

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

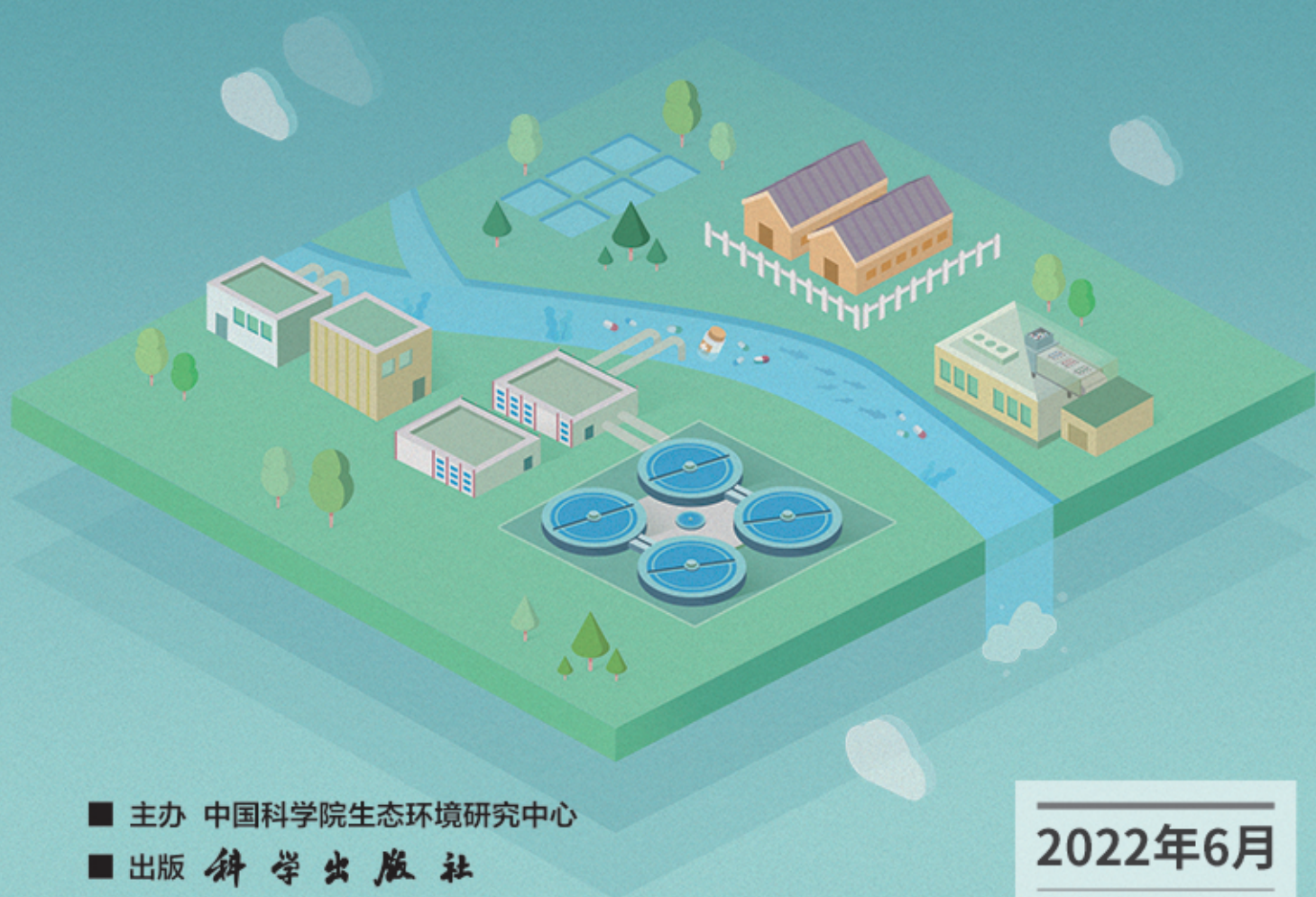
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐藤, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析

席玥^{1,2}, 郭婧^{1,2}, 陶蕾^{1,2}, 田颖^{1,2}, 陈吉吉^{1,2}, 吴悦^{1,2}, 徐蘇士^{1,2}, 荆红卫^{1,2*}, 刘保献^{1,2}

(1. 北京市生态环境监测中心, 北京 100048; 2. 国家环境保护河流全物质通量重点实验室, 北京 100871)

摘要: 以北京市中心城区屋面径流为研究对象, 对 2019 年 6~9 月期间 7 场降雨事件中屋面径流及附近降雨水质情况开展监测, 分析了屋面径流及降雨水质特征、径流初始冲刷效应、径流污染物浓度影响因素及其来源特征。结果表明, 北京市中心城区屋面径流中总氮、氨氮、化学需氧量和悬浮物污染较为严重, 降雨事件径流平均浓度 (EMC) 均超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) V 类标准限值[悬浮物超过《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 二级排放标准]; 降雨水质相对较好, 但氨氮和总氮也存在超标情况。屋面径流中各污染物初始冲刷强度以中等和微弱为主, 由大到小排序依次为: 氨氮 > 悬浮物 > 化学需氧量 > 总氮 > 汞 > 锌 > 总磷 > 铅。屋面径流中悬浮物、化学需氧量、总磷浓度水平与干燥期长度呈显著正相关, 与降雨强度呈显著负相关。结合主成分分析结果可知, 降雨中的主要污染物为交通运输来源的氮类污染物, 屋面径流中的主要污染物则为屋面材料老化和金属雨落管锈蚀释放的悬浮物、有机物和磷类污染物。

关键词: 北京市; 屋面径流; 降雨; 径流初始冲刷; 主成分分析

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3177-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202107171

Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing

XI Yue^{1,2}, GUO Jing^{1,2}, TAO Lei^{1,2}, TIAN Ying^{1,2}, CHEN Ji-ji^{1,2}, WU Yue^{1,2}, XU Su-shi^{1,2}, JING Hong-wei^{1,2*}, LIU Bao-xian^{1,2}

(1. Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of All Materials Flux in Rivers, Beijing 100871, China)

Abstract: The rainwater and rainfall runoff of roofs in the central district of Beijing from June to September in 2019 were sampled and analyzed to study the characteristics of the water quality, the first flush effect, and the main influential factors and sources of pollutants. The results showed that the roof runoff was seriously polluted by total nitrogen, ammonia nitrogen, chemical oxygen demand, and total suspended solids whose event mean concentration (EMC) exceeded the fifth level of environmental quality standards for surface water (GB 3838-2002) (the EMC of suspended solids exceeded the second level of discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plants (GB 18918-2002)). The rainwater was relatively less polluted than the rainfall runoff, but the EMC of ammonia nitrogen and total nitrogen of the rainwater also exceeded the standard in some rainfall events. The first flush intensity of the rainfall runoffs was between weak and medium. The sequence of strength of the first flush of different pollutants was ammonia nitrogen > total suspended solids > chemical oxygen demand > total nitrogen > mercury > zinc > total phosphorus > lead. The concentration of total suspended solids, chemical oxygen demand, and total phosphorus in roof runoff were significantly positively correlated with the length of rainfall and the dry period and negatively correlated with the rainfall intensity. According to the results of principal component analysis, the main pollutant in rainwater was nitrogen emitted by vehicles, and the main pollutants in roof runoffs were suspended solids, organic matters, and phosphorus pollutants released from the aging of roofing materials and the corrosion of metal down pipes.

Key words: Beijing; roof runoff; rainwater; first flush; principal component analysis

随着城镇化的快速发展, 城市屋面、路面和停车场等不透水下垫面占比迅速提升, 其表面累积的大量污染物在降雨过程中随地表径流汇入受纳水体, 对城市水生态环境质量造成严重威胁^[1]。城市下垫面污染物累积过程主要包括大气干湿沉降、交通运输、工业生产、土壤侵蚀和下垫面腐蚀等, 其中, 屋面作为承接大气干湿沉降的主要载体, 是城市降雨径流污染的重要来源^[2, 3], 深入研究屋面降雨径流污染特征对控制城市径流污染具有积极意义。

西方发达国家针对城市不透水下垫面降雨径流污染物输移规律、来源及其对受纳水体的影响等方面的研究起步相对较早^[4~7]; 近年来, 我国重庆、扬州和澳门等典型城市先后开展了降雨径流监测, 在屋面径流水质特征、初始冲刷效应和径流污染削减等方面^[8~11]取得了一定的研究成果。北京市作为北

方城市的典型代表, 屋面径流水质评价、径流污染负荷控制和资源化利用研究等工作也在逐步推进, 但是关于屋面径流污染物来源解析的研究相对较少, 且现有研究的监测范围主要集中在某个单位或学校, 较大区域范围内或者涉及多个行政区的屋面径流研究相对较少^[10, 12~15]。本研究针对北京市中心城区不同材质特征的屋面径流及附近降雨开展监测, 采用相关性分析和主成分分析等方法对屋面径流污染影响因素及来源进行了分析, 旨在为北京市以及其他北方城市降雨径流污染控制和治理提供科学依据。

收稿日期: 2021-07-20; 修订日期: 2021-10-26

基金项目: 北京市污染源普查项目

作者简介: 席玥(1992~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为城市雨水径流, E-mail: xiyue_1102@163.com

* 通信作者, E-mail: jinghongwei@bjmemc.com.cn

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

北京市属于典型的北温带半湿润半干旱大陆性季风气候,降雨主要集中在夏季,汛期通常为6~9月.北京市的建筑屋面主要分为平顶屋面和坡顶屋面,常见的屋面材料有瓦屋面、石油沥青屋面和水泥砖屋面等^[16].本研究选取坡顶瓦屋面和平顶沥青屋面两种典型的屋面类型作为研究对象,2019年6~9月在中心城区4个监测点位(表1)共进行了7场次降雨径流监测,降雨特征详见表2,监测水质指标包括pH、化学需氧量、悬浮物、氨氮、总磷、总氮、汞、铅和锌,分析方法见表3.屋面降雨径流样品在楼房雨落管口处收集,采样频次按照“前密后疏”的原则,自径流开始产生后采集第一个样品,之后30 min内每隔5 min采集一个样品;30~60 min内每隔10 min采集一个样品;60 min以后每隔30 min采集一个样品,直至产流结束,每场降雨平均采集11~12个样品.雨水样品在屋面监测点位附近采集,在降雨开始后前15 min内采集一个样品,根据降雨历时长短在中后期各采集一个样品,每场降雨平均采集2~4个样品.当降雨历时较短且降雨量变化较大时应适当增加采样频次^[2,47].

表1 采样点特征

Table 1 Characteristics of sampling sites			
所在区域	点位编号	材质特征	所在位置
北京市 中心城区	W1	坡顶瓦屋面	西城区百万庄小区(3层)
	W2	平顶沥青屋面	西城区北京建筑大学校区(5层)
	W3	平顶沥青屋面	丰台区彩虹城小区(16层)
	W4	平顶沥青屋面	海淀区清华大学校区(6层)

表2 2019年6~9月降雨事件相关特征

Table 2 Characteristics of rainfall events from June to September in 2019				
降雨日期 (月-日)	雨前干燥期 /d	降雨量 /mm	降雨历时 /h	降雨类型
06-06	10	10.2	4.0	中雨
06-16	9	4.0	9.0	小雨
07-05	17~19	10.3	8.0	中雨
07-22	2~4	19.0	5.0	中雨
07-28	2~5	19.3	14.0	中雨
08-12	2	3.7	1.5	小雨
09-13	3	19.3	6.0	中雨

1.2 数据处理与分析

1.2.1 降雨事件径流平均浓度

降雨事件中,径流污染物浓度受到降雨特征和区域性质差异等因素的影响,相同事件不同区域或同一区域不同降雨事件中,径流污染物浓度随时间

表3 水质指标分析方法

Table 3 Methods for water quality measurement		
指标	分析方法	参考标准
pH	玻璃电极法; 便携式pH计法	GB/T 6920-86; 文献[18]
化学需氧量	快速消解分光光度法	HJ/T 399-2007
氨氮	纳氏试剂分光光度法	HJ 535-2009
总磷	钼酸铵分光光度法	GB 11893-89
总氮	碱性过硫酸钾消解 紫外分光光度法	HJ 636-2012
铅	等离子体质谱法	HJ 700-2014
锌	等离子体质谱法	HJ 700-2014
汞	原子荧光法	HJ 694-2014
悬浮物	重量法	GB 11901-89

变化波动较大,因此,通常用降雨事件平均浓度评估单次降雨径流污染水平^[19],计算公式见式(1):

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t c_t Q_t dt}{\int_0^t Q_t dt} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i c_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (1)$$

式中,EMC(event mean concentration)为降雨事件径流平均浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); M 为整个径流过程中的污染物总量(mg); V 为径流总量(L); t 为径流时间(min); c_t 为 t 时刻污染物的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Q_t 为 t 时刻径流流量($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); n 为 t 时段内径流取样次数; c_i 为第 i 次取样时径流污染物浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Q_i 为第 i 次取样时径流量($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$).

目前我国尚未制定城市降雨径流水质评价标准,本文参考国内其他相关研究,采用《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)对降雨^[17,20,21]和屋面径流^[10,22,23]水质进行评价,对于该标准中未涉及的悬浮物指标,采用《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)进行评价^[24].

1.2.2 径流初始冲刷效应

城市降雨径流产生初始阶段,由于携带大量污染物导致径流初期出现较高污染物浓度峰值的现象称为径流初始冲刷效应^[2].对降雨初期径流冲刷现象的研究,有利于更加清楚地掌握径流污染负荷变化规律,进而采取有效的初期截留措施.本文采用Geiger等^[25]定义的径流污染负荷累积分布曲线(M/V)来判断初始冲刷效应,分别计算降雨事件中累积径流量和累积污染负荷量,并绘制相关性曲线,当曲线起始坡度大于 45° 时则认为存在初始冲刷效应,计算公式见式(2)和式(3):

$$M(t) = \frac{\int_0^t c_t Q_t dt}{\int_0^t Q_t dt} = \frac{\sum_{i=0}^k \bar{c}_{t_i} \bar{Q}_{t_i} \Delta t}{\sum_{i=0}^k \bar{Q}_{t_i} \Delta t} \quad (2)$$

$$V(t) = \frac{\int_0^t Q_t dt}{\int_0^T Q_t dt} = \frac{\sum_{i=0}^k \bar{Q}_{t_i} \Delta t}{\sum_{i=0}^T \bar{Q}_{t_i} \Delta t} \quad (3)$$

式中, $M(t)$ 为降雨 t 时刻累积污染物负荷量与负荷总量之比; $V(t)$ 为降雨 t 时刻累积径流量与径流总量之比; Q_t 为 t 时刻径流流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$), c_t 为 t 时刻径流污染物浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); T 为降雨径流总时间 (min); Δt 为时间增量 (min); $\bar{Q}_{t_i}$ 为在 Δt 时间的平均径流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); $\bar{c}_{t_i}$ 为在 Δt 时间径流污染物的平均浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[26].

1.2.3 统计分析

采用 Pearson 相关系数判断屋面径流污染物浓度与降雨特征相关性; 利用主成分分析法 (PCA) 结合方差极大旋转法对降雨及屋面径流污染物进行来源解析, 采用 KMO 检验和 Bartlett's 球度检验以判断方法适用性.

本文中的数据统计分析与制图采用 SPSS 18.0 与 Origin 2018 软件.

2 结果与分析

2.1 降雨水质特征

2019 年 6~9 月降雨污染物浓度水平如表 4 所示, 结果表明, 北京市中心城区降雨水质为中性偏弱碱性; 除化学需氧量、总氮和氨氮外, 其他污染物逐月浓度和平均浓度均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类标准限值要求[悬浮物达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 排放标准]; 化学需氧量 8 月浓度略超过 IV 类标准限值, 其他月份和平均浓度均满足 III 类标准限值要求; 氨氮平均浓度满足 V 类标准限值, 逐月浓度在 III 类~劣 V 类(浓度高于 V 类标准)标准限值间波动; 总氮逐月浓度普遍高于 V 类标准限值, 平均浓度超过 V 类标准限值 1.29 倍.

表 4 2019 年 6~9 月降雨污染物浓度¹⁾

Table 4 Concentration of rainwater between June and September in 2019

指标	6 月	7 月	8 月	9 月	均值	III 类标准限值	IV 类标准限值	V 类标准限值
pH	7.10	7.06	7.67	7.33	7.16	6~9	6~9	6~9
化学需氧量	16.91	16.87	31.60	9.40	16.33	20	30	40
氨氮	1.61	2.58	0.57	0.92	1.98	1.0	1.5	2.0
总磷	0.040	0.060	0.022	0.105	0.064	0.2	0.3	0.4
总氮	3.95	5.01	2.07	4.54	4.58	1.0	1.5	2.0
汞	0.020	0.031	0.015	0.029	0.028	0.1	1.0	1.0
铅	0.000 52	0.000 6	0.000 05	0.000 06	0.000 44	0.05	0.05	0.1
锌	0.075	0.062	0.079	0.022	0.057	1.0	2.0	2.0
悬浮物	8.00	6.44	2.00	5.67	6.20	10(一级 A 标准)	20(一级 B 标准)	30(二级标准)

1) pH 无量纲, 汞浓度单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 其余单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

不同研究中城市降雨污染物浓度水平如表 5 所示, 与 2008~2009 年北京市的研究结果相比, 本研究中降雨的总磷、氨氮、重金属和悬浮物浓度有所降低. 与烟台和西安等北方城市相比, 本研究中北京市降雨的悬浮物、化学需氧量和重金属浓度处于中等偏低水平, 但氮类污染物浓度偏高, 有研究表明^[27~29], 交通工具排放的尾气中含有氮氧化物, 这可能是导致北京市氮沉降量高于其他城市的主要原因; 与常州和昆明等南方城市相比, 北京市降雨中氮类污染物浓度也相对较高, 除了与尾气排放量差异有关外, 还可能受南北方土壤环境酸碱度差异等因素的影响^[30].

2.2 屋面径流水质特征

2019 年 6~9 月屋面径流 EMC 如表 6 所示, 结果表明, 北京市中心城区屋面径流水质整体为中性偏弱碱性, 与降雨基本保持一致; 参考《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) V 类标准限值, 径流中各污染物浓度水平普遍处于高位, 其中, 化学需氧

表 5 不同研究中降雨污染物浓度比较¹⁾/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 5 Comparison of contamination concentrations of rainwater in different studies/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

指标	北京 ^[17]	烟台 ^[31]	西安 ^[32]	常州 ^[21]	昆明 ^[33]
pH	—	—	—	—	6.89
化学需氧量	14.5	18	—	22.64	9
氨氮	2.72	0.07	—	1.37	0.719
总磷	0.07	0.071	—	0.044	0.031
总氮	4.23	3.87	—	1.67	0.8
铅	0.001	—	6.31 *	—	9 *
锌	0.21	—	137.92 *	—	42 *
悬浮物	6.5	22	—	12	4

1) “—”表示文献中没有相关数据; * 表示此处单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

量、总氮和氨氮 6~9 月 EMC 平均值分别超过地表水 V 类标准限值 1.01 倍、0.88 倍和 3.34 倍, 悬浮物 EMC 平均值超过《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 二级排放标准 0.37 倍. 按照雨污分流排水系统, 屋面径流通过雨水管直接排放进入受纳河道, 将会对中心城区河道水

质产生影响^[15]. 与同时段降雨相比,屋面径流水质明显变差,说明其径流污染主要由雨前干燥期屋面累积污染物被冲刷进入水体所致;但 2019 年 8 月屋面径流化学需氧量浓度反而低于同时段降雨,这可能与屋顶表面对降雨中携带的有机物存在吸附作用有关^[34]. 2019 年 6~7 月屋面径流污染程度整体高于 8~9 月,化学需氧量和悬浮物浓

度差异尤为明显,一方面可能由于北京市 6~7 月平均气温相对较高,屋顶表面的黑色沥青受太阳暴晒易吸热变软老化,从而释放出更多有机物颗粒导致径流污染程度较高^[16],另一方面,还可能与随着累计降雨次数增多,屋顶表面累积的污染物逐渐被冲刷减少导致后期屋面径流污染程度降低有关.

表 6 2019 年 6~9 月屋面径流 EMC¹⁾

Table 6 EMC of roof runoff between June and September in 2019

指标	6 月	7 月	8 月	9 月	均值	V 类标准限值
pH	7.31	6.94	7.71	7.10	7.09	6~9
化学需氧量	105.00 *	86.61 *	3.30	3.13	80.78 *	40
氨氮	3.57 *	4.50 *	0.27	0.66	3.77 *	2.0
总磷	0.158	0.148	0.010	0.060	0.136	0.4
总氮	7.59 *	10.33 *	2.74 *	2.61 *	8.69 *	2.0
汞	0.238	0.134	0.030	0.010	0.146	1.0
铅	0.002 31	0.002 00	0.000 09	0.000 01	0.003 03	0.1
锌	0.475	0.528	0.120	0.200	0.469	2.0
悬浮物	39.98 *	48.31 *	7.71	7.68	41.15 *	30(二级标准)

1) pH 无量纲,汞浓度单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其余单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; * 表示超过对应评价标准限值

不同研究中城市屋面径流 EMC 如表 7 所示,与 2010 年北京市的研究结果相比,本研究中北京市屋面径流中的氮磷类污染物浓度有所降低;与北方城市西安市相比,本研究中北京市屋面径流化学需氧量、总氮和悬浮物浓度相对较低,其他污染物浓度水平与西安市较为接近;与重庆、昆明和扬州等南方城市相比,北京市屋面径流化学需氧量、氮类污染物和锌的浓度水平相对较高.不同城市屋面径流污染物浓度水平差异除了与降雨特征和屋面材质等因素有关外,同时还受城市经济发展水平、产能结构和污染治理水平等多重因素的影响^[11,35].

表 7 不同研究中屋面径流 EMC 比较¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 7 Comparison of EMC values of roof runoff in different studies/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

指标	北京 ^[10]	西安 ^[36]	昆明 ^[33]	扬州 ^[11]	重庆 ^[8]
pH	6.77	—	6.7	—	7.1
化学需氧量	68.91	98.34	58	—	44.98
氨氮	5.67	—	1.65	1.76	—
总磷	0.084	0.132	0.39	0.35	0.06
总氮	11.75	14.58	2.72	8.31	4.51
铅	0.006	59.02 *	34 *	—	—
锌	0.144	280.08 *	204 *	—	—
悬浮物	37.70	63.5	99.2	37	437.67

1) “—”表示文章中没有相关数据; * 表示此处单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

2.3 屋面径流初始冲刷特征

小雨和中雨条件下屋面各监测点位径流污染负荷累积分布曲线(M/V)如图 1 和图 2 所示,结果表明,不同屋面径流初始冲刷特征存在差异,小雨条件下,W1 瓦屋面径流中悬浮物、总磷和汞表现出一定

的初始冲刷效应;W2 中层沥青屋面径流中各污染物均表现出一定程度的初始冲刷效应,其中,悬浮物和铅的初始冲刷效应相对较为明显;W3 高层沥青屋面径流中各污染物除总磷和铅外均表现出一定初始冲刷效应,尤其是化学需氧量、氨氮、总氮和汞初始冲刷效应相对较为明显;W4 中层沥青屋面径流中仅悬浮物表现出一定初始冲刷效应.中雨条件下,W1 瓦屋面径流中各污染物除悬浮物和总磷外均表现出一定的初始冲刷效应,尤其是总氮、铅和锌初始冲刷效应相对较为明显;W2 中层沥青屋面径流化学需氧量、氨氮、总氮和铅均表现出一定初始冲刷效应,其中,氨氮径流初始冲刷效应较为明显;W3 高层沥青屋面径流中各污染物除总磷外均表现出一定初始冲刷效应,其中,氨氮径流初始冲刷效应相对较为明显;W4 中层沥青屋面径流中各污染物除总磷外均表现出一定初始冲刷效应,其中悬浮物、化学需氧量和汞初始冲刷较为明显.

有研究表明^[7,37],对累积分布曲线(M/V)进行幂函数拟合,确定拟合指数 b ,并计算当累积径流量对径流总量占比达到 30% 时的累积污染物负荷占比(FF_{30}),进而对各污染物径流初始冲刷强度进行定量分析,结果如表 8 所示:屋面径流各污染物在不同雨量条件下径流初始冲刷强度存在差异,小雨条件下,冲刷强度达到中等级别的污染物包括悬浮物、总磷、汞和化学需氧量,前 30% 径流量中污染物携带量占比依次为 43.4%、39.4%、38.8% 和 37.5%;中雨条件下,除悬浮物和总磷外,其他污染物 FF_{30} 均有所增加,且大部分达到中等冲刷级别,说明雨量增

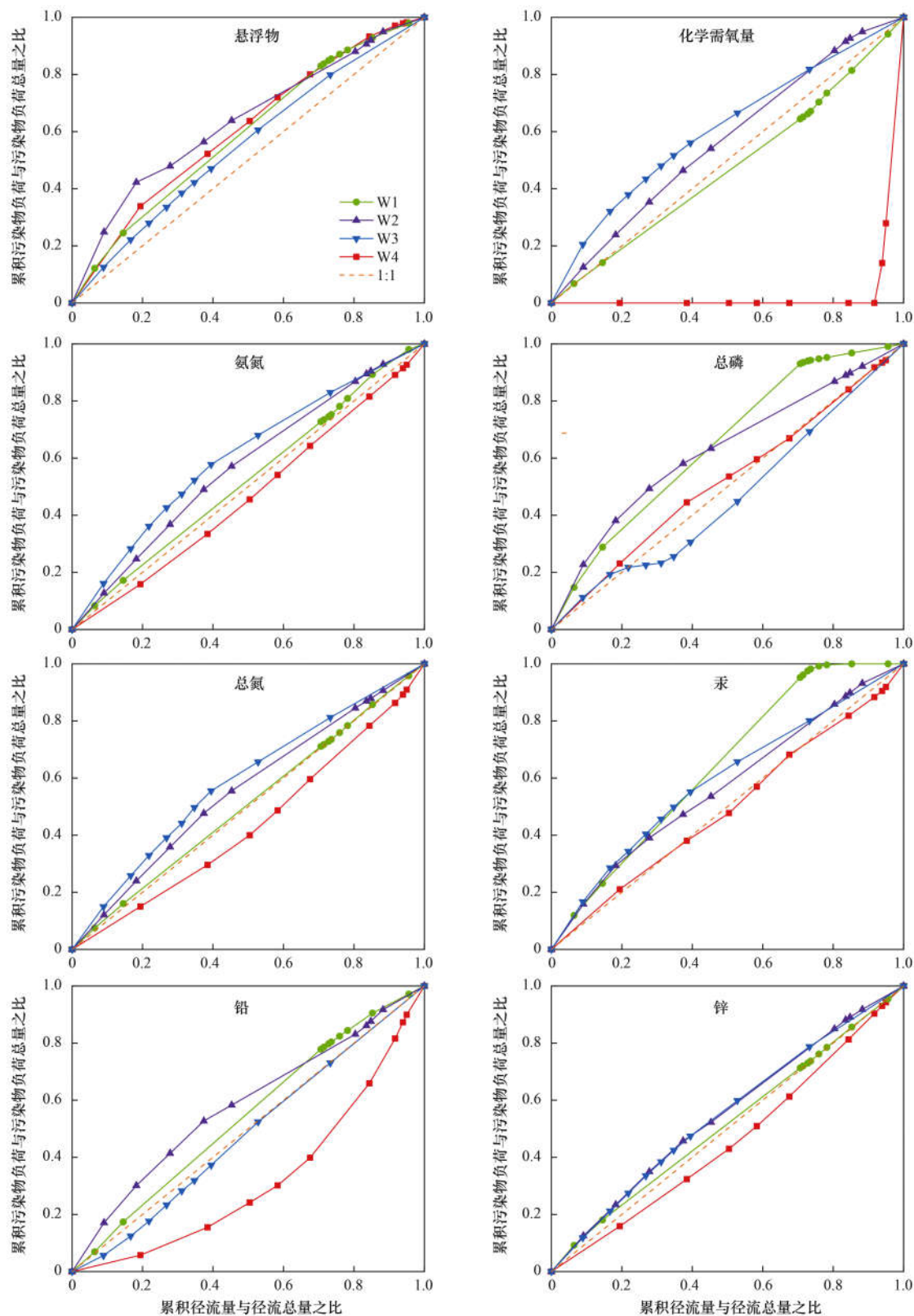


图1 屋面径流污染负荷累积分布曲线(小雨)

Fig. 1 Cumulative distribution curves of roof runoff pollution load under light rain

大有利于对屋面累积污染物的冲刷。悬浮物颗粒由于具有较强的迁移能力,雨量较小时即可被冲刷进入水体,雨量增大反而对径流污染物浓度起到较大稀释作用,导致初始冲刷强度有所减弱^[22];降雨径流中的磷常吸附于颗粒物表面^[12,38],因此也表现出

与悬浮物类似的径流冲刷规律。总体来看,屋面径流各污染物初始冲刷强度由大到小排序依次为:氨氮>悬浮物>化学需氧量>总氮>汞>锌>总磷>铅,前30%径流量中污染物携带量占比分别为40.9%、40.4%、40.0%、38.3%、37.7%、37.2%、

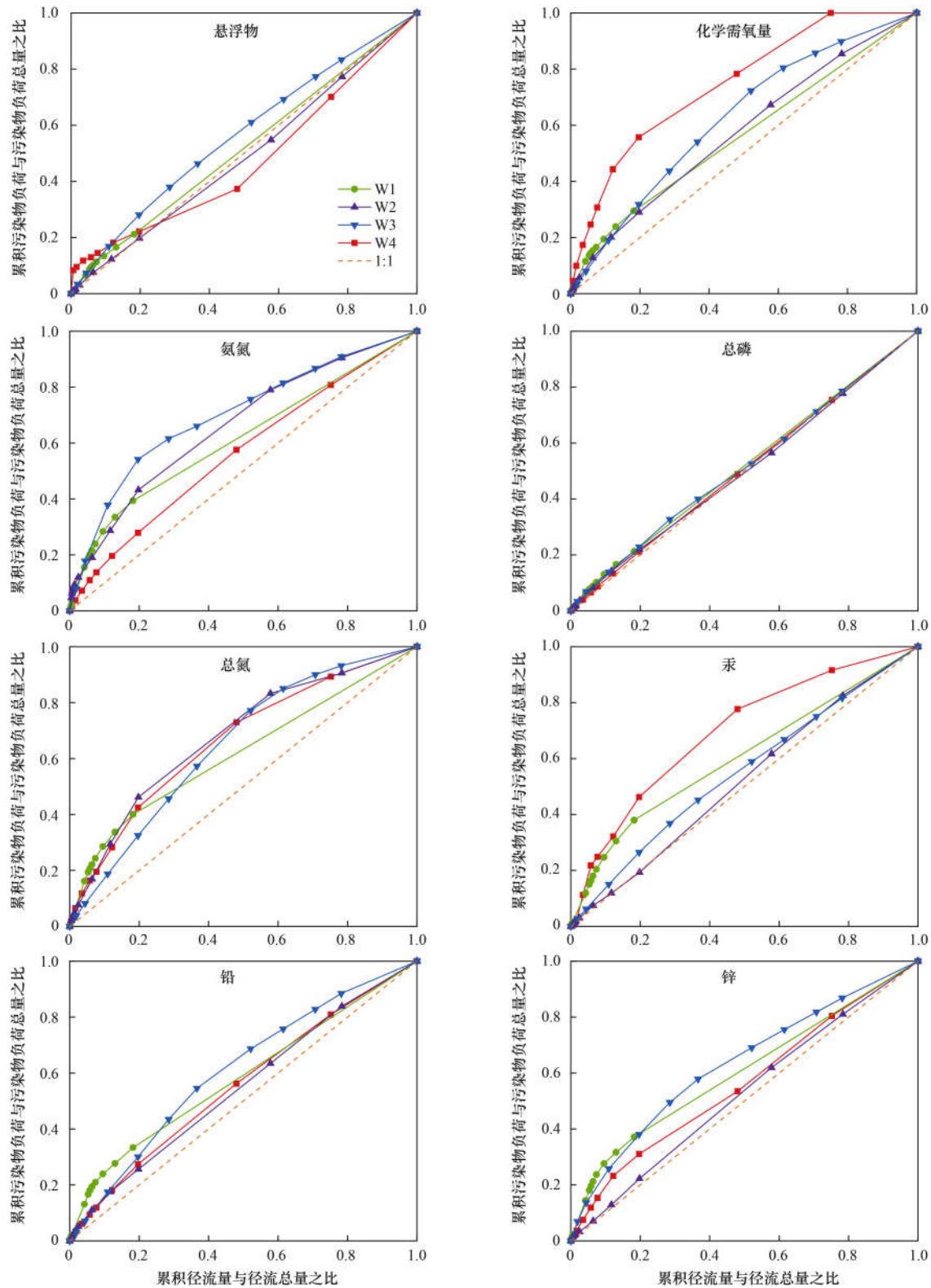


图2 屋面径流污染负荷累积分布曲线(中雨)

Fig. 2 Cumulative distribution curves of roof runoff pollution load under moderate rain

36.6%和33.1%,径流污染物初始冲刷强度以中等和微弱为主,该定量结果略低于周冰等^[2]和张伟等^[15]的研究,说明中心城区屋面降雨产流初期径流量并未按比例携带更多的污染负荷,因此对于中心城区仅截留处理初期屋面降雨径流难以实现对径流污染的有效控制^[39]。

3 讨论

3.1 屋面径流污染物浓度分布特征

不同屋面监测点位由于屋顶材质和所处环境的不同,径流污染物浓度分布特征存在差异.本研究中各屋面径流EMC分布如图3所示,结果表明,4个

表 8 屋面径流污染物 FF₃₀/ %
Table 8 FF₃₀ of roof rainfall runoff/ %

降雨级别	化学需氧量	氨氮	总磷	总氮	汞	铅	锌	悬浮物
小雨	37.5	35.0	39.4	33.1	38.8	27.6	32.8	43.4
中雨	42.5	46.8	33.8	43.5	36.6	38.7	41.5	37.3
均值	40.0	40.9	36.6	38.3	37.7	33.1	37.2	40.4

监测点位中,W1 瓦屋面径流污染程度相对最高,其径流化学需氧量、氨氮和总磷 EMC 平均值均高于其他 3 个沥青屋面点位,径流悬浮物和总氮 EMC 平均值也处于中高水平. 这与车武等^[16] 和刘大喜等^[20] 的研究发现,沥青屋面径流污染程度往往高于瓦屋面的结果不同,主要原因可能在于本研究中的瓦屋面与沥青屋面相比所处空间高度相对较低,落叶腐败和鸟粪累积现象较为严重,导致径流有机污染程度较高^[40],此外,该区域建成年代较早,屋顶瓦片老化程度相对较高,表面孔隙更易于污染物的吸附和累积^[11],进而影响径流水质. 本研究结果也表明,瓦屋面的径流污染程度不应被低估,尤其是老旧小区屋面径流污染问题仍需重点关注^[41]. W2 沥青屋面与 W4 沥青屋面均位于环境相对较好的校园内部,且空间高度接近,但前者径流污染程度明显高于后者,除了与沥青老化程度存在差异有关外,还可能受屋顶清扫频次不同的影响^[13].

3.2 屋面径流污染物浓度与降雨特征指标相关性分析

屋面径流污染物浓度还受到雨前干燥期长度、

降雨时长、降雨量和降雨强度等降雨特征的影响^[22]. 本研究考察了屋面径流污染物浓度与降雨特征指标之间的相关性,如表 9 所示,结果表明,屋面径流中悬浮物浓度与干燥期长度在 0.01 显著水平下呈显著正相关,与降雨强度在 0.05 显著水平下呈显著负相关;化学需氧量浓度与干燥期长度和降雨强度在 0.01 显著水平下分别呈显著正相关和显著负相关;汞和总磷浓度与干燥期长度和降雨强度在 0.05 显著水平下分别呈显著正相关和显著负相关.

雨前干燥期越长,大气沉降和屋面材质老化等过程累积的污染物颗粒量越多,导致径流悬浮物浓度越高. 单位时间内降雨量越大,被冲刷进入水体的污染物量越多,但同时径流污染物浓度稀释程度也越强^[42],本研究中屋面径流悬浮物浓度与降雨强度呈负相关关系,说明降雨的稀释作用强度大于冲刷作用,该结果也与欧阳威等^[14] 和任玉芬等^[22] 的研究结果相一致. 屋面径流中化学需氧量、总磷和汞浓度与干燥期长度和降雨强度的相关性也表现出与悬浮物类似的规律,这主要与这 3 种污染物在径流中主要依附颗粒态存在有关^[10,38].

表 9 屋面径流水质特征与降雨特征相关性分析¹⁾

Table 9 Correlation of the water quality data in roof runoff and rainfall characteristics

	干燥期长度		降雨时长		降雨量		降雨强度	
	相关系数	P 值	相关系数	P 值	相关系数	P 值	相关系数	P 值
pH	-0.071	0.793	-0.528 *	0.036	-0.445	0.084	0.037	0.893
化学需氧量	0.691 **	0.003	0.346	0.190	-0.447	0.082	-0.692 **	0.003
氨氮	0.141	0.601	0.348	0.187	-0.012	0.964	-0.247	0.356
总磷	0.576 *	0.020	0.373	0.154	-0.235	0.381	-0.594 *	0.015
总氮	0.230	0.391	0.360	0.170	0.142	0.601	-0.153	0.572
汞	0.503 *	0.047	0.273	0.306	-0.422	0.104	-0.552 *	0.027
铅	0.413	0.112	0.235	0.382	-0.106	0.696	-0.316	0.233
锌	0.461	0.072	-0.047	0.864	-0.250	0.350	-0.219	0.415
悬浮物	0.808 **	0.000	0.355	0.177	-0.296	0.265	-0.600 *	0.014

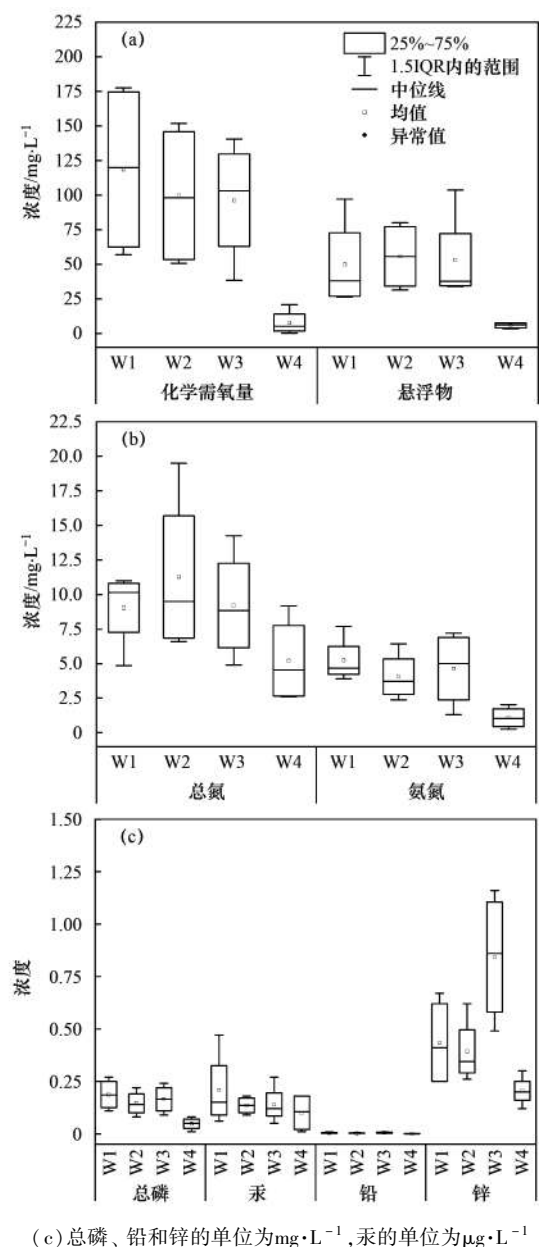
1) 相关系数指 Pearson 相关系数; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3.3 降雨及屋面径流污染物主成分分析

对降雨和屋面径流污染物浓度数据分别进行主成分分析,检验结果显示,二者的 KMO 值均大于 0.5, Bartlett's 测试值 P 均小于 0.05,说明可以采用该方法对污染物提取主因子进行源解析,最终计算结果如表 10 所示.

由表 10 可知,降雨中共提取出影响水质的 3 个

主成分,方差贡献率分别为 34.819%、24.023% 和 20.282%,累积方差贡献率为 79.125%,其中,对方差起主要贡献的主成分 1 与总氮和汞的相关性较高,机动车尾气中往往含有氮氧化合物和重金属污染物,贺成武等^[27] 和王德宣等^[28] 的研究发现城市氮沉降与交通运输密切相关,逮娟^[43] 的研究结果则表明交通运输是城市大气降雨中汞的主要来源之



(c)总磷、铅和锌的单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,汞的单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

图3 各屋面径流污染物 EMC 分布情况

Fig. 3 Distribution of EMC value of different roof runoffs

一,因此主成分1可以解释为交通运输排放源;主成分2与氨氮相关性较高,根据李新艳等^[35]的研究,我国大气中的氨气来源占比由高到低分别为畜禽排泄、氮肥施用、人类粪便和工业生产氮肥与合成氨等,考虑到目前北京市工农业生产分布情况,并结合唐莉华等^[13]和张静等^[29]的研究,发现城区屋顶厕所排气口附近降雨和屋面径流中氨氮浓度明显偏高的结果,主成分2可以解释为生活源(主要来自厕所排气口排放);主成分3与化学需氧量相关性较高,可能主要与生物质燃烧、大气挥发性有机物的二次合成和机动车尾气排放等过程有关^[44~46]。

屋面径流共提取出影响水质的2个主成分,方差贡献率分别为43.381%和26.471%,累积方差累积贡献率为69.852%;其中,主成分1对方差贡献率起到主要作用,该主成分与悬浮物、化学需氧量、总磷和重金属的相关性较高,可解释为屋面材料老化和金属雨落管锈蚀释放源^[3,40];主成分2与氮类污染物的相关性较高,其来源主要包括大气干湿沉降和鸟类粪便累积等^[47]。

对比降雨和屋面径流污染物主成分结果可以发现,影响降雨和屋面径流水质的主成分均与化学需氧量、氨氮和总氮相关性较高,屋面是承接大气沉降的主要载体,因此降雨和屋面径流污染物来源表现出一定相似性;与降雨相比,屋面径流污染物主成分相关性指标增加了悬浮物、铅和锌,说明这3项指标主要与屋面污染物累积有关。根据主成分分析结果,大气降雨污染物主要来自交通运输排放,而屋面径流污染物主要来自屋面材料老化和金属雨落管锈蚀,因此可有针对性地采取汽车尾气排放削减、屋面材质抗老化和金属雨落管防锈蚀等措施,以进一步改善中心城区降雨和屋面径流水质。

表10 雨水和屋面径流主成分分析结果

Table 10 Results of principal component analysis and varimax rotated loading for rainwater and roof runoff

指标	雨水			屋面径流	
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2
pH	0.107	-0.603	0.592	-0.016	-0.745
化学需氧量	-0.133	0.211	0.893	0.852	0.270
氨氮	0.387	0.864	0.013	0.264	0.913
总磷	0.648	-0.185	-0.392	0.810	0.341
总氮	0.952	0.164	0.131	0.188	0.841
汞	0.957	-0.039	0.088	0.600	-0.097
铅	-0.154	0.667	0.023	0.838	0.166
锌	-0.594	0.625	0.250	0.793	0.209
悬浮物	-0.580	0.332	-0.660	0.852	0.132
方差贡献率/%	34.819	24.023	20.282	43.381	26.471
累计方差贡献率/%	34.819	58.842	79.125	43.381	69.852

4 结论

(1)北京市中心城区屋面径流总氮、氨氮、化学需氧量和悬浮物浓度较高,径流 EMC 平均值均超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) V 类标准限值[悬浮物超过《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 二级排放标准];降雨污染物浓度相对较低,但总氮和氨氮也存在超标情况。

(2)不同降雨条件下各屋面径流初始冲刷效应存在差异;污染物径流初始冲刷强度由大到小排序依次为:氨氮 > 悬浮物 > 化学需氧量 > 总氮 > 汞 > 锌 > 总磷 > 铅,初始冲刷强度以中等和微弱为主。雨量增大有利于屋面累积污染物的冲刷和输移,但悬浮物和总磷反而在小雨条件下初始冲刷效应更为明显,可能主要与污染物的迁移能力存在差异有关。

(3)屋面径流悬浮物浓度与干燥期长度呈显著正相关,与降雨强度呈显著负相关;屋面径流中化学需氧量、总磷和汞等污染物常吸附到悬浮物颗粒表面并随之迁移,因此也表现出类似的相关性规律。

(4)根据主成分分析结果,降雨中的主要污染物为交通运输来源的氮类污染物,屋面径流中的主要污染物则为屋面材料老化和金属雨落管锈蚀释放的悬浮物、有机物和磷类污染物,可重点针对汽车尾气排放削减、屋面材质抗老化和金属雨落管防锈蚀采取相应措施以改善中心城区降雨和屋面径流水质。

参考文献:

- [1] 尹澄清. 城市面源污染的控制原理和技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [2] 周冰, 张千千, 缪丽萍, 等. 不同使用年限沥青屋面降雨径流特征研究[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(S1): 236-242. Zhou B, Zhang Q Q, Miao L P, et al. Research on the characterization of runoff on asphalt roofs of different building times [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **39**(S1): 236-242.
- [3] 李实, 于江华, 陈亮. 不同降雨强度下铅在屋面径流中迁移规律的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(3): 910-917. Li S, Yu J H, Chen L. Characterizing the transport and distribution of lead in roof-runoff system under different rain intensity [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(3): 910-917.
- [4] Förster J. Variability of roof runoff quality [J]. Water Science & Technology, 1999, **39**(5): 137-144.
- [5] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. Ecological Applications, 1998, **8**(3): 559-568.
- [6] Brun S E, Band L E. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2000, **24**(1): 5-22.
- [7] 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.
- [8] 蒋荣廷. 重庆市悦来新城典型下垫面雨水径流水质特性的初步研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [9] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门屋面径流特征初步研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(7): 1076-1081. Huang J L, Du P F, Ou Z D, et al. Preliminary investigation on characterization of urban roof runoff in Macau [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, **26**(7): 1076-1081.
- [10] 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. Hou P Q, Ren Y F, Wang X K, et al. Research on evaluation of water quality of Beijing urban stormwater runoff [J]. Environmental Science, 2012, **33**(1): 71-75.
- [11] 何湖滨, 陈诚, 林育青, 等. 城市不同材料屋面径流的污染负荷特性[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1287-1294. He H B, Chen C, Lin Y Q, et al. Pollution load characteristics of runoff from urban roofs of different materials [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1287-1294.
- [12] 武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 等. 城市典型屋面径流的排污特征[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(8): 4351-4356. Wu J L, Ren Y F, Wang X M, et al. Pollution wash-off characterization in urban typical roof stormwater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(8): 4351-4356.
- [13] 唐莉华, 何康茂, 梁宁, 等. 北京校园区降雨径流产污特性及其对水环境的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, **54**(8): 1025-1030. Tang L H, He K M, Liang N, et al. Urban rainfall-runoff pollution on the campus in Beijing and its impact on water body [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, **54**(8): 1025-1030.
- [14] 欧阳威, 王玮, 郝芳华, 等. 北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(9): 1249-1256. Ouyang W, Wang W, Hao F H, et al. Pollution characterization of urban stormwater runoff on different underlying surface conditions [J]. China Environmental Science, 2010, **30**(9): 1249-1256.
- [15] 张伟, 罗乙兹, 钟兴, 等. 北京市中心城区某沥青屋面和金属屋面径流污染特征[J]. 科学技术与工程, 2019, **19**(23): 358-365. Zhang W, Luo Y Z, Zhong X, et al. Characteristics of runoff pollution in asphalt roof and metal roof in downtown Beijing [J]. Science Technology and Engineering, 2019, **19**(23): 358-365.
- [16] 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. Che W, Wang H Z, Ren C, et al. Studies on roof runoff pollution and utilization in Beijing urban area [J]. China Water & Wastewater, 2001, **17**(6): 57-61.
- [17] 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. Jing H W, Hua L, Guo J, et al. Non-Point source pollution monitoring and its loads estimation study on surface water environment in Beijing [J]. Environmental Monitoring in China, 2012, **28**(6): 106-111.
- [18] 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.
- [19] 李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 等. 北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 919-926. Li H Y, Xu B P, Xu S L, et al. Research on pollution load of sediments in storm sewer in Beijing district [J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 919-926.
- [20] 刘大喜, 李倩倩, 李铁龙, 等. 北方沿海城市屋面雨水径流水质及影响因素[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(12): 100-105.

- Liu D X, Li Q Q, Li T L, *et al.* Study on characteristics of roof runoff water quality in the northern coastal city and its influencing factors[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(12): 100-105.
- [21] 张香丽, 赵志杰, 秦华鹏, 等. 常州市不同下垫面污染物冲刷特征[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, **54**(3): 644-654.
- Zhang X L, Zhao Z J, Qin H P, *et al.* Characteristics of pollutants flush on different types of underlying surface in Changzhou [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, **54**(3): 644-654.
- [22] 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.
- Ren Y F, Wang X K, Ouyang Z Y, *et al.* Analysis of first flush effect of typical underlying surface runoff in Beijing urban city [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 373-378.
- [23] 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 等. 宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3275-3284.
- Xu Y J, Gong Y M, Bi J P, *et al.* Analysis of rainwater runoff pollution characteristics of various typical underlying surfaces in Ningbo[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3275-3284.
- [24] 郭婧, 马琳, 史鑫源, 等. 北京城市道路降雨径流监测与分析[J]. *环境化学*, 2011, **30**(10): 1814-1815.
- [25] Geiger W F. Flushing effects in combined sewer systems[A]. In: Yen B C, ed. *Proceedings of the 4th international conference on urban storm drainage*[C]. Lausanne, Switzerland, 1987. 40-46.
- [26] 吴民山, 李思敏, 张文强, 等. 天津滨海临港工业园区径流污染特征及其控制策略[J]. *环境工程学报*, 2020, **14**(12): 3435-3446.
- Wu M S, Li S M, Zhang W Q, *et al.* Pollution characteristics and control strategies of runoff in Tianjin Binhai Lingang industrial park [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, **14**(12): 3435-3446.
- [27] 贺成武, 任玉芬, 王效科, 等. 北京城区大气氮湿沉降特征研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 490-494.
- He C W, Ren Y F, Wang X K, *et al.* Characteristics of atmospheric nitrogen wet deposition in Beijing urban area [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 490-494.
- [28] 王德宣, 赵普生, 张玉霞, 等. 北京市区大气氮沉降研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 1987-1992.
- Wang D X, Zhao P S, Zhang Y X, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition in urban area of Beijing[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(9): 1987-1992.
- [29] 张静, 周玉文, 王中正, 等. 北方城市天然降水中氨氮污染特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(6): 129-134.
- Zhang J, Zhou Y W, Wang Z Z, *et al.* Characteristics of ammonia nitrogen pollution in natural rainfall of Chinese northern city[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(6): 129-134.
- [30] 黄银芝. 上海市多年湿沉降化学组成特征分析及成因探讨[D]. 上海: 东华大学, 2009.
- [31] 刘文平. 烟台地区院落式住宅屋面雨水收集处理研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2019.
- [32] 袁宏林, 李星宇, 王晓昌. 西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4143-4147.
- Yuan H L, Li X Y, Wang X C. Heavy metals pollution and analysis of seasonal variation runoff in Xi'an[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4143-4147.
- [33] 施国飞. 昆明市城市住宅小区径流雨水水质特性及资源化利用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [34] 常静. 城市地表灰尘—降雨径流系统污染物迁移过程与环境效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [35] 李新艳, 李恒鹏. 中国大气 NH_3 和 NO_x 排放的时空分布特征[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(1): 37-42.
- Li X Y, Li H P. Emission and distribution of NH_3 and NO_x in China[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(1): 37-42.
- [36] 吴亚刚, 陈莹, 陈望, 等. 西安市某文教区典型下垫面径流污染特征[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 3104-3112.
- Wu Y G, Chen Y, Chen W, *et al.* Characteristics of runoff pollution of different underlying surfaces in typical cultural and educational area of Xi'an [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 3104-3112.
- [37] 王昭, 韩霁昌, 李娟, 等. 绕城高速路面径流重金属初期效应研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(S1): 157-162.
- Wang Z, Han J C, Li J, *et al.* Research on road runoff of heavy metals first flush effect from city beltway [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(S1): 157-162.
- [38] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 北京市城市非点源污染特征的研究[J]. *中国环境监测*, 2005, **21**(6): 63-65, 19.
- Han B, Wang X K, Ouyang Z Y. Study on characterization of urban runoff pollution in Beijing [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, **21**(6): 63-65, 19.
- [39] 陈莹, 王昭, 吴亚刚, 等. 降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2828-2835.
- Chen Y, Wang Z, Wu Y G, *et al.* Impacts of rainfall characteristics and occurrence of pollutant on effluent characteristics of road runoff pollution [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2828-2835.
- [40] Göbel P, Dierkes C, Coldewey W G. Storm water runoff concentration matrix for urban areas [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, **91**(1-2): 26-42.
- [41] 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.
- Lu Y C, Ji G X, Lü T H, *et al.* Research on the pollution characteristics and rule of runoff from roofs of urban buildings in primary stage [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2011, **22**(4): 85-88.
- [42] Van Metre P C, Mahler B J. The contribution of particles washed from rooftops to contaminant loading to urban streams [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(10): 1727-1741.
- [43] 逯娟. 兰州市大气降水中重金属元素地球化学特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(10): 170-175.
- Lu J. Geochemical characteristics of heavy metal elements with atmospheric precipitation in Lanzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(10): 170-175.
- [44] Feng J L, Li M, Zhang P, *et al.* Investigation of the sources and seasonal variations of secondary organic aerosols in $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai with organic tracers [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **79**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.07.022.
- [45] 倪雪. 典型城市和森林下垫面大气水溶性有机碳的干湿沉降观测研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [46] Guo H T, Zhou J B, Wang L, *et al.* Seasonal variations and sources of carboxylic acids in $\text{PM}_{2.5}$ in Wuhan, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(2): 517-528.
- [47] 庞立军, 程伍群, 赵军庆, 等. 某大学校园及周边不同下垫面降雨径流污染过程研究[J]. *水电能源科学*, 2020, **38**(2): 69-72.
- Pang L J, Cheng W Q, Zhao J Q, *et al.* Study on rainfall-runoff pollution process of different underlying surfaces in university campuses and their periphery [J]. *Water Resources and Power*, 2020, **38**(2): 69-72.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)