

高鹏举,周翔,郑玉烽,等. 台风大风暴雨复合致灾的灾害风险评估研究:以福州市为例[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(5): 1-14. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.001

GAO Pengju, ZHOU Xiang, ZHENG Yufeng, et al. Study on risk assessment of compound disasters caused by typhoon-induced gales and storms; A case study of Fuzhou City[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2025,56(5):1-14. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.001

# 台风大风暴雨复合致灾的灾害风险评估研究: 以福州市为例

高鹏举<sup>1</sup>,周翔<sup>2</sup>,郑玉烽<sup>2</sup>,郝晓博<sup>3</sup>,陈莹<sup>4</sup>,严颺<sup>5,6</sup>,高路<sup>1,4</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院,福建福州 350007; 2. 福建省减灾中心,福建福州 350001;  
3. 福建省水利水电勘测设计研究院有限公司,福建福州 350001; 4. 福建省陆地灾害监测评估  
工程技术研究中心,福建福州 350007; 5. 福建农林大学资源与环境学院,福建福州  
350002; 6. 福建省土壤环境健康与调控重点实验室,福建福州 350002)

**摘要:**【目的】科学评估灾害风险对提升区域灾害防御能力、针对性地制定防灾抗灾减灾措施具有重要意义。【方法】以福州市为例,基于地面气象观测资料、历史台风灾害数据,以及1 km 网格的人口、经济、建筑物等承灾体调查数据,运用 Copula 函数和风险矩阵模型,综合评估不同重现期情景下台风大风和台风暴雨复合致灾风险。【结果】结果表明:(1)千年一遇情景下,闽清县风雨设计值最小,复合重现期对应设计值为 26.03 m/s 与 463.72 mm;罗源县和长乐区复合重现期对应设计值最大,分别为 57.78 m/s、1 173.87 mm 与 65.42 m/s、1 094.27 mm。(2)随着重现期水平提高,致灾因子危险性自东部沿海向西部山区增大。承灾体中高、高脆弱性地区主要分布于福州市主城区以及东南临海乡镇,与人口、经济和建筑物的集中度密切相关。(3)福州市台风灾害风险大致呈“东高西低”格局,随着重现期水平提高,灾害风险由东北、东南部沿海向内陆地区提高,福州市主城区、长乐区、罗源县、福清市风险高于其余地区。(4)极端灾害条件下(如千年一遇),中高、高风险区主要位于福州市东北、东南部与主城区,占全市总面积的 34.5%。【结论】福州市台风灾害风险大致呈“东高西低”格局,随着重现期水平提高,灾害风险由东北、东南部沿海向内陆地区提高,极端灾害条件下(如千年一遇),中高、高风险区主要位于福州市东北、东南部与主城区。

**关键词:**台风;灾害风险;复合灾害;Copula 函数;福州市;气候变化;降水;风险评估

DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.001

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号:P954

文献标志码:A

文章编号:1000-0860(2025)05-0001-14



收稿日期:2024-08-09;修回日期:2024-09-07;录用日期:2024-09-09;网络出版日期:2024-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目“东南沿海山地丘陵区暖季暴雨时空异质性及其致洪效应”(42271030);福建省科技厅杰青项目“全球升温 1.5 °C~3 °C 情景下福建复合极端气候事件的致灾风险预估”(2022J06018);福建省“雏鹰计划”青年拔尖人才计划

作者简介:高鹏举(2000—),男,硕士研究生,主要从事自然灾害风险评估研究。E-mail: gao.pengju@foxmail.com

通信作者:高路(1983—),男,研究员,博士,主要从事气候变化与自然灾害研究。E-mail: l.gao@foxmail.com

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

## Study on risk assessment of compound disasters caused by typhoon-induced gales and storms: A case study of Fuzhou City

GAO Pengju<sup>1</sup>, ZHOU Xiang<sup>2</sup>, ZHENG Yufeng<sup>2</sup>, HAO Xiaobo<sup>3</sup>, CHEN Ying<sup>4</sup>, YAN Xie<sup>5,6</sup>, GAO Lu<sup>1,4</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China; 2. Fujian Provincial Disaster Reduction Center, Fuzhou 350001, Fujian, China; 3. Fujian Provincial Hydraulic and Hydroelectric Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Fuzhou 350001, Fujian, China; 4. Fujian Provincial Engineering Research Center for Land Disaster Monitoring and Assessment, Fuzhou 350007, Fujian, China; 5. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 6. Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation, Fuzhou 350002, Fujian, China)

**Abstract:** [Objective] Scientific evaluation of disaster risks is crucial for improving regional disaster prevention capabilities and formulating targeted measures for disaster prevention, response, and mitigation. [Methods] Taking Fuzhou City as an example, the ground meteorological observations, historical typhoon disaster data, and 1 km-grid survey data of population, economy, buildings, and other disaster-bearing bodies were utilized. Then, the Copula function and risk matrix model were used to assess the compound disaster risks from typhoon-induced gales and storms under different return periods. [Results] The results indicated that: (1) under the scenario of 1 000-year compound return period, the design values of typhoon extreme wind speed and cumulative rainfall in Minqing County were the smallest, with the values being 26.03 m/s and 463.72 mm, respectively. Luoyuan County and Changle District showed the maximum design values under this compound return period, reaching 57.78 m/s and 1 173.87 mm, and 65.42 m/s and 1 094.27 mm, respectively. (2) As the level of return period increased, the hazard levels of disaster-inducing factors exhibited an increasing trend from the eastern coastal areas to the western mountainous areas. Moderately high and high vulnerability zones of disaster-bearing bodies were primarily distributed in the main urban area of Fuzhou City and the southeastern coastal towns, demonstrating strong spatial correlation with the concentration of population, economy, and buildings. (3) The risk of typhoon disasters in Fuzhou City generally exhibited a pattern of “high in the east and low in the west”. As the level of return period increased, disaster risks escalated from the northeastern and southeastern coastal areas to inland areas. The risks in the main urban area of Fuzhou City, Changle District, Luoyuan County, and Fuqing City were higher than other regions. (4) Under the conditions of extreme disasters (such as 1 000-year return period), medium-high and high-risk zones were mainly concentrated in the northeast, southeast, and main urban area of Fuzhou City, accounting for 34.5% of the total area of the city. [Conclusion] The risk of typhoon disasters in Fuzhou City generally exhibits a pattern of “high in the east and low in the west”. As the level of return period increases, the disaster risk gradually intensifies from the northeastern and southeastern coastal areas to inland areas. Under the conditions of extreme disasters (such as 1 000-year return period), medium-high and high-risk zones are mainly distributed in the northeast, southeast, and main urban area of Fuzhou City.

**Keywords:** typhoon; disaster risk; compound disaster; Copula function; Fuzhou City; climate change; precipitation; risk assessment

## 0 引言

我国是世界上遭受台风影响最为严重的国家之一<sup>[1-4]</sup>。每年5月到9月, 平均有7个台风登陆和影响我国<sup>[5-7]</sup>。台风带来的大风、暴雨、风暴潮以及一系列次生灾害具有高频率、大范围等特点, 成为我国沿海地区社会经济发展与人民生命财产的重大威胁<sup>[2-9]</sup>。此外, 受台风运动、外围和残留云系的影响, 我国内陆省份也遭受一系列次生灾害<sup>[10]</sup>。特别是近年来台风活动逐渐呈现北上趋势<sup>[11-13]</sup>, 北上台风导致我国华北地区突发罕见暴雨、内涝灾害, 造成严重损失<sup>[14-16]</sup>。仅2023年, 台风灾害共造成我国1 131.6万人受灾, 直接经济损失达474.9亿元<sup>[17]</sup>。准确把握台风活动规律、识别台风灾害高风险区, 科

学评估区域灾害风险对于区域发展战略的制定、防灾救灾措施的实施、保障人民生命财产与社会高质量发展具有重要指导意义<sup>[18-21]</sup>。

目前台风灾害风险评估的研究主要集中在大风、暴雨等单致灾因子分析。而台风带来的大风和暴雨同时打击承灾体, 是典型的时间和空间双重复合的灾害事件, 复合灾害造成的灾情往往大于单一灾害<sup>[22]</sup>。例如金玲等<sup>[23]</sup>通过对沿海学校的大风风险隐患点普查, 建立基于台风影响下风灾风险计算模型, 完善了原有灾害风险评估模式, 为学校及时采取防灾减灾措施提供依据。陈勇全<sup>[24]</sup>对华南海域台风大风致灾因子危险性和海上风电场承灾体特性进行分析, 构建台风大风的风险评估模型, 对台风大风风险进行区划。李颖等<sup>[25]</sup>基于地理信息及台风灾情资料、风场再分

析数据,建立了台风输电线路杆塔风险评估模型,得出台风大风危险性随重现期增大呈非线性增大趋势。罗玲等<sup>[26]</sup>选取2013—2017年影响华东的13个台风个例,系统分析了ECMWF集合预报降水极端天气预报指数(Extreme Forecast Index, *EFI*)与台风暴雨的统计关系。WANG等<sup>[27]</sup>基于1979—2020年降水及台风资料,利用统计和随机森林方法,揭示了西太平洋台风对我国西北地区东部降水的影响机制。福州市台风灾害风险研究多侧重台风暴雨内涝方面, QIN等<sup>[28]</sup>、张炜月等<sup>[29]</sup>、林芳等<sup>[30]</sup>基于数值模拟、统计分析等方法对福州市台风暴雨内涝进行深入分析。

当前台风大风和暴雨的复合研究以主观赋权方法为主,忽略了两者内在的联系。评估单元多以区县行政区为最小评估单元,无法体现行政区内部的空间差异,不能满足精细化风险管理的需要。例如张晓宇等<sup>[31]</sup>选择灾害危险性、孕灾环境敏感性、承灾体脆弱性和防灾减灾能力为评价指标,运用TFN-AHP-EW主客观赋权法确定指标权重,建立台风灾害风险性评价模型,评价了广东省台风灾害风险性。潘金兰等<sup>[32]</sup>以致灾因子危险性,承灾体脆弱性,防灾减灾能力为评价指标,建立了基于AHP-TOPSIS最优组合赋权的华南台风灾害风险评估模型。WANG等<sup>[33]</sup>结合基础地理信息、统计数据和多源地理大数据,以县域为基本评价单元,利用AHP-EWM组合赋权法确定各指标权重,构建了包含17个指标的综合风险评估模型,评估了中国沿海省份台风灾害风险。杨奕杰<sup>[34]</sup>筛选了14个评估指标,利用AHP层次分析等方法,建立台风灾害风险评估模型,对中国39个沿海城市进行了灾害风险评估和灾害等级分析。总体上现有研究缺乏精细化的风雨复合影响下的台风灾害综合风险评估。

有鉴于此,本研究以1 km网格为基本评价单元,依托高精度的承灾体调查数据,通过二元Copula函数推求风雨联合分布,计算不同重现期与其对应的设计值,利用熵权法与风险矩阵,评估不同重现期情景下的福州市台风灾害复合风险,以期为区域自然灾害综合风险防御提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

福州市位于我国东部沿海,介于北纬 $25^{\circ}15'—26^{\circ}39'$ ,东经 $118^{\circ}08'—120^{\circ}31'$ 。东濒东海,与台湾隔海相望,现辖鼓楼区、台江区、仓山区、马尾区、晋安区、长乐区6个区,闽侯县、连江县、罗源

县、闽清县、永泰县5个县,福清市1个县级市<sup>[35]</sup>。本研究包含平潭综合实验区。福州市区所在地属于典型的河口盆地,盆地四周被群山峻岭所环抱,山地面积广大,占福州总面积的72.68%,其海拔多在600~1 000 m,最高海拔1 682 m,境内地势自西向东倾斜<sup>[36]</sup>。福州市共有107条河道,总长度超过300 km,河网密度达 $0.98 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ ,城区内水域面积达到 $62.34 \text{ km}^2$ ,水域率达到20.6%。福州市属亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,降水多集中在夏秋季节,并时有台风登陆并形成大量短时强降雨,年降水量为900~2 100 mm<sup>[37]</sup>。

独特的气候条件与地形地貌使得福州市台风灾害较为严重。据统计,台风灾害是福州市年际发生频次最大的灾害之一,年均致灾台风2次,台风灾次比由东南至西北递减。台风灾害多发生于7—9月,最早为5月,最晚为10月。受2023年11号台风“海葵”影响,9月5日6时至6日6时,福州市24 h降水量达到362.21 mm,打破当地观测史单日降雨纪录。2023年9月5日,福州市受灾乡镇147个,总体受灾人员51 272人,直接经济损失约为5.521亿元<sup>[38]</sup>。

### 1.2 研究数据

本研究所选用的气象数据来源于资源环境科学数据平台的“中国气象要素逐日站点观测数据集”(https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=230),福州市共有9个气象站。根据福州市气象局“关于下发《灾害性天气及预报用语标准规定》的通知”规定,本文定义影响福州市的台风为:(1)受台风影响,研究区内9个气象站任一阵风 $\geq 8$ 级;(2)受台风影响,任有一站日雨量 $\geq 25 \text{ mm}$ 或过程雨量 $\geq 50 \text{ mm}$ ;满足上述任意一条即定义为对福州市有影响的台风。台风过程雨量是指从台风进入福建48 h警戒区开始到台风影响结束时研究区内各气象站的最大累积雨量。研究共选取了2005—2020年97场影响福州市的台风事件。人口、GDP、房屋建筑分布数据来源于第一次全国自然灾害风险普查成果,并由30弧秒转换为1 km网格。0—14岁与65岁以上人口分布来源于第七次全国人口普查成果,路网数据来源于openstreetmap(https://www.openstreetmap.org/),采集时间为2023年11月(见表1)。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 Copula联合函数

##### 1.3.1.1 边缘分布函数

参数法和非参数法是两种常见的确定边缘分布函数的方法。参数法先假定变量的边缘分布形式,然

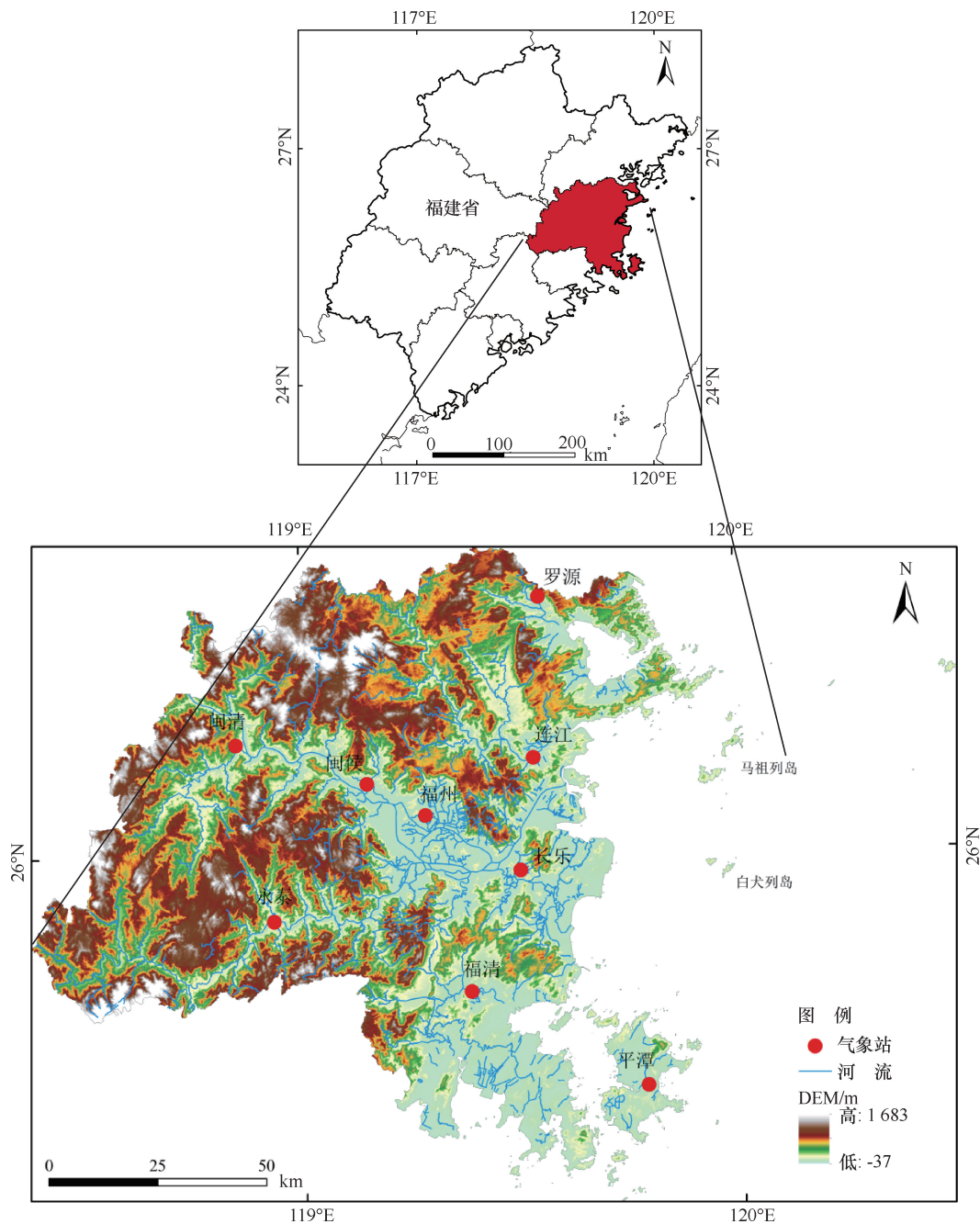


图 1 福州市地形与区位

Fig. 1 Topography and location of Fuzhou City

表 1 研究数据及来源

Table 1 Research data and sources

数据名称	分辨率	来源
福州市气象要素逐日站点观测数据	d	资源环境科学数据平台
人口分布	30"	福建省减灾中心
GDP 分布	30"	福建省减灾中心
0—14 岁与 65 岁以上人口分布	县	第七次全国人口普查
房屋建筑面积分布	30"	福建省减灾中心
路网数据		OpenStreetMap

后进行参数估计, 确定分布函数中的参数。非参数法则不需要假定变量的边缘分布形式, 直接根据样本估计总体分布<sup>[39]</sup>。本文采用参数估计法, 选取 Normal、Lognormal、Gamma、GEV、Rayleigh、Weibull、Exponential 共 7 个函数, 对受台风影响下福州市域内 9 个气象站点的极大风速与累积降水进行边缘分布拟合。通过计算 *RMSE*、*AIC* 评价和 *K-S* 检验进行拟合优度评价, 实现最优边缘分布函数的选取, 为实现风雨联合分布奠定基础。

### 1.3.1.2 二元 Copula 函数

Copula 函数是把随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  的联合分布函数  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$  与各自的边缘分布函数  $F_1, F_2, \dots, F_n$  相连接的连接函数<sup>[40-41]</sup>, 即函数  $C(u_1, u_2, \dots, u_n)$ , 使  $F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n))$  (1)

本文选取 Gaussian、 $t$  两种椭圆 Copula 函数和 Clayton、Frank、Gumbel 三种 Archimedean Copula 函数, 对受台风影响下福州市域内 9 个气象站点的极大风速与累积降水进行联合分布推求。通过计算 RMSE、AIC 评价和 BIC 评价进行拟合优度评价, 实现最优 Copula 函数的选取。

BIC 信息准则的表达式为

$$BIC = 2N \ln(RMSE) + k \ln N \quad (2)$$

式中,  $N$  为样本个数;  $RMSE$  为样本均方根误差;  $k$  为变量个数;  $BIC$  数值越小表示拟合度越好。

### 1.3.2 重现期与设计值

#### 1.3.2.1 重现期

选取极大风速和累积雨量两个指标作为台风灾害的致灾因子。极大风速与累积雨量中任一变量发生超阈值事件时, 都会导致台风灾害的发生。设极大风速  $H$  和累积雨量  $Z$  的联合分布函数为  $F(h, z)$ , 边缘分布函数为  $F_H(h)$  和  $F_Z(z)$ 。极大风速  $H$  和累积雨量  $Z$  任一变量超过某一量级的重现期称为复合重现期, 记为  $T \cup (h, z)$ <sup>[39]</sup>。公式为

$$T \cup (h, z) = \frac{1}{P((H > h) \cup (Z > z))} = \frac{1}{1 - F(h, z)} \quad (3)$$

若极大风速与累积雨量同时发生超阈值事件, 极大风速  $H$  和累积雨量  $Z$  均超过某一量级的重现期称为同现重现期, 记为  $T \cap (h, z)$ <sup>[41]</sup>。公式为

$$T \cap (h, z) = \frac{1}{P((H > h) \cap (Z > z))} = \frac{1}{1 - F_H(h) - F_Z(z) + F(h, z)} \quad (4)$$

#### 1.3.2.2 双变量同频率法

本文选取同频率法求算极大风速-累积雨量特定重现期水平下对应的设计值。双变量同频率法即在相应重现期  $T$  水平下, 求极大风速与累积雨量频率相等 ( $u = v$ ) 的交点为设计极大风速 - 累积雨量组合值<sup>[39]</sup>。应满足如下条件

$$u = v = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{\frac{2}{\theta}}$$

$$h = F_H^{-1}(u)$$

$$z = F_Z^{-1}(v) \quad (5)$$

式中,  $F_H^{-1}(u)$  与  $F_Z^{-1}(v)$  分别为极大风速与累积雨量的反函数。

### 1.3.3 台风灾害风险评估

#### 1.3.3.1 致灾因子危险性评估

本文选取台风极大风速与台风累积雨量作为台风灾害评估的致灾因子, 并计算不同重现期情景下各站点对应的设计值。利用反距离权重法进行空间插值, 得到不同重现期情景下极大风速与累积雨量的空间分布。根据式(6)计算每个网格致灾因子危险性指数, 根据分位数(5%、25%、75%、95%)将致灾因子危险性划分为低、中低、中、中高、高五个等级。公式为

$$Hazard = \omega_h H + \omega_z Z \quad (6)$$

式中,  $Hazard$  为致灾因子危险性;  $\omega_h$  与  $\omega_z$  分别代表极大风速与累积雨量的权重;  $H$  与  $Z$  分别为归一化后的极大风速与累积雨量。

#### 1.3.3.2 承灾体脆弱性评估

本文选取人口密度、地均 GDP、人均 GDP、0—14 岁与 65 岁以上人口密度、房屋建筑密度、路网密度作为承灾体脆弱性指标, 根据式(7)计算每个格网承灾体脆弱性指数。根据分位数(5%、25%、75%、95%)将承灾体脆弱性划分为低、中低、中、中高、高五个等级。公式为

$$Vulnerability = \omega_1 W_1 + \omega_2 W_2 + \omega_3 W_3 + \omega_4 W_4 + \omega_5 W_5 \quad (7)$$

式中,  $Vulnerability$  为承灾体脆弱性;  $\omega_i$  为评估指标权重;  $W_i$  为指标归一化后的值。

#### 1.3.3.3 熵权法与风险矩阵模型

熵权法是风险评估中常用的阈值确定方法, 最大优点是根据指标变异性的确定权重, 具有一定的客观性<sup>[42]</sup>。因熵权法为常用方法, 计算过程省略。

风险矩阵法综合考虑了自然灾害风险的致灾因子危险性和承灾体脆弱性, 根据分位数法进行等级划分, 构建风险评价矩阵。通过构建风险矩阵进行综合风险等级划分, 本文采用的风险矩阵如表 2 所列。本研究的技术路线如图 2 所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 台风极大风速与台风累积雨量边缘分布拟合

如表 3 所列, 对于台风影响下的极大风速, Log-normal 函数对闽清、罗源、连江、长乐、平潭具有较好的拟合效果, Gamma 函数对于闽侯、福州、福

表2 风险矩阵  
Table 2 Risk matrix

台风灾害风险等级		承灾体脆弱性					
		高	中高	中	中低	低	低
致灾因子危险性	高	高	高	中高	中	中低	中低
	中高	高	中高	中	中	中低	中低
	中	中高	中	中	中	中低	中低
	中低	中高	中	中	中	中低	中低
	低	中高	中	中	中	中低	中低

清具有较好的拟合效果, Normal 函数对永泰具有较好拟合效果。对于台风影响下的累积雨量, Gamma 函数对于闽清、闽侯、连江、永泰、福清、平潭具有较好的拟合效果, Weibull 函数对罗源、福州、长乐具有较好拟合效果。

### 2.2 风雨联合概率分布拟合

如表4所列, 闽清、闽侯、福州、连江、永泰、长乐、平潭, Gaussian 函数具有较小的 AIC、BIC、

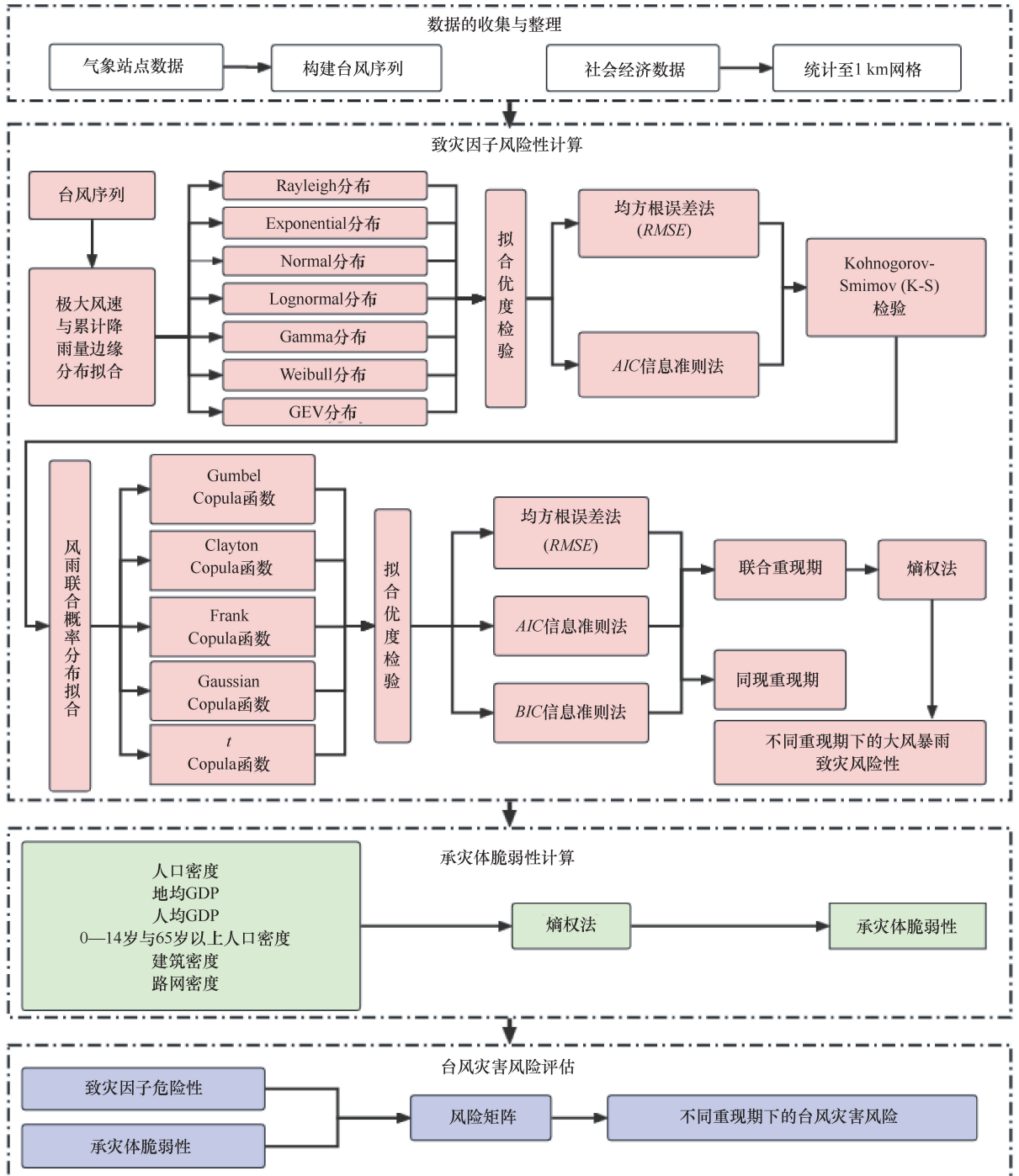


图2 技术路线

Fig. 2 Technical workflow

表 3 最佳边缘分布拟合

Table 3 Optimal marginal distribution fitting

站 点	台风极大风速边缘分布	AIC	RMSE	KS	台风累积雨量边缘分布	AIC	RMSE	KS
闽 清	Lognormal	395.93	0.04	0.09*	Gamma	778.5	0.02	0.06*
闽 侯	Gamma	483.82	0.02	0.07*	Gamma	809.75	0.03	0.07*
罗 源	Lognormal	511.56	0.02	0.06*	Weibull	877.21	0.03	0.07*
福 州	Gamma	493.79	0.02	0.06*	Weibull	832.43	0.02	0.06*
连 江	Lognormal	485.04	0.02	0.05*	Gamma	841.25	0.02	0.05*
永 泰	Normal	425.84	0.03	0.09*	Gamma	826.23	0.02	0.07*
长 乐	Lognormal	534.05	0.02	0.06*	Weibull	859.39	0.01	0.04*
福 清	Gamma	493.27	0.02	0.06*	Gamma	841.41	0.03	0.09*
平 潭	Lognormal	517.29	0.02	0.05*	Gamma	774.28	0.04	0.08*

注: \*代表通过KS检验。

RMSE值。对于台风影响下极大风速与累积雨量联合分布拟合情况较好, 更为贴切地表现福州市台风风雨复合灾害事件的联合分布特征。Gaussian、 $t$ 函数对罗源极大风速与累积雨量联合分布拟合较好, 本文选取 $t$ -Copula函数拟合罗源台风影响下极大风速与累积雨量的联合分布。Clayton函数对福清极大风速与累积雨量联合分布拟合情况较好, 本文选取Clayton-Copula函数拟合福清台风影响下极大风速与累积雨量的联合分布。

表 4 台风极大风速与台风累积雨量联合分布拟合

Table 4 Joint distribution fitting of typhoon maximum wind speed and cumulative rainfall

站 点	Copula	AIC	BIC	RMSE
闽 清	Gaussian	285.21	287.58	0.06
闽 侯	Gaussian	268.29	270.66	0.04
罗 源	$t$ -Copula	251.09	255.83	0.06
福 州	Gaussian	268.30	270.67	0.07
连 江	Gaussian	246.55	248.91	0.06
永 泰	Gaussian	281.35	283.72	0.05
长 乐	Gaussian	255.68	258.05	0.05
福 清	Clayton	249.06	251.43	0.08
平 潭	Gaussian	269.96	272.33	0.04

## 2.3 重现期与设计值

根据Copula函数计算各站台风影响下风雨复合重现期与风雨同现重现期, 利用同频率法求出各站不同重现期水平下对应的设计值, 结果如表5所列。由表5可知, 随着重现期水平的提高, 风雨对应设计值增大。东部沿海地区的风雨设计值普遍大于西部山区的风雨设计值。不同重现期水平下, 闽清的风雨设计值最小, 极端灾害条件下(如千年一遇), 复合重现期对应的设计值为26.03 m/s与463.72 mm, 同现重现期对应的设计值为18.03 m/s与242.66 mm。罗源县和长乐区风雨设计值最大, 极端灾害条件下(如千

年一遇), 复合重现期对应设计值分别为57.78 m/s、1173.87 mm与65.42 m/s、1094.27 mm, 同现重现期对应设计值分别为43.1 m/s、756.03 mm与46.3 m/s、618.71 mm。同重现期水平下, 复合重现期对应的值要大于同现重现期。

## 2.4 风雨复合致灾风险

随着重现期水平的提高, 风险等级由东部沿海向西部山区增大(见图3)。十年一遇、百年一遇情景下, 较高风险地区主要集中分布于罗源县、长乐区与福清市。五百年一遇情景下, 高风险地区集中分布于罗源县与长乐区。千年一遇情景下, 高风险地区为罗源县、长乐区、福清市东北部与平潭综合实验区。

十年一遇情景下, 中风险区域主要位于福州市东北部的罗源县、东部的长乐区以及东南部的福清市部分地区, 占全市总面积的10.4%。二十年一遇情景下, 中风险地区位于除闽清县、永泰县、闽侯县部分区域外的广大地区, 占全市总面积的55%。五十年一遇情景下, 中风险区域位于福州市大部地区, 占全市总面积的93%。百年一遇情景下, 福州市东北部的罗源县、东部的长乐区与福清市部分地区, 由中风险提升为中高风险, 占全市总面积的16.36%。五百年一遇情景下, 中高风险区域主要位于福州市中部与东部地区, 占全市总面积的52.22%。罗源县与长乐区部分地区由中高风险提升为高风险, 占全市总面积的6.28%。千年一遇情景下, 高风险区主要位于长乐区、平潭综合实验区与罗源县、连江县、福清市部分区域, 占全市总面积的23.59%。

## 2.5 承灾体脆弱性

选取人口密度、地均GDP、人均GDP、0—14岁与65岁以上人口密度、建筑密度、路网密度作为承灾体脆弱性评估的指标, 并统一到1 km网格。利用熵权法确定对应权重(见表6)。

表 5 不同重现期下的风雨设计值

Table 5 Design values of wind speed and rainfall under different return periods

站 点	重现期	联合设计值		同现设计值		站 点	重现期	联合设计值		同现设计值	
		风速/ $m \cdot s^{-1}$	雨量/mm	风速/ $m \cdot s^{-1}$	雨量/mm			风速/ $m \cdot s^{-1}$	雨量/mm	风速/ $m \cdot s^{-1}$	雨量/mm
闽 清	10 a	15.81	163.81	11.84	67.43	闽 侯	10 a	23.85	201.90	18.04	90.71
	20 a	17.44	209.03	12.98	92.36		20 a	26.37	260.00	20.06	125.34
	50 a	19.50	268.56	14.38	126.36		50 a	29.44	336.59	22.49	172.99
	100 a	21.02	313.63	15.40	152.75		100 a	31.61	394.48	24.21	210.00
	500 a	24.51	418.02	17.66	215.30		500 a	36.35	528.87	27.92	297.85
	1 000 a	26.03	463.72	18.03	242.66		1 000 a	38.29	586.59	29.44	336.59
罗 源	10 a	27.23	325.26	19.70	152.61	福 州	10 a	25.78	236.63	19.66	101.89
	20 a	31.62	438.67	22.93	222.23		20 a	28.44	311.43	21.80	142.79
	50 a	37.44	597.32	27.3	326.85		50 a	31.66	413.67	24.37	201.01
	100 a	41.95	723.57	30.72	414.99		100 a	33.95	493.53	26.19	247.59
	500 a	52.87	1 034.24	39.21	646.64		500 a	38.92	685.80	30.11	362.85
	1 000 a	57.78	1 173.87	43.10	756.03		1 000 a	40.94	771.10	31.70	414.84
连 江	10 a	23.87	253.54	17.98	129.59	永 泰	10 a	17.31	221.46	13.94	92.37
	20 a	27.36	332.29	20.55	181.73		20 a	18.48	282.83	15.03	126.58
	50 a	31.93	436.73	23.89	253.99		50 a	19.8	363.57	16.25	173.32
	100 a	35.40	515.81	26.40	310.40		100 a	20.7	424.74	17.07	209.51
	500 a	43.69	700.47	32.29	444.99		500 a	22.52	566.43	18.70	295.32
	1 000 a	47.37	780.06	34.92	504.90		1 000 a	23.23	628.39	19.33	333.31
长 乐	10 a	32.35	299.92	23.59	135.02	福 清	10 a	24.46	330.33	17.35	113.76
	20 a	37.21	405.73	27.03	194.67		20 a	27.20	435.6	19.19	160.67
	50 a	43.59	553.85	31.48	281.88		50 a	30.54	576.29	21.38	225.11
	100 a	48.46	671.40	34.84	353.23		100 a	32.93	684.06	22.89	275.04
	500 a	60.11	960.71	42.74	533.69		500 a	38.19	937.87	26.14	393.78
	1 000 a	65.42	1 094.27	46.30	618.71		1 000 a	40.37	1 048.41	27.45	445.68
平 潭	10 a	29.27	241.82	22.57	113.88						
	20 a	33.52	332.89	25.79	172.17						
	50 a	39.08	456.44	29.96	256.36						
	100 a	43.30	551.59	33.10	323.67						
	500 a	53.31	775.85	40.51	488.65						
	1 000 a	57.75	873.28	43.80	562.93						

表 6 脆弱性指标权重

Table 6 Weights of vulnerability indicators

脆弱性指标	信息熵值 $e$	信息效用值 $d$	权重/%
人口密度/ $人 \cdot km^{-2}$	0.47	0.53	34.55
地均 GDP/ $万元 \cdot km^{-2}$	0.73	0.27	17.77
人均 GDP/万元	0.66	0.34	22.62
0—14 岁与 65 岁以上人口密度/ $人 \cdot km^{-2}$	0.88	0.12	7.94
建筑密度/ $m^2 \cdot km^{-2}$	0.81	0.19	12.45
路网密度/ $km \cdot km^{-2}$	0.93	0.07	4.65

权重占比由大到小依次为人口密度 (34.55%)、人均 GDP (22.62%)、地均 GDP (17.77%)、建筑密度 (12.45%)、0—14 岁与 65 岁以上人口密度 (7.94%)、路网密度 (4.65%)。人口密度与人均 GDP 在承灾体脆弱性评估体系中占有重要比重, 两项权重总和为 57.17%。根据公式 (7) 求出各评价单元承灾体脆弱性指数。根据分位数 (5%、25%、75%、95%) 将致灾因子危险性划分为低、中低、中、

中高、高五个等级 (见图 4)。

福州市承灾体脆弱性等级由东部沿海向西部山区递减, 整体上脆弱性空间分布与承灾体的分布密切相关。中高、高脆弱性地区以面状、条带状集中分布于福州市主城区、东南临海乡镇以及平潭综合实验区。中等级区主要位于福州市东北部、中西部地区。中低、低脆弱性区则破碎分布于北部、西部、西南部的山区, 其中闽清县与永泰县低、中低脆弱性占比最大, 分别占本县面积的 40.3% 与 51.4%。罗源县和马尾区中脆弱性地区占比最大, 分别占本区县总面积的 64.2% 与 65.9%。鼓楼区 and 台江区全域为高、中高脆弱性地区, 仓山区与平潭综合实验区高、中高脆弱性地区分别占本区总面积的 96.64% 与 69%。各县不同脆弱性等级占本区县面积比例如表 7 所列。

## 2.6 不同重现期情景下的台风灾害风险

福州市台风灾害风险等级大致呈现“东高西低”的格局, 随着重现期水平的提高, 灾害风险等级不断

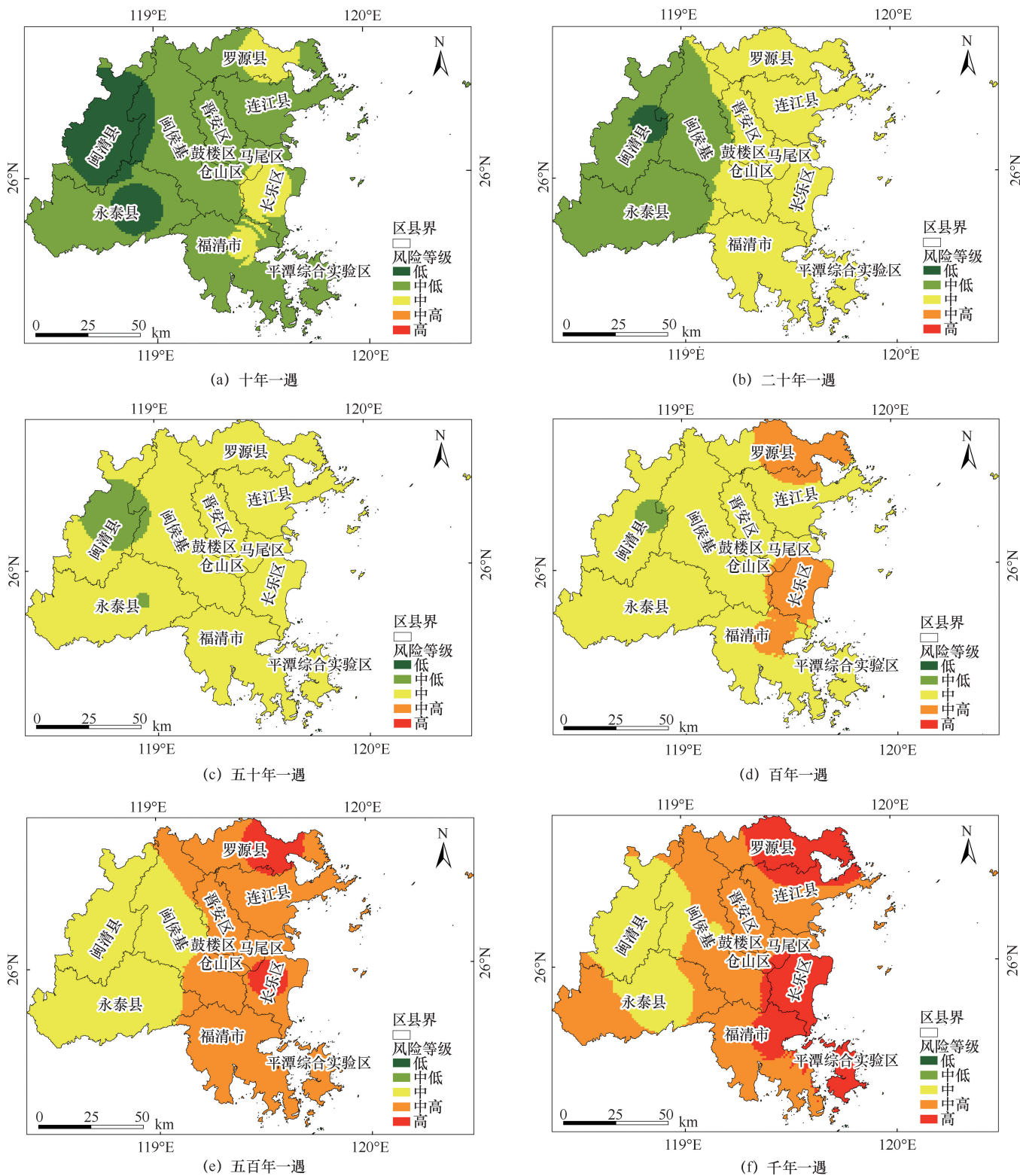


图3 不同重现期情景下致灾因子危险性等级分布

Fig. 3 Distribution of hazard levels of disaster-inducing factors under different return periods

由东北部沿海地区与东南部地区向内陆地区增大(见图5), 其中福州市主城区、长乐区、罗源县、福清市的风险等级较高于其他地区。

十年一遇情景下, 中风险区域主要位于福州市主

城区、罗源县东部、长乐区与福清市东北部, 占全市总面积的12.75%; 中高风险区主要位于长乐区与福清市部分地区, 占全市总面积的1.25%。二十年一遇情景下, 中高风险地区主要位于福州市主城区、

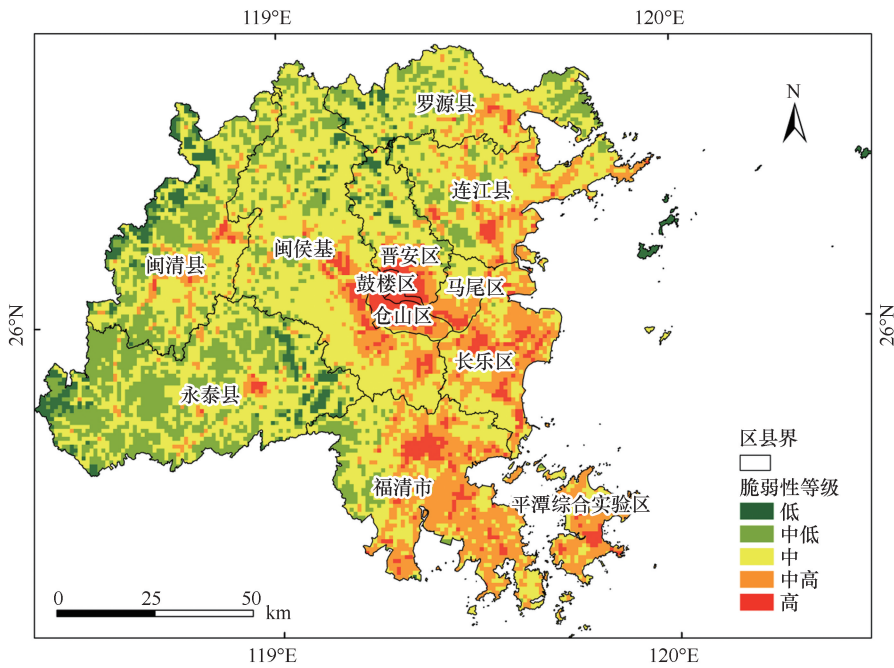


图4 承灾体脆弱性等级分布

Fig. 4 Distribution of vulnerability levels of disaster-bearing bodies

表7 各区县脆弱性等级占比 %

Table 7 Proportion of vulnerability level in each district and county %

区县	低	中低	中	中高	高
仓山区	0.00	0.00	3.36	36.24	60.40
福清市	0.10	8.80	40.10	43.50	7.50
鼓楼区	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
晋安区	6.10	12.60	53.00	16.90	11.40
连江县	2.00	10.40	59.20	24.70	3.70
罗源县	2.50	23.40	64.20	8.90	1.00
马尾区	0.00	4.10	45.60	39.10	11.20
闽侯县	1.30	15.50	65.90	13.60	3.70
闽清县	9.30	31.00	49.30	9.30	1.10
平潭县	0.00	0.30	30.70	60.00	9.00
台江区	0.00	0.00	0.00	5.00	95.00
永泰县	7.40	44.00	44.50	3.50	0.60
长乐区	0.00	0.14	41.00	47.16	11.70

福清市与长乐区部分地区, 占全市总面积的 4.8%。五十年一遇情景下, 中风险区域位于除闽清县、永泰县以外的广大地区, 占全市总面积的 66.5%。百年一遇情景下, 中风险区域变化不大, 占全市总面积的 64.5%; 中高风险区主要位于福州市主城区、罗源县与福清市部分地区、长乐区大部分地区, 占全市总面积的 9.2%。五百年一遇情景下, 中高、高风险地区主要位于福州市主城区、平潭综合实验区、长乐区与福清市大部分地区、罗源县东部, 分

别占全市总面积的 19.4% 与 6.5%。其中鼓楼区和台江区全域高风险。千年一遇情景下, 中高风险与高风险地区主要位于福州市主城区、平潭综合实验区、长乐区与福清市大部分地区、罗源县东部, 分别占全市总面积的 21.1% 与 13.4%, 鼓楼区、台江区、仓山区、平潭综合实验区、长乐区中高、高风险区域几乎占全区全域。

### 3 结论

本研究基于福州市 9 个气象站点数据, 筛选了 2005—2020 年 97 场影响福州市的典型台风。对台风影响下极大风速与累积雨量进行边缘分布拟合、二元联合分布拟合并计算不同重现期情景下对应的设计值, 通过熵权法确定

风雨对应权重, 得到不同重现期情景下台风致灾因子危险性的空间分布。依托全国第一次自然灾害风险普查成果, 利用熵权法评估 1 km 网格下承灾体的脆弱性, 运用风险矩阵, 评估了六个重现期情景下福州市台风灾害风险, 结论如下。

(1) 千年一遇情景下, 闽清县风雨设计值最小, 复合重现期对应设计值为 26.03 m/s 与 463.72 mm, 同现重现期对应设计值为 18.03 m/s、242.66 mm; 罗源县和长乐区风雨设计值最大, 复合重现期对应设计值分别为 57.78 m/s、1 173.87 mm 与 65.42 m/s、1 094.27 mm, 同现重现期对应设计值分别为 43.1 m/s、756.03 mm 与 46.3 m/s、618.71 mm; 全市 9 个站复合重现期对应设计值平均为 44.13 m/s、824.41 mm, 同现重现期对应设计值平均为 32.67 m/s、468.41 mm。

(2) 随着重现期水平提高, 致灾因子危险性自东部沿海向西部山区增大。承灾体中高、高脆弱性地区主要分布于福州市主城区以及东南临海乡镇, 中等级区主要位于福州市东北部、中西部地区, 中低、低脆弱性区分布于北部、西部、西南部的山区。鼓楼区和台江区全域为高、中高脆弱性地区, 仓山区与平潭综合实验区高、中高脆弱性地区分别占本区总面积的 96.64 与 69%。承灾体脆弱性分布与人口、经济和建筑物的集中度密切相关。

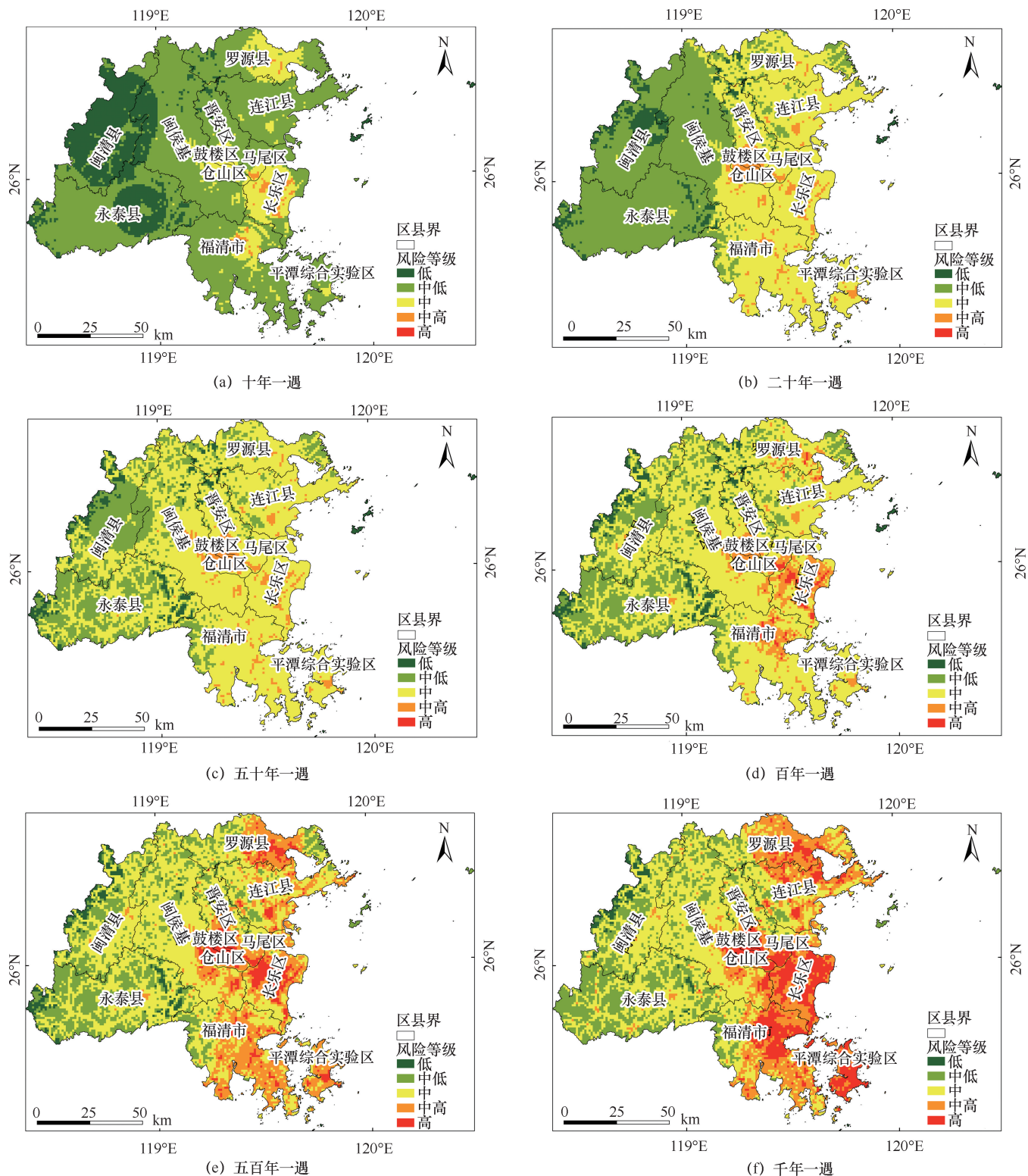


图5 不同重现期情景下台风灾害风险分布

Fig. 5 Distribution of typhoon disaster risks under different return periods

(3) 福州市台风灾害风险大致呈“东高西低”格局, 随着重现期水平提高, 灾害风险由东北、东南部沿海向内陆地区提高, 福州市主城区、长乐区、罗源县、鼓楼区、台江区、仓山区、平潭综合实验区、福清市风险高于其余地区。

(4) 极端灾害条件下(如千年一遇), 中高、高风险区主要位于福州市东北、东南部与主城区, 占全市总面积的 34.5%。鼓楼区、台江区、仓山区、平潭综合实验区、长乐区中高、高风险区域几乎占全区

全域。

本研究精细评估了不同重现期情景下的福州市台风灾害复合风险, 为区域自然灾害综合风险防御提供了科学依据, 但本研究仍存在诸多不足。首先, 研究选取的台风样本及代表站点有限, 计算所得不同重现期对应设计值与空间插值结果的准确性有待进一步验证和优化。其次, 研究仅选取台风过程雨量与极大风速作为致灾因子, 未考虑台风引起的风暴潮、洪水等其他致灾风险, 具有一定的局限性。最后, 在致灾因子危险性与承灾体脆弱性的计算中, 各指标所占权重均由熵值法确定, 权重设定的合理性有待进一步验证。后续研究将针对这些局限性逐步拓展和优化。

## 参考文献 (References):

- [1] BALAGURU K, FOLTZ G R, LEUNG L R, et al. Global warming-induced upper-ocean freshening and the intensification of super typhoons [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13670.
- [2] 梁必骥, 梁经萍, 温之平. 中国台风灾害及其影响的研究[J]. *自然灾害学报*, 1995, 4(1): 84-91.
- LIANG Biqi, LIANG Jingping, WEN Zhiping. Research on typhoon disasters and their effects in China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1995, 4 (1): 84-91.
- [3] 殷洁, 戴尔阜, 吴绍洪. 中国台风灾害综合风险评估与区划[J]. *地理科学*, 2013, 33(11): 1370-1376.
- YIN Jie, DAI Erfu, WU Shaohong. Comprehensive risk assessment and zoning of typhoon disasters in China [J]. *Geographic Sciences*, 2013, 33 (11): 1370-1376.
- [4] 周紫蕊, 廖卫红, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市河网调控与分析: 以福州市仓山区龙津阳岐片区为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 770-779.
- ZHOU Z R, LIAO W H, LEI X H, et al. InfoWorks ICM-based urban river network regulation and analysis: A case study of Longjin Yangqi area in Cangshan District, Fuzhou City [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21 (4): 770-779.
- [5] 石先武, 方伟华. 1949—2010年西北太平洋热带气旋时空分布特征分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2015(3): 287-292.
- SHI Xianwu, FANG Weihua. Spatial and temporal distribution characteristics analysis of tropical cyclones in the northwest Pacific from 1949 to 2010 [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2015 (3): 287-292.
- [6] 刘倩, 高路, 赵鹏, 等. 2000—2016年中国热带气旋灾害时空特征研究[J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(5): 50-57.
- LIU Qian, GAO Lu, ZHAO Peng, et al. Study on the spatiotemporal characteristics of tropical cyclone disasters in China from 2000 to 2016 [J]. *China Flood and Drought Management*, 2020, 30 (5): 50-57.
- [7] 向纯怡, 高栓柱, 刘达. 2021年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. *海洋气象学报*, 2022, 42(1): 39-49.
- XIANG Chunyi, GAO Shuanzhu, LIU Da. Overview of typhoon activities in the northwest Pacific and South China Sea in 2021 [J]. *Journal of Marine Meteorology* 2022, 42 (1): 39-49.
- [8] 杨慧娟, 李宁, 雷颀. 我国沿海地区近 54a 台风灾害风险特征分析[J]. *气象科学*, 2007, 27(4): 413-418.
- YANG Huijuan, LI Ning, LEI Yang. Risk analysis of typhoon disasters in coastal areas of China in the past 54 years [J]. *Journal of Meteorological Science*, 2007, 27(4): 413-418.
- [9] 王然, 连芳, 余瀚, 等. 基于孕灾环境的全球台风灾害链分类与区域特征分析[J]. *地理研究*, 2016, 35(5): 836-850.
- WANG Ran, LIAN Fang, YU Han, et al. Classification and regional characteristics analysis of global typhoon disaster chain based on pregnancy disaster environment [J]. *Journal of Geographical Research* 2016, 35(5): 836-850.
- [10] 张鹏, 张云霞, 汪洋, 等. 1978—2020年中国台风灾害灾情时空分布格局及影响因素分析[J]. *热带地理*, 2024, 44(6): 1047-1063.
- ZHANG Peng, ZHANG Yunxia, WANG Yang, et al. Analysis of the spatiotemporal distribution pattern and influencing factors of typhoon disasters in China from 1978 to 2020 [J]. *Tropical Geography*, 2024, 44 (6): 1047-1063.
- [11] CHEN T, CHEN S, ZHOU M, et al. Northward shift in landfall locations of tropical cyclones over the western North Pacific during the last four decades[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39 (2): 304-319.
- [12] CHA Y, CHOI J W, AHN J B. Interdecadal changes in the genesis activity of the first tropical cyclones over the western North Pacific from 1979 to 2016[J]. *Climate Dynamics*, 2022, 60(5/6): 1885-1906.
- [13] 李铮, 邱兰兰, 王伟, 等. 北上台风时空变化特征及其与 ENSO 的关系[J]. *热带地理*, 2024, 44(6): 973-986.
- LI Zheng, QIU Lanlan, WANG Wei, et al. Spatiotemporal variation characteristics of northbound typhoons and their relationship with ENSO [J]. *Tropical Geography*, 2024, 44 (6): 973-986.
- [14] QIN L J, ZHU L Y, LIAO X L, et al. Recent northward shift of tropical cyclone economic risk in China[J]. *Natural Hazards*, 2024, 1 (1). <https://www.nature.com/articles/s44304-024-00008-9>.
- [15] 杨晓亮, 杨敏, 隆璘雪, 等. 影响环渤海地区的北上台风特征及其各类典型大暴雨过程分析[J]. *海洋预报*, 2021, 38(4):

99-106.

YANG Xiaoliang, YANG Min, LONG Linxue, et al. Characteristics of northward typhoons affecting the Bohai Rim area and analysis of various typical heavy rainstorm processes [J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38 (4): 99-106.

- [16] 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 Hydro-power Engineering*, 2023, 54(7): 14-26.
- [17] 应急管理部. 2023 年全国自然灾害基本情况. (2024-01-20) [2024-03-25]. [https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120\\_475697.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475697.shtml).
- Emergency Management Department of the People's Republic of China. Basic situation of natural disasters in China in 2023. (2024-01-20) [2024-03-25]. [https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120\\_475697.shtml](https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475697.shtml).
- [18] YIN J, YIN Z, XU S. composite risk assessment of typhoon-induced disaster for China's coastal area [J]. *Natural Hazards*, 2013, 69 (3): 1423-1434.
- [19] LU Y, REN F, ZHU W. Risk zoning of typhoon disasters in Zhejiang Province, China [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 11: 2921-2932.
- [20] WANG K, YANG Y, RENIERS G, et al. A study into the spatio-temporal distribution of typhoon storm surge disasters in China [J]. *Natural Hazards*, 2021, 108(1): 1237-1256.
- [21] 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, 55.
- 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, 55.
- [22] TAO S, HUA Y, DONG S. Hazard risk assessment of tropical cyclones based on joint probability theory [J]. *海洋学报: 英文版*, 2023, 42(6): 89-99.
- [23] 金玲, 张欣馨, 陈佩燕, 等. 台风影响下的学校风灾风险评估模型研究: 以浦东新区部分沿海学校为例[J]. *灾害学*, 2022, 37(2): 54-59.
- JIN Ling, ZHANG Xinxin, CHEN Peiyan, et al. Study on the wind disaster risk assessment model of schools under typhoon impact: A case study of some coastal schools in Pudong New Area [J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37 (2): 54-59.
- [24] 陈勇全. 华南沿海海上风电的台风大风风险评估研究[D]. 昆

明: 云南财经大学, 2023.

CHEN Yongquan. Research on Typhoon and Gale Risk Assessment of Offshore Wind Power along the South China Coast [D]. Kunming: Yunnan University of Finance and Economics, 2023.

- [25] 李颖, 杨程, 方伟华, 等. 台风灾害输电线路杆塔脆弱性与风险评估: 以浙江省为例[J]. *热带地理*, 2024, 44(6): 1113-1126.
- LI Ying, YANG Cheng, FANG Weihua, et al. Vulnerability and risk assessment of transmission line towers in typhoon disasters: A case study of Zhejiang Province [J]. *Tropical Geography*, 2024, 44 (6): 1113-1126.
- [26] 罗玲, 娄小芬, 傅良, 等. ECMWF 极端降水预报指数在华东台风暴雨中的应用研究[J]. *气象*, 2019, 45(10): 1382-1391.
- LUO Ling, LOU Xiaofen, FU Liang, et al. The application of ECMWF extreme precipitation forecast index in storm rainfall over East China observatory [J]. *Meteorological Monthly*, 2019, 45 (10): 1382-1391.
- [27] WANG Xu, ZHANG Lifeng, WANG Yuan, et al. Influence of typhoons in the western pacific on summer precipitation in the eastern Northwest China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2024, 48(2): 507-520.
- [28] QIN Xiaochen, WU Yilong, LIN Tianshu, et al. Urban flood dynamic risk assessment based on typhoon rainfall process: A case study of typhoon “Lupit” (2109) in Fuzhou, China [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15: 3116.
- [29] 张炜月, 林昕, 郑凌琳. 福州地区近 20 年台风降水特征分析 [J]. *海峡科学*, 2020(5): 3-8.
- ZHANG Weiyue, LIN Xin, ZHENG Linglin. Analysis of typhoon precipitation characteristics in Fuzhou area in the past 20 Years [J]. *Strait Science*, 2020 (5): 3-8.
- [30] 林芳. 浅议福建福州市 2013—2016 年台风洪涝灾害[J]. *中国防汛抗旱*, 2018, 28(3): 41-44.
- LIN Fang. A brief discussion on typhoon and flood disasters in Fuzhou City, Fujian Province from 2013 to 2016 [J]. *China Flood and Drought Management* 2018, 28 (3): 41-44.
- [31] 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 disasters in Guangdong Province based on GIS [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2018, 34 (6): 783-790.
- [32] 潘金兰, 徐庆娟, 刘合香. 基于 AHP-TOPSIS 最优组合赋权的台风灾害风险评估[J]. *南宁师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 38(1): 60-67.
- PAN Jinlan, XU Qingjuan, LIU Hexiang. Typhoon disaster risk as-

- essment based on AHP-TOPSIS optimal combination weighting [J]. Journal of Nanning Normal University: Natural Science, 2021, 38 (1): 60-67.
- [33] WANG Zhenkang, XIA Nan, ZHAO Xin, et al. Comprehensive risk assessment of typhoon disasters in China's coastal areas based on multi-source geographic big data. Science of The Total Environment, 2024, 926: 171815.
- [34] 杨奕杰. 基于近 20 年历史数据的中国沿海城市台风灾害风险评估[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- YANG Yijie. Risk Assessment of Typhoon Disasters in Coastal Cities of China based on Historical Data from the Past 20 Years [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [35] 福州市人民政府. 2022 年福州市行政区划情况 [EB/OL]. (2023-09-20) [2024-07-10]. [https://www.fuzhou.gov.cn/zgfztt/zjrc/qhyg/202309/t20230920\\_4681575.htm](https://www.fuzhou.gov.cn/zgfztt/zjrc/qhyg/202309/t20230920_4681575.htm).
- Fuzhou Municipal People's Government. Administrative divisions of Fuzhou City in 2023 and 2022 [EB/OL] (2023-09-20) [2024-07-10]. [https://www.fuzhou.gov.cn/zgfztt/zjrc/qhyg/202309/t20230920\\_4681575.htm](https://www.fuzhou.gov.cn/zgfztt/zjrc/qhyg/202309/t20230920_4681575.htm).
- [36] 福州市人民政府. 2023. 2022 年福州市自然资源情况 [EB/OL]. (2023-09-11) [2024-07-10]. [https://www.fuzhou.gov.cn/zgfztt/zjrc/zrdl/202309/t20230911\\_4671377.htm](https://www.fuzhou.gov.cn/zgfztt/zjrc/zrdl/202309/t20230911_4671377.htm).
- Fuzhou Municipal People's Government. Natural Resources Situation of Fuzhou City in 2023 and 2022 [EB/OL] (2023-09-11) [2024-07-10]. [https://www.fuzhou.gov.cn/zgfztt/zjrc/zrdl/202309/t20230911\\_4671377.htm](https://www.fuzhou.gov.cn/zgfztt/zjrc/zrdl/202309/t20230911_4671377.htm).
- [37] 戴志忠. 福州地区水文特性分析[J]. 水利科技, 2004(3): 9-11.
- DAI Zhizhong. Analysis of hydrological characteristics in Fuzhou area [J]. Hydraulic Science and Technology, 2004 (3): 9-11.
- [38] 人民网. 2023. 降雨突破历史极值! 福建福州受灾 5 万多人, 直接经济损失超 5 亿元 [EB/OL]. (2023-09-09) [2024-07-10]. [https://slt.fujian.gov.cn/wzsy/mtjj/202309/t20230918\\_6260047.htm](https://slt.fujian.gov.cn/wzsy/mtjj/202309/t20230918_6260047.htm).
- People's Daily Online 2023. Rainfall breaks historical record! More than 50000 people in Fuzhou, Fujian were affected by the disaster, resulting in direct economic losses exceeding 500 million yuan [EB/OL] (2023-09-09) [2024-07-10]. [https://slt.fujian.gov.cn/wzsy/mtjj/202309/t20230918\\_6260047.htm](https://slt.fujian.gov.cn/wzsy/mtjj/202309/t20230918_6260047.htm).
- [39] 许红师. 沿海城市多维致灾洪涝风险分析与灾防决策模型研究 [D]. 天津: 天津大学, 2024.
- XU Hongshi. Research on Multidimensional Flood Risk Analysis and Disaster Prevention Decision Model in Coastal Cities [D]. Tianjin: Tianjin University, 2024.
- [40] 高小童, 秦志龙, 高新宇. 含海上风电-光伏-储能的多能源发电输电系统可靠性评估[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 626-635.
- GAO X T, QIN Z L, GAO X Y. Reliability evaluation of multi-energy generation and transmission system with offshore wind power-photovoltaic-energy storage [J]. Power Generation Technology, 2022, 43 (4): 626-635.
- [41] NELSEN R B. An Introduction to Copulas [M]. New York: Springer Verlag, 2006.
- [42] 吴佳瑶, 张煜洲, 陈柯, 等. 基于 AHP-熵权法的城市内涝风险评估: 以杭州市滨江区为例 [J]. 浙江水利水电学院学报, 2024, 36(1): 38-45.
- WU Jiayao, ZHANG Yuzhou, CHEN Ke, et al. Urban waterlogging risk assessment based on AHP entropy weight method: A case study of Binjiang District, Hangzhou City [J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2024, 36(1): 38-45.

(责任编辑 王海锋)