

城市内涝防治中雨水径流调控与排水系统优化研究

邹成新

江西吉干发建设工程有限公司 江西吉安 331300

摘要: 本文系统研究了城市内涝防治中雨水径流调控与排水系统优化的协同策略。研究首先阐述了城市雨水径流的形成过程与影响因素,并构建了涵盖源头减排、过程控制与末端治理的全流程调控体系,强调了低影响开发(LID)技术的核心理念。在此基础上,文章深入剖析了排水系统在管网布局、关键节点设计及超标雨水处置方面的优化关键环节。进而,提出了构建“源头-管网-河道”一体化调控体系、实现灰色与绿色基础设施协同增效以及建立基于动态监测的智能调度机制三大协同策略。该研究旨在通过源头分散减排、过程精准控制与末端高效排泄的有机结合,结合智能化管理手段,构建一个适应性强、高效低碳的城市内涝综合防治体系,以提升城市应对暴雨灾害的能力。

关键词: 城市内涝; 雨水径流; 排水系统优化

引言

随着全球气候变化和城市化进程的加速,城市内涝已成为威胁城市安全运行的严峻挑战。传统的以“快速排放”为导向的排水系统已难以应对日益频发的极端降雨事件。因此,转变治水思路,将雨水径流的源头调控与排水系统的系统性优化相结合,构建“源头减排、过程控制、末端治理”的全流程防治体系,已成为现代城市韧性建设的必然要求。深入研究雨水径流调控与排水系统优化的协同机制,对于科学指导城市内涝防治工作、保障城市水安全具有重要的理论价值与现实紧迫性。

一、城市雨水径流调控的理论与方法

(一) 雨水径流的形成过程与影响因素

城市雨水径流的形成遵循“降水-截留-下渗-汇流”的水文过程:降水落到地面后,首先经植被、建筑物屋顶截留(如乔木截留量约20%-30%),剩余雨水部分下渗至土壤(下渗量取决于土壤渗透率,沙土渗透率远高于黏土),未下渗的雨水形成地表径流,沿地形坡度汇流入排水管网或自然水体。影响径流形成的核心因素包括三类:一是不透水面率,城市道路、建筑占地等不透水面无法下渗雨水,直接转化为径流,不透水面率每提升10%,径流系数(径流总量与降雨量的比值)可增加0.15-0.2;二是地形条件,坡度较大的区域(如坡度>5%)径流汇流速度快,易形成短时间高水位径流,加剧管网冲击;三是植被覆盖,绿地、公园等区域的植被

可通过截留与根系促进下渗,植被覆盖率每提升20%,径流总量可削减15%-20%。这些因素相互作用,共同决定城市雨水径流的总量与峰值特征。

(二) 源头减排、过程控制与末端治理的调控体系

雨水径流调控需构建“源头-过程-末端”全流程体系,各环节分工明确又相互衔接。源头减排聚焦“减少径流生成”,通过分散式设施在雨水产生源头进行管控,常见设施包括生物滞留设施(如城市绿地上的下沉式绿地,可截留雨水并促进下渗,闫文博的研究表明其可削减30%-50%的径流总量)、渗透铺装(如多孔沥青路面,孔隙率约15%-25%,雨水可通过孔隙下渗至地下)、绿色屋顶(屋顶种植植被,截留部分雨水并延缓汇流时间),这类设施可直接减少进入后续环节的径流总量,降低排水系统压力。过程控制侧重“延缓径流汇流”,通过线性设施减缓径流速度、降低峰值流量,如道路两侧的植草沟(利用植被与土壤过滤雨水,同时延长汇流路径)、渗透沟(沟内填充碎石,雨水下渗的同时减缓流速),可使径流峰值出现时间延迟15-30分钟,避免短时间内大量径流集中涌入管网。末端治理则针对“超标雨水承接”,通过调蓄设施(如人工湿地、调蓄池)储存无法通过前两环节消纳的超标雨水,待暴雨后再通过泵站抽排至河道,避免雨水直接漫溢至路面形成内涝^[1]。

(三) 低影响开发(LID)技术的核心理念

低影响开发(LID)技术的核心是“模仿自然水文循环”,通过小型、分散的设施减少人类活动对城市水

文过程的干扰,实现“雨水就地消纳、水文过程接近自然”的目标。其理念包含三个关键维度:一是“分散式布局”,LID设施不依赖集中式大型工程,而是嵌入城市日常空间(如小区绿地、道路绿化带、屋顶),例如在住宅小区的绿化带中设置生物滞留设施,无需额外占用土地,即可实现雨水调控;二是“多功能融合”,LID设施除调控径流外,还兼具生态与景观功能,如渗透铺装路面可减少径流,同时提升路面透气性、降低热岛效应,下沉式绿地可消纳雨水,同时为居民提供休闲空间;三是“全周期调控”,LID技术不仅关注暴雨时的径流削减,还注重雨水资源的回收利用,如通过绿色屋顶收集的雨水可用于灌溉绿地、冲洗路面,实现“调控-利用”一体化,契合城市可持续发展需求。

二、城市排水系统优化的关键环节

(一) 排水管网的布局优化与能力提升

排水管网是城市雨水输送的核心载体,其优化需兼顾“布局合理性”与“能力适配性”。布局优化方面,需结合城市地形与用地规划调整管网走向,避免传统枝状管网“单点故障影响全域”的缺陷——例如在平坦区域采用环状管网布局,通过多路径输水提升可靠性,某城市商业区将枝状管网改造为环状后,管网故障导致的积水频次减少70%;在地形起伏区域,沿地势坡度设计“分区排水”管网,避免低地势区域因上游来水过多导致积水。能力提升需针对管网短板精准施策:对老化管网(如使用超50年的混凝土管),采用内衬修复(如HDPE内衬管,修复后管网过流能力提升20%–30%)或管径扩容(如将DN600管更换为DN800管),西安市老城区改造中,对20公里老化管网进行修复与扩容,洪伟等的研究显示,改造后区域管网输水能力提升40%,内涝频次减少60%;同时,需根据区域径流系数调整管网设计流量,如商业区不透水面率高、径流系数大(约0.7–0.8),管网设计流量需相应提高,避免“小马拉大车”导致管网超载^[2]。

(二) 排水系统关键节点的优化设计

排水系统的关键节点(泵站、检查井、雨水口)是保障系统稳定运行的核心,其优化需聚焦“防堵塞、防倒灌、提效率”。排水泵站优化需实现“流量与扬程匹配”,根据服务区域的汇流面积与峰值流量确定泵站机组数量与参数,避免“机组过大耗能高、机组过小排不及”,某城市工业区泵站通过优化机组运行策略(暴雨时开启3台机组,平峰时开启1台),既保障排涝需求,又

降低30%的能耗。检查井优化需解决“防倒灌、防堵塞”问题,在检查井内设置单向阀,暴雨时管网内水位过高时自动关闭,防止雨水倒灌至路面;同时在井口设置截污挂篮,拦截垃圾、落叶等杂物,减少管网堵塞风险(堵塞是导致管网过流能力下降的主要原因之一,堵塞率每降低10%,过流能力可提升8%–10%)。雨水口优化需提升“集水效率”,根据道路坡度调整雨水口间距(坡度>3%时间距缩短至20米,坡度<1%时间距延长至40米),同时采用“双篦雨水口”替代传统单篦雨水口,集水面积提升50%,避免路面雨水无法及时汇入管网形成积水。

(三) 超标雨水的行泄通道与调蓄设施优化

面对超标暴雨(如50年一遇、100年一遇降雨),仅靠排水管网无法完全应对,需通过行泄通道与调蓄设施承接超标雨水。行泄通道优化需“因地制宜利用现有空间”,优先选择城市河道、绿道、人行道等作为临时行泄通道——例如某城市将滨河绿道改造为超标雨水行泄通道,通过硬化路面、拓宽断面(宽度从5米增至8米),设计流量达 $15\text{m}^3/\text{s}$,可承接管网无法输送的超标雨水,避免雨水漫溢至核心商业区;同时,需在通道两侧设置防护栏杆与警示标识,保障行人安全。调蓄设施优化需“地上地下结合”,地下调蓄设施适合用地紧张的城区,如在地下停车场、广场下方建设调蓄池(容积多为 $5000\text{--}10000\text{m}^3$),暴雨时储存雨水,雨后通过泵站抽排至河道,某城市中心广场地下调蓄池投入使用后,周边区域内涝积水时间从4小时缩短至1小时;地表调蓄设施则结合生态景观建设,如人工湖、湿地公园,利用景观水体调蓄雨水,同时提升城市生态品质,某城市湿地公园调蓄容积达 $20\text{万}\text{m}^3$,可消纳周边5平方公里区域的超标雨水^[3]。

三、雨水径流调控与排水系统优化的协同策略

(一) 构建“源头-管网-河道”一体化的调控体系

雨水径流调控与排水系统的协同,首要在于构建“源头减排-管网输送-河道排泄”的一体化体系,实现各环节无缝衔接。源头减排设施需与管网设计匹配,例如生物滞留设施、渗透铺装的下渗量需纳入管网进水流量计算,避免因源头设施未发挥作用导致管网超负荷——某城市在小区建设中,同步设计绿色屋顶与DN500管网,绿色屋顶削减25%的屋面径流后,管网实际进水流量低于设计值,运行更稳定。管网系统需与河道行洪能力协同,根据河道多年平均行洪流量调整管

网出口设计,避免管网排水超过河道承载能力导致河水倒灌;同时,在管网出口设置闸门,暴雨时根据河道水位调控排水时机,水位低时快速排水,水位高时暂时储存于管网或调蓄设施。河道则需作为末端调蓄载体,通过清淤疏浚(如清除河道淤泥0.5-1米,提升行洪能力30%-40%)、拓宽断面,承接管网与调蓄设施排出的雨水,形成“源头减、管网输、河道排”的闭环调控。

(二) 实现灰色基础设施与绿色设施的协同增效

灰色基础设施(排水管网、泵站、调蓄池)与绿色设施(LID设施)并非替代关系,而是需协同发挥作用,兼顾“常规降雨应对”与“超标降雨防控”。常规降雨(如中小雨,降雨量 $< 20\text{mm/h}$)时,绿色设施作为主力,通过生物滞留、渗透铺装等消纳大部分雨水,仅少量径流进入灰色设施,减少管网运行负荷;例如某城市道路两侧设置植草沟,常规降雨时植草沟可消纳80%的路面雨水,管网仅需处理剩余20%径流,大幅降低堵塞风险。超标降雨(如暴雨,降雨量 $> 50\text{mm/h}$)时,灰色设施承担核心作用,管网满负荷输送雨水,调蓄池储存超标部分,同时绿色设施仍可通过截留与下渗辅助削减径流——周玉文等的研究表明,灰绿设施协同使用时,内涝风险可降低50%-70%,远高于单一设施的效果。此外,绿色设施还可提升灰色设施寿命,如渗透铺装减少雨水对管网的冲击,生物滞留设施过滤雨水杂质,降低管网堵塞与腐蚀概率,延长管网使用寿命5-10年^[4]。

(三) 建立基于动态监测的智能调度机制

智能调度是提升雨水径流调控与排水系统协同效率的关键,需依托监测数据实现“实时响应、精准调控”。首先构建物联网监测网络,在城市关键位置布设三类监测设备:雨量计(实时监测降雨量、降雨强度,数据采样间隔5-10分钟)、管网水位计(安装于管网关键节点,监测管内水位变化,判断是否超载)、河道水位计(监测河道实时水位,掌握行洪能力),所有数据实时传输至城市排水调度平台。其次制定动态调度规则,平台根据监测数据自动调整设施运行状态:当降雨量 $< 20\text{mm/h}$ 时,仅开启绿色设施,关闭部分管网泵站,降低能耗;当降雨量 $20-50\text{mm/h}$ 时,开启全部管网泵站,同时启动地表调蓄设施(如人工湖)进水;当降雨量 $> 50\text{mm/h}$ 时,开启地下调蓄池与超标雨水行泄通道,泵站满负荷运行,

待降雨量降低、河道水位下降后,再逐步排空调蓄设施。某城市通过智能调度,不仅使排水设施利用效率提升30%,还减少25%的能源消耗,实现“高效排涝”与“低碳运行”的双重目标^[5]。

结语

城市内涝防治是一项复杂的系统工程,雨水径流调控与排水系统优化作为核心环节,其协同作用直接关系到城市应对暴雨灾害的能力。从雨水径流的形成机制与调控体系出发,系统分析了源头减排、过程控制与末端治理的全流程策略,揭示了低影响开发(LID)技术通过“分散式布局、多功能融合、全周期调控”实现自然水文循环模仿的关键路径;同时聚焦排水系统优化,提出排水管网布局与能力提升、关键节点防堵塞与提效率设计、超标雨水行泄通道与调蓄设施优化等具体措施,为构建“源头-管网-河道”一体化调控体系提供了技术支撑。进一步研究发现,灰色基础设施与绿色设施的协同增效可显著降低内涝风险,而基于动态监测的智能调度机制则通过实时数据驱动设施精准运行,实现了排水效率与能源消耗的平衡。未来研究需深化多要素耦合模型开发,结合气候变化与城市化进程动态调整调控策略,同时加强公众参与与政策引导,推动内涝防治从技术优化向社会共治转型,最终构建适应性强、可持续的城市水安全体系。

参考文献

- [1] 莫俊锋.城市超标雨水径流蓄排控制系统规划设计方法与案例研究[D].北京建筑大学,2020.
- [2] 闫文博.生物滞留设施雨水径流调控影响因素研究[D].河北工程大学,2020.
- [3] 周玉文, 姜富豪, 刘子龙, 等.城市内涝风险分析模型系统开发与应用[J].2022(1).
- [4] 廖佳卉, 周安娜, 裘鸿菲.城市绿地雨洪调蓄能力研究综述[J].华中建筑,2020,38(8):5.
- [5] 洪伟, 高徐军, 杜颖恩, 等.西安市老城区海绵改造对雨水径流削减效益模拟研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(5):70-77.DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.05.10.