

李妙琳,涂新军,李若琰等. 极端气候条件下滨海城市内涝损失评估[J]. 人民珠江, DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

极端气候条件下滨海城市内涝损失评估

李妙琳^{1,2,3},涂新军^{1,2,3*},李若琰^{1,2,3},林凯荣^{1,2,3},刘梅先^{1,2,3},董春雨^{1,2,3},刘智勇^{1,2,3},
张晶⁴

(1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),广东 珠海 519082;2. 中山大学水资源与环境研究中心,广东 广州 510275;3. 广东省华南地区水安全调控工程技术研究中心,广东 广州 510275;4. 中电建生态环境集团有限公司,广东 深圳 518101)

摘要:快速城市化过程中,内涝及带来的灾损问题是城市安全面临的重要挑战。以粤港澳大湾区深圳西部为典型研究区,基于城市内涝一二维耦合模型,模拟了重现期2、5、10、20、50、100 a的设计暴雨、水库泄洪及深隧工程排涝等多情景多工况的内涝淹没过程。结合城市土地利用分类,以及淹没过程中不同土地利用上覆建筑物、车辆等资产类型,通过建立多类型淹没水深-资产损失曲线,开展了较为精细化土地利用类型的资产损失评估。结果表明,设计暴雨重现期从2 a增加到100 a,受灾范围显著加大,灾损程度明显加剧,内涝淹没的受灾面积、资产损失分别由3.98 km²增加到6.75 km²、2.55亿元增加到9.12亿元。淹没水深以小于0.5 m为主,占比为54.1%~64.7%;淹没的土地利用类型主要为道路,占比90.2%~91.5%。灾损占比较大主要为住宅用地和车辆,分别为25.8%~35.2%和18.0%~33.7%。铁岗水库泄洪影响下受灾面积和资产损失分别增加了6.1%和5.6%,深隧工程排涝的资产损失减少了21.0%。研究成果为多情境多工况下的滨海城市内涝损失评估和当地洪涝防灾减灾提供了科学依据。

关键词:内涝模拟;资产损失;设计暴雨;土地利用;深隧工程;粤港澳大湾区

中图分类号:TV122.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-12

城市内涝是指由于强降雨等导致城市地面积水无法及时排出,形成局部或大范围的积水现象^[1]。随着全球气候变化,极端降雨频发,城市短时暴雨强度不断增强^[2]。同时由于城市化进程加速,不透水面积增加,汇流时间缩短,地表径流总量增加,导致城市内涝问题日益突显^[3]。国内外城市内涝模拟已开展了大量研究,应用较为广泛的模拟工具有MIKE、SWMM和InfoWorks^[4-5]。相比较而言,MIKE工具是一个综合建模系统,可以在同系列的软件之间相互耦合^[6],在城市河道、管网水流及内涝淹没的一维二维耦合模拟方面具有优势^[7-8]。

城市内涝不仅影响居民出行与日常生活,还会

造成巨大的经济损失和社会影响,其损失评估也越来越受到关注。内涝产生的社会经济损失评估,常常需要淹没区更为精细化的城市土地利用分类^[9]。如结合城市规划与遥感数据将城市区域划分为47类^[10],或根据经济部门类型划分并计算不同经济部门之间的损失转移^[11]。有学者针对不同建筑高度和结构类型,评估内涝淹没时建筑物损失^[12]。在道路损失方面,可考虑道路积水持续时间与淹没深度,评估对道路结构影响及道路无法通行产生的经济损失^[13]。在车辆损失方面,主要考虑车辆类型及在道路上的分布情况^[14]。在损失曲线构建方面,有研究考虑室内财产位置和价值构建室内财产水淹

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3002900);国家自然科学基金(52279032);中国电力建设集团重点科技研发项目(DJ-ZDXM-2023-39)

收稿日期:2026-01-08 **修回日期:**2026-02-05

作者简介:李妙琳(2001—),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源。

通信作者:涂新军(1972—),男,教授、博导,研究方向为水文水资源。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

损失率曲线^[15],考虑损失不确定性与局部空间相关性建立损失评估框架^[16],或通过直接调查构建淹没深度和时间的损失曲线^[17],利用已知城市的损失曲线与社会经济指标,提出构建缺资料地区的损失曲线构建方法^[18]。

深圳作为粤港澳大湾区核心城市之一,人口密集、经济发达,极端气候条件下城市内涝问题也较为典型^[19-20],排涝不及时容易造成巨大的社会经济损失。因此本文以深圳市西部洪涝潮问题较为典型的西乡河和新圳河地区为研究范围,调查当地土地利用结构及其社会经济价值,开展设计暴雨和典型风暴潮组合条件下的内涝损失评估,并分析叠加当地水库泄洪的影响和当地规划的深隧工程排涝减灾效果,对于滨海城市防洪减灾决策具有重要

意义。

1 研究区域与方法

1.1 区域概况

研究区位于粤港澳大湾区中深圳市的西部,总面积约为62.21 km²,地理位置及地形高程见图1。该区域内包括西乡河、新圳河等河流。西乡河上游为铁岗水库,其设计防洪标准为100 a一遇,限泄流量为200 m³/s,其中100 m³/s由铁岗水库排洪河承担,40 m³/s由西乡大道分流渠承担^[21]。研究区多年平均降水量为1 925 mm,受锋面低槽和热带气旋影响,暴雨多发,全年86%的雨水量出现在汛期4—9月,容易产生内涝。且区域内建筑密集,人口密度大,内涝造成经济损失大。

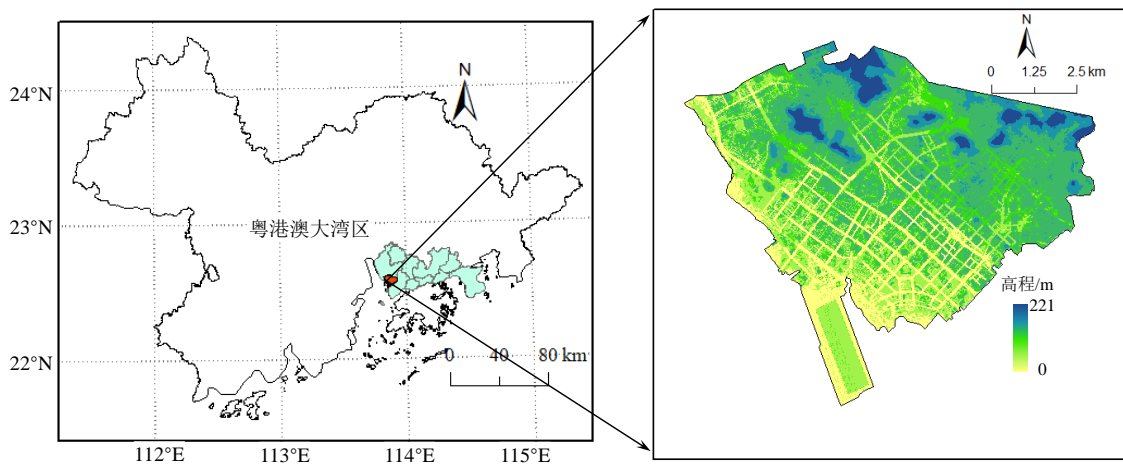


图1 研究区位置及地形高程

Fig. 1 Location and topographic elevation of the study area

1.2 数据处理

地形数据是在地理空间数据云的30 m栅格化数据进行加密处理,借助检查井的地表高程对道路进行高程插值。基于当地土地利用规划获取道路、建筑、绿地、水体等图层,进一步细分功能性建筑用地类型^[22],并根据Open Street Map细分道路等级(<https://extract.bbbike.org>),见图2a。参照当地排水综合规划及水环境综合治理,排水管网布局及深隧工程如图2b。

规划的深隧工程自广深公路与新安路交叉口

起,经新安路、海澜路至西乡大道延伸段,管线长约7 km,管道直径为6 m,坡度为1‰;在西乡河和咸水涌下游接入有若干个初小雨截留管道,在西乡大道分流渠位置布设初小雨提升泵站,在西乡大道延伸段布设规模为120 m³/s的排涝泵站,抽水排放入海,工程影响范围约为10.24 km²^[20]。

1.3 研究方法

1.3.1 城市内涝模拟

内涝模拟方法采用研究区已建立内涝模拟模型^[20]。基于MIKE 11构建了一维河道模型,基于

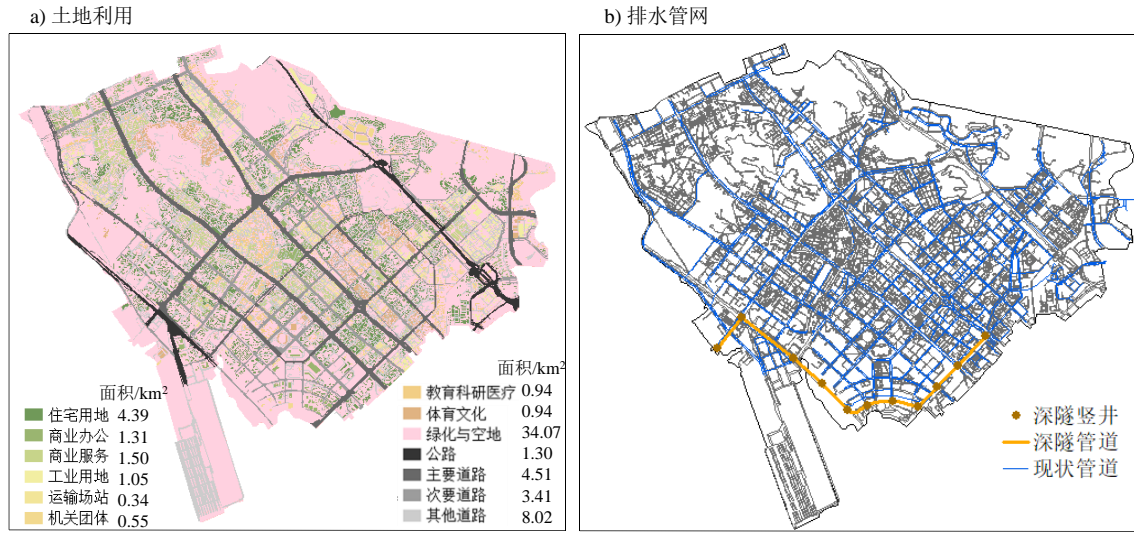


图2 土地利用及排水管网布局

Fig. 2 Land use and drainage network

MIKE 21 构建二维地表漫流模型。基于 MIKE URBAN 构建了城市排水管网系统模拟模型,包括降水径流模拟和管网模拟两部分,降水径流模拟结果是管网模拟的边界条件,并基于泰森多边形法进行子汇水区划分。基于 MIKE FLOOD 提供的连接方式有效耦合不同模型,侧向连接用于耦合 MIKE 11 和 MIKE 21,城市连接用于耦合 MIKE URBAN 和 MIKE 21,河道城市连接用于耦合 MIKE 11 与 MIKE URBAN^[23]。深隧管道同现状管道一样在耦合模型中通过城市连接与二维地表进行水量交换,即连接深隧竖井口与地面地形,是排水系统与集水区之间的相互作用^[20]。

1.3.2 模拟工况设置

参照当地规划设计暴雨公式有:

$$i = \frac{8.701(1 + 0.594\log P)}{(t + 11.13)^{0.555}} \quad (1)$$

式中: i 为设计暴雨强度,mm/min; t 为降水历时,min; P 为暴雨重现期,拟设置为2、5、10、20、50、100 a共6种情景。

降雨过程采用降雨历时2 h芝加哥雨型,峰值系数0.35,重现期 $T=2、5、10、20、50、100$ a的降水总量分别为82.63、101.61、111.74、124.27、140.84、153.38 mm,见图3a。河道入海口考虑台风暴潮影

响,采用赤湾站“天鸽”台风典型潮位,如图3b。当 $T=100$ a,考虑铁岗水库泄洪影响,西乡河河道上游边界条件采取铁岗水库设计100年一遇的下泄流量。

1.3.3 各类资产价值

房屋、道路等工程建筑类的内涝淹没损失,主要考虑基于灾后修复或重建的工程造价^[24]。住宅、商业用地(包括办公和服务)价值参照当地2024年统计年鉴中竣工房屋价值,工业用地建筑部分、以运输场站为主的交用地、公共管理与服务用地中的机关团体用地及教育科研医疗用地,均参照当地2021年制订的物业建筑安装工程总造价标准。工业用地除建筑外还考虑室内财产,以工业总产值替代^[25]。体育文化用地则类比了2023年上海市建设市场信息服务平台造价。道路淹没损失主要指对道路结构的影响,即道路本体及附属交通设施如路面路基护栏等及资产的损失,公路等各类道路资产综合考虑当地道路工程造价^[26],并类比了上海道路价值研究^[27]。绿地与空地按绿化养护标准计算。各类资产分类及价值见表1。

考虑到研究区域为人口密度大,车辆数目多,因此内涝淹没时也考虑私家车和公共汽车的损失,且主要分析公路、主要道路与次要道路上行驶和停放的车辆损失。私家车根据当地道路管理部

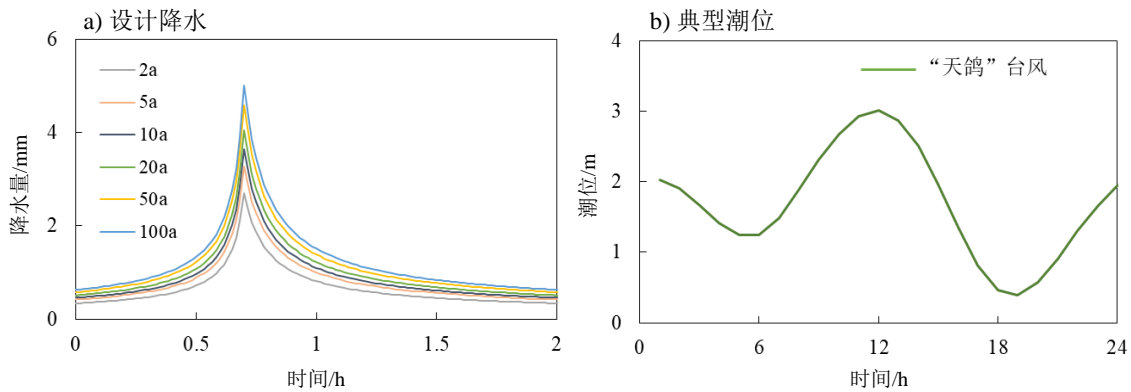


图3 设计暴雨与台风典型潮位

Fig. 3 Design rainstorm and typical typhoon tide levels

门及2024年统计年鉴获取相关车辆密度数据,单价则基于全国2020年人口普查年鉴中当地家用车辆总价值换算得出。公共汽车密度根据当地2024年统计年鉴的道路面积与公共汽车总量计算得出,当地公共汽车主要为新能源汽车,参照2023—2025年当地采购均价作为公共汽车单价。车辆密度及价值如表2。

1.3.4 淹没水深-财产损失关系

参照依据吴先华等^[28]对当地住宅、商业、工业和公共用地典型淹没水深下的经济损失率,再对各类用地损失率采用三次曲线进行拟合, R^2 分别为0.883、0.970、0.885、0.917,见图4。交通用地、公

共管理与服务用地均采用公共用地淹没水深-财产损失关系。

根据Van G等^[29]研究的典型淹没水深下道路经济损失,采用三次曲线进行拟合, R^2 为0.998,见图5a。绿化与空地一旦淹没即造成损失,且淹没水深实际影响不大,不同淹没水深的经济损失率均以20%计。根据Martínez-Gomariz E等^[30]基于不同车辆底盘高度研究典型淹没水深下的损失率,公共汽车类比小型载货车淹没损失关系,采用三次曲线分别进行拟合,私家车和公共汽车的淹没水深-财产损失率拟合曲线的 R^2 分别为0.991、0.998,见图5b。

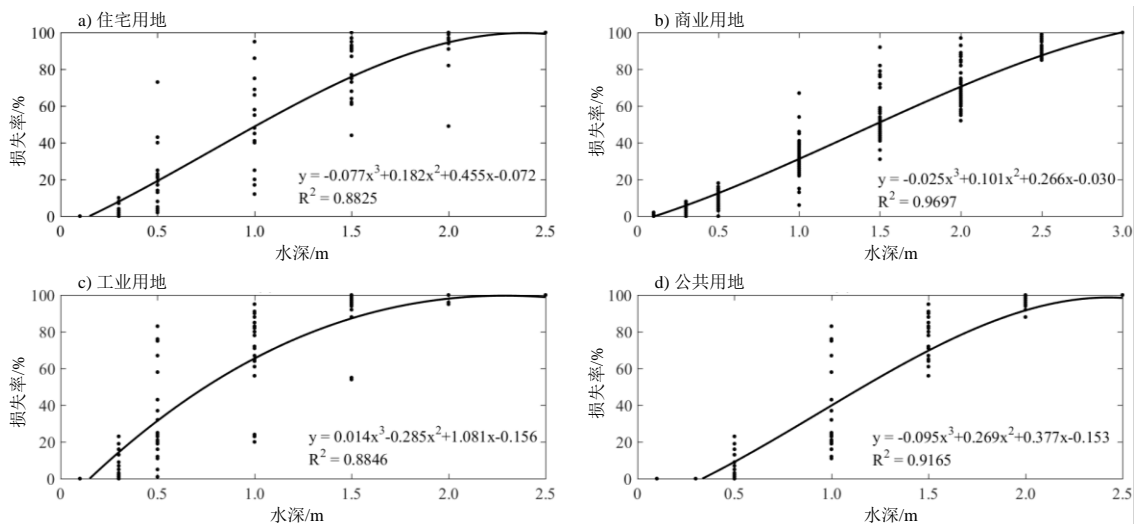


图4 各类土地利用淹没水深-损失曲线

Fig. 4 Inundation depth-loss curve for various land uses

表1 各类土地利用资产价值

Tab. 1 Asset value of various land uses

一级类	二级类	价值/元·m ⁻²
住宅用地		13 670
商业用地	商业办公	11 596
	商业服务	11 596
工业用地		24 959
交通用地		5 032
公共管理与服务用地	机关团体	7 149
	教育科研医疗	5 032
	体育文化	12 614
	公路	1 738
道路与其他	主要道路	989
	次要道路	954
	其他道路	844
	绿化与空地	9

基于模拟的获得最大淹没范围和淹没水深,内涝淹没的总资产损失 S 有:

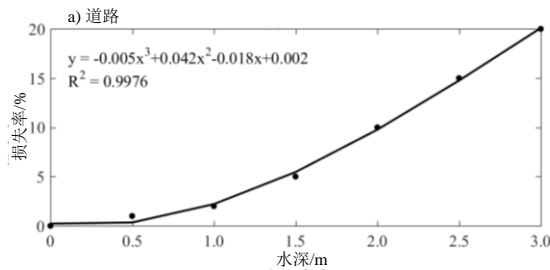


表2 车辆密度与价值

Tab. 2 Density and value of vehicles

类型	密度/辆·km ⁻²	单价/万元·辆 ⁻¹
私家车	550	18
公共汽车	100	150

$$S = \sum V_i A_i \lambda_i \quad (2)$$

式中: V_i 、 A_i 和 λ_i 分别为第 i 类资产的价值,元/m²;淹没面积,m²;经济损失率,%。

2 结果分析

2.1 内涝淹没特征分析

参照GB50014—2021《室外排水设计规范》中规定,纳入城市内涝淹没范围统计的最低水深阈值为0.05 m,重现期分别为2、5、10、20、50与100 a的淹没范围分别达到了5.02、6.05、6.44、6.82、7.66、8.13 km²(图6),约在在2.1、2.1、2.0、2.0、2.0、1.6 h内达到最大同步淹没范围分别为3.95、4.76、5.16、5.56、6.00、6.29 km²,之后快速下降,约6 h之后变化趋于平缓(图7)。

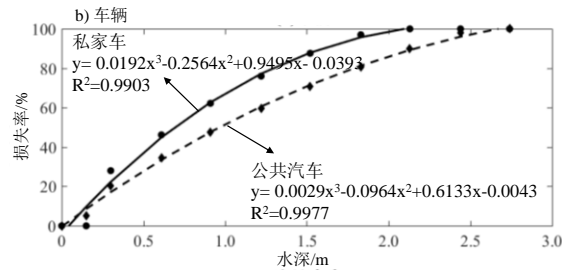


图5 道路和车辆淹没水深-损失曲线

Fig. 5 Inundation depth-loss curve for roads and vehicles

计算淹没损失时通常不考虑水深小于0.1 m和时长不足30 min的情况^[14]。损失情况由淹没最大水深控制,且当水深每增加0.5 m时损失率明显上升,因此以0.5 m为间隔统计受灾面积(表3)。设计暴雨重现期分别为2、5、10、20、50、100 a条件下,受灾总面积分别为398.4万、510.4万、539.4万、579.1万、654.1万、674.8万m²。淹没水深为小于

0.5 m、[0.5 m, 1 m)、[1.0 m, 1.5 m)和大于等于1.5 m时的受灾面积占比,分别约为54.1%~64.7%、22.4%~29.0%、10.2%~15.3%和6.7%~7.1%。道路及其他用地受灾面积最大,约占90.2%~91.5%,其次为住宅用地、公共管理与服务用地分别约为3.2%~3.8%和3.0%~3.9%。

表3 各种淹没水深下的受灾范围

Tab. 3 Disaster-affected area under various inundation depths

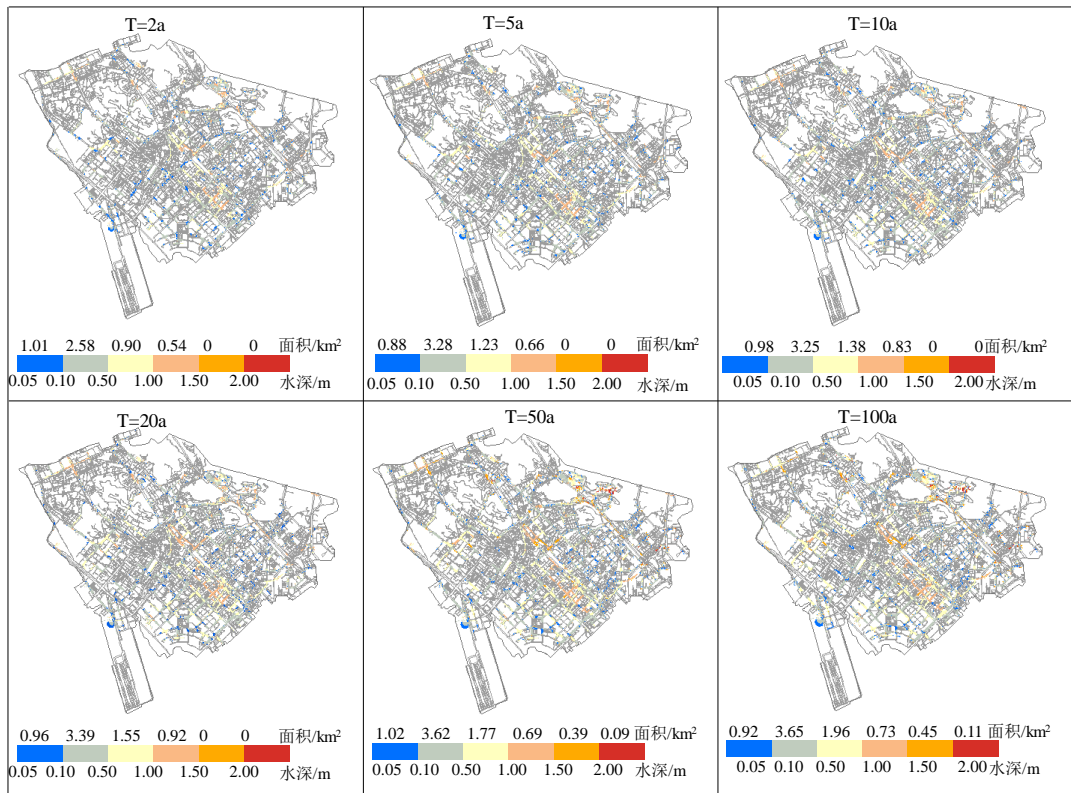


图6 内涝淹没状况

Fig. 6 Waterlogging inundation situation

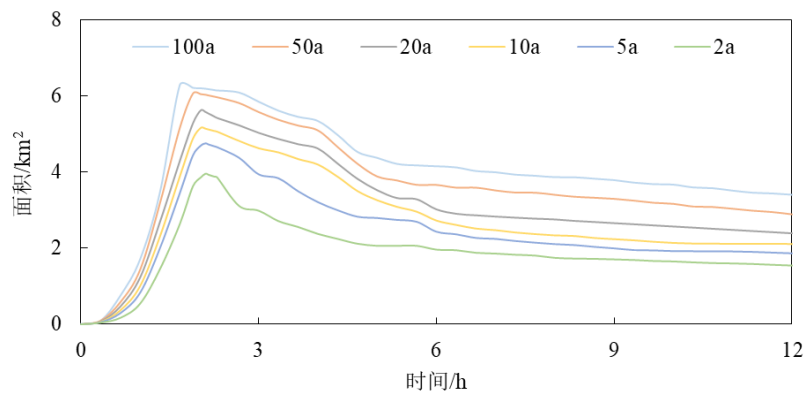


图7 淹没范围变化过程

Fig. 7 Processes of inundation range change

用地类型	淹没深度 /m	受灾范围/10 ⁴ m ²					
		2a	5a	10a	20a	50a	100a
住宅用地	< 0.5	10.9	11.3	11.8	12.2	13.3	13.0
	[0.5, 1.0)	2.2	3.1	4.7	5.1	5.7	6.3
	[1.0, 1.5)	1.8	2.0	2.9	3.3	2.3	2.6
	≥1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	1.6

(表3 各种淹没水深下的受灾范围续表)

用地类型	淹没深度 /m	受灾范围/10 ⁴ m ²					
		2a	5a	10a	20a	50a	100a
商业用地	小计	14.9	16.5	19.4	20.5	23.0	23.4
	<0.5	2.2	2.8	3.6	3.4	3.8	4.9
	[0.5,1.0)	1.0	1.1	2.9	1.4	1.6	2.7
	[1.0,1.5)	0.7	0.7	0.7	2.3	2.6	2.2
	≥1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.7
工业用地	小计	3.9	4.6	7.2	7.2	9.2	11.5
	<0.5	1.3	2.1	2.1	2.2	2.7	3.0
	[0.5,1.0)	0.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.3
	[1.0,1.5)	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3
	≥1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3
交用地	小计	1.8	2.9	3.1	3.2	3.8	3.9
	<0.5	0.6	0.5	0.7	0.9	0.8	1.2
	[0.5,1.0)	0.2	0.3	0.5	0.6	0.5	0.8
	[1.0,1.5)	1.1	1.1	1.2	1.4	0.2	0.6
	≥1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.7
公共管理与服务用地	小计	2.0	2.0	2.4	2.9	3.6	4.3
	<0.5	11.1	11.3	11.4	10.3	9.5	9.9
	[0.5,1.0)	2.0	3.5	3.4	4.0	8.5	8.7
	[1.0,1.5)	2.5	2.4	2.7	3.2	2.1	2.3
	≥1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.1
道路与其他	小计	15.6	17.2	17.5	17.5	22.2	23.0
	<0.5	231.5	300.4	295.5	310.5	332.2	332.9
	[0.5,1.0)	83.5	110.4	125.6	139.4	160.3	176.9
	[1.0,1.5)	45.2	56.3	68.7	78.1	60.8	60.8
	≥1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	39.0	38.0
合计	小计	360.2	467.2	489.8	528.0	592.3	608.6
	<0.5	257.6	328.4	325.0	339.5	362.3	364.8
	[0.5,1.0)	89.2	119.0	137.7	151.0	177.2	195.8
	[1.0,1.5)	51.6	62.9	76.7	88.7	68.3	68.8
	≥1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	46.4	45.3
	小计	398.4	510.3	539.4	579.1	654.1	674.8

2.2 内涝淹没灾损分析

内涝淹没造成的各类资产损失见表4。设计暴雨重现期为2、5、10、20、50、100 a的损失分别为

2.55亿、3.57亿、4.63亿、5.66亿、7.41亿、9.12亿元。损失占比较大为住宅用地、车辆和公共管理与服务用地,分别为25.8%~35.2%、18.0%~33.7%

和13.7%~16.9%;其次为工业用地和商业用地,分别为9.2%~16.7%和9.2%~11.0%;较小的为交通用地和道路用地与其他,仅有0.5%~1.9%和3.4%~4.6%。其中,住宅用地损失占比随着重现期

增大而上升,由2a的25.8%上升到100a的35.2%;车辆损失占比则随着重现期增大而下降,由2a的33.7%下降到100a的18.0%;其他资产损失占比变化较小。

表4 设计暴雨下的内涝淹没财产损失

Tab. 4 Asset losses of waterlogging inundation under design rainstorms

资产类型	财产损失/亿元						
	2 a	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a	
住宅用地	0.66	1.19	1.51	1.81	2.26	3.21	
商业用地	商业办公	0.13	0.20	0.25	0.30	0.47	0.50
	商业服务	0.12	0.18	0.22	0.26	0.34	0.34
工业用地	0.23	0.34	0.66	0.87	1.22	1.53	
交通用地	0.01	0.02	0.03	0.06	0.13	0.17	
公共管理与服务用地	机关团体	0.31	0.33	0.43	0.52	0.73	0.92
	教育科研医疗	0.05	0.06	0.08	0.11	0.12	0.12
	体育文化	0.07	0.11	0.12	0.14	0.25	0.30
	公路	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06
	主要道路	0.04	0.05	0.06	0.07	0.13	0.14
道路与其他	次要道路	0.02	0.03	0.04	0.04	0.07	0.08
	其他道路	0.01	0.02	0.02	0.03	0.06	0.07
车辆	绿化与空地	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
	私家车	0.48	0.49	0.60	0.77	0.83	0.85
	公共汽车	0.38	0.49	0.56	0.63	0.71	0.79
合计	2.55	3.57	4.63	5.66	7.41	9.12	

2.3 铁岗水库泄洪及深隧工程排涝的影响

设计暴雨重现期100 a叠加铁岗水库泄洪造成内涝淹没及财产损失变化如表5。铁岗水库泄洪影响下,受灾面积约为716.0万m²,增加了41.3万m²,相对增幅为6.1%;其中,交通用地和商业用地受灾面变化幅度较大,增幅分别为33.9%和26.9%。另外,私家车和公共汽车的受灾数量分别增加了18.5%和5.8%。损失为9.63亿元,增加了5079万元,增幅为5.6%。损失增加值较大的有车辆、商业用地、住宅用地和公共管理与服务用地,分别为1505万、1172万、837万、736万元,增幅较大的为交通用地和商业用地,分别为16.2%和14.0%。

若考虑深隧工程排涝效果,内涝淹没损失变化如表6。其中,重现期为100a叠加了水库泄洪的影响。深隧工程排涝影响下设计暴雨重现期为2、5、10、20、50、100 a的损失,分别减少了0.62亿、0.80亿、1.04亿、1.27亿、1.58亿、2.02亿元,下降了21.0%~24.2%。减灾效果贡献较大有住宅用地和车辆,贡献占比分别为25.2%~33.9%和22.7%~34.9%。

3 结论

基于已构建的当地内涝耦合模型,拟合了淹没水深-财产损失曲线,开展了设计暴雨、水库泄洪及

表5 铁岗水库泄洪对灾损的影响

Tab. 5 Impact of flood releasing from the Tiegang reservoir on disaster losses

资产类型		受灾范围或车辆		资产损失	
		变化值/10 ⁴ m ²	变化率/%	变化值/万元	变化率/%
住宅用地		0.4	1.5	837	2.6
商业用地	商业办公	1.3	28.7	754	15.2
	商业服务	1.8	25.8	418	12.3
工业用地		0.2	4.0	276	1.8
交通用地		1.5	33.9	276	16.2
公共管理与服务用地	机关团体	2.0	17.3	722	7.8
	教育科研医疗	0.1	3.5	11	0.9
	体育文化	0.3	3.9	3	0.1
	公路	14.8	0.5	42	7.1
道路与其他	主要道路	0.1	3.9	137	9.6
	次要道路	6.4	7.9	69	8.5
	其他道路	11.2	1.8	2	0.3
车辆	绿化与空地	1.3	7.1	27	7.1
	私家车/辆	1 119	18.5	1 439	16.9
	公共汽车/辆	112	5.8	66	0.8
合计				5 079	5.6

深隧工程排涝等多种情景及工况下的内涝淹没过程模拟和资产损失评估,为极端气候条件下滨海城市防涝减灾提供了科学依据,主要结论如下。

a)设计暴雨重现期从2 a增加到100 a,内涝淹没的受灾面积由3.98 km²增加到6.75 km²,受灾范围显著加大。淹没水深以小于0.5 m为主,占比为54.1%~64.7%。淹没的土地利用类型主要为道路与其他用地,占比90.2%~91.5%。

b)设计暴雨重现期从2 a增加到100 a,资产损失由2.55亿元增加到9.12亿元,灾损程度明显加剧。占比较大的有住宅用地和车辆,分别为25.8%~35.2%和18.0%~33.7%。

c)在铁岗水库泄洪影响下,设计暴雨重现期100 a的受灾面积和资产损失,分别增加了6.1%和5.6%;考虑深隧工程排涝,设计暴雨重现期100 a且叠加铁岗水库泄洪的资产损失减少了21.0%,其中减灾贡献较大的有住宅用地和车辆,占比分别为

33.6%和22.7%。

表6 深隧工程排涝减灾效果

Tab. 6 Disaster-mitigation effect of inundation in deep tunnel engineering

资产类型	损失变化值/万元						变化率/%						
	2 a	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a	2 a	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a	
住宅用地	-1 555	-2 836	-3 537	-4 148	-4 945	-6 808	-23.6	-23.9	-23.4	-22.9	-21.9	-20.7	
商业用地	商业办公	-366	-474	-866	-865	-1 332	-1 543	-29.2	-23.2	-34.6	-29.0	-28.2	-27.0
	商业服务	-353	-585	-696	-867	-883	-1246	-30.1	-32.3	-32.2	-33.6	-25.9	-32.6
工业用地	-203	-320	-547	-736	-1 045	-1 396	-8.7	-9.5	-8.3	-8.4	-8.5	-9.0	
交通用地	-11	-25	-28	-71	-114	-194	-8.6	-10.1	-8.8	-12.5	-8.9	-9.8	
	机关团体	-857	-544	-1 083	-1 289	-1 878	-2 430	-27.2	-16.3	-25.0	-24.8	-25.7	-24.4
公共管理与服务用地	教育科研医疗	-229	-296	-389	-523	-554	-560	-47.5	-46.5	-46.8	-46.4	-45.9	-45.1
	体育文化	-85	-83	-138	-179	-299	-312	-12.6	-7.6	-11.6	-12.6	-11.8	-10.2
	公路	-31	-33	-33	-62	-141	-131	-22.8	-21.6	-21.1	-29.9	-29.1	-21.0
	主要道路	-125	-151	-27	-327	-399	-462	-32.9	-29.2	-4.1	-45.7	-30.8	-29.5
道路与其他	次要道路	-121	-119	-184	-133	-194	-329	-50.9	-36.4	-48.0	-30.9	-29.0	-37.2
	其他道路	-49	-68	-76	-60	-110	-198	-34.3	-36.3	-31.8	-22.1	-18.7	-29.7
	绿化与空地	-28	-38	-41	-41	-45	-47	-12.9	-13.5	-13.7	-12.8	-12.2	-11.6
车辆	私家车	-1 361	-1 345	-1 573	-2 010	-2 231	-2 706	-28.3	-27.2	-26.3	-26.2	-27.0	-27.2
	公共汽车	-793	-1 086	-1 225	-1 419	-1 620	-1 879	-20.8	-22.2	-21.9	-22.6	-22.7	-23.6
合计		-6167	-8 002	-10 443	-12 732	-15 792	-20 242	-24.2	-22.4	-22.6	-22.5	-21.3	-21.0

参考文献:

- [1] 王伟武,汪琴,林晖. 中国城市内涝研究综述及展望[J]. 城市问题, 2015(10):24-28.
Wang Weiwu, Wang Qin, Lin Hui. Review and Prospect of Urban Waterlogging Research in China [J]. Urban Problems, 2015(10): 24-28. (in Chinese)
- [2] Wang Kai, Wu Yan, Fan Qingdong. Construction of Rainstorm Security Pattern Based on Waterlogging Prevention and Control: A Case Study on Zhengzhou City [J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(11): 8911-8918.
- [3] 郝晓丽,穆杰,喻海军. 城市洪涝试验研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 80-86, 94.
Hao Xiaoli, Mu Jie, Yu Haijun. Research Progress on Urban Flood Experiment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 80-86, 94. (in Chinese)
- [4] 吴家阳,刘佳明,刘晓霞. 深圳市重演郑州"7·20"特大暴雨情景分析[J]. 水利水电快报, 2024(11): 1-8.
Wu Jiayang, Liu Jiaming, Liu Xiaoxia. Scenario Analysis of Zhengzhou '7·20' Extreme Rainstorm in Shenzhen [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2024(11): 1-8. (in Chinese)
- [5] 王兆礼,孟德胜,廖耀星. 快速城市化对城市内涝特征的影响分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 41-51.
Wang Zhaoli, Meng Desheng, Liao Yaoxing. Influence of Rapid Urbanization on Characteristics of Urban Waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 41-51. (in Chinese)
- [6] 李虎成,王天宇,王灵华. 基于Mike Flood的典型滨湖城市排水防涝系统规划[J]. 中国农村水利水电, 2017,(4): 77-80.
Li Hucheng, Wang Tianyu, Wang Linghua. Planning of Drainage and Flood Control System For Typical Lakeside City Based on Mike Flood [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017,(4): 77-80. (in Chinese)
- [7] 马洪涛,张晓昕,王强. 基于模型的城市道路积水应急排水措施研究[J]. 城市道桥与防洪, 2008,(9): 42-45+6-7.
Ma Hongtao, Zhang Xiaoxin, Wang Qiang. Research on Emergency Drainage Measures For Urban Road Waterlogging Based on Model [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2008, (9): 42-45+6-7. (in Chinese)
- [8] Li Jiake, Gao Jiayu, Li Ning, et al. Risk Assessment and Management Method of Urban Flood Disaster [J]. Water

- Resources Management, 2023, 37(5): 2001–2018.
- [9] 程先富, 郝丹丹, 韩平, 等. 基于格网数据的巢湖流域洪涝灾害损失评估[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(10): 1479–1484.
Cheng Xianfu, Hao Dandan, Han Ping, et al. Loss Assessment of Flood Disaster in Chaohu Lake Basin Based on Grid Data [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(10): 1479–1484. (in Chinese)
- [10] Zhang Haixia, Fang Weihua, Zhang Hua, et al. Assessment of Direct Economic Losses of Flood Disasters Based on Spatial Valuation of Land Use and Quantification of Vulnerabilities: A Case Study on the 2014 Flood in Lishui City of China [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2021, 21(10): 3161–3174.
- [11] Liu Yating, Chen Bin, Duan Cuncun, et al. Economic Loss of Urban Waterlogging Based on An Integrated Drainage Model and Network Environ Analyses [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 192: 106923.
- [12] Komolafe Akinola Adesuji, Herath Srikantha, Avtar Ram. Establishment of Detailed Loss Functions for the Urban Flood Risk Assessment in Chao Phraya River Basin, Thailand [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 633–650.
- [13] 黄琰, 董文杰, 支蓉, 等. 强降水持续过程对上海市内交通经济损失评估模型初探[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 810–819.
Huang Yan, Dong Wenjie, Zhi Rong, et al. A Preliminary Study on the Economic Loss Assessment Model of Urban Traffic Under Persistent Heavy Precipitation Process in Shanghai [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4): 810–819. (in Chinese)
- [14] Bocanegra Ricardo A, Francés Félix. Assessing the Risk of Vehicle Instability Due To Flooding [J]. Journal of Flood Risk Management, 2021, 14(4): e12738.
- [15] 廖永丰, 赵飞, 邓岚, 等. 城市内涝灾害居民室内财产损失评价模型研究[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 7–12.
Liao Yongfeng, Zhao Fei, Deng Lan, et al. Study on Indoor Property Loss Assessment Model for Urban Waterlogging Disaster [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 7–12. (in Chinese)
- [16] Chen Wenlong, Wang Xiaoling, Deng Shaohui, et al. Integrated Urban Flood Vulnerability Assessment Using Local Spatial Dependence-Based Probabilistic Approach [J]. Journal of Hydrology, 2019, 575: 454–469.
- [17] Hung B V, Ding N N. Assessment on the Economic Damage of Trading Households Due to Urban Inundation [J]. Journal of Water and Climate Change, 2022, 13(1): 1–12.
- [18] 吕鸿, 吴泽宁, 管新建, 等. 缺资料城市洪灾损失率函数构建方法及应用[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 707–716.
Lyu Hong, Wu Zening, Guan Xinjian, et al. Construction Method and Application of Flood Loss Rate Function For Data-Scarce Cities [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(5): 707–716. (in Chinese)
- [19] 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.
Cai Rongshuo, Xu Weihong. Risk of Socio-Economic Loss From Coastal Flooding in China's Coastal Cities in the Future [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(8): 174–184. (in Chinese)
- [20] 谈荫, 涂新军, 余红刚, 等. 基于MIKE的滨海城市内涝模拟及深隧工程排涝效果评估[J]. 人民珠江, 2024, 45(5): 123–131.
Tan Yin, Tu Xinjun, Yu Honggang, et al. Waterlogging Simulation and Evaluation of Drainage Effect of Deep Tunnel Project in Coastal City Based on MIKE [J]. Pearl River, 2024, 45(5): 123–131. (in Chinese).
- [21] 柴苑苑. 铁岗水库流域暴雨季节性变化规律[J]. 中国农村水利水电, 2011, (8): 67–68, 72.
Chai Yuanyuan. Seasonal Variation Law of Rainstorm in Tiegang Reservoir Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011, (8): 67–68, 72. (in Chinese)
- [22] Gong Peng, Chen Bin, Li Xuecao. Mapping Essential Urban Land Use Categories in China (EULUC-China): Preliminary Results For 2018 [J]. Science Bulletin, 2018, 65(3): 182–187.
- [23] Li Jiake, Zhang Bei, Mu Cong. Simulation of the Hydrological and Environmental Effects of a Sponge City Based on MIKE FLOOD [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(2): 32.
- [24] Zhou Jinjun, Zhang Shunxun, Wang Hao, et al. Spatial Coupling Analysis of Urban Waterlogging Depth and Value Based on Land Use: Case Study of Beijing [J]. Water, 2025, 17(529): 1–26.
- [25] Xu Hui, Gao Junlong, Yu Xinchun. Assessment of Rainstorm Waterlogging Disaster Risk in Rapidly Urbanizing Areas Based on Land Use Scenario Simulation: A Case Study of Jiangqiao Town in Shanghai, China [J]. Land, 2024, 13(7): 1088–1088.
- [26] 李明月. 北京、上海、广州、深圳市政道路建安造价指标测算对比分析[J]. 价值工程, 2024, 43(35): 79–82.
Li Yueming. Comparative Analysis of Construction and Installation Cost Indicators of Municipal Roads in Beijing, Shanghai, Guangzhou and Shenzhen [J]. Value Engineering, 2024, 43(35): 79–82. (in Chinese)

- [27] 祁辉. 市政道路工程综合造价指标的研究[J]. 城市道桥与防洪, 2021, (6): 354-356, 34.
- Qi Hui. Research on Comprehensive Cost Index of Municipal Road Engineering [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021, (6): 354-356, 34. (in Chinese)
- [28] 吴先华, 周蕾, 吉中会. 城市暴雨内涝灾害经济损失评估系统开发研究——以深圳市龙华新区为例[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 71-82.
- Wu Xianhua, Zhou Lei, Ji Zhonghui. Development of Economic Loss Assessment System For Urban Storm Waterlogging Disaster: A Case Study of Longhua New District, Shenzhen [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(5): 71-82. (in Chinese)
- [29] Van G K, Dottori F, Alfieri L, et al. Flood Risk Assessment of the European Road Network [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2021, 21: 1011 - 1027.
- [30] Martínez G E, Gómez M, Russo B, et al. Methodology for the Damage Assessment of Vehicles Exposed to Flooding in Urban Areas [J]. Flood Risk Management, 2019, 12: e12475.

Assessment of Waterlogging Losses in Coastal Cities under Extreme Climate Conditions

LI Miaolin^{1,2,3}, TU Xinjun^{1,2,3*}, LI Ruoyan^{1,2,3}, LIN Kairong^{1,2,3}, LIU Meixian^{1,2,3}, DONG Chunyu^{1,2,3}, LIU Zhiyong^{1,2,3}, ZHANG Jing⁴

(1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 2. Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Center of Water Security Engineering and Technology in Southern China of Guangdong, Guangzhou 510275, China; 4. Powerchina Eco-environmental Group Co., Ltd., Shenzhen 518101, China)

Abstract: Urban waterlogging occurs when surface water cannot be drained in a timely manner due to heavy rainfall. This issue not only disrupts residents' travel but also causes significant economic losses. With rapid urbanization, waterlogging and its associated disaster impacts pose a great challenge to urban safety. The assessment of socio-economic losses caused by urban waterlogging often requires detailed classification of urban land use in the inundated area. Shenzhen, as one of the core cities in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA), is densely populated and economically developed. Under extreme climatic conditions, urban waterlogging has become a common issue. This paper takes the western part of Shenzhen city as a typical study area and simulates waterlogging inundation processes under multiple scenarios, including design rainstorms with return periods of 2a, 5a, 10a, 20a, 50a and 100a, and multiple engineering situations such as reservoir flood discharge, and deep tunnel drainage. A one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) coupled model of urban waterlogging was used for these simulations. By classifying urban land use and assets such as buildings and cars according to different land use types during the inundation processes, this study conducted a refined asset loss assessment by establishing multiple types of inundation depth-asset loss curves. The results demonstrate that as the design return period of rainstorm increases from 2a to 100a, the disaster-affected area significantly expands from 3.98 km² to 6.75 km², and asset losses dramatically increase from 255-million-yuan to 912-million-yuan, Inundation depths are primarily less than 0.5 m accounting for 54.1% -64.7% of the total area affected. Roads make up the majority of the inundation land use types, accounting for 90.2% -91.5%. Asset losses are mainly concentrated in residential land and vehicles, accounting for 25.8%-35.2% and 18.0% -33.7%, respectively. Furthermore, the study evaluates the impact of water engineering plans: the inundated area and asset losses increase by 6.1% and 5.6%, respectively, under reservoir flood discharge scenarios, while asset losses decrease by 21.0% when considering deep tunnel drainage projects. These findings provide a scientific basis for assessing waterlogging losses and implementing local flood prevention and mitigation strategies in coastal cities under multiple extreme climate conditions and engineering plans.

Keywords: Waterlogging simulation; Asset loss; Design rainstorm; Land use; Deep tunnel engineering; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

(责任编辑:高天扬)