

基于大幅提升城市内涝排水工程关键技术研究

俞 伟 付花胤鹏

宁波广天建通工程管理有限公司 浙江 宁波 315000

摘要：随着全球气候变化和我国城市化进程的飞速推进，极端强降雨事件频发，“城市看海”现象日益突出，严重威胁人民生命财产安全和城市正常运行。传统以“灰色基础设施”为主的排水系统已难以应对新的挑战。本文旨在系统研究大幅提升城市内涝防治能力的关键技术体系。首先，深入剖析了导致城市内涝加剧的自然与人为因素；其次，构建了包含“精准监测与智能预警技术”、“源头减排与过程控制技术（海绵城市理念）”、“管网指标与优化调度技术”以及“行泄通道与末端调蓄技术”在内的四大关键技术体系，并对各项技术的原理、应用及最新进展进行了详细阐述；最后，提出了“灰绿蓝”多源融合、智慧赋能、平战结合的系统性解决方案，并展望了未来技术发展方向，以期为我国城市内涝治理提供理论参考和技术支撑^[1]。

关键词：城市内涝；排水工程；关键技术；海绵城市；智慧水务；综合治理

引言

城市作为人类文明和社会经济发展的核心载体，正面临着气候变化和自身快速扩张带来的严峻挑战。其中，城市内涝问题因其发生频率高、影响范围广、成灾损失大而成为世界各国大中城市的“心腹之患”。近年来，我国北京、郑州、广州等多地接连遭遇极端暴雨袭击，引发严重内涝，交通瘫痪、基础设施损毁、甚至造成人员伤亡，暴露出城市排水防涝体系存在的明显短板^[1]。

城市作为人类文明演进与社会经济高质量发展的核心载体，正日益面临着全球气候变化加剧与自身空间快速扩张所带来的双重严峻挑战。其中，城市内涝问题因其发生频率逐年攀升、影响范围覆盖城市核心功能区、成灾损失直接关联民生安全与经济命脉，已成为世界各国大中城市在城镇化进程中难以规避的“心腹之患”。

近年来，我国极端降雨事件呈现出“突发性强、强度大、持续时间长”的显著特征，北京、郑州、广州、武汉等多个人口密集、经济活跃的大城市接连遭遇历史罕见的暴雨袭击。短时间内超标准的降雨量迅速超出城市排水系统承载极限，引发严重内涝灾害——城市主干道积水深度可达半米以上，导致交通全面瘫痪，大量车辆被淹熄火；地下车库、地铁站等地下空间进水，不仅造成巨额财产损失，更对人员生命安全构成直接威胁；供排水、供电、通信等关键基础设施因长时间浸泡出现损毁，部分区域陷入“断水、断电、断网”的困境，甚至出现人员伤亡案例。这些极端事件集中暴露出我国城市排水防涝体系在规划标准、设施建设、应急响应等方面存在的明显短板，也让“城市如何安全应对极端天气”成为社会各界高度关注的重要议题。^[2]

传统的城市排水工程理念主要依赖于大规模、集中式的“灰色基础设施”（如管道、泵站），遵循“快速排除”的原则。这种模式在应对标准内降雨时是有效的，但在面对超过设计标准的极端降雨时，其容量不足、灵活性差的缺点暴露无遗。同时，城市下垫面的高度硬化导致地表径流系数急剧增大，汇流时间缩短，进一步加剧了管网的压力和内涝风险。因此，单一依靠扩大管径、增加泵站能力的传统思路已不可行，必须转向一种更具韧性、更系统化、更智慧的综合治理新模式。本研究旨在突破传统思维，从“防、蓄、滞、排、净”等多个维度，系统梳理和探讨能够大幅提升城市内涝排水能力的核心技术，构建一套多层次、全过程的技术体系，为提升城市应对极端天气的“免疫力”提供核心技术支持。

1 城市内涝成因深度剖析

要有效治理内涝，必须首先透彻理解其成因，主要包括自然因素和人为因素。

1.1 自然因素

气候变化导致极端降雨频发：全球变暖加剧了大气环流和水循环，导致短时强降雨、台风等极端天气事件的频率和强度显著增加，降雨时空分布不均性加大，远超现有排水系统的设计标准。地形地貌条件限制：部分城市地处低洼平原、河谷盆地或沿海地区，天然排水条件差，遭遇强降雨时积水难以快速自排。

1.2 人为因素

重地上、轻地下”的发展观念：过去城市建设往往注重地表可见的楼宇、道路，对地下排水管网等隐蔽工程投入不足，历史欠账多，系统标准偏低。城市下垫面

过度硬化：大量的建筑、道路、广场取代了原有的植被和土壤，使得雨水无法下渗，绝大部分形成地表径流，汇流量和峰值流量大幅增加。

排水系统规划建设滞后与标准不足：许多老城区的排水管网设计标准仍沿用1-3年一遇的低标准，难以应对今日之强降雨。新建区域虽标准有所提高，但系统性与协调性仍显不足。监测预警与应急管理能力薄弱：对降雨、积水、管网运行状态的实时感知能力不足，预测预报模型精度不高，各部门间的应急联动机制不畅，导致响应迟缓。维护管理不到位：管道淤积、堵塞现象普遍，清通养护不及时，严重削弱了现有设施的排水能力^[3]。

2 大幅提升排水能力的关键技术体系构建

为系统解决上述问题，必须采取“系统治理、源头减排、过程控制、末端调蓄”的综合策略，构建以下四大关键技术体系。

2.1 关键技术一：精准监测与智能预警技术（“智慧大脑”）

本技术是内涝防治体系的“感知神经”和“决策中枢”，实现从被动应对到主动预警的转变。

高密度立体监测网络：天：利用气象卫星、雷达进行大范围降雨监测和短临预报。空：借助无人机对重点区域进行巡排查，快速获取灾情信息。地：布设大量物联网监测设备，包括雨量计、液位计（安装在易涝点、河道）、流量计（安装在关键管段）、水质传感器、视频监控等，实现降雨-径流-管网-河道全过程实时数据采集。

城市内涝模拟与预报模型：基于GIS（地理信息系统）、DEM（数字高程模型）和管网拓扑数据，构建高精度的城市水文水动力耦合模型（如SWMM、MIKE URBAN、InfoWorks ICM等）。该模型能够模拟在不同降雨情景下，地表产汇流、管网汇流、河道水流以及地面积水淹没的全过程。结合实时监测数据和气象预报数据，模型可进行滚动预报，提前数小时至数十小时预测城市内涝风险点的位置、积水量、积水深度及持续时间，为决策提供科学依据。

智能预警与应急调度平台：集成监测数据、模型预报结果，构建城市内涝预警指挥系统。系统基于预设阈值，自动生成预警信息，通过APP、短信、广播等渠道向公众和管理人员发布。同时，系统可根据模拟结果，智能生成调度方案，如提前预降河道水位、启动特定泵站、开放调蓄设施、规划应急抢险路线等，实现各类排水设施的联动优化调度。

2.2 关键技术二：源头减排与过程控制技术（“海绵体”）

本技术核心是借鉴海绵城市“渗、滞、蓄、净、用、排”理念，从源头减少径流产生，延缓汇流时间，是减轻管网压力的根本性措施。

低影响开发（LID）技术：透水铺装：用透水砖、透水沥青、透水混凝土代替传统硬化路面，使雨水快速下渗，补充地下水。绿色屋顶：在建筑屋顶种植植被，可有效截留、蒸发雨水，延缓径流形成。生物滞留设施：如下沉式绿地、雨水花园、生态树池等，通过植物、土壤和微生物系统蓄渗、净化雨水。渗井/渗渠：将雨水引导至深层土壤进行下渗^[4]。

雨水蓄滞设施：模块化蓄水池/水箱：在地下空间安装塑料或混凝土模块组，储存大量雨水，雨后可缓慢排入管网或回用于绿化、冲洗等。人工湿地、调节塘：在径流过程中设置湿地或池塘，不仅能调蓄峰值流量，还能显著净化雨水径流中的污染物。

通过这些“绿色基础设施”的分布式布局，城市就像一块巨大的海绵，在降雨时吸收储存雨水，在需要时“释放”利用，从而有效削减洪峰流量，实现雨水的自然积存、自然渗透、自然净化。

2.3 关键技术三：管网提标与优化调度技术（“强筋健骨”）

灰色基础设施仍是应对中大强度降雨的主力，需通过提标改造和智慧化手段挖掘其最大潜能。

管网诊断与修复技术：管道机器人（CCTV）、QV检测：对现有管网进行内部摄像检测，精准定位破裂、错口、淤积等结构性缺陷和功能性问题。非开挖修复技术：如原位固化法（CIPP）、碎管法、螺旋缠绕法等，在不开挖路面的情况下对老旧破损管道进行修复更新，成本低、影响小。管网提标扩容技术：分流制改造：对雨污合流制区域进行改造，实现雨污分流，减轻污水处理厂压力，提高雨水排放效率。管道扩容与新建：在关键瓶颈段，通过铺设更大管径管道或新建排水廊道（深隧系统）等方式，大幅提升系统输送能力。

泵站智能化改造与联合调度：对排水泵站进行自动化、智能化改造，安装智能控制系统。基于模型预报和实时监测数据，中央调度平台可远程智能控制全域泵站的启停和运行频率，实现泵站群与河道闸门的联合调度，避免各自为战，甚至出现“下游泵站猛抽，上游闸门未开”的尴尬局面，系统化地提升排水效率。

2.4 关键技术四：行泄通道与末端调蓄技术（“疏通血管”与“扩大胃容量”）

当遭遇极端超标准降雨时，需要为超量雨水寻找安全的出路和临时储存空间。优化行泄通道：为超量雨水开辟“快速通道”，行泄通道是极端降雨时雨水快速外

排的关键，需从竖向设计、河道整治两方面系统优化，确保雨水“流得通、排得快”。

竖向设计优化：在城市规划中，利用道路、绿地、广场的竖向设计，在发生内涝时，将积水引导至预设的安全行泄通道（如主干道、明渠、河道），避免积水深度过深危及生命，并将其快速导向承泄区（江河湖海）。**河道整治与拓宽：**清理、拓宽、疏浚城市内河，拆除阻水构筑物，确保河道行洪通畅。**大型末端调蓄设施：**地表调蓄池/公园：建设多功能调蓄设施，如地下调蓄池+地上公园、运动场。平时为市民提供休闲场所，雨时蓄滞洪水，是节约集约用地的典范。**深隧系统：**在特大城市，建设埋深大、直径巨的深层排水隧道（如广州、深圳的深隧工程），作为城市的“地下主动脉”，在极端降雨时储存和快速输送远超浅层管网能力的巨大洪水量，是应对超标准暴雨的“王牌”工程。**虚拟调蓄：**通过智慧调度，利用管网自身的空余容量进行调蓄，但这要求对管网运行状态有精确的感知和控制能力。

3 多技术融合与系统性解决方案

上述四项关键技术并非孤立存在，必须进行有机融合，形成“灰（灰色基础设施）-绿（绿色基础设施）-蓝（蓝色水体）”多源互补，智慧赋能的一体化解决方案。

“灰绿蓝”融合：绿色基础设施（LID）从源头削减径流，是“第一道防线”；经过优化的灰色管网和泵站是“主力军”，负责输送和排除雨水；蓝色河道、湖泊、调蓄池是“容受器”，负责最终消纳和调蓄。三者必须统一规划、同步设计、协同运行。智慧赋能：基于物联网、大数据、AI和数字孪生技术，构建城市水系统数字孪生平台。该平台是物理城市水系统的虚拟映射，能够实时感知、模拟预测、优化调度整个“灰-绿-蓝”系统，实现从“经验驱动”到“数据与模型双驱动”的决策模式变革，是未来城市内涝防治的核心竞争力^[5]。

平战结合：所有设施，特别是调蓄设施，应具备“平时”与“战时”（汛时）两种功能模式，最大化利用城市空间资源，实现效益最大化。

4 结论与展望

大幅提升城市内涝防治能力是一项长期、复杂且系

统的工程，不可能一蹴而就。本研究认为：

（1）理念转变是前提：必须从传统的“快速排除”转向“自然积存、自然渗透、自然净化”与“合理排放”相结合的韧性治理理念。

（2）系统规划是基础：必须打破“头痛医头、脚痛医脚”的碎片化治理模式，进行全域统筹、系统规划，将排水防涝设施建设与城市规划、道路交通、园林绿地等深度融合。

（3）技术创新是核心：深度融合精准监测、海绵城市、管网提标、智慧调度等关键技术，构建“源头减排、管网输送、排涝除险、超标应急”的全过程技术体系，是提升排水能力的硬核支撑。

（4）智慧管理是关键：依托数字孪生城市技术，建设智慧水务平台，实现监测-预报-预警-调度-决策-评估的智能化闭环管理，是现代化城市治理的必然要求。

未来展望：未来城市内涝治理技术将向着更加精细化、智慧化、韧性的方向发展。更高精度的传感器和雷达技术、更强大的人工智能预报模型、数字孪生技术的深度应用、新型海绵城市材料、以及更高效的深层隧道施工技术等，都将为彻底解决城市内涝问题提供新的强大工具。最终目标是构建一座座能够像有机生命体一样，自如呼吸、吞吐雨水、应对冲击、快速恢复的韧性水城市。

参考文献

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计标准(GB 50014-2021)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [2]中华人民共和国国务院办公厅. 国务院办公厅关于加强城市内涝治理的实施意见(国办发〔2021〕11号)[Z]. 2021.
- [3]俞孔坚, 李迪华, 李春波, 等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划, 2015, 39(6): 26-36.
- [4]张建云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 气候变化背景下城市水文学的发展挑战与展望[J]. 水科学进展, 2016, 27(3): 443-453.
- [5]王浩, 王建华, 贾仰文, 等. 城市水系统与海绵城市建设理论与实践[J]. 水力学报, 2018, 49(1):