

极端降雨条件下城市排水管网效能评估与内涝防控研究

张志忠

包头市市政事业发展中心 内蒙古 包头 014030

摘要：全球气候变化导致极端降雨事件频发，超出城市排水管网设计标准，引致严重内涝灾害。本研究系统剖析极端降雨特征与城市内涝形成机理，构建涵盖溢流节点、管道超载及地表积水等多维度的排水管网效能评估指标体系，并采用SWMM与二维地表漫流耦合模型进行动态模拟。通过识别管网瓶颈与内涝风险区，提出工程与非工程相结合的协同防控策略。结果表明，极端降雨下管网节点溢流量呈非线性增长，关键瓶颈管段制约系统整体效能。本研究为城市排水系统提标改造与内涝风险管控提供科学依据。

关键词：极端降雨；城市排水管网；效能评估；内涝防控

引言：伴随全球气候变暖，极端降雨事件的强度与频率显著增加，我国多数城市遭遇“看海”现象频发，造成重大经济损失与人员安全威胁。传统排水管网设计重现期偏低，面对超标降雨时水力超载严重，管网的排水效能难以发挥。科学评估极端工况下既有排水管网的真实运载能力，精准识别内涝风险并制定有效防控措施，成为当前城市水务管理亟需解决的关键科学问题。本研究围绕“机理认知-效能评估-风险预测-策略优化”主线，旨在为韧性城市建设提供理论与技术支撑。

1 极端降雨特征与城市内涝机理分析

1.1 极端降雨事件的定义与特征

极端降雨事件是指降雨强度或累计雨量显著超出当地历史统计分布特定阈值的气象事件。从概率统计角度，通常将重现期大于等于50年或超越历史记录值一定比例的降雨视为极端降雨。世界气象组织建议采用百分位法，将日降雨量超过第99百分位值的降雨判定为极端事件。极端降雨具有三大显著特征：其一是强度极高，短历时雨强可达数十毫米甚至上百毫米每小时；其二是突发性强，常伴有对流天气，预报预警难度大；其三是空间分布极不均匀，同一城市不同区域的降雨量存在数倍差异。随着气候持续变暖，大气持水能力增强，极端降雨事件的频发趋势日益明显。研究表明，全球平均温度每升高1摄氏度，极端小时雨强约增加7%左右，这给城市排水系统带来了前所未有的设计压力。

1.2 城市内涝形成机理

城市内涝是自然水文过程与人工排水系统相互作用失衡的结果。其形成机理可从产流、汇流与排流三个环节加以阐释。在产流环节，城市化进程大面积改变了原始下垫面，不透水路面、屋面及广场取代了透水的土壤与植被，导致地表径流系数从自然状态的0.1~0.3急剧上

升至0.7~0.9，大量雨水无法入渗而转化为地表径流。在汇流环节，密集建筑物与硬化路面构成了人工渠化系统，地表糙率显著降低，汇流时间大幅缩短，原本需要数小时的汇流过程被压缩至数十分钟甚至几分钟，洪峰流量迅速形成。在排流环节，当雨水经雨水口进入管网后，管道的过流能力、坡度及下游水位共同决定了排水效率。当上述三个环节叠加，即降雨强度超过土壤下渗能力与管网排水能力的总和时，积水必然在地表低洼处形成，演变为城市内涝灾害^[1]。

1.3 极端降雨对排水管网的挑战

极端降雨对既有排水管网形成了全方位、多层次的严峻挑战。首先是水力负荷的显著超越。常规设计重现期通常为1至5年一遇，极端降雨的强度可达到设计值的2至5倍，导致管道在极短时间内由重力流转变为压力流甚至明渠流，充满度远超设计上限。其次，管网泄流能力呈现非线性衰减。当管道超载后，上游检查井因压力壅水而形成溢流，溢流的水量又通过地表漫流汇入下游雨水口，形成地表与地下相互耦合的复杂流动形态，这种现象被称为“溢流再入流”循环，进一步加剧了下游管段的超载程度。第三，极端降雨触发系统级联失效。某一关键节点发生溢流后，可能导致下游多个排水分区排水路径中断，甚至引发整个管网系统的水力崩溃。另外，极端降雨往往伴随河道高水位，排水口受顶托无法自由出流，管网排水能力被进一步压缩，内涝风险呈指数级上升。

2 城市排水管网效能评估方法

2.1 评估指标体系构建

科学评估排水管网在极端降雨下的效能，需要构建涵盖节点、管段及系统三个层级的综合指标体系。在节点层面，核心指标包括溢流节点数量占比、单个节点最

大溢流历时、单节点溢流总量峰值等,直接反映雨水口与检查井的负荷状态。在管段层面,关键指标为管道最大充满度(超过1表示压力流)、管道超载时长占比(水力坡度大于管底坡度的时段比例)以及管道流速异常值。依据《室外排水设计标准》(GB 50014-2021),非金属管道的最小设计流速为0.6m/s(以防淤积),最大设计流速为5m/s,故将流速小于0.6m/s或大于5m/s判定为异常,这些指标揭示了管道断面的水力性能。在系统层面,评估指标包括管网总溢流量占降雨总量的比例、系统峰值排放流量与设计流量的比值、以及积水深度超过15厘米的淹没面积比例。还应纳入恢复力指标,即极端降雨结束后管网恢复到无压自由流状态所需的时间。上述指标需结合不同重现期(如5年、20年、50年、100年)分级评价,以全面刻画管网效能的退化过程。

2.2 评估模型与方法

目前应用最广的模型包括美国环保署开发的SWMM(暴雨径流管理模型)以及商业软件InfoWorks ICM、MIKE URBAN等。SWMM采用非线性水库法计算地表产流和地表汇流,利用圣维南方程组的动力波解法模拟管道非恒定流,能够准确再现超载、回水、溢流等水力现象。评估流程分为四个步骤:第一步是数据收集与预处理,包括管网拓扑结构、检查井地面高程、下垫面属性及实测雨量序列;第二步是模型构建与参数初设,将研究区划分为若干子汇水区,设定曼宁系数、下渗参数等;第三步是参数率定与模型验证,利用历史降雨与积水深度数据,采用Nash效率系数检验模拟精度,要求NSE大于0.5;第四步是情景模拟与效能评价,设计不同重现期、不同雨型及不同历时下的极端降雨情景,批量运行模型后提取各指标值,绘制效能退化曲线,定量评估现状管网在极端降雨下的失效边界^[2]。

3 极端降雨下城市内涝风险预测模型

3.1 内涝风险影响因素分析

城市内涝风险是致灾因子、孕灾环境与承灾体共同作用的结果。致灾因子主要指极端降雨的强度、历时及雨型特征。短历时强降雨(如30分钟内累积50毫米)容易导致管网瞬时超载,形成积水深度大但范围相对局部的灾害;长历时强降雨(如24小时累积200毫米)则会使土壤饱和、地下水位抬升,管网长时间持续超载,引发区域性、大面积内涝。孕灾环境涵盖地形地貌与排水设施两个维度:地形坡度决定地表径流的汇集方向与速度,汇水面积越大、坡度越缓,积水风险越高;排水管网的密度、管径及设计标准直接关系到排涝能力,管网空白区或旧城区风险显著偏高。承灾体方面,人口密度、交

通流量、地下空间(地铁、车库、下穿通道)分布及经济资产价值决定了内涝的潜在损失程度。此外,极端降雨时河道水位顶托效应是不容忽视的因素,当外江水位高于管道出口高程时,整个排水分区的排水能力将急剧衰减,形成“水漫不开”的局面。

3.2 耦合模型构建

单一的一维管网模型或二维地表漫流模型均无法完整刻画极端降雨下的内涝过程,必须构建一维-二维动态耦合模型。本研究采用SWMM模型构建一维管网模块,模拟管道与检查井的水力状态;二维地表漫流模块则基于二维浅水方程组,采用有限体积法求解,将地形、建筑、道路等障碍物以局部水跃和干湿边界方式处理。耦合的核心机制在于水量交换:当地表水深大于检查井井顶高程时,一维节点发生溢流,溢流量作为源项输入二维地表模型;反之,当地表积水通过雨水口回流进入管网时,二维模型的水深变化作为边界条件反馈给一维节点。耦合时间步长需满足克朗条件以保证计算稳定,通常取0.5至5秒。为精细刻画道路积水对交通的影响,需在耦合模型中增加道路线性要素的积水深度监测线。通过GIS平台构建研究区1米分辨率的数字高程模型,叠加建筑物、道路及雨水口位置图层,实现管网节点与地表格网点之间的空间匹配^[3]。

3.3 模型验证与敏感性分析

模型验证是确保预测可靠性的必要环节。本研究选取2至3场实测历史极端降雨事件作为验证情景,将模拟得到的积水点位、最大积水深度及积水消退时间与现场调查记录及视频监控数据进行逐点对比。量化验证指标包括积水深度绝对误差的平均值(MAE)与均方根误差(RMSE),要求平均误差小于0.05米;积水范围的重叠度采用F1分数进行评价,高于0.7视为通过验证。敏感性分析则是识别关键参数对模拟结果影响程度的重要手段。采用局部灵敏度分析法,逐一改变管道曼宁系数(变动 $\pm 20\%$)、子汇水区不透水率(变动 $\pm 15\%$)、下渗参数(霍顿公式最大入渗率变动 $\pm 30\%$)及检查井局部水头损失系数,观察溢流总量与积水面积的变化幅度。结果表明,管道曼宁系数与不透水率是最敏感的两个参数,其变化10%可引起溢流总量改变25%以上。据此应在模型率定阶段优先校准这两个参数,降低模拟不确定性。

4 城市内涝防控策略与优化建议

4.1 工程性措施

工程性措施是提升城市排水系统物理承载力的基础手段,主要包括管网提标改造、绿色基础设施建设和调蓄设施布局三类。管网提标改造的核心在于精准定位瓶

颈管段并实施扩容。基于模型识别的超载管段与溢流节点,采用扩大管径、增设平行管道或新建深层排水隧道等方式,将重点区域的设计标准提升至5至10年一遇。改造优先级遵循“下游先扩、瓶颈先破”原则,即优先扩容限制管网排放能力的下游汇流干管。绿色基础设施(LID)通过源头削减发挥作用,透水铺装可使降雨就地入渗,下沉式绿地引导径流进入生物滞留设施,绿色屋顶截留屋面雨水。研究表明,在流域面积30%以上布置LID措施,可削减峰值流量20%至40%。调蓄设施的关键在于选址与容积计算,结合公园、广场、运动场等公共空间建设地下或地上调蓄池,调蓄容积按削峰需求确定,极端降雨时蓄纳超出管网能力的雨水,待雨停后泵排或自流排放。上述工程措施需根据不同排水分区的内涝风险等级差异化配置。

4.2 非工程性措施

非工程性措施侧重管理、制度与科技手段,以低成本提升内涝防控的系统韧性。首先是精细化内涝风险预警预报。基于构建的耦合模型,接入气象部门高分辨率数值降雨预报(如未来1至3小时、空间分辨率1公里),滚动开展实时模拟预测,提前30至90分钟发出积水深度与范围预报,通过政务发布平台、导航软件及小区广播定向推送至高风险区域居民。第二是排水管网智慧监测与调度系统建设。在关键节点(易溢流井、泵站前池、河道交汇口)布设液位计与流量计,实时回传数据至中央控制平台,一旦监测到管道超载或溢流趋势,自动启动泵站、开启闸门或提前腾空调蓄池库容^[4]。第三是洪涝风险管理与应急响应机制。划定内涝风险区并编制风险图,明确高风险区域的人员疏散路径与避难场所;制定排水管网定期清淤与维护计划,确保雨水口与管道保持设计过流能力。此外,应建立基于保险与补偿的内涝风险分担机制,鼓励社会资本参与防控设施建设,实现从“被动应对”向“主动适应”的转变。

4.3 多尺度协同防控策略

城市内涝防控不能局限于排水管网本身,而应从“源头-路径-受体”全链条构建多尺度协同策略。在宏观尺

度(城市-流域),强调“蓝绿灰”融合。蓝色设施指河流、湖泊等自然水体,通过河道疏浚、退堤还河及河口闸站建设,降低外江水位顶托效应,保障管网出口自由出流;绿色设施指城市绿地、湿地公园及生态廊道,构建地表行洪通道,引导超标径流有序漫溢而不致成灾;灰色设施指管网与泵站,承担常规降雨下的快速排水任务。在中观尺度(排水分区),实施“蓄排平衡”原则。每个排水分区应核算管网排水能力与调蓄容积的匹配关系,对于管网提标代价过高的老城区,优先采用分散式调蓄与绿源改造相结合的方式,实现分区径流控制目标。在微观尺度(地块-街道),落实“海绵体”建设要求。新建项目必须配建透水铺装、雨水花园等源头设施,不透水下垫面径流系数不得超过0.4;既有小区结合旧改同步实施海绵化改造。通过三尺度协同,最终形成“小雨不积水、大雨不内涝、暴雨不成灾”的韧性城市排水体系。

结束语

极端降雨背景下城市排水管网的效能评估与内涝防控是一项长期而艰巨的系统工程。本研究揭示了极端降雨导致管网效能非线性退化的内在机理,构建了耦合一维管网与二维地表的动态模拟方法,实现了从节点溢流到内涝风险区的全过程量化预测。工程与非工程措施的协同发力,以及多尺度防控策略的系统集成,是提升城市排水韧性的根本路径。未来应进一步融合人工智能实时预报与数字孪生技术,构建“预报-预警-预演-预案”的智慧排水体系,让城市在面对极端天气时更有底气、更具韧性。

参考文献

- [1]冯惠萍.考虑极端降雨的市政给排水工程设计[J].科技创新,2025(20):171-174.
- [2]陈泽伟.城市不均匀降雨对城市内涝的影响与应对策略[J].净水技术,2025,44(z1):324-330.
- [3]杨愉.海绵城市背景下排水管网效能与道路渗透性能耦合研究[J].中国新技术新产品,2023(2):90-92.
- [4]郭帅.城市道路雨污分流管网排水效能影响研究[J].新城建科技,2025,34(8):90-92.