

# 城市地下道路内涝防治分析技术

邓卫东<sup>1</sup>, 林宏军<sup>1</sup>, 孙东凯<sup>2</sup>, 王 程<sup>2</sup>, 王 越<sup>1</sup>

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082; 2. 北京市公联公路联络线有限责任公司, 北京市 100161)

**摘 要:** 当城市遭遇内涝灾害时, 城市地下道路的受灾危险性极大。尤其是重要地下道路, 内部聚集大量人员与车辆, 内涝不仅会造成巨大财产损失与人员安全威胁, 若交通中断, 更会严重阻碍城市救灾工作推进及基本功能运转。内涝防治分析是地下道路工程设计的核心环节之一, 旨在精准识别内涝风险源、确定内涝设计水位, 为后续防治工程设计提供关键依据。然而在城市开展此项工作时, 往往面临基础资料碎片化难收集、人口流动频繁导致历史灾害调查难、城市水文环境因城镇化而快速变迁、人工干预措施干扰多等问题, 诸多分析技术因成本过高、周期过长等限制难以落地, 导致当前多数城市地下道路仍主要依赖城市防洪排涝体系。但城市的防洪排涝工程的设计标准以保护城市整体区域为主, 与地下道路“封闭空间、人员密集、交通关键”的防护需求存在本质差异, 其安全保障能力难以覆盖地下道路的特殊风险。总结近十几年城市内涝防治工程实践经验, 逐步形成了一套针对性技术路线——通过地形数字建模分析、历史内涝灾害调查、精细化水文模拟计算等方法, 依托电子地形图与专业地形分析软件(如GIS), 实现内涝风险源的精准定位与设计水位的科学计算, 为地下道路内涝防治工程提供更贴合实际的设计依据。

**关键词:** 地下道路; 内涝防治; 地形分析; 内涝风险源; 内涝设计水位

中图分类号: TU991

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0285-05

## Analysis Technology of Waterlogging Prevention and Control for Urban Underground Roads

DENG Weidong<sup>1</sup>, LIN Honhjun<sup>1</sup>, SUN Dongkai<sup>2</sup>, WANG Cheng<sup>2</sup>, WANG Yue<sup>1</sup>

(1. Beijing General Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China; 2. Beijing Gonglian Highway Link Co., Ltd., Beijing 100161, China)

**Abstract:** When cities suffer from the waterlogging disasters, the risk of damage to underground roads is extremely high. Especially for important underground roads, where a large number of people and vehicles gather inside, the waterlogging not only causes huge property losses and threats to personnel safety, but also seriously hinders the progress of urban disaster relief work and the operation of basic functions if traffic is interrupted. The analysis of waterlogging prevention and control is one of the core aspects in the design of underground road engineering, aiming to accurately identify the waterlogging risk sources, determine the waterlogging design water levels, and provide a key basis for subsequent prevention and control engineering design. However, when carrying out this work in cities, there are often problems such as fragmented basic data that are difficult to collect, frequent population movements that make it difficult to investigate historical disasters, rapid changes in urban hydrological environment due to urbanization, and frequent interference from human intervention measures. Many analytical techniques are difficult to implement due to high costs and long cycles, resulting in the most urban underground roads still relying mainly on urban flood control and drainage systems. However, the design standards for flood control and drainage projects in cities mainly focus on protecting the overall urban area, which is fundamentally different from the protection requirements of underground roads such as enclosed spaces, densely populated areas and critical traffic. Its safety guarantee capability is difficult to cover the special risks of underground roads. The practical experience of urban waterlogging prevention and control engineering in the past decade is summarized, and a set of targeted technical route is gradually formed, such as terrain digital modeling analysis, historical waterlogging disaster investigation, refined hydrological simulation calculation and others. Relying on electronic topographic maps and professional terrain analysis software (such as GIS), the accurate positioning of waterlogging risk sources and the scientific calculation of design water levels can be achieved, providing more practical design basis for the waterlogging prevention and control engineering of underground roads.

**Keywords:** underground road; prevention and control of waterlogging; terrain analysis; risk sources of waterlogging; design water level of waterlogging

## 0 引言

中国城市化进程自20世纪末迈入快速增长阶段,随之而来的城市“看海”问题亦愈发突出<sup>[1-2]</sup>。例如2012年北京“7·21”暴雨,京港澳高速公路南岗洼下凹段路堤损毁,洪水灌入,致3人遇难<sup>[3]</sup>;2021年郑州“7·20”暴雨,地铁五号线五龙口停车场周边涝水冲垮挡墙涌入地铁,致12人遇难;郑州京广隧道亦发生重大淹涝事故,247辆车被淹、6人遇难<sup>[4]</sup>。在此期间,我国城市建设中的内涝防治技术逐步发展<sup>[5-10]</sup>。以《室外排水设计规范》为例,自1974年版至2021年实施的最新版《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),47年间历经7次更新,各版使用年限依次为13年、10年、9年、5年、3年、2年、5年<sup>[11]</sup>。前期更新内容多聚焦城市污水领域,直至2014年版规范才纳入城市内涝相关内容,并提出内涝防治设计重现期。然而,仅有内涝防治设计重现期还不够,需配套相应技术方法方能实现内涝防治目标。

在城市内涝防治工程规划设计中,首先面临基础资料收集困难——城市排水工程鲜有观测记录设备,导致内涝灾害发生时,难以获取详实的水文数据<sup>[12-14]</sup>;且城市人口流动性较大,增加了历史内涝灾害水文数据的调查难度<sup>[15]</sup>;加之城市建设进程中,下垫面情况不断变化<sup>[16-17]</sup>,排水工程人工管控措施较多,进一步加剧了这一问题。近年来,数学模型逐步应用于城市雨水工程规划设计,但城市缺乏长期水文观测资料,导致模型参数率定缺乏足够数据支撑<sup>[18-23]</sup>。尤其对于规模较小的建设工程,数学模型对基础资料数据需求量大,导致时间与费用成本过高,加之计算边界条件设定不规范,应用效果欠佳。

当前,许多城市地下道路的防洪涝安全依赖城市防洪、防涝工程,然而二者在防洪标准、防护对象、防洪保护区及工程建设时序等方面存在差异,导致地下道路内涝设计标准与安全难以保障<sup>[24]</sup>。

我国古代城市防洪拥有近五千年的历史经验积淀,部分古代行之有效的防洪设施沿用至今。《管子》总结了中国古代城市防洪的实践经验:“凡立国都,非于大山之下,必于广川之上,高毋近旱而用水足,下毋近水而沟防省。”书中还对城市防洪涝系统有如下论述:“地高则沟之、下则堤之。”中国古代城市防洪方略是祖先留给我们的宝贵遗产,从中不难看出,在古人的城市防洪涝智慧中,地形、地势的概念始终

贯穿其中<sup>[25-27]</sup>。借鉴古人的智慧,通过多年城市基础设施内涝防治的工作实践,逐步摸索出一套适用于城市建成区的内涝防治分析技术路线。该技术路线以地形分析、历史内涝灾害调查、水文计算等为主要技术手段,以问题为导向,以地形分析为主线探寻城市内涝灾害的本质成因与风险源,以历史内涝灾害调查为验证依据,通过设定安全合理的计算条件综合确定分析成果。

接下来,以北京市东六环入地改造工程内涝防治分析为例,介绍由地形分析、历史内涝灾害调查及相应水文分析计算构成的内涝防治分析技术路线。

## 1 东六环入地改造工程简介

北京市东六环作为国家高速公路网G45的重要组成部分,其入地改造工程既是交通部及北京市“十四五”时期重点工程,更是交通运输科技示范工程、“平安百年品质工程”,总投资约126亿元。隧道全长9.2 km,为目前国内最长城市隧道,盾构直径15.4 m,刷新国内最大纪录,埋深更达59 m,同样位居国内之首。工程地处北京市东部通州地区,地势低洼,河网密布,周边环绕萧太后河、玉带河、玉带河东支、北运河、运潮减河、中坝河、翟减沟等7条河道。为服务北京城市副中心行政办公区、环球影城等重要功能节点,隧道出入口设置密集,防洪涝压力极大。

## 2 设计标准确定

北京市东六环属于高速公路。依据《防洪标准》(GB50201—2014)中表6.2.1对公路各类建筑物、构筑物防护等级及防洪标准的规定,东六环的防护等级为Ⅰ级,其隧道的防洪标准为100年一遇<sup>[28-34]</sup>。

上述东六环隧道地处北京市通州区,其防洪标准实际上是为抵御项目区域100年一遇的内涝灾害。

## 3 内涝防治分析技术路线简介

内涝防治分析技术路线主要由三个核心环节构成:地形分析、历史内涝灾害调查与水文计算。首先需对项目区域开展地形分析,判断是否存在内涝风险——若不存在风险,后续工作可终止;若存在风险,则需进一步明确内涝风险源。第二步是开展内涝灾害调查,具体包括实地走访、历史资料查阅及现场测量等内容。经上述两阶段工作评估后,若认为有必要且具备计算条件,可开展相应的水文计算。

最终通过综合分析形成结论。内涝防治分析技术路线如图 1 所示。

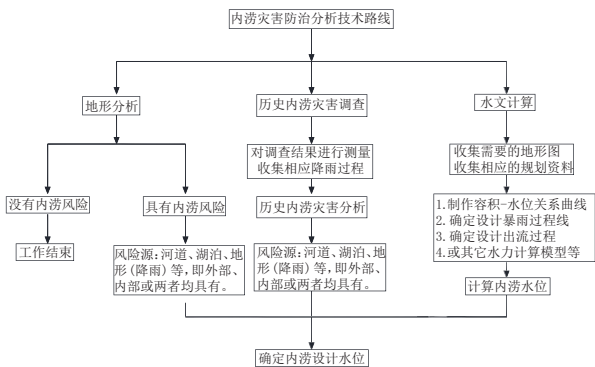


图 1 内涝防治分析技术路线图

4 地形分析

地形分析主要包括洼地与风险源的分析。

4.1 洼地

地处洼地是致灾的重要原因之一。降雨发生时,降落到洼地或汇入其中的雨水无法通过重力流自然排出。在城市地区,排水工程的设计标准普遍低于 5 年一遇,当遭遇超过设计标准的暴雨时,多余的降雨径流便会滞留在洼地里形成积水。通过地形分析软件对数字地形图进行分析,可快速获取洼地的位置、范围、最高积水深度及积水体积等数据,如图 2 所示。

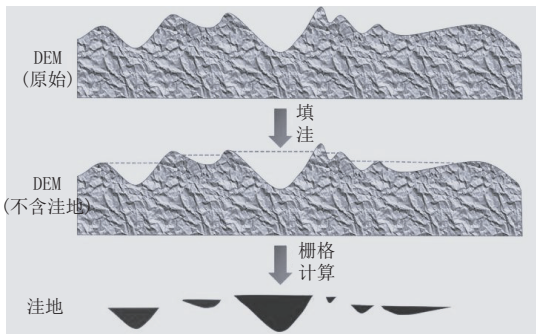


图 2 洼地计算示意图

4.2 内涝风险源

内涝风险源的本质,就是引发内涝灾害的核心水源。主要包括两类,一是河道或湖泊的漫溢,二是区域自身的降雨径流。这就需要我们明确项目区域周边河道、湖泊的洪水水位——若水位达到足以威胁项目区的程度,这些河道或湖泊便成为重要风险源。若项目区域周边未受河道、湖泊洪水威胁,其唯一的内涝风险源则很可能来自区域自身的降雨。此时需进一步判断,若项目区域并非洼地,降雨一般不会引发内涝灾害;若为洼地,其内涝风险源则为该区域流域的降雨径流。

通过地形及内涝风险源分析后,我们就能初步判定项目区域是否面临内涝风险。若分析结论为无内涝风险,整个内涝防治分析工作即可终止。若分析结论显示项目区域存在内涝风险,且初步得出内涝设计水位,则需继续开展后续分析工作。

4.3 东六环入地改造工程计算实例

通过软件工具构建研究区域的数字高程模型,提取洼地并获取其相关参数。结合工程实际需求,对分析所得的洼地进行筛选,核心判断依据为洼地的积水深度与体积是否会对工程项目构成威胁,若不构成威胁则予以剔除。筛选出最大深度超过 H、积水体积大于 V 的洼地(注:H 和 V 根据具体工程要求确定),同时提取这些洼地的参数。为提高分析成果的准确性,可借助已有地形资料及补充测量,对所选洼地最高水位的关键点位进行复核,最终确定洼地的最大积水参数,如表 1 所示。

表 1 洼地最大积水参数

| 洼地名称  | 最高积水<br>水位高程/<br>m | 最大积水体<br>积/m <sup>3</sup> | 最大积水<br>深度/m | 最大积水面<br>积/m <sup>2</sup> |
|-------|--------------------|---------------------------|--------------|---------------------------|
| 洼地 1  | 21.40              | 6 677                     | 0.70         | 31 675                    |
| 洼地 2  | 20.46              | 102 215                   | 1.70         | 267 000                   |
| 洼地 3  | 19.08              | 194 275                   | 3.81         | 103 153                   |
| 洼地 4  | 19.86              | 2 552                     | 2.45         | 12 506                    |
| 洼地 5  | 19.84              | 359 260                   | 3.50         | 286 013                   |
| 洼地 6  | 20.73              | 138                       | 0.67         | 1 331                     |
| 洼地 7  | 20.33              | 370                       | 0.40         | 5 331                     |
| 洼地 8  | 18.41              | 1 695 572                 | 3.54         | 4 111 719                 |
| 洼地 9  | 20.17              | 3 795                     | 1.16         | 27 831                    |
| 洼地 10 | 20.01              | 965 088                   | 3.53         | 1 965 950                 |
| 洼地 11 | 20.64              | 1 290                     | 0.39         | 12 363                    |
| 洼地 12 | 23.50              | 715                       | 0.47         | 8 025                     |
| 洼地 13 | 23.18              | 23                        | 0.35         | 66 738                    |

下一步将针对每个洼地的风险源展开分析,明确其内涝水位。以洼地 1 为例,其位置及集水区范围如图 3 所示。洼地 1 位于疃里桥南侧,最大积水面积达 31 675 m<sup>2</sup>,汇水区面积 73 562 m<sup>2</sup>,最大积水体积达 6 677 m<sup>3</sup>。根据《北京市水文手册-暴雨图集》,该区域百年一遇 24 h 降雨量为 350 mm,则当洼地 1 对应的集水区遭遇百年一遇 24 h 设计降雨时,降雨总量达 25 747 m<sup>3</sup>,远大于洼地 1 的最大积水体积 6 677 m<sup>3</sup>,因此在该降雨条件下,洼地 1 极易达到最高积水水位高程。表 1 中显示其最高积水水位高程为 21.4 m,即该降雨条件下洼地 1 的淹涝水位为 21.4 m。

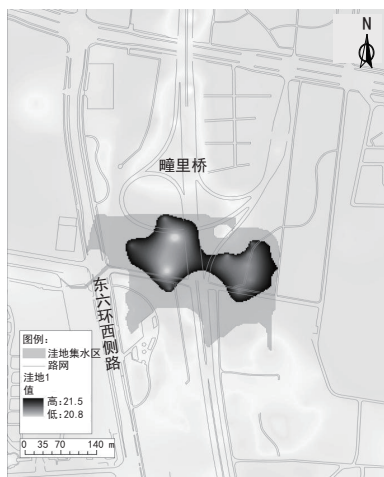


图3 洼地1汇水区域示意图

## 5 历史内涝灾害调查

历史内涝灾害调查是一项极具重要性的工作,其核心价值在于能对我们的分析结论进行有效验证。城市内涝灾害的水文资料记录匮乏,一直是困扰城市内涝研究的重要难题。城市排水工程的规划设计,大多采用无资料地区的水文计算方法——比如设计流量的计算。对于大型工程项目而言,若缺乏历史资料的验证,极有可能引发工程设计失误或超规模建设,要么造成工程资源的浪费,要么无法实现预期的防灾目标。

当前,在城市区域开展历史内涝灾害调查时,面临的另一大难点是居民流动性大,尤其是难以找到长期居住的老年居民,加之城市地物变迁剧烈,进一步增加了调查的复杂度。这就要求我们在现场调查时,必须以更足的耐心开展寻访工作,并做好详细的调查记录——比如调查地点、时间、受访者信息及联系方式等。对于有价值的调查线索,还需在现场做好标记及影像记录,并及时开展必要的测量工作。值得注意的是,当事人通常对灾害发生的原因留有清晰记忆,这类信息对我们的灾害分析报告具有极高的参考价值。

## 6 水文计算

若洼地排水设施的工程资料齐全,且其运行工况已被掌握,即可通过水文计算得出涝水体积及水位。此处介绍一种适用于洼地内涝计算的方法——水量平衡法。

依据水量平衡法的基本原理,进入洼地的水量减去排出洼地的水量,即为洼地的积水量差值。水量平衡法的基本公式如下:

$$\frac{q_{t+1} + q_t}{2} \Delta t - \frac{Q_{t+1} + Q_t}{2} \Delta t = (V_{t+1} - V_t) \quad (1)$$

式中: $q_t$ 、 $q_{t+1}$ 为 $t$ 时刻和 $t+1$ 时刻洼地的入流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $Q_t$ 、 $Q_{t+1}$ 为 $t$ 时刻和 $t+1$ 时刻的流出洼地的流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $V_t$ 、 $V_{t+1}$ 为 $t$ 时刻和 $t+1$ 时刻洼地积水体积, $\text{m}^3$ ; $\Delta t$ 为 $t$ 时刻到 $t+1$ 时刻的时段长, $\text{s}$ 。

由公式1可推导出

$$V_{t+1} = V_t + \left( \frac{q_{t+1} + q_t}{2} \Delta t - \frac{Q_{t+1} + Q_t}{2} \Delta t \right) \quad (2)$$

公式2中等式右边入流量 $q_t$ 、 $q_{t+1}$ 和出流量 $Q_t$ 、 $Q_{t+1}$ 、积水体积 $V_t$ 值均为已知项,可以直接计算出来,即 $t+1$ 时刻的积水体积可以由等式右边项计算出来。根据洼地水位-积水体积曲线图,可以得到积水水位,再根据排水工程的排水流量-洼地水位曲线图,可以得到流出洼地的流量。

根据一定内涝防治标准的来水过程、工作曲线,进行逐时段水量平衡计算,求出洼地积水体积 $V_t$ 随时间 $t$ 变化的过程过程。基于最大汇水量与洼地水位-积水体积曲线图,最终确定最高积水水位。

流域面积是城市内涝防治计算工作中需要特别关注的核心概念之一。尤其在平原地区,地形高程起伏较小,一旦地面出现积水,流域面积便会发生动态变化。若规划设计时忽略这一变化,计算结果与规划方案便可能出现偏差。为此,我们提出“不同设计标准下的流域面积”这一概念。例如,在城市排水工程设计标准范围内,需划定排水工程的设计流域面积;但当降雨超出设计标准导致地面积水,且积水水位超过地形高差时,原本不属于本流域的径流便可能汇入,从而扩大流域面积——这一现象在城市内涝防治规划设计中需重点关注。

## 7 结 语

城市地下道路是城市区域内的重要基础设施,其防洪工作的核心在于抵御城市内涝灾害。城市地下道路内涝防治分析技术,是针对工程项目所处区域内涝情况的专业分析技术,其创新性提出“内涝风险源”概念,将识别与定位内涝风险源作为分析的逻辑起点。若区域内无内涝风险源,分析即可终止,判定该区域为内涝安全区域;若存在内涝风险源,则进入风险源深度分析环节,最终推导得出内涝设计水位——这是内涝防治工程设计的核心依据。该分析技术涵盖两大核心工具——地形分析与历史内涝灾害调查。地形分析可精准解析工程项目区域与周边

的地形空间关联,判断其是否具备内涝发生的必要条件;历史内涝灾害调查是不可或缺的关键环节,为分析工作提供了重要的实证支撑与验证依据。由于城区的水文情势、产汇流过程及内涝防治要求等,与农村等自然区域存在显著差异,城市水文计算需设定合理且安全的设计边界条件。

在遵循科学性、先进性、实用性及可持续发展等原则的前提下,随着城市数字化转型的加速推进,本技术将不断总结完善、迭代升级,在提升重要城市基础设施内涝防护能力、提高城市极端天气应对水平、推进韧性城市建设、保障人民生命安全等方面,逐步发挥重要的支撑作用。

参考文献:

- [1] 唐明,许文斌,谢千辰,等.海绵城市建设背景、争论、定位与实证分析[J].中国防汛抗旱,2024,34(4):55-61.
- [2] 徐宗学,叶陈雷.从“城市看海”到“城市看江”:极端暴雨情景下福州市洪涝过程模拟与风险分析[J].中国防汛抗旱,2021,31(9):12-20.
- [3] 邓卫东.京港澳高速南岗洼下凹段水患治理方案[J].中国给水排水,2018,34(10):66-70.
- [4] 刘家宏,梅超,刘宏伟,等.特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J].水科学进展,2023,34(2):172-181.
- [5] 孙立,张安然,杨震.城市内涝防治研究进展[J].北京规划建设,2025(2):89-94.
- [6] 许佳,丁超,张昕禹,等.基于复杂网络的城市内涝灾害应急管理研究综述[J].自然灾害学报,2024,33(3):1-16.
- [7] 陈吉升,尹丽丽,李祥锋,等.基于内涝数学模型的雨水与竖向规划优化研究[J].中国市政工程,2024(2):73-78;147.
- [8] 赵超辉,万金红,张云霞,等.城市内涝特征、成因及应对研究综述[J].灾害学,2023,38(1):220-228.
- [9] 柳发根,丘汶卉,李文钰.基于韧性治理理论的城市内涝治理路径研究——以郑州“7·20”特大暴雨灾害为例[J].中国西部,2022(2):47-56.
- [10] 赵丰昌,章林伟,高伟.海绵城市理念下城市内涝防治体系构建的探讨[J].给水排水,2021,57(8):37-44.
- [11] GB50014—2021 室外排水设计标准[S].
- [12] 邵先奎,王超,杨翠媛.城市排水管网数字化智能化运行维护系统实践研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(21):22-24.
- [13] 林琿,吴贤宇,潘家祎,等.中国城市洪涝实时预报研究:现状与挑战[J].测绘学报,2022,51(7):1306-1316.
- [14] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等.变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J].水利学报,2022,53(7):757-768;778.
- [15] 宋晓猛,徐楠涛,董子然.变化环境下城市洪涝风险评估与调控策略[J].水利发展研究,2025,25(1):56-64;85.
- [16] 苏晓乐,张宁.郑州市下垫面变化影响城市热环境的数值模拟[J].大气科学学报,2025,48(5):723-735.
- [17] 薛晓萌,李红晔,黄晓霞,等.基于高分遥感的城市内涝数值仿真与风险评价研究[J].遥感技术与应用,2024,39(4):971-986.
- [18] 徐宗学,叶陈雷,廖如婷.城市洪涝灾害协同治理:研究进展与应用案例[J].地球科学进展,2023,38(11):1107-1120.
- [19] 林琿,吴贤宇,潘家祎,等.中国城市洪涝实时预报研究:现状与挑战[J].测绘学报,2022,51(7):1306-1316.
- [20] 徐宗学,初祁,王昊,等.基于陆气耦合的城市雨洪模拟技术研究进展[J].北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(3):434-446.
- [21] 郑成成,龙小刚,胡广柱,等.基于离散元的高陡堆石边坡失稳过程模拟[J].水利水电科技进展,2021,41(6):92-98.
- [22] 周宏,刘俊,高成,等.我国城市内涝防治现状及问题分析[J].灾害学,2018,33(3):147-151.
- [23] 熊立华,闫磊,李凌琪,等.变化环境对城市暴雨及排水系统影响研究进展[J].水科学进展,2017,28(6):930-942.
- [24] 韩瑜,潘文峥.聚民意献良策稳字当头向未来——2022年全国两会应急管理和安全生产工作专题报道[J].中国安全生产,2022,17(3):8-31.
- [25] 杭侃.中国古代城市的防洪排涝[J].协商论坛,2021(8):56-59.
- [26] 唐由海,邱建.先秦时期城市选址理性实践与技术成就分析[J].西南民族大学学报(人文社科版),2017,38(11):181-187.
- [27] 郑太文,王婷婷,郑雨馨,等.重庆市沙坪坝区内涝风险评估[J].城市道桥与防洪,2025(9):39-45.
- [28] GB/T50805—2012 城市防洪工程设计规范[S].
- [29] GB50201—2014 防洪标准[S].
- [30] GB50318—2017 城市排水工程规划规范[S].
- [31] SL669—2014 防洪规划编制规程[S].
- [32] SL723—2016 治涝标准[S].
- [33] GB51079—2016 城市防洪规划规范[S].
- [34] GB51222—2017 城镇内涝防治技术规范[S].