

GIS-Based Risk Assessment of Urban Water-Logging Disaster in Shanwei City

Zhaolin Fang¹, Kairong Lin^{1,2,3*}, Yang Liu⁴, Xiaozhang Hu⁵, Haiyan Chen³, Wenjing Li⁶

¹School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong

²Guangdong Key Laboratory of Oceanic Civil Engineering, Guangzhou Guangdong

³Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong

⁴Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, Guangzhou Guangdong

⁵Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou Guangdong

⁶South China Institute for Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou Guangdong

Email: *linkr@mail.sysu.edu.cn

Received: Feb. 14th, 2020; accepted: Mar. 20th, 2020; published: Apr. 27th, 2020

Abstract

Risk assessment of urban water-logging disaster can effectively reflect the severity of regional disaster, and provide scientific suggestions for disaster planning, monitoring and mitigating. The urban area of Shanwei city was chosen as case study, and the key indicators were selected using the index system assessment method. Based on ArcGIS spatial analysis technology and analytic hierarchy process (AHP), the water-logging disaster risk evaluation model was constructed and used to analyze the risk distribution. The results show that the risk distribution of water-logging disaster is characterized by the gradual decline of the high risk areas in central. These areas with high risk levels are mainly located in Fengshan street, Xiangzhou street, Dongchong town along the Pinqing lake and the east of Hongcao town. Through the verification of historical observed data, the results of risk assessment can well reflect the actual situation of waterlogging disaster and provide technical support for flood prevention and drainage planning in urban area of Shanwei city.

Keywords

Water-Logging Disaster, Risk Assessment, GIS, Urban Area of Shanwei City

基于GIS的汕尾市城区内涝灾害风险评价

方兆麟¹, 林凯荣^{1,2,3*}, 柳杨⁴, 胡晓张⁵, 陈海燕³, 李文静⁶

¹中山大学土木工程学院, 广东 广州

²广东省海洋土木工程重点实验室, 广东 广州

³中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州

作者简介: 方兆麟(1993.12-), 男, 广东广州人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事水文水资源研究工作。

*通讯作者。

⁴广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州

⁵珠江水利科学研究所, 广东 广州

⁶生态环保部华南环境科学研究所, 广东 广州

Email: *linkr@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2020年2月14日; 录用日期: 2020年3月20日; 发布日期: 2020年4月27日

摘要

城市内涝灾害风险评价可以反映城市区域内发生内涝灾害风险的严重程度, 为内涝灾害风险的防控与管理提供科学依据, 从而减少灾害损失。本文以广东省汕尾市城区为研究区域, 利用指标体系法选取关键指标, 基于GIS空间分析技术和层次分析法构建内涝灾害风险评价模型, 研究城区内涝灾害风险等级分布状况。结果表明, 城区内涝灾害风险分布具有从中部高风险区域向四周逐渐下降的特点。风险等级较高的区域主要分布在凤山街道、香洲街道、东涌镇沿品清湖地区和红草镇东部。通过历史资料的验证, 风险评价结果较好地反应城区内涝灾害实际情况, 可为城区防洪排涝规划工作提供技术支撑。

关键词

内涝灾害, 风险评价, 地理信息系统, 汕尾市城区

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来在以全球变暖为主要特征的气候变化环境下, 城市暴雨的频次和强度不断上升, 因强降雨引发的内涝灾害作为一种极易发生且破坏性大的自然灾害广泛存在于全国各地。城市化进程的加速导致城市绿地减少、河湖萎缩, 原有的水系网络被切断, 地表下渗率下降, 径流汇流速度加快, 严重削弱了城市的内涝调蓄能力[1]。当城市的地下管网无法将暴雨产生的径流及时排出时, 城市内涝灾害进一步加剧。因此, 有必要对易发生内涝灾害的典型地区进行灾害风险评价, 为城市防涝减灾工作提供重要的科学依据。

目前城市内涝灾害风险评价方法主要有历史灾情数理统计方法、指标体系法、水文水力学模型仿真模拟等[2]。历史灾情数理统计方法是指利用历史灾害数据, 包括受灾人口, 房屋等具体数据进行统计分析, 并对未来灾害进行预测评估。该方法计算简单, 但对统计数据的真实性有一定要求, 且没有考虑受灾城市的环境变化因素, 一般适合大尺度的行政区划单元[3]。模型仿真模拟方法是利用水文水力学模型模拟计算降雨产汇流和洪水推进过程, 推算暴雨造成的淹没程度来进行内涝研究。仿真模拟方法能够通过物理分析模拟出内涝过程, 但需要大量数据, 也要具体分析模型参数的取值问题[4]。指标体系法结合层次分析法进行内涝灾害风险评价, 其基本原理是根据致灾因素和承灾体的特点选取合适的指标体系, 通过数理方法对原始指标进行处理, 进行区域内涝灾害风险评价[5]。指标体系法在我国应用非常广泛, 方法相对简单, 对于指标数据的精度要求不高, 且考虑了社会经济与空间自然属性, 常常结合层次分析法计算指标权重, 减少研究者经验的影响, 合理分析当地的内涝特征。

本文选取内涝灾害频发的汕尾市城区为研究对象, 结合城市内涝灾害的形成机理, 采用指标体系法选取不同指标, 通过层次分析法计算权重, 构建内涝灾害风险评价模型。基于GIS空间分析技术进行内涝灾害风险评价分析, 可为内涝灾害防治研究提供科学依据, 对提高当地防洪排涝能力具有重要意义。

2. 研究区概况与资料

2.1. 研究区概况

汕尾市城区地处广东省东南沿海，位于汕尾市东南部(115°10'E~115°37'E, 22°36'N~22°54'N)，北部与海丰县接壤，西部与海丰县联安镇、梅陇镇隔河相对，南濒南海的红海湾，东临碣石湾与陆丰市金厢相望[6]。全区面积 401.05 km²，地势北高南低，背山面海，地形变化复杂，为山地、台地、丘陵、平原、河流、滩涂和海洋兼有的复杂地貌。境内无大江河注入，河溪多发源于小山区，源近流短，流域面积大于 10 km²的溪流共 12 条，经湾、港、湖等注入南海[6]。研究区域行政区划如图 1 所示。

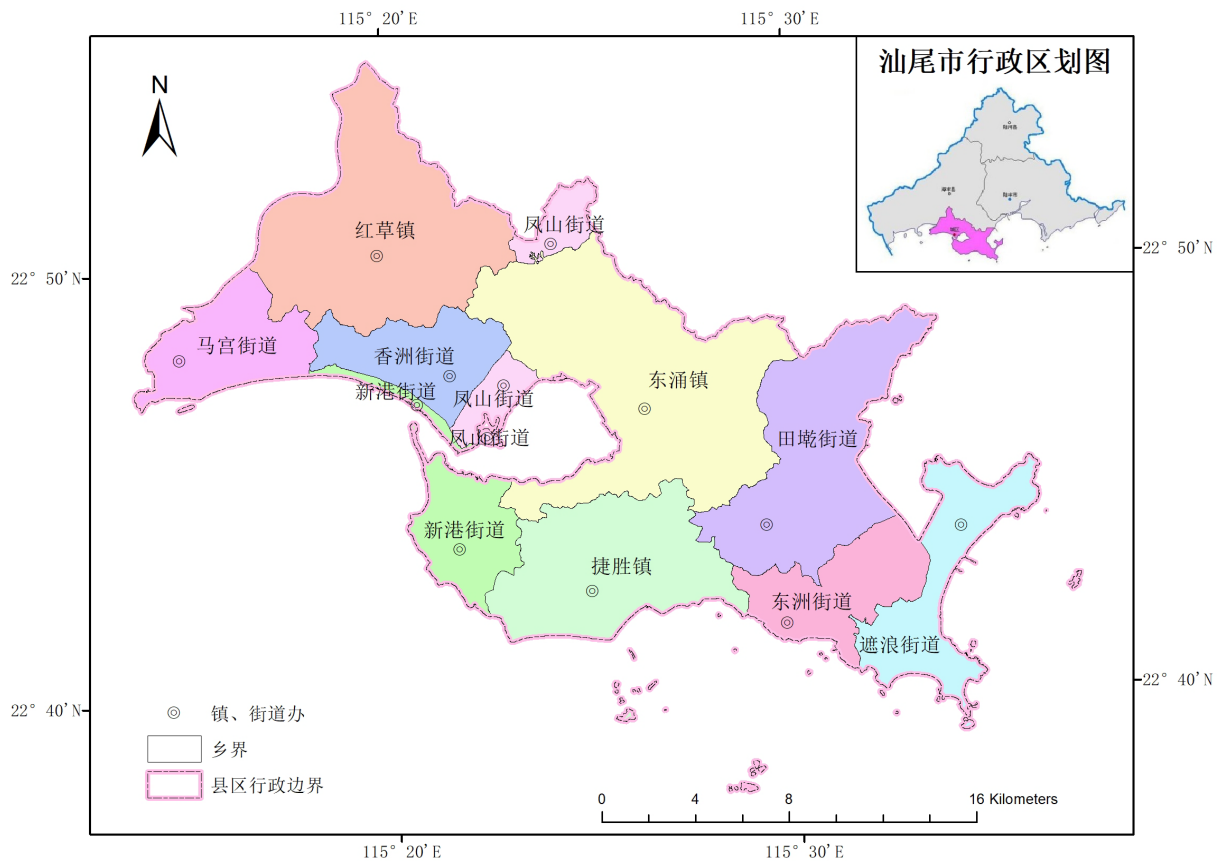


Figure 1. Administrative division of urban area of Shanwei city

图 1. 汕尾市城区行政区划

汕尾市属亚热带季风气候区，是广东省三大暴雨中心之一，降雨特点为雨量多、雨强大、暴雨频繁，局部性暴雨占比高，年平均降雨量 1924.7 mm，最大年降雨量为 2953.9 mm (1983 年)，最小年降雨量为 894.7 mm (1963 年) [7]。汕尾市降雨的时间分布极不均匀，主要集中在汛期 4 月到 9 月。由于汕尾市北部莲花山脉的影响，城区容易发生特大暴雨，极端降水量较高[8]。2010 年以来汕尾市每年均遭遇台风暴雨袭击，其中 2013 年台风“天兔”在汕尾市登陆，形成局部特大暴雨，导致城区严重积涝受灾，对汕尾交通、农业等造成严重影响，带来了极大的社会经济财产损失[9]。

2.2. 数据来源

城市内涝灾害是一个较为复杂的灾害系统，前期工作中针对城区自然环境和社会经济条件展开调查，收集

大量基础数据并进行标准化处理。城区行政区划数据来自于广东省水利电力勘测设计研究院；气象数据与河网数据来自于“广东省内涝灾害调查评价”项目的雨量站、水文站数据及项目调查资料；地形数据来自于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)；土地利用数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心；历史内涝灾害资料来自于汕尾市气象局；社会人口与经济数据来自于汕尾市 2016 年统计年鉴。

3. 研究方法

Maskrey [10]认为洪水灾害风险评价是致灾因子危险性，社会经济易损性综合作用的结果，灾害风险表达式为：风险性 = 危险性 + 易损性。由于短历时暴雨主导的内涝灾害不但受到致灾因子的影响，与受灾城市的发展程度也密切相关，主要体现在两方面。一方面，城市生产要素聚集，自然灾害对社会经济影响极大。另一方面，随着城市化进程及城市防洪排涝系统的完善，城市的防灾减灾能力也越来越强，防灾减灾能力体现了一个地区受灾后恢复正常社会运作及经济生产的能力，或是受灾时应急救援的能力。因此，在搭建风险评价模型时有必要将城市防灾减灾能力指标纳入考虑，而这在之前的研究中往往被忽略。综上，本文将从三个角度即致灾因子的危险性，区域的易损性及防灾减灾能力出发，搭建更为完善的内涝灾害风险评估体系，采用灾害风险表达式：风险性 = 危险性 + 易损性 + 防灾减灾能力，进行区域风险分析。

3.1. 评价指标选取与等级划分

根据区域的水文条件和下垫面情况，结合其沿海地区的气候特征，本文综合前人的灾害风险研究成果[8] [9]，分析城区内涝灾害的致灾原因，从致灾因子危险性，地区的易损性及防灾减灾能力三方面选择内涝灾害风险评价指标。其中选取暴雨综合指标(多年平均最大 1 h、3 h、6 h、24 h 降雨量按 0.41、0.30、0.18 和 0.11 权重叠加 [11])、河网密度、地表不透水率、高程作为危险性指标；选取地均 GDP、人口密度、城镇化率、交通路网密度作为易损性指标；选取水利设施分布、人均 GDP、医疗点分布作为防灾减灾能力指标，构建内涝灾害风险评价指标体系见表 1。通过 GIS 将各图层进行 30 m × 30 m 栅格化处理，采用自然间断法[12]将各指标划分为 5 个等级(微、低、中、高、极高)，获得各指标等级划分图层，等级划分结果见表 2。

Table 1. Index system of water-logging disaster risk assessment

表 1. 内涝灾害风险评价指标体系

危险性	易损性	排防减灾能力
暴雨综合指标；河网密度	地均 GDP；人口密度	水利设施分布
地表不透水率；高程	城镇化率；交通路网密度	人均 GDP；医疗点分布

Table 2. Grade classification of water-logging disaster risk assessment indexes

表 2. 内涝灾害风险评价指标等级划分

评价指标	等级划分				
	微	低	中	高	极高
暴雨综合指标/mm	96.73~97.28	97.28~97.88	97.88~98.38	98.38~98.85	98.85~99.51
河网密度/(km·km ⁻²)	0.00~1.24	1.24~2.44	2.44~3.68	3.68~5.38	5.38~9.87
地表不透水率/%	0~3	3~7	7~10	10~60	60~90
高程/m	-16~32	32~86	86~154	154~247	247~513
地均 GDP/(亿元·km ⁻²)	0.08~0.14	0.14~0.21	0.21~0.51	0.51~1.11	1.11~1.79
城镇化率/%	2~3	3~15	15~22	22~53	53~96

Continued

人口密度/(万人·km ⁻²)	0.060~0.065	0.065~0.098	0.098~0.129	0.129~0.273	0.273~0.432
交通路网密度/(km·km ⁻²)	0.00~2.34	2.34~3.88	3.88~5.42	5.42~7.07	7.07~9.79
水利设施分布/(个·km ⁻²)	0~0.01	0.01~0.29	0.29~0.59	0.59~0.88	0.88~1.17
人均 GDP/(万元/人)	1.41~1.46	1.46~1.90	1.90~3.40	3.40~5.25	5.25~7.31
医疗点分布/(个·km ⁻²)	0~0.01	0~0.29	0.29~0.59	0.59~0.88	0.88~1.17

3.2. 评价指标权重分析

根据各评价指标对当地内涝灾害形成和发展的影响程度，采用层次分析法确定各评价指标权重值。层次分析法是一种定性与定量分析相结合的决策分析方法[13]，分析指标所包含的因素及各指标之间的关系，对各指标的相对重要程度进行判断，构建各个层次的判断矩阵，得到通过一致性检验的各个指标的权重。

根据层次分析法将层次结构分为目标层、准则层、指标层，算得各个评价指标的权重(表 3)。由表可得，暴雨综合指标为最重要的危险性指标，其次是地表不透水率与高程，河网密度影响最小；易损性指标中，人口密度权重最高，次高指标为地均 GDP；对于各个防灾减灾能力指标，水利设施分布指标赋值最高[14]。

Table 3. Weights of risk assessment indexes for water-logging disaster

表 3. 内涝灾害风险评价指标权重

目标层 A	准则层 B	指标层 C	A 层对 B 层的相对权重	B 层对 C 层的相对权重	C 层指标的相对权重
城区内涝灾害 风险评价	危险性	暴雨综合指标	0.615	0.409	0.251
		河网密度		0.137	0.084
		地表不透水率		0.227	0.140
		高程		0.227	0.140
	易损性	地均 GDP	0.231	0.286	0.066
		人口密度		0.357	0.083
		城镇化率		0.214	0.049
		交通路网密度		0.143	0.033
	防灾减灾能力	水利设施分布	0.154	0.500	0.077
		人均 GDP		0.300	0.046
		医疗点分布		0.200	0.031

3.3. 内涝灾害风险评价模型构建

由于评价指标各不相同，每个指标具有不同量纲，因此需要对指标进行风险值标准化处理。其中，对危险性和易损性指标进行归一化处理，对防灾减灾能力的指标进行负归一化处理。标准化处理后各指标依照层次分析法获取的权重进行 GIS 空间分析。综合危险性、易损性和防灾减灾能力等级的计算结果，得到内涝灾害风险等级分布图层，并采用自然间断法对图层风险值进行分级和分析。其中风险值计算公式为：

$$R = \sum_{i=1}^n \omega_i d_i \tag{1}$$

式中， R 为风险值； ω_i 为评价指标 i 的权重； d_i 为评价指标 i 的栅格单元归一化处理后的取值； n 为评价指标个数。

根据表 3 的各层次指标的权重，可得城区内涝灾害危险性、易损性、防灾减灾能力及风险指数计算公式：

$$\text{危险性}(H) = 0.409CH_1 + 0.137CH_2 + 0.227CH_3 + 0.227CH_4 \quad (2)$$

$$\text{易损性}(V) = 0.286CV_5 + 0.357CV_6 + 0.214CV_7 + 0.143CV_8 \quad (3)$$

$$\text{防灾减灾能力}(F) = 0.500CF_9 + 0.300CF_{10} + 0.200CF_{11} \quad (4)$$

$$\text{风险指数}(R) = 0.615H + 0.231V + 0.154F \quad (5)$$

式中，CH₁、CH₂、CH₃、CH₄、CV₅、CV₆、CV₇、CV₈、CF₉、CF₁₀、CF₁₁ 分别为每个栅格单元经过标准化处理后的降雨、河网密度、地表不透水率、高程、地均 GDP、人口密度、城镇化率、交通路网密度、水利设施分布、人均 GDP、医疗点分布取值。

4. 研究结果与讨论

内涝灾害风险是致灾因子危险性、区域易损性和防灾减灾能力的结合体，通过自然间断法分别将危险性、易损性、防灾减灾能力和风险等级划分为微、低、中、高、极高五个等级，获得内涝灾害风险等级分布图层。风险等级分布图层的风险指数范围为 0.06~0.68，指数越高风险等级越大。表 4 统计了各级风险指数及各区域面积，各级风险区面积从大到小依次为：中风险区 > 低风险区 > 高风险区 > 微风险区 > 极高风险区，其中中风险区比例为 43.59%。

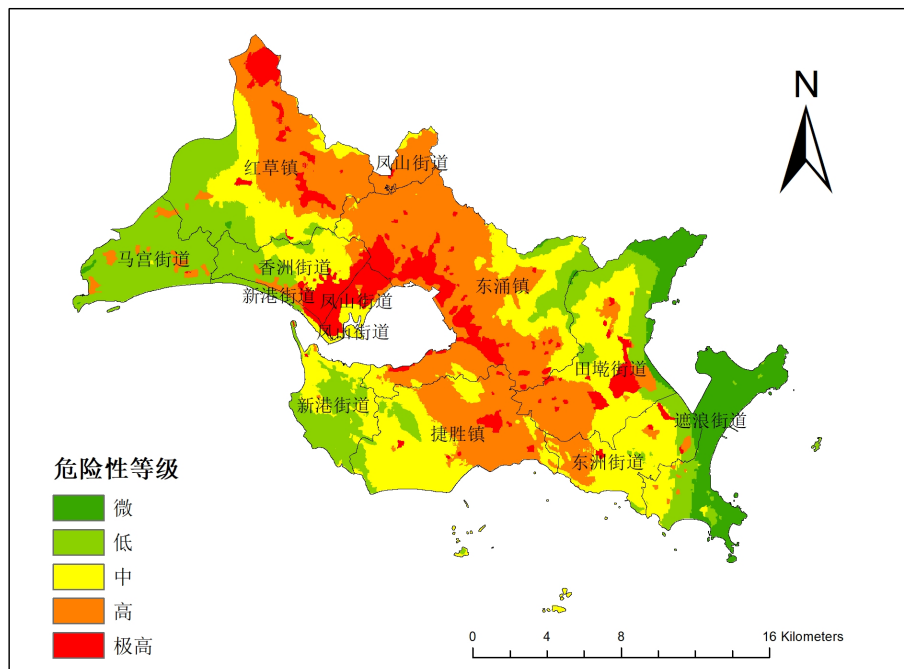


Figure 2. Distribution of risk level of hazard factors

图 2. 致灾因子危险性等级分布

Table 4. Water-logging disaster risk index and area distribution

表 4. 内涝灾害风险指数及面积分布

风险级别	风险指数	所占面积/km ²	比例/%
微风险区	0.06~0.26	46.68	11.64
低风险区	0.26~0.35	112.48	28.04
中风险区	0.35~0.44	174.8	43.59
高风险区	0.44~0.55	56.44	14.07
极高风险区	0.55~0.68	10.65	2.66

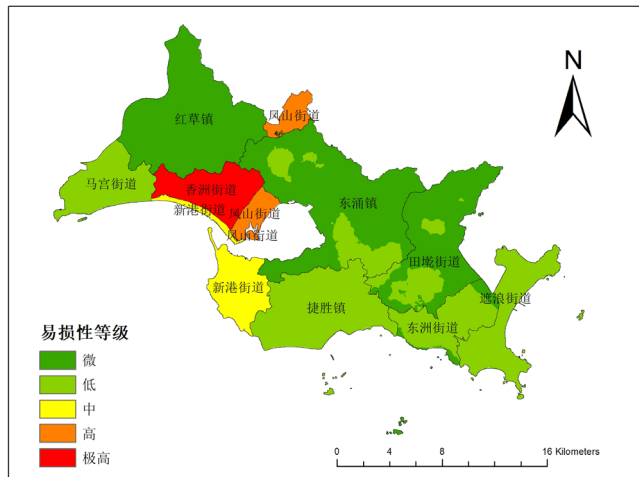


Figure 3. Distribution of regional vulnerability
图 3. 区域易损性等级分布

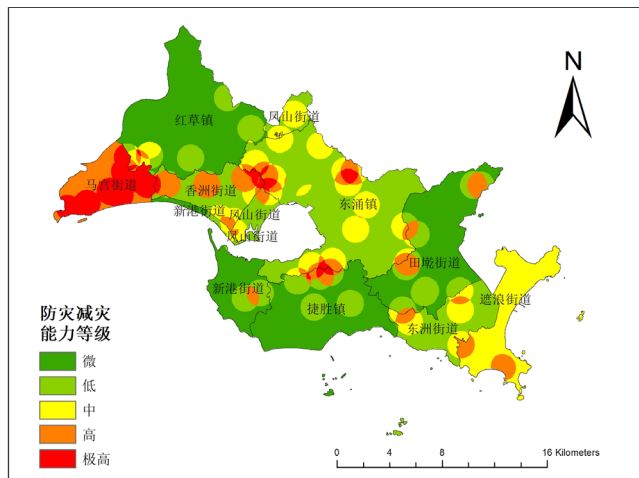


Figure 4. Distribution of disaster prevention and reduction capabilities
图 4. 防灾减灾能力等级分布

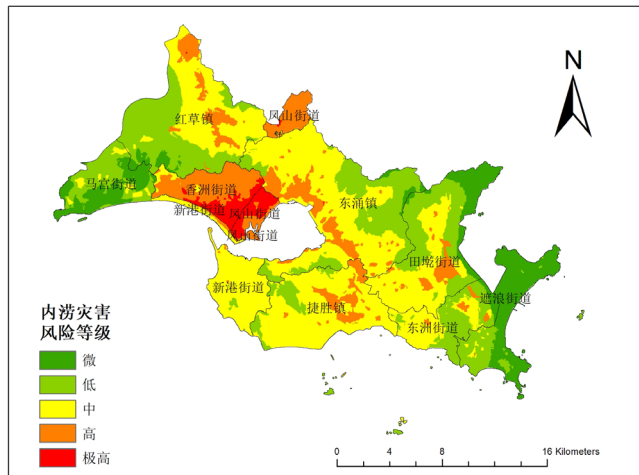


Figure 5. Risk distribution of waterlogging disaster
图 5. 内涝灾害风险等级分布

4.1. 内涝灾害风险评价与分析

从风险分布结果(图 5)可以看出, 城区内涝灾害风险等级从中部区域向四周逐步下降。风险等级整体走势与城区内涝灾害危险性基本一致, 主要与降雨量及地表不透水率两个指标密切相关。

极高风险区主要集中在城区的香洲街道及凤山街道。该地区为汕尾市的政治、经济和文化中心, 人口与建筑密集, 交通路网发达, 土地的开发利用造成下垫面硬化程度非常高, 地区易损性非常高(图 3)。当该地区发生局部暴雨时极易形成内涝灾害, 会对当地的经济造成较大损失。

高风险区主要分布在东涌镇沿品清湖地区和红草镇东部。东涌镇台风暴雨入侵次数较多, 降雨量较大。沿湖地区地形平坦, 形成狭长的低洼区域, 导致洪水汇集加快, 发生内涝灾害的风险较高。红草镇东部降雨量较大, 河网密集, 工业园区及周边区域高程较低, 交通路网密集, 内涝灾害风险等级高于镇内其他地区。

中等风险区主要包括新港街道、捷胜镇和田墘街道。其内涝灾害指标的影响程度比较均衡, 降雨量较高, 但土地利用类型大部分为水田及林地, 雨水下渗率较高, 因此内涝灾害风险等级为中级。

低风险区主要分布在马宫街道、东洲街道和遮浪街道。马官街道人均 GDP 较高, 且水利设施分布密集, 防灾减灾能力较高(图 4), 能有效抵御内涝灾害造成的损害。东洲街道距离城区中心较远, 人口密度不高, 地均 GDP 较低, 土地利用类型多为林地, 森林覆盖度较高, 区域下垫面能够有效渗透雨水抵御内涝灾害。遮浪街道降雨量相对较少, 河网密度不高, 即危险性等级较低(图 2)。这些区域下垫面的透水率普遍较高, 且降雨量较小, 危险性及易损性的指标指数较低, 因此内涝灾害风险等级较低。

4.2. 结果验证

易涝点分布一定意义上表征了区域内涝风险分布情况, 根据住建部公布的全国城市重要易涝点位置(建城函[2017] 99 号、建城函[2018] 40 号、建城函[2019] 37 号), 将近 3 年汕尾市城区的易涝点位置及收集的当地历史洪涝灾害的出现区域[9] [11]整理得到 46 个易涝点, 将收集的易涝点与城区内涝灾害风险等级分布图进行对比验证(图 6)。结果表明, 80.43%的易涝点分布在高及以上风险区域范围内, 97.82%的易涝点分布在中级及以上风险区域范围内。根据历史内涝灾害的位置进行统计分析, 汕尾市城区的主要实际易涝点均分布在中高风险区域, 主要集中在香洲街道及凤山街道, 表明本文构建的内涝风险评价模型的精度较好, 能较好地反应该地区的内涝风险分布状况。

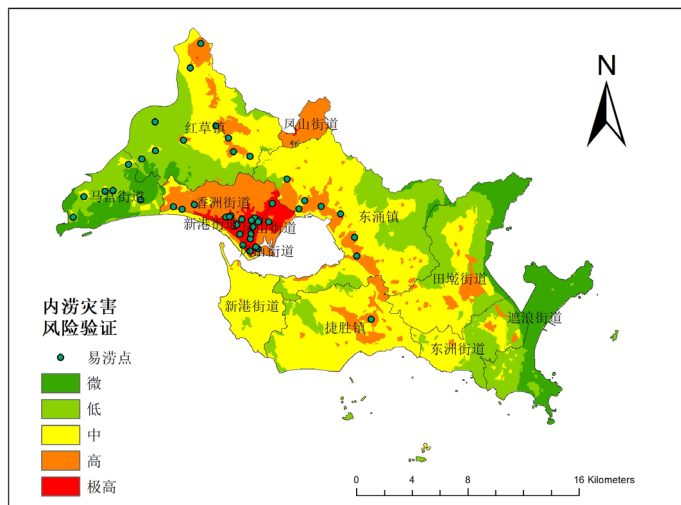


Figure 6. Verification of risk distribution of waterlogging disaster
图 6. 内涝灾害风险等级分布验证

5. 结论

本文结合城市内涝灾害的形成机理, 基于内涝风险理论和内涝灾害成因机制, 加入城市内涝灾害防灾减灾能力指标参与风险评价, 采用层次分析法确定指标权重, 建立内涝灾害风险评价模型, 提高了风险评价的精度。本次风险评价得出以下结论:

1) 城区内涝灾害风险分布呈现出由中部高风险区向周边地区逐渐下降的特点。城区内涝灾害风险等级整体走势与城区内涝灾害危险性基本一致, 内涝灾害风险等级与降雨量和下垫面条件密切相关。风险等级较高的区域主要分布在凤山街道、香洲街道、东涌镇沿品清湖地区 and 红草镇东部。

2) 通过对不同风险区的自然和经济条件的分析, 结合历史资料的验证, 风险分布与实际情况较为吻合。表明城区内涝风险评价模型精度较好, 评价结果可为城区防洪排涝规划工作提供技术支撑。

内涝灾害的形成与发展过程非常复杂, 受到自然要素和人类活动及社会经济要素共同影响, 目前要完全量化地分析城区内涝灾害风险仍然有一定难度。在今后工作中, 在工程措施上加强防洪排涝设施的建设及日常维护, 同时在管理层面上健全城市内涝预警机制, 可将气象学、水文学和城市规划等多学科交叉联合开展灾害预报研究, 建立城市灾害数据库, 逐步形成完整的城市内涝灾害风险评估系统。

基金项目

国家优秀青年科学基金项目(51822908)、国家自然科学基金面上项目(51779279)、国家重点研发计划(2017YFC040590)、和广东省特支计划百千万工程青年拔尖人才计划(42150001)资助。

参考文献

- [1] 孔锋. 透视变化环境下的中国城市暴雨内涝灾害: 形势、原因与政策建议[J]. 水利水电技术, 2019, 50(10): 42-52.
KONG Feng. Perspective on urban rainstorm waterlogging disaster in China under changing environment: situation, causation and policy suggestion. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(10): 42-52. (in Chinese)
- [2] 张冬冬, 严登华, 王义成, 等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 144-149.
ZHANG Dongdong, YAN Denghua, WANG Yicheng, et al. Research progress on risk assessment and integrated strategies for urban pluvial flooding. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 144-149. (in Chinese)
- [3] 牟新利, 冯钰璇, 向先伟, 等. 重庆市梁平县近 59 年旱涝灾害评价研究[J]. 农业灾害研究, 2016, 6(8): 29-31.
MOU Xinli, FENG Yuxuan, XIANG Xianwei, et al. Study on evaluation of drought and flood disasters in nearly 59 years of Liangping County in Chongqing. Journal of Agricultural Catastrophology, 2016, 6(8): 29-31. (in Chinese)
- [4] 梁汝豪, 兰甜, 林凯荣, 等. 基于 SWMM 的城市雨洪径流模拟研究——以广州市猎德涌流域为例[J]. 人民珠江, 2018, 39(6): 1-5+15.
LIANG Ruhao, LAN Tian, LIN Kairong, et al. Simulation of urban rainfall-runoff based on SWMM—The case of Liede River basin in Guangzhou. Pearl River, 2018, 39(6): 1-5+15. (in Chinese)
- [5] 李文静, 林凯荣, 刘玥, 等. 基于 GIS-AHP 集成的无资料小流域山洪灾害风险评价[J]. 中国农村水利水电, 2017(8): 103-107.
LI Wenjing, LIN Kairong, LIU Yue, et al. Flash flood risk assessment in ungaged small basin based on GIS and AHP integrated method. China Rural Water and Hydropower, 2017(8): 103-107. (in Chinese)
- [6] 汕尾市城区人民政府网. 汕尾市城区地理资源[EB/OL].
<http://www.swchengqu.gov.cn/swchengqu/zjcq/index.html>, 2019-10-31.
Chengqu District People's Government Network. Geographical resource of Chengqu district, Shanwei city.
<http://www.swchengqu.gov.cn/swchengqu/zjcq/index.html>, 2019-10-31. (in Chinese)
- [7] 钟平威, 林晓青, 李世光. 汕尾市近 53 年的气候变化特征[J]. 广东气象, 2008, 30(S2): 45-47.
ZHONG Pingwei, LIN Xiaqing, and LI Shiguang. Climate change characteristics of Shanwei city in recent 53 years. Guangdong Meteorology, 2008, 30(S2): 45-47. (in Chinese)
- [8] 陈芳丽, 李明华, 姜帅, 等. 粤东暴雨中心的降水气候统计特征和成因分析[J]. 广东气象, 2019, 41(4): 6-10.
CHEN Fangli, LI Minghua, JIANG Shuai, et al. On the statistical characteristics of precipitation climatology of heavy rain centers in eastern Guangdong and analysis of its causation. Guangdong Meteorology, 2019, 41(4): 6-10. (in Chinese)
- [9] 王小粤, 吴道远, 李泳泽, 等. 台风“泰利”过后汕尾特大暴雨过程的成因分析[J]. 广东气象, 2015, 37(5): 19-22.

- WANG Xiaoyue, WU Daoyuan, LI Yongze, et al. Analysis of the causation of an exceptionally heavy rain in the wake of typhoon Talim in Shanwei. *Guangdong Meteorology*, 2015, 37(5): 19-22. (in Chinese)
- [10] MASKREY, A. *Disaster mitigation: A community based approach*. England: Oxfam, 1989.
- [11] 黄海燕, 黄卫东. 汕尾市前汛期暴雨地域分布特征[J]. *气象研究与应用*, 2011, 32(S2): 73.
HUANG Haiyan, HUANG Weidong. Geographical distribution characteristics of rainstorm in the pre-flood season in Shanwei city. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2011, 32(S2): 73. (in Chinese)
- [12] WU, Y., ZHONG, P., ZHANG, Y., et al. Integrated flood risk assessment and zonation method: A case study in Huaihe river basin, China. *Natural Hazards*, 2015, 78(1): 635-651.
- [13] 梁国华, 张雯, 何斌, 等. 流域水文模型识别方法研究与应用[J]. *人民长江*, 2019, 50(1): 53-57.
LIANG Guohua, ZHANG Wen, HE Bin, et al. Research and application of watershed hydrological model identification method. *Yangtze River*, 2019, 50(1): 53-57. (in Chinese)
- [14] 宫清华, 黄光庆, 郭敏, 等. 基于 GIS 技术的广东省洪涝灾害风险区划[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(01): 58-63.
GONG Qinghua, HUANG Guangqing, GUO Min, et al. GIS-based risk zoning of flood hazard in Guangdong province. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(1): 58-63. (in Chinese)