年 5 月 5 日、7 月 4 日、8 月 9 日重庆江北典型不透水地表径流水质变化过程。不透水地表源区径流污染排放过程的主要特征是污染

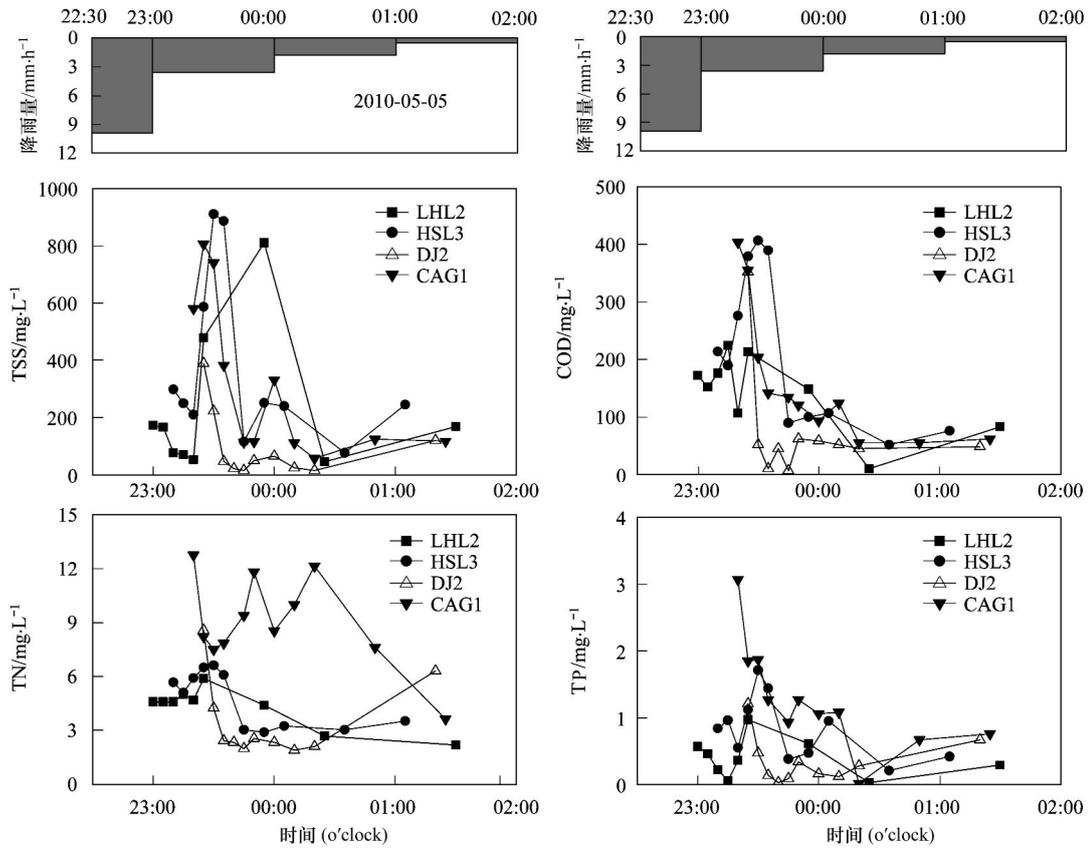


图1 重庆江北4个道路地表径流污染过程

Fig. 1 Temporal variation of rainfall intensity and water quantity of runoff from four urban roads

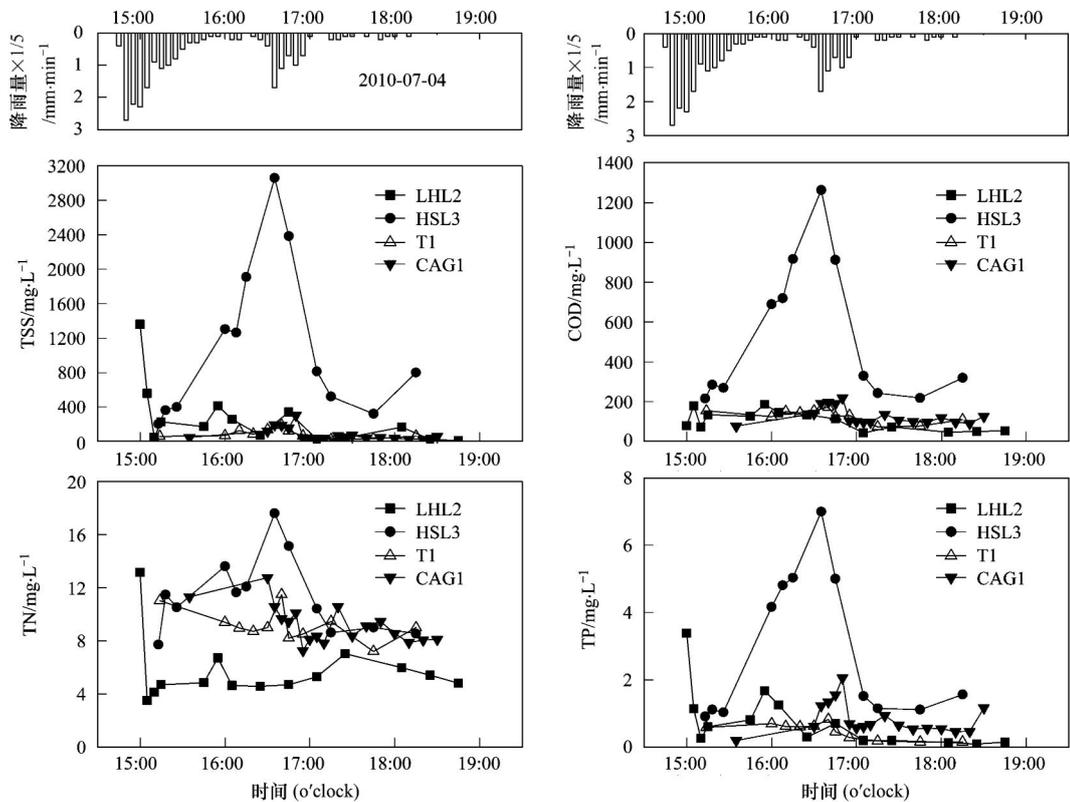


图2 重庆江北3个道路和1个停车场地表径流污染过程

Fig. 2 Temporal variation of rainfall intensity and water quantity of runoff from three roads and one parking lot

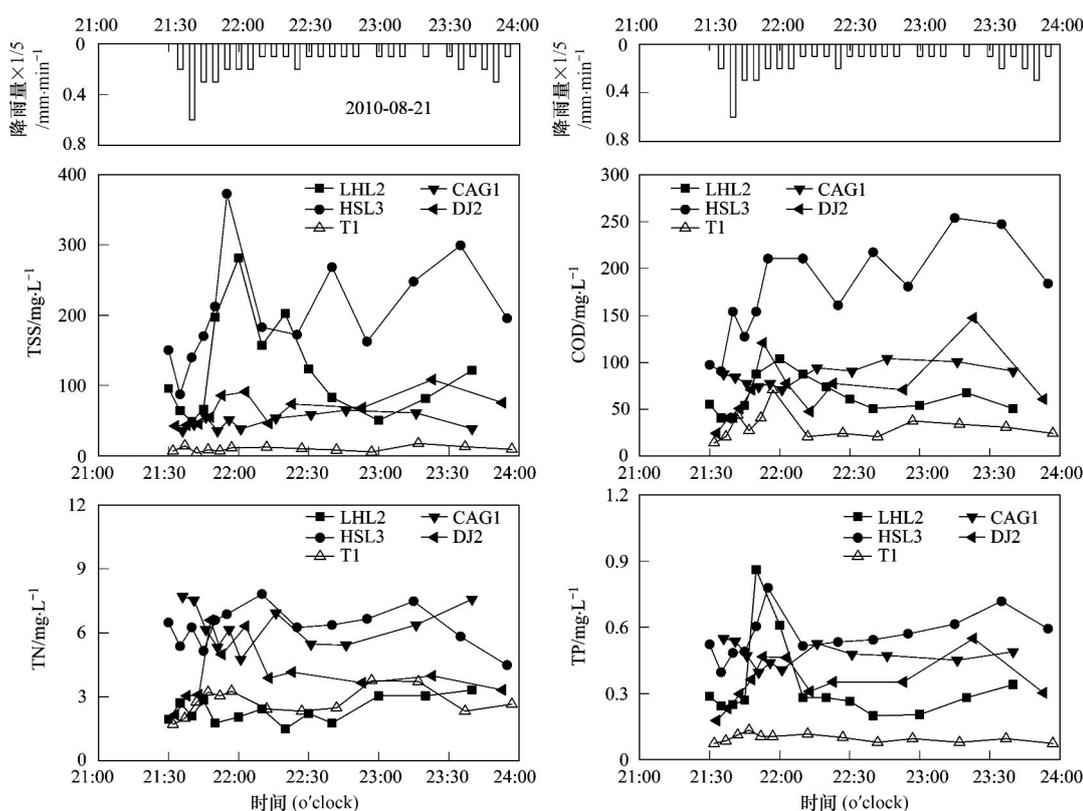


图3 重庆江北5个道路地表径流污染过程

Fig. 3 Temporal variation of rainfall intensity and water quantity of runoff from four roads and one parking lot

物浓度在降雨径流的初期相对较高,随着降雨径流过程的延续,污染物浓度逐渐下降并趋于稳定. 降雨径流初期,降雨径流的溶解冲刷作用占主导地位,污染物浓度相对较高. 在降雨径流后期,地表污染物的持续减少,降雨径流的稀释作用逐渐占主导地位,从而浓度降低. 在整个降雨径流过程中,受降雨强度的影响,地表径流水质的波动同雨强的变化呈同步趋势,雨强增加,污染物浓度下降,表现出水质变化的随机性. 其中5月5日、7月4日由于初期降雨强度高,地表径流冲刷能力强,所以初期径流中污染物的浓度高,随后污染物浓度下降并趋于稳定. 8月9日整场降雨强度弱,冲刷程度不明显,因而径流水质在整场降雨过程中变化不明显. 因此降雨强度主导着不透水地表污染物的输出,是影响初期冲刷的决定性因素.

## 2.2 城市地表径流水质相关性及形态特征

图4为主要道路监测水质TSS与COD、TN、TP的相关性,表现出不同程度的相关性,其中COD与TSS的相关性最为显著( $R^2 = 0.92$ ),其次是TP( $R^2 = 0.74$ ),TN最小( $R^2 = 0.55$ ). 城市地表径流污染过程主要表现为冲刷地表颗粒物与溶解部分污染物,其中冲刷过程占据主导,因而COD、TN、TP与

TSS具有明显的相关性,TSS是城市地表径流污染的主要污染物,而且是其他污染物的载体,特别是有物质与磷素多以颗粒态存在,而氮素主要为溶解态的氨和硝酸盐,所以与TSS的相关性相对较小. 图5是2010年4月10日大竹林镇居民区道路地表径流污染过程氮素与磷素组成的变化过程. 溶解性总氮与总氮变化趋势一致,而且溶解性总氮与总氮的浓度非常接近,地表径流氮素污染过程中溶解态占相当大的比例,平均为 $88\% \pm 5\%$ ,主要组成为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,分别占溶解性总氮的 $41\% \pm 7\%$ 和 $48\% \pm 2\%$ . 而地表径流磷素污染过程中,颗粒态磷占非常高的比例,平均为 $95\% \pm 2\%$ ,溶解态磷仅占很少部分.

## 2.3 城市地表径流水质的空间分异性

图6是对重庆江北10个地表径流源区水质指标的统计分析,表3为水质指标的统计中值. 不同类型源区水质指标存在显著差异,同一类型的源区不同监测位置水质指标也存在明显的差异,城市地表径流水质存在明显的空间分异性. TSS、COD、TN、TP和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在各个测点的差异最为显著,在商业区观音桥和城市交通主干道红石大道TSS、COD和TP的浓度最高,其次为城市支路、居民区道路和

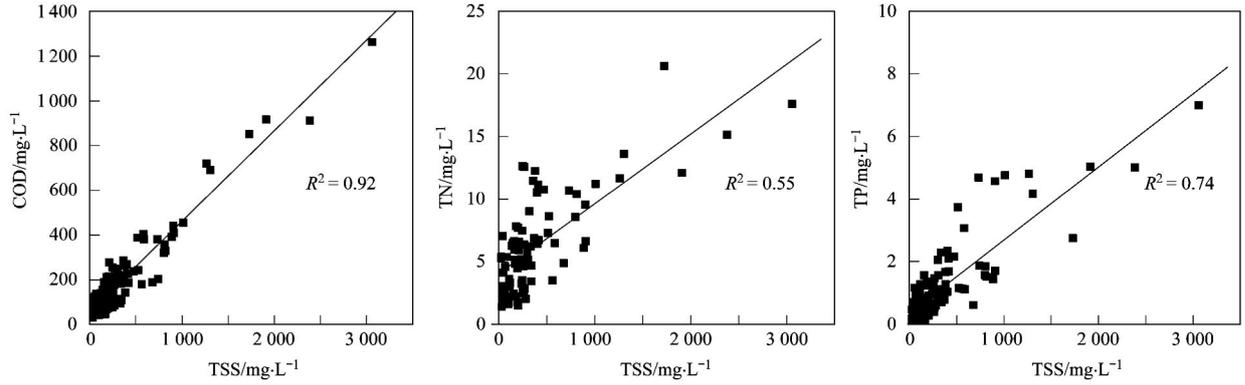


图 4 城市地表径流中 COD、TN、TP 与 TSS 的相关性

Fig. 4 Relationships between TSS and COD, TN and TP in urban stormwater runoff

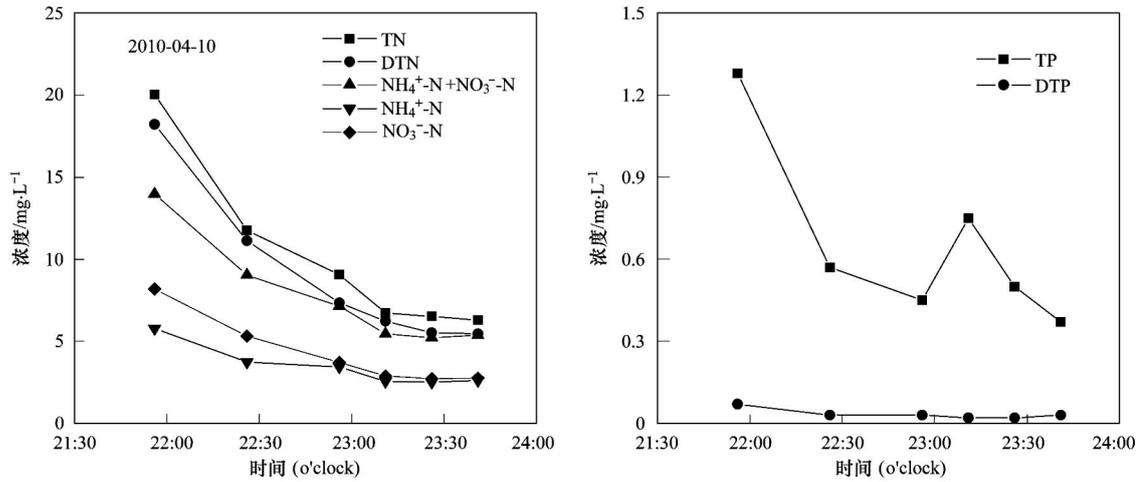


图 5 城市地表径流中 TN 与 TP 的形态特征(大竹林居民区道路)

Fig. 5 Temporal variation of nitrogen and phosphorus composition during stormwater (residential road)

停车场,屋面径流水质相对较低,特别是水泥屋面。 $\text{NO}_3^-$ -N在各测点的差异不显著. 交通流量、人流量和地表卫生管理是影响地表径流水质的主要因素,交通流量和人流量越大地表径流水质越差,特别是

交通流量与人流量同时高的地段(观音桥)地表径流水质最差. 因此,城市商业区、交通干道和人流量高的居民区道路是城市地表径流污染的关键源区,主要污染物为 TSS、COD、TN、TP 和 $\text{NH}_4^+$ -N.

表 3 重庆江北城区 10 个地表径流污染源区水质统计中值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Comparison of median concentrations of stormwater runoff pollutants for 10 monitored source areas/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

序号	测点位置	编号	土地利用/功能	TSS	COD	TN	TP	$\text{NH}_4^+$ -N	$\text{NO}_3^-$ -N
1	大竹林水泥屋面	W1	居住区	8.3	50.1	4.16	0.07	0.70	1.59
2	大竹林沥青屋面	W2	居住区	18.0	140.7	4.32	0.29	1.51	1.82
3	聚信广场停车场	T1	商业区	63.0	103.7	6.74	0.24	3.51	1.18
4	大竹林庭院地表	SJ1	居住区	68.0	99.5	7.26	0.49	2.08	2.37
5	大庆小区道路	DJ2	居住区	60.3	55.5	4.26	0.32	2.48	0.96
6	长安厂路	CAG1	居住/工业	59.0	98.7	8.06	0.62	5.18	1.30
7	大竹林居民区路	SZL1	居住区	138.7	96.3	4.89	0.44	1.79	1.44
8	龙华支路	LHL2	交通区	157.0	87.3	3.51	0.30	0.91	1.31
9	红石大道	HSL3	交通区	259.9	216.3	6.55	0.81	3.73	2.64
10	观音桥路	GS1	商业/交通	322.0	180.3	6.87	1.62	2.44	1.79

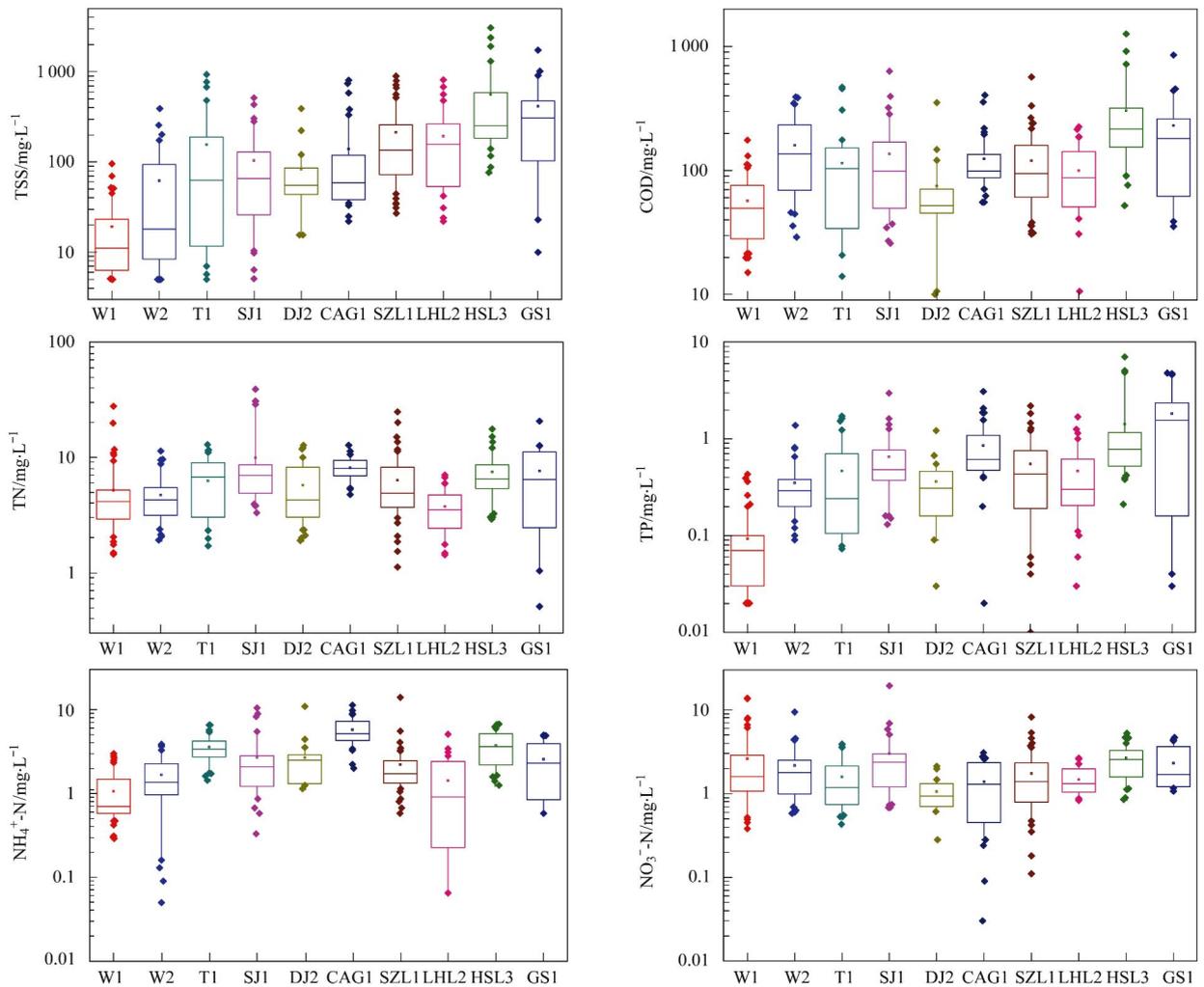


图6 山地城市重庆地表径流源区水质空间分异性

Fig. 6 Spatial differentiation of stormwater quality for 10 monitored source areas

### 3 结论

(1) 山地城市重庆地表径流污染过程具有明显初期冲刷效应,降雨强度影响地表径流水质的变化,地表径流水质的波动同雨强的变化呈同步趋势,雨强增加,污染物浓度下降,表现出水质变化的随机性。

(2) 山地城市重庆地表径流中 COD、TN、TP 与 TSS 具有不同程度的相关性,其中 COD 与 TSS 的相关性最为显著( $R^2 = 0.92$ ),其次是 TP( $R^2 = 0.74$ ), TN 最小( $R^2 = 0.55$ )。TSS 是城市地表径流污染的主要污染物,而且是其他污染物的载体,特别是有机物质与磷素多以颗粒态存在,而氮素以溶解态的氨和硝酸盐为主。

(3) 山地城市地表径流水质 TSS、COD、TN、TP 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在各个源区的差异显著,商业区和城市交

通主干道 TSS、COD 和 TP 的浓度最高,其次为城市支路、居民区道路和停车场,屋面径流水质相对较低。交通流量、人流量和地表卫生管理是影响地表径流水质的主要因素。商业区、交通干道和人流量高的居民区道路是城市地表径流污染的关键源区。

#### 参考文献:

- [1] US EPA. Results of the nationwide urban runoff program[R]. PB 84- 185552. Washington, D C: U. S. Environmental Protection Agency, 1983.
- [2] Maestre R A, Hyche H, Togawa N. The updated National Stormwater Quality Database (NSQD), version 3[R]. Chicago: Water Environment Federation Technical Exposition and Conference, 2008.
- [3] Zgheib S, Moilleron R, Saad M. Partition of pollution between dissolved and particulate phases: What about emerging substances in urban stormwater catchments? [J]. Water Research, 2011, 45(2): 913-925.
- [4] Montalto F, Behr C, Alfredo K, et al. Rapid assessment of the

- cost-effectiveness of low impact development for CSO control[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, **82**(3): 117-131.
- [ 5 ] Dietz M E, Clausen J C. Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, **87**(4): 560-566.
- [ 6 ] Davis A P, Shokouhian M, Sharma H, *et al.* Water quality improvement through bioretention media: nitrogen and phosphorus removal[J]. *Water Environment Research*, 2006, **78**(3): 284-293.
- [ 7 ] 车武, 欧岚, 汪慧贞, 等. 北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, **3**(1): 33-37.
- [ 8 ] 欧阳威, 王玮, 郝芳华, 等. 北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(9): 1249-1256.
- [ 9 ] 张巍, 张树才, 万超, 等. 北京城市道路地表径流及相关介质中多环芳烃的源解析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1478-1483.
- [ 10 ] 陈莹, 赵剑强, 胡博. 西安市城市主干道路面径流污染及沉淀特性研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(2): 331-336.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 李贺, 李田, 李彩艳. 上海市文教区屋面径流水质特性研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 47-51.
- [ 13 ] 王彪, 李田, 孟莹莹, 等. 屋面径流中营养物质的分布形态研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3035-3042.
- [ 14 ] 赵建伟, 单保庆, 尹澄清. 城市旅游区降雨径流污染特征——以武汉动物园为例[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(7): 1062-1067.
- [ 15 ] 李立青, 朱仁肖, 郭树刚, 等. 基于源区监测的城市地表径流污染空间分异性研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 2896-2904.
- [ 16 ] 边博, 朱伟, 黄峰, 等. 镇江城市降雨径流营养盐污染特征研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 19-25.
- [ 17 ] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市路面地表径流特征分析[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(4): 469-473.
- [ 18 ] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门屋面径流特征初步研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(7): 1076-108.
- [ 19 ] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 607-612.
- [ 20 ] 国家环境保护总局. 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.

## CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake .....	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau .....	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis .....	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data .....	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway .....	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index .....	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea .....	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae .....	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea .....	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake: A Simulation Study .....	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event .....	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment .....	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area .....	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring .....	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan .....	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet .....	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin .....	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area .....	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin .....	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary .....	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China .....	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators .....	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae .....	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> Modified GAC in the Presence of H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation .....	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside .....	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers .....	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation .....	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter .....	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact .....	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation .....	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties .....	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor .....	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity .....	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17β-estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM .....	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment .....	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model .....	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate .....	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants .....	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway .....	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk .....	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments .....	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals .....	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(III) Absorption .....	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2 .....	ZHANG Yu-xiu, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain .....	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain .....	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period .....	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N <sub>2</sub> O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain .....	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing .....	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer .....	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon .....	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O <sub>3</sub> on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean .....	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress .....	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting .....	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

# 《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10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 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

国内外公开发行人