

城市道路排水系统应对降雨的能力阈值及提升策略研究

卢兴超^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 施奇妙^{1,2}, 李永坤^{2,3}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要: 针对我国城市道路排水系统应对降雨时存在的排水路径不明、系统分工不清、实施效率不高等问题, 解析了城市道路排水系统应对各阶段降雨时的控制机理和径流排放路径, 给出了北京市城市道路排水系统应对降雨的“防湿鞋”“防积水”“防内涝”能力阈值, 并结合监测预警系统和应急抢险措施, 提出了“防失控”能力建设措施。从系统的顶层规划设计、综合排水能力、应急管理能力的3个层面, 提出了城市道路排水系统的提升策略。

关键词: 城市道路排水系统; 能力阈值; 监测预警; 建设策略

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)02-0046-08

Research on capacity threshold and its improvement strategies for urban road drainage systems in response to rainfall // LU Xingchao^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, SHI Qimiao^{1,2}, LI Yongkun^{2,3} (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: In response to issues such as ambiguous drainage paths, unclear system division of responsibilities, and low implementation efficiency in urban road drainage systems when handling rainfall in China, the operational mechanisms of the urban road drainage system, as well as the discharge pathways of runoff, were thoroughly analyzed. The capacity thresholds for Beijing's urban road drainage system to manage rainfall in terms of *preventing wet shoes*, *preventing waterlogging*, and *preventing flooding*, are established. In conjunction with the monitoring and early warning systems, as well as emergency rescue measures, construction guidelines for enhancing the system's *out-of-control prevention* capacity are proposed. Improvement strategies for urban road drainage systems are proposed from three perspectives: top-level planning and design of the system, enhancement of comprehensive drainage capacity, and construction of emergency management.

Key words: urban road drainage system; capacity threshold; monitoring and early warning; construction strategies

在气候变化和快速城镇化的共同作用下, 城市“雨岛效应”和“热岛效应”显著增强, 城市洪涝灾害频次增多、灾害损失增大, 给城市防灾减灾工作带来了新的挑战^[1-5]。城市道路作为社会经济发展的重要生命线, 在暴雨洪涝灾害过程中常常出现低洼路段、下凹桥区、下穿隧道等位置^[6-8]受淹问题, 造成行人伤亡和车辆被淹, 如北京“7·21”特大暴雨事件引发下凹桥区受淹^[9], 郑州“7·20”突发暴雨事件引发京广快速路隧道雨水倒灌^[10], 北京“23·7”极端降雨事件引发道路交通受阻^[11-12]。由此可见, 从

“城市看海”到“城市看江”, 城市洪涝灾害已成为城市发展之殇。

城市道路除了具有地上行车和地下排水功能之外, 也具有行洪排涝功能, 这是城市排涝除险设施中必不可少的组成部分^[13]。近年来, 国内学者从理论分析、工程设计、模型模拟等角度对城市道路排水系统开展了较为深入的研究。例如: 周玉文^[14]提出了将城市排水防涝工程系统划分为5个单项工程体系架构的设想, 探讨了各个单项工程的组成、承担任务和相互衔接关系; 车伍等^[15]认为大排水系统是一套

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52239003)

作者简介: 卢兴超(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事城市洪涝灾害防治研究。E-mail: xclu@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 徐宗学(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

应对超标降雨或极端暴雨的蓄排系统,主要体现在道路、明渠等漫流通道;李贞子等^[16]借用古代城镇道路的排水特点,建议将城镇道路作为径流排放的重要通道;徐连军等^[17]以上海市为例将道路纳入城市陆域防涝系统的重要组成部分;李俊奇等^[18]提出了将城市道路用于大排水系统中的规划设计方法。

虽然上述学者取得了较为丰硕的研究成果,但在实际场景中城市道路排水系统在应对降雨时,存在排水路径不明、系统分工不清、实施效率不高等,导致其排水、排涝和除险方面对应的能力阈值也存在模糊与混淆。如何充分发挥城市道路排水系统的效能,既实现蓄水排水功能又不积涝成灾,已成为一个新的课题。因此,本文力图厘清城市道路排水系统各组成部分的功能和控制雨水的机理,并以北京市为例,辨析城市道路排水系统应对不同降雨条件的能力阈值,同时,提出城市道路排水系统建设的提升策略,以期在城市排水防涝规划提供技术支撑。

1 城市道路排水系统构建

1.1 道路排水系统组成

与传统的城市排水系统末端治理理念相比,我国于2013年提出的海绵城市建设理念,将源头减排、过程控制、系统治理思路融入可持续城市排水系统中,历经10a的全国性试点城市和示范城市建设与推广,已形成具有我国特色的海绵城市建设模式^[19]。2021年3月,住建部与国家发展改革委联合制定了《城市内涝治理系统化实施方案编制大纲》,提出城市层面系统治理内涝措施包括海绵型道路、道路竖向优化、排水管渠以及道路行泄通道等建设。完善的城市道路排水系统除了具有源头减排设施、排水管渠系统外,还应考虑道路行泄功能^[20],如图1所示。其中源头减排设施也被称为低影响开发设施,包括雨水花园、下凹绿地、植草沟、透水铺装、渗井、渗管等设施;排水管渠系统由雨水口、检查井、排水(雨水)管渠、排水口以及相关附属设施组成;道路行泄系统指在超标降雨条件下雨水沿着道路路

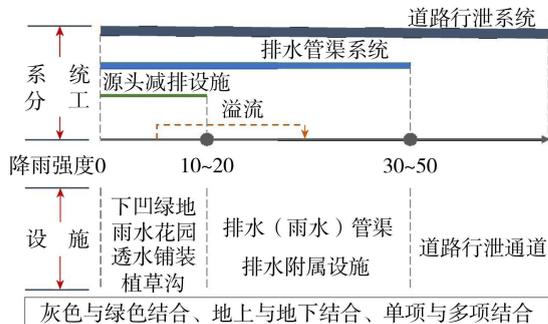


图1 城市道路排水系统组成(单位:mm/h)

面行泄排放,其能力大小受道路的纵坡与断面形式影响。

1.2 道路雨水径流控制

《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(以下简称“《指南》”)要求道路边缘设置路缘石豁口,确保雨水优先进入邻近的下凹式绿地中就地消纳。城市道路排水系统雨水排放路径可概化为:降雨开始后,机动车道路雨水经截留、填洼后优先排入生物滞留设施、雨水花园、植草沟等绿地中,透水型非机动车道和透水型人行道上的雨水就地下渗;随着降水量的增大,非机动车道和人行道上外排雨水也排入下凹绿地中,当下凹绿地系统的渗透和调蓄能力逐渐达到饱和状态时,雨水经下凹绿地中的溢流口排入道路雨水管网系统中;当降雨峰值来临时,道路雨水管道满管流运行,超出道路雨水管网能力的超标雨水直接沿着道路纵向坡度排出,最终排入城市河湖水系。径流路径示意图见图2所示。

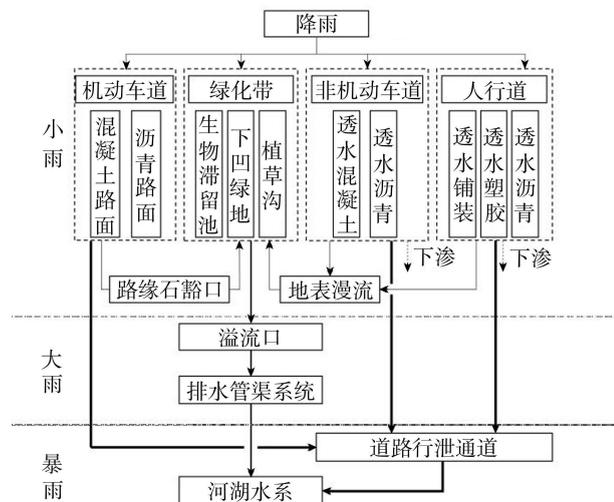


图2 城市道路排水系统径流路径示意图

2 城市道路排水系统应对降雨能力阈值

2.1 应对降雨能力阈值分析

城市道路排水系统中源头减排设施(低影响开发设施)、排水管渠系统、道路行泄通道等各个子系统都有自己的职责,但相互之间协同完成对雨水的控制利用。中小雨时,道路中透水型非机动车道、中间及两旁的下凹式绿化带,对雨水进行滞留、下渗、蓄存,实现消纳目标,此过程控制雨量对应的降雨重现期约0.5~1年一遇,对应年径流总量控制率不低于60%;大雨时,在海绵设施充分发挥其消纳能力后,多余的雨水径流经溢流口排入地下雨水管渠系统,该系统应对降雨重现期为3~5年一遇,个别低洼或下凹路段达到10~30年一遇,且满足当地排水管网设计标准要求,此时对应的径流总量控制率已

达到全年的 95% 以上,所以在源头减排设施和排水管渠系统的共同作用下,大部分场次降雨安全排放;暴雨时,降雨强度和总量超过了雨水管渠系统的输送和储存能力,超标雨水径流通过道路坡度排放,以降低道路内涝致灾的可能性,此时对应的降雨重现期约 20~50 年一遇,个别特大城市重要路段达到 100 年一遇。城市道路排水系统中的 3 个子系统各司其职,相互叠加形成累加效应,当降雨达到特大或极端暴雨灾害时,单靠城市道路排水系统本身无法实现排涝除险,需要依靠预报预警系统和应急救援措施,防止城市道路失控、失防造成生命和财产损失。

2.2 “防湿鞋”能力阈值

“防湿鞋”能力阈值是指城市道路排水系统中低影响开发设施所能消纳自身和周边雨水,且不造成人行道路积水的能力阈值。雨水径流控制对减少径流外排量和削减污染物排放量具有双重作用^[21]。雨水径流控制最早在美国低影响开发技术中提出,2009 年 12 月,美国环保署发布了《联邦项目执行 EISA438 条文的雨水径流减排技术导则》^[22],给出了 95% 年降雨场次的径流控制方法,转化为 24 h 累计降水量在 25~45 mm 不等。年径流总量控制率作为海绵城市建设的重要考核指标,其目标是实现开发建设后的径流量接近开发前的径流量。《指南》根据对全国 200 个城市的降水量统计,归纳出降水量对应的年径流总量控制率,并将大陆地区划分为 5 个区,其中年径流总量控制率最低不小于 60%,最高不大于 90%。在海绵设施的作用下,中小雨时城市道路系统中的雨水径流得到了就地消纳,如图 3 所示。

北京市年径流总量控制率处于 III 区(75%~85%),考虑道路系统的绿化率较低,道路系统年径流总量控制率为 50%~70%,对应降水量为 9.3~19.0 mm,若按照 GB/T 28592—2012《降水量等级》

中 24 h 降水量等级,城市道路海绵设施控制的降雨等级达到小雨和中雨级别;若按照 12 h 降水量等级,城市道路海绵设施控制降雨等级的上限可达到大雨级别。有学者通过容积法、数学模型法对北京市城市道路及周边开放空间的雨水控制能力进行了评估,年径流总量控制率最高达到 85%,对应降雨重现期在 0.5~1 年一遇的 1 h 降水量^[23]。除了市政道路,对于公园道路及周边场地空间,通过采取下凹绿地、植草沟、生态调蓄塘等低影响开发设施,将道路雨水径流进行就地消纳^[24]。

2.3 “防积水”能力阈值

“防积水”能力阈值是指城市道路在雨水管渠满管流运行下,将道路雨水径流进行收集、储存和排放,实现道路不积水的能力阈值。GB 50014《室外排水设计标准》规定:“雨水管渠设计流量应根据雨水管渠设计重现期确定,雨水管渠设计重现期大小根据城市规模和城市区域不同也有所差异”。北京在“7·21”暴雨事件后,全面提升城市排水管网能力,颁布 DB11/T 969—2016《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》,根据暴雨特征将北京市划分为 I 区和 II 区,其中 I 区为偏远乡镇地区,II 区包含中心城区、副中心及其他重要区域,并给出对应的设计暴雨强度公式,要求一般道路雨水管网设计重现期为 3 年一遇,重要道路为 5 年一遇。在充分发挥海绵设施和雨水管渠系统能力的情况下,城市道路保持无积水状态,如图 4 所示。马洪涛等^[25]采用数学模型方法对北京市雨水系统排水能力进行了评估,结果表明,中心城区的重要区域路段排水能力达到 3~5 年一遇的管道长度占 90% 以上,而偏远地区的部分路段 1~3 年一遇的管道长度占 70%,需要改造 20% 左右的管道长度以满足排水要求。

参照《北京市城市重要基础设施及建筑物内涝防护技术要点(暂行)》,道路雨水管渠排水能力阈值:I 区一般道路应对降雨强度为 30.3 mm/h、重要

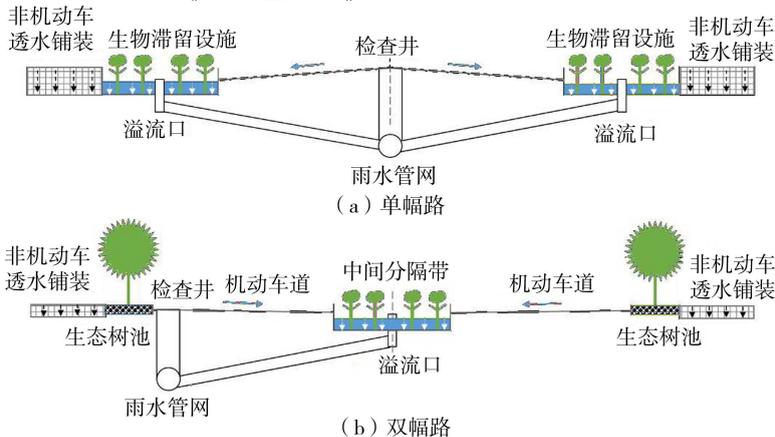


图 3 城市道路“防湿鞋”雨水控制示意图

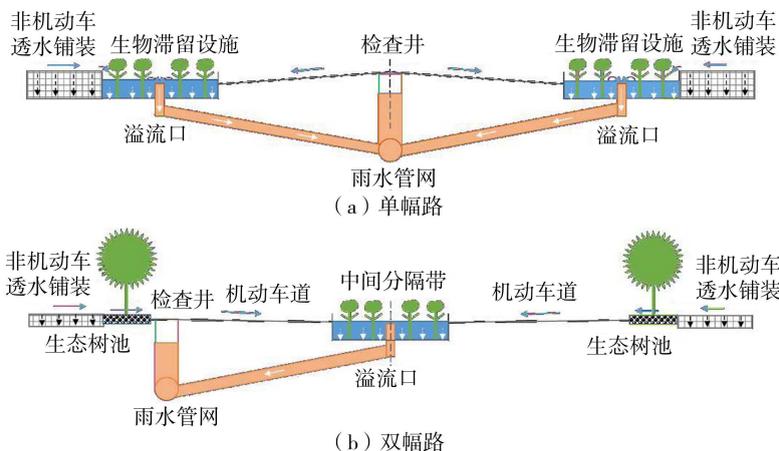


图4 城市道路“防积水”雨水控制示意图

道路 47.0 mm/h; II 区一般道路应对降雨强度为 47.0 mm/h、重要道路 54.3 mm/h。根据《北京市城市积水内涝防治及溢流污染控制实施方案(2021 年—2025 年)》,到 2025 年,实现首都功能核心区和中心城区重点道路以及城市副中心重点道路达到小时降雨 65 mm 不发生积水,中心城区其他道路及新城重点道路达到小时降雨 54 mm 不发生积水的目标。在道路源头减排设施和城市排水系统的共同作用下,一场大雨或者暴雨产生的降水量,经源头减排设施消纳 19.0 mm,雨水管渠系统输送 47.0 mm,累计消纳 66.0 mm,可以满足大雨甚至暴雨要求,保证地面不积水,降低洪涝灾害风险。

2.4 “防内涝”能力阈值

“防内涝”能力阈值是指在城市内涝防治设计重现期下道路中一条车道的积水深度不超过 15 cm 的能力阈值。行泄道路作为城市大排水系统的一种,设计降雨重现期达到 20~50 年一遇,个别特大城市达到 100 年一遇。GB 50014—2006《室外排水设计规范(2011 年版)》首次提出城市内涝概念,但没有给出统一的内涝控制标准,个别城市借鉴国外经验设定了适用于本市的内涝控制标准,如上海市规定市政道路内涝标准为道路路边的积水深度大于

等于 15 cm 或道路中心积水时间大于等于 1 h,积水范围大于等于 50 m²。潘安君等^[26]利用数学模型分析了不同重现期和历时的设计暴雨情景下道路积水临界阈值。GB 50014—2006《室外排水设计规范(2014 年版)》明确规定:“内涝防治设计重现期下,道路中一条车道的积水深度不超过 15 cm”。GB 50014—2021《室外排水设计标准》对内涝防治设计标准也采用相同要求。在城市道路自身坡度作用下,超标雨水径流水深进行有效排放,且实现道路不内涝目标,如图 5 所示。

目前北京市城市道路内涝防治标准为 20~50 年一遇,中心城区、城市副中心的重要或特别重要地区的防涝标准达到百年一遇。根据北京市 DB11/T 969—2016《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》,可采用两种方式推求降雨过程,其中采用暴雨强度公式计算推求的内涝防治能力阈值:一般地区为 268.6 mm/d 或 86.9 mm/h,重要地区为 299.0 mm/d 或 96.7 mm/h。此时,内涝防治能力阈值对应的降水量使低影响开发设施已远超其自身承载能力,雨水管渠系统和调蓄设施处于超负荷运行状态,但需保证城市道路中一条车道的积水深度不超过 15 cm,依靠城市道路自身的坡度对雨水径流进

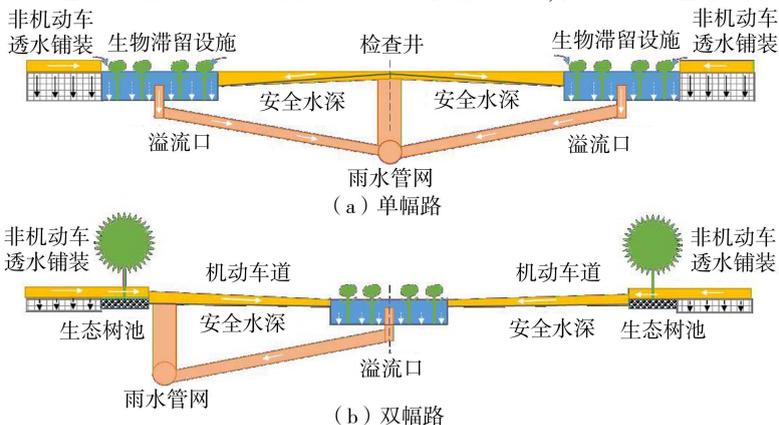


图5 城市道路“防内涝”雨水控制示意图

行行泄排放^[27]。针对北京市城市道路内涝点位,除了采用灰绿调蓄设施外,刘子龙^[28]利用数学模型模拟了调整城市道路坡度、设置行泄通道后,道路内涝防治标准满足规划要求。

2.5 “防失控”能力建设

“防失控”能力措施是指为防止极端降雨条件下城市道路失防、失控造成的车辆淹没和人员伤亡,所采取的有力措施。对于下凹路面、下穿隧道等特殊道路,快速积水过程易造成人、车受难以脱险,如郑州“7·20”特大暴雨灾害事件造成京广快速路北隧道倒灌,发生亡人事件时,最大小时降水量为201.9 mm,最大日降水量为624.1 mm,此时已出现道路失控问题。采用线性插值法可以计算得到郑州市主城区的“不失防”阈值为131 mm/h^[29]。2023年7月28日至8月1日,受2305号台风“杜苏芮”影响,华北地区遭遇了历史罕见的连续强降雨事件,其中北京门头沟区是本次事件受灾严重区域之一,全区累计平均降水量远超2012年“7·21”特大暴雨事件水平,达到471.1 mm^[30]。门头沟区中门寺大街南路道路监控视频显示,7月31日上午10:35至10:55,短短20 min时间,该道路由轻度积水演变为严重内涝,再发展成失控局面,如图6所示。



(a) 10:35 (积水)



(b) 10:44 (内涝)



(c) 10:55 (成灾)

图6 北京门头沟区中门寺大街南路7月31日监控道路积水变化情况

提高灾害监测预警的精准度、提升灾害应急抢险能力,是防止暴雨洪涝灾害失控、失防的重要措施。①利用水文数据监测、数值模拟计算手段对道路洪涝灾害等级进行预判,通过雨量站、水文站、气象监测站构建水情监测防线,形成具备立体化、协同化、数据化的水文感知网络,为城市洪涝快速预报模型提供实时、连续、精准的水文监测数据。②通过加强灾害应急抢险救援的演练工作,提高受灾人员紧急抢险能力。当暴雨致使道路快速受淹时,及时疏散被困车辆和行人,设置障碍物,建立危险封控区,阻止其他车辆和人员进入,对于低洼路段采用龙吸水、快排车、强排泵等方式,将涝水及时排出。

3 城市道路排水系统提升建设策略

3.1 做好系统顶层规划设计

城市道路排水系统建设是一项系统工程,从顶层规划设计出发对雨水径流路径进行系统化布局^[31],充分发挥海绵城市建设功能,对超标雨水径流进行有序防控。根据《北京城市总体规划(2016年—2035年)》要求,提高城市防洪防涝能力建设,加强海绵设施建设,加大雨水就地消纳和利用比重,到2035年80%以上城市建成区实现70%降雨的消纳和利用。《北京市中心城防洪防涝系统规划》指出,确定超过城市管网设计标准的雨水径流量的地表路径,合理布设行车通道,其中包括城市道路的纵坡、宽度和衔接要求。由此可以看出北京市城市道路排水系统的建设包含了海绵设施、地下雨水管渠、道路行泄系统的建设。城市道路排水系统规划设计以“防湿鞋→防积水→防内涝→防失控”为建设目标,对应构建源头减排设施→排水管渠系统→道路行泄系统→监测预警系统的排水防涝除险技术体系,如图7所示。

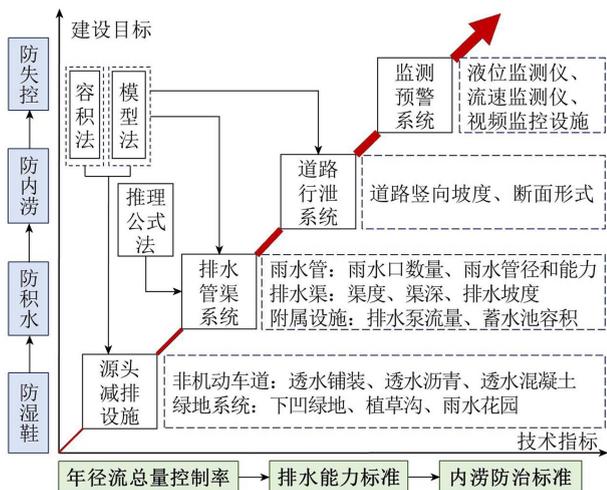


图7 城市道路排水系统顶层规划设计策略

城市道路排水系统作为城市排水防涝系统的重要组成部分,与建筑小区、绿地公园、河湖水系等系统之间相辅相成,具有“上疏、下排”等功能,在其建设红线范围内需要做好顶层设计,具体思路如下:优先利用城市道路可透水路面和凹下绿地设施构建源头减排设施,最大程度实现年径流总量控制率目标;规划建设高标准的城市道路雨水管渠系统,遵循“高水高排、低水强排”原则,保证系统运行满足设计标准要求;合理规划城市道路竖向坡度和行泄方向,构建道路行泄通道系统,充分发挥高重现期降雨路面的排涝除险功能;构建城市道路内涝监测预警系统,采用地上监控、地下监测相结合手段,掌握道路淹没水位和水流流速实时数据,为预警预报提供技术支撑。借助容积法、推理公式法、模型法等手段对城市道路排水系统进行优化,提高整个排水系统的科学性和合理性^[32]。

3.2 加强系统综合排水能力建设

充分发挥城市道路排水系统中源头减排、过程管控和系统治理的能力。在源头减排方面,充分利用道路中间及两侧的绿化带空间,一般绿化带占整个道路系统的15%~30%,年径流总量控制率要求为50%~70%^[33],新建城市道路取值为上限,改造型道路取值不低于下限。凹下绿地一般低于道路10~15 cm,溢流口高于绿地5~10 cm,三者之间的高差通过容积法或模型法进行合理化确定,人行道和非机动车道一般均采用透水型道路,与凹下绿地共同消纳中小降雨产生的径流。在过程管控方面,提高排水管道能力,保障排水管道畅通,据统计,北京市雨水管道总长度为9396 km,排水标准不足1年一遇的占66%,管网不满足36 mm/h降雨强度标准;3~5年一遇或以上重现期的占21%,管网满足45~56 mm/h降雨强度标准,该标准远低于美国、英国、日本等发达国家特大城市的水平^[34-36],需要不断提升和完善。在系统治理方面,合理规划建设道路行泄通道,使其达到设计降雨重现期20~100年一遇,且要避免出现城市道路行泄系统的“规而不建、建而不用”问题。

3.3 提升应急管理能力的水平

城市洪涝灾害监测预警是城市减灾工作的重要组成部分,2021年7月20日,郑州遭遇了千年一遇特大暴雨灾害,造成京广快速路北隧道6人遇难,247辆汽车受淹。虽然灾害发生前郑州市发布了暴雨灾害预报预警信息,但城市关键路段和交通要道的灾害监测预警设施缺失,导致道路受淹时无法提供及时有效的避险提示信息,造成人员伤亡和车辆被淹。城市道路积水监测技术分为人工监测和自动

监测,相比而言,自动监测技术更为先进和成熟,具有数据采集方便、处理效率高、人工成本低的优势,不仅可以对道路积水深度进行监测,也可以对道路径流流量进行计算分析,可实时分析城市道路洪涝灾害风险并进行预警提示,如国内无锡市道路积水预警系统、常州市道路积水监控系统、长沙市高铁立交桥雷达监测系统^[37]。通过构建城市道路洪涝灾害监测预警系统,不仅能够为城市管理部门在执行交通管制时提供快速可靠的信息,而且能够为居民出行提供安全指引。目前,北京市水务局发布了《北京城市积水内涝风险地图》,给出了典型历史积水内涝点位和凹下式立交桥分布,同时,在易涝点位置和凹下桥区设置液位计、监测仪,实现道路灾害的实时监测预警。

4 结论

a. 城市道路排水系统由源头减排设施、排水管渠系统、道路行泄系统等组成,其中源头减排设施应消纳0.5~1年一遇降雨,达到“防湿鞋”能力阈值;排水管渠系统在优先发挥源头减排设施能力的基础上,承担3~5年一遇降雨,达到“防积水”能力阈值;道路行泄系统在前两者基础上,综合应对20~50年一遇降雨,部分重要路段应对100年一遇,达到“防内涝”能力阈值。

b. 在极端降雨情景下,城市道路排水系统无法有效应对超标降雨可能带来的灾害损失,为了降低这种情况带来的人身和财产损失,需要对道路采取“防失控”能力建设,包括监测预报预警系统和应急抢险救援措施,从确保城市道路系统有效地应对各种降雨情景,提高城市道路的韧性水平,降低灾害损失。

c. 随着极端暴雨灾害的频发,未来城市暴雨洪涝灾害事件的可能性和不确定性在增加,面临的风险也在提高。作为城市洪涝灾害防治的重要组成部分,应进一步提升城市道路排水系统能力,包括系统顶层规划设计、系统综合能力建设以及应急管理能力的水平,该部分内容应纳入城市道路专项规划和城市排水防涝专项规划中,从而实现面对极端暴雨灾害时,城市道路排水系统能够有效地应对。

参考文献:

[1] 王浩,王佳,刘家宏,等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报,2021,52(1):3-11. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1):3-11. (in Chinese))

- [2] 张金良,罗秋实,王冰洁,等.城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J].水资源保护,2024,40(1):6-15. (ZHANG Jinliang,LUO Qiushi,WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 6-15. (in Chinese))
- [3] 黄晶,吴星妍,李梦晗.不同主体视角下极端暴雨灾害事件网络舆情演化研究[J].水利经济,2023,41(4):94-106. (HUANG Jing, WU Xingyan, LI Menghan. Research on the evolution of network public opinion of extreme rainstorm disaster events from the perspective of different subjects [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(4): 94-106. (in Chinese))
- [4] 徐宗学,卢兴超,施奇妙.城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J].水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (1): 1-9. (in Chinese))
- [5] 高玉琴,王慧,刘钺,等.基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J].水利水电科技进展,2024,44(6):6-12. (GAO Yuqin, WANG Hui, LIU Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 6-12. (in Chinese))
- [6] 朱明安,李颖.城市积水原因分析及防治对策探讨[J].城市道桥与防洪,2011(4):100-103. (ZHU Mingan, LI Ying. Analysis of urban flooding cause and discussion of preventive countermeasures [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2011(4): 100-103. (in Chinese))
- [7] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等.基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J].水资源保护,2024,40(4):36-47. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (4): 36-47. (in Chinese))
- [8] 夏军强,董柏良,李启杰,等.近年城市洪涝致灾的水动力学机理分析与减灾对策研究[J].中国防汛抗旱,2022,32(4):66-71. (XIA Junqiang, DONG Boliang, LI Qijie, et al. Study on hydrodynamic mechanisms and disaster reduction countermeasures of recent urban floods [J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(4): 66-71. (in Chinese))
- [9] 刘兴哲.城市下凹桥区区内涝积水综合治理设计探讨[J].中国给水排水,2019,35(4):47-53. (LIU Xingzhe. Comprehensive treatment design of waterlogging and water accumulation in urban concave bridge area [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 47-53. (in Chinese))
- [10] 王振亚,姚成,董俊玲,等.郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 17-22. (in Chinese))
- [11] 麦合木提·图达吉,童瑞,徐宝宁,等.北京“23·7”特大洪水复盘分析[J].水力发电学报,2024,43(4):12-22. (MAHMUT Tudaji, TONG Rui, XU Baoning, et al. Hindcasting on “July 2023” flood event in Beijing [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43 (4): 12-22. (in Chinese))
- [12] 李致家,张心愿,白云鹏,等.海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):13-19. (LI Zhijia, ZHANG Xinyuan, BAI Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (5): 13-19. (in Chinese))
- [13] 高学珑,陈奕,蔡辉艺,等.城市道路雨水排放系统构建及要点研究[J].给水排水,2021,47(6):36-42. (GAO Xuelong, CHEN Yi, CAI Huiyi, et al. Research on construction and key points of urban road rainwater drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(6): 36-42. (in Chinese))
- [14] 周玉文.如何科学规划城市水灾防治工程体系[J].学术前沿,2016(21):38-46. (ZHOU Yuwen. How to scientifically make planning on the urban flood control system [J]. Frontiers, 2016(21): 38-46. (in Chinese))
- [15] 车伍,葛裕坤,唐磊,等.我国城市排水(雨水)防涝综合规划剖析[J].中国给水排水,2016,32(10):15-21. (CHE Wu, GE Yukun, TANG Lei, et al. Analysis of integrated plan for urban drainage (stormwater) and flood control [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (10): 15-21. (in Chinese))
- [16] 李贞子,车伍,赵杨.我国古代城镇道路大排水系统分析及对现代的启示[J].中国给水排水,2015,31(10):1-7. (LI Zhenzi, CHE Wu, ZHAO Yang. Analysis of major drainage system of urban road in ancient China and its modern enlightenment [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(10): 1-7. (in Chinese))
- [17] 徐连军,张善发,朱砂砾,等.城市陆域排水防涝体系构建方法与技术关键探讨[J].中国给水排水,2013,29(19):141-145. (XU Lianjun, ZHANG Shanfa, ZHU Shali, et al. Construction and key techniques of urban drainage and flood control system [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(19): 141-145. (in Chinese))
- [18] 李俊奇,王耀堂,王文亮,等.城市道路用于大排水系统的规划设计方法与案例[J].给水排水,2017,43(4):18-24. (LI Junqi, WANG Yaotang, WANG Wenliang, et

- al. Urban roads for major drainage system planning-design methods and cases[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(4):18-24. (in Chinese)
- [19] 章林伟. 海绵城市建设典型案例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [20] 车伍, 杨正, 赵杨, 等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(16):13-19. (CHE Wu, YANG Zheng, ZHAO Yang, et al. Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(16):13-19. (in Chinese))
- [21] 杨凤茹, 陈亮, 张雅卓, 等. 低影响开发雨水系统规划研究综述[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(6):62-78. (YANG Fengru, CHEN Liang, ZHANG Yazhuo, et al. Review of low impact development rainwater system planning[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(6):62-78. (in Chinese))
- [22] 李俊奇, 李小静, 王文亮, 等. 美国雨水径流控制技术导则讨论及其借鉴[J]. *水资源保护*, 2017, 33(2):6-12. (LI Junqi, LI Xiaojing, WANG Wenliang, et al. Technical guidance for stormwater runoff control in United States and its significance[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2):6-12. (in Chinese))
- [23] 王文亮. 基于多目标的城市雨水系统构建技术与策略研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [24] 马洪涛, 张晓昕, 王强. 基于模型的城市雨水系统改造规划方法: 以北京奥林匹克公园地区为例[J]. *给水排水*, 2008, 34(10):115-118. (MA Hongtao, ZHANG Xiaoxin, WANG Qiang. Model-based method of rebuilding the urban drainage system: a case study of Beijing Olympic Green region[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 34(10):115-118. (in Chinese))
- [25] 马洪涛, 周凌. 关于城市排水(雨水)防涝规划编制的思考[J]. *给水排水*, 2015, 41(8):38-44. (MA Hongtao, ZHOU Ling. Discussion on issues about urban drainage system and local flood control planning[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41(8):38-44. (in Chinese))
- [26] 潘安君, 侯爱中, 田富强, 等. 基于分布式洪水模型的北京城区道路积水数值模拟: 以万泉河桥为例[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(5):19-22. (PAN Anjun, HOU Aizhong, TIAN Fuqiang, et al. Numerical simulation of street inundation based on distributed urban flood model: a case study in Wanquanhe flyover bridge of Beijing[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(5):19-22. (in Chinese))
- [27] 王耀堂. 道路用于城市大排水系统规划设计方法与案例研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [28] 刘子龙. 基于模型的城市内涝灾害防治理论与技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [29] 刘家宏, 梅超, 邵薇薇, 等. 城市排水防涝基础设施应对能力的三个阈值[J]. *水利学报*, 2022, 53(7):789-797. (LIU Jiahong, MEI Chao, SHAO Weiwei, et al. Three thresholds for the bearing capacity of urban drainage and flood control infrastructures[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(7):789-797. (in Chinese))
- [30] 刘家宏, 梅超, 王佳, 等. 北京市门头沟流域“23·7”特大暴雨洪水过程分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(9):50-55. (LIU Jiahong, MEI Chao, WANG Jia, et al. Flood survey of “23·7” heavy rain in Mentougou Watershed of Beijing[J]. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(9):50-55. (in Chinese))
- [31] 章林伟, 牛璋彬, 张全, 等. 浅析海绵城市建设的顶层设计[J]. *给水排水*, 2017, 43(9):1-5. (ZHANG Linwei, NIU Zhangbin, ZHANG Quan, et al. Brief analysis of top-level design of sponge city construction[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 43(9):1-5. (in Chinese))
- [32] 刘绪为, 胡坚, 方帅, 等. 镇江海绵城市系统性顶层设计方法与实践[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4):1-4. (LIU Xuwei, HU Jian, FANG Shuai, et al. Practice and systematic top-level design method of Zhenjiang sponge city[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4):1-4. (in Chinese))
- [33] 王旭阳, 耿适为, 王冬, 等. 海绵城市理念下市政道路排水设计及关键问题探讨[J]. *给水排水*, 2022, 48(增刊1):569-573. (WANG Xuyang, GENG Shiwei, WANG Dong, et al. The discussion of municipal road drainage design and key issues under sponge city concept[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(Sup1):569-573. (in Chinese))
- [34] BSI (British Standards Institution). *Drain and sewer systems outside buildings; BS EN 752:2008[S]*. London: British Standards Institution, 2008.
- [35] Melbourne Water. *WSUD engineering procedures: stormwater[M]*. Melbourne: CSIRO Publishing, 2005.
- [36] 陈嫣. 日本大城市雨水综合管理分析和借鉴[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(10):42-47. (CHEN Yan. Analysis and reference on stormwater integrated management in major cities of Japan[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(10):42-47. (in Chinese))
- [37] 栾清华, 秦志宇, 王东, 等. 城市暴雨道路积水监测技术及其应用进展[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1):106-116. (LUAN Qinghua, QIN Zhiyu, WANG Dong, et al. Review on monitoring technology of urban road waterlogging after rainstorm and its application[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1):106-116. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-03-18 编辑: 俞云利)