

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

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16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中芘解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

重庆市典型城镇区地表径流污染特征

王龙涛^{1,2}, 段丙政^{1,2}, 赵建伟^{1,2*}, 华玉妹^{1,2}, 朱端卫^{1,2}

(1. 华中农业大学资源与环境学院生态与环境工程研究室, 武汉 430070; 2. 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要:以重庆大渡口区建胜镇为典型区域,选取水泥瓦屋顶、石棉瓦屋顶、水泥平屋顶、居民区水泥路面、餐饮沥青路面、油库沥青路面等不透水下垫面和附近一条合流制溢流渠为采样点,研究了城镇地表径流中营养性污染物和重金属排放特征。结果表明,路面径流中 TSS、COD、TN、TP 平均质量浓度为 $(1\,681.2 \pm 677.2)$ 、 $(1\,154.7 \pm 415.5)$ 、 (12.07 ± 2.72) 、 $(3.32 \pm 1.15) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,普遍高于屋面径流污染物平均质量浓度: (13.3 ± 6.5) 、 (100.4 ± 24.8) 、 (3.58 ± 0.70) 、 $(0.10 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。不透水地表径流中,TDN、TDP 分别占 TN、TP 的 $62.60\% \pm 34.38\%$ 、 $42.22\% \pm 33.94\%$ 。与中心城区相比,本城镇地表径流污染物质量浓度一般较高。合流制溢流中,TSS、COD、TDN、TN、TDP、TP 为 (281.57 ± 308.38) 、 (231.21 ± 42.95) 、 (8.16 ± 2.78) 、 (10.60 ± 3.94) 、 (0.38 ± 0.23) 、 $(1.51 \pm 0.75) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,重金属质量浓度均未超过地表水环境质量 V 类标准。合流制溢流中大部分污染物存在初期冲刷效应,而 TSS 的初期冲刷效应较弱。合流制溢流中,COD、TP 与 TSS 都具有显著正相关关系, NH_4^+-N 和 TP、TDP、TN、TDP 之间呈显著正相关关系,而 NO_3^--N 和其它指标都呈负相关关系。

关键词:城镇地表径流; 营养性污染物; 重金属; 合流制溢流; 初期冲刷

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2809-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.08.011

Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City

WANG Long-tao^{1,2}, DUAN Bing-zheng^{1,2}, ZHAO Jian-wei^{1,2*}, HUA Yu-mei^{1,2}, ZHU Duan-wei^{1,2}

(1. Laboratory of Eco-Environmental Engineering Research, College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

Abstract: Six kinds of impermeable underlying surface, cement tile roof, asbestos roof, cement flat roof, residential concrete pavement, asphalt pavement of restaurants, asphalt pavement of oil depot, and a combined sewer overflow canal in the Jiansheng town of Dadukou district in Chongqing city were chosen as sample plots to study the characteristics of nutritional pollutants and heavy metals in town runoff. The research showed that the average mass concentrations of TSS, COD, TN, TP in road runoff were $(1\,681.2 \pm 677.2)$, $(1\,154.7 \pm 415.5)$, (12.07 ± 2.72) , $(3.32 \pm 1.15) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. These pollutants were higher than those in roof runoff which were (13.3 ± 6.5) , (100.4 ± 24.8) , (3.58 ± 0.70) , $(0.10 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. TDN accounted for $62.60\% \pm 34.38\%$ of TN, and TDP accounted for $42.22\% \pm 33.94\%$ of TP in the runoff of impermeable underlying surface. Compared with the central urban runoff, town runoff in our study had higher mass concentrations of these pollutants. The mass concentrations of TSS, COD, TDN, TN, TDP and TP in the combined sewer overflow were (281.57 ± 308.38) , (231.21 ± 42.95) , (8.16 ± 2.78) , (10.60 ± 3.94) , (0.38 ± 0.23) and $(1.51 \pm 0.75) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The average levels of heavy metals in this kind of runoff did not exceed the class VI level of the surface water environmental quality standard. Most pollutants in the combined sewer overflow had first flush. However, this phenomenon was very rare for TSS. There was a significant positive correlation between TSS and COD, TP in the combined sewer overflow. And this correlation was significant between NH_4^+-N and TP, TDP, TN, TDP. However, a negative correlation existed between NO_3^--N and all other indicators.

Key words: town runoff; nutritional pollution; heavy metal; combined sewer overflow; first flush

随着城市化日益加快,不透水下垫面的面积迅速增长,直接增加了城市面源污染的输出负荷。城市化与洪峰形成时间具有线性关系^[1],增大了洪峰风险。城市地表径流含有大量的 TSS 和大肠杆菌^[2]、可溶盐^[3]、营养物^[4]、重金属^[5]等污染物,大量研究表明这些物质降雨时被冲刷进入水体,造成严重的水体污染^[6,7]。但这些研究成果大多在中心城区展开,城镇地表径流的研究还较为缺乏。国内外一些学者已开展了一些城镇街尘污染研究,街尘

中重金属的累积分布^[8]、粒径效应^[9]、重金属污染特性^[10]等研究都取得了一定成果,这为城镇地表径流研究提供了良好基础。目前我国中心城区是 3.6 万 km^2 ,县城的建成镇达 1.65 万 km^2 ^[11],城

收稿日期: 2015-01-26; 修订日期: 2015-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371452,40901264); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07307-002)

作者简介: 王龙涛(1989~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市面源污染与控制,E-mail: wanglongtaoxyz@qq.com

* 通讯联系人,E-mail: jwzhao2@163.com

镇面积还在不断扩大.然而当前城镇建设普遍缺乏规划和管理,城镇地表径流及其造成的污染还未引起足够重视^[12],这方面的研究还有待加强.

径流中污染物浓度呈现出前期高后期低的现象,通常称为初期冲刷效应,这对地表径流的污染截流和控制具有重要的意义.许多学者对初期冲刷给出了不同的量化标准. Deletic^[13] 建议使用 20% 径流量携带 20% 的污染负荷来界定. Fawcett^[14] 和 Bertrand-Krajewskia 等^[15] 分别提出更为严格的 20/80、30/80 标准,即初期 20% (30%) 的径流所携带的污染负荷超过 80% 时才被认为有初期冲刷的现象存在. Kim 等^[16] 也在之后提出了 30/50 标准.但到目前为止,初期冲刷的定量标准尚未取得广泛的共识.本文选取重庆市大渡口区建胜镇为研究区域,开展城镇地表径流水质及初期冲刷效果分析,以期城镇地表径流污染评价

和处理提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆冬季降雨量少,4、5 月开始大量降雨,6、7、8 月达到最高,9 月降雨开始减少.大渡口地处长江上游,降雨多发生在 5~9 月,占全年总降雨量的 70% 左右.研究区为大渡口建胜镇伏牛溪正街,该区域为典型丘陵峡谷地带,伏牛溪为南北走向,将该区分为东岸、西岸,东岸沿河道路为支干路,西岸为一重工厂厂区,两岸地形多为丘陵.采样点分别为水泥瓦屋顶(SNW),石棉瓦屋顶(SMW),水泥平屋顶(SPW),居民区水泥路面(JSL),餐饮沥青路面(CLL)、油库沥青路面(YLL),同时选取了一个合流制溢流渠(HSQ).采样点特征见表 1,采样点位置见图 1.

表 1 建胜镇地表径流采样点特征

Table 1 Characteristics of sampling sites of urban runoff in the Jiansheng town

类型	采样点	代号	周围土地利用功能	环境特征
屋顶	水泥瓦屋顶	SNW	居民区	伏牛溪旁,周围有公路,为职工宿舍屋顶
	石棉瓦屋顶	SMW	居民区	周围居民区,靠近公路,为居民区屋顶
	水泥平屋顶	SPW	居民区	周围绿化带,为居民区屋顶
路面	居民区水泥路面	JSL	居民区	居民区水泥路面,车流量较小,人流量较大
	餐饮沥青路面	CLL	小型商业区/交通	沥青路面,附近为餐馆,车流量较小,人流量较大
	油库沥青路面	YLL	工业区/交通	沥青路面,附近为油库,车流量大
雨水口	合流制溢流渠	HSQ	林地和居民区	汇水面积 45 hm ² ,其中,上游主要为旱地和林地,28.3 hm ² ,下游排放口附近为居民区,16.7 hm ²

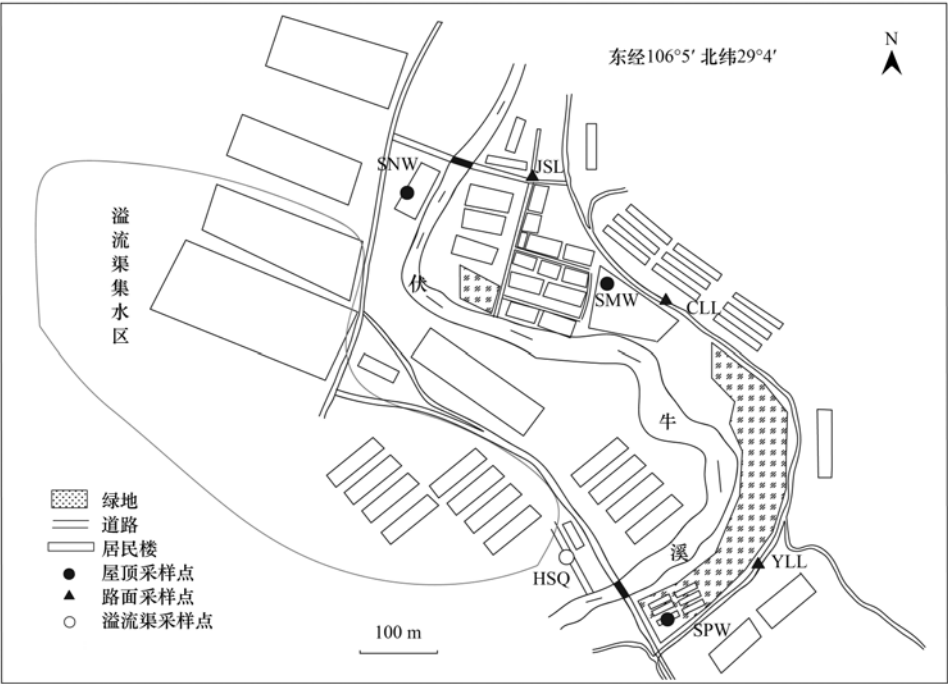


图 1 建胜镇地表径流采样点位置示意

Fig. 1 Location of rainfall runoff monitoring sites in the Jiansheng town

1.2 样品采集

对各下垫面采样点进行适当修葺,并放置带有刻度的采样桶,降雨期间收集径流及记录流量,待降雨结束,混匀采样桶内收集的径流,用 500 mL 采样瓶迅速带回实验室分析.合流制溢流渠为全过程采样,径流产生后 30 min 内每 5 min

采一次,30~60 min 每 10 min 采一次,以后每隔 30 min 采一次,直至径流结束.在采集径流样的同时,测定合流制溢流渠的流速和水位,以计算流量.降雨数据由采样点附近的自动式雨量计测得.2013 年 5~9 月共收集五场典型降雨,基本特征见表 2.

表 2 采样期间降雨特征
Table 2 Characteristics of rainfall events

时间	降雨历时/min	降雨量/mm	平均雨强/mm·min ⁻¹	最大雨强/mm·5 min ⁻¹	降雨间隔/d
2013-05-24	160	21.9	0.14	0.9	8
2013-06-05	450	16	0.04	0.9	11
2013-07-05	315	41.2	0.13	6.2	3
2013-07-18	255	10.6	0.04	0.6	13
2013-09-02	590	58.7	0.10	1.1	10

1.3 样品处理及数据分析

径流分析项目有悬浮物(TSS)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、可溶性总氮(TDN)、总氮(TN)、可溶性总磷(TDP)、总磷(TP)重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)等.所有指标测定都按照国家环境保护局标准^[17].采用次降雨径流平均浓度(EMC)来说明一次径流中污染物的平均浓度,EMC 为一场降雨径流全过程的瞬时污染物浓度加权平均值^[18].每次降雨初期 30% 的径流量所含污染负荷占总污染负荷的比例,记为 $F_{(30)}$,本研究根据城镇汇水区排水体制及径流特点,采用 30/50 标准来评价不同场次降雨污染物的初期冲刷效应^[16],即 $F_{(30)} \geq 50\%$ 为高初始冲刷.

2 结果与讨论

2.1 不透水地表径流营养性污染物

由图 2 可知,各下垫面径流中 TSS 污染程度依次为:油库沥青路面>餐饮沥青路面>小区水泥路面>水泥平屋顶>石棉瓦屋顶>水泥瓦屋顶.油库沥青路面径流污染最为严重,达到 $(2\,462.4 \pm 915.3)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,主要是油库沥青路面很少清扫,地表累积物较多.另两个路面为人工清扫,且较为频繁,TSS 含量大幅下降.水泥平屋顶 TSS 含量比其他两个屋面高,但整体污染并不严重,平均为 $(19.8 \pm 27.2)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.刘守城等^[19]在南京市区的研究表明,水泥屋面径流 TSS 质量浓度为 $49.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,本城镇屋面径流与此相比,TSS 污染明显较轻.COD 污染程度为:餐饮沥青路面>油库沥青路面>小区水泥路面>石棉瓦屋顶>水泥平屋顶>水泥瓦屋顶.虽然餐饮沥青路面清扫频率较高,但路面依然残留

有许多油污,造成径流中 COD 污染严重,达到 $(1\,579.6 \pm 733.9)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.各屋面中,水泥瓦屋顶 COD 最低,为 $(80.4 \pm 63.6)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,原因可能是另两个屋面老化相对严重,导致这两个屋面 COD 稍高,但本城镇所研究的水泥瓦屋顶 COD 质量浓度仍比李贺等^[20]在上海城区研究的综合屋面要高将近一倍.3 个路面径流中氮素主要以溶解态存在,由于餐饮沥青路面散落较多的油污,因而餐饮路面氮的质量浓度最高.袁玲等^[21]在重庆近郊区、远郊区和林区所研究的大气湿沉降的 TN 平均浓度分别为 4.56 、 4.32 和 $3.94\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,本城镇屋面径流中,水泥瓦屋顶 TN 为 $(4.36 \pm 2.66)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,石棉瓦屋顶 $(3.36 \pm 2.74)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水泥平屋顶 $(3.01 \pm 1.54)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均超过了地表水环境质量的 V 类指标,这表明重庆地区大气湿沉降对地表径流中 TN 的贡献比较大,结果与谢继锋等^[22]在合肥城区的研究较为相近.各下垫面氮的形态主要以溶解状态存在,磷主要以颗粒态存在,这与龙剑波等^[23]、王彪等^[24]在中心城区径流中研究的氮磷形态分布较相似.油库沥青路面径流磷的质量浓度最高,同时油库沥青路面 TSS 质量浓度也最高,车流量高明显导致了这两类污染物质量浓度的增加.各下垫面 TN、COD 浓度超过了地表水环境质量的 V 类指标.任玉芬等^[25]在北京中心城区的径流研究表明,屋面径流的 COD、TN 分别超过地表水环境质量的 V 类指标 3.64 和 4.8 倍,路面径流超过 3.73 和 1.07 倍.本研究中屋面径流 COD、TN 超过 V 类指标 2.51 和 1.79 倍,路面径流则超过 28.87 和 6.04 倍.这表明城镇径流可能比中心城区径流污染严重.

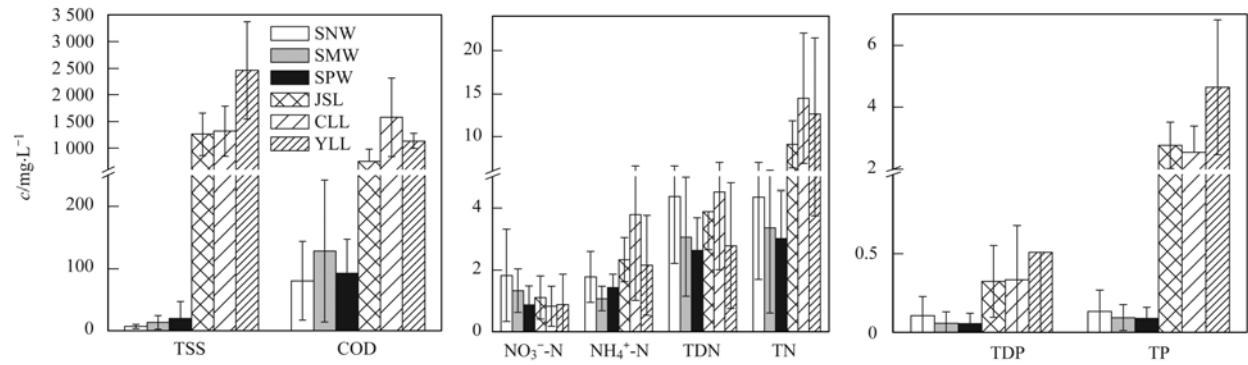


图2 各下垫面污染物 EMC 值对比

Fig. 2 EMC of pollutants in the each monitoring points

2.2 不透水地表径流重金属污染

由表3可知,所有路面的重金属 Ni、Pb 都超过了城镇污水处理厂重金属出水标准,Cu 则没有超标. 重金属 Cd、Cr 和 Zn 均只有油库沥青路面超标. 路面径流的重金属质量浓度均大于屋面径流,各屋面重金属污染水平,除石棉瓦屋顶 Cd 相对较高外,其余重金属,水泥平屋顶污染水平最高. 综合而言,路面重金属污染要比屋面严重得多. 小区水泥路面和餐饮沥青路面的交通流量较为接近,而油库沥青路面交通流量远高于这两类路面. 小区水泥路面和餐饮沥青路面径流中的6种重金属浓度,都相对较小,污染值也较为接近. 但油库沥青路面重金属浓度却普遍比前两类路面高. 这说明交通流量增加明显

提高了路面径流中重金属含量,主要是交通流量增大使车辆轮胎摩擦、制动器摩擦和尾气排放次数变多,从而引起径流中重金属污染加重^[26,27]. 本城镇屋面径流 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 质量浓度平均为:(3.68 ± 0.68)、(18.78 ± 0.94)、(23.78 ± 1.20)、(6.37 ± 5.19)、(12.97 ± 3.51)、(47.01 ± 21.40) μg·L⁻¹,总体比 Gromaire-Mertz 等^[28]在巴黎市区,张科峰等^[29]在南京市市区屋面所研究的质量浓度要低. 本城镇路面径流 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 平均(6.83 ± 2.97)、(91.63 ± 58.28)、(185.21 ± 110.45)、(94.85 ± 51.49)、(174.74 ± 111.32)、(986.55 ± 566.65) μg·L⁻¹,则比黄金良等^[30]在澳门市区路面所研究的污染水平要高.

表3 不透水地表径流重金属污染物质量浓度/μg·L⁻¹

Table 3 Average mass concentration of heavy metal pollutants in runoff of impermeable underlying surface/μg·L⁻¹

项目	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
水泥瓦屋顶	2.90 ± 2.64	17.90 ± 9.67	23.33 ± 5.84	0.91 ± 1.40	12.49 ± 24.85	26.09 ± 31.03
石棉瓦屋顶	4.14 ± 2.34	18.68 ± 10.88	22.87 ± 4.68	6.95 ± 3.94	9.72 ± 9.19	46.09 ± 61.15
水泥平屋顶	3.99 ± 1.85	19.77 ± 9.80	25.14 ± 2.66	11.25 ± 3.77	16.70 ± 13.35	68.86 ± 47.65
小区水泥路面	5.16 ± 2.19	54.34 ± 36.69	126.92 ± 75.57	62.71 ± 54.02	106.52 ± 75.85	649.80 ± 404.23
餐饮沥青路面	5.06 ± 2.24	61.75 ± 40.23	116.11 ± 66.93	67.59 ± 42.07	114.49 ± 71.34	669.08 ± 376.26
油库沥青路面	10.26 ± 5.28	158.79 ± 147.52	312.59 ± 319.63	154.24 ± 141.38	303.20 ± 278.66	1 640.76 ± 1 435.00

2.3 合流制溢流污染过程

2.3.1 合流制溢流污染物

由表4可知五场降雨中,合流制溢流水质差异较大. 降雨强度和晴天累积数导致 TSS 差别较大,平均值达到 281.57 mg·L⁻¹,最大值达到 828.94 mg·L⁻¹,COD 的平均值达到了 231.21 mg·L⁻¹,总磷平均值达到 1.51 mg·L⁻¹. 氮素污染物中主要以溶解性氮为主,NH₄⁺-N占 49.91%. 磷素污染物主要以颗粒态为主,占 74.83%. 与李立青等^[31]在汉阳主城区,李海燕等^[32]在北京城区合流制溢流所做研究相比,本城镇合流制溢流中 TSS 总体污染水平与其相

当,但波动性更大.

2.3.2 合流制溢流过程污染物变化特征

从图3可知,五场降雨中营养性污染物质量浓度峰值出现的时间分别为:45、35、55、5和30 min左右,营养性污染物变化幅度也较大,主要是每场降雨之间的晴天累积数和降雨强度差异造成的,在达到峰值后,都开始急剧下降,但后期营养性污染物浓度保持相对稳定,这说明汇水区上游旱地和林地中的营养物质开始持续出现在排放口,导致径流营养性污染物浓度仍处于一个较高的水平. 五场降雨整个过程中 COD、TSS 波动性较大,主要原因是径流

表 4 合流制溢流中污染物 EMC 值

Table 4 EMC of pollutants in the combined sewer overflow							
日期	TSS /mg·L ⁻¹	COD /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	TDN /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	TDP /mg·L ⁻¹
2013-05-24	195.21	250.63	2.59	7.22	8.9	11.38	0.71
2013-06-05	167.55	256.98	3.52	5.06	9.04	11.25	0.38
2013-07-05	828.94	247.7	3.55	1.82	4.56	5.96	0.1
2013-07-18	100.11	246	2.78	5.79	11.9	16.35	0.46
2013-09-02	116.03	154.75	0.74	6.54	6.42	8.07	0.23
平均值	281.57 ± 308.38	231.21 ± 42.95	2.63 ± 1.14	5.29 ± 2.10	8.16 ± 2.80	10.60 ± 3.94	0.38 ± 0.23
日期	TP /mg·L ⁻¹	Cd /μg·L ⁻¹	Cr /μg·L ⁻¹	Cu /μg·L ⁻¹	Ni /μg·L ⁻¹	Pb /μg·L ⁻¹	Zn /μg·L ⁻¹
2013-05-24	2.31	1.71	9.75	15.1	2.29	8.44	39.88
2013-06-05	1.18	5.14	15.17	29.94	3.11	11.55	71.72
2013-07-05	2.32	6.15	43.54	51.64	25.86	32.15	177.45
2013-07-18	0.92	4.15	16.86	34.72	8.83	12.46	89.84
2013-09-02	0.82	3.42	10.69	33.64	6.45	12.8	43.68
平均值	1.51 ± 0.75	4.11 ± 1.70	19.20 ± 13.93	33.01 ± 13.04	9.31 ± 9.62	15.48 ± 9.48	84.51 ± 55.88

开始时管道中附着的污染物及淤积的泥沙冲刷不彻底,随着径流量的加大,附着物及泥沙陆续被冲刷,从而形成不同浓度高峰.五场降雨中,溶解态氮占 77.5% ± 3.0%,大部分氮素以溶解态形式存在.溶解态磷占 29.0% ± 16.3%,颗粒态磷占主导地位.李立青等^[33]研究表明,重庆中心城区地表径流溶解态氮素达到 88% ± 5%,溶解态磷仅占到 5% ± 2%,本城镇的研究表明合流制溢流中溶解态氮、颗粒态磷比重庆中心城市偏低,但这两者的含量仍然占主导地位.

由表 5 可知,前 10 min 溢流量占总溢流量的百

分比为 1.57% ± 0.83%,前 10 min 污染负荷占总污染负荷的比值,超过溢流百分比两倍的污染物有: NH₄⁺-N、TDN、TN、TDP、Ni; 三倍的有: NH₄⁺-N、TDP、Ni. 前 20 min,超过溢流百分比两倍的污染指标为: NH₄⁺-N、TDP; 前 30 min,超过溢流百分比两倍的污染指标为: NH₄⁺-N、TDP; 前 40 min,超过溢流百分比两倍的指标为: NH₄⁺-N、TDP. 这说明 NH₄⁺-N、TDP 在初期溢流中的比例始终较高,为初期溢流的重点控制对象.拦截前期 20 min 内的溢流,虽然只处理了约 5% 的溢流量,但能削减 NH₄⁺-N、TDP 总量达 20% 以上.

表 5 合流制溢流中前 10、20、30 和 40 min 的污染负荷占总污染负荷的比例/%

Table 5 Ratios of pollutant load at 10 min, 20 min, 30 min and 40 min of the whole combined sewer overflow/%				
项目	10 min	20 min	30 min	40 min
TSS	0.50 ± 0.58	1.32 ± 1.13	3.58 ± 2.11	6.28 ± 4.29
COD	1.96 ± 1.68	3.46 ± 3.47	7.33 ± 7.47	12.18 ± 11.23
NO ₃ ⁻ -N	1.40 ± 0.15	5.08 ± 1.24	7.03 ± 3.05	12.18 ± 5.76
NH ₄ ⁺ -N	4.72 ± 2.63	11.15 ± 6.48	14.49 ± 9.85	19.31 ± 12.62
TDN	3.28 ± 0.62	7.25 ± 3.00	10.93 ± 5.45	15.50 ± 8.32
TN	3.22 ± 1.32	5.71 ± 3.40	10.43 ± 6.27	14.09 ± 8.16
TDP	6.09 ± 3.83	12.84 ± 7.83	18.07 ± 11.54	23.17 ± 11.33
TP	1.87 ± 0.74	3.86 ± 1.70	6.97 ± 3.08	10.39 ± 5.49
Cd	2.45 ± 1.04	5.06 ± 2.00	7.84 ± 2.70	11.68 ± 5.14
Pb	1.98 ± 1.94	3.64 ± 3.62	6.24 ± 5.14	7.86 ± 6.31
Ni	4.84 ± 5.20	7.82 ± 7.27	9.70 ± 10.00	13.94 ± 11.12
Cu	1.63 ± 0.70	3.66 ± 1.94	5.55 ± 3.06	8.87 ± 4.71
Cr	2.00 ± 0.61	4.43 ± 1.58	7.18 ± 3.40	11.29 ± 5.96
Zn	1.55 ± 1.52	3.09 ± 2.66	6.18 ± 4.50	12.56 ± 11.16
溢流量	1.57 ± 0.83	4.73 ± 2.01	6.74 ± 2.76	9.25 ± 5.16

2.3.3 合流制溢流初期冲刷效应分析

五场降雨初期冲刷效应的显著程度见表 6. 从中可知,合流制溢流中大部分污染物都具有初期冲

刷效应.但 TSS 有 4 场无初期冲刷,这与城镇集水区的特征密切相关.该排洪渠上游为林地和旱地,降雨冲刷带来大量泥沙颗粒物,这部分径流到达排放口

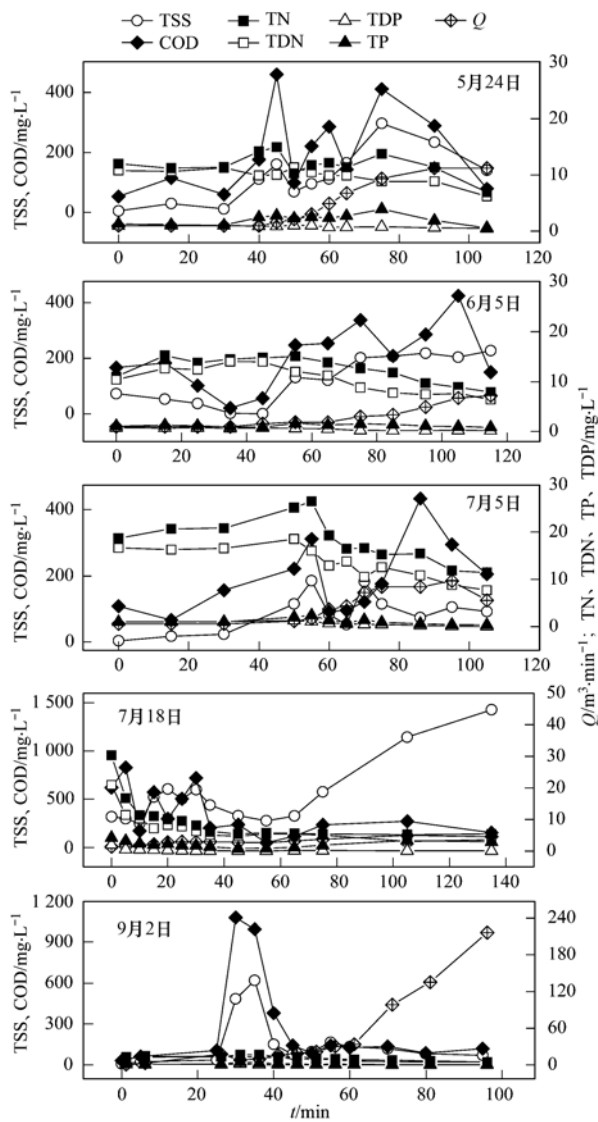


图3 五场降雨合流制溢流渠中污染物
质量浓度和流量随时间变化

Fig. 3 Change of pollutants mass concentration and
flow of the combined sewer overflow canal in the five rainfall

的时间较长,后期才会出现。集水区排放口附近密集分布居民区,而上游则分布农田、林地,是城镇地区常见的土地利用格局,因而TSS的弱初期冲刷现象,也有可能是城镇径流的一个普遍现象。TDP的 $F_{(30)}$ 均值达到54.1%,其中三场为高初始冲刷,说明TDP具有明显的初始冲刷现象, NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TDN、TN、TP、Zn、Cr、Ni的 $F_{(30)}$ 均值分别达到33.2%、44.6%、38.8%、35.8%、36.5%、39.9%、36.3%、35.2%,都具有一定的初期冲刷。5月24日、7月5日、9月2日,合流制溢流污染物 $F_{(30)}$ 都比较大,具有明显的初期冲刷效应,主要是这三场降雨的强度和雨量都比其它两场降雨大。马英

等^[34]和Taebi等^[35]的研究结果也表明,降雨强度、降雨量大,初始冲刷效应最明显。前言中提到初期冲刷效应,通常还有更为严格的20/80和30/80定量判断标准,如用这样的比值进行判断,本研究区域的溢流事件都未能发生初期冲刷。通常在汇水面积较小、不透水地表比例较大、初期降雨强度大等多重条件下,汇水区中的大部分地表累积污染物才能够被径流快速冲刷至排水口,从而达到20/80或30/80的标准。然而,城镇汇水区内通常透水地表较多,汇水面积也较大,因此研究者认为30/50的标准更能准确反映城镇径流冲刷特点,本研究的结果也表明该比值可能更易判断城镇径流的初期冲刷现象。基于上述结果,拦截前期60min左右的溢流,可以处理30%的溢流量,能削减 NH_4^+ -N、TDP分别达到 $49.98\% \pm 7.79\%$ 、 $58.03\% \pm 11.05\%$,因此在治理重庆城镇合流制溢流时,建议对初期30%溢流所携带的污染负荷量进行进一步的研究。

2.3.4 合流制溢流水质指标相关性分析

径流污染物之间的相关性,对径流污染控制具有重要意义。5场合流制溢流水质指标之间的相关性见表7和表8。从表7可知,TSS和溢流量,COD,TP有显著的正相关关系,表明这两种物质主要以颗粒物为载体,控制TSS能有效地控制TP和COD。罗专溪等^[36]在川中丘陵区村镇研究中也发现TSS和溢流量、COD、TP都呈显著正相关关系。 NO_3^- -N和其他指标呈负相关关系,这说明 NO_3^- -N的污染行为不只是地表径流的冲刷,可能有其它类似淋溶过程的存在。 NH_4^+ -N和TP、TDP、TN、TDP之间呈显著正相关关系。

TSS与6种重金属都具有显著正相关关系(表8),说明重金属主要以颗粒物为载体。各重金属之间也呈显著正相关关系,其中,Ni和Zn、Cu和Zn、Cu和Ni相关系数分别达到0.645、0.750、0.821,说明这3种重金属之间具有同源性。甘华阳等^[37]的研究也表明,路面径流中的重金属彼此相关性很强且都与径流中的TSS明显相关。

3 结论

(1)城镇下垫面径流中,路面的营养性污染物含量普遍高于屋面,餐饮路面污染物含量最高。氮在各下垫面主要以溶解态形式存在,磷主要以颗粒态存在。屋面径流的重金属污染一般较轻,而路面径流的重金属污染较重,油库路面最为严重。

(2)合流制溢流中,TSS、COD平均值分别为

表 6 合流制溢流中各污染物的 $F_{(30)}$ 值¹⁾/%

Table 6 $F_{(30)}$ values of pollutants in the combined sewer overflow/%							
日期	TSS	COD	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TDN	TN	TDP
2013-05-24	18.6	25.1	36.4	32.4	34.3	31.8	36.8
2013-06-05	13.2	19.2	29.6	46.7	40.6	37.7	52.8
2013-07-05	28.1	19.8	20.3	51.1	38.5	39.1	60.2
2013-07-18	27.4	33	33.7	44.9	35.6	27.5	42.6
2013-09-02	43.2	49.1	46	48.1	45.2	43.1	78.1
均值	26.1 ± 10.2	29.2 ± 11.1	33.2 ± 8.4	44.6 ± 6.4	38.8 ± 3.9	35.8 ± 5.5	54.1 ± 14.5
高初始冲刷/次	0	0	0	1	0	0	3
中初始冲刷/次	1	2	3	4	5	4	2
无初始冲刷/次	4	3	2	0	0	1	0
日期	TP	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
2013-05-24	31.4	37.9	19.7	29.8	68.8	43.5	52.6
2013-06-05	31.8	25.1	37.4	24.1	19.9	17.9	28.6
2013-07-05	48.2	38	41.3	30.8	14.8	34.9	50.4
2013-07-18	16.1	26.8	18.9	21.2	17.1	21.2	14.8
2013-09-02	54.8	29.8	64.1	34.1	55.3	41.2	52.9
均值	36.5 ± 13.7	31.5 ± 5.5	36.3 ± 16.6	28 ± 4.7	35.2 ± 22.4	31.7 ± 10.4	39.9 ± 15.5
高初始冲刷/次	1	0	1	0	2	0	3
中初始冲刷/次	3	2	2	1	0	3	0
无初始冲刷/次	1	3	2	4	3	2	2

1) 高初始冲刷: $F_{(30)} \geq 50\%$, 中初始冲刷: $30 < F_{(30)} < 50$, 无初始冲刷: $F_{(30)} \leq 30$

表 7 合流制溢流渠营养性污染物 Pearson 相关性¹⁾

Table 7 Pearson correlation among the nutritional pollutants in the combined sewer overflow canal								
	溢流量	TSS	COD	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TDN	TN	TDP
溢流量	1.000							
TSS	0.329 **	1.000						
COD	-0.062	0.412 **	1.000					
NO ₃ -N	0.010	0.117	-0.108	1.000				
NH ₃ -N	-0.537 **	-0.286 **	0.279 *	-0.544 **	1.000			
TDN	-0.644	-0.463 **	0.077	-0.211	0.790 **	1.000		
TN	-0.537	-0.327 **	0.219	-0.291 *	0.723 **	0.919 **	1.000	
TDP	-0.589 **	-0.363 **	0.112	-0.305 *	0.882 **	0.847 **	0.753 **	1.000
TP	-0.176	0.492 **	0.630 **	-0.205	0.459 **	0.201	0.307 *	0.440 **

1) * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,下同

表 8 合流制溢流重金属污染物 Pearson 相关性

Table 8 Pearson correlation among the heavy metal pollutants in the combined sewer overflow								
	溢流量	TSS	Cd	Pb	Ni	Cu	Cr	Zn
溢流量	1.000							
TSS	0.329 **	1.000						
Cd	-0.102	0.366 **	1.000					
Pb	-0.024	0.278 *	0.391 **	1.000				
Ni	-0.040	0.528 **	0.507 **	0.523 **	1.000			
Cu	-0.009	0.465 **	0.586 **	0.597 **	0.821 **	1.000		
Cr	-0.083	0.451 **	0.566 **	0.410 **	0.562 **	0.636 **	1.000	
Zn	-0.135	0.389 **	0.384 **	0.501 **	0.645 **	0.750 **	0.521 **	1.000

281.57 mg·L⁻¹、231.21 mg·L⁻¹, 重金属 EMC 值未超过地表水环境质量 V 类标准. 溶解态氮、颗粒态磷占主导地位, 但其占总氮和总磷的比值低于中心城区径流的比值.

(3) 通过初期 30% 径流所携带营养性污染物负荷的分析, 表明大部分合流制溢流事件携带量高于

50%, 具有初期冲刷效应, 而 TSS 的初期冲刷效应较弱.

(4) 合流制溢流污染物相关性分析表明, COD、TP 与 TSS 都具有显著正相关关系, NH₄⁺-N 和 TP、TDP、TN、TDP 之间呈显著正相关关系, NO₃⁻-N 和其他指标都呈负相关关系.

参考文献:

- [1] Kumar D S, Arya D S, Vojinovic Z. Modeling of urban growth dynamics and its impact on surface runoff characteristics [J]. Computer, Environment and Urban Systems, 2013, **41**: 124-135.
- [2] Zhang Y, Sun T T, Lia F Y, *et al.* Effect of decaying salts on ion concentrations in urban stormwater runoff [J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, **18**: 567-571.
- [3] McCarthy D T, Hathaway J M, Hunt W F, *et al.* Intra-event variability of *Escherichia coli* and total suspended solids in urban stormwater runoff [J]. Water Research, 2012, **46**(20): 6661-6670.
- [4] 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.
- [5] 李倩倩, 李铁龙, 赵倩倩, 等. 天津市路面雨水径流重金属污染特征 [J]. 生态环境学报, 2011, **20**(1): 143-148.
- [6] Brezonik P L, Stadelmann T H. Analysis and predictive models of stormwater run of volumes, loads, and pollution concentration from watersheds in the Twins Cities metropolitan area, Minnesota, USA [J]. Water Research, 2002, **36**: 1743-1757.
- [7] 范俊楠, 赵建伟, 朱端卫. 湖泊氮素氧化及脱氮过程研究进展 [J]. 生态学报, 2012, **32**(15): 4924-4931.
- [8] Hofman J, Wuyts K, van Wittenberghe S, *et al.* Reprint of On the link between biomagnetic monitoring and leaf-deposited dust load of urban trees: Relationships and spatial variability of different particle size fractions [J]. Environmental Pollution, 2014, **192**: 285-294.
- [9] Mejía Z, Alfonso C, Pinzon L, *et al.* Influence of traffic in the heavy metals accumulation on urban roads: Torrelavega (Spain)-Soacha (Colombia) [J]. Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Antioquia, 2013, **67**: 146-160.
- [10] 何小艳, 顾培, 李叙勇, 等. 北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征 [J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 357-363.
- [11] 王亚男, 冯奎, 郑明媚. 中国城镇化未来发展趋势——2012 年中国城镇化高层国际论坛会议综述 [J]. 城市发展研究, 2012, **19**(6): 1-3.
- [12] 姜文超, 管继玲, 吕念南, 等. 雨水径流污染与城镇排水系统规划 [J]. 南水北调与水利科技, 2010, **8**(3): 39-41.
- [13] Deletic A. The first flush load of urban surface runoff [J]. Water Research, 1998, **32**(8): 2462-2470.
- [14] Fawcett H. Stormwater: Best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management; by Ben Urbonas and Peter Stahre, PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, 1993, ISBN 0-13-847492-3, 449 pp., MYM52.00 (plus postage) [J]. Journal of Hazardous Materials, 1994, **36**(1): 113-114.
- [15] Bertrand-Krajewski J L, Chebbo G, Saget A. Distribution of Pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon [J]. Water Research, 1998, **32**(8): 2341-2356.
- [16] Kim L H, Kayhanian M, Zoh K D, *et al.* Modeling of highway stormwater runoff [J]. Science of the Total Environment, 2005, **348**(1-3): 1-18.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 200-415.
- [18] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway stormwater [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, **123**(2): 134-143.
- [19] 刘守城, 何兆芳, 张烨, 等. 屋面雨水径流水质特性研究 [J]. 环境科技, 2012, **25**(6): 28-31.
- [20] 李贺, 张秋菊, 李田. 屋面径流污染物的出流类型与水质特征 [J]. 中国给水排水, 2009, **25**(9): 90-93.
- [21] 袁玲, 周鑫斌, 辜夕容, 等. 重庆典型地区大气湿沉降降的时空变化 [J]. 生态学报, 2009, **29**(11): 6095-6101.
- [22] 谢继锋, 胡志新, 徐挺, 等. 合肥市不同下垫面降雨径流水质特征分析 [J]. 中国环境科学, 2012, **32**(6): 1018-1025.
- [23] 龙剑波, 李兴扬, 王书敏, 等. 城市区域不同屋顶降雨径流水质特征 [J]. 环境工程学报, 2014, **8**(7): 2895-2900.
- [24] 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.
- [25] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析 [J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 373-378.
- [26] 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.
- [27] 李春林, 刘森, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流污染物排放特征 [J]. 生态学杂志, 2014, **33**(5): 1327-1336.
- [28] Gromaire-Mertz M C, Garnaud S, Gonzalez A, *et al.* Characterisation of urban runoff pollution in Paris [J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(2): 1-8.
- [29] 张科峰, 李贺, 傅大放, 等. 三种不同屋面雨水径流重金属污染特性及影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 2011, **31**(4): 724-730.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 李海燕, 徐尚玲, 黄延, 等. 合流制排水管道雨季出流污染负荷研究 [J]. 环境科学学报, 2013, **33**(9): 2522-2530.
- [33] 李立青, 单保庆, 赵建伟, 等. 山地城市地表径流源区水质特征监测研究 [J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3397-3403.
- [34] 马英, 马邕文, 万金泉, 等. 东莞不同下垫面降雨径流污染输移规律研究 [J]. 中国环境科学, 2011, **31**(12): 1983-1990.
- [35] Taebi A, Droste R L. First flush pollution load of urban stormwater runoff [J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2004, **3**(4): 301-309.
- [36] 罗专溪, 朱波, 王振华, 等. 川中丘陵区村镇降雨特征与径流污染物的相关关系 [J]. 中国环境科学, 2008, **28**(11): 1032-1036.
- [37] 甘华阳, 卓慕宁, 李定强, 等. 公路路面径流重金属污染特征 [J]. 城市环境与城市生态, 2007, **20**(3): 34-37.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 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