

## 城镇水系统研究与应用

杨倩, 王思雨, 王小强, 等. 西北某市初期雨水水质特征及雨水资源化利用方案[J]. 净水技术, 2025, 44(11): 140-147.

YANG Q, WANG S Y, WANG X Q, et al. Characteristics of initial rainwater quality and solutions of rainwater resources utilization in a northwestern city [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(11): 140-147.

# 西北某市初期雨水水质特征及雨水资源化利用方案

杨倩<sup>1</sup>, 王思雨<sup>2</sup>, 王小强<sup>3</sup>, 胡瑞柱<sup>2,\*</sup>, 魏继林<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学设计研究总院有限公司, 陕西西安 710055; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西西安 710055; 3. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西西安 710055)

**摘要** 【目的】 我国西北地区水资源稀缺, 雨水资源化利用可有效缓解用水压力。【方法】 对西北某市一年中的降雨情况进行监测, 并重点收集场次降雨冲刷不同下垫面形成的初期雨水样品, 检测其化学需氧量(COD)、氨氮、总磷(TP)及悬浮物(SS)等水质指标, 分析污染物浓度与地表水V类标准的符合性及污染物之间的相关性。【结果】 该地区5月中下旬—8月上旬降雨量占全年降雨量比重最大, 降雨形成的初期雨水中除未落地初期雨水, 3月—12月COD、氨氮的平均浓度(event mean concentration, EMC)值未超过地表水V类水质标准, 其余均超过地表水V类水质标准, 主要污染物中COD、TP含量与SS含量具有较为明显的相关性, 可通过水中SS的去除达到控制有机物和磷含量的目的。【结论】 该地区降雨量偏低且初期雨水水质较差, 需通过对雨水进行集中收集和处理后进一步利用提高水资源利用率, 缓解用水紧张。

**关键词** 西北地区 初期雨水 不同垫面 相关性分析 雨水资源化利用

**中图分类号:** TU992    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1009-0177(2025)11-0140-08

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.11.016

## Characteristics of Initial Rainwater Quality and Solutions of Rainwater Resources Utilization in a Northwestern City

YANG Qian<sup>1</sup>, WANG Siyu<sup>2</sup>, WANG Xiaoqiang<sup>3</sup>, HU Ruizhu<sup>2,\*</sup>, WEI Jilin<sup>3</sup>

(1. Xi'an University of Architecture and Technology Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710055, China;  
2. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;  
3. China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an 710055, China)

**Abstract** [Objective] Water resources are scarce in northwestern China, and the utilization of rainwater resources can effectively alleviate water pressure. [Methods] The rainfall situation in a city in the northwest was monitored over the course of a year, with emphasis on collecting initial rainwater samples from different underlying surfaces during rainfall events. Parameters such as chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen, total phosphorus (TP), and suspended solids (SS) were measured to analyze compliance with the class V surface water quality standards and the correlations among pollutants. [Results] The period from mid-May to early-August accounted for the largest proportion of annual rainfall. Except for the initial rainwater that had not touched the ground (from March to December), whose event mean concentration (EMC) values of COD and ammonia nitrogen did not exceed the class V surface water quality standards, all other initial rainwater exceeded these standards. Significant correlations were observed among the main pollutants, particularly between COD and TP content with SS content, indicating that the removal of SS could effectively control organic

[收稿日期] 2024-06-24

[基金项目] 陕西省重点科技创新团队项目(2023-CX-TD-32)

[作者简介] 杨倩(1982—), 女, 高级工程师, 主要从事建筑给排水设计等工作, E-mail: 41706829@qq.com。

[通信作者] 胡瑞柱(1991—), 男, 副教授, 研究方向为饮用水和工业水中污染物的去除技术开发和理论研究, E-mail: huruizhu@xauat.edu.cn。

matter and phosphorus levels. [Conclusion] Given the low rainfall and poor quality of initial rainwater in the region, centralized collection and treatment of rainwater is necessary to enhance water resource utilization and relieve water shortage.

**Keywords** northwest region initial rainwater different underlying surface correlation analysis rainwater resource utilization

随着我国城镇化率不断提升,城市地表的不透水率随之上升,城市面源污染问题日趋严重。相关研究<sup>[1-4]</sup>表明,降雨在地表不断汇集污染物质所形成的径流通过城市排水管网最终进入受纳水体时会造成水质污染。其中,初期雨水具有污染物种类多、污染物浓度较高的特点,部分地区初期雨水污染指数甚至会超出典型性城市污水<sup>[5-7]</sup>。初期雨水在冲刷不同下垫面时所形成的径流可以分为屋顶径流、路面径流以及其他不透水表面径流等<sup>[8]</sup>,其中路面和屋面的污染程度较高<sup>[9-13]</sup>,我国水资源存在严重的时空分布不均,西北地区作为严重缺水区,降雨径流的回用可以为缓解水资源紧张,提高水资源利用率发挥重要作用。针对西北地区一年内不同季节初期雨水径流中污染物的含量变化及污染物之间相关性研究,对于控制降雨径流污染和开展雨水径流资源化利用具有重要意义。

本文以西北地区某市区道路及附近文教区一年内不同场次未落地初期雨水、屋面初期雨水及路面初期雨水为研究对象,对雨水冲刷不同下垫面所形成的初期雨水径流水质进行监测,对不同季节雨水初期径流污染特征进行研究,并对各垫面初期雨水径流中悬浮物(SS)与其他污染物的相关性进行分析,为西北地区城镇初期雨水污染防治和雨水资源化利用提供数据支撑,也为缓解地区水资源紧张、实现雨水资源的循环利用提供新思路。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 采样地点

该市属暖温带半湿润大陆性季风气候,冷暖干湿四季分明,年平均气温为13.0~13.7℃,年降水量为522.4~719.5 mm。初期雨水定义为暴雨次降雨前30~40 min、大雨和小雨次降雨前40~50 min的雨水<sup>[14]</sup>。本文以未落地、屋面及路面3种下垫面初期雨水为研究对象。其中,未落地初雨采样点位于文教区内,屋面初期雨水径流采样点位于文教区内学生公寓楼下雨落管处,采集区域汇水面积约为600 m<sup>2</sup>,路面初期雨水径流采样点位于文教区外道路雨水井处。

### 1.2 采样方法

本研究对该研究区域中2023年中的23场降雨事件进行水质监测,采样时从降雨开始进行收集,未落地初雨直接使用采样容器收集,路面初期雨水采样时待路面开始形成径流后在雨水井处采集,屋面初期雨水待屋面形成径流后在雨落管处收集。水中SS、化学需氧量(COD)以及氨氮等指标具有失效时间,因此,样品采集后要尽快检测水质,不能及时检测的水样在4℃条件下保存。

### 1.3 场次降雨初期雨水水质特征分析方法

由于降雨事件的随机性和不确定性,雨水径流中污染物含量水平同样具有随机性,目前通常采用场次降雨径流污染物平均浓度(event mean concentration, EMC)对场次降雨所形成的径流中某一物质的含量水平进行表征,可更加准确地表征雨水径流的污染状况<sup>[15]</sup>,EMC可根据式(1)计算。

$$E = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T C_t Q_t dt}{\int_0^T Q_t dt} \approx \frac{\sum_{i=1}^n C_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (1)$$

其中:  
 $E$ —EMC, mg/L;

$M$ —降雨过程中某污染物的质量, mg;

$V$ —总径流量, L;

$C_t$ — $t$ 时刻降雨径流中某污染物的瞬时质量浓度, mg/L;

$Q_t$ — $t$ 时刻径流流量, L/min;

$T$ —总径流时间, min;

$n$ —降雨时段内的取样次数;

$C_i$ —第*i*次取样时的径流污染物质量浓度, mg/L;

$V_i$ —第*i*次取样时的总径流量, L。

## 2 初期雨水径流监测结果分析

通过监测、分析研究区域一年内不同季节的降雨数据,最终对同一下垫面(未落地、屋面、路面)不同季节(春、夏、秋、冬)的23场降雨初期雨水径流污染物数据进行分类整理,以研究不同季节初期雨水的径流污染特征,并分析SS与其他污染物之间的相关性。不同下垫面污染物浓度差异较大,因此,分别对3个

下垫面不同季节初期雨水径流污染特征进行分析。

## 2.1 场次降雨特征

场次降雨规模可根据 24 h 中降雨量水平划分为小雨(<10 mm)、中雨(10~25 mm)、大雨(25~

50 mm)、暴雨(50~100 mm)、大暴雨(100~200 mm)和特大暴雨(>200 mm)。采样时须根据降雨强度和降雨历时调整采样时间间隔,监测周期内场次降雨特征如图 1 所示。

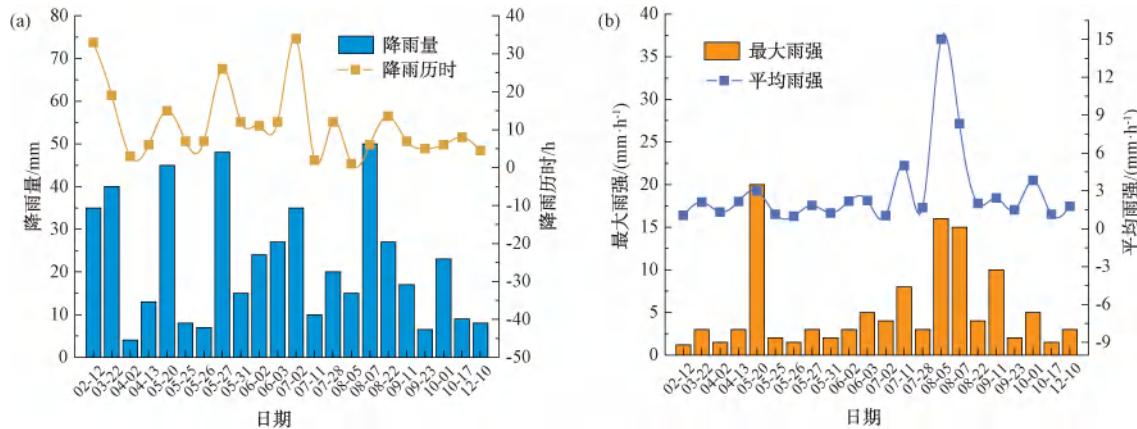


图 1 监测周期内场次降雨特征

Fig. 1 Characteristics of Rainfall Events during the Monitoring Period

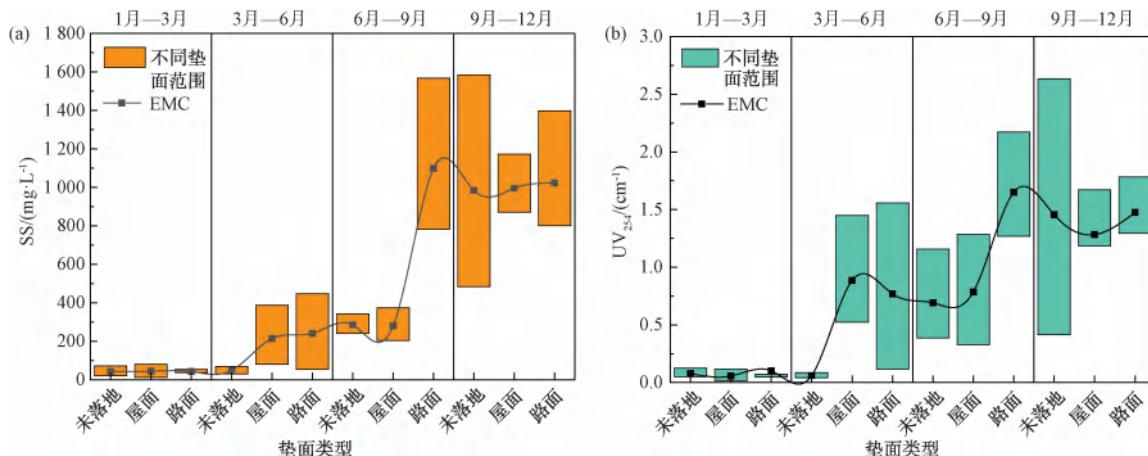
由图 1 可知,该地区小雨、小中雨规模降雨较多,其中 5 月中下旬—8 月上旬降雨量占全年降雨量比重最大。6 月下旬—7 月上旬期间场次降雨时长较其他时间更长。该地区大雨和暴雨多发于 8 月上旬且为全年最大场次降雨强度,这与该地区的气候变化情况相一致,监测周期内场次降雨特征基本涵盖该地区可能出现的降雨类型,具有良好的代表性。

## 2.2 3 种垫面不同季节径流污染特征分析

对监测区域内一年中不同季节未落地初期雨水、屋面初期雨水、路面初期雨水中酸碱度(pH)、SS、254 nm 紫外线吸光度(UV<sub>254</sub>)、溶解性有机碳(DOC)、COD、总氮(TN)、总磷(TP)和氨氮主要水质指标含量变化范围及各个水质指标的 EMC 值进

行统计,结果如图 2 所示。

监测区间中不同垫面形成的初期雨水中,路面初期雨水中各类主要污染物含量总体高于其他 2 种垫面初期雨水,3 种垫面在 1 月—3 月降雨中污染物含量水平均低于其他月份降雨。对 3 种垫面初期雨水分别进行分析可知,未落地初期雨水在 1 月—9 月降雨中污染物含量水平较低且 EMC 值波动较小,9 月—12 月降雨中污染物含量水平显著上升;屋面初期雨水在 1 月—3 月降雨中污染物含量水平均较低,3 月—9 月中污染物 EMC 值较为接近,除 TN 和氨氮 2 种污染物外,其他污染物含量在 3 月—9 月达到最高水平;地面初期雨水中污染物 EMC 值在 1 月—9 月呈现增加趋势且在 6 月—9 月降雨中达到



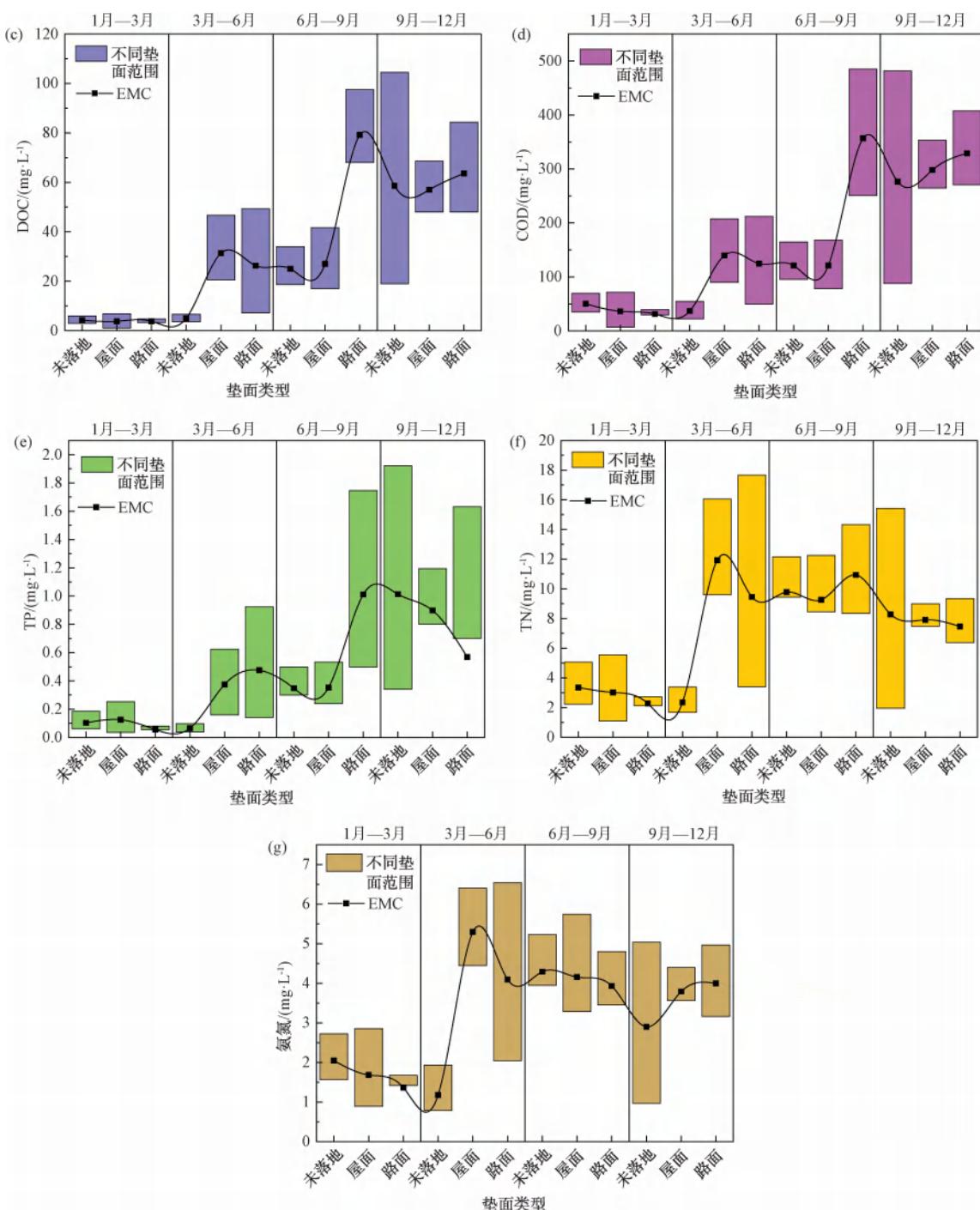


图 2 不同垫面初期雨水水质指标统计

Fig. 2 Statistics of Initial Rainwater Quality Indices for Different Underlying Surfaces

最高水平,9月—12月降雨中污染物含量水平降低。此外,3种下垫面初期雨水中TN的EMC值均超过地表水V类水质标准;除未落地初期雨水3月—12月降雨中COD、氨氮的EMC值未超过地表水V类水质标准,其余均超过地表水V类水质标准;未落地

初期雨水TP的EMC值在地表水I~III类水质标准,屋面初期雨水TP的EMC值未超过地表水V类水质标准,路面初期雨水TP的EMC值超过地表水V类水质标准。分析3种垫面层的各类污染物的EMC值可知,TN的污染最为严重,这与刘子恒<sup>[16]</sup>

对西北城市的研究结果一致。

3种垫面层初期雨水污染程度呈现路面>屋面>未落地初期的趋势,未落地初期雨水中的污染物主要来源于雨水下落过程中空气中酸性气体、工业尾气等污染性气体的溶解,如化石燃料的燃烧以及农业氮肥、磷肥的施用,使得降雨中含有氮、磷类污染物。屋面初期雨水中污染物质主要来源于大气干湿沉降、屋面材料老旧磨损和晴天照晒下时屋面材料析出的物质,污染源单一但水中污染物浓度较高,其中氮含量污染较为突出<sup>[17-18]</sup>。路面初期雨水中污染来源相对复杂,如路面交通状况、人流活动、降雨直接冲刷等,因此,SS 及有机物所占比例较大<sup>[19]</sup>。李春荣等<sup>[20]</sup>测出海口城区的径流污染物主要是 SS、COD、TN,并且径流水质污染程度为路面径流>绿地径流>屋面径流。3 种垫面全年各污染物含量波动最大范围多出现于 9 月—12 月,这是由于该地区在此期间为暴雨多发季,此外降雨频次多、降雨历时久以及连续降雨等情况使初期雨水中污染含量下降,这与张仪等<sup>[21]</sup>发现当降雨强度越大、前

期干旱天数越长时,初始冲刷效应越强烈的结果一致。

### 2.3 SS 与其他污染物相关性研究

国内外众多研究表明,初期雨水中 SS 含量与有机物、重金属等其他污染物质含量具有一定的相关性。因此,可以通过监测初期雨水中 SS 含量,与其他污染物质含量进行相关性分析计算,从而节省大量的人力物力。对本研究中监测的 23 场降雨中初期雨水各污染物与 SS 含量的相关性进行分析,为实际应用提供理论依据和数据支撑。

#### (1) SS 与 COD 相关性分析

不同下垫面初期雨水 SS 含量与 COD 相关性分析结果如图 3 所示,其中屋面和路面初期雨水中 COD 与 SS 具有较为明显的相关性,而未落地初期雨水中相关性不明显。这是未落地初期雨水中 SS 含量较低所致,陈莹等<sup>[22]</sup>研究结果表明,当径流中 SS 质量浓度低于 200 mg/L 时,COD 含量变化范围大,当 SS 质量浓度高于 200 mg/L 时,COD 含量和 SS 含量变化具有一定相关性。

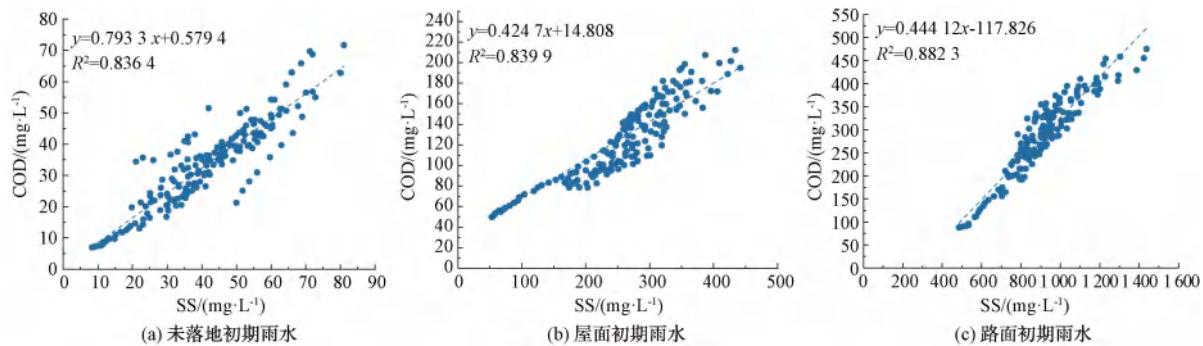


图 3 不同下垫面初期雨水 SS 与 COD 相关性分析

Fig. 3 Correlation Analysis between Initial Rainwater SS and COD on Different Underlying Surfaces

#### (2) SS 与 TN、氨氮相关性分析

不同下垫面初期雨水 SS 与 TN、氨氮相关性分析结果如图 4 和图 5 所示。3 种下垫面初期雨水中 TN 和 SS 相关性较为明显,氨氮与 SS 相关性不明显,3 种垫面形成的初期雨水中,TN 和氨氮含量与 SS 含量的线性方程斜率呈现出路面<屋面<未落地的现象,TN、氨氮含量随着 SS 含量增大而增大,这可能与 TN、氨氮的赋存状态有关。

#### (3) SS 与 TP 相关性分析

不同下垫面初期雨水 SS 含量与 TP 含量相关性分析结果如图 6 所示。未落地、屋面和路面初

期雨水中 TP 含量与 SS 含量之间存在的相关性呈现出路面最强、屋面次之、未落地较弱的现象,这可能是水中磷含量多以颗粒态存在所致,谢尚宇等<sup>[12]</sup>研究发现,在路面径流及屋面径流中 SS 是降雨径流中污染的主要载体,与 TP 的相关度较高。

综上,不同垫面所形成的初期雨水中 COD、TP 含量分布与水中 SS 含量变化具有较为明显的相关性,而 TN、氨氮含量分布与 SS 含量变化的相关性较差,这说明雨水中 SS 主要携带了有机物、非溶解态磷等物质,同时也是这些污染物质的主要载体。

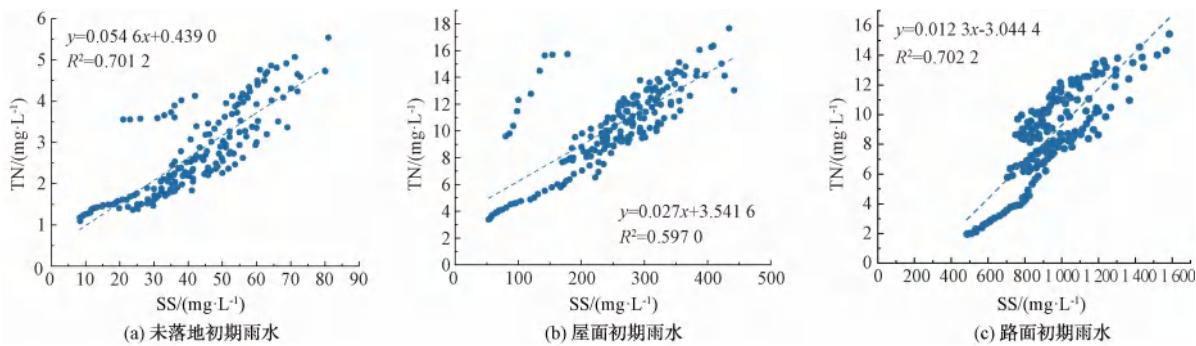


图 4 不同下垫面初期雨水 SS 与 TN 相关性分析

Fig. 4 Correlation Analysis between SS and TN of Initial Rainwater on Different Underlying Surfaces

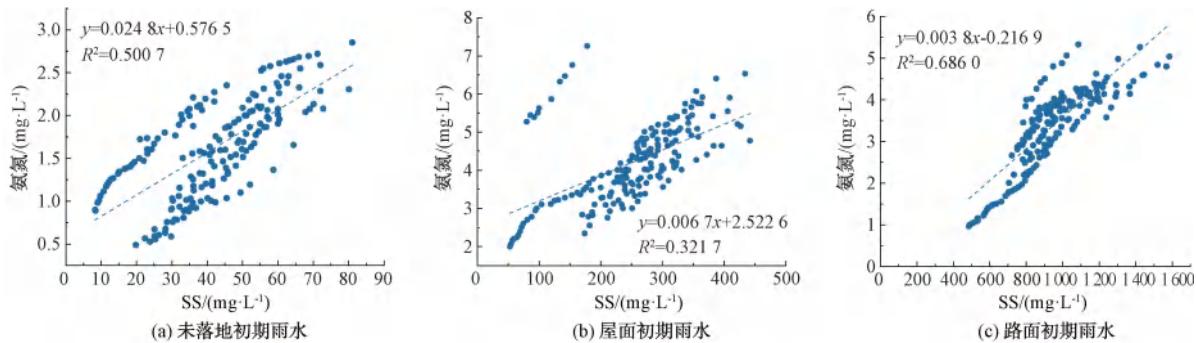


图 5 不同下垫面初期雨水 SS 与氨氮相关性分析

Fig. 5 Correlation Analysis between SS and Ammonia Nitrogen in Initial Rainwater on Different Underlying Surfaces

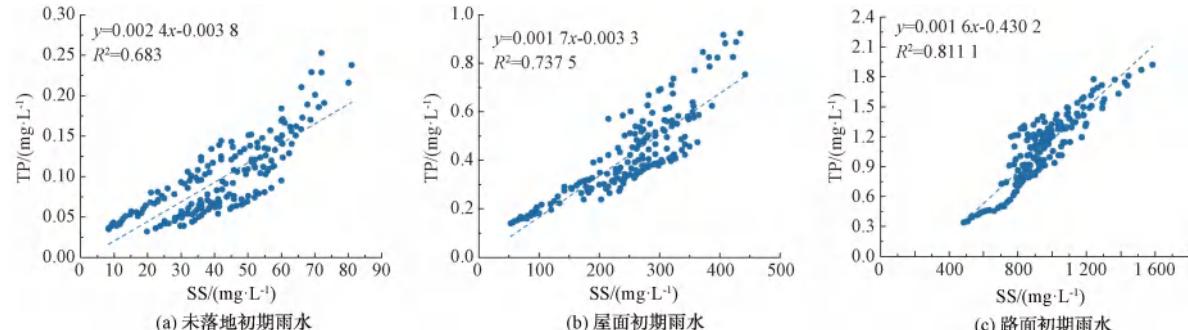


图 6 不同下垫面初期雨水径流污染物中 SS 与 TP 相关性分析

Fig. 6 Correlation Analysis of SS and TP in Initial Rainwater Runoff Pollutants on Different Underlying Surfaces

### 3 结论

(1) 本文通过对西北地区某市区一年中降雨情况和降雨冲刷不同垫面形成的初期雨水水质状况进行监测,该地区5月中下旬—8月上旬降雨量占全年降雨量比重最大,降雨所形成的降雨初期雨水中,除未落地初期雨水3月—12月COD、氨氮的EMC值未超过地表水V类水质标准,其余均超过地表水V类水质标准;未落地初期雨水TP的EMC值在地表水I~III类水质标准,屋面初期雨水TP的EMC值未超过地表水V类水质标准,路面初期雨水TP

的EMC值均超过地表水V类水质标准。

(2) 通过对初期雨水中主要污染物含量与SS含量变化的相关性分析可知,COD、TP以及TN含量与SS含量具有较为明显的相关性,氨氮含量与SS含量相关性较差,预期可通过对去除SS达到改善雨水水质状况的目的。

(3) 西北地区某市区初期雨水径流中污染物成分复杂且含量水平高,雨水收集后无法直接进行再利用,结合水中不同污染物含量与SS指标的相关性分析,可通过以混凝沉淀为主要机理的水处理装备

及系统对初期雨水中有机物含量进行去除,同时结合脱氮除磷工艺对水中氮、磷含量进一步去除后进行资源化利用。

## 参考文献

- [1] 蒋明. 初期雨水就地调蓄工程方案及运行策略[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 145–152.  
JIANG M. Engineering scheme and operation solution of on-site storage and disposal for initial rainwater [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 145–152.
- [2] 陈振楼, 毕春娟, 王东启, 等. 城市降雨径流污染与河岸带生态阻控机制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
CHEN Z L, BI C J, WANG D Q, et al. Urban runoff pollution and riparian ecological control mechanism [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [3] MA Y K, GONG M L, ZHAO H T, et al. Influence of low impact development construction on pollutant process of road-deposited sediments and associated heavy metals[J]. Science of the Total Environment, 2018, 613/614: 1130–1139. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.174.
- [4] 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.
- [5] 高雅弘, 林炳权, 刘宇轩, 等. 城镇分流制排水系统初期雨水污染特征与控制对策[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(3): 973–985.  
GAO Y H, LIN B Q, LIU Y X, et al. Characteristics and control measures of rainwater pollution in urban separate drainage system [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(3): 973–985.
- [6] 刘月雷, 张俊杰, 郑小林, 等. 城市初期雨水控制技术研究进展[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(7): 1007–1012.  
LIU Y L, ZHANG J J, ZHENG X L, et al. Research progress on rainwater control technology in early urban stage [J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(7): 1007–1012.
- [7] 周传庭, 王梦玉, 幸韵欣, 等. 城市初期雨水污染及处理措施的研究进展[J]. 净水技术, 2022, 41(7): 17–26.  
ZHOU C T, WANG M Y, XING Y X, et al. Research progress of urban initial stormwater pollution and treatment measures [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(7): 17–26.
- [8] 钟登杰, 张湖川, 李林澄, 等. 城市初期雨水污染及处理措施综述[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(2): 224–230.  
ZHONG D J, ZHANG H C, LI L C, et al. Pollution and treatment measures of urban initial rainwater: A review [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(2): 224–230.
- [9] PAN Y J, LI Z Q, GAO Y Y, et al. Analysis of the migration characteristics of stormwater runoff pollutants on different underlying surfaces in Guangzhou, China [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9. DOI: 10.3389/feart.2021.554588.
- [10] 李春林, 刘森, 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.
- [11] 童桢恭, 付龙望, 李俊. 南方某高校降雨径流面源污染研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(2): 136–141.  
TONG Z G, FU L W, LI J. Research on a southern college urban rainfall-runoff non-point source pollution [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(2): 136–141.
- [12] 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 S Y, QIU C S, ZHANG Y, et al. Particle size distribution and pollutant speciation analyses of rainfall runoff in urban residential community of Tianjin [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 566–573.
- [13] 周抒宇, 宋现财, 王静, 等. 城镇雨水径流污染研究综述[J]. 供水技术, 2021, 15(3): 43–50.  
ZHOU S Y, SONG X C, WANG J, et al. Review on urban rainwater runoff contamination [J]. Water Technology, 2021, 15(3): 43–50.
- [14] 陈望, 陈莹, 赵剑强, 等. 雨水斗截污装置对屋面初期雨水净化规律及关键参数设计[J]. 环境工程学报, 2020, 14(7): 1799–1807.  
CHEN W, CHEN Y, ZHAO J Q, et al. Purifying rule and key parameters design of the interception device of rainwater funnel treating initial roof rainwater runoff [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(7): 1799–1807.
- [15] 徐宇婕, 龚敏敏, 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.
- [16] 刘子恒. 西北某市雨水径流水质特征以及初期雨水界定和控制策略研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.  
LIU Z H. Study on water quality characteristics of stormwater runoff and initial stormwater definition and control strategy of a city in northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [17] 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 D L, XU Z H, BIAN Z, et al. An analysis of the variation characteristics of rainfall runoff water quality in different underlying surfaces in Jinan [J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2020(9): 177–181.
- [18] 马慧雅. 北京城区降雨径流污染特征分析[D]. 郑州: 河南大学, 2016.
- MA H Y. Analysis of pollution characteristics of rainfall runoff in Beijing urban area [D]. Zhengzhou: Henan University, 2016.
- [19] 郭心仪的, 张守红, 王国庆. 城市不同下垫面降雨径流水质监测及特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(3): 128–136.
- GUO X Y, ZHANG S H, WANG G Q. Monitoring experiment and characteristics analysis of rainfall-runoff-water quality of different urban underlying surfaces [J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2024(3): 128–136.
- [20] 李春荣, 刘坤, 林积泉, 等. 海口市城区不同下垫面降雨径流污染特征[J]. 中国环境监测, 2013, 29(5): 80–83.
- LI C R, LIU K, LIN J Q, et al. Analysis on water-runoff pollutions of different underlying urban surfaces in Haikou City [J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29 (5): 80–83.
- [21] 张仪, 姜应和, 程静, 等. 基于水质水量监测的武汉市雨水径流污染特征分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1): 52–55.
- ZHANG Y, JIANG Y H, CHENG J, et al. Analysis of pollution characteristics of rainwater runoff in Wuhan City based on water quality and quantity monitoring [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(1): 52–55.
- [22] 陈莹, 赵剑强, 胡博. 西安市城市主干道路面径流污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(5): 781–788.
- CHEN Y, ZHAO J Q, HU B. Research on the characteristics of runoff pollution on urban main roads in Xi'an City [J]. China Environmental Science, 2011, 31(5): 781–788.

(上接第 132 页)

(2) 进一步以 SPSP 为研究对象, 探讨产水水质、分流比例对温度调控范围的影响, 结果表明, 产水水质的影响较小, 分流比例的影响最为明显; 分流比例每增加约 5%, 临界温度增加 3 ℃, 同时对 SWRO 回收率和 SEC 影响不大, 可以作为实际工程应用中最有利最直接的调控参数。

(3) 从投资成本和运营成本 2 个方面进行经济性对比, 结果表明, SPSP 在增加投资和降低能耗之间达到一定平衡, 与 SSP 和 PSP 相比, 更具有经济性优势。

(4) 综合对比技术和经济性, SPSP 设计方式在调控产水水质和降低投资成本方面最具有工程应用优势。

## 参考文献

- [1] ELIMELECH M, PHILLIP W A. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment [J]. Science, 2011, 333: 712 – 717. DOI: 10.1126/science.1200488.
- [2] 苏慧超, 李逢时, 徐国荣, 等. 反渗透海水淡化系统混合膜设计[J]. 净水技术, 2024, 43(1): 132–139.
- SU H C, LI F S, XU G R, et al. Hybrid membrane inter-stage design for RO seawater desalination system [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(1): 132–139.
- [3] 薛喜东, 潘春佑, 冯涛, 等. 反渗透海水淡化系统双端产水脱盐工艺探讨[J]. 中国给水排水, 2023, 39 (21): 111–116.
- XUE X D, PAN C Y, FENG T, et al. Discussion on double-end water production process of reverse osmosis seawater desalination system [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(21): 111–116.
- [4] CHU K H, LIM J, KIM S J, et al. Determination of optimal design factors and operating conditions in a large-scale seawater reverse osmosis desalination plant [J]. Desalination, 2020, 244: 101–107. DOI: 10.1016/j.desal.2019.118918.
- [5] RYBAR S, BODA R, BARTALS C. Split partial second pass design for SWRO plants [J]. Desalination and Water Treatment, 2010, 13(1/2/3): 186–194. DOI: 10.5004/dwt.2010.989.
- [6] BRAY D T. Simultaneous production of multiple grades of purified water by reverse osmosis: 4,046,685 [P]. 1976–03–17.
- [7] KIMA J, PARKA K, YANG D. R, et al. A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants [J]. Applied Energy, 2019, 254: 1 – 16. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113652.
- [8] KIM J B, HONG S K. A novel single-pass reverse osmosis configuration for high-purity water production and low energy consumption in seawater desalination [J]. Desalination, 2018, 429: 142–154. DOI: 10.1016/j.desal.2017.12.026.