

基于气候变化的多情景模拟城市排水系统适应性研究

宋培忠¹ 吴雪^{2*} 李云历¹

1 云南省设计院集团有限公司

2 云南开放大学

DOI:10.32629/btr.v8i10.5114

[摘要] 受全球气候波动影响,城市降水规律发生明显改变,极端降雨事件多发,持续加重排水设施运行负担。当前国内不少城市排水工程建设标准偏旧,加之城区硬化地面占比升高、调度方案应变能力有限,设施对气候环境的适配性逐步降低。研究划分三类气候扰动情景开展工况模拟,证实现有排水体系仅可平稳应对常规降雨,遭遇极端气候时极易出现运行故障,城市内涝隐患加剧,防灾能力已难以匹配气候发展态势。

[关键词] 气候变化; 多情景; 城市排水; 系统适应性

中图分类号: TU992 文献标识码: A

Research on the Adaptability of Urban Drainage Systems Based on Multi-Scenario Simulation under Climate Change

Peizhong Song¹ Xue Wu^{2*} Yunli Li¹

1 Yunnan Design Institute Group Co., Ltd.

2 Yunnan Open University

[Abstract] Affected by global climate change, urban precipitation patterns have changed significantly, with more frequent extreme rainfall events, placing increasing pressure on drainage infrastructure. At present, many urban drainage systems in China are still based on outdated design standards. In addition, the increasing proportion of impervious surfaces and the limited flexibility of operational scheduling have further reduced the adaptability of drainage facilities to changing climatic conditions. This study develops simulations under three climate disturbance scenarios. The results show that the existing drainage system can only operate stably under normal rainfall conditions. When exposed to extreme climate events, system failures are highly likely to occur, and urban waterlogging risks are significantly increased. The current flood prevention capacity is no longer sufficient to match evolving climate conditions.

[Key words] Climate Change; Multi-Scenario; Urban Drainage; System Adaptability.

引言

气候变暖使得区域降水特征显著改变,短时强降雨等极端天气愈发常见,城市原有水文格局被打破,防洪排涝压力持续攀升。伴随城市建设推进,不透水下垫面范围不断扩大,地表径流量随之增加。加之现有排水管网普遍建设标准不高、设施老旧、整体协同效能不足,难以适配当下复杂的气候条件。本文依托多情景模拟手段,构建差异化气候扰动场景,剖析排水系统现存短板与运行适配性,为相关工程优化完善提供参考。

1 气候变化下城市排水系统运行特征与承压现状

1.1 城市极端降水水文演变特征

在全球气候变暖的大背景下,区域降水的时空分布规律发生了深层次改变,原本趋于稳定的城市水文平衡状态逐步被打

破,降水在空间分布上的不均与时间维度的失衡问题愈发突出。结合各地气象站点长期连续的观测数据能够发现,国内城市极端降水事件的发生频次较以往显著提升,短时强降雨和持续性阴雨天气交替发生,不仅降水持续时长有所增加,瞬时降雨强度也呈现逐年上升的趋势,彻底重塑了城市传统水文循环格局^[1]。依托历史气象资料归纳的降水变化规律,已经无法适配当前气候异变下的城市水文环境。现阶段城市极端降水往往表现出突发概率高、局地特征显著、雨量极值突破以往记录的特点,单场降水累积雨量与峰值雨强远超区域多年平均数值,持续给城市排水管网带来巨大运行压力。气候异变同时打乱了城市固有的季节性降水节律,汛期雨水集聚程度显著提高,非汛期突发强降雨的现象也愈发常见。这种降水模式的根本性变革,让城

市排水系统告别了以往汛期高负荷、平日低负荷的阶段性运行模式,全年处于波动式高负荷运行状态。针对平稳水文环境设计的传统排水体系适配性持续衰减,使得城市水安全治理和排水设施日常运维长期面临不稳定的现实挑战。

1.2城市排水系统固有运行短板

我国多数城市排水基础设施建设年代久远,管网规划布局、管径规格设定及配套系统建设,均以历史稳定气候条件和常规水文数据为设计基准,其承载上限仅能满足常态降水工况的排水需求。随着全球气候持续变化,极端降水从偶发事件转变为常态化场景,传统排水系统的设计缺陷与适配短板被充分暴露。老旧城区普遍存在管网老化锈蚀、管径设计标准偏低、管道淤积堵塞等结构性问题,加之新老城区管网衔接不畅、各排水分区相互割裂、整体联动性不足等系统性问题,直接导致城市整体泄洪能力不足,汇水、输水、排水各环节协同性较差。城市化推进过程中,城市建成区规模持续扩张,道路、建筑等硬质不透水地表占比不断提升,原有绿地、裸地等透水调蓄空间被大量占用。地表雨水下渗能力与自然调蓄功能持续弱化,降雨形成的地表径流规模大幅增长,进一步加剧了管网排水压力。目前国内城市排水系统的建设标准与运维模式,均基于常规降雨场景制定,并未针对极端强降雨、连续叠加降水等特殊工况设置弹性调控与应急缓冲机制。

1.3气候变化对排水系统的扰动机制

气候变化主要通过改变区域水文核心参数,从多重维度干扰城市排水系统的稳定运行,是诱发城市内涝的核心外因之一。从单次降雨过程来看,极端强降水会短时间内激增地表汇水总量,突破市政管网的设计排水阈值,造成管网满管运行、路面雨水漫溢等问题,最终引发局部内涝灾害。从长期水文演化过程分析,气候变暖加速区域水汽循环,连续降雨、多轮降水叠加的场景愈发普遍,排水系统难以在降水间隙完成管网排空与负荷释放,长期处于饱和和高负荷运行状态,系统安全冗余与容错空间不断被压缩^[2]。与此同时,气候异常使得台风、强对流等灾害性天气频发,进一步颠覆了传统降水时空分布特征,大幅增强了降雨过程的随机性与突发性。高强度集中降雨会快速提升局部地表汇流速度,打破排水系统的常规运行节奏,造成排水供需关系严重失衡,进而出现路面积水、管网淤堵、排水滞后等一系列问题,直观体现出现有排水设施在复杂水文场景下,承载弹性不足、动态适配能力薄弱的核心短板。

2 城市排水系统多情景模拟体系构建

2.1多情景模拟核心思路

气候变化会持续改变区域水文格局,依托城市水文动态演变特征,可搭建适配复杂气候条件的排水系统多情景模拟体系。相较于传统模拟仅依靠历史水文数据开展单一推演的局限,该模式充分兼顾气候演化的随机性与不确定性。依据降水强度、持续时长、降雨形态的不同组合方式,可划分常态、轻中度异常、极端异常等多种气候工况,精准还原真实降雨环境下的排水运行状态。研究以城市下垫面特质、管网布局与设备参数为基础

数据,结合气候水文预测结果,测算不同场景下地表汇流、管网输水、区域积水等关键水文指标,精准排查排水体系的运行漏洞与适配短板,为排水设施的气候适应性优化改造提供可靠的数据支撑。

2.2模拟情景梯度划分

结合区域气候演变规律与城市降水特征,依据气候分级标准,将模拟工况划分为三类典型场景。梯度化场景涵盖不同强度气候扰动与各类降雨工况,可全面反映排水系统的运行特性,为多情景模拟分析提供完备的场景基础(见下表)。

表1 城市排水系统多气候扰动情景模拟参数与研究目标对照表

模拟情景类型	气候扰动特征	降水核心参数特征	模拟研究目标
基准情景	气候状态稳定,无明显异常波动	降水强度、时长、频次符合常年平均水平	研判排水系统常规运行状态,明确基础适配能力
中度气候扰动情景	气候小幅异常,极端降水事件增多	短时强降水频次提升20%-30%,单次降水时长小幅增加	识别系统轻度承压状态下的运行短板与薄弱区域
重度气候扰动情景	气候显著异常,极端水文事件集中爆发	强降水强度提升40%以上,叠加降水、连续降水场景频发	评估系统极限承压能力,排查重大内涝风险隐患

三类情景形成梯度化模拟体系,可完整复刻气候变化从稳定到异常的动态演变过程,有效规避单一情景模拟的片面性,保障模拟结果能够适配气候不确定性特征,全面反映排水系统的动态适配性能。

2.3模拟参数与基础条件设定

开展模拟参数设置工作时,需立足城市真实下垫面状况、排水管网台账及历年水文监测资料开展梳理整合,保障模拟成果与城市实际工况相匹配。参数体系包含硬化路面占比、绿地水域面积、管段长度、管径、管道坡度、排水节点分布等静态设施信息,同时依托气象预报成果实时修正降水相关动态参数,完成两类参数的融合应用^[3]。模拟过程中统一边界条件,剔除人为施工、管网临时检修等干扰因素,保证不同情景下模拟变量的唯一性,确保各类情景模拟结果具备可比性与参考性。通过参数精细化设定,提升多情景模拟的精准度,保障模拟数据能够真实反映气候变化对排水系统的实际影响。

3 多情景模拟下城市排水系统适应性研判

3.1常规基准情景下系统适配性分析

基准情景对应气候条件相对稳定、降水节律贴合常年平均状态的常规工况,是检验城市排水系统基础运行能力的核心参照标准。结合模拟推演结果来看,在常态化水文环境的作用下,城市现有排水基础设施整体运行状态平稳,管网汇流、输水及末端排水的全过程衔接有序。城市大部分建成区在常规降水过程中能够快速完成雨水排出,地表无长时间积水滞留情况,现有排水体系的承载阈值可基本匹配常态降水的径流产出水平。现阶段城市管网的空间布局、管径梯度配置以及各排水节点的调度运行模式,经过长期城市水文适配磨合,能够稳定应对日常水文

循环过程,全域范围内未出现大范围、持续性的排水功能失效问题,整体运行可靠性较强。从局部细化维度分析,城市不同功能片区的排水适配能力存在差异化特征。其中新建城区、核心片区的管网建设标准较高、管网密度合理,排水效能表现稳定。而建设年代久远的老旧城区受限于早期规划标准,普遍存在管网布设密度偏低、管径规格偏小的硬件特征,在短时集中降水过程中会出现雨水汇集速度大于管网排水速度的情况,产生短时地表积水现象。但该类积水问题具备消退快、影响范围小、无次生衍生灾害的特征,降水结束后可依靠管网自身排水能力快速完成地表径流排空,不会形成持续性内涝风险,对城市整体排水体系的运行效能干扰程度较低。

3.2 中度气候扰动情景下系统承压特征

中度气候扰动情景代表气候环境出现小幅异常波动,区域极端降水的发生频次、降水强度较常年水平出现阶段性提升,也是当前城市气候环境逐步演变的常态化过渡工况。在此模拟场景下,城市排水系统的隐性短板逐步显现,全域排水稳定性开始出现分化特征。城市地形低洼区域、老旧街巷片区、新老管网衔接断面以及排水节点交汇处等结构性薄弱地带,最先出现排水响应滞后的问题。相较于基准情景,该工况下的地表积水覆盖范围进一步扩张,积水留存时长显著增加,多数主干管与支管会在降水峰值阶段进入短时满管运行状态,管网输水余量被大幅压缩。从系统整体运行状态来看,中度气候扰动尚未造成排水体系整体性失效,城市核心功能片区的排水秩序仍可维持基本稳定^[4]。但系统自身的可调冗余容量持续缩减,应对水文波动的容错性能大幅下降。多次连续降水的叠加效应会造成局部管网排水压力持续累积,无法通过间歇时段完成管网疏通与负荷缓释,直接导致管网排水调度效率持续降低。原本在常规情景下不会暴露的结构性缺陷、管网适配性不足等隐性问题,在降水负荷提升后完全显现,城市局部区域的内涝风险持续上升,整体排水系统由稳态运行状态逐步转向临界承压状态,气候适配的脆弱性初步凸显。

3.3 重度气候扰动情景下系统失效风险研判

重度气候扰动情景对应极端暴雨、持续性强降雨等高强度、高风险水文工况,也是研判城市排水系统极端气候抵御能力的关键场景。在该模拟条件下,现有排水基础设施的设计标准与运

行能力难以匹配激增的水文负荷,系统整体进入超负荷运行状态,适配性不足的问题全面暴露。极端降水带来的高强度地表径流远超管网常规输水能力,城市大范围管网出现满管溢流、输水阻滞等功能性问题。其中路网密集、硬化率极高的城市中心片区、地势低洼的老旧城区、排水体系相对薄弱的城郊片区,会出现大面积、长时间的地表积水滞留,排水系统原本具备的汇水、输水、泄洪核心功能被大幅削弱。极端降水具有强度大、雨区集中、持续时间长的特点,会打破城市排水系统原有的水文平衡。当前管网布局与调度模式,无法应对短时剧增的地表径流,进一步激化排水供需矛盾。管道长期高负荷运转,易出现泥沙淤积、管路堵塞等状况,输水能力持续下降,最终形成降水超标、排水不畅、路面积水、管网淤塞的连锁问题。在此情形下,城市内涝不再局限于零散点位,逐步演变为成片区域的系统性风险,灾害影响程度与波及范围显著扩大。

4 结语

综上,气候变化造成降水时空分布失衡,持续对城市排水系统形成多重冲击。排水设施先天不足、城区下垫面硬化等因素,又进一步加重了系统运行负担。不同情景模拟数据印证,现有排水体系仅能应对常态水文环境,遭遇中等气候波动便会暴露承载能力短板,极端天气下更易出现大范围运行故障,诱发成片区域内涝。结合气候演变的整体趋势,后续需针对系统薄弱处开展优化,调整管网结构与设施配置,建立弹性运行调度模式,整体强化排水系统防灾能力,夯实城市防洪排涝的安全基础。

[参考文献]

- [1]赵志文,韩天,曹玉萍.气候变化条件下城市防洪规划的风险评估与策略研究[J].水上安全,2025(3):191-193.
- [2]刘智晓,吴凡松,黄鹏.气候变化背景下排水系统韧性构建及峰值流量调控策略[J].给水排水,2025,51(8):5-13.
- [3]解铭威,陈耸,王向荣.应对气候变化下唐长安城的水环境管建[J].古建园林技术,2025(4):92-97.
- [4]刘华超,周民华,甘立建.基于气候变化情景下的片区排水防涝模型构建与分析[J].净水技术,2023,42(10):139-146.

*通讯作者:

吴雪(1988—),2015年毕业于昆明理工大学,现就职于云南开放大学,长期致力于市政工程领域的教学与科研工作。