

风暴潮与极端暴雨叠加作用下九龙半岛内涝防控方法

袁竹¹, 高亮², 张文生¹, 李锦辉^{1,3}

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518005; 2. 澳门大学科技学院, 澳门 999078;
3. 广东省土木工程智能韧性结构重点实验室, 广东 深圳 518005)

摘要:考虑城市地形、建筑、排水管网要素,构建风暴潮与极端暴雨叠加作用下的九龙半岛内涝灾害模型,对多种内涝防控方法进行了量化评估。结果表明:构建的内涝灾害模型可准确反映不同位置淹没范围及水深等关键物理量;止回阀与挡水板能够通过切断海水倒灌渠道削弱风暴潮对城市内涝的放大效应,1000年一遇风暴潮与极端暴雨叠加作用下,西九龙深水埗钦州街附近区域加装止回阀后管网溢流率下降14.8%、净排水量增加5.7%;八号货柜码头加装1 m高挡水板可使淹没面积降低26%;地下蓄洪池通过汇集与存储地表径流减轻周边淹没程度,降雨重现期为100 a条件下界限街游乐场淹没面积降低34%。

关键词:风暴潮;极端暴雨;叠加效应;城市内涝防控方法;九龙半岛

中图分类号:TV122⁺.1

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)04-0056-09

Waterlogging prevention and control methods in Kowloon Peninsula under superimposed effect of storm surge and extreme rainstorm//YUAN Zhu¹, GAO Liang², ZHANG Wensheng¹, LI Jinhui^{1,3} (1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518005, China; 2. Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macau 999078, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Intelligent Ductile Structures in Civil Engineering, Shenzhen 518005, China)

Abstract: Taking the Kowloon Peninsula of Hong Kong in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as the study area, considering the urban terrain, buildings, and drainage network elements, a waterlogging disaster model under the superposition of storm surge and extreme rainstorm was constructed, and a variety of waterlogging prevention and control methods were quantitatively evaluated. The results show that the waterlogging disaster model can accurately reflect key physical quantities such as the extent of inundation and water depth at different locations. Check valves and baffles can weaken the amplification effect of storm surges on urban waterlogging by cutting off seawater backflow channels. Under the superposition of a 1 000 a return period storm surge and extreme rainstorms, the overflow rate of the pipeline network decreases by 14.8% and the net drainage volume increases by 5.7% after the addition of check valves in area near Yenchow Street, Shamshuipo, West Kowloon. The addition of a 1 m baffle at Container Terminal No. 8 reduces the inundated area by 26%. Underground flood storage ponds reduce the level of inundation around the perimeter by pooling and storing surface runoff, which reduces the inundation of the Boundary Street Playground by up to 34% under the condition of a 100 a rainfall return period rainfall event.

Key words: storm surge; extreme rainstorm; superimposed effect; urban waterlogging prevention and control method; Kowloon Peninsula

城市内涝灾害是防洪减灾领域的热点问题之一,学术界对其进行了大量研究,建立了各种模型模拟城市地区的地表径流、下水道流和耦合流。从我国的城市特点看,城市内涝具有明显的地域性,对于山前平原城市,如济南,山区坡度大,降雨的汇流时

间较短,发生短时强降雨时地势低洼的地方容易出现道路行洪现象;对于沿江城市,如南京、武汉,城市内涝容易受到外江水位的影响;对于滨海城市,如珠海,排水管网容易受到下游潮位的顶托作用,从而进一步加剧内涝的严重程度。多位学者基于 Infoworks

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3001002);国家自然科学基金重点项目(52239008)

作者简介:袁竹(1997—),男,硕士研究生,主要从事灾害风险分析研究。E-mail:1412823253@qq.com

通信作者:李锦辉(1978—),女,教授,博士,主要从事灾害风险分析研究。E-mail:jinhui.li@hit.edu.cn

ICM、MIKE FLOOD、SWMM 等模型研究了北京、山西、陕西、合肥等内陆省市的内涝情形,研究方向多集中在单一灾因素下的城市内涝形成过程和风险评估^[1-4]。部分学者运用 InfoWorks 模型、GIS 等研究了沿江城市极端暴雨下的内涝情形,但没有考虑外部江面水位对城市内涝的影响^[5-6]。一些学者使用 Delft3D、TELEMAC-2D、Infoworks ICM-2D、SWMM-ADCIRC 等模型针对滨海城市的复杂情况进行了研究,聚焦气候变化下海平面上升、台风路径等对滨海城市的影响,从而评估其内涝风险^[7-12]。Qiang 等^[12-13]基于 FLO-2D 对滨海城市的内涝模拟进行了研究,取得了良好的效果。综上所述,多种方法被应用到内陆、沿江、滨海城市的内涝模拟中,但主要侧重单一诱发因素,目前还缺乏多灾种叠加下内涝防控方法研究。

近年来,极端天气频繁发生,联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)发布的第六次评估报告中指出:受自然变率和人类活动共同影响,气候变化的速率明显加快,极端天气和气候异常事件呈现增多、增强趋势,尤其是沿海城市正面临着台风风暴潮、暴雨内涝和海平面上升带来的巨大风险。沿海城市台风风暴潮、极端降雨和上游来水等多致灾因子叠加,极易造成严重的城市内涝灾害^[14]。由于特殊的地理位置和气候,粤港澳大湾区风暴潮灾害易发频发。影响大湾区的热带气旋年总频数最多时可达 11 个(1953 年、1967 年、1974 年),平均每年有 1.08 个热带气旋直接在大湾区登陆,2010 年以来影响大湾区的强台风以上级别频数增加趋势明显,各站点历年最高潮位也呈增加趋势^[15]。广东的风暴潮主要由台风形成,2018 年广东风暴潮灾害直接经济损失达 23.70 亿元^[16]。风暴潮与极端暴雨的联合作用导致大湾区沿海城市的内涝风险不断增加^[17-18]。因此,研究风暴潮与极端暴雨叠加作用下滨海城市内涝防控方法和提升灾害应对能力已成为我国沿海城市水安全和可持续发展的迫切要求^[19]。

1 研究区概况

香港是粤港澳大湾区的重要组成部分,地理坐标为 22°08'N ~ 22°35'N、113°49'E ~ 114°31'E,位于中国南部、珠江口以东,西与澳门相望,北与深圳相邻,属亚热带季风气候,全年雨量充沛。香港陆地面积 1 113.76 km²,海域面积 1 641.21 km²,总人口为 733.32 万人(2018 年),是世界上人口密度最高的地区之一。香港位于台风频发的西北太平洋沿岸,每年都有热带气旋影响或者登陆,这也是沿岸居民

和生态环境所面临的最不利的自然灾害风险。同时,由于香港属亚热带季风气候,气温和雨量具有明显的季节变化,据香港天文台统计香港 79% 的雨量集中在 5—9 月,暴雨是香港最常见的自然灾害之一^[20]。夏秋两季频繁发生的风暴潮灾害和暴雨灾害使得香港具有较高的城市内涝灾害风险,为加强应对,香港采取了多项举措以降低发生严重内涝灾害的风险。本文以香港九龙半岛为研究区,建立可以考虑风暴潮与极端暴雨叠加作用的城市内涝模型,并深入研究了缓解内涝的工程措施,以期为粤港澳大湾区的城市内涝灾害防治提供参考。

九龙半岛位于香港中南部,地理坐标为 114°07'N ~ 114°14'N、22°17'E ~ 22°22'E,东、南、西三面被维多利亚港包围,隔海与香港岛相望,人口数约占香港总人口的 30%,年降水量 2 224.7 mm。九龙半岛面积约 53.46 km²,最高处为位于北部的狮子山,海拔约 600 m,低洼地区位于山脚下,在暴雨期间容易发生内涝灾害。维多利亚港位于九龙半岛南侧,设有葵涌、鲗鱼涌两个潮位站进行潮位数据观测,香港天文台公布了鲗鱼涌潮位站的部分观测数据。九龙半岛地理位置如图 1 所示。

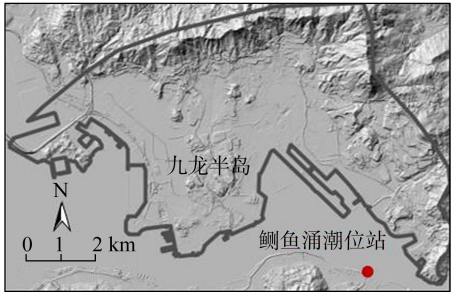


图 1 九龙半岛地理位置

Fig.1 Geographical location of Kowloon Peninsula

2 研究方法

2.1 控制方程

现代都市中地下排水系统是地表径流排放的重要组成部分,城市排水管网通过检查井和排水口分别与城市地表和大海进行水量交换。由于一、二维水动力模型的耦合在城市内涝中兼具可靠性和实用性,本文采用二维地表漫流模型和一维管流模型耦合的方式搭建风暴潮与极端暴雨作用下的内涝灾害模型。一维管流模拟中的水动力模型将管网中的水流视为非恒定流,用一维圣维南方程组计算,并利用 Abbott 六点隐式差分交替格式求解,计算公式为

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (2)$$

式中: Q 为管道流量; A 为过水断面面积; x 为管道长度; t 为时间; g 为重力加速度; h 为管道水位深度; S_0 为管道坡度; S_f 为水力坡度。

二维地表漫流模拟中,对于水平尺度远大于垂向尺度的浅水流动,通常沿垂向将三维流动的控制方程积分,可得垂向平均的二维流动控制方程。选择浅水方程^[21]作为控制方程,计算公式为

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \delta}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} -$$

$$\frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \delta}{\partial y} + \frac{gq \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} -$$

$$\frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xy}) \right] + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial \rho_a}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

式中: h 为水深; p 为 x 方向上的单宽流量; q 为 y 方向上的单宽流量; C 为谢才系数; ρ_w 为水密度; ρ_a 为三维扰动密度的垂向平均值。

一维管流模型基于 MIKE CS 模块搭建,二维地表漫流模型通过 MIKE 21 结构化网格构建,对每个网格赋予高程、渗透系数和曼宁系数。通过 MIKE FLOOD 模块城市连接功能实现一维管流模型与二维地表漫流模型的耦合。城市连接用来描述城市地面水流和管网水流通过检查井的相互影响,要求 MIKE 21 至少有一个网格单元与 MIKE CS 的检查井相连^[22]。风暴潮与极端暴雨叠加作用下内涝灾害模型如图 2 所示。

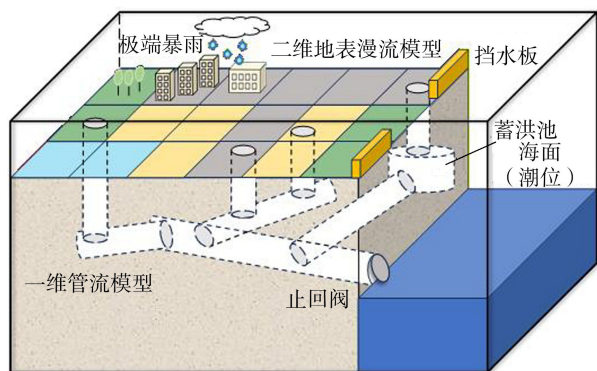


图 2 内涝灾害模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of waterlogging disaster model

2.2 研究数据

地表高程数据是分析城市内涝积水情况的基础,采用香港地政署公开数据 (<https://data.gov.hk/>),该数据以 5 m×5 m 网格格式展示地形。参照了 Yang 等^[23]研究将土地利用类型分为 3 类,建筑物和街道矢量数据以及土地利用类型数据源自 OpenstreetMap 网站公开数据 (<https://www.openstreetmap.org/>)。高清卫星影像资料源自空间数据共享平台 (<https://portal.crsdi.gov.hk/>),城市地下管网数据源自香港渠务署公开数据 (<https://www.map.gov.hk/gm/>),包括 815 个雨水井、831 根排水管(其中方管 345 根、圆管 486 根)、60 个排水口。潮位数据和实测降雨过程线数据源自香港天文台 (<https://www.hko.gov.hk/>)。内涝灾害模型数据如图 3 所示。

2.3 模型构建

数字高程模型对洪水演进具有重要影响^[24-25],本文对照高清卫星影像资料修正了异常高程数据,以减小高架桥、植被等造成的误差。通过加高、降低地表高程的方式考虑城市建筑和道路对内涝演进的影响^[26]。采用 ArcMap 工具结合高清卫星影像资料对建筑等矢量数据进行了校正,建筑修正后效果如图 4 所示。据研究,城市内涝模拟采用 10~30 m 的网格分辨率能够取得令人满意的结果^[27-28],更高分辨率的网格并不一定取得更高质量的模型输出^[29],故本文按照 15 m×15 m 划分网格,模型共包括 488 250 个结构化网格。因糙率及渗透系数对于内涝演进有重要影响,He 等^[20,30]建立了香港岛二维地表漫流模型,本文参照其研究成果并进行模型率定,率定后植被、建设用地、城市路面糙率(曼宁系数)分别为 0.40、0.03、0.04,饱和渗透系数分别为 16、2.6、0.3 mm/h。基于 MIKE 软件中 MIKE CS 一维管网功能建立排水管网拓扑数据。地下管道的材料决定了管道的粗糙程度,默认九龙半岛地下管道均为光滑的混凝土材质,参照 MIKE 操作手册将管道曼宁系数设置为 0.012。

2.4 模型验证

由于研究区面积不大,降雨空间变异性较小,故假设降雨分布均匀。Gao 等^[13]的研究表明,香港 5 km 范围内的降水量高度相关。为验证建立的风暴潮与极端暴雨作用下内涝灾害模型,选取 4 场发生在九龙半岛的历史降雨事件,将实测降雨过程线和边界水位输入模型,对比淹没情况模拟值与实测值。4 场降雨事件采用分钟级降雨数据,分别为:①2008-06-07 特大暴雨灾害,40 h 内累积降水量达到 449 mm,香港天文台发出最高黑色暴雨警告,降雨期间鲗鱼涌潮位站录得日潮位均值约 1.31 m;②2010-07-22 暴雨灾害,18 h 累积降水量 127 mm,降

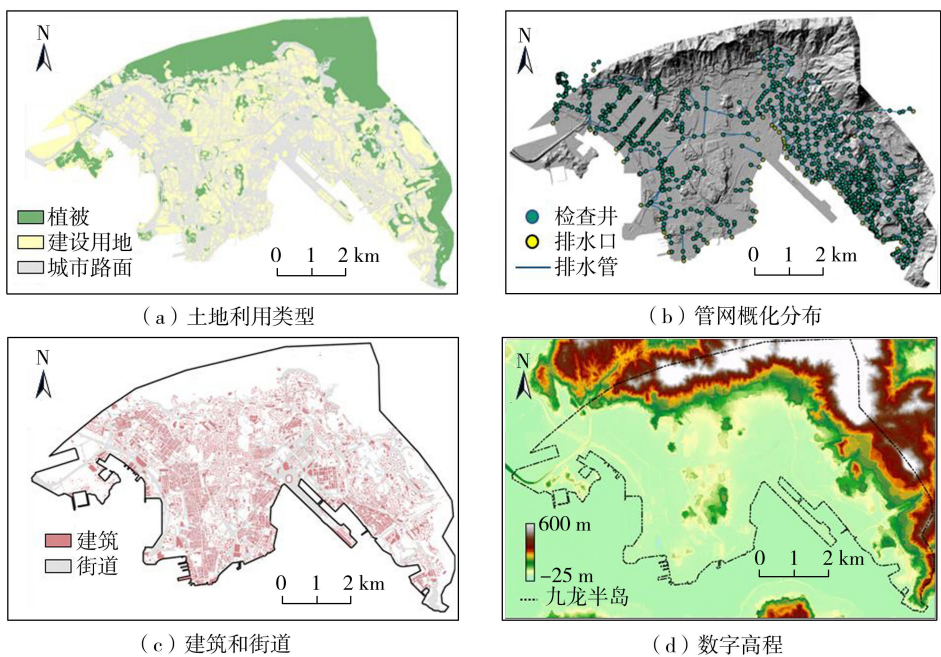


图3 内涝灾害模型数据
Fig.3 Data of waterlogging disaster model

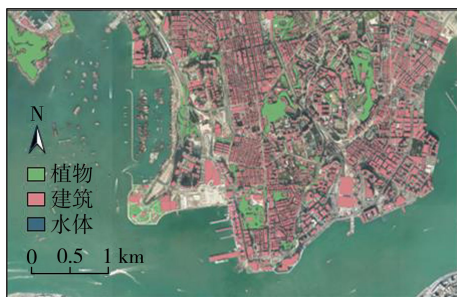


图4 建筑修正后效果
Fig.4 Effect of building correction

雨期间鲗鱼涌潮位站录得日潮位均值约 1.45 m；
③2014-05-30 暴雨灾害,19 h 累积降水量 210 mm,降雨期间鲗鱼涌潮位站录得日潮位均值约 1.35 m；
④2016-05-10 暴雨灾害,12 h 累积降水量87.5 mm,降雨期间鲗鱼涌潮位站录得日潮位均值约1.35 m。
4 场降雨的实测降雨过程线如图 5 所示。

历史暴雨期间的淹没范围和淹没深度的记录往往难以获得。针对研究区,香港渠务署提供了2008-06-07 暴雨时段内 273 份水浸报告,总体反映了九龙半岛在这次灾害中的淹没范围(图 6),水浸报告的点越密集代表灾害越严重。需要注意的是,未收到水浸报告的区域不代表没有被淹没。He 等^[20]对上述 4 场降雨下香港水浸进行了研究,搜集了香港九龙半岛深水埗区长沙湾深旺道、黄大仙区大成街灾害来临时的淹没图片,并结合出租车被淹没情况对这两条街道在 4 场降雨来临时的淹没深度进行了推断,结果如表 1 所示。采用城市内涝模型对两条

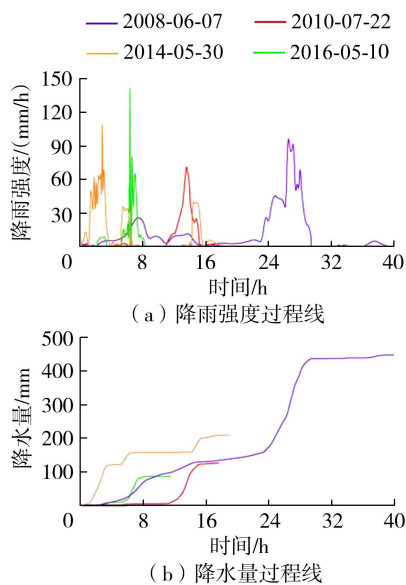


图5 4 场降雨的实测降雨过程线
Fig.5 Measured rainfall process lines of four rainfall events

街道在 4 场降雨情景下淹没水深进行了数值仿真,对比了模拟水深与观测水深。由于模拟尺度较大,模拟水深取为街道平均水深。由表 1 可见,模拟水深与观测水深之间相对误差基本在 10% 以内,表明该模型能够较好地预测洪水淹没深度。为验证洪涝点的空间分布情况,将 2008-06-07 实测降雨过程线的模拟结果和香港渠务署收到的水浸报告进行对比,如图 6 所示。根据水浸报告,长沙湾、深水埗、旺角、尖沙咀等地的灾情较为严重,与模拟结果基本一致,验证了模型计算所得淹没范围的可靠性。

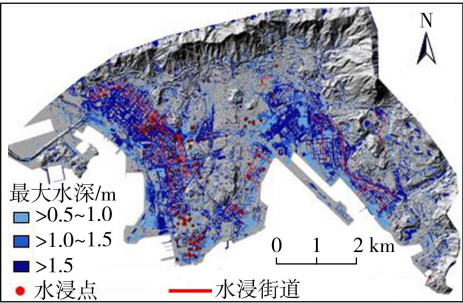


图6 2008-06-07暴雨模拟与观测淹没范围

Fig.6 Simulated and observed inundation range of 2008-06-07 rainstorm

表1 4场降雨模拟水深与观测水深

Table 1 Simulated water depth and observed water depth for 4 rainfall events

降雨时间	地区	观测水深/m	模拟水深/m	相对误差/%
2008-06-07	黄大仙区大成街	0.90	0.989	9.89
2014-05-30	黄大仙区大成街	0.43	0.443	3.02
2010-07-22	黄大仙区大成街	0.32	0.300	6.13
2016-05-10	深水埗区长沙湾深旺道	0.16	0.177	10.50

3 城市内涝防控方法

高风暴潮位主要通过海水对排水管网的顶托作用和海水从地表倒灌进入城市两种方式加剧城市内涝风险。运用广义极值 (generalized extreme value, GEV) 分布模型进行风暴潮潮位重现期的计算^[31]。收集到鲗鱼涌潮位站 1986—2021 年的最大风暴增水记录,进行数据拟合得到 GEV 分布模型的 3 个参数,分别是 $k=0.0913$ 、 $\xi=0.2379$ 、 $\sigma=0.6749$,针对 50、100、500、1 000 a 4 种降雨重现期,计算对应的风暴潮位值。为评估风暴增水和天文潮位叠加的最大影响,将鲗鱼涌潮位站 1960—2022 年高潮的平均水平 2.157 m 作为天文潮的极值。根据香港特别行政区的暴雨强度公式以及芝加哥降雨过程线模型,得到了研究区在 50、100、500、1 000 a 4 种降雨重现期条件下 2 h 的暴雨数据。香港天文台公布的天文潮数据以海图基准面为基准,数字高程模型以香港主水平基准面为基准,二者存在 0.146 m 的差距,在建模过程中对此进行了校准,得到降雨重现期分别为 50、100、500、1 000 a 条件下,研究区 2 h 降水量分别为 64.7、69.9、82.4、87.4 mm,潮位值分别为 3.801 0、4.045 9、4.675 4、4.975 8 m。

3.1 止回阀防控方法

顶托作用是指城市积水排出时受到下游河道河水或海平面潮位顶托的现象。当城市地区同时遭遇极端暴雨与风暴潮时,受排水口高潮位影响,城市排水系统将发生壅水现象,导致排水能力减弱。

2018 年台风“山竹”登陆给香港造成了严重损失,灾害过后,香港特别行政区渠务署采取了一系列预防措施,包括在排水口加装止回阀,止回阀的结构如图 7 所示。当外侧水位 (即潮位值) 低于内侧水位时,在内外侧压力差下,止回阀开启;当潮位值高于内侧水位时,在潮水压力及自重影响下,止回阀关闭。

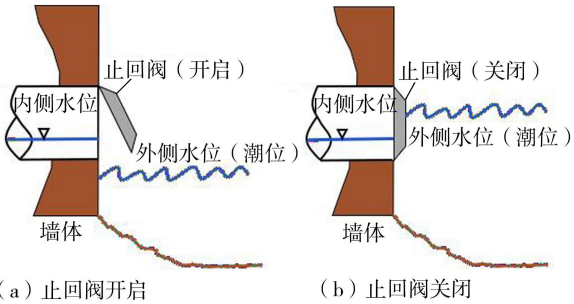


图7 排水口止回阀示意图

Fig.7 Schematic diagram of drain check valve

分析了不同重现期风暴潮与极端暴雨叠加作用下加装和不加装止回阀时九龙半岛的内涝情况,城市积水通过排水管网的排出情况如图 8 所示,其中溢流量指通过地面检查井溢流至城市地表的水量,净排出量指城市地面积水扣除溢流量以后排入大海的水量。不加装止回阀情况下,随着潮位值的升高,雨水并溢流量增大,排水管网净排出量呈现降低趋势,即雨水排出受到阻碍。随着风暴潮位的升高,净

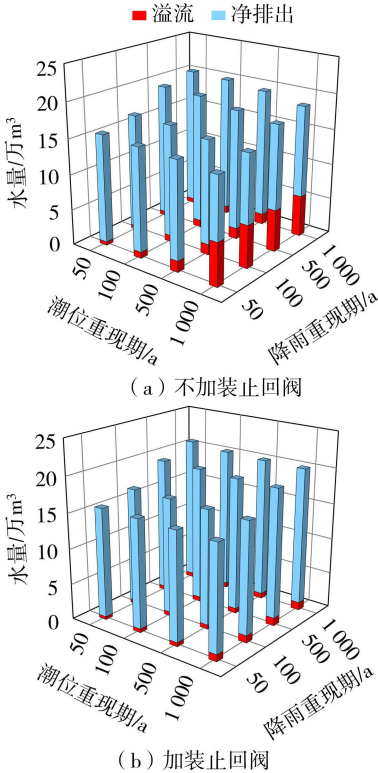


图8 不同情况下排水系统溢流量和净排出量

Fig.8 Overflow and net discharge of drainage systems under different conditions

排出量降低幅度增大,阻碍作用愈加显著。加装止回阀情况下,随着潮位高度增加,海水通过排水管道倒灌进入城市的风险得到有效控制,城市积水净排出量均衡,雨水排出效率未出现明显降低。设溢流量体积为 A 、城市地表积水进入排水管网的水量体积为 B ,定义风暴潮顶托加剧极端暴雨情形下城市内涝的溢流率 O_v 为

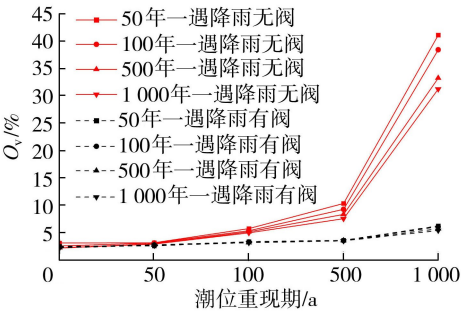
$$O_v = A/B \times 100\% \tag{6}$$

溢流率越大代表溢流量占比越大,风暴潮顶托现象加剧极端暴雨情形下城市内涝的程度越严重。图 9 为不同降雨重现期条件下加装止回阀与不加装止回阀情况下溢流率随潮位重现期变化情况,可见风暴潮越大,不加装止回阀情形下风暴潮顶托现象加剧城市内涝的程度越大,加装止回阀能够有效降低溢流率,即在极端暴雨与风暴潮遭遇时显著降低城市内涝的严重程度。

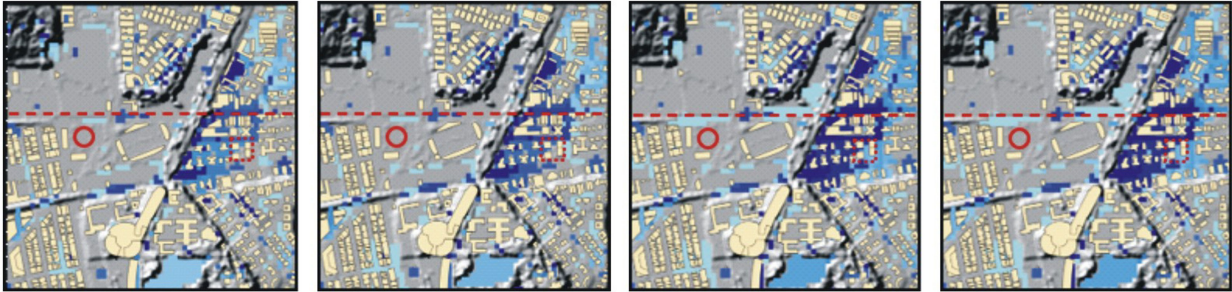
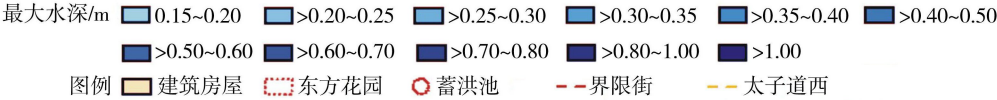
了淹没深度,高潮位下止回阀削弱淹没风险的作用更加明显,表明在极端风暴潮和降雨灾害情形下设置止回阀可有效降低城市内涝风险,这与 Shi 等^[32-33]的研究结论相符。

3.2 挡水板防控方法

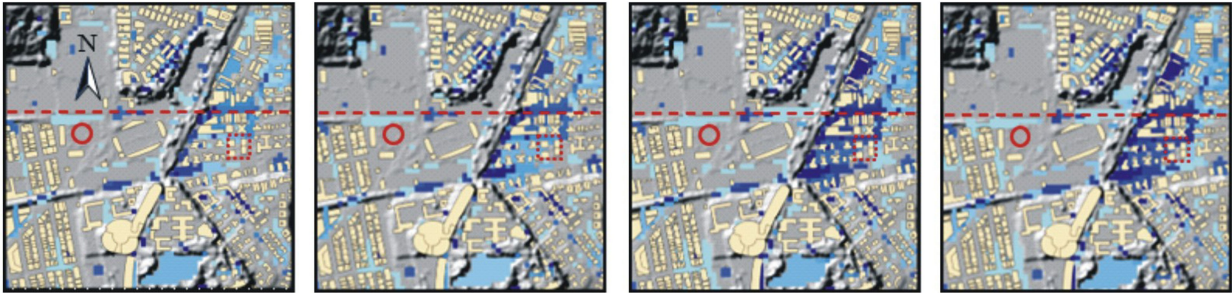
当风暴潮位高于海岸高程将引发海水倒灌,即海水漫过堤防进入城区,加剧城市内涝风险。Qiang 等^[34]评估了在香港将军澳地区增设挡水措施的可能性,发现挡水板可有效改善风暴潮对沿海城市的影响。选取九龙半岛八号货柜码头作为典型区域,在 1000 年一遇潮位重现期的风暴潮条件下(潮位超出平均海堤高度约 0.9 m),加挡水板和不加挡水板的淹没情况如图 11 所示。由图 11 可见,随着风暴潮位上升,海水倒灌现象愈加明显,淹没范围逐渐增大。在 1000 年一遇潮位重现期的风暴潮条件下,八号货柜码头淹没面积达 53%。当在香港八号货柜码头沿线加设高为 1 m 挡水板时,城市内涝风险得到了有效控制,1000 年一遇潮位重现期的风暴潮时,码头淹没面积从 53% 下降到 27%,码头办事处淹没水深从 1.10 m 降低至 0.15 m 以下,能够有效保证人员安全。这表明高风暴潮位来临时,在城市海岸线地区及低洼地带增设挡水板可减少海水从地表进入城市的水量,从而减轻城市内涝的严重程度。



3.3 地下蓄洪池防控方法



(a) 无蓄洪池 (50年一遇降雨) (b) 无蓄洪池 (100年一遇降雨) (c) 无蓄洪池 (500年一遇降雨) (d) 无蓄洪池 (1000年一遇降雨)



(e) 有蓄洪池 (50年一遇降雨) (f) 有蓄洪池 (100年一遇降雨) (g) 有蓄洪池 (500年一遇降雨) (h) 有蓄洪池 (1000年一遇降雨)

图 10 将军澳地区不同降雨重现期下淹没情况

Fig. 10 Flooding Depth and Urban Surface Flood Signs Boipuland Street Flood Groundstances

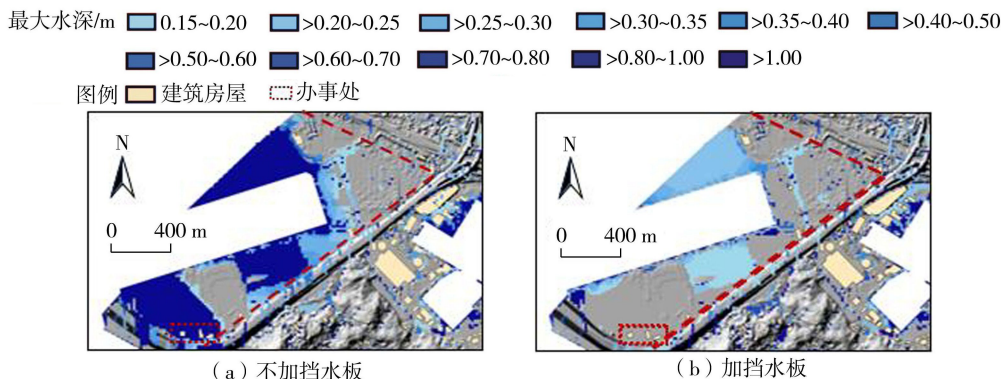


图 11 八号货柜码头不同情形下的淹没情况

Fig. 11 Inundation of Container Terminal 8 under different conditions

洪池是香港整体防洪策略的重要组成部分^[35]。香港渠务署计划于九龙半岛黄大仙区摩士公园、九龙城区休憩用地、观塘区海滨花园、油尖旺区界限街游乐场等地建造地下雨水蓄洪池,以加强排水系统的排水能力、减轻九龙地区的城市内涝风险。其中,油尖旺界限街游乐场的蓄洪池体积为 5 万 m³,以其为研究对象,模拟潮位重现期为 100 a 时不同降雨重现期下的淹没范围及深度,结果如图 12 所示。由图 12 可见,界限街设置蓄洪池后,降雨重现期分别为 50、100、500、1 000 a 条件下,游乐场及附近区域淹没范围分别降低 43%、34%、18% 和 6%,效果显著。东方花园在降雨重现期为 1 000 a 时原淹没深度约为 0.40 m,建立蓄洪池以后降低到 0.15 m 以下。从之前的城市淹没情况可以看出,界限街和太子道西中间的区域人口密集,受灾风险较大,是应该重点预防的区域。模型中蓄洪池主要考虑了对于这个区域的减灾作用。根据图 12,降雨重现期为 100 a 时,蓄洪池的作用明显;降雨重现期为 500 a 及以上时,蓄洪池在降低城市内涝淹没范围上的作用有限。案例分析表明,在城市内涝严重的地区增设蓄洪池可有效降低局部内涝严重程度,徐奎等^[33,36]的研究亦表明建立蓄洪池能够有效降低城市内涝风险。为保障区域安全,蓄洪池容量的选取应与设防降雨强度相匹配。

4 结 论

a. 考虑地形、建筑与街道对城市内涝演进的影响,构建了风暴潮与极端暴雨叠加情形下的城市内涝灾害模型,利用香港渠务署提供的水浸报告进行对比,结果表明所构建模型能够准确反映城区淹没范围及内涝水深。

b. 止回阀与挡水板通过削弱海水倒灌减轻风暴潮对城市内涝的放大效应。1 000 年一遇风暴潮和极端暴雨情景下,加装止回阀后九龙半岛管网溢

流率降低 14.8%,净排水量增加 5.7%。在九龙半岛八号货柜码头地区加装 1 m 高挡水板,1 000 年一遇风暴潮条件下淹没面积可降低 26%,码头办事处淹没水深从 1.10 m 降低至 0.15 m 以下,能够有效降低人员风险。

c. 地下蓄洪池通过收集地表径流预防局部地区内涝和减轻内涝程度。结果显示设置地下蓄洪池后,降雨重现期为 100 a 时界限街游乐场淹没面积降低 34%,降雨重现期为 1 000 a 时东方花园淹没深度降低 60%。

参考文献:

- [1] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 109-117. (LIAO Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen drainage area based on SWMM and InfoWorks ICM models [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 109-117. (in Chinese))
- [2] 舒心怡,徐宗学,叶陈雷,等. 晋城市片区洪涝过程响应分析与马路行洪模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 176-186. (SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Flooding/waterlogging process response analysis and road flooding simulation in urban area of Jincheng City [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 176-186. (in Chinese))
- [3] 廖敬语,李可,史晓雨,等. 耦合 CA 与 SWMM 的城市内涝模拟模型开发与应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(8): 922-933. (LIAO Xinyu, LI Ke, SHI Xiaoyu, et al. Development and application of urban waterlogging simulation model coupled with CA and SWMM [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(8): 922-933. (in Chinese))
- [4] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 33-39. (FU Chun, FU Yaorong, XIAO Cunyan, et

- al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (1):33-39. (in Chinese))
- [5] 洪国平,万君,柳晶辉,等. 武汉城区短历时暴雨内涝数值模拟研究[J]. 暴雨灾害, 2018, 37 (1): 83-89. (HONG Guoping, WAN Jun, LIU Jinghui, et al. Rainstorm waterlogging research on numerical simulation for short-duration in the urban area of Wuhan[J]. Torrential Rain and Disaster, 2018, 37(1): 83-89. (in Chinese))
- [6] 袁绍春,王怀鋈,吕波,等. 基于 InfoWorks_ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J]. 水资源保护, 2020, 36 (5): 43-49. (YUAN Shaochun, WANG Huaijun, LYU Bo, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks_ICM model[J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (5): 43-49. (in Chinese))
- [7] 孙钦珂,周亮,王宝. 气候变化背景下沿海特大城市复合洪水灾害空间模拟[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25 (12): 2427-2438. (SUN Qinke, ZHOU Liang, WANG Bao. Spatial simulation of compound flood hazard risk in coastal megacities under climate change[J]. Journal of Geo-information Science, 2023, 25 (12): 2427-2438. (in Chinese))
- [8] 何黎. 基于 InfoWorks ICM-2D 耦合模型的上海某片区排水系统排水能力分析[J]. 中国市政工程, 2021(4): 36-40. (HE Li. Analysis of drainage capacity of drainage system in some area of Shanghai based on InfoWorks ICM-2D coupling model[J]. China Municipal Engineering, 2021(4): 36-40. (in Chinese))
- [9] SHI Shaoyu, YANG Bo, JIANG Wensheng. Numerical simulations of compound flooding caused by storm surge and heavy rain with the presence of urban drainage system, coastal dam and tide gates: a case study of Xiangshan, China [J]. Coastal Engineering, 2021, 172: 104064.
- [10] 梅超,陈宇枫,刘家宏,等. 基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 31-38. (MEI Chao, CHEN Yufeng, LIU jiahong, et al. Impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on scenario simulation [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 31-38. (in Chinese))
- [11] 王兆礼,陈昱宏,赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 117-124. (WANG Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 117-124. (in Chinese))
- [12] QIANG Yejia, ZHANG Limin, HE Jian, et al. Urban flood analysis for Pearl River Delta cities using an equivalent drainage method upon combined rainfall-high tide-storm surge events [J]. Journal of Hydrology, 2021, 591: 126293.
- [13] GAO Liang, ZHANG Limin, LU Mengqian. Characterizing the spatial variations and correlations of large rainstorms for landslide study [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(9): 4573-4589.
- [14] RIDDER N N, PITMAN A J, WESTRA S, et al. Global hotspots for the occurrence of compound events [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 5956.
- [15] 罗志发,黄本胜,邱静,等. 粤港澳大湾区风暴潮时空分布特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 72-79. (LUO Zhifa, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing mechanisms of storm surge in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 72-79. (in Chinese))
- [16] 自然资源部. 2018 中国海洋灾害公报[R]. 北京: 自然资源部, 2019.
- [17] CHOY C W, LAU D S, HE Yuheng. Super typhoons *Hato* and *Mangkhut*, part II: challenges in forecasting and early warnings[J]. Weather, 2022, 77(9): 324-331.
- [18] ZHANG Y J, YE F, YU H C, et al. Simulating compound flooding events in a hurricane[J]. Ocean Dynamics, 2020, 70(5): 621-640.
- [19] YANG Yuhan, YIN Jie, ZHANG Weiguo, et al. Modeling of a compound flood induced by the levee breach at Qianbujing Creek, Shanghai, during typhoon Fitow [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2021, 21 (11): 3563-3572.
- [20] HE Jian, QIANG Yejia, LUO Hongyu, et al. A stress test of urban system flooding upon extreme rainstorms in Hong Kong[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 125713.
- [21] CHEN H X, ZHANG L M. EDDA 1. 0: integrated simulation of debris flow erosion, deposition and property changes [J]. Geoscientific Model Development, 2015, 8 (3): 829-844.
- [22] 衣秀勇,关春曼,果有娜,等. DHI MIKE FLOOD 洪水模拟技术应用与研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [23] YANG Jie, HUANG Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [24] COSTABILE P, COSTANZO C, GANDOLFI C, et al. Effects of DEM depression filling on river drainage patterns and surface runoff generated by 2D rain-on-grid scenarios[J]. Water, 2022, 14(7): 997.
- [25] JIANG A L, HSU K, SANDERS B F, et al. Topographic hydro-conditioning to resolve surface depression storage and ponding in a fully distributed hydrologic model[J].

Advances in Water Resources,2023,176:104449.

[26]

LEE S, NAKAGAWA H, KAWAIKE K, et al. Urban inundation simulation considering road network and building configurations [J]. Journal of Flood Risk Management,2016,9(3):224-233.

[27]

DULLO T T, GANGRADE S, MORALES-HERNÁNDEZ M, et al. Simulation of hurricane Harvey flood event through coupled hydrologic-hydraulic models: challenges and next steps [J]. Journal of Flood Risk Management, 2021,14(3):e12716.

[28]

WING O E J, SAMPSON C C, BATES P D, et al. A flood inundation forecast of hurricane Harvey using a continental-scale 2D hydrodynamic model [J]. Journal of Hydrology,2019,4:100039.

[29]

COSTABILE P, MACCHIONE F, NATALE L, et al. Flood mapping using LIDAR DEM: limitations of the 1-D modeling highlighted by the 2-D approach [J]. Natural Hazards,2015,77(1):181-204.

[30]

GAO Liang, ZHANG Limin, LI Xueyou, et al. Evaluating metropolitan flood coping capabilities under heavy storms [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2019, 24 (6) : 05019011.

[31]

蔡文香. 中国极端气候事件的趋势特征与极值分布 [D]. 北京:对外经济贸易大学,2016.

[32]

SHI Shaoyu, YANG Bo, JIANG Wensheng. Numerical simulations of compound flooding caused by storm surge and heavy rain with the presence of urban drainage system, coastal dam and tide gates: a case study of Xiangshan, China [J]. Coastal Engineering, 2022, 172 : 104064.

[33]

徐奎,鲁志伟,宾零陵,等. 沿海城市暴雨-高潮位复合致涝区划研究 [J]. 水力发电学报,2022,41(4):18-27. (XU Kui, LU Zhiwei, BIN Lingling, et al. Risk factor zoning of waterlogging in coastal cities caused by compound of rainstorms and high tides [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41 (4) : 18-27. (in Chinese))

[34]

QIANG Yejia, HE jian, XIAO Te, et al. Coastal town flooding upon compound rainfall-wave overtopping-storm surge during extreme tropical cyclones in Hong Kong [J]. Journal of Hydrology:Regional Studies,2021,37:100890.

[35]

王江波,王子初,温佳林,等. 香港城市防洪排涝对策及启示 [J]. 中国给水排水,2022,38(6):48-54. (WANG Jiangbo, WANG Zichu, WEN Jialin, et al. Countermeasures and enlightenment of the flood control and drainage in Hong Kong [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38 (6) : 48-54. (in Chinese))

[36]

AVIN D, MOHSEN B, HELENA M R, et al. Storage ponds application for flood control, hydropower generation and water supply [J]. International Review of Civil Engineering,2019,10(4):219-226.

(收稿日期:2023 - 11 - 23 编辑:王芳)

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2024. 04. 008

京津冀科技创新水平对水资源利用效率的影响效应及贡献

吴 丹,潘朱玲

(北方工业大学经济管理学院,北京 100144)

摘要:为明晰科技创新对水资源利用效率的影响机理,利用空间计量模型,构建了科技创新水平对水资源利用效率的影响效应模型与贡献模型。基于 2009—2021 年面板数据,测算了京津冀科技创新指数和水资源利用效率指数,评价了京津冀科技创新水平对水资源利用效率的弹性系数与贡献率。结果表明:京津冀科技创新指数与水资源利用效率指数均呈稳定增长趋势,二者同向演化;京津冀科技创新水平对水资源利用效率的影响正向显著且存在空间差异,北京、天津、河北的科技创新水平每提升 1%,水资源利用效率分别提升 2.684%、0.918%、1.365%;北京、天津、河北科技创新水平对水资源利用效率的贡献率分别为 50.47%、45.74%、62.59%,2009—2021 年京津冀科技创新水平对水资源利用效率的贡献率受技术迭代、政策颁布及用水结构优化的影响呈分段波动形

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目(21YJCZH176);北方工业大学北京城市治理研究基地项目(2023CSZL01)

作者简介:吴丹(1986—),男,副教授,博士,主要从事城市治理与资源环境管理研究。E-mail:wu_daniel@163.com