

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20240502001

文章编号:1672-9331(2024)06-0001-13

引用格式:陈杰,谭璐,蒋昌波,等.基于Sentinel-1A SAR影像的珠海市台风降雨淹没特征分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(6):1-13.

Citation: CHEN Jie, TAN Lu, JIANG Changbo, et al. Inundation characteristics of typhoon-induced rainfall in Zhuhai based on Sentinel-1A SAR images [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(6): 1-13.

基于 Sentinel-1A SAR 影像的珠海市台风降雨淹没特征分析

陈杰^{1,2,3}, 谭璐¹, 蒋昌波^{1,2,4}, 伍志元^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 4. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412007)

摘要:【目的】基于雷达遥感卫星影像,探究珠海市城区在台风降雨条件下的淹没特征,解决台风过境时无法准确获取淹没范围的问题。【方法】首先,选用 Sentinel-1A 卫星的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像和全球地表水年度数据集,利用阈值分割法和双极化水体指数来获取对应时间段珠海市主城区的淹没范围;然后,结合数字高程模型和土地利用类型数据,并利用 ArcGIS 平台对珠海市 2015—2022 年间的 10 场过境台风降雨所造成的淹没范围进行空间特征与成因分析。最后,结合层次分析法,并利用淹没可能性、防潮洪能力、高程和河网密度 4 项指标对珠海市主城区台风降雨淹没风险进行分析。【结果】在台风和非台风降雨导致淹没的范围中,斗门区为淹没面积最大的行政区。珠海市河网密度较大区域发生淹没最为频繁,其次是城乡居民用地;珠海市部分区域受台风降雨影响易发生淹没,淹没风险偏高。【结论】利用 Sentinel-1A SAR 影像并结合双极化水体指数可获得较为准确的台风降雨淹没范围,在台风过境时应更加关注高程较低地区以及水系分布较密地区的受灾情况。

关键词:淹没范围;台风降雨;空间特征;Sentinel-1A;淹没风险;双极化水体指数

中图分类号:TP79;TV8

文献标志码:A

Inundation characteristics of typhoon-induced rainfall in Zhuhai based on Sentinel-1A SAR images

CHEN Jie^{1,2,3}, TAN Lu¹, JIANG Changbo^{1,2,4}, WU Zhiyuan^{1,2,3}

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 4. Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: [Purposes] Based on radar remote sensing satellite images, this paper aims to explore the inundation characteristics of typhoon-induced rainfall in urban areas of Zhuhai City, so as to solve the problem of not being able to accurately obtain the inundation scope during the passage of a typhoon. [Methods] Firstly, Sentinel-1A synthetic aperture radar (SAR) images and an annual dataset of global surface water were selected to obtain the inundation scope in the main urban area

收稿日期:2024-05-02;修回日期:2024-06-18;接受日期:2024-06-18

基金项目:湖南省自然科学基金(2022JJ10047);国家自然科学基金资助项目(52271257)

通信作者:陈杰(1982—)(ORCID:0000-0002-9930-0323),男,教授,主要从事海岸防灾减灾研究。

E-mail:chenjie166@163.com

of Zhuhai City in the corresponding time period by using the threshold segmentation method and the dual-polarized water index. Then, combined with the digital elevation model and the land-use type data, the spatial characteristics and causes of inundation scopes caused by rainfalls during the passage of 10 typhoons from 2015 to 2022 were analyzed by using the ArcGIS platform. Through the hierarchical analysis method, the inundation risk in the main urban area of Zhuhai City caused by typhoon-induced rainfalls was analyzed in terms of inundation possibility, tidal flood control capacity, elevation, and river network density. **[Findings]** In the inundation scopes generated by typhoon-induced and non-typhoon-induced rainfalls, Doumen District is the administrative district with the largest inundation area, and inundation is the most frequent in the areas with denser river networks in Zhuhai City, followed by urban and rural residential land use; some areas in Zhuhai City are susceptible to inundation due to the impacts of typhoon-induced rainfall, and the inundation risk is high. **[Conclusions]** Using Sentinel-1A SAR images combined with a dual-polarized water index can obtain more accurate information on the inundation scope of typhoon-induced rainfall. During the passage of typhoons, more attention should be paid to the disaster situation in areas with low elevation and areas with dense water system distribution.

Key words: inundation scope; typhoon-induced rainfall; spatial characteristic; Sentinel-1A; inundation risk; dual-polarized water index

Foundation items: Project (2022JJ10047) supported by Outstanding Youth Natural Science Foundation of Hunan Province; Project (52271257) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author: CHEN Jie (1982—) (ORCID: 0000-0002-9930-0323), male, professor, research interest: coastal disaster prevention and reduction. E-mail: chenjie166@163.com

0 引言

我国拥有绵长的海岸线,沿海地区经常发生台风灾害。台风天气频发带来的大量降雨以及引起的次生风暴潮,给沿海地区带来了严重的淹没损失^[1-3]。台风是影响珠海市的主要灾害性天气,其带来的大量降雨往往导致城区被淹没,对城市产生较大影响。因此,利用不受天气影响的雷达遥感卫星数据对降雨后产生的淹没空间分布特征和淹没风险进行研究,对沿海城市的防灾减灾工作具有指导意义。

近年来,随着防灾减灾意识的不断提高,学者们通过数值模拟对淹没特征进行研究。部分学者通过数值模拟,对台风条件下的影响范围和持续时间^[4]、不同降雨条件下的淹没水深和范围^[5]、山洪淹没时空变化特征^[6]和暴雨时空分布规律^[7]等进行研究分析,得到不同淹没条件下的风险分布结果,并提出相应的灾害治理建议。随着遥感技术的不断发展,结合地理信息系统(geographic information system, GIS)技术,研究人员可以得到

实际的淹没范围。在此基础上,部分学者则结合遥感和GIS技术对淹没状况^[8]、淹没范围和淹没频率^[9]、灾害损失的时空分布和演变趋势^[10]、不同等级台风风暴潮的淹没风险^[11]进行研究分析。然而,台风过境时段的阴雨天会导致遥感影像不准确或者被遮盖,光学遥感数据无法满足台风天气的水体监测要求,而合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)则具备全天时、全天候、全球覆盖的观测能力,可以及时获取水体信息^[12],如WOOD等^[13]利用哨兵1号Sentinel-1数据的时间序列和测量数据提出一种新方法来进行较高精度的洪水监测,并改进了全球尺度的淹没模型。然而,目前大多数研究只针对一段时间的洪涝或者风暴潮灾害进行数值模拟分析,或只针对某一场洪水或者某一段时间的汛期水体进行监测,像对台风这种频繁影响我国沿海城市安全的灾害天气进行精准、集中式分析研究比较缺乏。

为了得到较精确的台风天气情况下的淹没范围,本研究首先选取Sentinel-1A SAR影像和全球地表水年度数据集(JRC yearly water classification history, JRC),采用Sentinel-1双极化水体指数

(Sentinel-1 dual-polarized water index, SDWI)法得到珠海市2015—2022年可获取数据的10场台风过境后的淹没范围,研究不同强度台风过境后珠海市受降雨影响产生的真实淹没范围变化和空间特征;然后,结合数字高程模型(digital elevation model, DEM)和土地利用类型数据对淹没范围和空间特征进行分析,得出在台风过境、大量降雨条件下易发生淹没的区域,并与非台风条件下的结果进行对比;最后,利用层次分析法将淹没可能性作为评价指标之一,对珠海市主城区的台风降雨淹没风险进行评估。本研究将为珠海市等沿海地区的防潮减灾工作提供科学决策参考。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

珠海市位于珠江口西南部,地处北纬 $21^{\circ}48' \sim 22^{\circ}27'$ 、东经 $113^{\circ}03' \sim 114^{\circ}19'$ 。据统计,1953—2022年登陆或影响珠海市的台风共有178场次,珠江口为风暴潮灾害频发区之一^[14]。作为珠江口西岸都市圈核心,珠海市近年来遭受台风灾害损失最严重的一次是在2017年7月23日,此次台风“天鸽”登陆造成直接经济损失44.01亿元^[15]。珠海市行政区划和高程数据如图1所示,珠海市主城区土地利用类型分布如图2所示。其中,高程数据和土地利用类型数据来源于资源环境科学数据平台,分辨率为30 m。

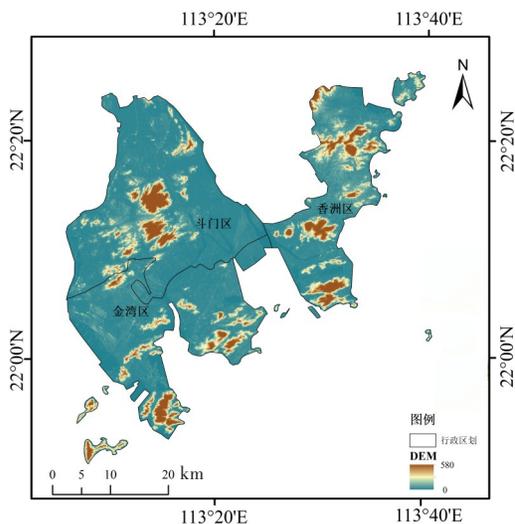


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

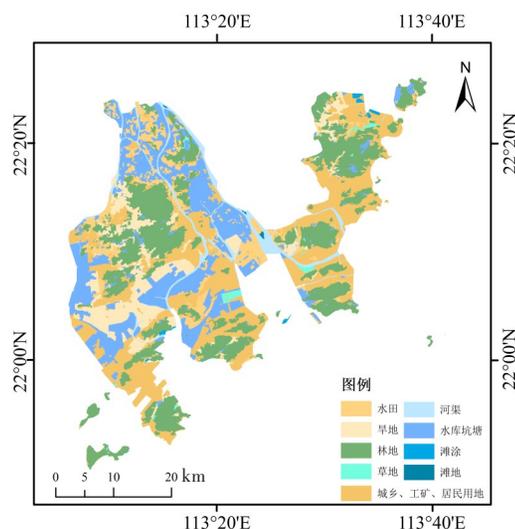


图2 珠海市主城区土地利用类型

Fig. 2 Land use types in main urban area of Zhuhai City

1.2 数据源及其预处理

Sentinel-1由两颗卫星组成,载有C波段SAR,能够利用SAR技术获取地球表面的高分辨率雷达图像,可提供连续图像(白天、夜晚和各种天气),且具有4种成像模式。研究数据来源于欧洲空间局科学数据中心,这些数据是在Sentinel-1发射并有公开数据后获取的,选用的数据是Sentinel-1A的Ground Range Detected (GRD)一级产品,分辨率为10 m。对于珠海市,该产品的重访周期为12 d。本研究从2015—2022年广东省海洋灾害公报中统计了影响珠海市的10场台风数据,随后对这些台风过境后3 d内的Sentinel-1A SAR影像数据进行了筛选,并补充获取了同期内珠海市发生的7场非台风降雨的Sentinel-1A SAR影像数据,最后对台风降雨和非台风降雨对珠海市的影响进行了对比分析。JRC数据覆盖了1984—2019年的Landsat系列卫星的高分辨率图像。本文选取该数据并将其分为无数据、非水体、间歇性水体和永久性水体4类,同时利用Google Earth Engine (GEE)平台的JRC数据对珠海市正常时段的水体进行提取^[16-17],得到长时序珠海市自然水体范围。进行水体范围提取的方法包括灰度阈值分割法^[18]、滤波法、机器学习方法^[19]等。本文通过综合分析各方法并对比阈值分割法和面向对象法的总体精度,发现阈值分割法总体精度为95.07%,面向对象法总体精度为91.13%。本文利用贾诗超等^[20]提出的SDWI法计算双极化水体指数来提取水体范围,该方法利

用水体在SAR影像上的向后散射系数低于土壤植被这一特性,将双极化数据相乘来增强水体信息。但在面对复杂地形的情况下,需要叠加DEM进行决策树分类,结合DEM的坡度以及高程信息综合去除阴影所带来的影响。本文结合DEM与SDWI法,并运用决策树分类方法,进一步提高了水体提取精度。SDWI法计算公式如式(1)所示,其中 K_{SDWI} 为双极化水体指数。淹没范围提取流程如图3所示。

$$K_{SDWI} = \ln(10 \times V \times H) - 8 \quad (1)$$

式中: V 与 H 分别表示Sentinel-1A中的垂直发送和垂直接收(VV)、垂直发送和水平接收(VH)两种极化数据。

Sentinel-1A各成像模式参数见表1。模式分为条带绘图模式(stripmap, SM)、干涉宽视场模式(interferometric wide swath, IW)、超宽视场模式(extra wide swath, EW)、波模式(wave, WM)。其中极化类型包括用于水平发送和水平接收(HH)、VV、水平发送和垂直接收(HV)、VH。

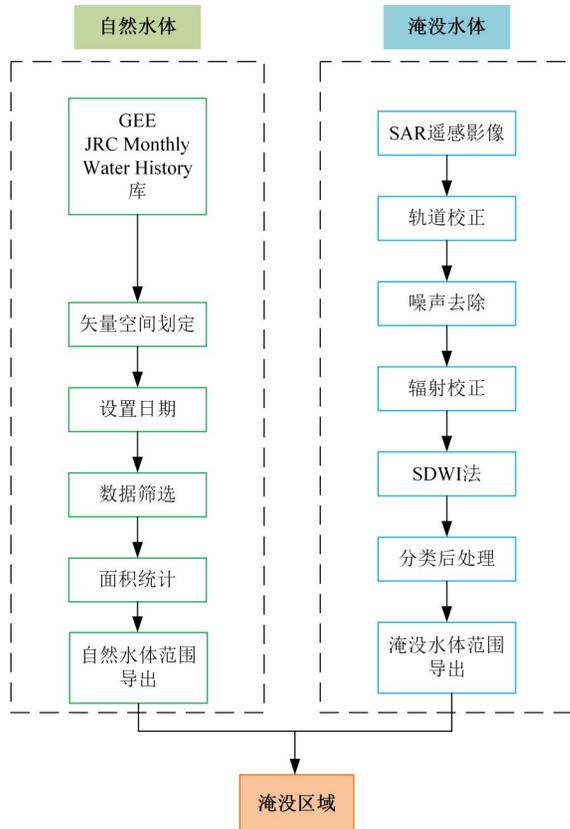


图3 淹没范围提取流程图

Fig. 3 Inundation scope extraction process

表1 Sentinel-1A各成像模式参数

Table 1 Imaging parameters of Sentinel-1A in all modes

模式	幅宽/ m	分辨率/(距离向× 方位向)	极化类型
SM	80	5 m×5 m	HH+HV、VH+VV、HH、VV
IW	250	5 m×20 m	HH+HV、VH+VV、HH、VV
EW	400	25 m×100 m	HH+HV、VH+VV、HH、VV
WM	20×20	5 m×20 m	HH、VV

1.3 淹没范围获取方法

本研究对预处理后的Sentinel-1A SAR影像数据进行 K_{SDWI} 计算,采用阈值分割法进行水体提取,去除陆地信息得到淹没范围。通过反复试验对比,研究区水体提取阈值为0.35,即当 $K_{SDWI}>0.35$ 时,为水体,反之,则为非水体。通过GEE平台的JRC数据对珠海市正常时段的水体进行提取,得到长时序珠海市自然水体范围面积为133 km²。

本研究对珠海市随机选取水体和非水体样本,并在此基础上,使用同期Google Earth多时相高空间分辨率影像对样本的正确性进行检查,随机选取670个样本点进行精度评价,精度评价结果见表2。利用验证样本点计算混淆矩阵,以总体精度和Kappa系数两个指标评价分类效果。经计算,提取的总体精度为95.07%,Kappa系数为0.895,提取结果较好。

表2 SDWI法淹没范围提取结果精度评价表

Table 2 Evaluation of accuracy of inundation scope extraction results by SDWI method %

地物类别	用户精度	制图精度	漏提率	误提率
水体	93.65	93.28	6.72	6.35
非水体	95.93	96.16	3.84	4.07

1.4 珠海市主城区台风降雨淹没风险评估方法

层次分析法是一种多层次权重分析决策方法,适用于本研究这种目标值难以定量描述的风险决策问题,其主要步骤包括建立层次结构模型、构造判断矩阵、计算权重向量、一致性检验、计算组合权重。利用层次分析法对影响珠海市主城区台风降雨淹没风险的指标进行权重计算,指标包括一致性指标(consistency index, CI)、随机一致性指标(random index, RI)、检验系数(composite reliability, CR)。通常情况下,CR值越小,说明判断矩阵一致性越好。一般情况下,CR值小于0.1,判断矩阵满足一致性检验。层次分析法中的各参

数计算如下:

$$I = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$R = \frac{I}{S} \quad (3)$$

式中: n 为特征矩阵的阶数; λ 为最大特征根; I 为一致性指标; S 为随机一致性指标; R 为检验系数。

2 珠海市台风降雨淹没范围研究

2.1 2015—2022 年珠海市台风降雨导致淹没特征分析

本文选取了 2015—2022 年间的 10 场台风数据,对珠海市台风降雨导致的淹没空间特征进行

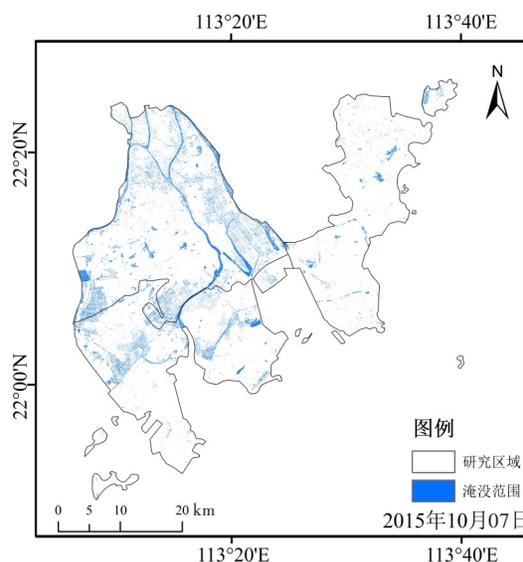
分析。这 10 场台风对应的淹没情况统计见表 3。各场台风降雨引起的淹没范围如图 4 所示。其中,累计降雨数据为遥感影像获取日近 3 d 的日累积降雨量之和,降雨数据的来源为欧洲中期天气预报中心。

利用 ArcGIS 平台将自然水体部分去除,可得到实际台风降雨引起的淹没范围。ISLAM 等^[21]利用遥感影像,通过叠加分析得到研究区域的洪水淹没次数。本研究将得到的数据叠加分析,获得台风降雨导致淹没可能性的分布图,再利用自然断点法将淹没次数分为 1~2、3~6、7~10 次三类淹没,并将这三类淹没所对应的程度分别定义为淹没可能性较小、较大和极大。淹没可能性分布如图 5 所示。

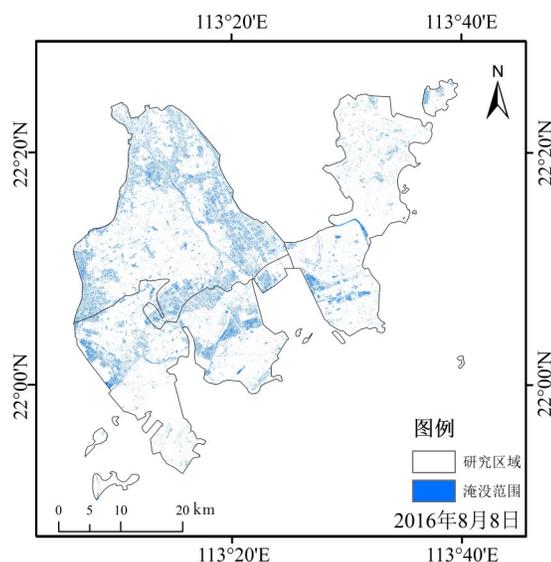
表 3 2015—2022 年台风场次对应淹没情况统计表

Table 3 Inundation cases corresponding to typhoon events from 2015 to 2022

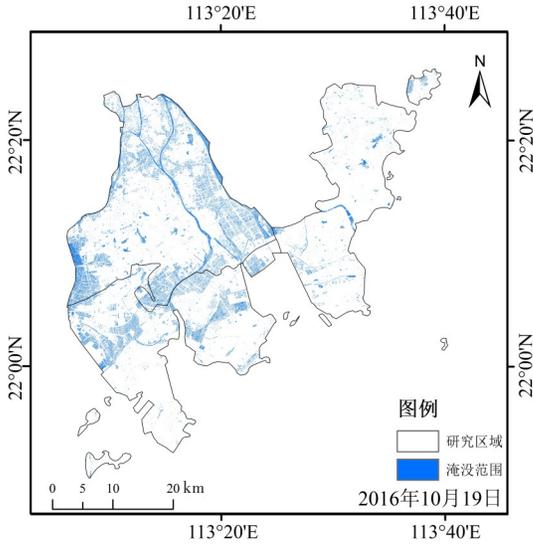
序号	台风名称	遥感影像拍摄时间	台风时间	累计降雨量/mm	实际淹没面积/km ²
1	2015 年“彩虹”	2015-10-07	2015-10-03—2015-10-06	134	58.65
2	2016 年“妮姐”	2016-08-08	2016-08-02—2016-08-07	230	80.08
3	2016 年“海马”	2016-10-19	2016-10-17—2016-10-19	120	74.33
4	2017 年“帕卡”	2017-08-27	2017-08-26—2017-08-29	94	64.19
5	2019 年“韦帕”	2019-08-05	2019-07-31—2019-08-04	204	80.78
6	2020 年“海高斯”	2020-08-23	2020-08-18—2020-08-22	102	72.13
7	2021 年“卢碧”	2021-08-06	2021-08-04—2021-08-08	110	66.95
8	2021 年“圆规”	2021-10-17	2021-10-10—2021-10-15	310	87.87
9	2022 年“木兰”	2022-07-08	2022-06-30—2022-07-06	200	75.25
10	2022 年“暹芭”	2022-08-13	2022-08-04—2022-08-11	255	59.58



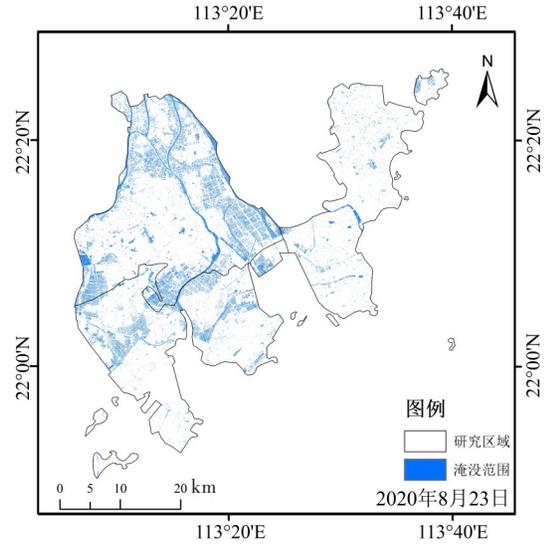
(a) 台风“彩虹”期间降雨淹没范围



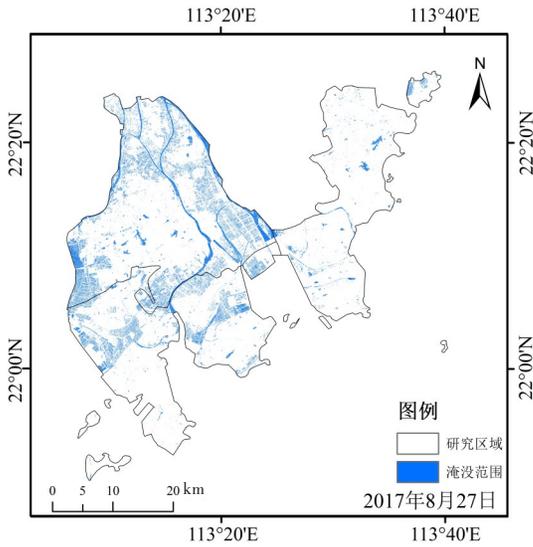
(b) 台风“妮姐”期间降雨淹没范围



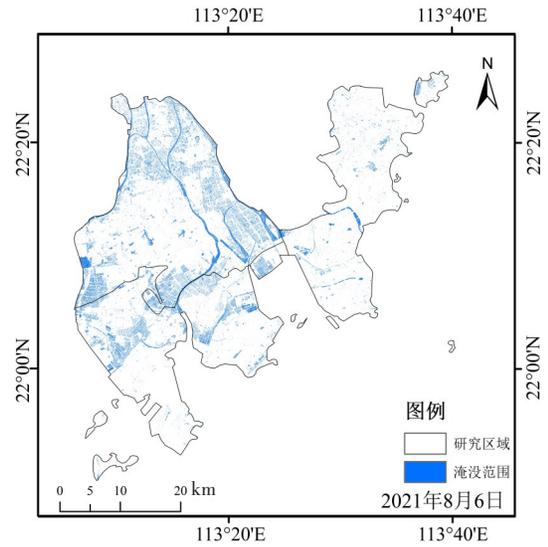
(c) 台风“海马”期间降雨淹没范围



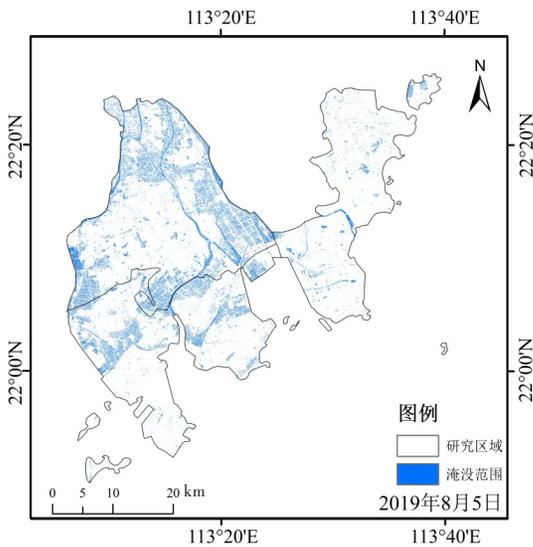
(f) 台风“海高斯”期间降雨淹没范围



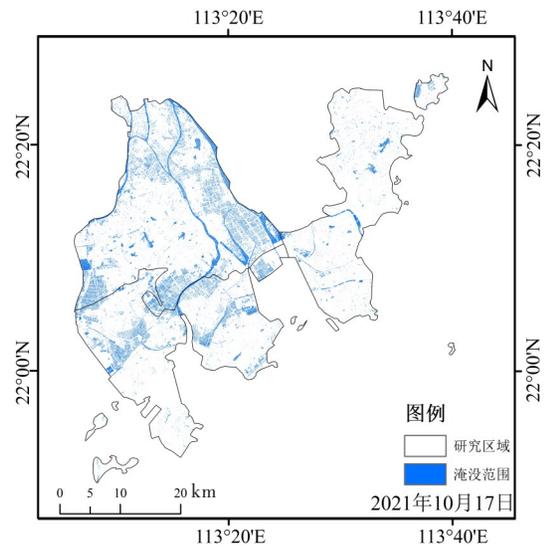
(d) 台风“帕卡”期间降雨淹没范围



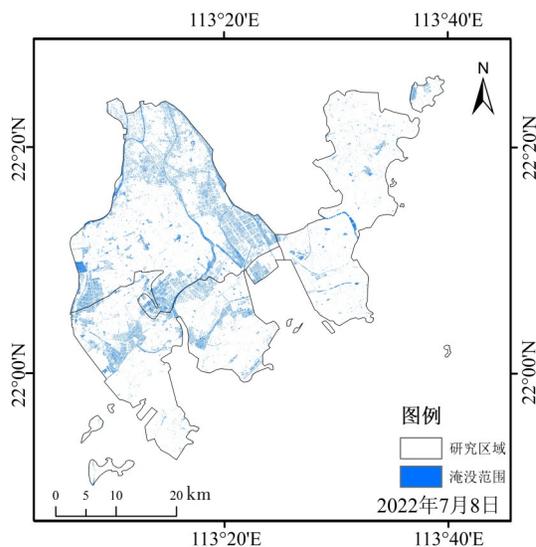
(g) 台风“卢碧”期间降雨淹没范围



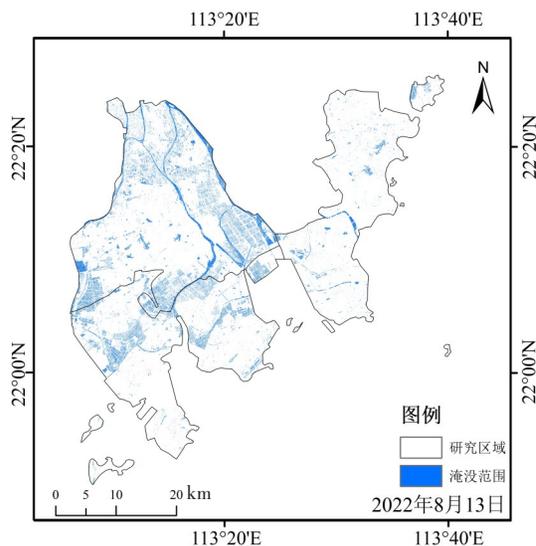
(e) 台风“韦帕”期间降雨淹没范围



(h) 台风“圆规”期间降雨淹没范围



(i) 台风“木兰”期间降雨淹没范围



(j) 台风“暹芭”期间降雨淹没范围

图 4 珠海市主城区 10 场台风降雨引起的淹没范围
Fig. 4 Inundation scope of rainfall induced by 10 typhoons in main urban area of Zhuhai City

由表 3 可知,在 10 场台风降雨中,实际淹没面积较大的场次为 2021 年第 18 号台风“圆规”、2019 年第 7 号台风“韦帕”和 2016 年第 4 号台风“妮妲”。这 3 场台风的累计降雨量均在 200 mm 以上,实际淹没面积均在 80 km² 以上。结合降雨量和实际淹没面积数据,发现降雨量和淹没面积呈同步增长的趋势,且珠海市主城区实际淹没面积在 60~90 km² 左右。

本文结合珠海市主城区 DEM,发现淹没区主要集中在地势较低地区,以及主要干流和开放性水域部分。斗门区的中西部、金湾区的南部、香洲

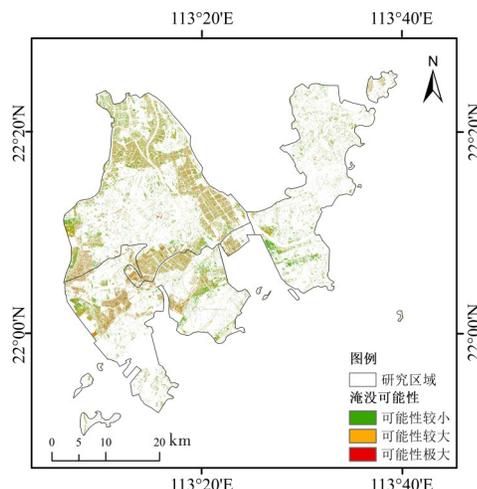


图 5 珠海市主城区台风降雨导致淹没可能性分布

Fig. 5 Distribution of inundation probability of typhoon-induced rainfall in main urban area of Zhuhai City

区的山体部分等地势较高,这些地区在台风降雨条件下的淹没可能性较小甚至不发生淹没。

表 4 为珠海市各土地利用类型的台风降雨淹没灾害可能性面积。本文根据土地利用类型分布,并结合表 4 数据进行分析,发现淹没分布范围最广的区域是开放性水域部分,例如水库坑塘和水田附近。珠海市共有 3 处珠江入海口,分别是虎跳门、磨刀门和鸡啼门,其中鸡啼门被淹没最为频繁且淹没面积最大。淹没频繁是由于所处位置地势较低,且附近有许多小型支流,河流面积易拓展。台风带来的大量降雨使水位上涨,从而导致自然水体的原本范围进一步扩大。

表 4 珠海市各土地利用类型的台风降雨淹没灾害可能性面积

Table 4 Area for inundation possibility of typhoon-induced rainfall for different land use types of Zhuhai City

土地利用类型	淹没面积/km ²		
	可能性较小	可能性较大	可能性极大
水田	7.80	9.90	4.34
旱地	6.33	3.39	2.31
林地	2.31	3.21	2.69
草地	0.61	0.92	0.43
河渠	1.46	3.37	2.25
水库坑塘	25.23	53.82	37.44
滩涂	0.26	0.43	0.22
滩地	0.06	0.16	0.06
城乡、工矿、居民用地	17.38	21.30	3.36

图6为10场台风降雨引起的珠海市各行政区淹没面积占比。由图6可以看出:斗门区的淹没面积占比为总面积的60%左右;而金湾区的淹没面积占比相对较少,几乎在30%以下;淹没面积最小的香洲区的占比则在10%上下。

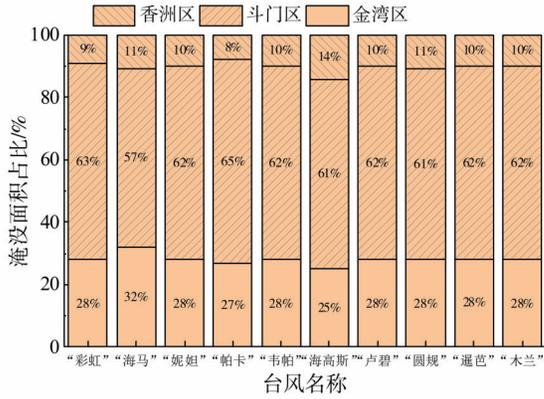


图6 台风降雨后珠海市各行政区淹没面积占比

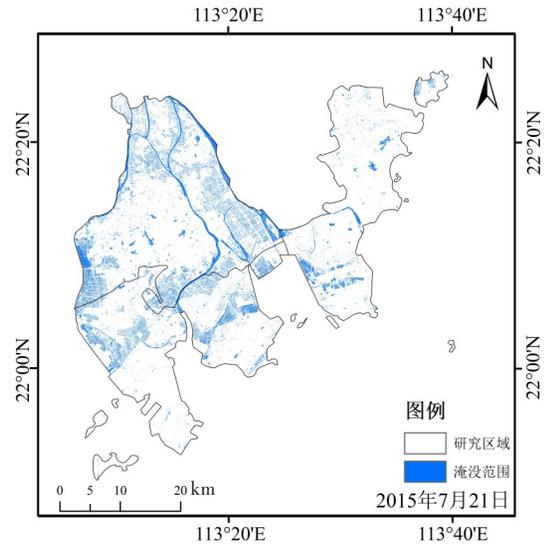
Fig. 6 Percentage of inundated area in each administrative district of Zhuhai City after typhoon-induced rainfall

香洲区为珠海市中心城区,主要土地利用类型为城乡居民用地,有较完备的排水管网建设和较高的城市防洪标准,淹没面积最小。淹没可能性极大区域主要在东部淇澳岛夹洲岛周围、中珠排洪渠的沿岸、前山水道沿岸、官塘湾、中心沟、马骊洲水道这几处区域。斗门区和金湾区的土地利用类型以水库坑塘为主,其中斗门区的淹没频繁区域为鸡啼门水道沿岸、乾务水库、鸡啼门、乾务冲口、荷麻溪、水冲石、天生河的黄镜门处、大角头冲、崖门口等。而金湾区在沙拦仔、直辣山、乾务大冲、大门航道、十字沥这几个区域淹没最为频繁。台风过境时持续降雨超过了河道和城市管网排放能力,大量雨水引起海水倒灌,使得城市内积水无法排出,产生淹没。

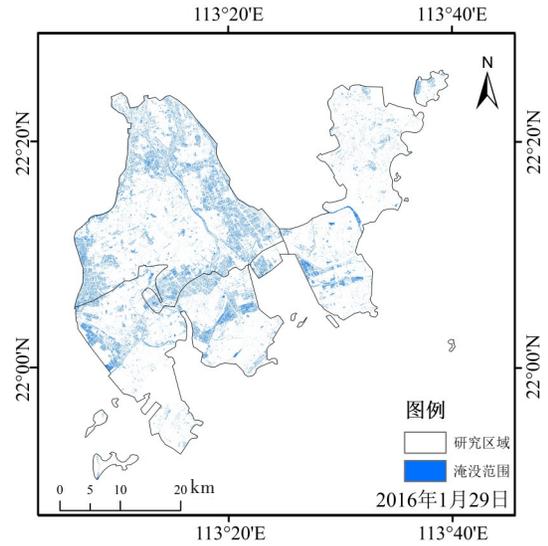
2.2 2015—2022年珠海市非台风降雨导致淹没特征分析

本节通过对2015—2022年珠海市非台风降雨资料进行收集,获取了该研究时间段内7场珠海市非台风降雨淹没数据,并对2.1节中台风降雨数据进行补充和对比。非台风降雨引起的淹没范围和淹没可能性分布图分别如图7、图8所示。

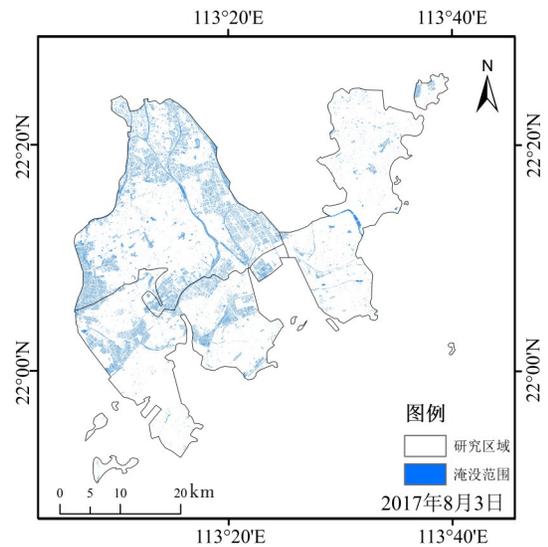
珠海市各土地利用类型非台风降雨淹没灾害可能性面积统计情况见表5。从土地利用类型和淹没可能性的分布来看,主要淹没范围同样



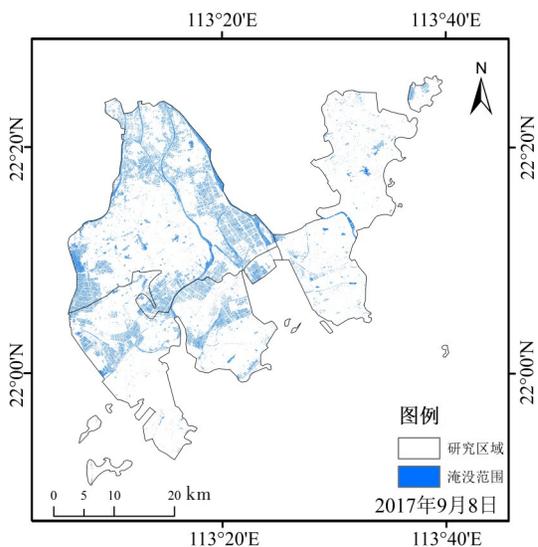
(a) 2015年7月21日降雨淹没范围



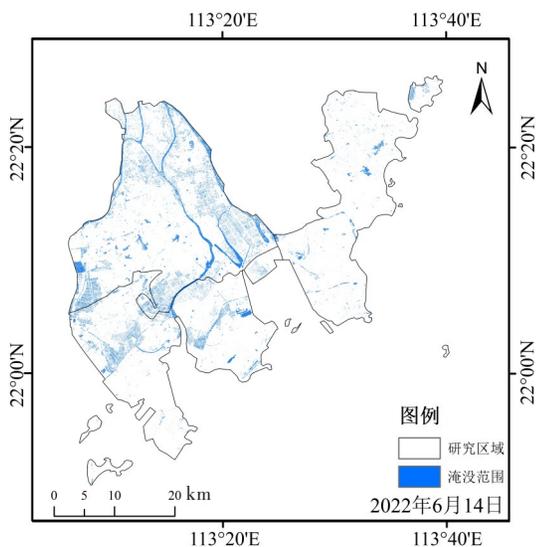
(b) 2016年1月29日降雨淹没范围



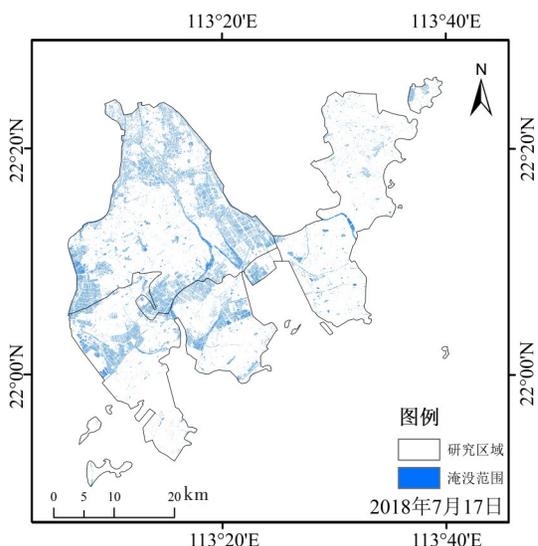
(c) 2017年8月3日降雨淹没范围



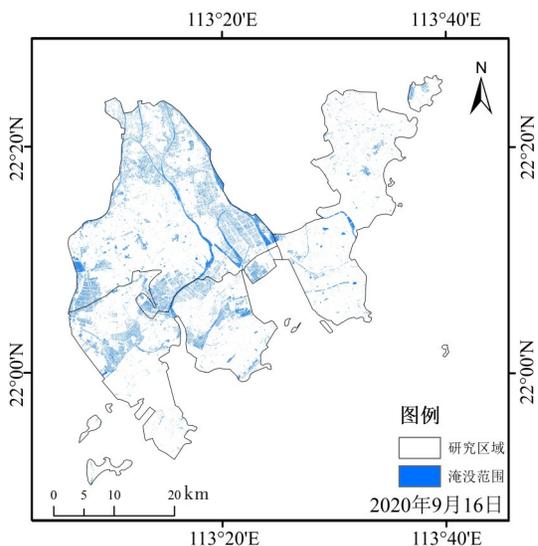
(d) 2017年9月8日降雨淹没范围



(g) 2022年6月14日降雨淹没范围



(e) 2018年7月17日降雨淹没范围



(f) 2020年9月16日降雨淹没范围

图7 珠海市主城区7场非台风降雨引起的淹没范围
Fig. 7 Inundation scope of seven non-typhoon-induced rainfalls in main urban area of Zhuhai City

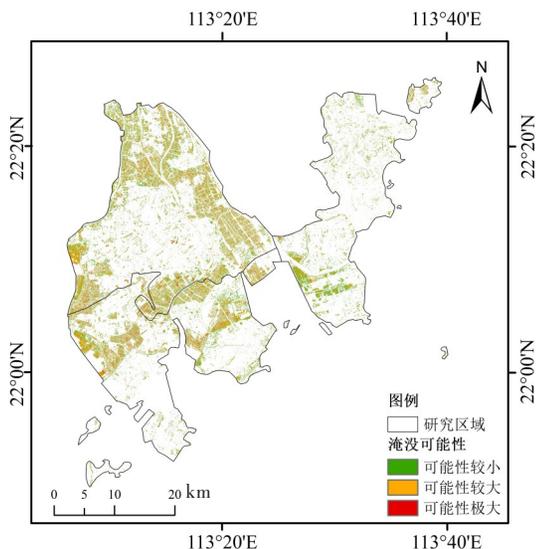


图8 珠海市主城区非台风降雨导致淹没可能性分布
Fig. 8 Distribution of inundation probability due to non-typhoon-induced rainfall in main urban area of Zhuhai City

分布在水域部分。其中水库坑塘的淹没面积占比高达50%,其次为城乡居民用地。由于不同土地利用类型的入渗速率不同,故淹没灾害可能性分布也与土地利用类型有关。土地利用类型按照入渗率由大到小排序依次为林地、灌木、草地、农田。珠海市水产养殖面积较大,仅斗门区水产养殖面积就高达11 820公顷,导致水田部分淹没范围较广。台风降雨造成水库坑塘的淹没占比略比非台风降雨的高,这是因为台风过境时引起的次生风

暴雨会使沿海部分地区,特别是低洼的海滩区域,受到潮水顶托的影响,导致这些区域无法正常往外海排水,从而产生海水倒灌,影响整个城市。

表5 珠海市各土地利用类型非台风降雨淹没灾害可能性面积

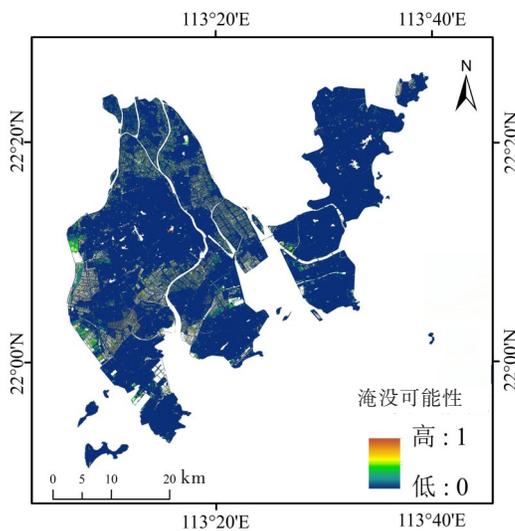
Table 5 Area for inundation possibility of non-typhoon-induced rainfall for different land use types of Zhuhai City

土地利用类型	淹没面积/km ²		
	可能性较小	可能性较大	可能性极大
水田	8.65	7.22	3.49
林地	2.17	2.23	2.25
草地	0.63	0.64	0.39
河渠	1.43	2.26	2.10
水库坑塘	26.47	40.56	33.36
滩涂	0.32	0.37	0.18
滩地	0.06	0.10	0.03
城乡、工矿、居民用地	19.02	20.75	5.90

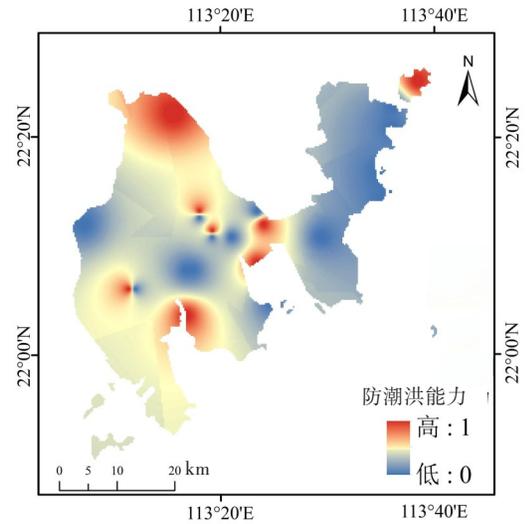
3 珠海市主城区台风降雨淹没风险分析

3.1 指标数据分析

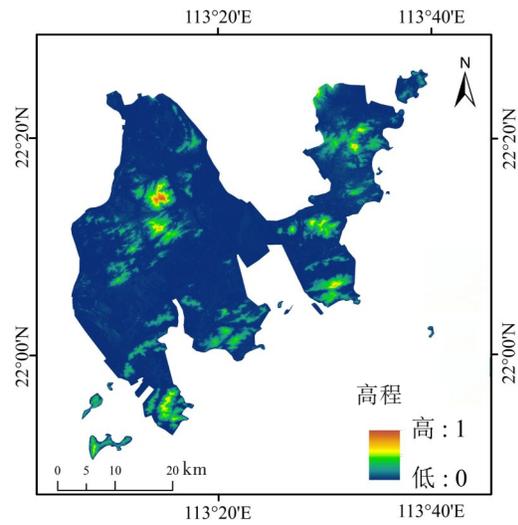
本节将前文获取的台风降雨淹没可能性作为淹没风险分析的指标之一,同时收集了高程数据、河网密度数据和防潮洪能力数据,将这4项指标数据进行标准化处理,并使用层次分析法对珠海市主城区淹没风险进行分析。图9为各指标进行标准化后的数据,各项数据来源见表6。



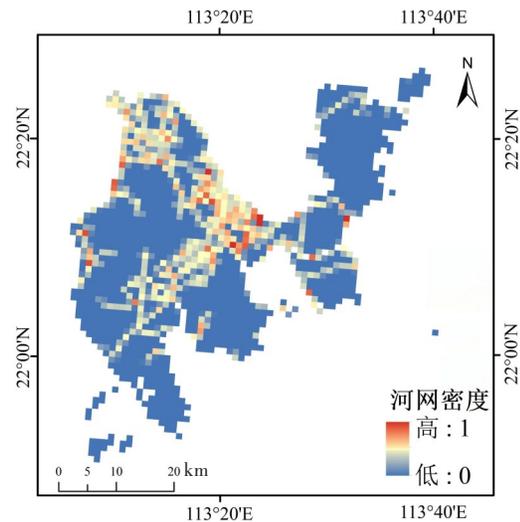
(a) 淹没可能性



(b) 防潮洪能力



(c) 高程



(d) 河网密度

图9 标准化后指标数据

Fig. 9 Post-standardized indicator data

表6 指标体系说明

指标	数据来源	属性
淹没可能性	本文	正向
防潮洪能力	珠海市海堤提升建设总体方案 (2021—2035年) (https://www.zhuhai.gov.cn/attachment/0/300/300423/3134188.pdf)	负向
高程	资源环境科学数据平台 (https://www.resdc.cn/)	负向
河网密度	https://www.openstreetmap.org/	正向

3.2 权重计算

本研究通过专家打分对各指标的相对重要程度建立判断矩阵,并对各指标权重进行计算。针对4阶判断矩阵,利用和积法计算得到的特征向量为(1.692,0.909,0.909,0.490),得出CI值为0.003,RI值查表为0.890,计算得到CR值为0.004,小于0.1。该结果证明本研究判断矩阵满足一致性检验,计算所得权重具有一致性,结果合理。淹没风险指标权重分配见表7。

表7 淹没风险指标权重分配表

Table 7 Assignment of weights to inundation risk indicators

评估指标	权重
淹没可能性	0.122 5
防潮洪能力	0.227 2
高程	0.227 2
河网密度	0.423 1

3.3 评估结果分析

通过上述指标权重分配,并利用ArcGIS平台进行分析计算,本文获得珠海市主城区台风降雨淹没风险性分布图,如图10所示。从图10可以看出:珠海市的台风降雨淹没的高风险区域主要分布在斗门区与金湾区相交的中部,即鸡啼门水道、乾务大冲等河流水系附近;其次,在斗门区北部与江门市交界处的鸡啼门水道、崖门口附近,该区域属于淹没风险较高地区。

本研究通过对比珠海市的三个行政区的淹没风险性分布情况,发现香洲区风险性大部分为中风险,作为中心城区其防潮洪能力相对较好,香洲区的整体河网密度相对其他两个行政区的也相对较小,但其中部河网密度较大,该区域风险较高。而斗门区中部包括西江在内的3条比较大的河流,河网分布较密,部分区域淹没较频繁,且北

部区域防潮洪水平相对较低,只有中部高程较高区域淹没风险相对较低。由图10可知:金湾区的淹没风险比斗门区的稍低,其南部高程相对较高,河网密度小,淹没风险较低;西南区域河流和台风影响相对较大,风险相对更高;金湾区和斗门区的交界处属于高风险区。

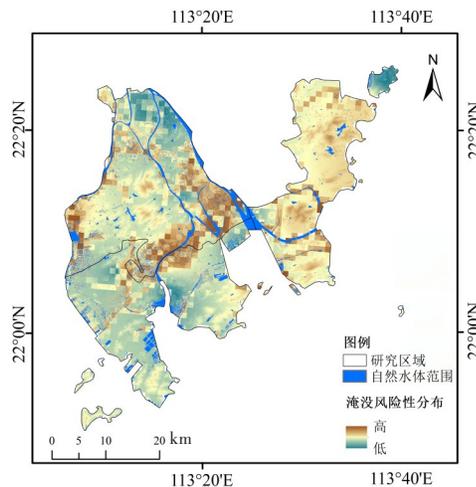


图10 珠海市主城区台风降雨淹没风险性分布图

Fig. 10 Distribution of inundation risk of typhoon-induced rainfall in main urban area of Zhuhai City

4 讨论

由中华人民共和国水利部和粤港澳大湾区建设领导小组办公室在2021年联合印发的《粤港澳大湾区水安全保障规划》,以及由广东省生态环境厅在2022年发布的《广东省海洋生态环境保护“十四五”规划》相继出台。上述规划的颁布对我国沿海城市抵御台风灾害、提升防潮洪能力给出了重要指示,但平均每年人员伤亡、经济损失、农田受灾面积和房屋倒塌数量仍然很高。因此,如何降低台风灾害风险显得尤为重要。

总的来说,台风过境的降水所造的淹没受多方面复合因素的影响,这些因素包括降雨量、高程、土地利用类型、台风风速、路径、风暴潮的叠加以及所处地区与台风中心之间的距离等。利用Sentinel-1A SAR影像这类不受台风降雨影响的遥感数据,可以有效提取淹没范围。这种方法解决了光学遥感卫星影像因天气因素被遮挡,以及实测过程中难以操作的问题,能够更加快速、准确地得到相应淹没区域。在实际分析应用中,还应综

合考虑沿海城市次生风暴潮的影响,以及高程、土地利用类型、城市排水管网的分布,同时须结合珠海市的城市发展规划和未来可能的变化情况,如土地利用变化、人口增长等。利用上述内容在将来可以采用如统计分析、模型模拟等方法,得到珠海市主城区易淹区域的等高线高程阈值。后续可以获取更高分辨率的数据,并利用更加全面、丰富的遥感卫星数据对台风这种短时影响大的天气进行有针对性的研究,同时结合相关地面监测资料,对台风降雨过程特征及淹没风险进行更深入的分析。

5 结论

本研究基于 Sentinel-1A SAR 影像,选取了珠海市 10 场台风降雨和 7 场非台风降雨的淹没范围,并对两者进行对比分析,同时结合高程、土地利用类型等数据,研究珠海市台风降雨期间淹没的空间特征,进而得到各区域的淹没风险可能性。研究结论如下:

1) 本文通过将台风和非台风两种条件下的珠海市主城区降雨淹没范围进行对比分析,发现斗门区、金湾区、香洲区淹没面积占比依次递减。结合高程和土地利用类型分布数据发现,台风降雨淹没频繁区域产生的原因主要是区域所处位置地势相对较低,距离水系较近,附近河网较密等。各土地利用类型中淹没频繁区域主要为水库坑塘、水田和城乡居民用地,其中水库坑塘的淹没面积为总面积的 50% 以上,水系周围为淹没发生的主要区域。台风过境时带来的大量降雨和引起的次生风暴潮是导致沿海地区淹没的主要原因。

2) 对影响台风降雨淹没的 4 个相关指标数据进行综合分析,得到珠海市在台风降雨影响下的主城区淹没风险性分布图,部分区域在台风降雨影响下淹没风险偏高,须重点关注。

[参考文献]

[1] 郭敬,车助镁,金锴,等.不同台风路径下浙江省台风风暴潮危险性空间分布特征分析[J].海洋预报,2023,40(3):19-27. DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2023.03.003.
GUO Jing, CHE Zhumei, JIN Kai, et al. Spatial distribution characteristics of typhoon storm surge in

Zhejiang Province under different typhoon tracks [J]. Marine Forecasts, 2023, 40(3): 19-27. DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2023.03.003.
[2] 隋意,石洪源,钟超,等.我国台风风暴潮灾害研究[J].海洋湖沼通报,2020(3):39-44. DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2020.03.006.
SUI Yi, SHI Hongyuan, ZHONG Chao, et al. Research on typhoon storm surge disaster in China [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(3): 39-44. DOI:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2020.03.006.
[3] 刘晓建,侯珊,胡晓张,等.超强台风“山竹”风浪过程数值模拟研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(4):117-126. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230421001.
LIU Xiaojian, HOU Peng, HU Xiaozhang, et al. Numerical simulation of wind wave process of super typhoon “Mangkhut” [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(4): 117-126. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230421001.
[4] YANG J, LI L L, ZHAO K F, et al. A comparative study of typhoon hato (2017) and typhoon mangkhut (2018): their impacts on coastal inundation in Macau [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(12): 9590-9619. DOI: 10.1029/2019jc015249.
[5] 张洪云,王永强,王大胜,等.基于降雨情景模拟的长江中下游流域淹没风险[J].长江科学院院报,2023,40(11):71-78. DOI:10.11988/ckyyb.20220764.
ZHANG Hongyun, WANG Yongqiang, WANG Dasheng, et al. Inundation risk of middle and lower reaches of Yangtze River basin based on rainfall scenario simulation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(11): 71-78. DOI:10.11988/ckyyb.20220764.
[6] 高丹,殷杰,王丹丹,等.干旱区暴雨山洪淹没数值模拟与验证[J].地理学报,2023,78(9):2271-2283. DOI: 10.11821/dlxb202309010.
GAO Dan, YIN Jie, WANG Dandan, et al. Modeling and validation of flash flood inundation in drylands [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(9): 2271-2283. DOI: 10.11821/dlxb202309010.
[7] 曾杭,杨琦,李权,等.资水流域柘桃区间设计暴雨时空分布分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(2):70-81. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220425006.
ZENG Hang, YANG Qi, LI Quan, et al. Spatial-temporal distribution analysis of design rainstorm in the Zhe-Tao region, Zishui Basin [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(2): 70-81. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220425006.

- [8] 徐韧,吉阳光,赵东儒,等.基于遥感与GIS技术的洪水淹没状况分析:以安徽省安庆市望江县为例[J].水土保持通报,2018,38(5):282-287. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.045.
XU Ren, JI Yangguang, ZHAO Dongru, et al. Flood inundation analysis based on remote sensing and GIS technology: a case study in Wangjiang County, Anqing City, Anhui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 282-287. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.045.
- [9] 何彬方,姚筠,冯妍,等.基于Sentinel-1A的安徽省2020年梅雨期洪水淹没监测[J].自然资源遥感,2023,35(1):140-147. DOI:10.6046/zrzyyg.2022052.
HE Binfang, YAO Yun, FENG Yan, et al. Sentinel-1A based flood inundation monitoring in Anhui Province during the plum rain period of 2020 [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1): 140-147. DOI: 10.6046/zrzyyg.2022052.
- [10] 刘旭,王峥,梁颖祺,等.我国台风风暴潮灾害损失的时空演变特征分析[J].海洋预报,2023,40(6):21-32. DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2023.06.003.
LIU Xu, WANG Zheng, LIANG Yingqi, et al. Spatial-temporal characteristics of the typhoon storm surge damages in China [J]. Marine Forecasts, 2023, 40(6): 21-32. DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2023.06.003.
- [11] 吴玮,刘秋兴,于福江,等.台州沿海地区台风风暴潮淹没风险分析[J].海洋预报,2012,29(2):25-31. DOI:10.3969/j.issn.1003-0239.2012.02.004.
WU Wei, LIU Qiuxing, Yu Fujiang, et al. Inundation risk assessment of typhoon storm surge along Taizhou coastal areas [J]. Marine Forecasts, 2012, 29(2): 25-31. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0239.2012.02.004.
- [12] 李丹,吴保生,陈博伟,等.基于卫星遥感的水体信息提取研究进展与展望[J].清华大学学报(自然科学版),2020,60(2):147-161. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.22.038.
LI Dan, WU Baosheng, CHEN Bowei, et al. Review of water body information extraction based on satellite remote sensing [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(2): 147-161. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.22.038.
- [13] WOOD M, DE JONG S M, STRAATSMA M W. Locating flood embankments using SAR time series: a proof of concept [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 70: 72-83. DOI: 10.1016/j.jag.2018.04.003.
- [14] 董剑希,李涛,侯京明,等.广东省风暴潮时空分布特征及重点城市风暴潮风险研究[J].海洋学报(中文版),2014,36(3):83-93. DOI:10.3969/j.issn.0253-4193.2014.03.009.
DONG Jianxi, LI Tao, HOU Jingming, et al. The characteristics of temporal and spatial distribution of storm surge in Guangdong Province and storm surge hazard study at Yangjiang City [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(3): 83-93. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2014.03.009.
- [15] 广东省海洋与渔业厅,2017年广东省海洋灾害公报[R].广州:广东省海洋与渔业厅,2018.
Guangdong Provincial Department of Marine and Fisheries, Guangdong province marine disaster bulletin (2017) [R]. Guangdong: Guangdong Provincial Department of Marine and Fisheries, 2018.
- [16] ZOU Z H, XIAO X M, DONG J W, et al. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(15): 3810-3815. DOI: 10.1073/pnas.1719275115.
- [17] PEKEL J F, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. Nature, 2016, 540(7633): 418-422. DOI: 10.1038/nature20584.
- [18] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [19] 杨彬,毛银,陈晋,等.深度学习的遥感变化检测综述:文献计量与分析[J].遥感学报,2023,27(9):1988-2005. DOI:10.11834/jrs.20222156.
YANG Bin, MAO Yin, CHEN Jin, et al. Review of remote sensing change detection in deep learning: bibliometric and analysis [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(9): 1988-2005. DOI: 10.11834/jrs.20222156.
- [20] 贾诗超,薛东剑,李成绕,等.基于Sentinel-1数据的水体信息提取方法研究[J].人民长江,2019,50(2):213-217. DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.02.038.
JIA Shichao, XUE Dongjian, LI Chengrao, et al. Study on new method for water area information extraction based on Sentinel-1 data [J]. Yangtze River, 2019, 50(2): 213-217. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.02.038.
- [21] ISLAM M M, SADO K. Development priority map for flood countermeasures by remote sensing data with geographic information system [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2002, 7(5): 346-355. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:5(346).

(责任编辑:刘平;校对:赵冰)