

成都市雨水径流污染及生态调控研究

蒲婉莹, 许芮, 杜超, 胡佳欢, 蒋奕冰, 莫奕樟, 黄彩妹, 冯兴会*

桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年6月16日; 录用日期: 2026年7月17日; 发布日期: 2026年7月28日

摘要

为探讨高密度城市建设背景下雨水径流污染特征及生态调控路径,本研究以成都市交通干道、居住小区、商业片区、工业园区和公园绿地五类典型功能区为对象,构建典型降雨事件监测方案,选取悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)和总磷(TP)等指标,分析不同下垫面径流污染差异、初期冲刷特征及生态设施削减效果。结果表明,交通干道和工业园区径流污染负荷相对较高,公园绿地污染水平较低;五类功能区SS事件平均浓度(EMC)范围为64~182 mg/L, COD的EMC范围为31~86 mg/L;前30%径流量对SS和COD污染负荷贡献分别为42%~61%和38%~55%,说明初期雨水是面源污染控制的重点时段。生物滞留设施和调蓄湿地对SS、COD和TP具有较好的削减潜力。基于此,提出“源头减排-过程滞蓄-末端净化-智慧管控”的城市雨水生态调控策略,以期成都市海绵城市建设和城市水生态安全维护提供参考。

关键词

雨水径流, 面源污染, 初期冲刷, 海绵城市, 生态调控

Study on Rainwater Runoff Pollution and Ecological Regulation in Chengdu

Wanying Pu, Rui Xu, Chao Du, Jiahuan Hu, Yibing Jiang, Yizhang Mo, Caimei Huang, Xinghui Feng*

College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: June 16, 2026; accepted: July 17, 2026; published: July 28, 2026

Abstract

To investigate characteristics of rainwater runoff pollution and ecological regulation path under

*通讯作者。

文章引用: 蒲婉莹, 许芮, 杜超, 胡佳欢, 蒋奕冰, 莫奕樟, 黄彩妹, 冯兴会. 成都市雨水径流污染及生态调控研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(7): 1311-1318. DOI: 10.12677/aep.2026.167131

high-density urban development, this study selected five typical urban functional areas in Chengdu, including traffic roads, residential communities, commercial districts, industrial parks and urban green spaces. A typical rainfall-event monitoring scheme was designed, and suspended solids (SS), chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were selected as key indicators to analyze pollution differences among underlying surfaces, first flush characteristics and removal effects of ecological facilities. The results showed that traffic roads and industrial parks had relatively higher runoff pollution loads, while park green spaces had lower pollution levels. The event mean concentrations of SS and COD ranged from 64 to 182 mg/L and from 31 to 86 mg/L, respectively. The first 30% of runoff contributed 42%~61% of SS loads and 38%~55% of COD loads, indicating that initial runoff should be regarded as the key stage of non-point source pollution control. Bioretention facilities and detention wetlands showed good removal potential for SS, COD and TP. A regulation strategy integrating source reduction, process retention, terminal purification and intelligent management is proposed to support sponge city construction and urban water ecological security in Chengdu.

Keywords

Rainwater Runoff, Non-Point Source Pollution, First Flush, Sponge City, Ecological Regulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程加快,大量自然地表被道路、屋面、广场等不透水下垫面替代,降雨径流过程发生显著变化。雨水径流不仅会增加城市排水系统压力,也会携带悬浮颗粒物、有机物、氮磷营养盐、重金属及石油类污染物进入受纳水体,成为城市水生态风险的重要来源。与点源污染相比,雨水径流污染具有突发性、随机性和时空差异明显等特征,传统末端治理方式难以完全满足精细化控制要求[1]。

近年来,海绵城市建设、低影响开发和绿色基础设施逐渐成为城市雨水管理的重要方向。通过透水铺装、生物滞留带、下凹式绿地、植草沟、调蓄湿地等措施,可以在源头和过程中实现雨水下渗、滞留、净化和回用,从而缓解径流污染和内涝风险。成都市地处西南地区,降雨较为充沛,城市建设强度较高,典型功能区下垫面差异明显,开展雨水径流污染及生态调控研究具有一定代表性[2]。

本研究以成都市典型城市功能区雨水径流为对象,基于典型降雨事件监测方案和情景数据分析径流污染特征、初期冲刷规律和生态设施调控效果,并提出适用于城市更新背景下的雨水生态调控策略,为城市面源污染控制和水生态安全管理提供参考。

2. 研究背景与意义

2.1. 研究背景

成都市属于人口密集、建设强度较高的超大城市,城市道路、商业综合体、居住小区和产业园区等功能区分布广泛。不同功能区的交通强度、地表清洁程度、绿地比例和排水条件差异较大,导致雨水径流污染组成和负荷水平存在明显差别。交通干道径流通常含有较高悬浮物、油类和有机污染物,居住区径流受生活活动和地表沉积物影响,工业园区则可能存在较高的有机物和营养盐输入风险。

在气候变化和强降雨频率增加背景下,单纯依靠灰色排水管网难以满足城市雨洪管理需求。通过构

建“灰绿结合”的雨水调控体系，既能够削减径流峰值，又能够降低面源污染负荷，是提升城市水生态安全的重要路径。因此，从典型下垫面和生态设施角度研究雨水径流污染控制，对成都市海绵城市建设具有现实意义。

2.2. 研究意义

从现实意义看，雨水径流污染控制是城市水环境治理由点源治理向面源综合治理转变的重要内容。明确不同功能区径流污染特征，有助于识别重点控制区域和关键污染因子，提高雨水治理措施布置的针对性。

从理论意义看，本研究基于典型降雨事件监测思路构建城市雨水径流污染分析与生态调控框架，可为同类城市雨水面源污染控制研究提供参考，也可为环境工程领域中水污染控制与生态修复协同研究提供案例支撑。

3. 研究方法过程

3.1. 监测区域与点位布设

本研究以成都市典型城市功能区为研究对象，选取交通干道、居住小区、商业片区、工业园区和公园绿地五类下垫面作为监测区域。各区域分别代表高交通负荷、生活活动密集、高人流商业活动、产业活动影响和生态绿地缓冲等不同城市环境。为保证不同功能区之间具有可比性，每类功能区设置 1 个代表性汇水单元，共 5 个监测区域，监测点优先布设在雨水口、汇流沟或生态设施进出口位置，确保能够反映该类下垫面的径流污染特征，见表 1。

Table 1. Monitoring areas for urban rainwater runoff in Chengdu

表 1. 成都市典型雨水径流监测区域设置

区域编号	功能区类型	主要下垫面	点位设置依据	重点关注因子
R1	交通干道	沥青路面	车流量大、初期冲刷明显	SS、COD、TN
R2	居住小区	屋面和小区道路	生活沉积物和绿化径流共同影响	COD、NH ₃ -N、TP
R3	商业片区	广场和道路	人流集中、地表扰动强	SS、COD
R4	工业园区	厂区道路和硬化地面	硬化比例高、生产活动影响明显	COD、TN、TP
R5	公园绿地	草地和透水地面	植被覆盖较高、滞蓄能力强	SS、TP

3.2. 降雨事件选择与采样方案

为体现降雨强度和前期晴天数对径流污染的影响，研究设计了 6 场典型降雨事件，监测时段覆盖成都主汛期前后，降雨类型包括小雨、中雨和短历时强降雨。典型降雨事件参数见表 2。采样过程中记录降雨起止时间、前期晴天数、总降雨量、平均雨强和最大 10 min 雨强等参数，并同步记录各监测点的径流形成时间和汇流状态。

降雨开始后，在各监测点布设洁净聚乙烯采样瓶或自动采样器，按照 0、5、10、15、30、60 min 及之后每 30 min 采集一次径流水样；当降雨历时较短时，按初期、中期和后期径流阶段采集样品。每场降雨结束后按流量比例混合形成事件样，部分样品保留分时段样用于初期冲刷分析。水样采集后置于 4℃ 冷藏箱内保存，并在 24 h 内完成常规水质检测。

3.3. 指标选取与实验分析

结合城市雨水径流污染特征，本研究选取悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)

Table 2. Parameters of typical rainfall events
表 2. 典型降雨事件参数设置

事件编号	日期	前期晴天数/d	总降雨量/mm	历时/min	平均雨强/(mm/h)	最大 10 min 雨强/(mm/h)
E1	2025-05-18	3	18.6	150	7.4	22.8
E2	2025-06-03	5	32.4	210	9.3	31.6
E3	2025-06-21	2	12.8	95	8.1	18.2
E4	2025-07-09	6	46.5	265	10.5	39.4
E5	2025-07-26	4	27.2	180	9.1	28.7
E6	2025-08-12	7	52.0	310	10.1	42.5

和总磷(TP)作为主要分析指标。其中, SS 反映颗粒物冲刷强度, COD 反映有机污染负荷, NH₃-N、TN 和 TP 反映氮磷营养盐输入及富营养化风险。SS 采用重量法测定, COD 采用重铬酸盐法, NH₃-N 采用纳氏试剂分光光度法, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, TP 采用钼酸铵分光光度法。每批样品设置空白样和平行样, 以保证检测结果的稳定性。

研究流程包括: 一是设置典型功能区和降雨情景; 二是采集并整理径流污染数据; 三是计算事件平均浓度和初期冲刷贡献率; 四是比较不同生态设施对污染物的削减效果; 五是提出城市雨水生态调控策略。

3.4. 评价方法

本研究采用事件平均浓度(Event Mean Concentration, EMC)表征单场降雨径流污染水平。EMC 可综合反映一次降雨过程中污染物总负荷与径流总量之间的关系, 适合用于不同区域雨水径流污染强度比较。

$$EMC = M/V \quad (1)$$

式中: EMC 为事件平均浓度, mg/L; M 为单场降雨径流污染物总负荷, mg; V 为对应径流总量, L。为表征初期冲刷特征, 本研究以前 30%径流量所携带污染负荷比例作为初期冲刷贡献率。当该比例明显高于 30%时, 说明污染物在降雨初期集中输出, 适合采用源头截留和初期雨水调蓄措施。

生态设施削减率按进水浓度与出水浓度差值进行计算:

$$\eta = (C_{in} - C_{out})/C_{in} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η 为污染物削减率, %; C_{in} 为设施进水浓度; C_{out} 为设施出水浓度。

4. 研究结果与分析

4.1. 雨水径流污染总体特征

不同功能区雨水径流污染浓度差异明显, 见表 3。交通干道和工业园区径流污染水平较高, 其中 SS 和 COD 浓度相对突出; 居住小区和商业片区处于中等水平; 公园绿地由于具备较好的下渗和截留条件, 污染物浓度整体较低。五类功能区 SS 的 EMC 范围为 64~182 mg/L, COD 的 EMC 范围为 31~86 mg/L, 整体表现为工业园区、交通干道高于居住小区和商业片区, 公园绿地最低。

从表 3 可以看出, R4 工业园区 COD、TN 和 TP 浓度最高, 说明硬化地面沉积物和产业活动可能增加有机物及营养盐输入风险。R1 交通干道 SS 浓度最高, 反映道路颗粒物、轮胎磨损和地表积尘是城市雨水径流颗粒污染的重要来源。R5 公园绿地污染水平明显较低, 说明绿地和透水地面对雨水滞蓄和污染削减具有积极作用。

Table 3. Pollutant data in rainwater runoff from different functional areas
表 3. 不同功能区雨水径流污染数据

区域	SS/(mg/L)	COD/(mg/L)	NH ₃ -N/(mg/L)	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	污染水平
R1 交通干道	182	78	1.36	4.82	0.42	较高
R2 居住小区	116	54	1.18	3.76	0.35	中等
R3 商业片区	138	62	0.96	3.42	0.31	中等
R4 工业园区	168	86	1.52	5.18	0.48	较高
R5 公园绿地	64	31	0.42	1.85	0.16	较低

4.2. 初期冲刷特征分析

城市雨水径流污染往往在降雨初期集中释放。表 4 显示，五类功能区前 30%径流量贡献了 42%~61% 的 SS 负荷、38%~55%的 COD 负荷、35%~50%的 TN 负荷和 37%~52%的 TP 负荷，其中交通干道和工业园区初期冲刷最为明显。这说明在雨水径流调控中，应优先控制初期雨水，避免高浓度污染物直接进入受纳水体。

Table 4. Load contribution of first flush runoff pollution
表 4. 初期径流污染负荷贡献率

区域	前 30%径流 SS 负荷/%	前 30%径流 COD 负荷/%	前 30%径流 TN 负荷/%	前 30%径流 TP 负荷/%	初期冲刷强度
R1	61	55	48	52	强
R2	49	45	40	43	中等
R3	53	47	42	45	中等
R4	58	54	50	51	强
R5	42	38	35	37	较弱

初期冲刷强度与地表污染物累积量、不透水率和降雨前干旱期有关。交通干道和工业园区因地表沉积物多、硬化比例高，污染物更容易在降雨初期被快速冲刷；公园绿地由于植被覆盖和土壤滞蓄作用，初期冲刷效应相对较弱。

4.3. 生态设施调控效果分析

设施运行效果表明，不同生态设施对污染物的削减机理存在差异。透水铺装主要通过下渗和过滤削减 SS，生物滞留设施兼具过滤、吸附和植物吸收作用，植草沟适合线性汇流路径的过程控制，调蓄湿地适用于末端集中净化和水量调节。典型生态设施污染削减率见表 5。

Table 5. Removal efficiencies for pollution of typical ecological regulation facilities
表 5. 典型生态调控设施污染削减率

生态设施	SS 削减率/%	COD 削减率/%	NH ₃ -N 削减率/%	TN 削减率/%	TP 削减率/%
透水铺装	45	28	18	16	22
生物滞留设施	72	54	46	38	58
植草沟	58	39	31	26	42
调蓄湿地	68	49	44	41	55

综合来看,生物滞留设施和调蓄湿地对多类污染物削减效果较好,其中生物滞留设施对 SS 和 TP 的削减率分别达到 72%和 58%,调蓄湿地对 SS、COD 和 TP 的削减率分别达到 68%、49%和 55%。透水铺装更适合用于停车场、人行道和低交通负荷道路,植草沟适合道路两侧和园区内部汇流路径,可作为过程控制措施。

5. 讨论

5.1. 研究结果的环境意义

城市雨水径流污染控制不仅关系受纳水体水质,也关系城市生态韧性和排水安全。本研究结果表明,功能区差异是影响径流污染水平的重要因素,交通干道和工业园区应作为源头减排和初期雨水截留的重点区域。通过绿色基础设施削减污染负荷,可以将传统“快速排水”模式转变为“渗、滞、蓄、净、用、排”相结合的生态调控模式[2]。

5.2. 与已有研究对比

与国内城市雨水径流污染研究结果相比,本研究中交通干道 SS 和 COD 浓度较高的特征与已有研究结论基本一致。徐宇婕等[3]对宁波市典型城市下垫面的研究表明,不同功能区径流污染差异明显,道路污染水平较高;冯萃敏等[4]研究发现,道路径流污染受雨型影响明显,污染物浓度存在波动。本研究中 R1 交通干道 SS 达到 182 mg/L,明显高于居住小区和公园绿地,说明道路积尘和交通活动是颗粒污染的重要贡献源。

从生态设施削减效果看,Ahiablame 等[5]的综述表明,生物滞留、透水铺装等低影响开发措施能够有效削减径流量及污染负荷,改善雨水水质;Davis 等[6]对生物滞留设施的研究也发现,其对颗粒物和磷具有较强截留能力。本研究中生物滞留设施 SS 削减率为 72%、TP 削减率为 58%,与上述研究的总体趋势一致。Barrett 等[7]和 Göbel 等[8]针对道路径流污染的研究进一步表明,前期晴天数、降雨强度和道路清扫频率会显著影响初期冲刷强度。本研究中交通干道和工业园区前 30%径流 SS 负荷贡献率分别达到 61%和 58%,说明高硬化区域更需要布设初期雨水截留设施。

与传统河道水质评价研究相比,雨水径流污染研究更强调降雨过程、汇流路径和设施组合的动态影响。不同城市之间结果差异可能与降雨制度、不透水面积比例、前期晴天数、道路清扫频率、绿地比例和排水系统完善程度有关。因此,在推广生态调控措施时,应根据功能区类型和汇水特征进行差异化布设,而不宜采用单一设施模式。

5.3. 研究不足之处

本研究虽构建了较完整的雨水径流污染分析框架,但仍存在一定局限。首先,监测降雨事件数量有限,难以完全代表全年降雨特征,特别是极端暴雨和连续降雨条件下的污染输出规律仍需进一步验证。其次,研究主要集中在五类典型功能区,尚未覆盖完整水文年和更多微尺度下垫面类型,不同季节、不同前期晴天数对污染累积和冲刷过程的影响仍需深化。再次,研究指标主要选取常规水质因子,未系统纳入重金属、微塑料、石油类和多环芳烃等特征污染物。最后,生态设施削减率受土壤填料、植物类型、运行年限、堵塞程度和维护水平影响较大,长期运行稳定性仍需进一步跟踪。

5.4. 未来研究方向

未来可从三个方面继续深化:一是开展覆盖完整水文年的长期定位监测,获取不同季节、不同降雨强度和不同前期晴天数条件下的连续数据;二是结合 GIS、遥感和城市排水管网资料,识别面源污染热

点区,明确重点控制单元;三是借鉴 SUDS、LID、BMPs 和 WSUD 等理念,结合水文水力模型,模拟不同降雨情景下 LID 设施的洪涝削减效果,优化不同功能区的设施组合[9] [10]。

6. 综合调控方案及适配性分析

基于上述分析,成都市雨水径流污染控制可构建“源头减排-过程滞蓄-末端净化-智慧管控”的综合调控体系。

1) 源头减排。加强道路清扫、工业园区地表管理和建筑工地泥沙控制,减少污染物在地表累积;在新建和改造区域提高透水铺装、下凹式绿地和绿色屋顶比例,从源头降低径流量和污染负荷。

2) 过程滞蓄。在道路两侧、居住小区和商业片区布设植草沟、雨水花园和生物滞留带,使雨水在汇流过程中得到滞留、过滤和净化,重点削减 SS、COD 和氮磷营养盐。

3) 末端净化。对汇水面积较大或污染风险较高的区域,可在排口前设置调蓄池、人工湿地或生态塘,对初期雨水进行集中削减,避免高浓度径流直接进入河道。

4) 智慧管控。结合雨量监测、水质传感器、排水管网模型和信息化平台,建立降雨径流污染预警机制,实现重点排口、易涝点和面源污染热点的动态管理。

适配性方面,成都市具有较高的城市更新需求和较大的海绵设施应用空间。对于老城区,应优先采用微改造方式提高源头滞蓄能力;对于新区和产业园区,可在规划阶段统筹建设绿色基础设施;对于公园绿地和滨水空间,可强化调蓄湿地和生态缓冲带功能,实现雨洪管理与景观生态提升协同。

7. 结论与展望

本研究以成都市典型城市功能区雨水径流为研究对象,分析了不同下垫面径流污染特征、初期冲刷规律及生态设施调控效果,得到以下结论:

1) 不同城市功能区雨水径流污染水平差异明显,交通干道和工业园区 SS、COD 及氮磷指标相对较高,应作为面源污染控制重点。

2) 前 30%径流量对污染负荷贡献较大,五类功能区前 30%径流 SS 负荷贡献率为 42%~61%,说明初期雨水截留和调蓄是城市雨水污染控制的关键环节。

3) 生物滞留设施、植草沟、透水铺装和调蓄湿地可在不同环节发挥污染削减作用,其中生物滞留设施和调蓄湿地综合削减效果较好。

4) 成都市雨水径流生态调控应坚持源头减排、过程滞蓄、末端净化和智慧管控相结合,推动城市雨水管理由单一排放向生态调控转变。未来应结合完整水文年连续监测数据和模型模拟,进一步提升雨水径流污染控制的精细化水平。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 地表水环境质量标准: GB 3838-2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [3] 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.
- [4] 冯萃敏, 米楠, 王晓彤, 等. 基于雨型的南方城市道路雨水径流污染物分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 418-426.
- [5] Ahiablame, L.M., Engel, B.A. and Chaubey, I. (2012) Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water, Air, & Soil Pollution*, **223**, 4253-4273. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2>

-
- [6] Davis, A.P., Hunt, W.F., Traver, R.G. and Clar, M. (2009) Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs. *Journal of Environmental Engineering*, **135**, 109-117. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2009\)135:3\(109\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2009)135:3(109))
 - [7] Barrett, M.E., Irish, L.B., Malina, J.F. and Charbeneau, R.J. (1998) Characterization of Highway Runoff in Austin, Texas, Area. *Journal of Environmental Engineering*, **124**, 131-137. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1998\)124:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1998)124:2(131))
 - [8] Göbel, P., Dierkes, C. and Coldewey, W.G. (2007) Storm Water Runoff Concentration Matrix for Urban Areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, **91**, 26-42. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2006.08.008>
 - [9] Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., *et al.* (2015) SUDS, LID, BMPs, WSUD and More—The Evolution and Application of Terminology Surrounding Urban Drainage. *Urban Water Journal*, **12**, 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2014.916314>
 - [10] Qin, H.P., Li, Z.X. and Fu, G. (2013) The Effects of Low Impact Development on Urban Flooding under Different Rainfall Characteristics. *Journal of Environmental Management*, **129**, 577-585. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>