

典型山地城市雨水径流污染负荷时空分布

王 龙¹, 聂煜东², 焦昭杰¹, 张贤明¹

1. 重庆工商大学 废油资源化技术与装备教育部工程研究中心, 重庆 400067
2. 重庆理工大学 化学化工学院, 重庆 400054

摘要: 为了了解山地城市雨水径流污染特征, 选取坡度大、绿地比率高的典型山地区域, 研究在各降雨等级条件下、不同下垫面的初期雨水污染物时空分布特性及不同污染物指标间相关性。结果显示: 径流污染在降雨初期有最大值, 其后各污染指标随时间变化迅速下降, 且雨强越大趋势越明显; 不同下垫面初期雨水径流水质优劣顺序为砖石>硬化铺装>绿地, 不同雨强初期雨水径流水质优劣顺序为中雨>大雨>暴雨; 研究区域内地表径流中总氮(TN)主要以溶解态输出, 总磷(TP)则以颗粒态输出; 绿地的产流中颗粒态氮磷要显著高于其他下垫面, 暴雨下雨水径流中颗粒态氮磷也显著高于其他雨强; 在不同雨强及下垫面条件下, 悬浮颗粒物(SS)与高锰酸盐指数(COD_{Mn})、TP、TN、溶解性总磷(TDP)、溶解性总氮(TDN)均高度正相关。说明山地型绿地存在一定水土流失情况, 污染负荷较集中于初期雨水中, 而且随雨强增大更加明显, SS对各污染物浓度的变化具有显著影响。因此, 控制初期雨水中SS含量是降低山地城市雨水径流污染物含量的有效途径。

关键词: 山地城市; 初期雨水; 下垫面; 污染负荷; 时空分布

中图分类号: X52 文献标识码: A doi: 10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0002.001

Spatial and Temporal Distribution of Rainwater Runoff Pollution Load in a Typical Mountain City

WANG Long¹, NIE Yudong², JIAO Zhaojie¹, ZHANG Xianming¹

1. Engineering Research Center for Waste Oil Recovery Technology and Equipment of Ministry of Education, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China
2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract: In order to know the characteristics of rainwater runoff pollution in mountain city, a typical mountain area with large slope and high green space ratio was selected to study the spatial and temporal distribution characteristics of pollutants in initial rainwater under different rainfall levels and different underlying surfaces, and to study the correlation between different pollutant indexes. The results showed that runoff pollution had the maximum value at the beginning of rainfall, then the pollution indexes decreased rapidly with time, and this phenomenon was strengthened by the heavier rain. The pollution order of rainwater runoff on different underlying surfaces from slight to serious was brick>hardened pavement>green space, and the pollution order of runoff water quality in the early stage of different rainfall intensities was moderate rain>heavy rain>rainstorm. The total nitrogen (TN) in surface runoff in the study area was mainly dissolved, while the total phosphorus (TP) was mainly particulate. The particulate nitrogen and phosphorus in runoff of green place was significantly higher than that of other underlying surfaces, and the particulate nitrogen and phosphorus in rainwater runoff under rainstorm was also significantly higher than that of other rainfall intensities. Under different rainfall intensities and underlying surface conditions, suspended particulate (SS) matter was highly positively correlated with permanganate

收稿日期: 2021-12-28 修回日期: 2022-02-25 文章编号: 1672-058X(2023)02-0001-06

作者简介: 王龙(1980—), 男, 河南固始人, 教授级高工, 博士, 从事环境污染控制技术研究。

通讯作者: 张贤明(1955—), 男, 重庆人, 教授, 硕士和博士后导师, 从事废油资源化技术与装备研究。Email: zxm215@126.com.

引用格式: 王龙, 聂煜东, 焦昭杰, 等. 典型山地城市雨水径流污染负荷时空分布[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(2): 1—6.

WANG Long, NIE Yudong, JIAO Zhaojie, et al. Spatial and temporal distribution of rainwater runoff pollution load in a typical mountain city[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(2): 1—6.

index (COD_{Mn}), TP, TN, total dissolved phosphorus (TDP) and total dissolved nitrogen (TDN). It shows that there is a certain degree of soil erosion in mountainous green space, and the pollution load is more concentrated in the initial rainwater, and it is more obvious with the increase of rainfall intensity. SS has a significant impact on the concentration of pollutants. Therefore, controlling the SS content in the initial rainwater is an effective way to reduce the pollutant content of rainwater runoff in mountainous cities.

Keywords: mountain city; initial rainwater; underlying surface; pollution load; spatial and temporal distribution

1 引言

地表污染是雨水径流污染的主要污染源^[1-3]。关于雨水径流污染,国内外学者在污染物时空分布、初期冲刷效应、径流模型开发、水质污染指标相关性等方面开展了大量研究,这些研究表明对初期径流污染的控制是径流面源污染治理的重点,不同下垫面因地面污染状况、径流系数、雨强等区别,其雨水径流污染特征有较大差异^[4-9]。CHANG 等^[4]研究表明,降雨在 6 mm~8 mm 时,径流污染占总雨水径流污染的 60%;降雨量为 10 mm 时,污染占总量的 80%。赵登良等^[5]分析济南市城区在降雨时期不同下垫面径流的污染物含量变化过程,结果显示屋面径流及居民区道路径流的降雨初期污染最为严重,且初期冲刷作用明显。岳楨铨等^[6]分析南宁市老城区不同降雨条件下菜市场、绿地、屋顶和道路等不同下垫面污染状况、初期冲刷效应及污染贡献比等特征,结果表明: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。谢尚宇等^[7]考察天津某住宅区降雨径流颗粒粒径分布及污染物赋存形态,不同下垫面降雨径流中颗粒物粒径主要分布在 10 μm ~200 μm ,不同下垫面中值粒径(D_{50})浓度在计量上均有显著差异,降雨径流中颗粒物是污染物的主要载体,径流中化学需氧量和总磷主要以颗粒态形式存在,而总氮主要以溶解态形式存在。王倩等^[8]总结分析典型山地城市、平原城市、河网城市的降雨径流污染物累积特征,结果表明:径流污染物累积趋势完全一致但特征不同,山地城市、河网城市、高原城市和河口城市表现为初期累积,平原城市则表现为中期累积,并随着降雨等级增大污染物累积特征更加明显。颜文涛等^[9]分析山地城市径流污染特征,对比 3 场不同降雨强度下的径流水质,降雨强度越大,径流污染物浓度越高,其中降雨强度对大坡度路面的地表

径流污染物浓度影响更大。

地形对雨水径流污染特征有重要影响,山地城市由于其特有的地形条件,山水空间足、坡面起伏大、雨急径流快及土薄难持水^[10-11],径流冲刷效应较平原更为明显,使得初期径流污染相对严重,对自然水体水冲击尤为明显。目前,雨水径流污染方面的研究多集中于平原城市,对山地城市研究^[8-9]较少,而且缺少对山地城市雨水径流污染负荷、污染物时空分布特性以及不同污染物间相关性等方面较系统的研究。为了解山地城市雨水径流污染特征,以典型山地城市重庆市为例,选择具有典型山地城市地形及污染特点的重庆北碚区田家炳中学附近区域为研究区域,通过现场监测、实验室统计分析,对该区域内不同下垫面上产生的初期雨水中污染物时空分布特性、负荷及规律、不同降雨等级 TN、TP 形态分布、不同污染物间相关性等进行研究,以期对山地城市不同下垫面降雨初期雨水污染控制提供数据积累及理论支持。

2 实验与方法

2.1 研究区域及采样点分布

研究区域位于重庆市北碚区田家炳中学附近,具有坡度大、绿地比率高典型西南山地城市特点。为研究不同下垫面上产生的初期雨水总污染物负荷变化特征,本研究在区域内不同下垫面上各取一点,采集不同下垫面上产生的地表径流,同时在采样区域的汇水点处采集该区域的混合水样,用于进一步分析。

2.2 研究方法

2.2.1 下垫面研究

采用卫星地图结合地形图初步确定下垫面的构成,利用 CAD 和实测数据计算不同下垫面面积,结合实地考察确定下垫面具体类型及分布。

2.2.2 样品采集

选取 2020 年具有代表性的 3 场不同雨强降雨进行样品采样及分析,其中 10 月 21 日为中雨,6 月 15 日为大雨,7 月 20 日为暴雨。利用雨量计进行降雨量的测

量,同时利用雨水收集器收集初次径流。从降雨开始,每隔一段时间进行一次地表径流的收集,自开始至一小时内共做五次采样。水样用聚乙烯瓶采集后,于当天送回实验室进行相关分析。

2.2.3 样品分析

常规分析指标包括高锰酸盐指数(COD_{Mn})、固体颗粒物(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)、溶解性总氮(TDN)、溶解性总磷(TDP)等,分析方法分别采用《水和废水监测分析方法》中酸性高锰酸钾法、重量法、过硫酸钾氧化紫外分光光度法以及钼锑抗分光光度法。

3 结果与分析

3.1 下垫面分析

现场勘查结合CAD计算表明:研究区域总面积约 3.2 hm^2 ,共包含水泥路面、沥青路面、绿地、砖石(人行道)四类下垫面,面积分别约 0.64 hm^2 、 0.34 hm^2 、 1.90 hm^2 、 0.32 hm^2 。根据重庆市气象局提供的降雨资料,该区域年平均降雨量为 981.5 mm 。分析表明:降雨中大部分雨型为小雨,占比 80.4% ,降雨历时主要以短历时($1\text{ h}\sim 3\text{ h}$)为主。现场雨水模拟实验表明:水泥路面和沥青路面的径流系数相近,因此在下述讨论中将二者统一计为“硬化铺装”,经测算其面积为 0.98 hm^2 ,占总面积的 30.6% 。

3.2 污染物时空分布规律

各下垫面产生径流中SS随时间的变化规律如图1所示,由于雨强、下垫面的差异,初次径流形成时间不同,因此采样时间点略有差异。同时,径流SS浓度在不同雨型下均呈现 $SS_{\text{砖石}} < SS_{\text{硬化铺装}} < SS_{\text{绿地}}$ 的规律,且绿地SS远远高于其他两类下垫面,这是由于雨水冲刷下绿地原位产生了大量颗粒物所致;另一方面砖石下垫面SS略高于硬化铺装,表明砖石上续存的沉积物要高于硬化铺装。图1(a)为暴雨下SS随时间变化,5 min内 $SS_{\text{硬化铺装}}$ 、 $SS_{\text{砖石}}$ 均迅速下降,之后维持在较低水平; $SS_{\text{绿地}}$ 远高于其他下垫面SS,且在20 min内持续下降,而后浓度变化趋于平缓。图1(b)、图1(c)为大雨、中雨条件下SS的变化规律,大雨条件下 $SS_{\text{砖石}}$ 及 $SS_{\text{硬化铺装}}$ 于10 min左右达到平衡, $SS_{\text{绿地}}$ 于30 min接近稳定,而暴雨条件下 $SS_{\text{砖石}}$ 及 $SS_{\text{硬化铺装}}$ 在60 min内始终缓慢下降,而 $SS_{\text{绿地}}$ 在30 min内接近稳定。上述结果表明雨强越大,初始SS浓度越高,同时SS浓度下降的速度越快。这是由于砖石、硬化铺装等下垫面上续存的沉积物有限且缺乏补充,雨水的冲刷力越强SS将会以更快

的速度进入径流,形成较大的初始SS浓度,并迅速降低。而绿地上由于不断有颗粒从泥土中溶出,因此在过了最初峰值后径流中SS将呈现动态平衡,浓度维持在较高水平。现场勘查发现研究区域绿地坡度较陡、部分地表裸露,降雨时存在水土流失情况,印证了对绿地径流中SS来源的推论。

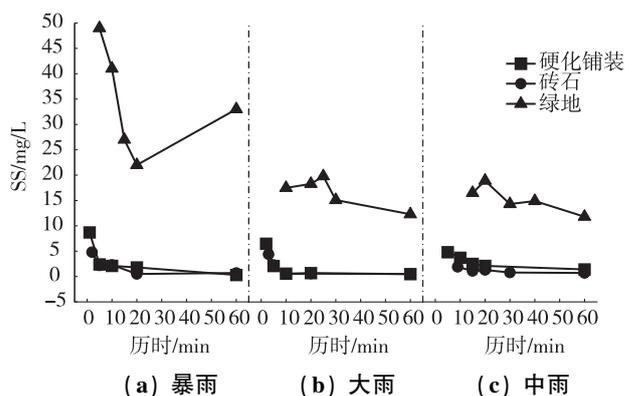


图1 SS随时间变化特征

Fig. 1 The variations of SS over time

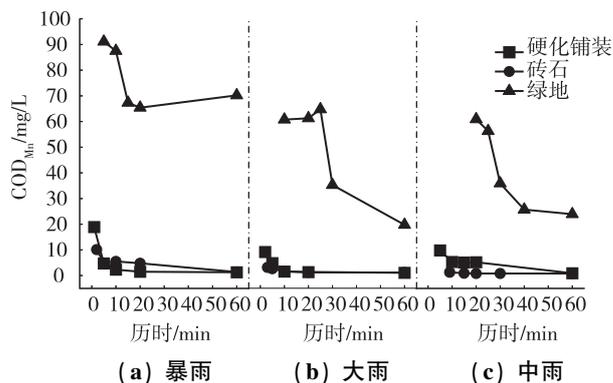


图2 COD_{Mn} 随时间变化特征

Fig. 2 The variations of COD_{Mn} over time

COD_{Mn} 随时间的变化规律如图2所示,图2(a)、图2(b)、图2(c)分别为暴雨、大雨、中雨下不同下垫面产生的地表径流中高锰酸盐指数的变化趋势。砖石、硬化铺装等下垫面上, COD_{Mn} 在短时间内迅速下降后保持在极低水平,而绿地径流中 COD_{Mn} 下降一定时间后,将会维持在较高水平。这是由于雨水对绿地的冲刷造成的水土流失会不断补充径流中的污染物,从而使 COD_{Mn} 维持在一定水平;而其他下垫面由于蓄积的沉积物有限,因此 COD_{Mn} 会迅速接近于0。进一步对比不同降雨强度下 COD_{Mn} 的变化趋势,雨水越强,初始 COD_{Mn} 越高,表明雨水的冲刷作用是其进入径流中的主要原因;同时雨水越强, COD_{Mn} 其浓度衰减越快,这验证了地表蓄存的污染物是其重要来源。此外,基于

COD_{Mn} 与 SS 的相同变化趋势,不排除有大量的 COD_{Mn} 来自于 SS。

TP 随时间的变化趋势如图 3 所示,图 3(a)、图 3(b)、图 3(c)分别为暴雨、大雨、中雨下的 TP 变化趋势。不同雨强下砖石、硬化铺装等下垫面上径流中 TP 均随时间迅速下降,暴雨条件下 TP 在 5 min 内降至最低水平并保持稳定,大雨条件下 10 min 左右降至最低水平,中雨条件下 TP 的下降过程持续至 30 min,表明雨强越强磷素释放越快。绿地所产生的径流中 TP 在较长时间内呈现持续下降趋势,且雨强越大下降越快;TP 降至一定水平时达到平衡,表明绿地将会对水体中磷素进行持续补充。另一方面,雨强越大,其初始 TP 浓度越高,表明地表蓄存的 TP 是其重要来源之一。同时 TP 变化趋势与 SS 具有相似性,表明雨水冲刷产生的 SS 可能也是 TP 重要来源。

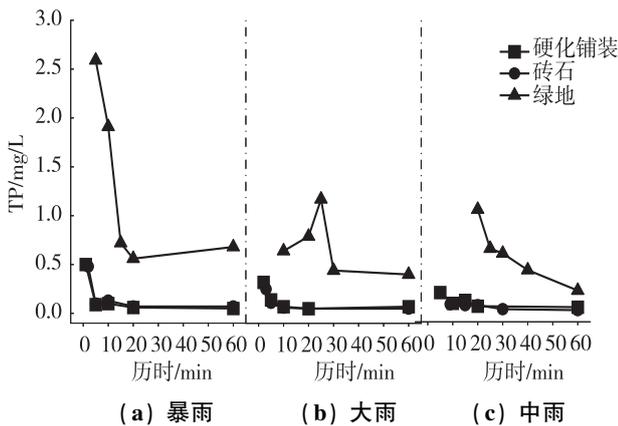


图 3 TP 随时间变化特征

Fig. 3 The variations of TP over time

TN 随时间的变化趋势如图 4 所示,图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)分别为暴雨、大雨、中雨下的 TN 变化趋势。TN 的浓度要远高于 TP,其变化趋势与 TP 相似。不同雨强下砖石和硬化铺装等下垫面上径流中 TN 均随时间迅速下降,暴雨条件下 TN 在 5 min 内降至最低水平并保持不变,大雨条件下 10 min 左右降至最低水平,中雨条件下 TN 的下降过程持续至 20 min,雨强的下降同样能延缓氮素的释放。绿地所产生的径流中 TN 在较长时间内呈现持续下降趋势,降至一定水平时将会达到平衡,表明绿地将会对水体中磷素进行持续补充。另一方面,雨强越大其初始 TN 浓度越高,表明地表蓄存的 TN 是其重要来源之一。同时 TN 变化趋势与 SS 具有相似性,表明雨水冲刷产生的 SS 可能也是 TN 重要来源。

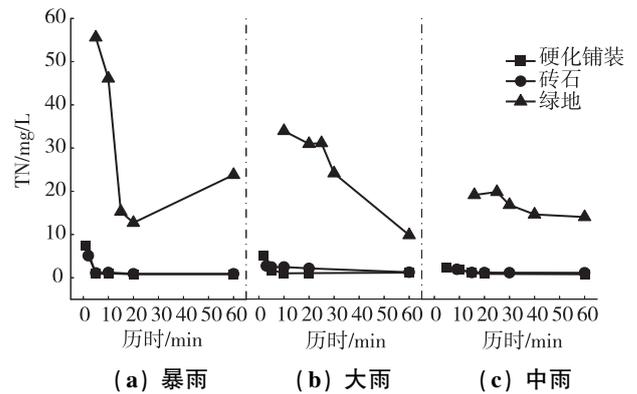


图 4 TN 随时间变化特征

Fig. 4 The variations of TN over time

综上所述,在中雨、大雨、暴雨各降雨等级下,浓度初期冲刷现象都很明显,且随着降雨等级的增大,浓度初期冲刷作用逐渐增强。在不同下垫面产生的径流中,部分指标浓度随着降雨历时下降较快,部分随着降雨历时下降较慢,但总体都呈下降趋势。随降雨时间的不同,各污染物浓度峰值到达的时间不同,浓度峰的出现是由于前期降雨产生的径流携带了较多的污染物,导致污染物浓度迅速增加;后期累积降雨径流增加致流量峰出现,较大的流量形成明显的稀释效应,同时砖石、硬化铺装等下垫面的污染物来源缺乏持续补充,导致污染物负荷浓度逐渐降低。绿地中各污染物浓度明显高于其他下垫面,这是由于当产生雨水径流时,绿地中由于水土流失,携带有各种泥沙,泥沙中携带的污染物汇入径流,导致污染浓度较高。绿地中含有较高的有机物及氮磷含量,因此其污染蓄存也较其他下垫面要高。硬化铺装路面因轮胎磨损、汽车尾气、道路老化等产生大量的污染物质,因此其地表蓄存的污染物浓度相对砖石下垫面要高。

3.3 N、P 的形态分布

由图 5 可知,在不同等级降雨条件下,不同下垫面监测点 TP 的主要输出形态是颗粒态。其中,TDP 比例最高为砖石路面,平均占比为 29%,硬化铺装路面其次,平均为 27%,最低为绿地,平均为 12%。这表明绿地中颗粒态磷形态要远高于其他下垫面,同时也证明部分 P 来源于 SS 的推测。砖石路面中颗粒态 TP 占比较小,可能是由于硬化铺装路面上轮胎磨损、物料泄露等因素影响较大,地表蓄存颗粒物较多,在雨水冲刷下进入水体,导致其占比相对较高。虽然绿地中 TDP 的占比较低,然而其具有较高的 TP 值(图 3),这使得其相对溶解性含量仍然要高于其他两类下垫面。

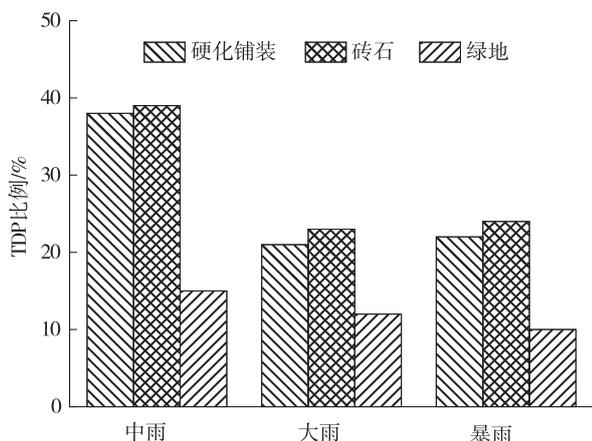


图 5 不同下垫面类型及雨强下 TDP 的占比

Fig. 5 Proportions of TDP with different underlying surfaces and different raininess

由图 6 可知,在不同降雨等级下,不同下垫面监测点污染物 TN 的主要输出形态是溶解态,其最高比例达 96%,为中雨下的砖石路面。同时,砖石路面的平均 TDN 占比最高,达 79%,硬化铺装其次达 67%,绿地 TDN 占 TN 比例较低,平均约 32%。在暴雨降雨强度下,绿地中颗粒态 TN 比例较高,印证了冲刷作用带来的 SS 是 TN 的重要来源。

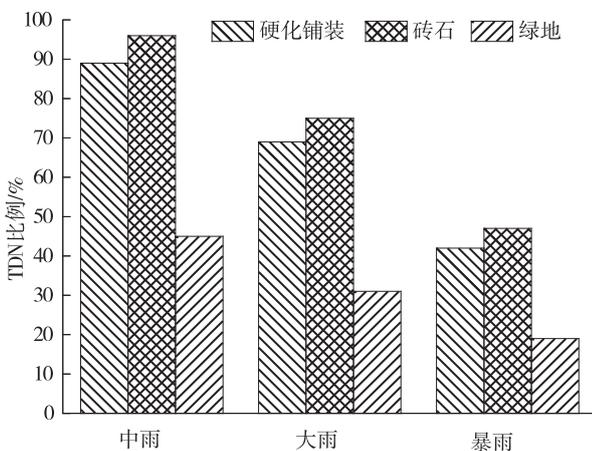


图 6 不同下垫面类型及雨强下 TDN 的占比

Fig. 6 Proportions of TDN with different underlying surfaces and different raininess

3.4 污染物间相关性研究

通过对 SS 与 COD_{Mn}、TP、TN、TDP、TDN 各指标进行 pearson 相关性分析可知(表 1),在各降雨等级条件下,SS 与 COD_{Mn}、TP、TN 的 pearson 相关系数都在 0.8~1.0 之间,属于极强相关,SS 与 TDP、TDN 的相关系数在 0.7~0.8 左右,属强相关。对相关系数进行了假设检验(*t* 检验法)表明 SS 与 COD_{Mn}、TP、TN 均在 0.01 水

平上处于极显著正相关关系,SS 与 TDP、TDN 在 0.05 水平上属显著正相关关系。上述分析表明,冲刷作用带来的 SS 是各污染物的重要来源。同时注意到溶解性氮磷相对其他指标与 SS 的相关性较其他指标与 SS 的相关性更低,这表明除冲刷的颗粒性氮磷污染物外,表面蓄存的污染物也是氮磷的重要来源。

表 1 不同污染物与 SS 的 Pearson 相关系数

Table 1 The Pearson correlation coefficients between different pollutants and SS

雨强	SS	COD _{Mn}	TP	TN	TDP	TDN
中雨	0.933**	0.886**	0.954**	0.754*	0.716*	
大雨	0.969**	0.935**	0.977**	0.769*	0.789*	
暴雨	0.982**	0.942**	0.961**	0.823*	0.866*	

注:* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关;**在 0.01 水平(双侧)上显著相关

4 小结与讨论

通过典型山地城市雨水径流污染特征的实验研究,结果显示:

(1) 从污染物的时间分布角度来看,在中雨、大雨、暴雨各降雨等级下,浓度初期冲刷现象都很明显,部分指标浓度随着降雨历时迅速下降,部分指标随着降雨历时下降相对较慢,但总体都呈下降趋势。且随着降雨等级的增大,浓度初期冲刷作用更为明显,下降更为迅速。

(2) 从污染物的空间分布来看,不同下垫面雨水径流水质优劣顺序依次为砖石>硬化铺装>绿地,山地城市的绿地中存在的水土流失现象,是污染物的重要来源。

(3) 在各降雨等级条件下,SS 与 COD_{Mn}、TP、TN 在 0.01 水平上处于极显著正相关关系,SS 与 TDP、TDN 相关性均在 0.05 水平上处显著正相关关系,SS 对各污染指标大小有重要影响。

(4) 研究区域污染物 TN 主要以溶解态输出,污染物 TP 主要以颗粒态输出,绿地径流的颗粒态污染物要大于硬化铺装路面径流,硬化铺装路面径流的颗粒污染物大于砖石路面径流。

针对上述研究,提出以下几点建议:

(1) 由于浓度初期冲刷现象很明显,应重点控制初期雨水中的污染负荷。同时,重点加强对山地型绿地的保护措施,可通过提高绿地植被覆盖率,降低绿地坡度,添加植草沟等拦截颗粒物,防止水土流失。

(2) SS 与其他指标相关性较好,针对该类山地城

市初期雨水,污染负荷的控制可从重点控制 SS 入手,在后续处理过程中聚焦于 SS 的去除,从而在简化处理过程的同时提高处理的经济性。目前已有学者开展研究,通过控制 SS 浓度从而有效控制污染物总量^[12-13]取得较好效果。

(3) 对于具有不同下垫面组成的区域水污染,应制定具有针对性的相关后续治理措施。

参考文献(References):

- [1] 谢卫民,张芳,张敬东,等.城市雨水径流污染物变化规律及处理方法研究[J].环境科学与技术,2005,28(6):30—32.
XIE Wei-min, ZHANG Fang, ZHANG Jing-dong, et al. Variation rule and treatment of pollutants in rainfall of cities [J]. Environment Science and Technology, 2005, 28 (6): 30—32.
- [2] LI J, MU C, DENG C, et al. Hydrologic-environmental effects of sponge city under different spatial scales[J]. Journal of Water Reuse and Desalination, 2019, 10(1): 45—56.
- [3] MA Y K, HAO S N, ZHAO H T, et al. Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in separate sewer systems[J]. Chemosphere, 2018, 211: 557—565.
- [4] CHANG C H, WEN C G, CHI S L. Use of intercepted runoff depth for stormwater runoff management in industrial parks in Taiwan[J]. Water Resources Management, 2008, 22(11): 1609—1623.
- [5] 赵登良,徐征和,边振,等.济南市不同下垫面降雨径流水质变化特征分析[J].中国农村水利水电,2020,(9):177—181.
ZHAO Deng-liang, XU Zheng-he, BIAN Zhen, et al. An analysis of the variation characteristics of rainfall runoff water quality in different underlying surfaces in Jinan [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, (9): 177—181.
- [6] 岳桢铎,李一平,周玉璇,等.南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析[J].环境科学,2022,43(4):2018—2029.
YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, et al. Analysis on the source tracing and pollution characteristics of rainfall runoff in the old urban area of Nanning city [J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2018—2029.
- [7] 谢尚宇,邱春生,张昱,等.天津某住宅区降雨径流颗粒粒径分布及污染物赋存形态[J].环境科学研究,2022,35(2):566—573.
XIE Shang-yu, QIU Chun-sheng, ZHANG Yu, et al. Particle size distribution and pollutant speciation analyses of rainfall runoff in the urban residential community of Tianjin [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 566—573.
- [8] 王倩,张琼华,王晓昌.国内典型城市降雨径流初期累积特征分析[J].中国环境科学,2015,35(6):1719—1725.
WANG Qian, ZHANG Qiong-hua, WANG Xiao-chang. Cumulative characteristics of runoff pollutants in typical domestic cities [J]. China Environmental Science, 2015, 35 (6): 1719—1725.
- [9] 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.
YAN Wen-tao, HAN Yi, HE Qiang. Characterization of stormwater runoff pollution in mountain city [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33 (3): 136—142.
- [10] 袁绍春,王怀鋆,吕波,等.基于 InfoWorks_ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J].水资源保护,2020,36(5):43—49,70.
YUAN Shao-chun, WANG Huai-jun, LYU Bo, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks_ICM model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 43—49, 70.
- [11] 吴君炜,熊科,罗翔.重庆海绵城市系统构建策略[J].规划师,2019,35(12):65—71.
WU Jun-wei, XIONG Ke, LUO Xiang. The strategy of establishing mountainous sponge city system [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2019, 35 (12): 65—71.
- [12] 王志标.基于 SWMM 的棕榈泉小区非点源污染负荷研究[D].重庆:重庆大学,2007.
WANG Zhi-biao. Research of the non-point source pollution load in Palm-spring residential district based on SWMM [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [13] 李俊奇,车伍,刘燕,等.城市雨水沉淀特性及其颗粒分布研究[J].中国给水排水,2004,20(3):43—46.
LI Jun-qi, CHE Wu, LIU Yan, et al. Study on precipitation characteristics and particle distribution of urban rainwater [J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(3): 43—46.