

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

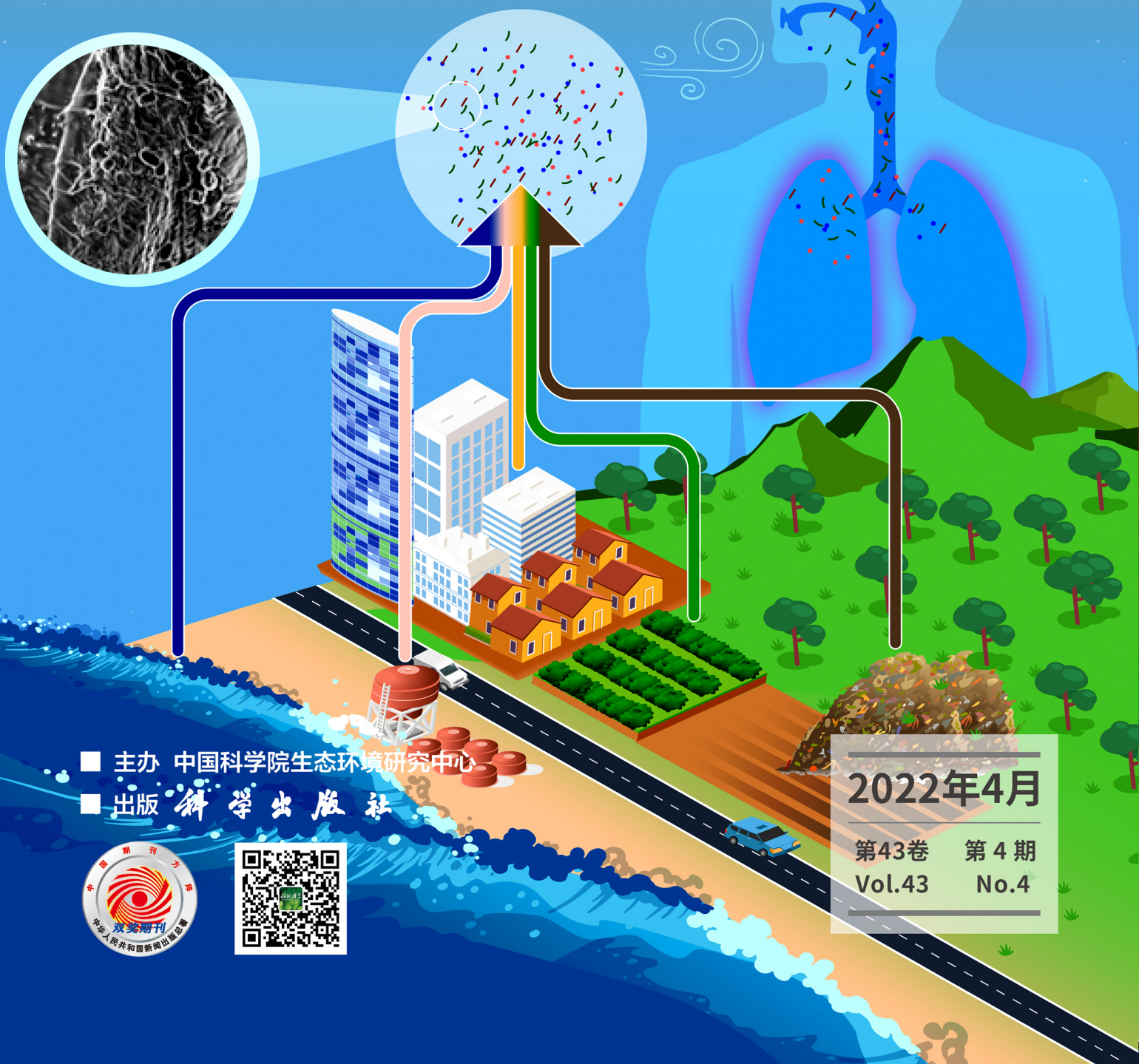
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢桢, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	
《环境科学》征稿简则(1975)	
信息(1996, 2029, 2080)	

南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析

岳桢铨, 李一平*, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬

(河海大学环境学院, 南京 210098)

摘要: 降雨径流是城市河道污染的重要来源之一。为了解降雨径流的污染特征,对南宁市老城区进行降雨径流同步采样监测,分析不同降雨条件下不同下垫面污染状况、初期冲刷效应及污染贡献比等特征,探讨了径流污染初期冲刷计算方法及影响因素分析,并根据老城区菜市场下垫面讨论降雨径流下垫面选取标准与必要性。结果表明,南宁市老城区径流污染中,道路及菜市场的COD和TSS场次降雨径流平均浓度(EMC)大于绿地和屋顶,营养盐污染物EMC值由大到小依次是菜市场、绿地、屋顶和道路。大雨条件下各下垫面均有较为明显的初期冲刷效应,初期冲刷系数(b)均值为0.67,道路和绿地初期输送污染物较多;小雨和中雨条件下总体未产生明显的初期冲刷效应, b 均值分别为0.83和0.94,评价冲刷效应更倾向于选取采用全过程计算的 b 值。基于多元统计分析表明,道路径流TSS的EMC值与总降雨历时之间呈显著正相关,绿地径流TN的EMC值与平均降雨强度间呈显著负相关。是否考虑菜市场作为下垫面的一类对营养盐污染负荷计算结果影响较大,对COD和TSS负荷计算结果几乎无影响,大雨下营养盐污染负荷差值百分比达80%,此时道路和菜市场污染物EMC差值百分比达到1012%。

关键词: 降雨径流; 污染特征; 污染溯源; 初期冲刷效应; 下垫面; 老城区

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2018-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107040

Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City

YUE Zhen-wu, LI Yi-ping*, ZHOU Yu-xuan, ZHENG Ke, YU Shan, WU Bin

(College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Rainfall runoff is one of the important sources of urban river pollution. In order to understand the pollution characteristics of rainfall runoff, the synchronous sampling and monitoring of rainfall runoff in the old urban area of Nanning were carried out; the pollution condition, initial scouring effect, and pollution contribution ratio of different underlying surfaces under different rainfall conditions were analyzed; and the calculation method and influence factor analysis of initial scouring of runoff pollution were discussed. According to the underlying surface of the vegetable market in the old urban area, the selection standard and necessity of the underlying surface of rainfall runoff were discussed. The results showed that the average concentration (EMC) of COD and TSS in roads and vegetable markets were greater than those in green spaces and roofs in the runoff pollution of the old urban area of Nanning, and the EMC values of nutrient pollutants in field rainfall runoff were ranked in decreasing order as vegetable markets, green spaces, roofs, and roads. Under the condition of heavy rain, each underlying surface had an obvious initial scouring effect, the average value of initial scouring coefficient (b) was 0.67, and there were many pollutants transported by roads and green spaces at the initial stage. Under light rain and moderate rain conditions, there was no obvious initial scouring effect, and the average b values were 0.83 and 0.94, respectively. The b value calculated by the whole process was preferred for evaluating the scouring effect. Based on multivariate statistical analysis, the EMC value of TSS in road runoff was significantly positively correlated with the total rainfall duration (RD), and the EMC value of TN in green land runoff was significantly negatively correlated with the average rainfall intensity (ARI). Whether the vegetable market was considered as the underlying surface had a great impact on the calculation results of nutrient pollution load but had little impact on the calculation results of COD and TSS load. The difference percentage of nutrient pollution load under heavy rain reached 80%. Under this condition, the difference percentage of pollutant EMC between the road and vegetable market reached 1012%.

Key words: rainfall runoff; pollution characteristics; pollution tracing; first flush effect; underlying surface; old urban area

随着我国改革开放不断进行,城镇化率不断提高,以往城市建设用材大多以不透水材料为主,城市不透水面积急剧增加,带来降雨径流量上升、冲刷污染物能力变强和城市内涝频发等一系列问题。由于城市各下垫面在旱天有有机质^[1]、氮磷污染物^[2]和重金属^[3]等污染物的累积,降雨时污染物被冲刷下河,导致径流污染已成为城市水环境污染的重要来源之一^[4,5],对受纳水体微生物等生态群落造成不利影响^[6]。目前国内外对于降雨径流污染的研究较为广泛,包括对不同下垫面^[7]、不同材料^[8,9]、不同污染物质^[10]或不同城市^[11~13]的降雨径流污染差异化影响研究。

以往径流污染研究多侧重于对降雨径流水质特性、溯源分析、初期冲刷效应或交通流量对径流水质影响等单方面研究^[14],对南宁市的相关研究也仅从径流污染物特性及初期冲刷的角度进行探讨^[15]。南宁市老城区建设年代久远,城市透水性较差,加之雨污管道混接现象较为严重以及排水口溢流较多,使得老城区河道“逢雨必黑”,针对南宁市老城区进行降雨径流污染特征分析和评判更具实际意义。本

收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52039003, 51779072)

作者简介: 岳桢铨(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市降雨径流污染, E-mail: 1920261581@qq.com

* 通信作者, E-mail: liyiping@hhu.edu.cn

研究通过实地调查发现老城区内菜市场众多且为高营养盐负荷区域,创新性地将菜市场作为一种下垫面.因此本研究选取了4类下垫面(道路、菜市场、绿地和屋顶),探究南宁市老城区各下垫面降雨径流水质特征、径流初期冲刷效应和径流污染溯源,并与不同城市的降雨径流污染物浓度值进行比较分析,同时对初期冲刷效应计算方法及影响因素和径流污染负荷计算时下垫面的选取标准进行探讨,以期在城市防治径流污染等提供数据资料基础及科学决策依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

南宁地处亚热带,属亚热带季风气候,年均降雨量约1 300 mm,降雨一般集中在4~9月,约占全年

降雨量的80%.本研究区域位于南宁市西乡塘区,区内人口密度大,为南宁市老城区的一部分,用地类型包括居住用地和商业用地.研究区域面积为12.7 hm²,采用GIS对下垫面进行提取,4类下垫面及所占面积比分别为道路30%,菜市场9%,屋顶37%,绿地24%.研究区域位于老城区,日常车流量较大,道路扬尘积灰较多,清扫也较为频繁(1 d约1~2次).

1.2 采样及检测

1.2.1 采样点布置

本次研究选取6个径流采样点,分别为道路2个(车行道及人行道)、屋顶2个(高层新小区及老旧平房)、菜市场1个和绿地1个,并在绿地采样点布置1台自动雨量监测设备,研究区域及采样点位置见图1.



图1 研究区域及采样点位置示意

Fig. 1 Study area and sampling site locations

1.2.2 采样方法及降雨监测情况

降雨前,在道路雨篦子处、屋顶雨落管口处、菜市场雨道末端及绿地草坪低洼处布设采样容器,待形成径流后开始采样,采集样品放入干净的聚乙烯瓶中.采用“先密后疏”采样方式,即降雨前30 min内每间隔5~10 min采一次样,之后间隔10~20 min采一次样,直至降雨径流结束.全部采样完成

后立即将所有样品运回实验室,放于4℃冰箱中冷藏保存,并在24 h内进行分析.

采集径流样品的同时,利用双翻斗式雨量传感器同步记录降雨特征,先后共采集7场降雨.按照短历时降雨类型划分标准^[15],分别有2场小雨、3场中雨和2场大雨,本研究将按雨量等级归为小雨、中雨和大雨这3类.降雨事件的特征参值见表1.

表1 降雨时间特征参值

Table 1 Rainfall time characteristic parameters

序号	日期 (年-月-日)	降雨量 /mm	降雨历时 /min	平均雨强 /mm·min ⁻¹	瞬时最大雨强 /mm·min ⁻¹	前期干旱时间 /h
1	2020-07-27	30.3	30	1.01	2.00	240
2	2020-08-03	4.6	150	0.27	0.80	12
3	2020-08-06	8.4	165	0.05	0.20	24
4	2020-08-13	1.6	20	0.08	0.12	12
5	2020-08-16	2.2	80	0.03	0.08	70
6	2020-08-17	13.8	210	0.06	0.32	11
7	2020-08-20	3.6	100	0.04	0.40	72

1.2.3 样品检测方法

实验分析指标包括:化学需氧量(COD)、氨氮(NH_4^+-N)、总氮(TN)、总磷(TP)和总固体悬浮物(TSS).上述水质指标均按照国家水质分析标准方法进行测定^[16].

1.3 数据分析方法

1.3.1 场次降雨径流平均浓度计算方法

场次降雨径流平均浓度(event mean concentration, EMC)是指在单场降雨下,基于排放总量的污染物排放加权平均浓度^[17],通常适用于评估降雨径流中接收污染物浓度.相对于降雨过程中污染物浓度变化速率,接收水体的响应速率相对较慢.因此,EMC($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)是研究城市降雨径流及污水产生的重要参数^[18]. EMC 计算如式(1)所示:

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

式中, M 为污染物负荷, g ; V 为径流量, m^3 ; t_r 为径流时间, min ; c_t 为 t 时刻降雨径流采样的污染物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Q_t 为 t 时段内的降雨径流量, m^3 ; n 为单场降雨采样次数; Δt 为两次采样间隔时间, min .

1.3.2 初期冲刷效应的判定

国际上常用场次降雨累积污染负荷与累积径流总量之比的曲线,即 $M(V)$ 曲线,以此判定是否存在初期冲刷效应. $M(V)$ 曲线的横坐标 $V(t)$ 为无量纲的累积径流量,表示前期径流量占径流总量的百分比;纵坐标 $M(t)$ 为无量纲的累积污染负荷,表示前期污染负荷占总污染负荷的百分比. $M(V)$ 曲线中过原点的 45° 直线表示污染物在整个降雨事件中与降雨量等比分布,表征降雨径流事件中污染物浓度保持稳定.若曲线在 45° 直线之上,则表示在初期径流中大部分污染物已被输送,存在初期冲刷效应. $M(V)$ 曲线可近似用幂函数形式表示^[19],如式(2)所示:

$$M(t) = V(t)^b \quad (2)$$

式中, b 为初期冲刷系数. b 值可以定量衡量有无初期冲刷的产生及初期冲刷强度,可通过 $M(V)$ 曲线与对角平衡线之间的距离来表示.当 $b < 1$ 时产生初期冲刷,初期冲刷强度与 b 值大小成反比.

也有研究学者使用 FF_{30} 来表示初期冲刷的强弱,即在径流量占到整场降雨径流量的 30% 时的污染物产生率. FF_{30} 值越大,表明初期冲刷强度越大^[20]. FF_{30} 计算公式如式(3)和式(4)所示:

$$t_x = \frac{30\% - V_0}{V_1 - V_0} t_{30} \quad (3)$$

式中, t_x 为径流量占到整场降雨径流量的 30% 的时刻与邻近上一采样时刻的时间差, min ; V_0 和 V_1 分别为 30% 累积径流量的前一个和后一个时刻的累积径流量, %; t_{30} 为 30% 累积径流量前后采样时间间隔, min .

$$\text{FF}_{30} = \frac{M_1 - M_0}{t_{30}} t_x + M_0 \quad (4)$$

式中, M_0 和 M_1 分别为 30% 累积径流量前一个和后一个时刻的污染物累积负荷, %.

1.3.3 降雨径流污染负荷计算

各下垫面降雨径流量用式(5)计算:

$$V_s = V_T (S_s R_s / S_T R_T) \quad (5)$$

式中, V_s 为单一下垫面单场降雨径流量, m^3 ; V_T 为单场降雨总径流量, m^3 ; S_s 和 S_T 分别为此下垫面和研究区域的面积, m^2 ; R_s 和 R_T 分别为此下垫面的径流系数和研究区域的综合径流系数.综合径流系数采用下垫面面积加权方法确定.

各下垫面的径流污染负荷由式(6)计算得到:

$$M_s = \text{EMC}_s \cdot V_s \quad (6)$$

式中, M_s 为单一下垫面单场降雨负荷, kg ; EMC_s 为单场降雨过程中单一下垫面的平均污染浓度,可用式(1)计算得到, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2 结果与分析

2.1 各下垫面降雨径流水质特征

道路、菜市场、绿地和屋顶等下垫面在 7 场降雨中的径流污染物浓度分布情况以箱型图形式表示(图 2). $\rho(\text{COD})$ 均值较大的下垫面是菜市场($85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和道路($67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),其次是绿地($45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),均超过地表水环境质量标准 V 类水质($40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而屋顶径流 $\rho(\text{COD})$ 最低($35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),主要受前期干旱时间较短和屋顶材质的影响.菜市场降雨径流 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 均值远超其他下垫面,分别为 $2.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时高于地表水环境质量标准 V 类水质($2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).这和菜市场主要销售蔬菜、瓜果、水产品、禽蛋、粮食制品、肉类及其制品等各类农副产品有关,此类产品总的特点为氮、硫和磷含量高,在降雨条件下极易将这些物质冲刷并形成富营养化径流污染.绿地径流 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ $1.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 也相对较高.4 种下垫面的径流 $\rho(\text{TSS})$ 差别较小,均值在 $50 \sim 85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间.

部分污染物指标存在超高的异常值,且个别下垫面的污染物最低浓度接近于 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.径流污染物浓度变化范围较大,可能原因是受到降雨径流初期冲刷的影响.降雨初期径流的污染物浓度高,随着

径流不断冲刷下垫面污染物,径流污染物浓度也随之降低。由于部分下垫面径流污染物浓度超过地表

水环境质量 V 类水质标准,若直接排河将对河道水环境造成一定影响。

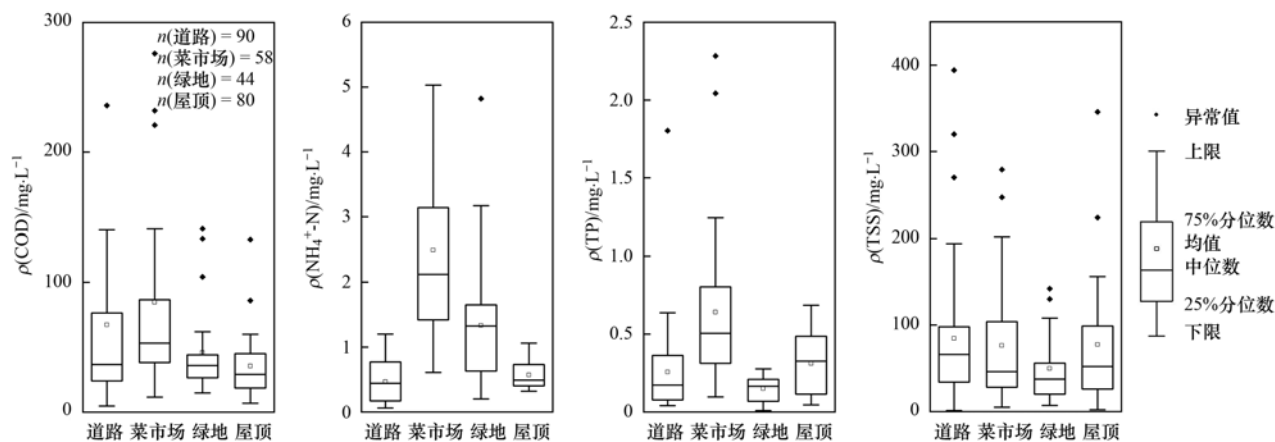


图 2 各下垫面径流污染物浓度对比

Fig. 2 Comparison of runoff pollutant concentration of each underlying surface

2.2 降雨径流初期冲刷效应分析

采用初期冲刷无量纲累积分析 $M(V)$ 曲线(图 3)来初步分析研究区域的初期冲刷效应。根据大中小雨量等级分析,大雨时下垫面基本上在不同程度均产生了较为明显的初期冲刷效应。同一污染物在中雨和小雨条件下的 $M(V)$ 曲线走势基本一致,如在小雨和中雨的条件下, TN 的 $M(V)$ 曲线基本贴近均衡线,小雨下的菜市场和中雨下的道路径流均未产生初期冲刷效应,这和降雨特征、流域特性和下垫面性质等因素的差异有关。

从污染物角度分析, COD 是初期冲刷效应最明显的径流污染物,在大雨降雨冲刷下 30% 的径流量输送了 50% 左右的 COD 污染负荷。 NH_4^+-N 和 TN 在下垫面的初期冲刷效应均较弱。 TP 在大雨条件下发生了极为明显的初期冲刷效应,中小雨的 $M(V)$ 曲线沿均衡线发展,未产生明显的初期冲刷现象。小中大雨下 TSS 均产生了初期冲刷效应,和大雨情况相比,小雨和中雨的下垫面初期冲刷效应较弱。

以绿地为代表的可渗透性下垫面在大雨下的初期冲刷 NH_4^+-N 污染物明显强于中小雨,而道路、菜市场和屋顶等不透水性下垫面则相反。主要由于不透水区域在径流发生后可将污染物迅速冲刷,而可渗透性下垫面则需先下渗后才能产生径流,因此在降雨强度较小时,不透水区径流初期效果不甚明显,这与 Li 等^[21]的研究结果一致,即高强度降雨事件中,主要是可渗透性下垫面作为径流污染源;而在低强度降雨中,不透水性下垫面作为主要污染源。

2.3 降雨径流污染溯源

通过公式(1)、(5)和(6)计算得到 4 类下垫面分别在小雨、中雨和大雨条件下的降雨径流污染负荷,并得出的各场次降雨地表径流各污染物污染负

荷量及贡献率如图 4 所示。

随着降雨量不断增大,冲刷污染物负荷量逐渐变大,小中大雨径流冲刷 COD 负荷分别为 31.97、66.13 和 114.60 kg。对于不同下垫面,由于屋顶径流系数较小且面积占比大,累积径流量可达 43%,而污染贡献率仅为 20%~40%;绿地径流中污染物负荷贡献率相对较小,一般情况下可忽略;菜市场面积仅占 9%,但径流营养盐污染物负荷贡献率较大;屋顶随着雨量增大,污染负荷贡献率降低。

分析不同污染物在各下垫面的组成, COD 中道路贡献的污染负荷最多,贡献率稳定在 40% 以上;其次是屋顶(21%~41%)和菜市场(11%~22%);绿地贡献率最小,不足 10%。营养盐污染物中菜市场污染负荷贡献率最大,平均值达到了 35%;其次是道路(13%~48%)和屋顶(11%~38%);绿地贡献最少,贡献率平均值为 10% 左右。 TSS 中随着降雨量变大,道路污染负荷贡献率由 30% 逐渐增大到 50%,而屋顶由 59% 降低至 28%,绿地和菜市场污染负荷贡献率也逐渐增大,但两者总贡献率较少,仅占 11%~22%。

综上,道路为径流 COD 和 TSS 的主要产出源,污染负荷贡献率达到 36%~52%;菜市场为径流营养盐类污染物的主要产出源,污染负荷贡献率可达 23%~47%。

3 讨论

3.1 降雨径流 EMC 空间异变性

南宁市老城区的径流下垫面污染物浓度和其他相关区域相比(表 2),径流道路污染物浓度低于宁波或东莞等南方城市, EMC 均值和昆明市径流最小浓度基本相同, COD 与 TSS 浓度和北京市相近,但

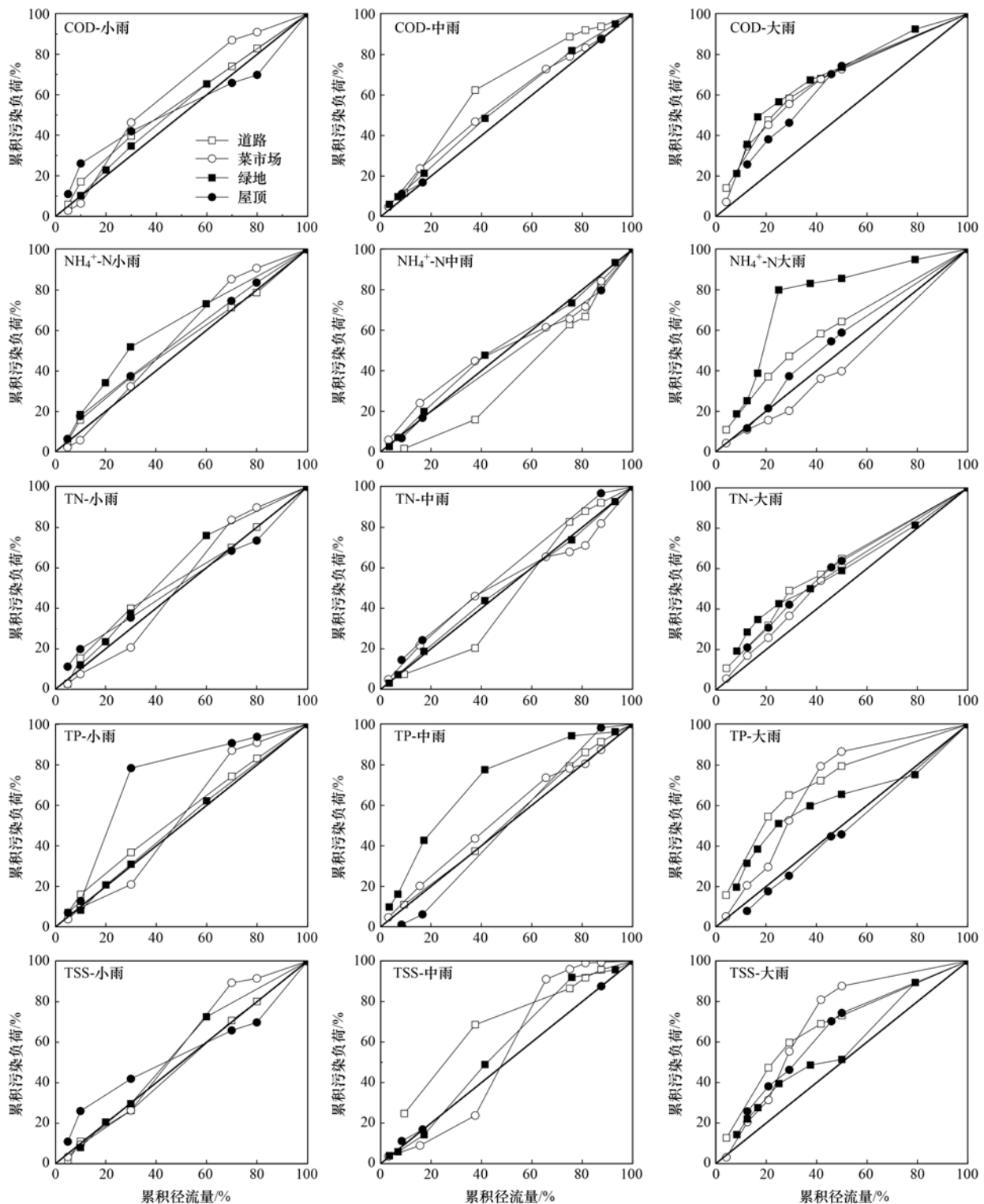
图3 不同雨量等级和污染物类型下降雨径流初期冲刷 $M(V)$ 曲线

Fig. 3 First flush curve of rainfall runoff at different rainfall grades and pollutant types

营养盐污染物浓度远小于北京市的污染物浓度,亦远小于其他城市营养盐污染物浓度.可能由于本研究将菜市场这一特殊的下垫面与道路独立开来,且老城区道路清扫较频繁,加之降雨频次高使得污染物无法得到充分累积,因此导致南宁市老城区道路下垫面径流营养盐污染物浓度较低.本研究屋顶径流 COD 和 TSS 浓度相较大部分城市高,但营养盐类

污染物较低,这可能是因为所在研究区域为老城区,屋面沥青老化脱落物使得屋顶径流雨水呈现高 COD、高 TSS.绿地径流污染物浓度相较其他城市普遍偏低,甚至不及昆明市的最小污染物浓度,可能原因是南宁市老城区降雨对土壤的淋滤作用参与较少,绿地污染物主要来源于大气降水,造成污染物浓度偏低.

上述研究表明,各个城市由于大气环境条件、降雨程度、人为活动影响和城市建设情况等自然和社会因素不同,降雨径流污染物浓度相差较大.本研究污染物浓度处于已有研究范围之内,表明本研究所采用的监测和计算方法能够相对真实地反映出南宁市老城区各下垫面的径流污染物浓度.

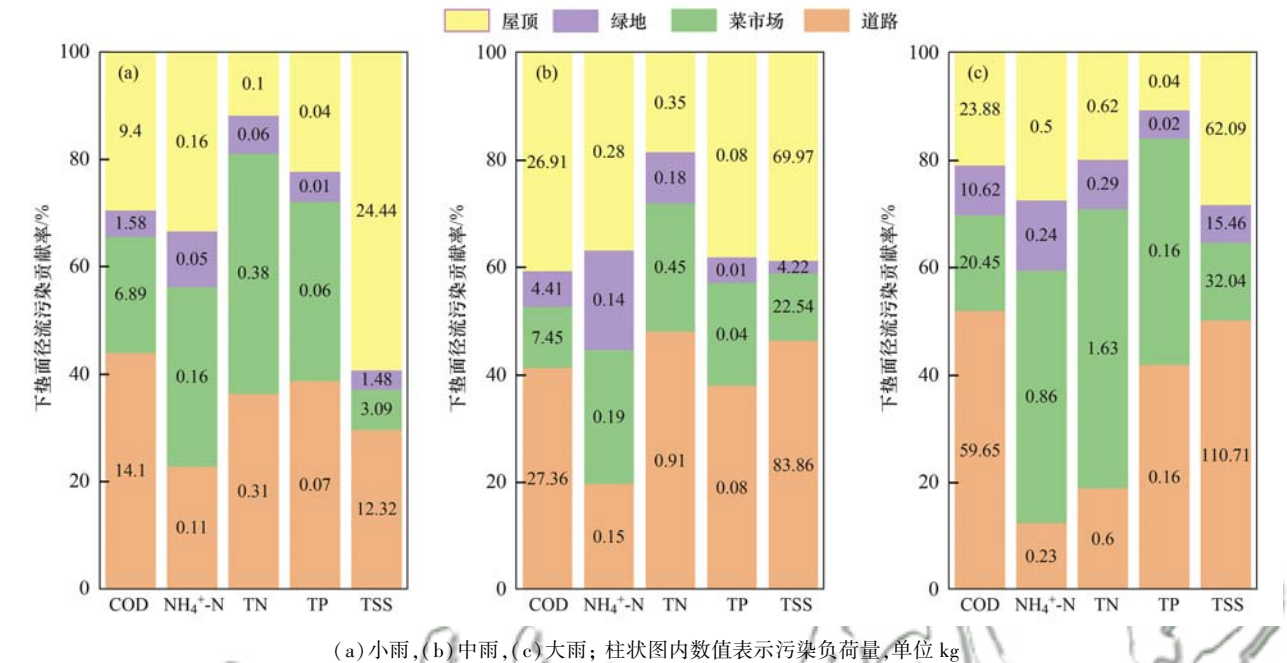


图4 径流污染溯源

Fig. 4 Source of runoff pollution

表2 本研究和其他研究降雨径流污染物浓度比较/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Comparison of pollutant concentrations in rainfall runoff between this study and other studies/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

国家/城市	下垫面类型	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{TSS})$
南宁市老城区 (本研究) ¹⁾	道路	72.81	0.35	1.33	0.22	151.66
	屋顶	36.55	0.56	0.65	0.09	95.03
	绿地	45.04	1.17	1.42	0.10	57.19
浙江省宁波市 ^[22]	道路	12.34 ~ 165.44	0.53 ~ 1.45	1.49 ~ 21.05	0.03 ~ 1.23	33.43 ~ 622.03
	屋顶	13.89 ~ 97.86	0.35 ~ 2.95	1.32 ~ 10.61	0.04 ~ 0.14	25.42 ~ 366.72
	绿地	28.23 ~ 124.64	0.01 ~ 1.08	0.54 ~ 10.47	0.18 ~ 1.21	55.12 ~ 765.80
广东省东莞市 ^[23]	绿地	20.15 ~ 144.99	0.38 ~ 2.37	0.94 ~ 10.86	0.35 ~ 2.09	70.12 ~ 272.07
云南省昆明市 ^[24]	道路	68 ~ 919	/	1.5 ~ 14.4	0.15 ~ 3.37	158 ~ 759
	屋顶	22 ~ 63	/	3 ~ 7.1	0.23 ~ 0.29	13 ~ 42
	绿地	56 ~ 140	/	2.1 ~ 6.7	0.4 ~ 1.3	81 ~ 250
北京市 ^[25]	道路	93 ~ 106	0.72 ~ 1.08	1.15 ~ 2.1	3.4 ~ 4.27	78 ~ 145
	屋顶	16 ~ 20	1.56 ~ 2.23	2.96 ~ 4.13	0.43 ~ 2.09	32 ~ 35
湖北省武汉市 ^{[26]1)}	道路	176.5	/	5	0.62	225.3
	屋顶	37	/	1.43	0.15	18.7
法国巴黎 ^[27]	道路	74 ~ 391	/	/	/	53 ~ 276
	屋顶	12 ~ 73	/	/	/	6 ~ 74
	绿地	31 ~ 213	/	/	/	13 ~ 152

1) 数据为降雨 EMC 平均值

3.2 降雨径流初期冲刷效应不同计算评价方法比选

前述 $M(V)$ 曲线仅从定性角度分析初期冲刷,而 b 值可以从定量的角度分析降雨径流初期冲刷效应的强弱. b 值越小,表示初期冲刷效应越明显.从热图可见(图 5),大雨下的 b 值总体较小,表明初期冲刷效应强;小雨和中雨 b 值大部分在 0.8 甚至 1

以上,说明初期冲刷效应较弱或未能产生初期冲刷效应.

COD 基本遵循降雨越强 b 值越小的规律,其他污染物在屋顶冲刷也基本拥有同样的规律,这可能与屋顶材质和降雨初期雨强有关,屋顶在小雨降雨初期雨强较大时,大量污染物被冲刷,造成 b 值偏小.对于营养盐污染物,大雨条件下 b 值最小,菜市

场中雨 b 值小于小雨,而道路、绿地和屋顶中雨 b 值大于小雨,推测原因可能是道路等本身营养盐污染较小且较难冲刷,初期瞬时雨强较小时并不能够冲刷起大量的营养盐污染物;前期干旱时间短,污染物未能得到充分积累也可能导致初期冲刷效应较差.而菜市场由于本身营养盐负荷高且汇流面积小,加之日常无人清理和因受人为因素影响导致污染物累积速率较快,使得菜市场中雨的初期冲刷效应比小雨大.综合考虑,各污染物径流冲刷强度大小排序分别为 COD、TSS、TP、TN 和 NH_4^+-N , b 值分别为

0.70、0.78、0.82、0.85 和 0.92.

Lee 等^[28]在对韩国两处居住区和一处工业区的降雨径流污染物数据进行分析发现,COD 的 b 值为 0.73~1.43,SS 的 b 值为 0.43~2.15,TP 的 b 值为 0.77~1.51,分布均较为广泛;且其在对降雨径流研究中,对包括本研究污染物在内的 7 种污染物冲刷强度的排序中,得出 TSS 最不易产生初期冲刷效应的结论,而本研究认为 TSS 比营养盐类污染物较易产生初期冲刷效应,造成结果不同的原因可能和两地地面糙率、城市用地类型和大气污染物沉降等有关.

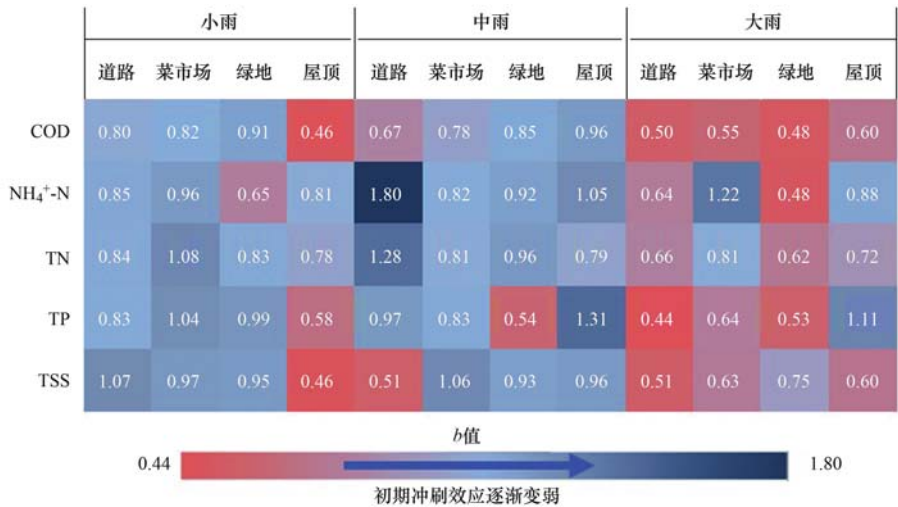


图 5 不同雨量等级和污染物类型下降雨径流初期冲刷 b 值热图

Fig. 5 Value b of rainfall runoff first flush at different rainfall grades and pollutant types

FF_{30} 亦可从定量角度更直观地反映出是否发生了初期冲刷效应, FF_{30} 数值越大,表明在径流量达到 30% 时径流污染物输移量更大.图 6 为不同情况下降雨径流初期冲刷 FF_{30} 值,30% 用黑线表示.

小雨条件下,屋顶降雨冲刷 TP 的 FF_{30} 值达 80%,达到了明显初期冲刷的标准;其余下垫面降雨冲刷的污染物 FF_{30} 值基本都超过了 30%,即具有初期冲刷效应.中雨条件下,除道路径流冲刷 COD、TSS 和绿地径流冲刷 TP、 FF_{30} 值超过了 50% 外,其余下垫面降雨冲刷污染物大都仅达到了初期冲刷的

标准.大雨情况下,除屋顶径流冲刷 TP 和菜市场径流冲刷 NH_4^+-N 没有发生初期冲刷外,其余大多均发生了较为明显的初期冲刷. Chow 等^[29]的研究对马来西亚的住宅和商业区进行了径流污染采样分析,结果表明,COD、TSS 和 TP 径流污染的 FF_{30} 均值分别为 45%、46% 和 44%,与本研究结果相近 (46%、40% 和 43%).

车伍等^[30]的研究对初期冲刷现象的量化比例作出了总结,采用较多的量化方法是“ $\text{FF}_{30}-80\%$ ”,即当初期径流量占整场降雨的 30% 时,初期径流污

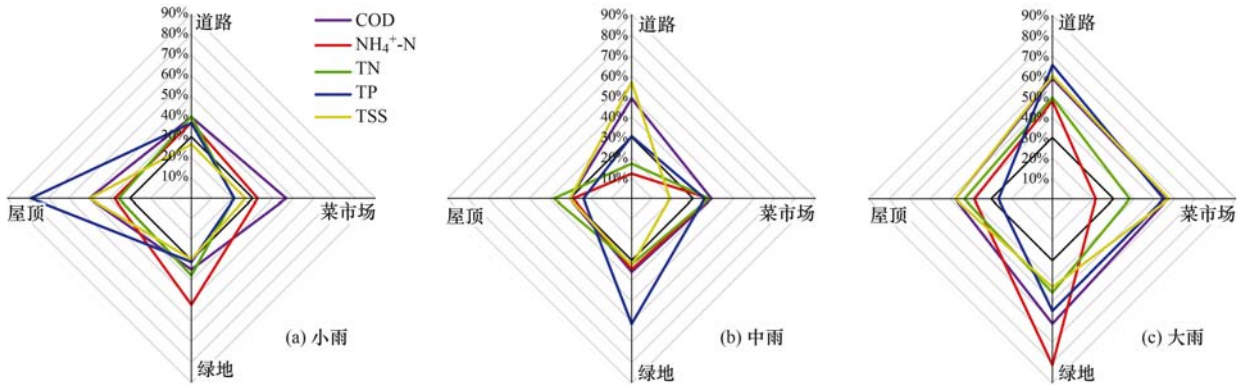


图 6 不同雨量等级和污染物类型下降雨径流初期冲刷 FF_{30} 值

Fig. 6 First flush's value FF_{30} of rainfall runoff at different rainfall grades and pollutant types

染负荷贡献率为 80%^[31], 才算作有初期冲刷效应。但随着学者的深入研究和大量实验数据积累, 符合上述界定条件的初期冲刷现象较为少见, 甚至在有学者的研究中出现的概率不足 1%^[28]。Saget 等^[32]的研究对 $M(V)$ 曲线做了区域划分, 分为 A~F 共 6 个区域(图 7), Peng 等^[33]和唐建国^[34]的研究对不同区域做了定义和描述, 最上方 A 区表示有明显初雨效应, 而后初雨效应依次减弱, 最下方的 F 区表示无初雨效应, 并伴随降雨后期严重污染。其中, 当 b 值 ≤ 0.862 时, 定义为产生中等冲刷效应, 此时 FF_{30} 为 35.4%。

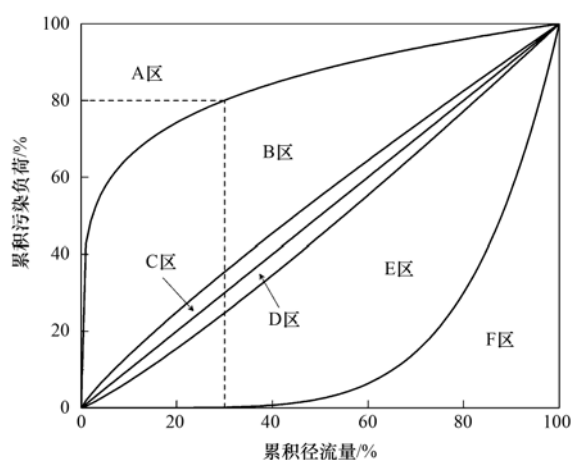


图 7 $M(V)$ 曲线各分区的定义

Fig. 7 Definition of each partition of $M(V)$ curve

若按以上定义严格划分, 在本研究中, 径流污染中的 21.7% 未产生初期冲刷, 21.7% 发生较弱的初雨效应, 55% 产生了中等的初期冲刷效应, 仅大雨条件下绿地径流冲刷 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 符合“明显初雨效应”的条件。若按 FF_{30} 值进行评判, 则本研究 63.3% 的径流污染都在中等冲刷效应的区间 (35%~80%), 评判区间较为宽泛, 且与 $M(V)$ 曲线定义初雨效应不符。

上述情况说明, 仅采用一种方法定量评价初雨效应无法有效客观评价单场径流初雨冲刷效应, 且在不同的研究条件下, 采用固定比例来界定初期冲刷现象较为不足。相对而言, FF_{30} 值仅靠整个径流过程中的一个时刻值来判断是否发生了初期冲刷, 而 b 值为整个 $M(V)$ 曲线的幂值, 在本研究中 b 值相对 FF_{30} 值也有更为具体的评价, 故在评价初期冲刷效应时, 应优先考虑 b 值。

3.3 降雨径流初期冲刷影响因素分析

降雨径流的初期冲刷受许多因素的影响, 例如分水岭界定、降雨强度、不透水区域和前期干旱时间等^[35~37]。本研究中选择总降雨量 (RFT)、总降雨历时 (RD)、平均降雨强度 (ARI)、次降雨最大强度

(MRI)、总径流量 (ROT) 和前期干旱时间 (EDT) 作为影响降雨径流的因子, 基于各下垫面的污染物 EMC 与降雨径流影响因子进行多元统计相关性分析。

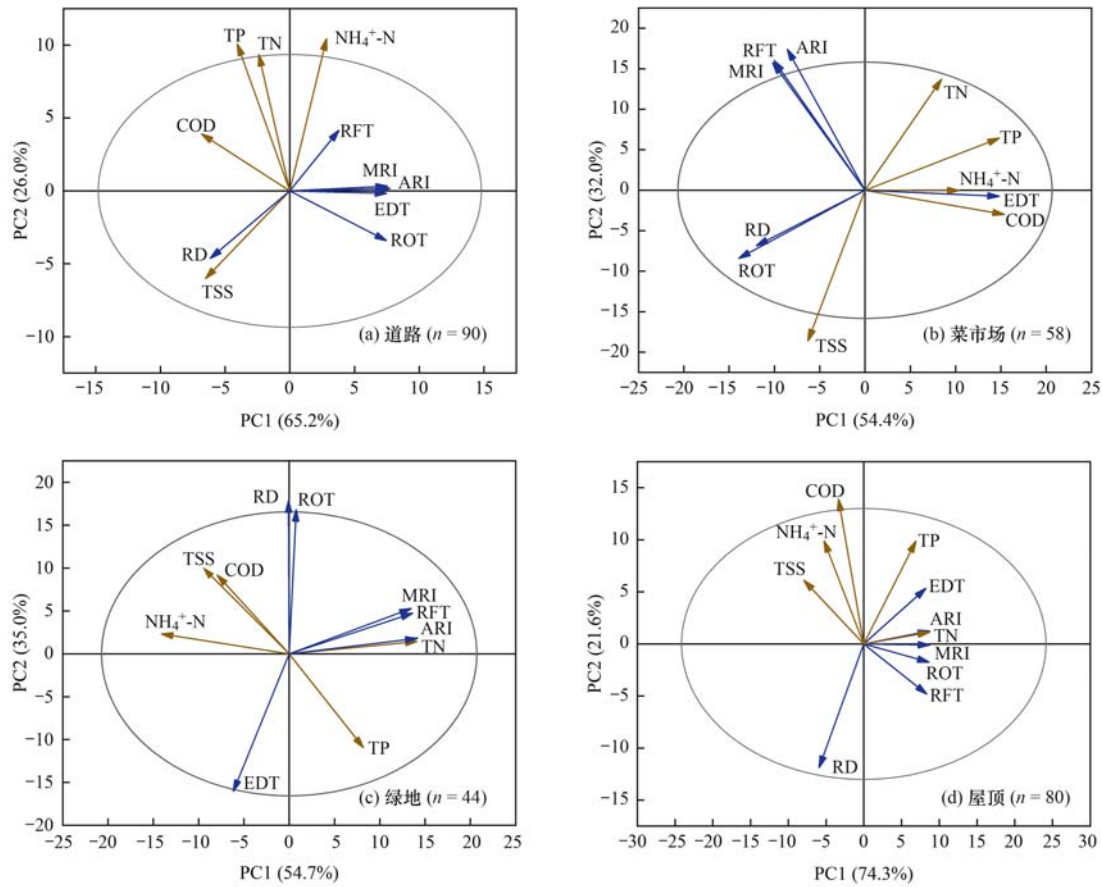
图 8 为各下垫面变量主成分分析。其中, 横纵坐标括号内的百分数之和代表了两个主成分可以描述总数据方差的百分比, 例如道路 PCA 的两个主成分可描述 91.2% 的数据方差; 一个向量代表一个变量, 向量长度与相应变量方差成比例, 棕色表示污染物种类成分, 蓝色表示影响降雨径流因子成分; 两个向量之间的夹角表示两变量之间的相关程度, 锐角表示相关性较好。变量间相关矩阵如表 3, 当相关系数绝对值大于 0.8 且对应向量夹角小于 30° 时, 认为任意两个变量之间有显著相关性^[38]。

综合考虑发现, 道路 TSS 的 EMC 值和总降雨历时之间呈显著正相关 ($P < 0.05$), 这和当初设想的降雨历时越长使污染物浓度越低的假设不符, 原因可能为总降雨历时与总降雨量无显著相关性, 即降雨历时长并不能代表降雨量大, 冲刷的污染物浓度低; 绿地的 TN 和平均降雨强度间呈显著负相关 ($P < 0.05$), 这可能与绿地特定的产汇流机制有关。尽管两因子间相关系数较高, 如道路 COD 的 EMC 值与总径流量相关系数为 0.94 ($P < 0.05$), 但对应角度大于 30° , 因此不能将对应的两个变量视为有显著相关性。

黄金良等^[39]的研究发现在厦门绿地小流域中, 降雨的总降雨量和总径流量较大的情况下容易发生 TSS 和 COD 的初期冲刷效应, Lee 等^[28]和 Taebi 等^[37]分别在各自研究区域发现污染物初期冲刷与最大降雨强度呈现强烈的负相关和正相关。本研究与上述研究结论不尽相同, 其原因可能在于各个城市降雨形态、城市污染累积、城市地势地形和产汇流机制都不尽相同。

3.4 菜市场下垫面选取的必要性

以往研究学者在研究降雨径流污染时, 大多仅选取 3 类下垫面: 道路、屋顶和绿地 (庭院)^[40]。而南宁市老城区具有众多菜市场用地, 根据已有研究表明菜场径流污染物浓度要远高于路面等下垫面^[41], 其中 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 均值为 $3.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远高于路面的 $1.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。并且前期预实验采集菜市场降雨径流发现, 菜市场径流具有高氮高磷的特征, 即比一般道路径流污水营养盐含量多, 故本研究将菜市场从道路下垫面中独立出来, 并对比分析有无将菜市场作为独立下垫面两种情况下的降雨径流总污染负荷的差值比重 (表 4), 以未将菜市场作为独立下垫面的径流总污染负荷作为参考标准。结果表明,



RFT 表示总降雨量, RD 表示总降雨历时, ARI 表示平均降雨强度, MRI 表示次降雨最大强度, ROT 表示总径流量, EDT 表示前期干旱时间

图 8 各下垫面主成分分析

Fig. 8 PCA of each underlying surface

表 3 不同下垫面的污染物与降雨径流影响因子的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients between pollutants and influencing factors of rainfall runoff on different underlying surfaces

下垫面	污染物	总降雨量 (RFT)	总降雨历时 (RD)	总径流量 (ROT)	平均降雨强度 (ARI)	次降雨最大强度 (MRI)	前期干旱时间 (EDT)
道路	COD	-0.422	0.526	-0.940 *	-0.876	-0.859	-0.791
	NH ₄ ⁺ -N	0.337	0.018	-0.491	-0.264	-0.222	-0.396
	TN	0.235	-0.756	0.069	0.333	0.299	0.425
	TP	0.110	0.134	-0.730	-0.491	-0.453	-0.532
	TSS	-0.490	0.885 *	-0.642	-0.822	-0.797	-0.830
菜市场	COD	-0.708	-0.566	-0.738	-0.655	-0.710	0.834
	NH ₄ ⁺ -N	0.212	-0.321	-0.600	0.238	0.215	0.284
	TN	-0.361	-0.062	-0.378	-0.399	-0.344	0.337
	TP	-0.336	-0.704	-0.899	-0.253	-0.345	0.795
	TSS	-0.429	0.707	0.762	-0.551	-0.407	-0.409
绿地	COD	-0.310	0.521	0.242	-0.438	-0.277	-0.171
	NH ₄ ⁺ -N	0.982 *	0.075	0.090	0.999 **	0.975 *	-0.491
	TN	-0.905	0.136	0.053	-0.963 *	-0.889	0.315
	TP	0.457	-0.617	-0.727	0.558	0.440	0.347
	TSS	-0.424	0.567	0.332	-0.558	-0.392	-0.177
屋顶	COD	-0.623	-0.340	-0.436	-0.316	-0.391	-0.100
	NH ₄ ⁺ -N	0.932	-0.726	0.978 *	1.000 **	0.997 **	0.963 *
	TN	-0.749	-0.082	-0.711	-0.552	-0.599	-0.331
	TP	0.572	-0.976 *	0.721	0.834	0.786	0.941
	TSS	-0.981 *	0.353	-0.920	-0.876	-0.911	-0.742

1) * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著, ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著

将菜市场作为独立下垫面时,降雨径流污染中的营养盐负荷要比不将菜市场作为下垫面时的大,大雨时总径流污染的氮类污染物差值百分比接近 100%,而 $\rho(\text{COD})$ 和 $\rho(\text{TSS})$ 并没有随着是否考虑菜市场作为下垫面而发生较大变化.

造成营养盐负荷差值比重大的主要原因是菜市场和道路的营养盐污染物 EMC 差值较大.菜市场降雨径流的氮磷营养盐污染物浓度均高于道路,差值百分比在 45%~1 012% 之间,大雨条件下差值更为明显.其中,菜市场 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 1.16~3.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而道路 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 仅为 0.31~0.74 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,两种下垫面 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 相差 2 倍以上,大雨条件下甚至相差超过 10 倍.根据降雨量不同,菜市场和道路的 $\rho(\text{COD})$ 相差有所起伏,菜市场的 $\rho(\text{TSS})$ 总是小于道路.

由于菜市场本身特殊性,加之大多菜市场卫生管理较差,造成日常营养盐类污染物大量富集于路面,并在下雨时随径流雨水冲刷至管道中,若直排入河则易造成河道富营养化.因菜市场本身营养盐污染高于道路,又是区域中不可忽视的一部分,在计算老城区降雨径流污染负荷时要将其考虑在内,否则将会造成较大误差.对于径流污染的分析,可因地制宜地考虑城市占地较大且较为特殊的一类下垫面,以与真实情况相接近,降低结果误差.

表 4 有无考虑菜市场作为下垫面的总径流污染负荷的差值百分比/%

Table 4 Difference percentage of total runoff pollution load whether or not to consider grocery as the underlying surface/%					
雨量等级	COD	NH_4^+-N	TN	TP	TSS
小雨	7.33	35.25	48.56	29.77	-2.39
中雨	-2.46	21.97	8.53	6.22	-2.91
大雨	0.50	74.44	84.25	39.54	-2.16

4 结论

(1)南宁市老城区径流污染中,道路和菜市场的 COD 和 TSS 的 EMC 值大于绿地和屋顶,营养盐污染物 EMC 值由大到小依次是菜市场、绿地、屋顶和道路,各下垫面 NH_4^+-N 的 EMC 值分别为 2.50、1.33、0.57 和 0.46 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

(2)大雨条件下各下垫面均有较为明显的初期冲刷效应,平均 b 值为 0.67,30% 径流量输送近 60% 的污染物,道路和绿地输送污染物较多;小雨和中雨条件下总体未产生明显的初期冲刷效应,平均 b 值分别为 0.83 和 0.94,30% 径流量输送不到 40% 的污染物.评价冲刷效应更倾向于选取采用全过程计算的 b 值.

(3)基于多元统计分析表明,道路径流 TSS 和

总降雨历时之间呈显著正相关,绿地径流 TN 和平均降雨强度间呈显著负相关.根据城市环境不同,降雨冲刷物与降雨事件参数相关性有较大差异甚至结果相反.

(4)下垫面选取对计算径流污染总负荷影响较大.有无考虑南宁市老城区菜市场作为下垫面对营养盐污染负荷影响较大,对 COD 和 TSS 负荷几乎无影响.大雨下营养盐污染负荷差值百分比达 80%,此时道路和菜市场污染物 EMC 差值百分比高达 1 012%.

参考文献:

[1] Xiao F, Simcik M F, Gulliver J S. Perfluoroalkyl acids in urban stormwater runoff: influence of land use[J]. *Water Research*, 2012, **46**(20): 6601-6608.

[2] Ostrom T K, Davis A P. Evaluation of an enhanced treatment media and permeable pavement base to remove stormwater nitrogen, phosphorus, and metals under simulated rainfall[J]. *Water Research*, 2019, **166**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115071.

[3] Eckley C S, Branfireun B. Simulated rain events on an urban roadway to understand the dynamics of mercury mobilization in stormwater runoff[J]. *Water Research*, 2009, **43**(15): 3635-3646.

[4] Brezonik P L, Stadelmann T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. *Water Research*, 2002, **36**(7): 1743-1757.

[5] 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.

[6] Reano D C, Haver D L, Oki L R, et al. Long-term characterization of residential runoff and assessing potential surrogates of fecal indicator organisms[J]. *Water Research*, 2015, **74**: 67-76.

[7] Charters F J, Cochrane T A, O'Sullivan A D. Particle size distribution variance in untreated urban runoff and its implication on treatment selection[J]. *Water Research*, 2015, **85**: 337-345.

[8] Gilbert J K, Clausen J C. Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut[J]. *Water Research*, 2006, **40**(4): 826-832.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 段圣辉,赵钰,单保庆,等.杭州市余杭区典型农村暴雨径

- 流污染特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3697-3705.
- Duan S H, Zhao Y, Shan B Q, *et al.* Research of the stormwater runoff and pollution characteristics in rural area of Yuhang District, Hangzhou[J]. Environmental Science, 2015, **36**(10): 3697-3705.
- [12] 吴杰, 熊丽君, 吴健, 等. 上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2240-2248.
- Wu J, Xiong L J, Wu J, *et al.* Comparison and source apportionment of PAHs pollution of runoff from roads in suburb and urban areas of Shanghai[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2240-2248.
- [13] 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.
- [14] 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.
- Sheng J G, Zeng P, Zhang C C, *et al.* Characteristics of pollution in precipitation runoff in Zhenjiang urban area[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, **25**(5): 496-499.
- [15] 秦雅琪. 南宁市城区雨水径流污染特征研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Becouze-lareure C, Dembélé A, Coquery M, *et al.* Assessment of 34 dissolved and particulate organic and metallic micropollutants discharged at the outlet of two contrasted urban catchments[J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 1810-1818.
- [19] 黄国如, 曾家俊, 吴海春, 等. 广州市典型社区单元面源污染初期冲刷效应[J]. 水资源保护, 2018, **34**(1): 8-15, 17.
- Huang G R, Zeng J J, Wu H C, *et al.* First flush effect of non-point source pollution in Guangzhou typical community unit[J]. Water Resources Protection, 2018, **34**(1): 8-15, 17.
- [20] Mamoon A A, Jahan S, He X L, *et al.* First flush analysis using a rainfall simulator on a micro catchment in an arid climate[J]. Science of the Total Environment, 2019, **693**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.358.
- [21] Li L Q, Yin C Q, He Q C, *et al.* First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(3): 295-299.
- [22] 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.
- [23] 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.
- Ma Y, Ma Y W, Wan J Q, *et al.* Characterization of rainfall runoff pollution transportation in different underlying surface of Dongguan City[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(12): 1983-1990.
- [24] 赵磊, 杨逢乐, 王俊松, 等. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(8): 1561-1570.
- Zhao L, Yang F L, Wang J S, *et al.* Characterization of stormwater pollutant sources in a combined sewer network[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(8): 1561-1570.
- [25] 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.
- Li H Y, Xu S L, Huang Y, *et al.* Pollution loading of overflow in combined drainage channels during rainy season[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(9): 2522-2530.
- [26] 李立青, 尹澄清. 雨、污合流制城区降雨径流污染的迁移转化过程与来源研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 368-375.
- Li L Q, Yin C Q. Transport and sources of runoff pollution from urban area with combined sewer system[J]. Environmental Science, 2009, **30**(2): 368-375.
- [27] Gromaire M C, Garnaud S, Saad M, *et al.* Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. Water Research, 2001, **35**(2): 521-533.
- [28] Lee J H, Bang K W, Ketchum Jr L H, *et al.* First flush analysis of urban storm runoff[J]. Science of the Total Environment, 2002, **293**(1-3): 163-175.
- [29] Chow M F, Yusop Z. Sizing first flush pollutant loading of stormwater runoff in tropical urban catchments[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **72**(10): 4047-4058.
- [30] 车伍, 张伟, 李俊奇. 城市初期雨水和初期冲刷问题剖析[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(14): 9-14.
- Che W, Zhang W, Li J Q. Analysis of urban initial rainwater and first flush[J]. China Water & Wastewater, 2011, **27**(14): 9-14.
- [31] 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.
- [32] Saget A, Chebbo G, Bertrand-Krajewski J L. The first flush in sewer systems[J]. Water Science and Technology, 1996, **33**(9): 101-108.
- [33] Peng H Q, Liu Y, Wang H W, *et al.* Event mean concentration and first flush effect from different drainage systems and functional areas during storms[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(6): 5390-5398.
- [34] 唐建国. 雨水排水口出流污染辨析和削减之道[J]. 给水排水, 2020, **46**(2): 1-5.
- Tang J G. Identification and reduction of pollutants from the stormwater outlet[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, **46**(2): 1-5.
- [35] Perera T, McGree J, Egodawatta P, *et al.* Catchment based estimation of pollutant event mean concentration (EMC) and implications for first flush assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111737.
- [36] 李春林, 刘淼, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5952-5961.
- Li C L, Liu M, Hu Y M, *et al.* Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(18): 5952-5961.
- [37] 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.
- [38] Perera T, McGree J, Egodawatta P, *et al.* Taxonomy of influential factors for predicting pollutant first flush in urban

- stormwater runoff[J]. *Water Research*, 2019, **166**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115075.
- [39] 黄金良, 涂振顺, 杜鹏飞, 等. 城市绿地降雨径流污染特征对比研究: 以澳门与厦门为例[J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3514-3521.
- Huang J L, Tu Z S, Du P F, *et al.* Comparative study on characteristics of urban rainfall runoff from two urban lawn catchments in Macau and Xiamen[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(12): 3514-3521.
- [40] 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.
- [41] 汉京超. 城市雨水径流污染特征及排水系统模拟优化研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013.

《环境科学》连续 10 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2021 年 12 月 6 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2021 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2021 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 10 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5%(Top5%)的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)