

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑菌活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

城市道路径流的排污特征

武俊良^{1,2,3}, 任玉芬^{2*}, 王雪梅^{1,3}, 王效科², 陈利顶², 刘刚才¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了解城市道路径流污染物的排放特征, 于2013年6~9月期间, 观测了北京市区内环路降雨径流污染的状况, 并分析了径流中颗粒物、氮和磷的排放特征及其关系, 在此基础上评估了氮、磷和颗粒物的负荷。结果表明道路径流中颗粒物主要是1~10 μm 粒径的为主, 占60%, 道路径流中89%的氮是以溶解态排放(粒径小于0.45 μm), 80%的磷是以颗粒态排放。根据电导率(EC)和总悬浮颗粒物(TSS)与总氮(TN)和总磷(TP)相关性关系, EC和TSS可分别作为城市道路降雨径流溶解态氮和颗粒态磷污染程度的指示指标。据估算, 北京环路径流中颗粒物、氮和磷污染物单位面积年负荷分别为16 725.69、1 777.91和24.23 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。道路径流污染物的排放特征为城市非点源污染的管理及其降雨径流污染物控制方法的选择提供了科学依据。

关键词: 城市道路径流; 氮; 磷; 颗粒物; 排放特征

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3691-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.10.017

Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater

WU Jun-liang^{1,2,3}, REN Yu-fen^{2*}, WANG Xue-mei^{1,3}, WANG Xiao-ke², CHEN Li-ding², LIU Gang-cai¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To understand the pollution character of urban road runoff, the concentrations of TSS, EC, N and P in the ring road runoff of Beijing from June to September 2013 were evaluated, the correlations among pollutants were examined, and the load of TSS, N and P were estimated. Result showed that the small particulates in the range of 1-10 μm consisted of 60% TSS in the road runoff. Totally 89 percent of the nitrogen (N) was dissolved phase state in the road runoff, 80 percent of the phosphorus (P) was particulate phase state in the road runoff. Based on the characteristics of correlations between EC, TSS and TN, TP, EC and TSS were the surrogate indexes of pollution degree assessment for the dissolved N and particulate P in the urban road runoff, respectively. Based on our results, the SS, N and P year load per unit area in Beijing ring road runoff were 16 725.69, 1 777.91 and 24.23 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, respectively. Our findings described the pollutant wash off character in urban road runoff, which provide a scientific basis for management of nonpoint pollution in a city and an alternative method for controlling pollution.

Key words: urban road runoff; nitrogen; phosphorus; suspend solid; wash-off characterization

城市降雨径流中氮和磷污染导致的水体富营养化成为城市周围水环境污染的重要问题^[1,2]。随着点源污染的控制, 城市面源污染管理问题将成为未来城市环境问题管理的一个非常重要的领域。到目前为止, 我国许多的学者开展了城市降雨径流污染方面的研究工作^[3~10]。城市道路径流被认为是一个重要的城市面源污染源, 以北京2008年为例, 城市道路面积约占城市面积的30%。城市道路径流中颗粒污染物, 由于其可作为其他污染物的载体而备受关注^[11~15]。目前尽管在城市道路降雨径流中氮、磷和颗粒物浓度和污染物初始排放特征等方面已经开展了较多的研究^[16~19], 但径流中氮和磷污染物排放形态, 及其与颗粒物浓度与电导率之间的关系研究较少, 特别是相关北京道路径流的研究还鲜有报道。本文以北京市环路为研究区域, 分析了北京市

道路降雨径流中颗粒物、粒径、氮和磷的排放特征, 以期在城市道路径流污染的管理和控制提供科学依据。

1 材料与方法

北京市城区的快速道路(环路)和交通干道上共设置了6个监测点, 采样点的位置见图1。其中, 城市快速交通道路有5个采样点, 分别位于钟楼北桥, 苏州桥, 联想桥, 和平西桥和惠新西桥, 城市交通干道采样点位于万泉河桥, 采样点所在道路特征见表1。各采样点的日均车流量大于3万辆。考虑到

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-04-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230633, 41030744)

作者简介: 武俊良(1980~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市面源污染, E-mail: junliangwu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yfren@cees.ac.cn

采样的方便和安全,所有采样点均位于环路道路立交桥下水管处. 在立交桥的雨水下水口处放置收集装置,当路面产生径流时,等比例全过程收集流入出水口的雨水.

表 1 采样点道路特征¹⁾

Table 1 Characteristic of the road sampled					
道路	种类	里程/km	宽/m	面积/万 m ³	调研地点
快速道路	二环路	32.70	18	58.86	钟楼北桥
	三环路	48	18	86.40	苏州桥、联想桥和平西桥
	四环路	65.30	18	117.54	万泉河桥
	主干道	861	18	1 549.80	惠新西桥

1) 数据来源于北京市统计局

径流样品(记录体积,一般需要 4~5L)分别过 200、100 和 50 μm 的尼龙筛和 10 μm、0.45 μm 孔径的滤膜获取不同粒径范围内的颗粒物. 过 50 μm 筛后,取 500 mL 过滤后水样过 10 μm 粒径的滤膜,之后水样过 0.45 μm 的滤膜. 10 μm、0.45 μm 的滤膜过滤后用 40 mL 的超纯水,超声清洗滤膜上的过滤物,最后定容到 50 mL. 200、100 和 50 μm 的尼龙筛上的颗粒物用超纯水清洗,然后定容到 50 mL,取定容后的样品测定总氮(TN)和总磷(TP).



图 1 道路采样点分布示意
Fig. 1 Sampling sites of urban road runoff

TN 和 TP 的测定分别采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(GB 11894-89)和过硫酸钾氧化-钼蓝比色法(GB 11893-89). 降雨径流中悬浮颗粒物的粒径分布采用激光粒度测试仪(Mastersizer 2000,英国马尔文仪器有限公司 Malvern)测定.

2 结果与讨论

2.1 城市道路径流水质特征

城市道路径流水质差(见表 2). pH、电导率(EC)、总悬浮颗粒物(TSS)、总氮(TN)和总磷(TP)的平均值分别为 7.85、703.20 μS·cm⁻¹、151.59 mg·L⁻¹、12.96 mg·L⁻¹和 0.15 mg·L⁻¹. TN 的平均浓度显著超国家地表水 IV 水体排放限值大约 10 倍,最高浓度可达 74.00 mg·L⁻¹,大约超标 50 倍. 颗粒物是道路径流中影响到径流水质的另外一个因素,平均浓度为 151.59 mg·L⁻¹. 总磷的平均浓度为 0.15 mg·L⁻¹,小于国家排放限值,但是在监测期间最高浓度可达 0.67 mg·L⁻¹,超过大约 2 倍. 依据单因子评价指标分析,城市道路径流水质属于劣 5 类水质. 因此,道路径流未经处理直接用作市政用水或者排放到周围水体,具有潜在的环境风险.

表 2 实验期间道路径流水质

项目		水质参数				
		pH	EC/μS·cm ⁻¹	TSS/mg·L ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹
道路径流	均值	7.85	703.20	151.59	12.96	0.15
	最大值	9.68	1 326.00	343.00	74.29	0.67
	最小值	6.90	87.00	52.00	2.47	0.01
	标准差	0.64	339.17	97.39	13.29	0.18
国家地表水 IV 类水体排放标准 (GB 3838-2002)		6~9			≤ 1.5	≤ 0.3

降雨径流污染物的浓度在不同降雨场次之间变异非常大(见表 2). 以 TSS 和 TN 为例,TSS 最高值为 343.00 mg·L⁻¹,最小值为 52.00 mg·L⁻¹,相差大

约 6 倍. TN 浓度的最高值为 74.29 mg·L⁻¹,最小值为 2.47 mg·L⁻¹,相差高达 37 倍. 除了降雨径流污染的变异程度大,导致降雨径流污染难于预测和治

理外,降雨径流中主要污染物种类和排放特征,即降雨径流中污染物是以何种形式排放,排放量多少等信息也是道路径流污染治理技术选择的重要影响因素。

2.2 颗粒物排放特征

颗粒物粒径分析结果表明道路径流中粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒物占 10%, $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 粒径范围的颗粒物占 60%, $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 粒径范围颗粒物占 25%, 大于 $50\ \mu\text{m}$ 粒径颗粒物占 5% (见图 2)。虽然采样地点和降雨不同,但径流中颗粒物中粒径的分布相同,均分布在 $1\sim 100\ \mu\text{m}$ 的范围内,且主要以粒径小于 $50\ \mu\text{m}$ 的细小颗粒物为主。道路清扫和高强度的车流影响道路径流中颗粒物的分布。道路清扫能有效去除大颗粒物,但对细小颗粒物的去处效率较低^[20]。另外,高强度的车流量也可能会降低道路径流中大颗粒物的比例。

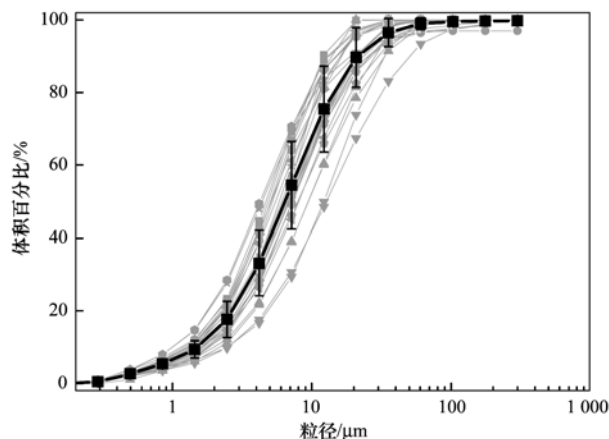


图2 道路径流中 TSS 粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution curve of road runoff

2.3 P 和 N 在不同粒径 SS 中分布

TSS 粒径分布实验结果表明,不同降雨和不同采样点道路径流中的颗粒物粒径分布差异很小,所以,2 次降雨 4 个地点径流水样被收集并分析道路径流中磷和氮在不同粒径颗粒物中分布,结果见图 3 和 4。颗粒态磷(粒径大于 $0.45\ \mu\text{m}$)排放占总磷的约 70%~90%。 $0.45\sim 10\ \mu\text{m}$ 粒径范围颗粒物中磷占总磷的 5%, $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 粒径范围颗粒物中磷占到总磷的 65%, $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 粒径范围的颗粒物中磷的含量为 4%,大于 $100\ \mu\text{m}$ 粒径范围的颗粒物中磷含量大约为 1%~2%。磷是以小粒径的颗粒态排放,和前人的研究结果一致^[20~22]。除了小颗粒物具有更大的比较面积,容易吸收结合原因外,和磷化合物特征也有关系。磷在地球生物化学循环过程中

是一种沉积型循环物,大部分含磷化合物是以颗粒物形式而迁移和沉积。

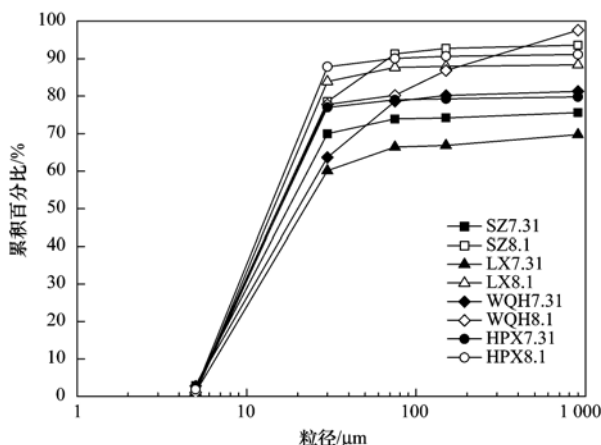


图3 不同粒径颗粒物中磷的分布

Fig. 3 Total phosphorus associated with different particle size ranges for three storm events sampled in the road runoff

氮在不同粒径颗粒物分布情况和磷不同。溶解态氮占道路降雨径流中总氮的 85%~95%,平均值为 89%。 $0.45\sim 10\ \mu\text{m}$ 粒径的颗粒物中氮的含量占 TN 的 2% 左右, $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 粒径的颗粒物中氮的含量为 10%, $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 粒径的颗粒物中氮的含量为 1%,大于 $100\ \mu\text{m}$ 的颗粒物中氮的含量为 1%。小于 $50\ \mu\text{m}$ 的颗粒物中氮的含量为 12% (见图 4)。

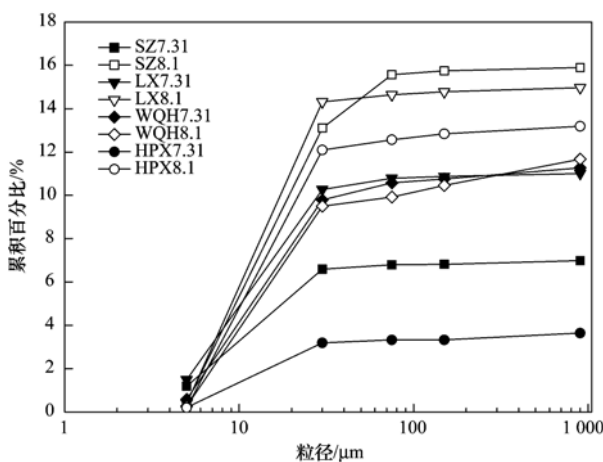


图4 不同粒径颗粒物中氮的分布

Fig. 4 Total nitrogen associated with different particle size ranges for three storm events sampled in the road runoff

Vaze 等^[21]研究指出城市暴雨径流中大约 90% 氮和磷是以颗粒物结合态形式排放。有研究也表明 60%~80% 的总磷和 50%~60% 的总氮的排放和颗粒物相关^[23],而氮以溶解态排放的规律和前人的研究结果相反。氮的形态和前人研究结果不同可能和径流中氮的来源有关,已有研究表明北京市降雨

径流中氮主要来源于大气沉降^[24,25].

2.4 TN、TP 和 EC、TSS 之间的关系

6 个降雨监测点,18 次降雨,42 个径流样品,以 50 为单位,TSS 浓度从小到大,分为 7 级,计算每级内平均值,同时计算氮和磷平均浓度,然后分析 TN、TP 和 TSS 之间的关系,其结果见图 5. 结果表明,道路径流中 TP 和 TSS 之间具有较好的相关性,而 TN 相关性较差. TN、TP 和 EC 之间的关系采用相同方法处理数据,其结果见图 6. 结果表明 TN 和 EC 之间具有很好的相关性,而 TP 和 EC 之间的相关性较差.

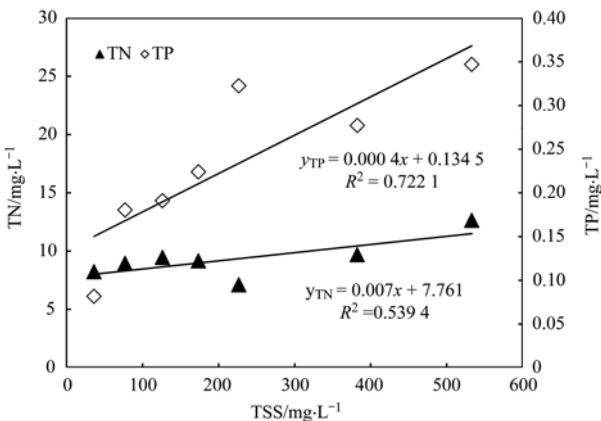


图 5 道路降雨径流中 TN、TP 和 TSS 的关系

Fig. 5 Correlation of total nitrogen, total phosphorus and total suspended solid in the road runoff

研究表明 EC 和 TSS 可作为降雨径流中污染物排放形态分类的指示指标. 污染物与 TSS 相关性较强,与 EC 相关性弱,颗粒物的比例较大,反之污染物主要是以溶解态形式为主^[19,26]. 此外,颗粒物在降雨径流中污染物的转移和固定污染物方面具有非常重要的作用. 颗粒物可作为重金属在水体中转移的载体^[9,20],大量的营养元素氮和磷结合在城市道路街尘和城市周围水体底泥中^[21]. 所以,通过研究降雨径流中 TN 和 TP 与 EC 和 TSS 浓度之间的关系可以进一步确认降雨径流中氮和磷污染物排放的形态. TN 和 TP 与 EC 和 TSS 之间的关系表明,城市道路径流中的氮主要是溶解态排放,而磷主要是以颗粒态排放.

同时降雨径流中 EC 和 TSS 与 TN 和 TP 相关关系表明, EC 和 TSS 可分别作为降雨径流溶解态氮和颗粒态磷的污染程度的指示指标,EC 和 TSS 可分别解释径流中氮和磷浓度变化的 75.07% 和 72.21%. 因此,EC 和 TSS 作为城市道路降雨径流氮和磷污染的预测指标.

2.5 环路段径流中 TSS、TN 和 TP 排放量估算

通过监测北京市 2013 年 6~9 月期间 19 场降

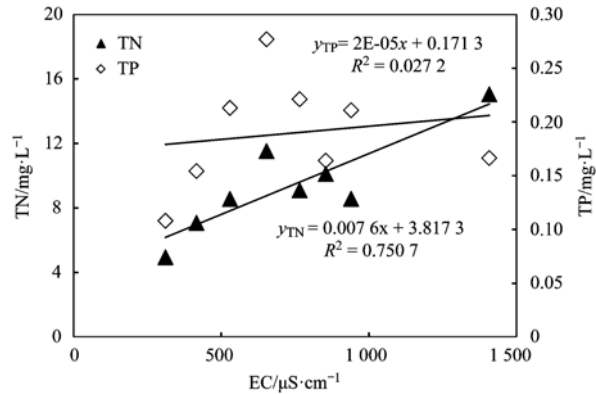


图 6 TN、TP 和 EC 之间的关系

Fig. 6 Correlation of the concentration TN, TP and EC in the road runoff

雨径流中污染物浓度,采用公式(1)计算单位面积道路径流中污染物年排放负荷(见表 3),污染物的年排放量采用公式(2)计算.

$$M_w = (P_1 \cdot c_{w1} + \dots + P_i \cdot c_{wi}) \cdot \Psi \quad (1)$$

式中, M_w : w 种污染物的单位面积年污染负荷, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; P_i : 第 i 次降雨量, mm; Ψ : 为径流系数(依据城市道路不透水面的径流系数 Ψ 为 0.85~0.95, GB 50014-2006), 为 0.90; c_{wi} : 为第 i 次降雨径流中 w 种污染物的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

$$L_w = M_w \cdot A \cdot 0.01 \quad (2)$$

式中, L_w : w 种污染物的年污染负荷, $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$; A : 研究区域面积, 万 m^2 .

单位面积道路径流中颗粒物的负荷最大,其次是氮,磷负荷最小. 以钟楼北桥为例,城市道路径流中颗粒物,氮和磷的单位面积年负荷分别为 $16\,725.69$ 、 $1\,777.91$ 和 $24.23 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 城市道路径流颗粒物二环路、三环路和四环路年排放量分别为 9.8、28.1 和 59.2 t. 氮年排放量分别为 1.0、3.5 和 2.5 t. 磷的年排放量分别为 14.3、44.7 和 80.7 kg.

氮和磷的排放规律在评估污染物排放负荷,制定污染物排放的管理政策等方面都会产生重要的影响. 依据降雨径流中颗粒物,氮和磷的排放规律(见表 4),北京市二环路、三环路和四环路降雨径流颗粒物 2013 年(6~9 月底)总排放量为 97.2 t,其中 $0.45 \sim 50 \mu\text{m}$ 和大于 $50 \mu\text{m}$ 粒径大小颗粒物排放量分别为 92.3 t 和 4.9 t,总氮为 7.0 t,其中溶解态氮为 6.3 t,总磷 0.14 t,颗粒态磷为 0.11 t. 由此可知,道路径流中氮和磷的去除需要采用不同的处理方法才能彻底去除由于降雨引发的城市道路径流氮和磷的污染.

表3 道路径流中 TSS,TP 和 TN 污染物排放负荷

Table 3 Pollution load in the road runoff

位置	TSS		TN		TP	
	$M/mg \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$	$L/kg \cdot a^{-1}$	$M/mg \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$	$L/kg \cdot a^{-1}$	$M/mg \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$	$L/kg \cdot a^{-1}$
二环路	16 725. 69	9 844. 7	1 777. 91	1 046. 5	24. 23	14. 3
三环路	32 575. 74	28 145. 4	4 080. 66	3 525. 7	51. 76	44. 7
四环路	50 369. 49	59 204. 3	2 088. 12	2 454. 4	68. 68	80. 7

表4 北京市环路径流中污染物负荷排放特征/kg

Table 4 Wash-off characteristic of load of pollution/kg

污染物	项目	二环路	三环路	四环路	合计
TSS	0. 45 ~ 50 μm	9 352. 50	26 738. 10	56 244. 10	92 334. 70
	> 50 μm	492. 20	1 407. 27	2 960. 20	4 859. 67
	总计	9 844. 70	28 145. 40	59 204. 30	97 194. 40
TN	颗粒态	104. 65	352. 57	245. 44	702. 66
	溶解态	941. 85	3 173. 13	2 208. 96	6 323. 94
	总计	1 046. 50	3 525. 70	2 454. 40	7 026. 60
TP	颗粒态	11. 44	35. 76	64. 56	111. 76
	溶解态	2. 86	8. 94	16. 14	27. 94
	总计	14. 30	44. 70	80. 70	139. 70

3 结论

北京城市道路降雨径流水质污染严重,属于劣五类水质,主要污染物为颗粒物,氮和磷. 城市道路径流颗粒物排放呈现浓度高,粒径小,且不同降雨场次之间变异程度大的特点. 氮是道路径流中主要超标的污染物,主要是以溶解态的形式排放. 道路径流中磷主要是颗粒态的形式排放,且主要是结合在10~50 μm 粒径的颗粒物上. 降雨径流中 EC 和 TSS 分别与径流中氮和磷具有显著的相关性,因此,EC 和 TSS 可分别作为降雨径流溶解态氮和颗粒态磷污染程度的指示指标,实现降雨径流污染的快速检测. 城市道路降雨径流颗粒物去除时应更加注意粒径较小颗粒物的去除效果,且氮和磷污染物需采用不同去除方式.

参考文献:

[1] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff [J]. Water Research, 2000, **34**(6): 1773-1780.

[2] Novotny V, Witte J W. Ascertaining aquatic ecological risks of urban stormwater discharges [J]. Water Research, 1997, **31**(10): 2573-2585.

[3] 夏青. 城市径流污染系统分析[J]. 环境科学学报, 1982, **2**(4): 271-278.

[4] 车武, 汪慧珍, 任超, 等. 北京城区屋面雨水污染及利用研究[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(6): 57-61.

[5] 赵剑强, 刘珊, 邱立萍, 等. 高速公路路面径流水质特性及排污规律[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(5): 445-448.

[6] 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

[7] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 沥青油毡屋面降雨径流污染物浓度历时变化研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(4): 601-606.

[8] 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.

[9] 李贺, 石峻青, 沈刚, 等. 高速公路雨水径流重金属污染特性研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1621-1625.

[10] 张千千, 王效科, 郝丽岭, 等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 76-82.

[11] Aryal R K, Furumai H, Nakajima F, *et al.* Dynamic behavior of fractional suspended solids and particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in highway runoff [J]. Water Research, 2005, **39**(20): 5126-5134.

[12] Fang G C, Chang K F, Lu C, *et al.* Estimation of PAHs dry deposition and BaP toxic equivalency factors (TEFs) study at Urban, Industry Park and rural sampling sites in central Taiwan, Taichung [J]. Chemosphere, 2004, **55**(6): 787-796.

[13] Pereira E, Baptista-neto J, Smith B J, *et al.* The contribution of heavy metal pollution derived from highway runoff to Guanabara Bay sediments-Rio de Janeiro/Brazil [J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2007, **79**(4): 739-750.

[14] Ha S Y, Kim G B, Yim U H, *et al.* Particle-size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust of Masan, Korea [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, **63**(2): 189-198.

[15] Long Y Z, Dai T G, Wu Q H. Sources and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust from the Chang-Zhu-Tan region, Hunan, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(2): 1377-1390.

[16] 李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 等. 北京市新建城区不透水地表

- 径流 N、P 输出形态特征研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3760-3767.
- [17] Taylor G D, Fletcher T D, Wong T H F, *et al.* Nitrogen composition in urban runoff-implications for stormwater management [J]. Water Research, 2005, **39**(10): 1982-1989.
- [18] Han Y H, Lau S L, Kayhanian M, *et al.* Characteristics of highway stormwater runoff [J]. Water Environment Research, 2006, **78**(12): 2377-2388.
- [19] Gan H Y, Zhuo M N, Li D Q, *et al.* Quality characterization and impact assessment of highway runoff in urban and rural area of Guangzhou, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **140**(1-3): 147-159.
- [20] Zhao H T, Li X Y, Wang X M, *et al.* Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **183**(1-3): 203-210.
- [21] Vaze J, Chiew F H S. Nutrient loads associated with different sediment sizes in the urban stormwater and surface pollutants [J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, **130**(4): 391-396.
- [22] Furumal H, Baimmer H, Bollner M. Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff [J]. Water Science & Technology, 2002, **46**(11-12): 413-418.
- [23] Hvitved-Jacobsen T, Johansen N B, Yousef Y A. Treatment systems for urban and highway run-off in Denmark [J]. Science of the Total Environment, 1994, **146-147**: 499-506.
- [24] 侯培强, 任玉芬, 王效科, 等. 北京市城市降雨径流水质评价研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 71-75.
- [25] 荆红卫, 华蕾, 郭婧, 等. 北京市水环境非点源污染监测与负荷估算研究[J]. 中国环境监测, 2012, **28**(6): 106-111.
- [26] Opher T, Friedler E. Factors affecting highway runoff quality [J]. Urban Water Journal, 2010, **7**(3): 155-172.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行