

谭心如, 王婷, 黄显峰, 等. 基于风险传递网络的台风风暴潮灾害链风险评价[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(10): 17-30. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.002

TAN Xinru, WANG Ting, HUANG Xianfeng, et al. Risk assessment for the typhoon-storm surge-flood-dike burst disaster chain based on risk-transmission network[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(10): 17-30. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.002

# 基于风险传递网络的台风风暴潮灾害链风险评价

谭心如<sup>1</sup>, 王婷<sup>2</sup>, 黄显峰<sup>1</sup>, 游进军<sup>2</sup>, 田雨<sup>2</sup>, 王文睿<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:**【目的】近年来台风袭击沿海地区事件发生频繁, 造成了严重的人员伤亡、经济损失和环境破坏。因此, 探究易发台风灾害链的形成机制及风险评价方法, 以期为近海城市防洪防潮工作提供科学支撑。【方法】针对典型的“台风-风暴潮-洪水-溃堤”灾害链, 选取1999—2022年台风灾情数据, 基于各灾种之间风险传递响应规律建立台风风暴潮灾害链的风险传递网络结构, 在此基础上使用贝叶斯理论构建台风风暴潮灾害链风险评价模型, 并在广东省珠海市、中山市、江门市和佛山市开展应用研究, 模拟分析发生三种典型台风场景下的灾害链风险分布。【结果】结果显示: 近海地区发生台风风暴潮灾害链的风险高于内陆地区, 在情况最不利台风场景下(当发生16级风力以上且登陆型台风时), 研究区“高”“中”风险区总面积占比达到29.9%, 其中“高”风险区主要集中在珠海市、中山市的东部地区, “中”风险区主要分布在佛山市中东部、江门市南部。【结论】结果表明: 在不同台风场景下, 台风强度改变对风暴潮、溃堤的影响程度大于洪水, 而台风路径改变对洪水、溃堤的影响程度大于风暴潮。研究成果可为粤港澳大湾区防灾减灾能力建设提供一定的参考借鉴价值。

**关键词:** 台风风暴潮; 灾害链; 风险评价; 贝叶斯网络; 广东省; 气候变化; 城市防洪; 降雨

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P429

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)10-0017-14



## Risk assessment for the typhoon-storm surge-flood-dike burst disaster chain based on risk-transmission network

TAN Xinru<sup>1</sup>, WANG Ting<sup>2</sup>, HUANG Xianfeng<sup>1</sup>, YOU Jinjun<sup>2</sup>, TIAN Yu<sup>2</sup>, WANG Wenrui<sup>2</sup>

(1. College of water conservancy and hydropower engineering Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** [Objective] In recent years, frequent typhoon strikes on coastal areas have caused severe casualties, economic losses and environmental degradation. Therefore, it is important to explore the formation mechanism and risk assessment of the easily

收稿日期: 2024-10-14; 修回日期: 2024-11-27; 录用日期: 2024-11-29; 网络出版日期: 2024-12-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001000); 国家自然科学基金青年基金项目(52209042); 国家自然科学基金项目(52079143)

作者简介: 谭心如(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事水利水电工程及灾害风险研究。E-mail: 1029430438@qq.com

通信作者: 王婷(1990—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事复杂水资源系统调控、灾害风险管理研究。E-mail: wangt90@iwhr.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

occurring typhoon disaster chain to provide scientific support for flood control and tide prevention in coastal cities. [Methods] Focus is paid on a typical “typhoon-storm surge-flood-dike burst” (TSFD) disaster chain event, conducting an evolution analysis of the disaster chain mechanism based on the risk transmission and response among various disasters. A risk transmission network structure is established for the TSFD disaster chain, and a risk assessment model for the TSFD disaster chain is constructed using Bayesian theory. This model is applied in Zhuhai, Zhongshan, Jiangmen, and Foshan in Guangdong Province to simulate and analyze the distribution of TSFD disaster chain risk under the three typical typhoon scenarios. [Results] The result show that coastal areas are at higher risk of TSFD disaster chain than inland regions. When a landing-type typhoon with a wind force above Category 16 occurs, the total area of “high” and “medium” risk zones in the study area accounts for 29.9% of the total, with “high” risk zones mainly concentrating in the coastal areas of Zhuhai and Zhongshan, and “medium” risk zones mainly distributing in the east-central part of Foshan and the southern part of Jiangmen. [Conclusion] The result indicate that: under different typhoon scenarios, typhoon intensity change has a greater impact on storm surge and dike burst than flood, while the impact of typhoon path change on flood and dike burst is greater than that of storm surge. Research result can provide valuable references for the disaster prevention and mitigation capacity building in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area.

**Keywords:** typhoon storm surge; disaster chain; risk assessment; Bayesian network; Guangdong Province; climate change; urban flood control; rainfall

## 0 引言

近年来,随着全球气候剧烈变化,台风灾害发生愈发频繁。由于发生频率高、影响范围广、应急避险措施难以实施,台风灾害已成为近年来危害程度仅次于暴雨洪涝灾害的自然灾害<sup>[1-2]</sup>。广东省临近西太平洋,是全球最主要的台风灾害生成区,平均每年有5~6个台风登陆,约占全国登陆台风量的1/3<sup>[3]</sup>。据相关资料统计<sup>[4]</sup>,由台风灾害导致的社会经济损失占广东省每年自然灾害损失的60%。其中,台风引发的风暴潮和洪水灾害是我国沿海地区主要的次生灾害之一。因此,在广东省开展典型的“台风-风暴潮-洪水-溃堤”灾害链(以下简称台风风暴潮灾害链)风险评价,对于提升广东省防灾减灾能力、保障粤港澳地区高质量发展具有重要意义。

国内灾害链的概念最早由郭增建提出,现在普遍认为灾害链是灾害事件间的相互作用、环环相扣的结果,是一种灾害引发另一种灾害而形成的级联效应。目前,国内外对于灾害的风险评价研究已经取得一些成果。风险评价最初主要集中在某单一类型灾害对农业或环境造成的影响程度研究<sup>[5-9]</sup>和区域风险分布研究<sup>[10-11]</sup>等。近年来,随着单灾种互相“碰头”现象逐渐频繁,从灾害链角度研究灾害风险已逐步成为国内外学者的研究重点。基于指标体系的风险评价法和基于历史灾情的数理统计法是目前自然灾害风险评价中最常用的两种方法。基于指标体系的风险评价法关键在于评价指标的选取,指标选择不当则会导致评价结果不当。然而目前对于评价指标的选择依旧广泛依赖于专家经验,还没有形成统一的标准<sup>[12-13]</sup>。基于

历史灾情的数理统计法是通过整理被记录的历史灾情数据,总结出灾害发生的规律和因灾损失的程度。通过函数表达式,该方法可以在一定时间内直观地表达出某灾害事件在特定区域内的风险情况<sup>[14-15]</sup>。但数理统计法对样本数据的数量和质量要求过高,且无法确定变量之间的因果关系,这可能导致对结果的错误解释。

随着现代信息技术和卫星遥感的发展,机器学习和遥感逐渐被用于台风及其次生灾害的风险评价。神经网络<sup>[16-17]</sup>、贝叶斯网络<sup>[18-19]</sup>、随机森林<sup>[20-21]</sup>等均被应用于风险评价研究。由于影响台风风暴潮灾害链发生的气象、水文、地质要素众多,灾害链成因机理复杂,使得其灾害风险更难模拟分析。复杂网络法评估精度较高,能够考虑系统中的所有变量及其相互作用,从而有助于理解风险的传播路径和潜在的系统性风险。目前复杂网络在冰雪、暴雨、台风等灾害链中都有应用<sup>[22-24]</sup>。因此,本文基于粤港澳地区台风风暴潮灾害链的历史统计资料,以灾害链的灾变机理以及灾变各要素之间链式传递关系为基础,搭建研究区域台风风暴潮灾害链的复杂系统网络,从灾害链的危险性与脆弱性出发,分别基于贝叶斯理论和指标体系得到危险性等级与脆弱性等级,对台风风暴潮灾害链的风险性进行评估,形成研究区域栅格化的灾害链风险分布图,以期为研究区域防灾减灾工作提供科学的决策依据。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 研究区域

广东省地处中纬度全球灾害带与环太平洋灾害带

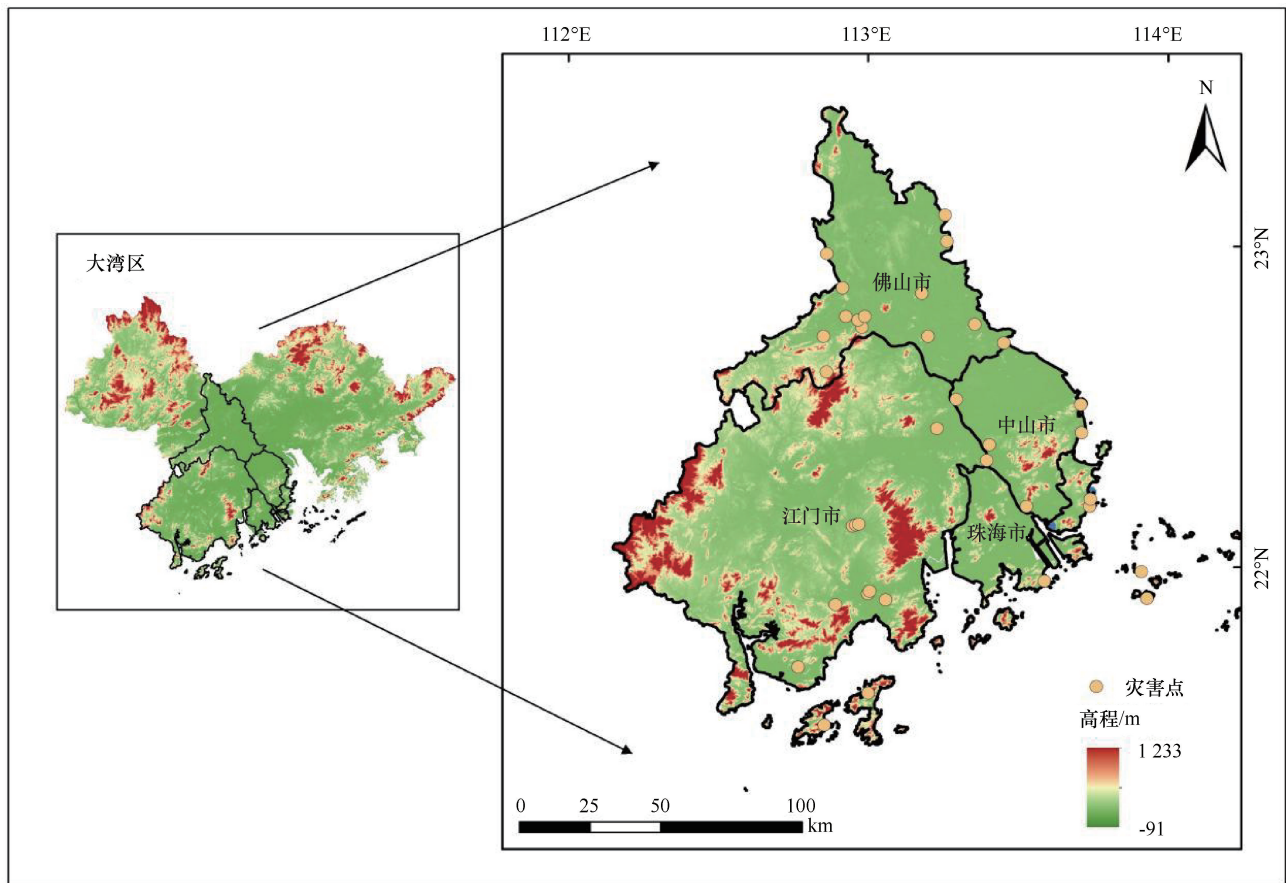


图1 研究区域地理位置

Fig. 1 Location of study area

交汇部位, 海洋、陆地、大气交互作用强烈, 气候复杂多变。通过前期大量搜集并分析广东省历史灾害事件数据发现: 作为珠江入海口之一的磨刀门水道较易发生台风风暴潮灾害链, 其首段河宽 1.2~1.7 km, 上接西江, 是入海主要排水河道, 流量巨大, 且历史上台风“山竹”“苏拉”“天鸽”等均导致了巨大的经济损失。因此, 本文选择该磨刀门水道途径的珠海市、中山市、江门市和佛山市作为研究区域, 具有一定的典型性和代表性。研究区域地理位置如图 1 所示。

## 1.2 数据收集与处理

本文数据主要涉及台风风暴潮灾害链的致灾因子、孕灾环境、承灾体和灾害事件等方面, 收集了包括基础地理数据、社会经济数据、工程数据等(见表 1)。其中, 基础地理数据与工程数据中的河流、坡度以及堤高等数据主要用来对孕灾环境节点进行离散化处理, 用于推理计算灾害的危险性等级。本文实地测定了灾害点的堤高与坡度, 并用堤防设计标准表征护坡厚度, 防洪标准达到 100 a 一遇的为“厚”, 达到 50 a 一遇的为“中”, 50 a 一遇以下的为“薄”。

同时, 本文主要以道路密度和工程投资为指标对抗洪物资进行表征, 该数据分别来自 OpenStreetMap 和地方政府, 可以充分反映研究区域抗洪物资的救援能力。河道深度采用 ArcGIS 中的水文分析, 基于流量对河道进行分级。社会经济数据主要反映研究区域人口数量和 GDP 分布, 地表覆盖数据主要用于区分不同土地利用类型, 用于计算承灾体脆弱性指标。数据具体信息及来源如表 1 所列。本文将各指标进行分级量化后, 利用 ArcGIS 软件的空间分析与制图功能, 根据所选变量特征, 选取合适的栅格大小(鉴于实际情况, 选取的网格大小为 1 km×1 km), 实现灾害风险的可视化制图表达。

## 2 研究方法

### 2.1 台风风暴潮灾害链风险评价

根据区域风险系统理论, 在一定区域内, 自然灾害的风险是在三种风险要素的综合作用下产生的, 包括致灾因子、孕灾环境和承灾体<sup>[25-26]</sup>。第 5 次联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)将风险表达为致灾因子的危险性、承灾体的暴露度和脆弱性的

表 1 研究数据来源及用途  
Table 1 Data source and purpose

数据类型	数据名称	分辨率	来源
台风数据	台风强度	—	中国气象数据网
	台风路径	—	中国气象局热带气旋资料中心
基础地理数据 与工程数据	行政边界、省地级行政中心	1 : 100 万	全国地理信息资源目录服务系统
	DEM	30 m	地理空间数据云
	河道深度	30 m	资源环境科学与数据平台, 利用 ArcMap 水文计算
	抗洪物资	1 km	OpenStreetMap、地方政府公报
	堤高	—	市水务局
	护坡厚度	—	市水务局
	坡度	—	市水务局
社会经济与 地表覆盖数据	2020 年人口密度数据	1 km	国家地球系统科学数据中心
	2020 年 GDP 密度数据	1 km	
	2019 年土地利用类型空间分布数据	1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心
历史灾情统计数据	潮位值	—	《南海区海洋灾害公报》(2012—2021 年)、《广东省海洋灾害公报》(2013—2022 年)
	溃堤公里数	—	《中国气象灾害大典·广东卷》《中国水利统计年鉴》

函数, 结合国内学者风险计算公式以及台风灾害风险评价文献<sup>[27-28]</sup>, 本文主要通过危险性与脆弱性对台风风暴潮灾害链风险进行评估。通过贝叶斯网络的变量状态表征致灾因子的危险性, 并据此构建灾害链的风险评价模型为

$$R = \sum_{i=1}^n H_i \times V_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中,  $R$  为灾害链的风险性;  $i$  为灾害类型;  $H_i$  代表单个灾害  $i$  造成的危险性等级,  $V_i$  代表承灾体对单个灾害  $i$  的脆弱性。

风险评价程序包括三个部分: 危险性评价、脆弱性评价、风险评价, 具体的技术路线如图 2 所示。首先从致灾因子、孕灾环境、灾害事件三方面调研采集基础数据并进行数据分类、数据离散化处理, 并基于灾变链式反应机理构建台风风暴潮灾害链危险性等级推理模型。其次, 分别选取生产总值密度、土地利用程度综合指数、人口密度等 3 项指标构建脆弱性评价指标体系, 分析计算灾害链承灾体脆弱性。最后, 结合研究区域实际情况设置典型台风情景, 并基于风险评价模型计算得到灾害链各单一灾种及整条灾害链的灾变风险值, 借助 ArcGIS 栅格化完成研究区域灾变风险分布, 并采用自然断点法进行分级, 首先对致灾情况最严重的台风场景 3 采用“自然断点法”得到不同风险等级区划, 再以此为依据对台风场景 1、2 进行划分。

## 2.2 台风风暴潮灾害链危险性评价

灾害链的危险性即灾害链作为致灾因子在一定的孕灾环境下对承灾对象造成破坏的严重程度<sup>[28]</sup>。在本文中, 只考虑风暴潮、洪水、溃堤三种次生灾害对

特定承灾体造成的危险等级。

贝叶斯复杂系统网络 (Bayesian Network, BN) 是一种能够借助图形化决策对复杂不确定系统进行推理和建模的有效方法<sup>[29-30]</sup>。贝叶斯网络对于复杂网络的表达具有巨大优势。一方面 BN 可以整合专家知识和经验数据<sup>[31-32]</sup>; 另一方面, 考虑到灾害链变量之间的复杂关系, 贝叶斯网络可以将链式反应中的变量投射为节点, 将变量间的响应规律通过 BN 网络节点之间的传递进行量化, 以概率形式呈现结果。具体操作方法如下: 首先, 以相关领域学者在台风风险分析与评估方面的研究成果为依据<sup>[24-34]</sup>, 通过框架表示法筛选出 13 个变量建立台风风暴潮灾害链网络结构, 并参考相关标准对节点变量取值划分等级, 如表 2 所列; 最后选取 1999—2022 年的台风事件和研究区域实地采集数据作为先验概率和条件概率表的计算样本, 对于历史数据不完备的部分环节, 采取数据集缺失情况下广泛使用的 EM 算法<sup>[35-36]</sup>进行计算。最终得到台风风暴潮灾害链危险性等级贝叶斯网络推理模型如图 3 所示。

依据国家标准《风暴潮等级》(GB/T 39418—2020)、行业标准《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252—2017), 以及研究区域灾害点历史溃堤事件中溃口长度将三种灾害事件危险性等级分为低、较低、中、高四级, 具体分级结果如表 3 所列。

## 2.3 台风风暴潮灾害链脆弱性评价

台风风暴潮灾害链脆弱性指易受到灾害影响和损害的人类和社会主体, 主要考虑人口、经济和土地这三种特定承灾体在三种灾害事件(风暴潮、洪水、溃堤)不同危险强度下的受灾情况<sup>[37]</sup>, 并基于脆弱性

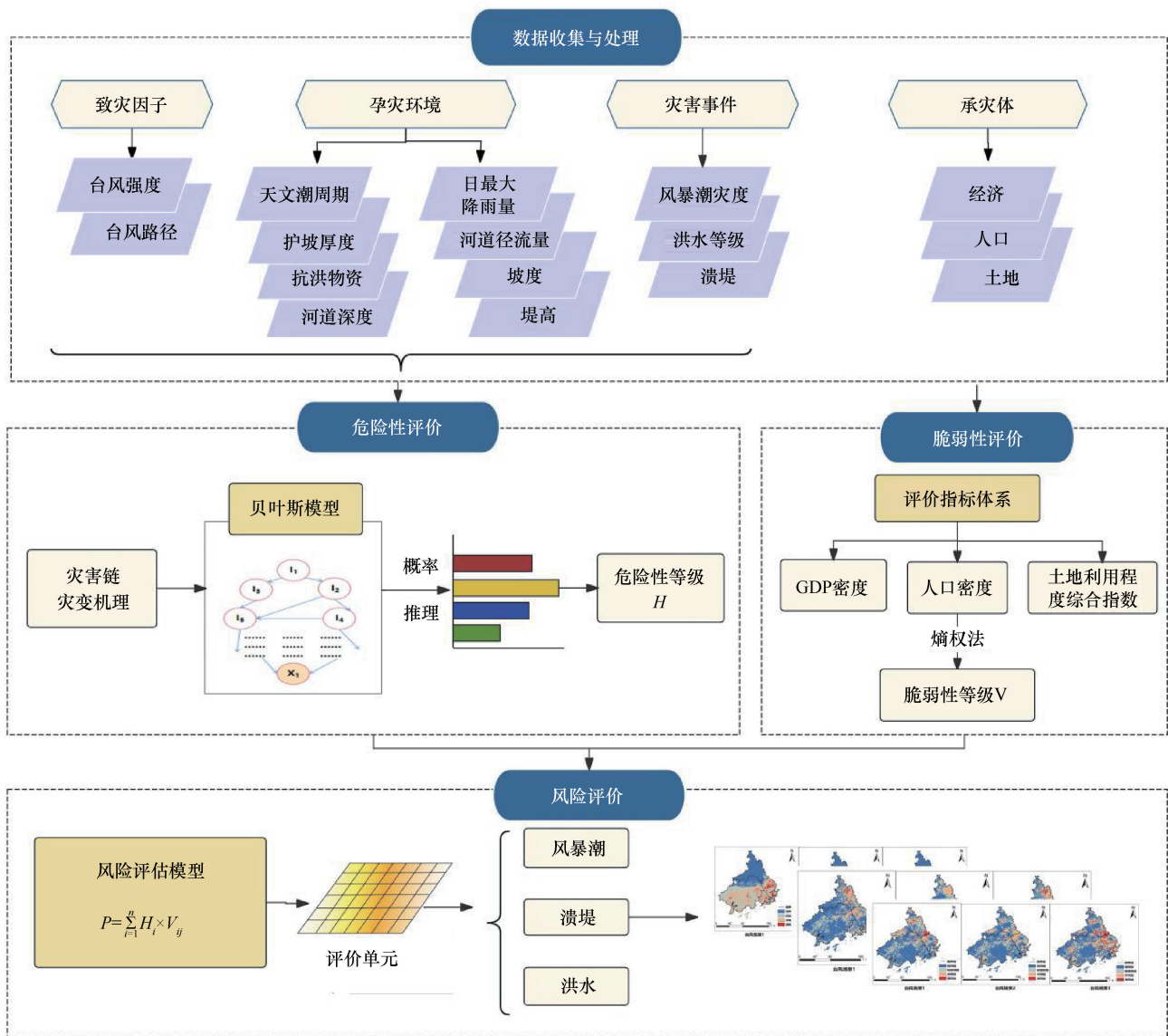


图2 台风风暴潮灾害链研究技术路线

Fig. 2 The flowchart of risk assessment for TSFD disaster chain

评价指标体系构建台风风暴潮灾害链的脆弱性评估模型。

结合以往学者研究<sup>[38-41]</sup>, 基于承灾体类型及特征分析, 考虑到佛山、江门、中山和珠海四市的实际情况和数据的可获得性, 选择 GDP、土地利用类型、人口共三项指标。由于各评估指标的量纲间有一定的差异, 指标间数量级也存在较大差异, 为消除各因子量纲不同对模型的影响, 需先根据公式对指标进行归一化处理, 结果如图 4 所示。其公式为

$$x = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中,  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为该评价指标的最大值和最小值。

在指标归一化过程中, 人口密度、GDP 密度可直接依据式(2)进行计算, 土地利用类型则需要先将其转化为土地利用程度综合指数, 其计算公式为

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n (A_i \times C_i) \quad (3)$$

式中,  $A_i$  为土地利用程度分级指数, 其中未利用地取 1, 林地、草地和水体取 2, 耕地取 3, 建设用地取 4;  $C_i$  为对应地类的面积比例。

在此基础上, 构建脆弱性评价模型公式为

$$V_i = \sum_{i=1}^n w_i p_i \quad (4)$$

式中,  $V_i$  为评价单元的综合脆弱性指数;  $p_i$  为评价指标标准化后的取值;  $w_i$  为各评价指标相应的权重。

表2 台风风暴潮灾害链贝叶斯网络节点及状态取值

Table 2 Classification and categories of node variables

	节点变量	等级划分	先验概率	分级参考依据
致灾因子	台风路径	I11: 西径型 I12: 登陆型 I13: 抛物线型	(0.20, 0.49, 0.31)	《热带气旋等级》(GB/T 19201—2006)
	台风强度	I21: STS(含以下) I22: TY I23: STY I24: SuperTY	(0.67, 0.26, 0.05, 0.01)	《热带气旋等级》(GB/T 19201—2006)
孕灾环境	日最大降雨量/mm	I31: ≤50 I32: (50, 100] I33: (100, 200] I34: >200	(0.78, 0.07, 0.11, 0.04)	《降水量等级》(GB/T 28592—2012)
	天文潮周期	I41: 大潮 I42: 平潮	(0.79, 0.21)	磨刀口门天文大潮时间表
	防浪堤等级	I51: 1级 I52: 2级 I53: 3级 I54: 3级以下	(0.13, 0.72, 0.11, 0.04)	《海堤工程设计规范》(GB/T 51015—2014)
	河道径流量/ 万 m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup>	I61: ≤0.5 I62: (0.5, 1.0] I63: (1.0, 1.5] I64: >1.5	(0.78, 0.11, 0.08, 0.03)	参考测站实际情况
	河道深度	I71: 深 I72: 中等 I73: 浅	(0.32, 0.42, 0.26)	参考研究区域实际情况
	抗洪物资	I81: 及时 I82: 不及时	(0.10, 0.90)	参考研究区域实际情况
	堤高/m	I91: <5 I92: [5, 6) I93: ≥6	(0.12, 0.54, 0.34)	《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)
	护坡厚度/m	I101: [0, 0.4) I102: [0.4, 0.6) I103: ≥0.6	(0.23, 0.48, 0.29)	参考研究区域实际情况
灾害事件	风暴潮灾度	X11: 一般 X12: 较重 X13: 严重 X14: 特别严重	—	《风暴潮等级》(GB/T 39418—2020)
	洪水等级	X21: 无 X22: 小 X23: 中 X24: 大 X25: 特大	—	《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL 252—2017)
	溃堤状态	X31: 低 X32: 较低 X33: 中 X34: 高	—	溃口长度

注: 台风强度“STS(含以下)”表示底层中心附近最大风力6—11级;“TY”表示底层中心附近最大风力12—13级;“STY”表示底层中心附近最大风力14—15级;“SuperTY”表示底层中心附近最大风力16级和以上。西径型表示热带气旋在中国海南岛或越南北部地区登陆;登陆型表示在中国广东、福建、浙江登陆;抛物线型表示先向西北方向后转向东北日本。本文坡度为堤面斜坡的铅直高度差与水平宽度的比。

目前,常用的权重计算方法主要分为主观和客观两类。其中主观赋权法往往过分依赖专家的经验判断,以德尔菲法和层次分析法为代表;而客观赋权法

主要依据大量的客观数据,以熵值法和灰色统计法为代表<sup>[42-43]</sup>。考虑到研究区域有足够多的栅格点,本文选择熵权法<sup>[44]</sup>确定各评价指标的权重,人口密度、

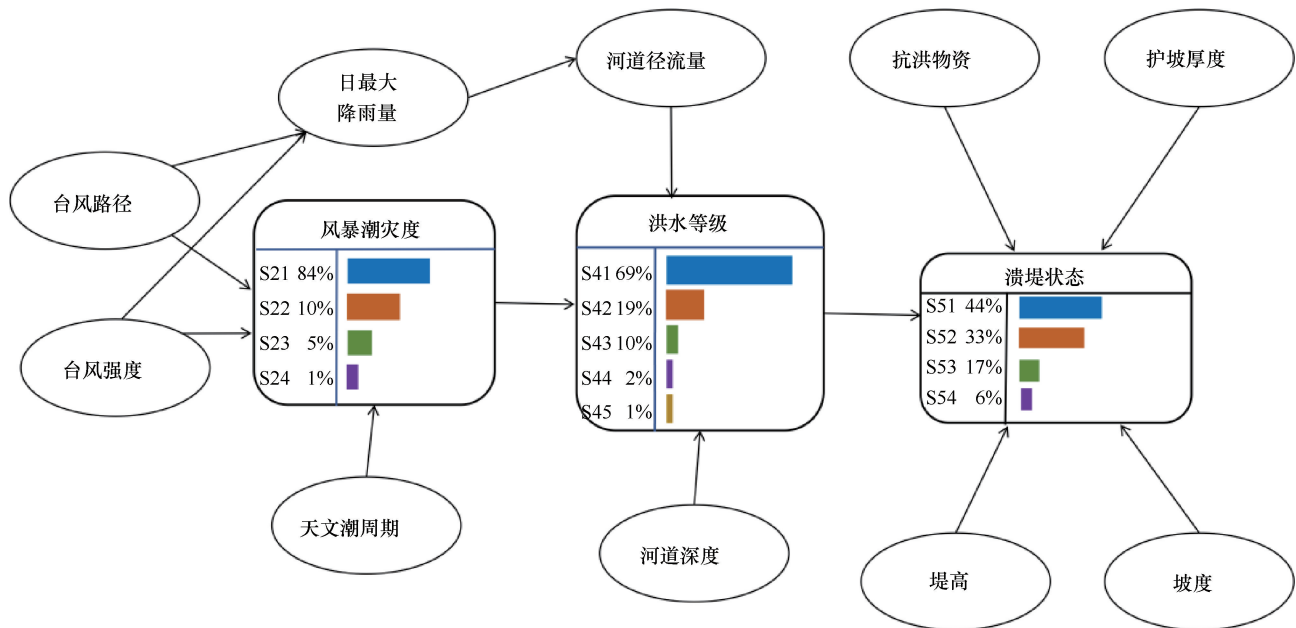


图3 台风风暴潮灾害链灾变推理贝叶斯网络

Fig. 3 BN-based model for the TSFD disaster chain

表3 风暴潮、洪水、溃堤灾害危险性等级划分

Table 3 Disaster hazard levels for storm surge, flood, and

dike burst

灾害类型	低	较低	中	高
风暴潮	一般	较重	严重	特别严重
洪水	小	中	大	特大
溃堤/m	≤50	50~100	100~250	>250

GDP 密度、土地利用程度综合指数权重分别为 0.328、0.316、0.356。

## 2.4 台风场景设置

根据研究区域 1999—2022 年台风灾情统计资料, 结合以往研究<sup>[3-45]</sup>, 可以发现不是所有的近岸或登陆台风都能造成灾害损失, 造成损失的台风多数为 TY 及以上强度(登陆时中心附近最大风力 ≥12 级), 例如, 2017 年 SuperTY “天鸽”、2018 年 SuperTY “山竹” 引发的风暴潮与台风降雨分别造成直接经济损失 119.2 亿元、24.57 亿元。因此, 本文选择在引发损失程度的台风类型中出现概率最大的两种台风场景和一种最极端台风场景开展台风风暴潮灾害链风险模拟。三种台风场景设计如下。

台风场景 1: 台风强度 STY, 状态定义为 I23; 台风路径登陆型, 状态定义为 I12。

台风场景 2: 台风强度 STY, 状态定义为 I23; 台风路径西径型, 状态定义为 I11。

台风场景 3: 台风强度 SuperTY, 状态定义为 I24; 台风路径登陆型, 状态定义为 I12。

## 3 结果与分析

### 3.1 危险性评价

依据 2.2 节研究方法, 可以得出不同台风场景下的台风风暴潮灾害链危险性分布结果, 具体如图 4 所示。

对比登陆型 STY 台风与登陆型 SuperTY 台风, 在 SuperTY 台风强度下“高”危险性和“中”危险性区域面积占比分别为 17.52%、27.34%, 比 STY 台风强度分别增加了 4.94% 和 3.29%, 可见危险性略有提升。比较登陆型 STY 台风与西径型 STY 台风可知, 西径型台风下“低”风险区面积占比有了明显提升, 占比为 45.12%, 危险性在“中”及以下的区域面积占比较登陆型台风下降了 14.86%。通过结果分析可以发现, 台风强度与灾害链的危险性等级呈较强的正相关性; 西径型台风对研究区域的影响程度低于登陆型, 灾害链危险性等级明显下降且不同危险性等级之间的占比结构有所变化, “低”等级的占比显著上升, “中”及以上等级面积占比显著下降。

从地理分布来看, 对比登陆型 STY 台风与登陆型 SuperTY 台风可以发现, “高”危险区均主要集中于珠海市东部、中山市东南部。SuperTY 台风强度下江门市南部、珠海市西部与佛山市三水区、南海区分布有部分“中”危险区, 其余地区为“较低”危险性及以下, TY 台风强度下江门市北部与佛山市内危险等级基本为“低”。对比登陆型 STY 台风与西径

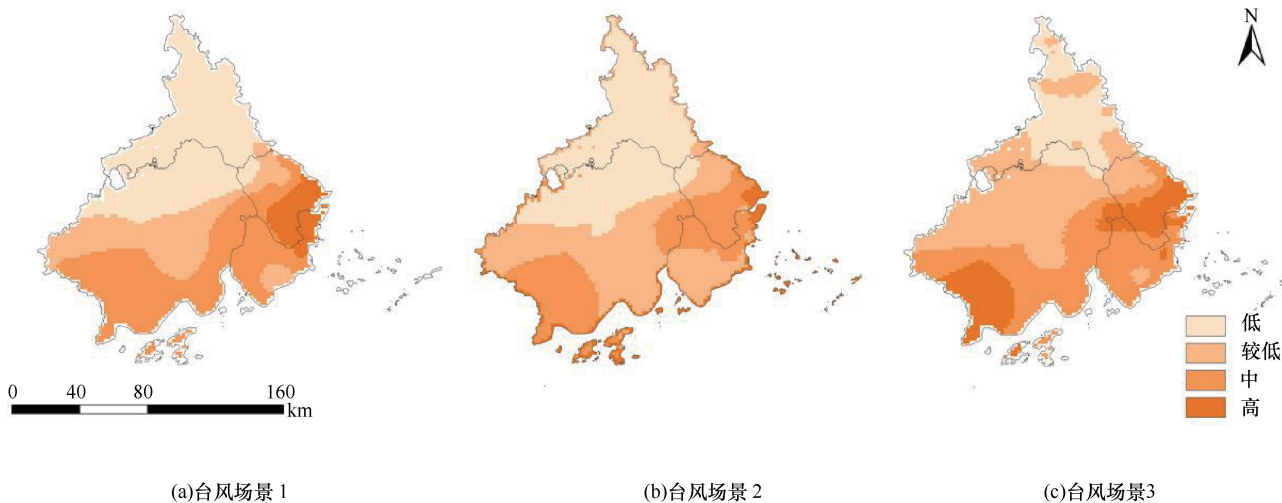


图4 三种台风场景下台风风暴潮灾害链危险性分布

Fig. 4 Hazard zoning of TSFD disaster chain under three typhoon scenarios

型 STY 台风可以发现, 西径型台风下, “高”危险区仅分布在珠海香洲区、中山市南部和江门台山市等沿海地区附近, 珠海市、中山市南部和江门市中部分布有“中”危险性, 佛山市基本为“低”危险性地区。

### 3.2 脆弱性评价

研究区域表征脆弱性的各项指标归一值分布结果如图 5 所示, 整体脆弱性分布结果如图 6 所示。由于承灾体脆弱性仅与当地实际条件相关, 不随台风条件变化而改变, 因此本文不考虑台风场景改变对承灾体脆弱性的影响。

由图 5 可知, 佛山市、中山市北部、珠海市东部的人口密度、GDP 密度、土地利用程度综合指数均

较高, 其中, 又以佛山市中部地区的人口密度、GDP 密度最高, 表明佛山市中部地区社会经济活动最为活跃。

由图 6 可知, 台风风暴潮灾害链承灾体脆弱性呈现出东部高、其他地区低的分布特征。其中“高”脆弱区主要在佛山市中部, “较高”脆弱区主要包括佛山市中东部、中山市北部小部分地区、江门市东北部小部分地区和珠海市沿海地区。这些地区地处平原, 耕地众多, 人口密集, 经济发达, 城市化程度高, 具有较高的临灾脆弱性。研究区域内承灾体佛山市、中山市地区的脆弱性分布趋势与人口密度分布较为一致, 江门市的脆弱性分布趋势与土地利用程度综合指数分布较为一致。

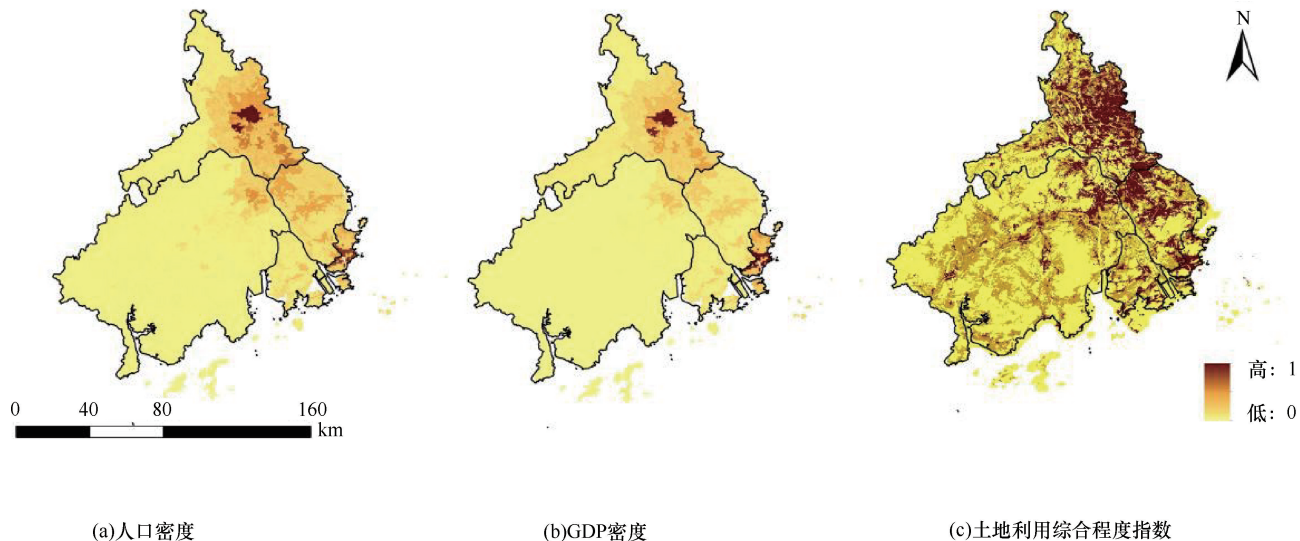


图5 研究区脆弱性指标归一值分布

Fig. 5 Normalized distribution of vulnerability indicators in the Study Area

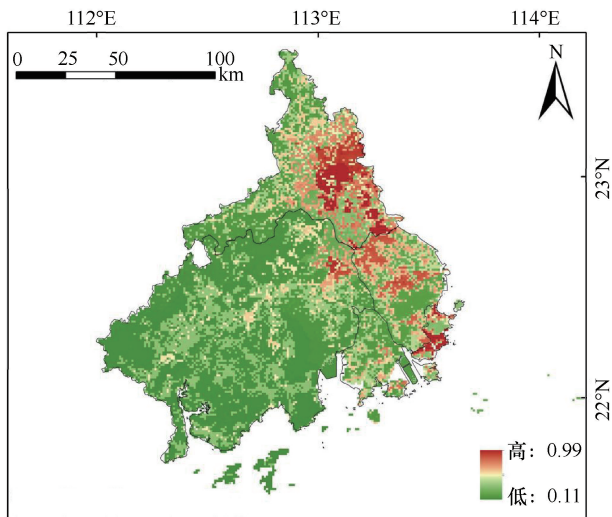


图6 研究区承灾体脆弱性分布

Fig. 6 Vulnerability distribution of disaster-bearing body in the study area

### 3.3 风险评价

#### 3.3.1 风暴潮、洪水、溃堤单一灾害风险评价

研究区域各单一灾害的风险区划如图7所示。对于风暴潮灾害,三类台风场景下“高”风险区基本分布在珠海市南部、东部以及中山市东部沿海地区,江门市与中山市沿西江下游沿岸附近散落分布有“中”风险区,其余地区为“较低”及以下。对比登陆型STY台风和登陆型SuperTY台风可以发现,SuperTY强度台风和STY强度台风下的“高”“中”风险区集中分布在珠海市,分别以高新区后环海堤、南围海堤、珠海市珠海水文站和鹤洲新区鹤洲南北海堤为中心半径15 km和10 km的区域内,中山市民众街道和横门岛地区也分布有较少“高”“中”风险区。登陆型STY台风与登陆型SuperTY台风下风暴潮灾害“中”风险性及以上地区面积占比相差仅为1.06%,风险性无明显变化。对比登陆型STY台风和西径型STY台风可以发现,西径型台风条件下“高”“中”风险性的区域向西南部移动,“高”“中”风险地区基本分布在珠海市高新区、斗门区以及江门市西南部区域,其余地区主要呈现出“低”及“较低”风险。西径型STY台风下风暴潮灾害“中”风险性及以上地区占比较登陆型台风下降了5.75%。风暴潮灾害的影响范围主要为珠海市、中山市和江门市中南部。由此可以发现,台风强度提升会造成风暴潮风险性增加,但当台风强度达到STY等级后,风力增强的影响降低,风险性强度变化不明显。而同等级台风强度下,台风路径的改变对风暴潮灾害风险性的影

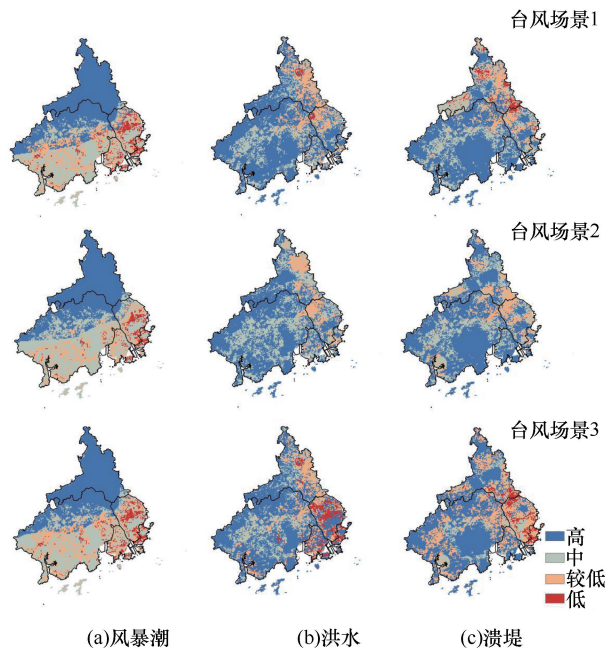


图7 三种台风场景下单一灾害风险性分布

Fig. 7 Risk distribution of single disaster type under three typhoon scenarios

响程度更大。此外,台风路径对风暴潮灾害风险性的地理分布也有一定影响。

对于洪水灾害,对比登陆型STY台风和登陆型SuperTY台风可以发现,SuperTY台风下“中”风险性及以上地区占比较STY台风增加了9.85%,风险性有较大增加。两种场景下“高”风险区主要分布范围均在佛山市中部、珠海市香洲区。经分析,上述地区经济发达、人口众多,脆弱性大,若发生灾害则损失程度较欠发达地区更大;“中”风险区分散在佛山境内(以高风险区为中心向外环绕)及中山市南区街道附近区域,这是由于中山市上述地区西邻磨刀门水道,孕灾环境敏感,更易发生洪水灾害;其余地区主要呈现出“低”及“较低”风险性。对比登陆型STY台风和西径型STY台风可以发现,登陆型台风下洪水灾害风险性最高等级为“高”,西径型台风下风险性最高等级则为“中”,且“中”风险性及以上地区占比较登陆型台风下降了5.32%,分布趋势类似。由此可以发现,台风强度和路径改变均对洪水灾害具有重要影响,路径改变对洪水灾害的影响程度大于台风强度,相较于登陆型台风,西径型台风下洪水灾害风险性等级明显下降。

对于溃堤灾害,登陆型STY台风和登陆型SuperTY台风条件下最高风险等级达到“高”,集中分布在佛山市和珠海市。佛山市地势平坦、河网密集,且人口稠密、经济发达、耕地面积占比大,导致

致灾因子危险性和承灾体脆弱性指数都处于较高水平, 但由于佛山市堤防设计标准较高, 灾害危险性较低, 所以大部分地区处于“较低”风险区, “高”“中”风险区主要分布于以东平水道为中心的 7 km 范围内。江门市、中山市也有部分地区呈现出“中”风险性, 虽然两市水网密度相对较疏, 但堤防联围设计标准较低, 且堤防主要建于软地基, 沉降变形较大导致部分堤防堤身沉降, 防浪墙顶与堤顶高程不足, 对防洪、防浪能力造成影响。登陆型 SuperTY 台风下溃堤灾害“高”“中”风险性及以上地区占比较 STY 台风分别增加了 3.36% 与 13.41%。比较登陆型 STY

台风与西径型 STY 台风可以发现, 与登陆型台风相比, 西径型台风下溃堤灾害最高风险性等级为“中”, 最高风险性下降一个等级, “低”风险区占比较西径型台风增加了 1.43%。由此可以发现, 在不同台风路径和台风强度条件下, 溃堤灾害和洪水灾害的变化较为一致。

### 3.3.2 台风风暴潮灾害链风险评价

基于已构建的灾害链风险评价模型得到研究区域台风风暴潮灾害链的现状风险分布图, 如图 8 所示。总体而言, 灾害链风险呈现出“南部高于北部, 海岸沿线高于内陆”的典型特征。

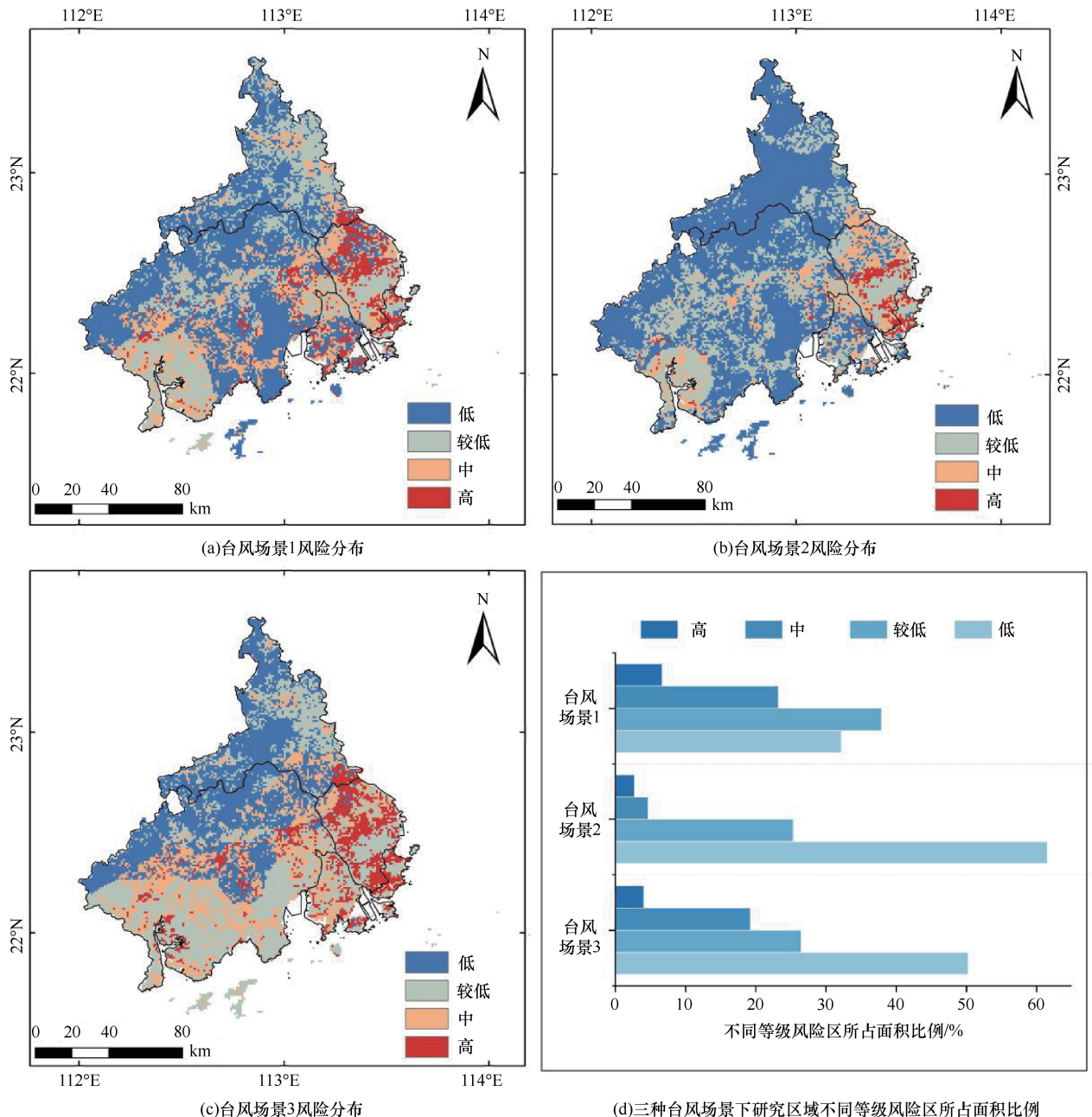


图 8 三种台风场景下台风风暴潮灾害链风险分布及面积比重

Fig. 8 Risk distribution and area proportion of TSFD disaster chain under three typhoon scenarios

通过对比登陆型 STY 台风与登陆型 SuperTY 台风,可以得出不同台风强度下对灾害链整体风险等级和风险分布的影响。在登陆型 SuperTY 台风下,“高”“中”风险地区面积占比分别为 6.69% 和 23.21%,较 STY 台风分别增加了 2.63% 和 3.95%,可见具有“高”“中”风险性的区域占比增长不明显。“高”“中”风险区集中分布在中山市、珠海市西南沿海与磨刀门水道沿岸地区,小部分散落在江门市潭江水道周围地区和佛山市中部。上述地区直面登陆型台风袭击,承受了较高的风速值和较高的台风雨量,并且河网分布较密集、地市植被覆盖度较低,对台风所带来的风雨量缓冲效果较低,同时城市化程度高、人口稠密、经济发达,灾害事件的危险性等级和承灾体的脆弱性等级都处于较高水平,所以风险性最高;此外,登陆型 SuperTY 台风下“低”风险和“较低”风险区基本由江门市和佛山市东北部囊括,分别占比 32.21% 与 37.90%,较 STY 台风分别增加了 20.48% 和降低了 27.06%,可见登陆型 SuperTY 台风下研究区域风险性集中分布于“较低”等级。江门市地势相对陡峭,位于沿海台山市内的北峰山和开平市的天露山、天堂坪等山峰对台风冲击减弱的效果较好,佛山市东北部则地处内陆,受台风冲击影响较小,并且这些地区人口相对稀疏、建设用地面积和耕地面积占比相对较低,灾害事件的危险性等级和承灾体脆弱性等级都处于较低水平,因此风险性较低。上述分析表明,在 STY 强度台风和 SuperTY 强度台风下,研究区域均会有较大风险,随着台风强度增加,区域风险性结构特征会有所改变,主要表现为“较低”风险性面积占比显著上升,“高”“中”风险性的区域变化不大。对比登陆型 STY 台风与西径型 STY 台风,可以得出不同台风路径下对灾害链整体风险等级和风险分布的影响。在西径型台风条件下,风险分布向西南移动,江门市内恩平市、台山市与新会区中“高”风险区增加。西径型台风下面积占比最大的为“低”风险区域,占比 61.49%,较登陆型台风增加了 11.25%，“高”“中”风险区占比则分别下降了 1.35% 与 14.61%。结果表明,相同台风强度下,与登陆型台风相比,西径型台风对研究区域的影响较小。

## 4 讨论

本文基于复杂网络的风险评价模型探索了台风风暴潮灾害链的风险传递机制及不同致灾场景下的风险分布。与传统的指标体系风险评价法和数理统计法相

比,复杂网络法可以直观地展示节点之间的风险传递关系,有助于揭示灾害链的演化机制及影响因子。此外,复杂网络法也适用于其他类型灾害链,具有一定参考价值。在台风风暴潮灾害链的风险评价与分析过程中,主要展现了不同台风场景下灾害链的风险强度变化及分布变化。可以发现,台风强度与台风路径的改变对不同灾害事件的影响程度有所不同,台风强度增加较易加重风暴潮灾害。此外,相较于登陆型台风,西径型台风条件下三种灾害事件整体风险性等级均有明显下降,且分布范围有所转移。通过设置不同台风场景,形成了较为全面的台风风暴潮灾害链风险分析,并初步提出以下防灾减灾工作策略<sup>[46-47]</sup>:

(1)虽然台风产生的雨量与台风本身环流及其周围下垫面等多种因素相关,但总体来说,台风暴雨的降水量和雨区的大小是随着台风本身的强弱而异。因此在 SuperTY 台风场景下,应注重对洪水和溃堤灾害的防治,通过铺设土袋等增加堤岸稳定,同时抢筑子埝(子堤),增加挡水高度。

(2)风暴潮增水往往受到当地潮汐和风向的控制,因此在登陆型台风场景下,应关注风暴潮灾害影响,尤其是珠海市近海地区。在近海区域,可以临时加高防浪堤,同时挖建截洪沟等泄洪道,增强地区防洪潮一体化能力。

与此同时,尽管本文已取得一些阶段性成果,但仍存在一定不足。本文在进行风险分析时,仅从致灾因子角度考虑了状态变化对风险改变的影响,而风险变化还与当地工程、地形地质、救援条件等存在一定联系,未来研究应进一步讨论这些变量对灾害链风险的影响。此外,由于年代较远,受灾情数据的样本数量与精度的控制,一些具有显著空间变异性的水文事件没有被完全捕获。这一限制导致贝叶斯模型无法完整描述某些灾害事件,在 EM 算法中可能会陷入局部最优。因此,未来风险评价中可利用较近年代的完整数据或通过卫星反演数据,得到更精确的算法样本。

## 5 结论

本文围绕沿海地区较易发生的“台风-风暴潮-洪水-溃堤”灾害链,基于区域风险系统理论从灾害危险性和承灾体脆弱性综合考虑灾害链的灾变风险,构建了基于贝叶斯网络的灾害链危险评价模型以及基于评价指标体系的脆弱性评价模型,最终得到研究区域风险评价。并模拟分析了三种常见台风场景下的灾害链风险分布。得到的主要结论如下。

(1)台风强度、台风路径均对风暴潮、洪水和溃

堤灾害的致灾程度具有重要影响,一般来说,台风强度与台风路径对风暴潮灾害的风险性水平均有一定影响,而台风路径对洪水、溃堤风险性等级的影响程度大于台风强度。随着台风强度从 STY 增加到 SuperTY,风暴潮、洪水和溃堤灾害的“高”风险性地区分别增加了 0.55%、6.22%与 3.36%;西径型台风比登陆型台风条件下风暴潮危险性等级无明显变化,“高”风险性地区增加了 0.24%,洪水、溃堤灾害区域最高危险性等级则明显下降。

(2)研究区域台风风暴潮灾害链整体风险分布规律为“南部高于北部,海岸沿线高于内陆”,“高”“中”风险区主要集中在高脆弱性区域,尤其在内陆地区。登陆型 SuperTY 台风条件下,“高”风险地区占比 6.69%,大部分集中在珠海市、中山市,其余分布在江门南部沿海地区。“中”风险地区占 23.21%,靠近高风险地区周围,分散在江门、中山和佛山中东部地区。“较低”风险区占比 37.90%,多分布在江门市中北部和佛山市东部。“低”风险地区占研究区域的 32.21%,分布在研究区域的西北部,江门市的“低”风险区最多,其次是佛山。

## 参考文献(References):

- [1] 张晓宇,韦波,杨昊宇,等. 基于 GIS 的广东省台风灾害风险性评价[J]. 热带气象学报, 2018, 34(6): 783-790.  
ZHANG Xiaoyu, WEI Bo, YANG Haoyu, et al. Risk assessment of typhoon disaster in Guangdong province based on GIS[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(6): 783-790.
- [2] 朱军政,徐有成. 浙江沿海超强台风风暴潮灾害的影响及其对策[J]. 海洋学研究, 2009, 27(2): 104-110.  
ZHU Junzheng, XU Youcheng. Study on the calamity and counter-measure of the super typhoon storm surge along the Zhejiang coastal area[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(2): 104-110.
- [3] 赵珊珊,任福民,高歌,等. 近十年我国热带气旋灾害的特征研究[J]. 热带气象学报, 2015, 3(31): 424-432.  
ZHAO Shan-shan, REN Fumin, GAO Ge, et al. Characteristics of Chinese tropical cyclone disaster in the past 10 years[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2015, 3(31): 424-432.
- [4] 中国气象局. 广东省气象灾害防御规划(2011—2020年)[R]. 北京: 中国气象局, 2015.  
China Meteorological Administration. Guangdong meteorological disaster prevention (2011—2020) [R]. Beijing: China Meteorological Administration, 2015.
- [5] 于小兵,俞显瑞,吉中会,等. 基于信息扩散的东南沿海台风灾害风险评估[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 73-77.  
YU Xiaobing, YU Xianrui, JI Zhonghui, et al. Risk assessment of typhoon disaster in China's south-east coastal areas based on information diffusion theory[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 73-77.
- [6] 丁燕,史培军. 台风灾害的模糊风险评估模型[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 34-43.  
DING Yang, SHI Pei-jun. Fuzzy risk assessment model of typhoon hazard[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(1): 34-43.
- [7] 陈文方,徐伟,史培军. 长三角地区台风灾害风险评估[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 77-83.  
CHEN Wenfang, XU Wei, SHI Peijun. Risk assessment of typhoon disaster at county level in the Yangtze River Delta of China[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(4): 77-83.
- [8] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 8-19.  
SHI Peijun. Theory and practice of disaster study[J]. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(4): 8-19.
- [9] XIAO Ping, TING Wang, TIAN Yu, et al. A bayesian network-based inhibition model of the rainstorm-landslide-debris flow disaster chain in mountainous areas: The case of the Greater Bay Area, China[J]. Water, 2023, 15: 3124.
- [10] ZHANG Caixia, YIN Kedong, SHI Xiaoran, et al. Risk assessment for typhoon storm surges using geospatial techniques for the coastal areas of Guangdong, China[J]. Ocean and Coastal Management, 2021, 213(3-4): 105880.
- [11] WANG Si, MU Lin, QI Mengnan, et al. Quantitative risk assessment of storm surge using GIS techniques and open data: A case study of Daya Bay Zone, China[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 289(3): 112514.
- [12] 张晓宇,韦波,杨昊宇,等. 基于 GIS 的广东省台风灾害风险性评价[J]. 热带气象学报, 2018, 34(6): 783-790.  
ZHANG Xiaoyu, WEI Bo, YANG Haoyu, et al. Risk assessment of typhoon disaster in Guangdong Province based on GIS[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(6): 783-790.
- [13] 黄莉,袁田,彭毅,等. 台风灾害社区韧性感知评估研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(1): 22-28.  
HUANG Li, YUAN Tian, PENG Yi, et al. Assessment on perception of community resilience to typhoon disasters[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(1): 22-28.
- [14] 李国一,刘家宏,邵薇薇. 洪涝灾害风险评估与分区研究进展[J]. 水文, 2023, 43(4): 15-20.  
LI Guoyi, LIU Jiahong, SHAO Weiwei. Research progress in flood disaster risk assessment and zoning[J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(4): 15-20.
- [15] 李勇,周永章,窦磊,等. 基于多元统计和傅立叶和谱分析的土壤重金属的来源解析及其风险评价[J]. 地学前沿, 2010, 17(4): 253-261.  
LI Yong, ZHOU Yongzhang, DOU Lei, et al. Soil heavy metal sources identification and associated riskassessment using multivariate statistical and Fourier spectral analysis[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4): 253-261.
- [16] GOPINATH D I, DWARAKISH G. Wave prediction using neural networks at new mangalore port along west coast of India[J]. Aquatic

- Procedia, 2015, 4: 143-150.
- [17] 苑希民, 黄玉啟, 田福昌, 等. 基于 LSTM-GM 神经网络模型的风暴潮增水预报方法研究[J]. 水资源保护, 2023(6): 8-15.  
YUAN Ximin, HUANG Yuqi, TIAN Fuchang, et al. Research on storm surge forecasting method based on LSTM-GM neural network model[J]. Water Resour. Prot., 2023(6): 8-15.
- [18] WEBER P, MEDINA-OLIVA G, SIMON C, et al. Overview on bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(4): 671-682.
- [19] 赵冬月, 陈长坤, 易亮. 灾害演化网络时序性风险评估模型[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(3): 171-177.  
ZHAO Dongyue, CHEN Changkun, YI Liang. Time-series risk assessment model for disaster evolution network [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(3): 171-177.
- [20] 王家栋. 面向事件链的台风风暴潮情景推演方法研究与实现 [D]. 武汉; 武汉大学, 2021.  
WANG Jiadong. Research and Implementation on Scenario Deduction of Typhoon Storm Surge Oriented to Event Chain [D]. Wuhan; Wuhan University, 2021.
- [21] 张然, 柴志勇, 张婷, 等. 基于机器学习模型的洪水预报研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(11): 89-101.  
ZHANG Ran, CHAI Zhiyong, ZHANG Ting, et al. Research progress of flood forecasting based on machine learning models[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(11): 89-101.
- [22] LI J, CHEN C. Modeling the dynamics of disaster evolution along causality networks with cycle chains [J]. Physica A Statistical Mechanics And Its Applications, 2014, 401(5): 251-264.
- [23] 汤秋鸿, 徐锡蒙, 周羽暄, 等. 全球变化背景下黄河流域水旱灾害演变及应对策略[J]. 水利发展研究, 2025, 25(2): 13-20.  
TANG Qiuhong, XU Ximeng, ZHOU Yuxuan, et al. Evolution of floods and droughts in the Yellow River Basin under global change and relevant coping strategies [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(2): 13-20.
- [24] 刘洪良, 罗年学, 赵前胜. 基于灾害复杂网络的深圳台风灾害链风险分析[J]. 灾害学, 2023, 38(4): 228-234.  
LIU Hongliang, LUO Nianxue, ZHAO Qiansheng. Risk analysis of typhoon disaster chain in shenzhen based on complex network [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(4): 228-234.
- [25] KOKS Ee, JONGMAN B, HUSBY Tg, et al. Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management[J]. Environmental science and policy, 2015, 47(42-52).
- [26] 陶凯, 廖新利, 苏鹏, 等. 热带气旋多致灾因子综合风险评估研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(9): 1-9.  
TAO Kai, LIAO Xinli, SU Peng, et al. Progress in multi-hazard risk assessment for tropical cyclone[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(9): 1-9.
- [27] 殷洁, 戴尔阜, 吴绍洪, 等. 中国台风强度等级与可能灾害损失标准研究[J]. 地理研究, 2013, 32(2): 266-274.  
YIN Jie, DAI Erfu, WU Shaohong, et al. A study on the relationship between typhoon intensity grade and disaster loss in China [J]. Geographical Research, 2013, 32(2): 266-274.
- [28] 张卫星, 周洪建. 灾害链风险评估的概念模型: 以汶川 5·12 特大地震为例[J]. 地理科学进展, 2013, 32(1): 130-138.  
ZHANG Weixing, ZHOU Hongjian. Conceptual model of disaster chain risk assessment: Taking Wenchuan Earthquake on 12 May 2008 as a case[J]. Progress in Geography, 2013, 32(1): 130-138.
- [29] JOO H C. A bayesian network-based integrated for flood risk assessment (Infra)[J]. Sustainability, 2019, 13(11): 3733.
- [30] BLASER L O. Bayesian networks for tsunami early warning [J]. Geophysical Journal International, 2011(3): 1431-1443.
- [31] LANDUYT D, BROEKX S, D' HONDT R, et al. A review of bayesian belief networks in ecosystem service modelling [J]. Environmental Modelling and Software, 2013, 46: 1-11.
- [32] UUSITALO Laura. Advantages and challenges of bayesian networks in environmental modelling [J]. Ecological Modelling, 2007, 203(3-4): 312-318.
- [33] 余瀚, 郭浩, 王静爱. 面向区划的台风灾害综合风险评价: 以广东省台风灾害人口与经济风险为例[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 62(1): 86-95.  
YU Han, GUO Hao, WANG Jing'ai. Comprehensive risk assessment of typhoon for regionalization: A case of population and economic risk in Guangdong Province [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2023, 62(1): 86-95.
- [34] 李颖, 方伟华. 热带气旋降水重现期估算研究[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 59-69.  
LI Ying, FANG Weihua. Estimation on return period of tropical cyclone precipitation [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 59-69.
- [35] BUHI E, GOODSON P, NEILANDS T. Out of sight, not out of mind: strategies for handling missing data. [J]. American journal of health behavior, 2008, 32(1): 83-92.
- [36] 田世海, 孙美琪, 张家毓. 基于贝叶斯网络的自媒体舆情反转预测[J]. 情报理论与实践, 2019, 42(2): 127-133.  
TIAN Shihai, SUN Meiqi, ZHANG Jiayu. Prediction of we-media public opinion reversion based on Bayesian network [J]. Information Studies: Theory and Application, 2019, 42(2): 127-133.
- [37] DILLEY M. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis[R]. The Republic of Colombia: Center for International Earth Science Information Network, 2005.
- [38] 包文轩, 宫阿都, 徐濛, 等. 基于区域灾害系统论的广东省台风灾害风险评估: 以“山竹”台风为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(1): 94-102.  
BAO Wenxuan, GONG Adu, XU Can, et al. Typhoon disaster risk assessment in Guangdong Province by regional disaster system theory: Case of “Mangkhut” [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2023, 59(1): 94-102.
- [39] 罗兴树, 章数语, 郭园, 等. 极端降水对陕西省农业生产的影

- 响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 339-347.
- LUO X S, ZHANG S Y, GUO Y, et al. The impact of extreme precipitation on agricultural production in Shanxi Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 339-347.
- [40] 张雷, 涂慰云, 孙蔡亮, 等. 基于 GIS 图层叠置法的莆田市雷灾脆弱性研究[J]. 海峡科学, 2017, 132(12): 84-97.
- ZHNAG Lei, TU Weiyun, SUN Cailiang, et al. Vulnerability study of lightning disasters in putian based on GIS layer overlay method[J]. Staits Science, 2017, 132(12): 84-97.
- [41] 宋晓猛, 徐楠涛, 董子然. 变化环境下城市洪涝风险评估与调控策略[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 56-64, 85.
- SONG Xiaomeng, XU Nantao, DONG Ziran. Risk assessment and control strategies of urban flooding under changing environments[J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(1): 56-64, 85.
- [42] LIN Liuyi. An introduction to grey systems: foundations, methodology and applications[J]. Kybernetes, 2003, 32(4): 368-492.
- [43] 张发明, 刘志平. 组合评价方法研究综述[J]. 系统工程学报, 2017, 32(4): 557-569.
- ZHANG Faming, LIU Zhiping. Combined evaluation methods: a literature review[J]. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(4): 557-569.
- [44] 李鑫. 优化模糊综合评价模型在水质评价中的应用[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2024, 24(1): 12-17, 53.
- LIXin. The application of optimized fuzzy comprehensive evaluation model in water quality evaluation[J]. Journal of Langfang Teachers University(Natural Science Edition), 2024, 24(1): 12-17, 53.
- [45] 李颖, 金茹, 许雯, 等. 基于路径与环境场最优赋权的致灾相似台风检索方法研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(7): 14-26.
- LI Ying, JIN Ru, XU Luan, et al. Study on the optimal weighting impact of typhoon track and environmental field in similar typhoon retrieval model for similar disasters [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(7): 14-26.
- [46] 王章立, 邱奕翔, 杨光, 等. 台风“格美”暴雨洪水防御实践与思考[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 43-47.
- WANG Zhangli, QIU Yixiang, YANG Guang, et al. Practice and experience of typhoon “Gemei” rainstorm flood prevention[J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(1): 43-47.
- [47] 刘志雨, 张同强. 水旱灾害防御雨水情监测预报技术研究[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 48-55.
- LIU Zhiyu, ZHANG Tongqiang. Research on flood and drought disaster prevention and rainfall monitoring and forecasting technologies [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(1): 48-55.

(责任编辑 王海锋)