

Analysis of long-term operation efficiency attenuation mechanism and optimization maintenance strategy of sponge city water cycle system

Yu Lin

China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co., Ltd. Zhejiang Branch, Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

The sponge city initiative serves as a pivotal approach to enhance urban water ecosystem resilience and mitigate urban flooding and water resource challenges. As the core component of sponge cities, the water circulation system's long-term stable operation is crucial for achieving urban sustainability goals. However, operational failures frequently occur in sponge city water circulation systems, compromising their functionality. This study conducts an in-depth analysis of the underlying mechanisms behind the performance degradation of sponge city water circulation systems during prolonged operation, while proposing corresponding optimization and maintenance strategies. The findings provide theoretical and practical references for improving operational stability and sustainability of sponge city water circulation systems.

Keywords

sponge city; water cycle system; efficiency attenuation; optimized maintenance

海绵城市水循环系统长期运行效能衰减机理及优化维护策略分析

林宇

中国市政工程华北设计研究总院有限公司浙江分公司, 中国·浙江 杭州 310000

摘要

海绵城市建设为城市水生态系统韧性的提升、城市洪涝与水资源问题的缓解所依赖的关键方式,水循环系统作为海绵城市的核心组成,其长期稳定运转对海绵城市目标的达成作用关键,不过,在实际运转时,海绵城市水循环系统效能衰减现象常被显现,使其功能施展受到影响,文章对海绵城市水循环系统长期运转效能衰减的内在机理展开深度解析,且对应性地给出优化维护办法,为海绵城市水循环系统运转稳定性与可持续性的提升供给理论与实践参照。

关键词

海绵城市;水循环系统;效能衰减;优化维护

伴随城市化步伐提速,城市水环境发生明显改变,传统城市建设里,大量不透水地面有所增多,致使雨水自然下渗受到阻碍,城市内涝、水资源短缺及水质恶化等问题因此引发,海绵城市理念随之诞生,水循环系统由其构建,自然水文过程被模拟,雨水“渗、滞、蓄、净、用、排”得以实现,城市应对水问题的韧性由此增强,不少城市主动开展海绵城市建设工作,部分项目已投入使用,然而实践表明,随着时间流逝,海绵城市水循环系统的运行效能出现衰减,使其可持续发挥功能受到影响,所以对其衰减机理及优化维

护策略展开研究极为迫切。

1 海绵城市水循环系统概述

1.1 系统构成与原理

1.1.1 构成要素

海绵城市水循环系统为多种设施和要素所构成,源头减排设施如透水铺装、下沉式绿地、生物滞留设施等,可使雨水快速下渗、滞留及净化得以实现,雨水收集与储存设施像蓄水池、雨水罐,雨水为其所储存,供后续利用,传输与调节设施包含管网、调节池,雨水输送和流量调节由其负责,末端处理设施如人工湿地,雨水经进一步净化后为其所排放。

【作者简介】林宇(1997-),男,中国广东汕头人,本科,助理工程师,从事海绵城市技术研究。

1.1.2 运行原理

海绵城市水循环系统运行时，源头减排设施率先发挥作用，雨水经透水铺装渗入地下，地下水为其所补充；下沉式绿地与生物滞留设施对雨水进行截留、净化，多余雨水经管网收集后，被送入蓄水池或调节池进行储存、调节，需用水之际，储存的雨水可用于灌溉、洗车等场景，最终，经末端处理设施净化至达标状态的雨水，被排入自然水体，自然水循环过程由此模拟，水资源高效利用与排水防涝得以实现。

1.2 系统功能与作用

1.2.1 雨水径流控制

雨水径流量及峰值得到有效削减，透水铺装使雨水下渗增加，地表径流产生被减少；下沉式绿地与生物滞留设施借助植物截留、土壤吸附及微生物降解，雨水流速和流量被降低，城市排水系统压力由此缓解，内涝风险得以减少。

1.2.2 水资源利用

雨水被收集储存后，为城市杂用所使用，水资源利用率由此提高，城市供水压力得以缓解，部分区域借助收集的雨水对城市绿地进行浇灌，大量自来水得到节约，水资源合理配置因此实现。

1.2.3 水质净化

系统里的生物滞留设施、人工湿地等，对雨水的净化作用可得到发挥，雨水中的悬浮物、有机物、氮磷等污染物，经物理过滤、生物降解和化学沉淀被去除，城市水环境质量由此改善，接纳水体生态系统为其所保护。

1.2.4 生态环境改善

绿色屋顶、下沉式绿地等让城市绿地面积得以拓展，城市微气候为其所改善，气温、湿度由其调节，热岛效应随之降低，同时为动植物进行栖息空间的供给，生物多样性保护为其所推动，城市生态系统稳定性得到增强。

表 1 设施功能对照表

设施类型	雨水径流控制	水资源利用	水质净化	生态改善
透水铺装	高(下渗)	低	中	低
下沉式绿地	高(截留)	中	高	高
生物滞留设施	高(滞留)	中	高	中
人工湿地	中	低	极高	高
绿色屋顶	中(截留)	低	中	高

2 长期运行效能衰减机理分析

2.1 物理堵塞导致的水流不畅

2.1.1 沉积物积累

长期运转过程，大量泥沙、树叶、垃圾等沉积物由雨水携带进入水循环系统，透水铺装孔隙、生物滞留设施土壤层、管网内壁处渐被堆积，水流通道为其堵塞，如某城市透水铺装路段，周边施工产生大量尘土，降雨时尘土随雨水进

入铺装孔隙，两年后孔隙堵塞率达 30%，透水性能大幅下滑。

2.1.2 生物膜形成

微生物于系统内合宜环境里生长繁殖，在管道内壁、填料表面得以形成生物膜，生物膜增厚会使过水断面缩小，让水流阻力增加，相关研究显示，运行三年的雨水管道，生物膜厚度能达 2-3mm，管道过水能力被降低 15%-20%。

2.2 材料老化与性能退化

2.2.1 透水材料堵塞与强度下降

透水铺装、渗透管这类透水材料，长期为雨水冲刷、冻融循环、车辆荷载等作用所影响，表面孔隙易于发生堵塞，透水性能得以减弱，与此同时，材料内部结构遭受损坏，强度随之下降，破裂、变形等状况为其呈现，特定区域的透水混凝土路面在使用五年之后，透水系数降低 50%，抗压强度减少 20%，正常使用由此受到干扰。

2.2.2 土工合成材料老化

土工布、防渗膜这类土工合成材料，于紫外线照射、化学物质侵蚀及微生物作用下发生老化，老化之后，材料的拉伸强度、抗撕裂强度为其降低，防渗、过滤等功能得以减弱，特定雨水蓄水池的土工膜在使用八年后，多处破损为其出现，水池漏水情况由此造成。

2.3 生物作用的影响

2.3.1 植物生长问题

生物滞留设施、下沉式绿地中植物的生长情形对系统效能构成影响，排水管道或为植物根系的过度生长所堵塞，二次污染或由植物死亡后残体分解产生的有机物所引发，植物若选择不妥，无法适应本地气候与土壤条件，生长态势不佳，则对雨水的截留、净化能力得以降低。

2.3.2 微生物活性变化

微生物在水质净化中承担关键职能，环境变化却会对其活性产生作用，水温、pH 值、溶解氧等发生改变时，微生物活性随之下降，对污染物的分解转化能力为其减弱，冬季水温降低的情况下，人工湿地中微生物活性遭抑制，对氮磷的去除率被降至 20%-30%。

2.4 设计与施工缺陷的暴露

2.4.1 设计不合理

部分海绵城市项目设计过程中，对当地气候、地形、水文条件的考量存在欠缺，设施的规模与布局为其呈现不合理状态，降雨量较大的区域里，雨水调蓄池容积设计偏小，暴雨时的调蓄需求便无法得到满足；不同类型设施的衔接出现阻碍，系统整体运行效率由此受到波及。

2.4.2 施工质量问题

施工阶段存在用料克扣、操作背离规范的情况，设施质量为其所累而不达标，像生物滞留设施的土壤层填筑厚度欠缺、压实度不足，雨水下渗及净化效果由之遭受影响；管网接口密封失当，漏水、堵塞等问题因此产生。

3 优化维护策略制定

3.1 定期清理与疏通

3.1.1 沉积物清理

制定定期清理方案,透水铺装、生物滞留设施、管网等为沉积物清理工作所覆盖,泥沙、树叶、垃圾这类沉积物,由高压水枪冲洗、真空抽吸等方式予以清除,就透水铺装而言,每年雨季前为全面清理所开展;生物滞留设施每季度对表面沉积物清理一次,土壤层每年进行一次翻耕、部分土壤得到更换,土壤板结与污染物积累由此受到防范。

3.1.2 生物膜清除

规划定期打扫安排,为透水铺装、生物滞留设施、管网等开展沉积物打扫,由高压水枪冲洗、真空抽吸等手段加以运用,把泥沙、树叶、垃圾等沉积物扫除,对于透水铺装,每年雨季前进行一次全面打扫;生物滞留设施每季度对表面沉积物打扫一次,每年为土壤层实施一次翻耕、更换部分土壤,阻止土壤板结和污染物堆积。

3.2 材料更新与修复

3.2.1 透水材料修复与更换

为出现堵塞、强度降低的透水材料及时开展修复或更替,对于透水铺装局部破损、孔隙堵塞严重的区域,可由重新铺设透水砖、修补透水混凝土等办法得以实施修复;若大面积材料性能衰退,需予以整体更替,定期为透水材料施行性能检测,依据检测结果拟定修复或更替方案。

3.2.2 土工合成材料更换

定时查验土工合成材料老化状况,为老化严重、功能受损的材料及时施行更换,在更替土工布、防渗膜等材料时,由质量可靠、性能契合标准的产品得以选用,并严格依照施工规范开展铺设,保障更换后材料正常施展功能。

3.3 生物调控与管理

3.3.1 植物养护与管理

深化生物滞留设施、下沉式绿地里植物养护工作,按期为植物开展修剪、施肥、病虫害防治,保证植物生长状态优良,参照植物生长情形与季节转换,合理调控植物种植密度及种类,杜绝植物根系生长过量致使管道堵塞,每年春季为植物执行一次全面检查和养护,让死亡植物残体获得及时清理。

3.3.2 微生物环境调控

人工湿地、生物滞留设施等微生物生存环境参数需加以监测,像水温、pH值、溶解氧等,水流速度的调节、营养物质的添加等方式被用于维持微生物适宜的生存环境,使其活性得到提升,冬季可实施保温举措,避免水温过低对微生物活性产生影响;水体pH值出现异常时,适量酸碱调节剂可被加入以进行调节。

3.4 强化监测与预警

3.4.1 建立监测体系

搭建完整监测系统,海绵城市水循环系统水量、水质、

设施运行状况等为其开展实时监测,流量计、水质传感器、压力传感器等监测设备于关键节点安装,如管网进出口、蓄水池、雨水花园进出口等位置均有设备装设,数据实时收集并传送至监控中心。

3.4.2 预警机制制定

搭建标准预警系统,监测数据为之设定适宜临界值,系统运行参数若逾越临界值,预警信号即刻发出,如管网流量超设计流量80%、水质指标超标等情况出现时,运维人员由短信、邮件等路径予以通知,方便及时采取举措,系统故障及效能进一步衰退得以遏制。

4 案例分析

4.1 案例城市简介

以某典型海绵城市建设区域为例,该片区面积约5平方公里,多种海绵城市设施于此兴修,涵盖透水铺装道路,下沉式绿地,生物滞留设施,雨水收集利用系统等,已运行五年。

4.2 效能衰减表现

运行阶段,该区域水循环系统效能明显衰减情况发生,透水铺装路段透水性能下滑,部分区域积水现象出现,下沉式绿地及生物滞留设施对雨水的净化能力变弱,出水水质未达标准,雨水收集系统收集效率降低,蓄水池漏水问题产生,管网排水能力下降,暴雨时局部区域内涝显现。

4.3 原因分析

经查验解析,效能衰减的根由主要包括,透水铺装与生物滞留设施因沉积物积聚而造成堵塞,透水材料老化,强度及透水性能均下滑,植物养护不力,部分植株枯萎,雨水截留和净化受其影响,微生物活性遭温度与水质等因素作用而降低,设计时对该区域未来发展预估不足,设施规模偏小,施工环节存在质量瑕疵,如管网接口密封不严密。

4.4 优化维护措施实施及效果

针对上述情形,一系列优化保养举措予以推行,透水铺装与生物滞留设施的沉积物为定期清理所涉及,植物在每年春季获全面养护及补种,老化透水材料予以修复和更换,微生物生存环境为监测并调控,监测体系得以健全,预警机制加以构建,部分设施进行改造,规模予以扩大,推行之后,系统运行效能大幅上扬,透水铺装透水性能恢复80%以上,下沉式绿地和生物滞留设施出水水质达标率提升至90%,雨水收集系统收集效率增长25%,管网排水能力强化,内涝问题有效减轻。

5 结语

综上,海绵城市水循环系统在改善城市水生态环境、提升城市水安全保障能力方面作用无可替代,但长期运行中,效能衰减问题对其功能的充分发挥形成严重制约,经深入剖析,物理堵塞、材料老化及性能退化、生物作用、设计与施工缺陷为导致效能衰减的主因,针对这些问题,定期清

理疏通、材料更新修复、生物调控管理、监测预警强化及设计施工管理完善等一系列优化维护办法被提出，实际应用时，需结合不同城市特点与海绵城市水循环系统具体状况，综合运用这些办法，全方位、多层次的维护管理体系得以构建，海绵城市水循环系统运行效能持续提升，建设目标的实现获保障，城市可持续发展由此得到坚实的水生态支撑。

参考文献

- [1] 王泉,汤明杰,施珮,等.智慧海绵城市研究进展与展望[J].水利水电技术(中英文),2025,56(05):47-58.
- [2] 李悦,杨玖伦,谢子涵,等.海绵城市建设能否缓解城市蔓延?[J].城市规划,2024,48(06):25-35+46.
- [3] 宋伟男,郝小旋.排水模型在海绵城市建设效果评估中的应用[J].水电能源科学,2024,42(06):50-53.