

澳门地区水浸灾害仿真推演与防控效果分析

余 晓¹, 刘家宏¹, 李 文², 骆卓然³, 梅 超¹, 董莉榕⁴

(1. 中国水利水电科学研究院, 100038, 北京; 2. 亚洲仿真控制系统工程(珠海)有限公司, 519000, 珠海;

3. 华北电力大学, 102206, 北京; 4. 澳门科技大学, 999078, 澳门)

摘要:气候变化背景下, 滨海城市受潮位顶托、高度城镇化和高人口密度等因素叠加影响, 水浸灾害频发, 显现出水浸灾害防控能力不足、决策分析智能化程度较低等问题, 开展滨海城市水浸灾害仿真推演研究具有重要现实意义。本文以澳门地区为研究对象, 构建了滨海城市水浸灾害仿真推演系统, 开展了重点工程防控效果的仿真推演分析。该系统具有城市水浸灾害模拟、三维视景推演等功能, 通过了“天鸽”台风历史水浸灾害事件的系列测试验证, 具有较高的模拟精度和三维可视化呈现能力。对新建挡潮闸、加高围堤等重点工程防控效果的仿真推演分析表明: 挡潮闸的修建有效阻挡了闸外潮水, 可显著减少澳门半岛西侧水浸灾害的影响, 但澳门半岛东北侧部分区域仍然存在水浸现象; 在修建挡潮闸的基础上, 加高澳门半岛重点区域围堤后, 澳门半岛东北部区域仅有零星的积水, 最大积水深度不足 10 cm。修建挡潮闸、加高围堤的组合, 能有效防控澳门半岛水浸灾害风险。本研究可为滨海城市水浸灾害预防、应对和缓解提供科学化、系统化、可视化的仿真平台, 能够为滨海城市水浸灾害科学管控提供参考和借鉴。

关键词: 滨海城市; 水浸灾害; 数值模拟; 仿真推演; 澳门半岛; 数字孪生水利; 洪涝灾害

Simulation deduction, prevention and control effectiveness analysis of waterlogging disasters in Macao

YU Xiao¹, LIU Jiahong¹, LI Wen², LUO Zhuoran³, MEI Chao¹, DONG Lirong⁴

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Asia Simulation

Control Systems Engineering (Zhuhai) Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 3. North China Electric Power

University, Beijing 102206, China; 4. Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China)

Abstract: Against the backdrop of climate change, influenced by factors such as tidal backwater, rapid urbanization and high population density, coastal cities are plagued by frequent waterlogging disasters and show the problems of inadequate prevention and control capacity of waterlogging disasters and low intelligence level of decision-making analysis. Therefore, carrying out research on the simulation deduction of waterlogging disasters in coastal cities is of practical significance. By taking Macao as the research object, this study constructs a simulation deduction system for waterlogging disasters in coastal cities and carries out simulation deduction analysis on the prevention and control effectiveness of key projects. This system features functions such as urban waterlogging disaster simulation and 3D visual scenario deduction. By conducting a series of tests and validations based on historical waterlogging disaster events from Typhoon Hato, the system demonstrates high simulation accuracy and robust 3D visualization capabilities. Simulation deduction analysis of the prevention and control effectiveness of key projects including new tidal barrages and raised embankments

收稿日期: 2025-08-29 修回日期: 2026-01-09

作者简介: 余晓, 高级工程师, 主要从事水力学及河流动力学相关研究工作。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0205200); 国家自然科学基金项目(52509016)。

reveals that while the construction of tidal barrages effectively blocks external tidal water and significantly reduces the influence of waterlogging disasters on the western side of the Peninsula of Macao, waterlogging still occurs in some areas on the northeastern side of the peninsula. After constructing the tidal barrages and raising the embankments in key areas of the peninsula, the northeastern part of it exhibits only isolated ponding with the maximum ponding depth less than 10 cm. The combination of constructing tidal barrages and raising embankments can effectively prevent and control the risk of waterlogging disasters in the Peninsula of Macao. This study can provide a scientific, systematic, and visual simulation platform for the prevention, response, and mitigation of waterlogging disasters in coastal cities. It serves as a reference for the scientific management and control of such disasters in coastal cities.

Keywords: coastal city; waterlogging disaster; numerical simulation; simulation deduction; Peninsula of Macao; digital twin water conservancy; flood disaster

中图分类号: TV122 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)02-0053-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.02.007

一、引言

根据国际紧急灾难数据库全球洪水数据, 2000—2023年全球发生洪涝灾害3974次, 约18亿人次受到影响, 其中内陆洪涝和滨海城市水浸灾害居全球各类灾害之首(在我国粤港澳大湾区等地的滨海城市, 将受暴雨、台风、风暴潮等因素影响, 城市积水超出排水系统承载能力, 或因海水倒灌等造成城市低洼区域被淹的灾害现象称为“水浸灾害”)。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第六次评估报告指出, 21世纪全球许多地区的强降雨和洪水将加剧且更加频繁, 尤其是滨海城市正面临着极端暴雨、风暴潮和海平面上升带来的巨大风险。在全球变暖、海平面上升和快速城市化等复杂背景下, 滨海城市水浸灾害风险日益加剧, 其水浸灾害发生频率和严重程度明显高于内陆城市。严重的水浸灾害给滨海城市造成极大的社会和经济损失, 已成为危害城市公共安全、制约经济社会发展的重要因素。

国内外学者从致灾机理、灾害模拟、损失评估、灾害防控等多角度开展研究, 在应对城市水浸灾害过程中已形成了较为完善的应对机制和防控措施。但滨海城市的水浸灾害影响因素众多、问题异常复杂、治理难度大, 近年来频繁发生的水浸灾害暴露出相关管理能力不足、决策分析智能化程度较低等问题, 亟须开展滨海城市水浸灾害仿真推演与防控效果分析等相关研究。

根据2010—2024年《中国海洋灾害公报》的统计数据, 我国沿海省份每年发生7~8次由台风和风暴潮引发的、较为严重的水浸灾害事件, 粤港澳大湾区多个

滨海城市近年来遭受严重的水浸灾害, 较为典型的有2023年“9·7”暴雨香港特别行政区和深圳市的水浸灾害事件、2017年“天鸽”台风以及2018年“山竹”台风澳门特别行政区水浸灾害事件等, 均造成了重大经济损失。澳门作为粤港澳大湾区的中心城市之一, 同时面临潮位顶托、高度城镇化和高人口密度等因素的叠加影响, 在滨海城市水浸灾害研究方面具有典型性和代表性。本文以澳门为研究区, 构建城市水浸灾害仿真推演系统, 开展不同水浸灾害防控工程的仿真推演, 分析各种措施的水浸灾害防控效果, 以期为滨海城市水浸灾害科学管控提供一定参考和借鉴。

二、研究区概况

澳门位于珠江口西岸, 由澳门半岛、氹仔岛及路环岛构成, 陆地总面积33.3 km², 总人口约68.7万人, 人口密度高居全球第二。澳门地处亚热带季风气候区, 区域多年平均气温约22.4℃, 多年平均年降雨量为1986.4 mm, 是华南沿海多雨地区之一, 4—9月降雨量占全年的84%。7—9月台风、暴雨等灾害性天气多发, 其降雨具有时间短、强度大的特点。根据国家标准《降水量等级》(GB/T 28592—2012)对澳门降雨数据的统计分析, 澳门多年平均的暴雨(日降雨量≥50 mm)、大暴雨(日降雨量≥100 mm)及特大暴雨(日降雨量≥250 mm)的发生天数分别为10.2 d、2.9 d和0.5 d, 每年暴雨降雨量占年降雨量的一半左右。

澳门作为粤港澳大湾区四个中心城市之一, 是我国遭受台风影响最严重的滨海地区之一。区域地势南高北低, 丘陵主要分布于南部的氹仔岛和路环岛, 澳

门半岛北部及沿海区域则以平地为主。作为土地资源稀缺的滨海地区,澳门通过多次填海工程扩展了土地面积,目前近70%的土地由填海而成,地势低洼,海拔相对较低。特别是澳门半岛西部,超过70%的土地高程在5 m以下,其内港海旁区地势尤其低洼,最低海拔约-1.8 m,极易受水浸灾害影响。

澳门海拔高程较低,加之高度城镇化、高人口密度等区域特征,水浸灾害风险高,近年频繁遭受“天鸽”(2017年)、“山竹”(2018年)、“苏拉”(2023年)等台风暴雨导致的水浸灾害影响,造成严重经济社会损失。

三、滨海城市水浸灾害仿真推演系统构建

仿真推演系统是在系统工程理论、仿真实验和技术支持下,深入理解、分析被仿真对象和系统的技术体系。水浸灾害仿真推演系统包含被仿真对象和系统的全部物理过程的仿真模型体系,通过将对象数字化,创建其虚拟孪生体,实现不同情景下水浸过程的模拟分析与可视化表达。滨海城市水浸灾害仿真推演系统可对极端天气条件下的降雨径流、潮位变化、城市排水响应等进行动态模拟及实时数字仿真结果的可视化呈现,评估和预测不同情景下的水浸灾害风险,增强决策者对复杂水浸灾害情况的认知能力,优化防控策略,提高城市灾害管理的智能化水平。

本研究结合澳门水浸灾害防控实际需求,选取水浸灾害高发的澳门半岛构建澳门水浸灾害仿真系统(见图1),该系统主要包含数值模拟、三维底座、仿真

推演三部分。

1. 数值模拟

数值模拟主要包括产汇流计算、水动力求解、耦合分析、水浸模拟等部分,耦合了水文过程、一维水动力过程与二维水动力过程。其中降雨产流过程采用径流曲线法(SCS法),管网模块采用一维圣维南方程进行水动力模拟,地表水浸过程采用二维浅水方程进行水动力模拟。该模型可对城市排水管网的排水能力进行评估,并预报在不同降雨和潮位条件下的积水情况;还能够对历史和设计暴雨情景下的水浸灾害进行模拟,为城市规划、防洪减灾措施的制定提供科学依据。

数值模型的输入涵盖了一系列水文、气象和地理信息参数,主要包括降雨强度、地形数据、土地利用类型、土壤类型、植被覆盖度、排水管网布局等参数,这些输入参数共同决定了模型的模拟精度和可靠性(见图2)。模型的输出主要包括一系列关键的水文响应指标,例如积水总量、淹没深度、淹没面积、淹没时间和流速等,这些输出信息对评估城市水浸灾害风险、制定防洪措施和进行灾害预警具有重要意义。

2. 三维底座

三维底座主要包括通信与数据处理、视景仿真驱动和三维视景建模等内容,三维底座构成了一个综合性的仿真推演平台,集成了地理信息系统技术、三维数字模型、实时数据驱动以及视景仿真技术等多项技术,其作用在于提供一个多维度、多场景的可视化系统,全

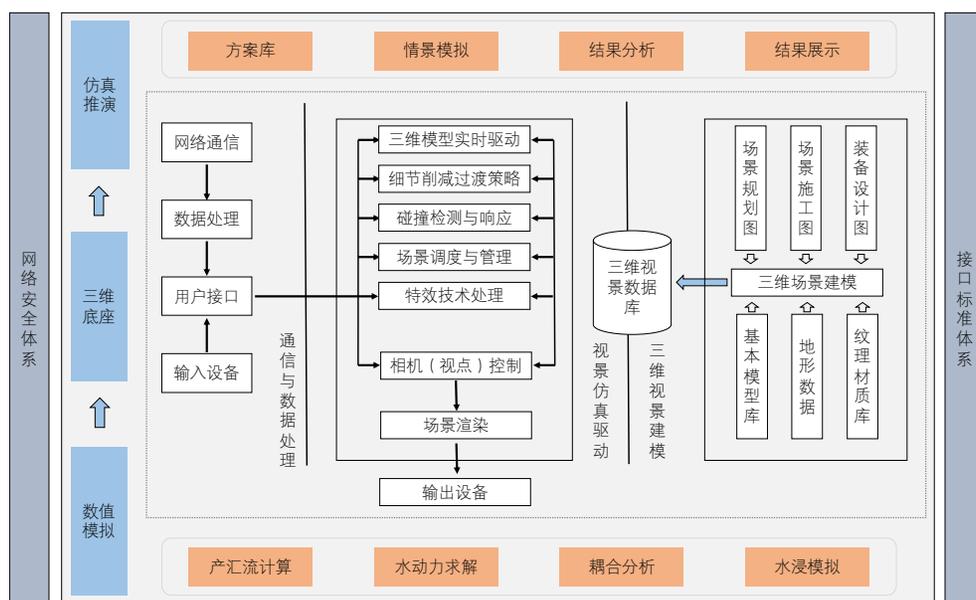


图1 水浸灾害仿真系统总体架构

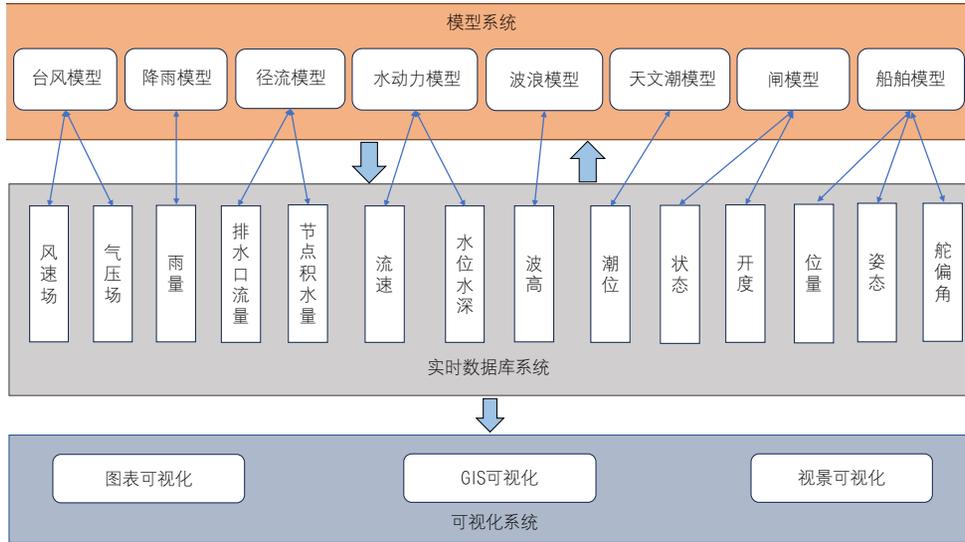


图2 系统内多类型数学模型融合运行示意

面展示水浸过程和结果。

该部分利用GIS等地理信息系统软件对管网数据、地形数据和土地利用数据进行预处理,采用自主研发的AFVisual视景支撑平台作为核心开发工具,将高精度地形、建筑物、数值模拟结果等集成到视景支撑平台,生成三维数字模型。这一模型不仅能反映地表水文过程,还能模拟建筑物、地形等对水流的影响,从而提供更为直观和详细的水浸灾害模拟结果。

3. 仿真推演

仿真推演的作用是提供一个可视化平台进行三维视景推演,能够实时观察数字仿真的效果。该部分主要包括方案库、情景模拟、结果分析、结果展示等四方面内容。该部分是基于精细的三维数字模型,实现对澳门城市地形、水文特征及排水系统的高精度仿真,可对极端天气条件下的降雨径流、潮位变化、城市排水响应等进行动态模拟及实时数字仿真结果的可视化呈现,从而为决策提供有效的科学依据。

澳门水浸灾害主要发生在澳门半岛北部及沿海区域,因此本文选取澳门半岛构建澳门城市水浸灾害仿真系统(见图3),该系统所需相关数据主要来自澳门地图绘制暨地籍局(包括地形、土地利用等数据)、澳门土地工务局(包括管网高程、埋深、检查孔和排水口位置以及管道直径、长度和位置)、澳门气象暨地球物理局(包括台风期间逐小时降雨、潮汐数据),其中地形数据的平面精度为2 m,高程精度为0.01 m。

本文构建的澳门城市水浸灾害仿真系统是基于数值模拟模型在仿真推演平台上的融合运行,仿真推演平台支持超实时仿真,必要时可以2~10倍的速度进

行超实时仿真计算。本系统通过反复试验,综合考量仿真区域面积、系统计算资源等多种因素,确定“天鸽”等典型台风工况采用2倍速仿真运行。

4. 系统的测试验证

选取2018年8月“天鸽”台风期间实测数据和系统的数值模拟结果进行比对,作为本系统的测试验证。首先,选取“天鸽”台风期间澳门半岛内港北站、下环街站为验证点,观察验证点的仿真推演水位变化与实测数据的相符性(见图4)。对比发现,两个站点的仿真水位(红色曲线)与实测数据(黑色曲线)的变化趋势一致,数值也基本相符。

对台风期间最大水浸面积等进一步对比分析。“天鸽”台风期间澳门水浸区域主要集中在澳门半岛西侧内港区和东北侧,对比西侧内港实际水浸区域与仿真最大水浸区域发现,实测、仿真的最大水浸面积分别为3.4 km²、3.37 km²,两者之差0.03 km²,仿真的水浸面积、分布与澳门有关部门统计结果较为相符。

通过上述仿真结果与实际情况的比较可知,该系统的仿真结果与现实情况高度一致,能够良好再现澳门的水浸变化过程,系统具有较高的模拟精度和准确的可视化呈现能力。

四、重点工程防控效果的仿真推演分析

基于对澳门城市水浸灾害的深入调研发现,澳门半岛大部分为填海而成,地势平缓且整体海拔偏低,受水浸灾害影响严重。本文重点梳理了澳门半岛现阶段规划实施的相关重点防控工程,对其建成后的防控效果进行仿真推演。现阶段澳门半岛的重点工程主要包

括内港挡潮闸、重点区域加高围堤等。

“天鸽”台风是自1953年有气象记录以来澳门遭受的最为严重的水浸灾害事件之一,具有不可替代的极端代表性。因此选取“天鸽”台风为代表性工况,分析“天鸽”台风期间现状条件、修建内港挡潮闸、重点区域加高围堤等情景的防控效果。

1. 内港挡潮闸工程防控效果仿真推演

澳门半岛西侧内港海旁区是澳门半岛最低洼的区域,大部分地面高程不足2 m,且沿岸无连续的防洪工程。受天文大潮、风暴潮等影响,该区域常因海水倒灌发生水浸,是澳门水浸灾害的重灾区。据调查,内港部分地区在每月天文大潮时可能出现约0.2 m的水浸;近100年来澳门发生13次潮位超过2 m的风暴潮事件,其中“天鸽”台风引发的风暴潮高程达3.78 m,引发了严重的水浸灾害。“天鸽”台风期间最高潮位时澳门半岛西侧水浸灾害仿真效果(现状条件)见图5。

已有研究表明台风期间澳门半岛西侧区域高潮位顶托城市排水系统,导致排水效率显著降低,是区域水浸灾害发生的主要原因。为缓解内港海旁区的水浸灾害,澳门特别行政区政府规划在澳门半岛西南侧、澳门半岛与珠海之间的湾仔水道修建内港挡潮闸。根据相关规划,挡潮闸设计标准为200年一遇,设计潮位3.85 m(平均海平面),挡潮闸的修建可有效抵御风暴潮与天文大潮叠加形成的高水位,防止海水倒灌,保障澳门半岛西侧内港及低洼地区免受水浸灾害(见图6)。

为评估该工程修建后对澳门半岛水浸灾害的防控效果,对“天鸽”台风条件下现状条件和修建挡潮闸两种情景进行仿真推演,对比分析两种情景下澳门半岛的水浸过程,如图6(a)、图6(b)、表1所示。修建挡潮闸后澳门半岛西侧的淹没面积、淹没程度显著减小,内港10个验证点的最大积水深度由2.46 m减小至0.10 m,其中有4个验证点不再发生水浸,其余6个验证点中5个点的积水深



图3 澳门城市水浸灾害仿真系统效果示意

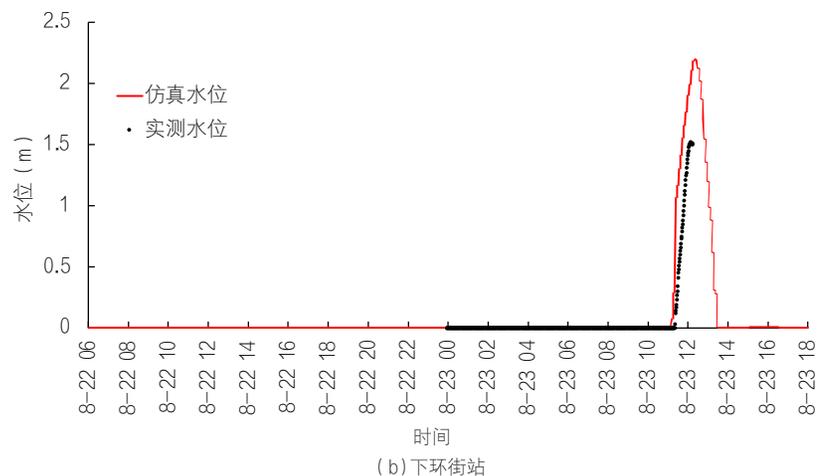
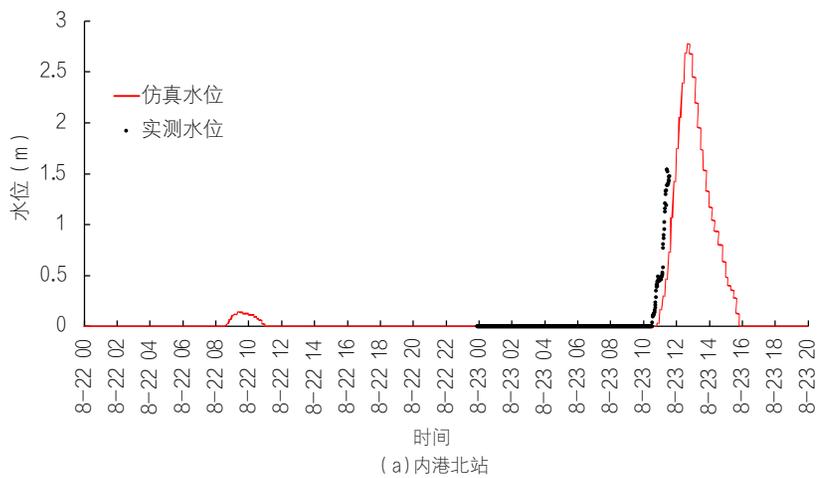


图4 仿真推演水位与实测数据对比

度小于0.05 m。

由此可见,挡潮闸可有效阻挡闸外潮水,确保澳门半岛西侧内港海旁区的安全。但修建挡潮闸后,澳门半岛东北侧部分区域仍然发生水浸,其原因主要是澳门半岛东侧、南侧围堤高度不够,潮水漫溢。

2. 重点区域加高围堤工程防控效果仿真推演

根据澳门特别行政区政府规划,内港挡潮闸不能完全解决区域的水浸问题,因此规划对澳门半岛西侧澳门内港段以及澳门半岛东部、南部等重点区域的部分围堤进行加高,提高防御能力。规划围堤加高工程



图5 “天鸽”台风期间最高潮位时澳门半岛西侧水浸灾害仿真效果(现状条件)

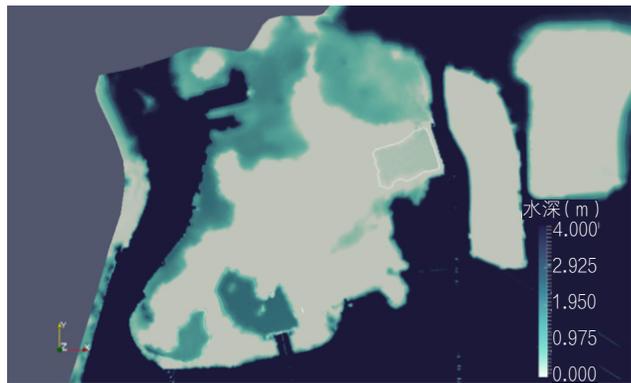
实施后围堤最低高程为3.2 m(平均海平面)。

仿真推演了修建挡潮闸、加高围堤后澳门半岛“天鸽”台风期间的水浸过程。仿真推演发现,加高围堤后澳门半岛水浸范围进一步缩小,区域仅有零星的积水,最大积水深度不足0.10 m。

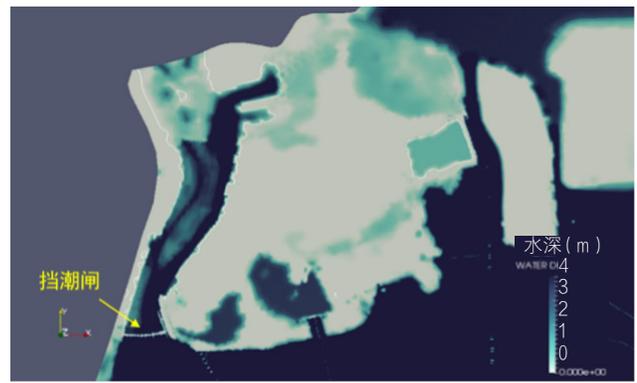
由此可见,重点区域的加高围堤能够显著增强澳门半岛南侧和东侧的防护能力,修建挡潮闸、加高围堤的组合能有效缓解澳门半岛水浸灾害的发生(见图7)。

五、结论

本文以澳门为研究区构建了滨海城市水浸灾害仿真推演系统,开展了新建挡潮闸、加高围堤等重点工程防控效果的仿真推演分析。滨海城市水浸灾害仿真推演系统具有城市水浸灾害模拟、三维视景推演等功能,通过了“天鸽”台风历史水浸灾害事件的系列测试验证。验证结果显示,该系统的仿真结果与现实情况高度一致,能够良好再现澳门的水浸变化过程,其中两个验证站的仿真水位与实测数据的变化趋



(a) 现状条件



(b) 修建挡潮闸

图6 不同情景下澳门半岛水浸过程示意

表1 内港区陆地验证点仿真水位对比

监测点	现状无挡潮闸最高水深(m)	有挡潮闸最高水深(m)	水位差(m)	水位减小程度(%)
下环街站	2.05	0.00	-2.05	100.0
内港站	1.55	0.00	-1.55	100.0
内港北站	2.46	0.02	-2.44	99.2
康公庙站	2.04	0.00	-2.04	100.0
花地玛站	1.88	0.01	-1.87	99.5
永乐戏院站	1.82	0.10	-1.72	94.5
光复街站	1.61	0.01	-1.60	99.4
青洲区站	2.07	0.00	-2.07	100.0
林茂塘站	2.08	0.01	-2.07	99.5
司打口站	2.11	0.03	-2.09	99.1

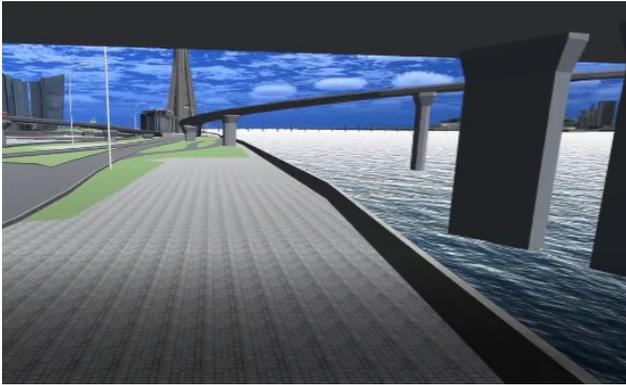


图7 “天鸽”台风期间最高潮位时澳门半岛东南侧围堤内外仿真效果(修建挡潮闸+加高围堤)

势一致,数值也基本相符;“天鸽”台风期间典型区域的水浸过程与实际过程基本一致;澳门半岛的水浸面积与同期的实测水浸面积差值为 0.03 km^2 ,差值占比不足1%。对新建挡潮闸、加高围堤等重点工程防控效果的仿真推演研究表明:挡潮闸的修建有效阻挡了闸外潮水,可显著降低澳门半岛西侧水浸灾害的影响,确保澳门半岛西侧的安全,但澳门半岛东北侧部分区域仍然存在水浸现象;在修建挡潮闸的基础上,对澳门半岛重点区域进行围堤加高后,澳门半岛东北部区域仅有零星的积水,最大积水深度不足 0.10 m ,修建挡潮闸、加高围堤的组合能有效缓解澳门半岛水浸灾害的发生。

本文构建的滨海城市水浸灾害仿真系统能够实现城市水浸灾害的高精度模拟和可视化表达,为应对滨海城市水浸灾害提供了系统可视的仿真平台,可为滨海城市的可持续发展和安全保障提供技术支撑。

参考文献:

- [1] Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. International Disaster Database (EM-DAT) [DB]. 2023. <https://www.emdat.be>.
- [2] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [3] OPPENHEIMER M, GLAVOVIC B C, HINKEL J, et al. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities [EB/OL]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, (2019-06-14) [2025-08-05]. <https://www.ipcc.ch/srocc/>.
- [4] 许炜宏,蔡榕硕.不同气候情景下中国滨海城市海岸极值水位重现期估算[J].海洋通报,2022,41(4):379-390.
- [5] 蔡榕硕,许炜宏.未来中国滨海城市海岸洪水灾害的社会经济损失风险[J].中国人口·资源与环境,2022,32(8):174-184.
- [6] EDMONDS D A, CALDWELL R L, BRONDIZIO E S, et al. Coastal flooding will disproportionately impact people on river deltas[J]. Nature Communications, 2020, 11(1):4741-4748.
- [7] XU H S, XU K, LIAN J J, et al. Compound effects of rainfall and storm tides on coastal flooding risk[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, 33(7):1249-1261.
- [8] 李超超,程晓陶.城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J].灾害学,2019,34(2):57-62.
- [9] 刘闯,刘家宏,鲁佳慧,等.城市洪涝损失评估与应对措施分析——以广州市为例[J].中国水利水电科学研究院学报,2022,20(3):231-236.
- [10] 徐奎,庄云超,马超,等.沿海城市复合洪涝模拟物理模型研究[J].水利学报,2024,55(11):1309-1332.
- [11] 袁竹,高亮,张文生,等.风暴潮与极端暴雨叠加下滨海城市内涝防控方法研究[J].水资源保护,2024,40(4):56-64.
- [12] 卢陈,胡晓张,吴尧,等.深圳河流域2023年“9·7”特大暴雨分析及洪涝治理思考[J].中国防汛抗旱,2024,34(1):24-28.
- [13] 张睿.复杂网络视角下滨海高密度城区雨洪韧性测度与优化研究——以澳门高密度城区为例[D].天津:天津大学,2022.
- [14] DONG L R, LIU J H, ZHOU J J, et al. The influence of astronomical tide phases on urban flooding during rainstorms: Application to Macau [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 56, 101998.
- [15] 珠海市水务局.澳门内港挡潮闸工程社会稳定风险分析公示 [EB/OL]. (2019-10-12) [2025-08-05]. https://sswj.zhuhai.gov.cn/zwgk/tzgg/gsgg/content/post_2379070.html.
- [16] 澳门特别行政区立法会.土地及公共批给事务跟进委员会第2/VI/2019号报告书 [EB/OL]. (2019-08-06) [2025-08-05]. <https://www.al.gov.mo/uploads/attachment/2019-08/856195d5232c8a962a.pdf>

责任编辑 李卢祎