

Optimization of urban water cycle system based on sponge city theory

Zongjian Li

Guangzhou Urban Construction Planning and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract

Urban water circulation systems exhibit notable deficiencies in water regulation capacity and compromised infiltration continuity. This study aims to enhance regional stormwater management and groundwater recharge capabilities through optimized strategies, including spatially optimized regulation units, enhanced infiltration systems, and closed-loop recharge mechanisms. A dynamic simulation model was developed to evaluate various rainfall return periods. Results demonstrate that implemented optimization measures effectively increased runoff reduction rates and groundwater recharge efficiency, while delaying peak drainage events. These findings provide essential technical support for improving urban drainage resilience and advancing water resource recycling systems.

Keywords

sponge city; urban water cycle; structural optimization; simulation and verification

基于海绵城市理论的城市水循环系统优化

李宗建

广州市城建规划设计院有限公司, 中国 · 广东 广州 510000

摘 要

城市所具备的水循环系统, 存在着调蓄能力方面凸显出的不足以及渗透连续性较差这样的系列问题, 对此所开展的研究, 其目的旨在有效提升区域在径流调控方面以及地下补水方面所具备的能力, 进而提出像是调蓄单元基于优化布局、渗滤系统结构进行强化以及补水机制实现闭环构建这样一系列的优化策略, 并建立起具备动态模拟功能的模型, 设定出对应不同降雨重现期的各类工况。结果呈现出, 被实施的那些优化措施, 以有效方式提高了径流削减率以及地下补水速率, 而且还让排水峰值所出现的时刻得以延缓。此研究成果能够为提升城市排水系统在韧性方面以及水资源循环利用的水平等方面, 提供必要的技术支持。

关键词

海绵城市; 城市水循环; 结构优化; 模拟验证

1 引言

随着城市化进程不断加快, 地表不透水面积迅速扩大, 原有自然水循环格局受到严重干扰。降雨过程中的地表径流激增, 造成城市内涝、地下水位下降和水体污染等复合型问题。海绵城市, 是新一代城市雨洪管理概念, 是指城市能够像海绵一样, 在适应环境变化和应对雨水带来的自然灾害等方面具有良好的弹性, 也可称之为“水弹性城市”, 国际通用术语为“低影响开发雨水系统构建”, 下雨时吸水、蓄水、渗水、净水, 需要时将蓄存的水释放并加以利用, 实现雨水在城市中自由迁移。围绕当前城市水系统运行中的结构性缺陷, 本研究提出面向调蓄、渗滤与补水环节的优化设计。

2 系统问题诊断

2.1 雨水调蓄能力不足

。当遇到雨水在短时间内高度集中这种特殊条件时, 就会迅速形成高强度的径流, 进而导致管网系统极易出现诸如满流、倒灌以及节点溢流等一系列不利于排水顺畅进行的现象。再者, 调蓄结构在空间上的配置处于一种不足的状态, 其布设的位置与汇水重心之间存在着一定程度的偏离, 使得它很难达成在片区范围内对于水量的有效调控以及峰值的合理削减^[1]。

2.2 渗透路径连续性差

透水铺装出现的材料孔隙堵塞、基底断层或设置深度不足等问题, 导致入渗能力发生衰减。土壤因压实度大幅增加, 造成微孔结构遭受破坏且渗流路径中断, 使得雨水大多沿表面径流方向快速向外排出。区域间渗滤结构由于未形成功能性连接, 造成渗透能力呈现点状分布, 根本无法承接汇

【作者简介】李宗建 (1997-), 男, 中国广东佛山人, 本科, 助理工程师, 从事生态环境工程研究。

水面上产生的连续流量^[2]。绿地与硬质铺装结构因衔接过渡不足,且未建立起水力通道,使得系统边界阻断了水平渗流的自然传导。

2.3 地下水补给受限

由于水位的持续下降,使得地层微变形以及结构沉降的风险加剧,补给总量出现了显著的下降,地下水流速随之变缓,含水层厚度也逐渐减小,影响范围还在逐步地扩大。部分区域呈现出地下水负平衡的趋势,水源调控处于失衡状态,整个系统长期处于抽取量多于补给量的状态。

3 优化设计策略

3.1 调蓄单元布局优化

对于优化策略而言,应当围绕集水区域存在的高程关系、排水的具体路径还有用地呈现的形态去开展耦合设计工作,促使调蓄结构从原本点状的节点朝着嵌套式的层级网络进行转化。在集水面当中的那些低洼区域需要优先考虑设置蓄滞空间,并且要让这些空间和上游地表径流的方向保持一致,以此使得雨水能够顺着自然坡势汇入到目标调蓄区域内。场地的布设不再仅仅局限于绿地与空地范围,而是应该引入像城市道路侧缘、广场边界以及建筑外部缓冲带等作为调蓄接口,进而将分布式的蓄水结构整合到整体排水链条当中去^[3]。不同等级的调蓄单元,需以汇水面积与降雨强度为依据去匹配响应容积,进而形成一种涵盖基础调蓄、区域调蓄与末端调蓄的分层格局。其中基础调蓄模块需嵌入到微型景观系统、植草沟或者局部下凹绿地这些地方,目的是承接初期雨水径流。区域调蓄结构依托于广场下沉空间、地下模块化水箱以及开放绿地复合场地,该结构所具备的是中期存储以及中继释放功能^[4]。

3.2 渗滤系统结构强化

垂向构造应当被重构成为一种三层复合系统,其中上层为承担截留颗粒物与分散流速职责的粗粒过滤层,中层是配置有生物滞留材料与透水基质用于吸附溶解污染物的稳定净化层,下层则是通过铺设碎石与穿孔管道从而形成水平导排界面并连接后续排水或补给结构的导流释放层。渗流路径不仅需保持坡度处于稳定状态,而且其排布方向也应避免出现死角与回流区段,以保障水力传导方向能够与地形走势始终保持一致。

3.3 补水机制闭环构建

在地表系统里选取具有入渗潜力的节点,并将其设为补水入口,还要预设结构通道以便导入浅层含水带,且导入路径需具备层级过滤能力来防止雨水中携带的污染物对含水层造成扰动。补给区应当设置下渗调控装置,在水量集中之际进行缓释控制,以此维持含水层压强稳定,避免因补给强度过大致使地下结构失衡。在系统运行过程中设定动态门限,当出现地下水位低于预警值这种情况时就启动补给路径调节程序,去强化渗滤与导流力度^[5]。如图1所示为城市水循环系统里调蓄、渗滤跟补水结构之间的协同路径,雨水从

面状集水区域汇入调蓄结构,调蓄单元连接着下游渗滤路径以及地下补水接口。

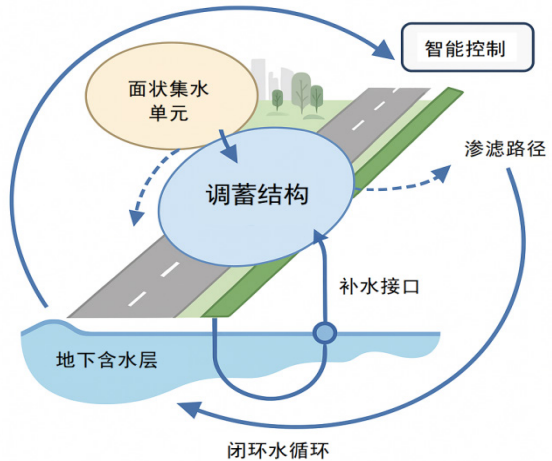


图1 海绵城市优化结构布置示意图

4 案例验证分析

4.1 工程背景与参数设定

本次模拟所选取的华东沿海某新城片区,其区域总面积大致为3.4平方公里且地形坡度起伏程度相对而言较小的这一片区,在开发之前存在诸如调蓄设施缺失、渗透率较低以及地表径流集中向外排出等一系列问题,致使在中强度降雨的条件之下常常出现道路积水和排水节点超负荷这样的现象。为对前述所提及的优化策略的实际运行效果加以验证,在本案例当中引入分布式调蓄池、多层次渗滤系统以及深层补水结构,将既有排水结构进行系统化的重构工作。

模拟时所用的降雨事件选取了年重现期分别为2年和5年的两种不同工况,在这一过程中考虑降雨强度、历时以及积水深度这三类变量,将初始条件设定为地表径流系数取值为0.78,同时基础下渗速率则设定为8.5 mm/h,地下水初始埋深设定为1.7 m且含水层有效孔隙率设定为15%。调蓄池容积依据流域面积与设计暴雨量来进行测算,其最大调蓄总量被控制在38,000 m³,布局结构覆盖的面域约为1.6 km²。模型是以MIKE URBAN平台作为基础去构建仿真结构,系统构件参数按照设计图纸与监测数据来进行初始化设定,而水动力参数采用常规的Saint-Venant方程对其进行时空解析。

4.2 模拟过程与数据匹配

本次以年重现期为2年且降雨历时达120分钟同时模型时间步长设为30秒的暴雨过程作为输入条件而展开的调蓄系统模拟之中,系统结构参数乃依据实测资料以及设计图纸来进行设定,这些参数所涉部分包含着调蓄池、水力控制口以及相关连接节点等方面。其中地表径流系数取值设定成0.78,基础层下渗速率给定8.5 mm/h,调蓄池最大设计容积则被确定是38000立方米,初始水位也设置为0.3米,控制口高程设为0.1米。在模型运行这个过程里,需实时对

蓄水阶段水位变化进行记录,生成用以刻画调蓄系统于暴雨事件之中响应状态的时序曲线。调蓄结构在降雨开始大约30分钟之时进入到蓄水加速阶段,水位在第35分钟上升至2.5米这一峰值,之后便逐渐下降进而进入稳定排放阶段。系统运行全过程所呈现出具备削峰明显、排放延迟以及释放稳定的三段式特征。图2展示出本次模拟条件之下调蓄系统的动态水位响应曲线,其水位变化趋势与降雨强度变化进程是保持一致的,峰值滞后主雨峰大概18分钟,这表明系统具备显著的径流调节能力与排放控制效果。

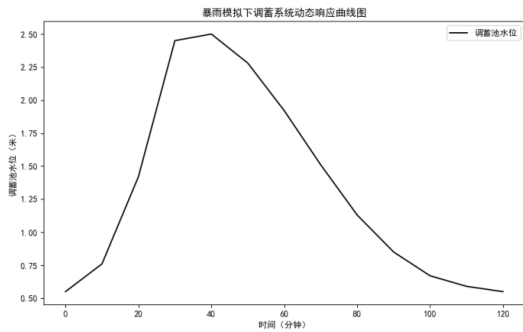


图2 暴雨模拟下调蓄系统动态响应曲线图

在那水位逐步回落的特定阶段之中,存在着这样一种状况,即部分相应水体以某种方式缓缓渗入至下层具备特定功能的渗透结构里,并且这些水体又进一步被导入到与之相关联的地下补水单元处。在此期间,整个系统内部并未出现那种会导致溢流的节点或者致使排放产生堵塞的现象,使得整个结构的运行节奏处于一种较为稳定的态势。与此同时,通过实测所获取到的结果以及借助模拟而得出的相关数据,在诸如水位峰值这一类、排放曲线斜率这一关键点以及滞后时间等诸多重要关键指标方面,始终保持着高度的一致性。最大水位误差始终被控制在不超过0.08米的范围之内,并且误差百分比也是稳稳地控制在3.4%以内,基于此情况,该模型所具备的精度已经满足了工程在进行预测时对于精度方面所提出的相关要求,从而也就具备了能够进一步被用于区域尺度上结构适应性分析所需的基础。

4.3 效果评估与技术反馈

将模拟所输出的结果与现场经实测获得的数据相结合

从而针对各项指标进行验证。需注意的是,峰值径流强度相比较于改造之前呈现出下降41%这一情况,并且积水持续的时间减少了43%,暴雨响应的窗口有明显延展现象。而渗透系统于不同地块会表现出存在差异的响应,渗透的速度跟土壤结构关联性紧密,像粗粒土壤区域的人渗速率是比较高的,致密的粘土区域则需借助辅助结构强化路径传导。由地下水位监测井的数据表明,在降雨事件发生之后的48小时以内回升趋势显著,并未出现超压或者反渗等迹象,说明结构稳定性满足工程的要求。在模型对比阶段,对优化前后的技术指标体系加以构建,从排放峰值、滞后时长、蓄水利用率以及水质指标这四个维度展开综合评估。各项技术指标都显示出系统运行性能得到显著提升,补水过程的可控性与雨水利用的效率同步增强。

5 结论

本研究将对象设定为典型城市片区的情况下,通过系统性的识别流程,把当前水循环结构里出现的如调蓄不足这类、渗透中断以及补水断裂等关键问题给找了出来,进而构建起一种核心为分布式调蓄且包括连续性渗透与闭环补水的优化策略。从模拟结果来看在径流削减这方面、水质净化方面以及地下水回补等方面优化结构都能达到显著提升,技术路径所具备的稳定性与工程适配性,对基于海绵城市理念的多层级协同构造能够有效支撑城市水循环系统在整体性能恢复和结构性修复方面得以验证。

参考文献

- [1] 杨默远,潘兴瑶,郑凡东,等.海绵城市水循环过程综合模拟技术研究[M].北京:中国水利水电出版社:2024.
- [2] 王学毅.海绵城市理念在城市园林设计中的应用[J].工程技术研究,2022,7(10):221-223.
- [3] 李威,周佳昱,李佳倩.海绵城市理念在城市公园设计中的应用研究[J].科技创新与生产力,2021(11):39-41.
- [4] 杨默远,刘昌明,潘兴瑶,等.基于水循环视角的海绵城市系统及研究要点解析[J].地理学报,2020,75(09):1831-1844.
- [5] 刘虹,盛起.基于海绵城市建设要求的城市带状公园设计与创新——以天津解放南路片区中央绿轴设计为例[J].建筑设计管理,2020,37(08):88-91.