

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响 陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)

北京地区秋季雾霾天 PM_{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)

上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究 王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)

杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征 谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)

保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别 李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)

春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究 周变红, 张承中, 王格慧 (448)

华东区域高山背景点 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 背景值及污染特征 苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)

基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估 田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)

积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征 张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)

靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究 徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)

正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究 欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)

干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素 刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)

降尘收集方法对降尘效率的影响 张正德, 董治宝 (499)

海河流域水生生态功能一级二级分区 孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)

长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究 时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)

内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究 黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)

溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响 邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)

自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究 张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)

淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制 周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)

高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征 崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)

城市雨水径流水质演变过程监测与分析 董雯, 李怀恩, 李家科 (561)

复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果 任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔杰, 王为进 (570)

给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究 郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)

1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用 李三华, 张奇亚 (583)

水生植物热解生物油对中肋骨条藻抗氧化酶活性的影响 姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)

TiO₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学 张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)

皮革废水有机污染物生物降解特性研究 王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)

链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究 谢练武, 方继生, 郭亚平 (611)

一种负载型生物载体的制备及性能研究 杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)

基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 培养研究 嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)

温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响 陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)

天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH₄ 的影响 姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)

蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征 青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)

基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究 钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)

区域地下水污染风险评价方法研究 杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)

地下水有机污染源识别技术体系研究与示范 王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)

祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究 朱凌宇, 潘剑群, 张威 (668)

黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平平 (676)

根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响 张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)

长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究 罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)

外源 Cr(III) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究 郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)

某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征 潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)

大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析 刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)

天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征 姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)

沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定 吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)

动物饲料中砷、铜和锌调查及分析 姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)

氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究 王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)

2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性 倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)

嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究 厉阆, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)

固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响 唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)

16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性 刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗杰 (767)

氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响 刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)

筒青霉 (*Penicillium simplicissimum*) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征 沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)

石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究 杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)

土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响 王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)

生活垃圾填埋过程含水率变化研究 李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)

动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化 吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)

《环境科学》征订启事(447) 《环境科学》征稿简则(493) 信息(508,588,610,731) 专辑征稿通知(788)

城市雨水径流水质演变过程监测与分析

董雯^{1,2}, 李怀恩^{1*}, 李家科¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048; 2. 陕西省环境科学研究院, 西安 710061)

摘要: 为了探讨降雨从落地前至居住小区出口径流的水质演变规律和污染特性, 于 2011 年 7~10 月进行了 6 场雨水径流水质演变过程的监测与分析, 同时, 初步对比了草带对屋面径流的净化效果. 结果表明: ①城市降雨从“落地前雨水-屋面径流-路面径流-小区出口径流”, 水质变化规律明显, 落地前雨水水质最好, 屋面径流和小区出口径流水质较差, 路面径流水质最差; ②雨水水质从落地前到小区出口的演变过程中, 除可溶性 TP 平均浓度未超出地表水环境质量 IV 类标准外, COD、NH₄⁺-N、TN 平均浓度均超出地表水环境质量 V 类标准; ③前期晴天时间短的降雨径流污染物平均浓度明显低于前期晴天时间长的降雨, 并且同一场降雨过程, 降雨结束时径流水质明显好于初期; ④草带对降雨径流中污染物的浓度削减作用明显, 约 1.0 m 宽的草带对屋面径流污染物 COD 和氮的削减率基本都在 30% 左右.

关键词: 降雨径流; 监测; 水质演变; 特性分析; 城市; 非点源污染

中图分类号: X830.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0561-09

Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area

DONG Wen^{1,2}, LI Huai-en¹, LI Jia-ke¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, Institute of Water Resources Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Province Academic of Environmental Science, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to find the water quality evolution law and pollution characteristics of the rainfall runoff from undisturbed to the neighborhood exit, 6 times evolution process of rainfall runoff water quality were monitored and analyzed from July to October in 2011, and contrasted the clarification efficiency of the grassland to the roof runoff rudimentarily at the same time. The research showed: ①the results of the comparison from “undisturbed, rainfall-roof, rainfall runoff-road, rainfall-runoff the neighborhood exit runoff” showed that the water quality of the undisturbed rain was better than that from the roof and the neighborhood exist, but the road rainfall runoff water quality was the worst; ②the average concentrations of the parameters such as COD, ammonia nitrogen and total nitrogen all exceeded the Fifth Class of the Surface Water Quality Standard except for the soluble total phosphorus from undisturbed rainfall to the neighborhood exit; ③the runoff water quality of the short early fine days was better than that of long early fine days, and the last runoff water quality was better than that of the initial runoff in the same rainfall process; ④the concentration reduction of the grassland was notable, and the reduction rate of the grassland which is 1.0 meter wide of the roof runoff pollutants such as COD and nitrogen reached 30%.

Key words: rainfall runoff; monitoring; water quality evolution; characteristic analysis; urban; non-point source pollution

由于降雨的空间分布不均,使得降雨量小的西北城市缺水严重.而对于年均降雨量约 500~700 mm 的西安市,无论是水源容量还是质量都不能满足 21 世纪可持续发展的需要.多年来渭河西安段的水质基本在地表水环境质量标准(GB 3838-2002) V 类内或超出 V 类水质标准.与巴黎、伦敦、纽约等世界级城市相比,西安属于水质性严重缺水的城市^[1].近几年西安在建设国际化大都市的同时,又被列为国家“关中-天水经济区”发展的重点,这就要求西安不仅要有充足的水资源作保障,更要有良好的水生态环境作支撑.2008 年以来,随着“国家水体污染控制与治理科技重大专项——河流主题”的

研究在渭河流域的开展,对渭河的治理和发展起到了至关重要的作用.但是,由于本身水资源的严重缺乏,仅靠治理是不够的.西安处于半干旱半湿润气候区,夏秋季节的降雨比较丰富,因此,收集利用雨水这一宝贵资源,是解决西安市水危机的有效途径,而首先要明确城市雨水径流的水质特征.

国内外对城市雨水径流污染的研究主要集中在

收稿日期: 2012-04-11; 修订日期: 2012-07-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-002-005-002); 国家自然科学基金项目(50979090, 50909080); 陕西省自然科学基金项目(2009JQ7008)

作者简介: 董雯(1980~),女,博士研究生,主要研究方向为水环境保护与非点源污染, E-mail: dongwenabc@126.com

* 通讯联系人, E-mail: huaienl@yahoo.com

以下几个方面:一是从城市不同功能区,如工业区、商业区、交通区和生活区等去研究非点源污染;二是从城市的不同下垫面类型,如屋顶、不透水路面、停车场、草坪、灌木丛等研究非点源污染^[2,3];三是比较不同材质屋面,如绿色屋顶、SBS 屋顶、油毡屋面以及沥青防水膜屋顶等的径流污染^[4];四是讨论不同交通量的路面径流污染等,然后运用不同的方法去确定污染物的成分、含量及影响因素,找出污染源及污染物的迁移规律,或者分析这些污染物对受纳水体水质的影响,并研究必要且可行的污染控制措施等^[5~11],从而减轻城市非点源污染和洪涝灾害,形成可持续利用的城市排水系统,实现城市雨水再利用,为城市非点源污染的进一步研究奠定基础^[12].如侯培强等^[13]对北京市城市天然雨水与 3 个不同下垫面(屋面、单位内部道路和环路干道)的降雨径流的水质进行了评价,发现环路干道径流的综合水质最差,其他依次为屋面径流、单位内部道路径流和天然雨水,其中环路干道径流综合水质超出国家地表水 V 类水质标准,天然雨水、单位内部道路径流和屋面径流综合水质满足国家地表水 II 类水质标准;颜文涛等^[14]以山地城市重庆主城区某大学校园为例,对路面、屋面和绿地等 3 种典型的城市下垫面径流水质进行了监测,得出由于坡度的作用,山地城市初期冲刷效应比平原城市更为显著,降雨径流污染物质的流失率高于平原城市,降雨径流污染物平均浓度随雨强和雨量的增大而增高;盛建国等^[15]研究了镇江市老城区代表性样点的雨水径流污染,发现初期径流污染严重,主要是有机污染物污染和悬浮物固体污染;张千千等^[16]运用多元统计方法分析了降雨特征对径流水质的影响,发现水泥屋面污染物的 EMC 值明显高于瓦屋面;陈莹等^[17]对西安市城市主干道南二环的路面径流污染特征进行了研究,得出城市主干道路面径流污染物 EMC 变异大且污染严重,SS、COD 的 EMC 中值远大于国内外其他研究结果,且高于《污水综合排放标准》三级标准限值,表明颗粒物和有机物是西安市路面径流的主要污染物.这些大都是降雨径流污染过程中单一环节的研究,关于雨水从落地前到落地后再经不同地表进入雨水管网这一过程的水质变化几乎未曾说明,也就是说对于城市雨水的全程水质演变过程,国内尤其是西北地区目前很少有系统的报道.

本研究通过对西安市“落地前雨水-屋面径流-(草带出水)-操场径流-屋前路面径流-小区出口径

流”的全程雨水水质监测,探讨城市雨水水质演变过程中的径流污染特性、浓度范围及其影响因素,以期为西北缺水型城市非点源污染控制措施的选择与方案的决择以及雨水再利用的研究提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西安市位于陕西省的中部.城市建成区面积约 369 km²,常住人口 843.46 万人,市区多年平均降水量 583.7 mm.年平均降水日数 88~105 d,市区年平均降水日数 96.6 d,最长连续降水日数 13~19 d,多出现于秋季,降水强度具有明显季节性.降雨量年际变化相差很大,7~10 月降水量占年降水量的 60% 以上.

本实验以西安理工大学家属院为研究区,进行城市雨水水质演变过程的监测与分析.西安理工大学金花校区位于西安市城东区东部东二环金花南路两侧,占地 560 亩,建筑面积 31 万 m².从城市地表类型来看,家属院有大量的不透水区,如屋顶、混凝土路面、不透水砖人行道等,也有各种类型的透水区,如绿化带、透水砖人行道等^[18].所以,对西安城市地表径流有着良好的代表性,可以作为典型区域进行数据采集和分析.本研究监测点具体位置及径流流程图如图 1 所示.

1.2 监测方案

2011 年对 6 场不同降雨过程进行了监测,将城市降雨径流按照“落地前雨水-屋面径流-(草带出水)-操场径流-楼前路面径流-小区出口径流”的模式进系统监测,落地前雨水样采自教学区水资所屋顶,其余水样均采自家属院.根据监测结果初步分析西安市降雨径流水质的演变过程及其特征,雨水径流采样位置和流程如图 1 所示.

2011 年 7~11 月,根据需求选取西安理工大学家属院内 18 号家属楼屋顶、小学操场、18 号楼前路面和家属院门口 4 个具有代表性的采样点进行雨水水质演变过程监测.18 号楼前屋顶落水管前面有约 1 m 宽的草带,由于草带土质松软,绝大部分雨水和屋面径流都渗入地下,径流量很少,所以草带出水的采集十分困难,并且研究区内的大部分草带地势平坦,样品收集就更加困难,在降雨条件允许的情况下,仅 2 次收集到了草带出水.

监测中路面径流采自路面低洼处,因为家属院内路面雨水口很少,所选研究地点路面没有雨水排

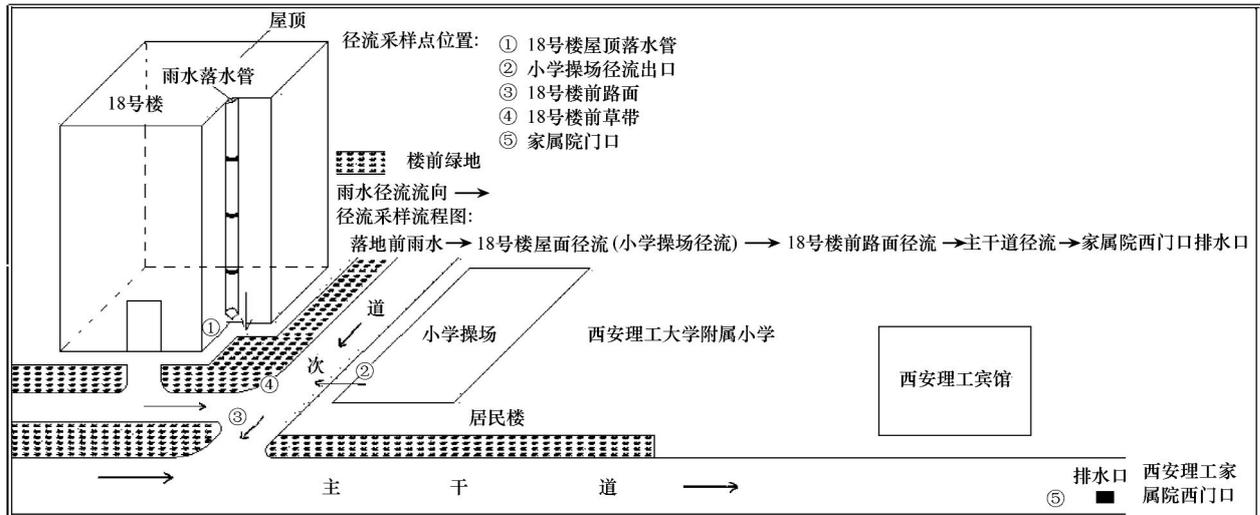


图1 监测点位置和雨水径流采样流程

Fig. 1 Location of the monitoring points and the rainfall sampling flow path

水口,该段路面的雨水直接通过路面汇至西门口的雨水口;小区出口的径流在家属院门口的雨水口处采集进入市政管道之前的地表雨水径流样品;屋面径流在屋顶落水管处收集;草带出水在楼前的草带出水口处收集.采样根据能真实反映地表径流污染特性的数据,即自地表产生径流开始采集第1个样品,采样间隔一般为5 min,根据降雨强度和历时变

化进行必要调整:短时降雨强度较大时采样时间缩短至3 min;降雨历时长而强度小,采样间隔延长至15~20 min.水样用自制采水器采集,置于1 L聚乙烯瓶中,立即送实验室,或于4℃保存,采用标准方法统一分析.

具体采样时间、地点、前期晴天数及降雨特征如表1所示.

表1 降雨特征及径流采集情况

Table 1 Rainfall and runoff characteristics

| 采样日期 | 采样点 | 雨前晴天 天数/d | 降雨历时 /h | 降雨量 /mm | 降雨类型,雨强 /mm·h ⁻¹ |
|------------|---------------------------------|--------------|------------|------------|--------------------------------|
| 2011-07-21 | 水资所屋顶、家属院18号楼落水管、路面、操场、家属院门口 | 14 | 1 | 15.8 | 大雨,15.8 |
| 2011-07-29 | 水资所屋顶、家属院18号楼落水管、路面、操场、家属院门口 | 7 | 2 | 13.2 | 中雨,6.6 |
| 2011-07-31 | 水资所屋顶、家属院18号楼落水管、草带、路面、操场、家属院门口 | 1 | 12 | 16 | 小雨,1.33 |
| 2011-08-04 | 水资所屋顶、家属院18号楼落水管、路面、操场、家属院门口 | 3 | 8 | 5.6 | 小雨,0.7 |
| 2011-09-27 | 水资所屋顶、家属院18号楼落水管、草带、路面、操场、家属院门口 | 8 | 13 | 10 | 小雨,0.8 |
| 2011-09-28 | 水资所屋顶、家属院18号楼落水管、路面、家属院门口 | 0 | 10 | 15 | 小雨,1.5 |
| 2011-10-12 | 水资所屋顶、家属院18号楼落水管、路面、操场、家属院门口 | 12 | 4 | 6 | 小雨,1.5 |

1.3 分析指标与方法

水质分析指标包括氨氮(NH₄⁺-N)、总氮(TN)、可溶性总磷(TP)、COD、SS.分析方法参考文献[19]中的规定与要求,NH₄⁺-N的分析采用纳氏试剂光度法,TN采用快速消解分光光度法,TP采用钼锑抗分光光度法,COD采用快速消解分光光度法,SS采用103~105℃烘干称量测定.各样品均进行平行样分析.

2 结果与分析

根据系统的监测结果,分别从降雨的不同类型,即大雨、中雨和小雨这3个不同降雨类型对“落地

前雨水-屋面径流-(草带出水)-操场径流-楼前路面径流-小区出口径流”的水质演变过程进行分析.

2.1 大雨径流水质变化

2011-07-21的降雨雨强15.8 mm·h⁻¹,属于大雨.分别采集了落地前雨水、理工大家属院的18号楼屋面径流、小学操场径流和家属院门口径流,经检测,落地前雨水中常规污染物平均浓度均较低,如表2所示.

从表2可以看出,本次降雨过程中,除TP平均浓度未超出地表水环境质量的IV类水质标准外,COD、NH₄⁺-N、TN平均浓度均超出V类水质标准.

表 2 2011-07-21 降水过程污染物平均浓度

Table 2 Average concentration of the 2011-07-21 runoff pollutants

| 采样点 | 间隔时间 /min | 监测指标/mg·L ⁻¹ | | | | |
|----------|--------------|-------------------------|--------|---------------------------------|------|------|
| | | COD | SS | NH ₄ ⁺ -N | TN | TP |
| 落地前雨水均值 | — | 27.42 | 3.26 | 2.07 | 2.55 | 0.04 |
| 18 号屋顶 | 5 | 94.58 | 6.94 | 3.22 | 4.45 | 0.29 |
| | 10 | 71.97 | 6.51 | 3.00 | 4.08 | 0.27 |
| | 20 | 77.29 | 8.00 | 2.51 | 3.21 | 0.22 |
| | 30 | 62.84 | 6.17 | 2.09 | 3.08 | 0.22 |
| | 45 | 72.38 | 8.79 | 1.54 | 2.47 | 0.26 |
| 18 号屋顶均值 | 60 | 88.67 | 12.34 | 1.49 | 2.06 | 0.38 |
| 小学操场 | 10 | 50.53 | 98.00 | 3.11 | 3.76 | 0.13 |
| 小学操场均值 | 20 | 62.95 | 26.00 | 2.82 | 3.05 | 0.14 |
| 家属院门口 | 5 | 135.11 | 202.00 | 3.89 | 5.46 | 0.23 |
| | 10 | 274.57 | 30.00 | 3.46 | 5.53 | 0.25 |
| | 15 | 118.87 | 12.00 | 3.15 | 5.31 | 0.22 |
| | 25 | 110.87 | 16.00 | 2.89 | 4.31 | 0.21 |
| | 35 | 135.94 | 10.00 | 2.93 | 4.20 | 0.21 |
| | 55 | 103.76 | 18.51 | 2.62 | 4.93 | 0.24 |
| 家属院门口均值 | 75 | 95.63 | 23.96 | 2.92 | 5.03 | 0.26 |
| 家属院门口均值 | | 139.25 | 44.64 | 3.12 | 4.97 | 0.23 |

屋面径流中 COD 和 TP 平均浓度大于操场径流,而 SS、NH₄⁺-N 和 TN 平均浓度小于操场径流,原因可能是屋面清扫次数少,降尘中厨房烟气含量高使得有机污染物浓度较高,操场正值暑假,无人打扫,表面灰尘等积累较多的缘故。家属院门口污染物 COD 和 TN 平均浓度最高,这是因为理工大家属院内屋面、操场以及路面等径流最终都要汇至地势较低的大门口的雨水口流出,使得污染物浓度在此有所升高。

在整个降雨过程中,家属院门口的雨水径流中污染物 COD 和 SS 降雨初期浓度明显高于后期,且初期浓度分别是后期浓度的 1.77 倍和 10.17 倍。NH₄⁺-N 和 TP 降雨初期和后期浓度变化不明显, TN 浓度初期是后期的 1.09 倍。

该次降雨的量为 15.8 mm,前期晴天数为 14

d. 整个径流过程污染物的浓度始终较高,说明即便是环境卫生状况相对较好的区域,在降雨量较大、前期晴天时间长的情况下,直至降雨结束径流水质仍然很差。说明对于地表污染状况严重的区域,10 mm 以上的降雨仍未能将地表冲刷干净^[20]。

2.2 中雨径流对比

2011 年 7 月 29 日 前 半 天 一 直 是 零 星 小 雨,至 下 午 16:00 雨 强 增 大,约 20 min 后 形 成 径 流,降 雨 量 13.2 mm,7 月 30 日 晴 天,7 月 31 日 早 晨 又 开 始 下 雨,持 续 至 上 午 10:00 左 右,采 集 这 2 场 降 雨 是 为 了 对 比 间 隔 1 d 的 降 雨 径 流 水 质,监 测 结 果 如 图 2 (a) 所 示。

按照“落地前雨水-屋面径流-操场径流-屋前路面径流-小区出口径流”的降雨演变过程,从图 2(a) 可以看出,“2011-07-29”降雨过程落地前雨水中污

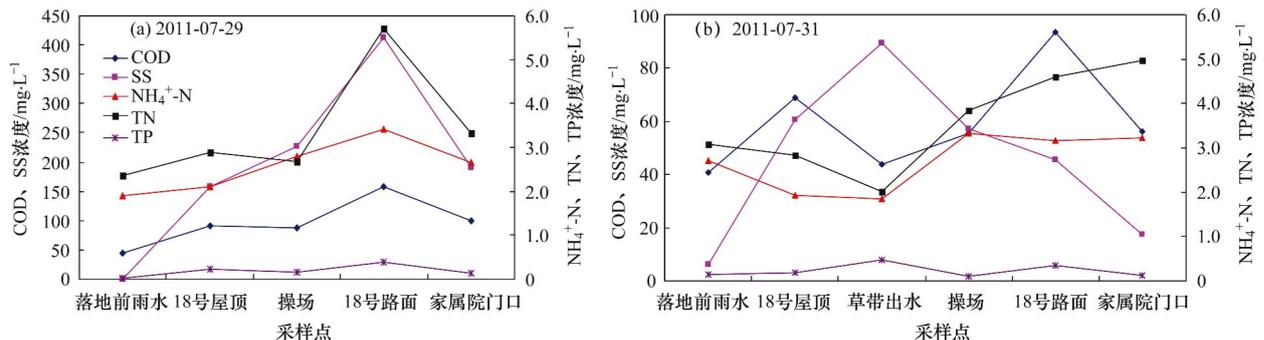


图 2 2011-07-29 和 2011-07-31 降雨径流水质变化

Fig. 2 Runoff water quality in 2011-07-29 and 2011-07-31

染物浓度最小,18号路面最大,COD、SS、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP浓度最大值分别为157.77、413.00、3.42、5.71和0.39 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的最大值均超出地表水V类标准,对比《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002),COD和SS最大值均超过了三级排放标准,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN浓度最大值均在一级排放标准范围内。

“2011-07-31”降雨径流的水质监测结果见图2(b),从中可以看出,落地前雨水中除TN平均浓度较高外,其余污染物平均浓度均较低。雨水从落地前到路面,各污染物的平均浓度呈逐渐增大的趋势,而从路面到小区的径流汇集出口,又略有减小。本次降雨过程中COD、SS、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP浓度最大值分别为93.48、89.32、3.34、4.97和0.34 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均比“2011-07-29”降雨中各污染物的最高浓度低,尤其是COD和SS,这说明间隔1d后,第2次降雨过程产生的径流水质比第1次降雨好。“2011-07-31”降雨草带出水中污染物平均浓度除SS和TP外,其余浓度均是整个水质演变过程中最低的,COD浓度从屋顶的56.93 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到44.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 从2.19 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到2.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN从6.47 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到2.93 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明草带对于降雨径流有一定的过滤作用,SS浓度较大的原因是由于雨量不大,草带出水量很小,取样过程中携带的泥土

和枯草较多所致,TP浓度较高的原因可能跟草的种类、带宽以及草带维护时人工施肥有关。

18号楼路面径流污染物平均浓度大于家属区门口的原因可能是楼前车流量和人流较大,人类活动频繁,行人丢弃的垃圾,从屋顶和其它开阔地上冲刷到路面上的碎屑和污染物,宠物粪便或随风抛撒的碎屑,汽车漏油,轮胎磨损和排出的尾气,以及从空中干沉降的污染物等^[21],致使路面径流中污染物浓度增大。家属院门口是所有径流最终的汇集点,理论上这里的径流中各污染物浓度应该是最高的,但实际上污染物浓度在此有所降低。分析原因有以下两点:一是路面的采样点位于人为活动最多的小学门口附近,离小区出口较远,这里人为活动多,产生的污染物也多。另一方面是各住宅楼前都有绿化带,屋面和路面径流在汇集到达小区出口处之前,会有一部分径流经过绿化带,这样就使得部分污染物浓度由于植被过滤带的作用而降低。所以18号楼前的路面径流中污染物的浓度会高于小区出口径流汇集点的污染物浓度。小学操场的TN和TP平均浓度小于屋面径流,这可能与地表的清洁程度有关。

2.3 小雨径流

“2011-10-12”降雨前期晴天数为12d,此次降雨雨强为1.5 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,历时4h,降雨量约6.0mm,属于小雨。监测结果如图3所示。

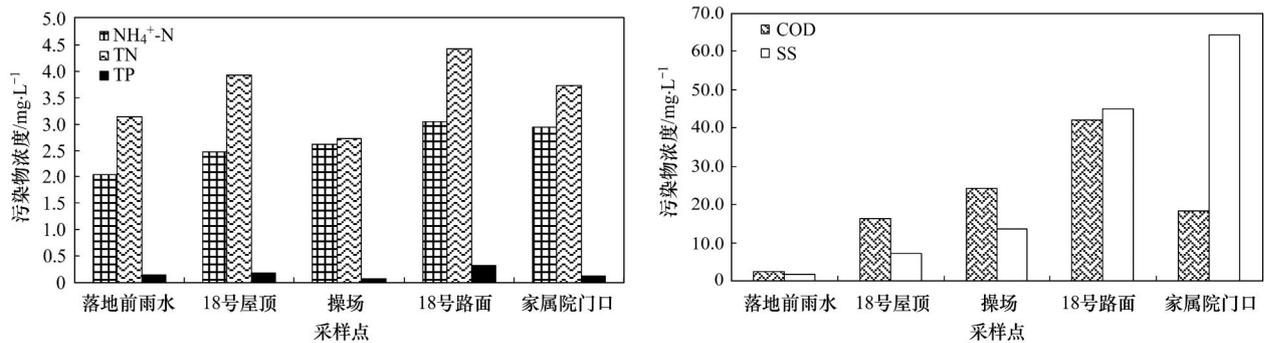


图3 “2011-10-12”降雨径流水质变化

Fig. 3 Runoff water quality in 2011-10-12

由图3可见,“2011-10-12”降雨的“落地前雨水-屋面径流-操场径流-路面径流-小区出口径流”的雨水水质演变过程中,SS平均浓度依次增大,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP平均浓度大小基本符合“落地前雨水<屋面径流<小区出口径流<路面径流”的特点,这与本节“2011-07-21”和“2011-07-29”降雨监测的结果一致,落地前雨水污染物平均浓度最低,路面径流污染物平均浓度最高。

上述实测结果初步表明,降雨径流污染物的

平均浓度与降雨强度、降雨量及地表污染物初始累积量(前期晴天数)有关,前期晴天时间短的降雨径流污染物平均浓度明显低于前期晴天时间长的降雨。

3 讨论

3.1 不同场次雨水径流水质对比

根据6场降雨的监测结果,将各不同采样点雨水径流水质的每场监测均值进行对比,见表3。

表 3 不同场次雨水径流水质监测均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Table 3 Average concentration of different runoff pollutants/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

| 采样点 | 采样日期 | COD | SS | NH_4^+-N | TN | TP |
|--------|------------|---------------|---------------|--------------------------|-------------|-------------|
| 落地之前降雨 | 2011-07-21 | 27.42 | 4.36 | 2.53 | 2.55 | 0.04 |
| | 2011-07-29 | 45.07 | 16.15 | 2.84 | 7.40 | 0.03 |
| | 2011-07-31 | 40.81 | 3.58 | 2.72 | 8.93 | 0.14 |
| | 2011-08-04 | 34.14 | 8.19 | 3.16 | 4.48 | 0.05 |
| | 2011-09-27 | 58.37 | 10.94 | 1.23 | 1.43 | 0.04 |
| | 2011-10-12 | 22.51 | 18.26 | 3.43 | 4.14 | 0.15 |
| 变化范围 | | 22.51 ~ 45.07 | 3.58 ~ 18.26 | 2.23 ~ 3.43 | 1.43 ~ 7.40 | 0.03 ~ 0.15 |
| 18 号屋顶 | 2011-07-21 | 77.96 | 6.00 | 3.06 | 4.73 | 0.27 |
| | 2011-07-29 | 90.22 | 158.80 | 2.12 | 2.89 | 0.23 |
| | 2011-07-31 | 68.92 | 60.50 | 3.03 | 2.83 | 0.19 |
| | 2011-08-04 | 39.56 | 37.33 | 1.47 | 6.17 | 0.20 |
| | 2011-09-27 | 56.93 | 43.00 | 2.19 | 6.47 | 0.21 |
| | 2011-10-12 | 16.43 | 7.14 | 2.47 | 4.93 | 0.17 |
| 变化范围 | | 16.43 ~ 90.22 | 6.0 ~ 158.8 | 1.47 ~ 3.06 | 2.83 ~ 6.47 | 0.17 ~ 0.27 |
| 18 号路面 | 2011-07-29 | 157.77 | 413.00 | 3.42 | 5.71 | 0.38 |
| | 2011-07-31 | 93.48 | 231.49 | 3.16 | 4.61 | 0.34 |
| | 2011-08-04 | 225.25 | 119.67 | 1.81 | 8.46 | 0.72 |
| | 2011-09-27 | 86.62 | 89.33 | 3.01 | 6.03 | 0.47 |
| | 2011-10-12 | 42.05 | 45.00 | 3.05 | 4.43 | 0.33 |
| | 变化范围 | | 42.1 ~ 225.25 | 45.0 ~ 413.0 | 1.81 ~ 3.42 | 4.43 ~ 8.46 |
| 家属院门口 | 2011-07-21 | 132.32 | 37.00 | 2.67 | 5.20 | 0.24 |
| | 2011-07-29 | 100.03 | 189.80 | 2.67 | 3.32 | 0.13 |
| | 2011-07-31 | 56.31 | 17.40 | 3.22 | 4.97 | 0.13 |
| | 2011-08-04 | 46.64 | 87.60 | 5.13 | 5.64 | 0.19 |
| | 2011-09-27 | 138.16 | 179.33 | 3.51 | 9.38 | 0.26 |
| | 2011-10-12 | 18.35 | 64.29 | 2.93 | 3.72 | 0.13 |
| 变化范围 | | 18.35 ~ 138.2 | 17.40 ~ 189.9 | 2.67 ~ 5.13 | 3.32 ~ 9.38 | 0.13 ~ 0.26 |

由表 3 可以看出,2011 年所监测的 6 场降雨过程中,落地前雨水中污染物 COD 和 TN 平均浓度的最高值出现在“2011-07-29”降雨过程中,分别为 $45.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $7.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 在地表水质量标准 V 类范围内, TN 超出 V 类水质标准 3.7 倍, SS、 NH_4^+-N 和 TP 浓度最高值出现在“2011-10-12”降水过程中,分别为 18.26 、 3.43 和 $0.147 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 浓度超出地表水质量标准 V 类水质标准 1.72 倍, TP 在 III 类水范围内. 虽然 COD、TN 和 NH_4^+-N 的平均浓度超出地表水 V 类水质标准,但是均在《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级 A 标准范围内,这说明落地前雨水可以作为城镇景观回用水和一般回用水.

家属院 18 号楼顶的屋面径流污染物 SS 和 COD 最高值出现在“2011-07-29”降雨过程中, SS 平均浓度最高值为 $158.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 最高值 $90.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超出地表水质量标准 V 类水质标准 2.05 倍, NH_4^+-N 和 TP 浓度最高值出现在“2011-07-21”降雨过程,分别为 $3.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+-N

超出地表水质量标准 V 类水质标准 1.5 倍, TP 未超出 IV 类水质标准, TN 浓度最高值出现在“2011-09-27”降雨过程中为 $6.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超出地表水质量标准 V 类水质标准 3.24 倍.

18 号路面径流中, COD、TN 和 TP 最高值出现在“2011-08-04”降雨中,分别为 225.25 、 8.46 和 $0.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 超出 V 类水质标准 5.63 倍, TN 超出 V 类水质标准 4.23 倍, TP 超出 V 类水质标准 1.8 倍, SS 和 NH_4^+-N 浓度最高值出现在“2011-07-29”降雨过程中,分别为 $413.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 超出 V 类水质标准 1.71 倍.

家属院门口的小区径流出口 COD、TN 和 TP 浓度最高值出现在“2011-09-27”降雨过程中,分别为 138.16 、 9.38 和 $0.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 超出 V 类水质标准 3.45 倍, TN 超出 V 类水质标准 4.69 倍, TP 在 IV 类水范围内, SS 浓度最高值为 $189.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出现在“2011-07-29”降雨中, NH_4^+-N 浓度最高值出现在“2011-08-04”降雨中,为 $5.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超出 V 类水质标准 2.56 倍.

从以上分析可以看出, TP 平均值均在地表水环

境质量标准IV类水质范围内, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 这 3 个指标在各场降雨中的平均浓度均超出地表水环境质量V类水质标准,这与郭婧等^[22]研究的北京城市路面地表径流污染严重,径流中的 COD、TP 和 TN 浓度平均值 60% 以上超过《地表水环境质量标准》V类标准的结果基本一致,这说明即便区域环境卫生状况较好,在降雨量较大、前期晴天时间长的情况下,径流水质仍然很差。所以,不同程度的降雨径流污染程度虽然不同,但是都是十分严重的,尤其对于严重缺水型城市,雨水是非常宝贵且可观的水资源,进行多方面雨水径流水质及污染特性的研究是加强地表径流污染控制与治理和雨水资源的再利用的重要基础。

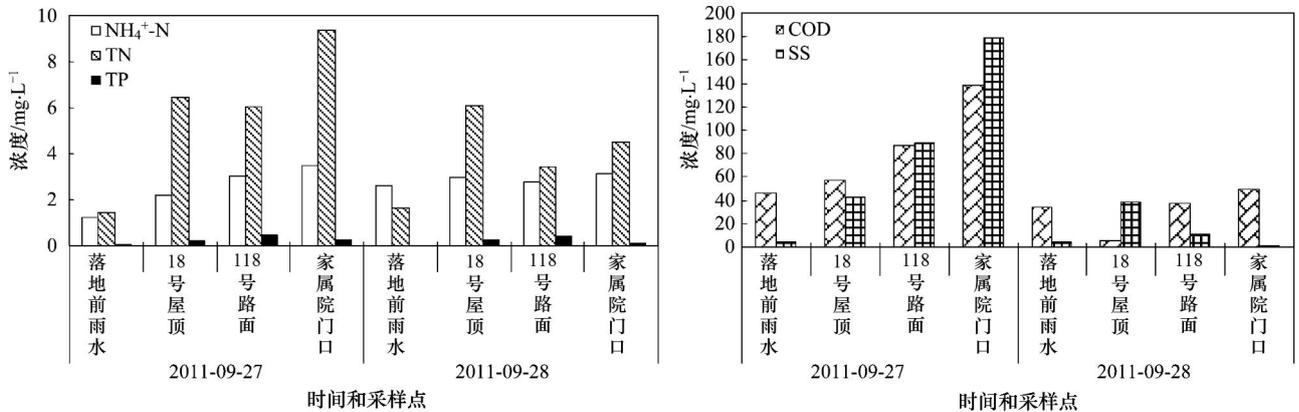


图4 降雨初期与后期污染物平均浓度对比

Fig. 4 Average concentration of the runoff pollutant in the preliminary and later period

由图4可知,初期径流18号路面各污染物浓度均高于18号屋面径流,家属院门口除TP外,其余各污染物浓度最高。因为该场降雨较小,持续时间长,为了对比末期降雨与初期降雨径流中污染物的浓度变化,在降雨结束时,笔者对各采样点又进行了监测,结果发现,2011-09-28降雨(末期),落地前雨水中各污染物浓度均较屋面和路面径流中低,但是却高于降雨初期,即2011-09-27降雨。

地表径流中各污染物浓度均低于降雨初期径流,无论是屋面径流、路面径流还是家属院门口的小区径流汇集点,各污染物的浓度均较降雨初期径流小很多,陈伟伟等^[23]通过体积法对新乡市城区屋面降雨径流采样研究也表明径流初期污染严重,后期COD、SS浓度分别在 $25.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,屋面材料、降雨历时、降雨强度及降雨量等是雨水初期径流水质的重要影响因素^[24]。虽然2011-09-27的降雨强度小,但径流产生的时间长,降雨持续时间长,大部分污染物已被径流冲走,地表比较干净,所以降雨末期水质明显

从本研究的监测结果看,落地前雨水水质较好,可以直接收集作为城市景观用水,屋面和路面径流水质相对较差,但是可以采取相应的措施加以净化后再利用,比如人工湿地技术和生态滤沟技术等,这也是解决缺水型城市水资源问题的一条途径。

3.2 同场降雨初期和后期雨水水质比较

2011年9月27日的降雨一直持续到9月28日,在对初期雨水采集监测后,笔者又对这场雨结束前的径流进行了监测对比,发现经过1d的雨水冲刷之后,各采样点9月28日监测的SS、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的浓度基本小于9月27日(见图4),这符合雨水初期浓度高于后期的一般规律。

转好。

3.3 草带对屋面径流污染物浓度削减的初步分析

由于2011年7月29日降雨强度较大,所以在间隔1d后的7月31日和降雨时间较长的9月27日,在18号楼前约1.0m宽的人工草坪出口收集到了草带出水,经测定,“2011-07-31”降雨的屋面径流污染物浓度经草带削减之后,污染物浓度除TP外均有所削减,这与黄国如等^[25]对草地、居住区和商业区的降雨径流水质研究结果一致,草地绿化区的污染物浓度除了TP外,其他远小于商业区和居住区。COD浓度从原来的 $68.92\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $43.70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,削减率为36.60%,SS浓度在两次过程中均增大,是因为当时在采样时,由于草带出水很小,所以将泥沙和杂草等带入了水样当中,致使SS浓度变大。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度从原来的 $1.93\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到 $1.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,削减率为10.36%,TN浓度从 $2.83\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到 $2.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,削减率为28.87%。“2011-09-27”降雨的屋面径流污染物浓度经草带削减之后COD浓度从原来的 $56.93\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 44.55

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 削减率为 21.75%, NH_4^+-N 浓度从原来的 2.19 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到 2.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 削减率为 4.57%, TN 浓度从 6.47 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到 2.93 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 削减率为 54.82%, 具体数值如表 4 所示。

表 4 草带出水与不同地点径流水质比较/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Comparison between the grass runoff water quality and the different places/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

| 降雨场次 | 采样点 | COD | SS | NH_4^+-N | TN | TP |
|------------|---------|-------|-------|--------------------------|------|------|
| 2011-07-31 | 18 号楼屋顶 | 68.92 | 60.50 | 1.93 | 2.83 | 0.19 |
| | 草带出水 | 43.70 | 89.32 | 1.85 | 2.01 | 0.48 |
| 2011-09-27 | 18 号楼屋顶 | 56.93 | 43.00 | 2.19 | 6.47 | 0.21 |
| | 草带出水 | 44.55 | 80.00 | 2.09 | 2.93 | 0.45 |

可见,草带对屋面径流污染物的削减效果明显,COD 和氮的削减率基本都在 30% 左右,这与李怀恩等^[26]的研究结果植被过滤带对地表径流中 COD 和氮的削减率分别达到 60.48% 和 46.05% 的相差较大,这是研究地点的草带宽度和盖度太小,径流进入草带后停留时间短的缘故。而 2 次收集的草带出水中 TP 的平均浓度都有所上升,这可能是人工草坪中有人为施肥的缘故。

4 结论

(1) 城市降雨从“落地前雨水-屋面径流-路面径流-小区出口径流”,水质变化规律明显,落地前雨水水质最好,TP 未超出 IV 类水质标准,COD、TN 和 NH_4^+-N 的平均浓度超出地表水 V 类水质标准,但是在《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级 A 标准范围内。屋面径流和小区出口径流水质较差,路面径流水质最差。

(2) 前期晴天时间短的降雨径流污染物平均浓度明显低于前期晴天时间长的降雨。同一场降雨过程,初期径流水质明显比降雨结束时差。

(3) 同场降雨,末期的屋面径流、路面径流以及家属院门口的小区径流中各污染物的浓度均较降雨初期径流的浓度低。

(4) 屋面径流经过草带的初步监测表明,草带对降雨径流中污染物有一定的削减作用,居民楼前约 1.0m 宽的草带对屋面径流污染物 COD 和 TN 的削减率分别为 29.75% 和 41.84%。

致谢:秦耀民、林启才、朱磊、邓娜、吴喜军、刘增超博士,以及黄池钧、杜光斐、汪磊、杜娟、王华、黄文菁、于婕、李层、常明、陈昱、张佳扬、高志新、雷婷婷硕士等在采样和水质分析方面提供了帮助,在此一并致谢!

参考文献:

[1] 纪桂霞,刘弦,王平香. 城市小区雨水径流水质监测及特性分析[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(8): 77-79.

- [2] Wei Q S, Zhu G F, Wu P, *et al.* Distributions of typical contaminant species in urban short-term storm runoff and their fates during rain events; a case of Xiamen City[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(4): 533-539.
- [3] 任玉芬,王效科,韩冰,等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 3225-3230.
- [4] Teemusk A, Mander ü. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: the effects of short-term events[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30(3): 271-277.
- [5] 陈莹. 公路路面径流对水环境影响的评价方法初探[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 2004, 27(1): 34-40.
- [6] 侯立柱,丁跃元,冯绍元,等. 北京城区不同下垫面的雨水径流水质比较[J]. 中国给水排水, 2006, 22(23): 35-38.
- [7] Chen J H, Wang W, Zhang J Y, *et al.* Characteristics of gaseous pollutants near a main traffic line in Beijing and its influencing factors[J]. *Atmospheric Research*, 2009, 94(3): 470-480.
- [8] Wang T, Xie S D. Assessment of traffic-related air pollution in the urban streets before and during the 2008 Beijing Olympic Games traffic control period[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(35): 5682-5690.
- [9] 李如忠,周爱佳,童芳,等. 合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1159-1166.
- [10] 王晓凤,邵红兵,夏训峰. 聊城市城市地表径流污染负荷估算[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(3): 164-167.
- [11] 郭文颖,程武群,王丽丽. 城市不透水区降雨径流量及径流水质变化规律研究[J]. 河北农业大学学报, 2011, 34(6): 96-99.
- [12] Sriwongsitanon N, Taesombat W. Effects of land cover on runoff coefficient[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 410(3-4): 226-238.
- [13] 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.
- [14] 颜文涛,韩易,何强. 山地城市径流污染特征分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(3): 136-142.
- [15] 盛建国,曾平,张灿灿,等. 镇江老城区降雨径流污染特征分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2011, 25(5): 496-499.
- [16] 张千千,王效科,郝丽岭,等. 重庆市不同材质屋面径流水质特性[J]. 环境科学研究, 2012, 25(5): 579-586.
- [17] 陈莹,赵剑强,胡博. 西安市城市主干道路面径流污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(5): 781-788.

- [18] 武晟. 西安市降雨特性分析和城市下垫面产汇流特性实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004. 105-106.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 李养龙, 金林. 城市降雨径流水质污染分析[J]. 城市环境与城市生态, 1996, **9**(1): 55-58.
- [22] 郭婧, 马琳, 史鑫源, 等. 北京市城市道路降雨径流监测与分析[J]. 环境化学, 2011, **30**(10): 1814-1815.
- [23] 陈伟伟, 张会敏, 黄福贵, 等. 城区屋面雨水径流水文水质特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, **22**(3): 86-88.
- [24] 陆怡诚, 纪桂霞, 吕天恒, 等. 城市屋面雨水初期径流污染特征与规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, **22**(4): 85-88.
- [25] 黄国如, 聂铁峰. 广州城区雨水径流非点源污染特性及污染负荷[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, **40**(2): 142-148.
- [26] 李怀恩, 邓娜, 杨寅群, 等. 植被过滤带对地表径流中污染物的净化效果[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(7): 81-86.

CONTENTS

| | |
|---|---|
| Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou | TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409) |
| PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area | ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416) |
| Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China | WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424) |
| Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou | XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434) |
| Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City | LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441) |
| Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival | ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448) |
| Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China | SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455) |
| Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose | TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462) |
| Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control | ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468) |
| Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique | XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476) |
| Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake | OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484) |
| Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City | LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494) |
| Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency | ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499) |
| Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China | SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509) |
| Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River | SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517) |
| Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body | HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i> (525) |
| Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate | QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532) |
| Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland | ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540) |
| Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin | ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547) |
| Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River | CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555) |
| Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area | DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561) |
| Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage | REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570) |
| Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis | ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576) |
| Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium | LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583) |
| Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities | YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589) |
| Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies | ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596) |
| Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater | WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604) |
| Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645 | XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611) |
| Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline | YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616) |
| Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization | JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622) |
| Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content | CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629) |
| Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter | YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635) |
| Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products | QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642) |
| Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model | ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647) |
| Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution | YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653) |
| Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application | WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662) |
| Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain | ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668) |
| Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization | LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676) |
| Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return | ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685) |
| Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations | LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692) |
| Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis | ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-chen, <i>et al.</i> (698) |
| Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise | PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705) |
| Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant | LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712) |
| Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin | YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718) |
| Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments | WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724) |
| Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds | YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732) |
| Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field | WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740) |
| Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity | NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746) |
| Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6 | LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753) |
| Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection | TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760) |
| Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method | LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767) |
| Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process | LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773) |
| Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes | SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781) |
| Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil | YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789) |
| Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters | WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795) |
| Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill | LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yue-wei, <i>et al.</i> (804) |
| Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms | WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-bin, <i>et al.</i> (810) |

《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)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

| | | | | |
|---------|---|------------------|----|--|
| 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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊