

庄瑶, 鲍瑞娟, 张容焱, 等. 福建热带气旋灾害精细化危险性评估. 应用气象学报, 2022, 33(3): 319-328.  
DOI: 10.11898/1001-7313.20220306

# 福建热带气旋灾害精细化危险性评估

庄瑶<sup>1)2)</sup> 鲍瑞娟<sup>1)</sup> 张容焱<sup>3)\*</sup> 高诗妍<sup>3)</sup> 潘航<sup>3)</sup> 陈思<sup>3)</sup> 林昕<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(福建省灾害天气重点实验室, 福州 350028)

<sup>2)</sup>(福建省气象台, 福州 350028)

<sup>3)</sup>(福建省气候中心, 福州 350028)

## 摘要

根据 1981—2021 年福建省热带气旋风雨资料, 采用极差标准化、相关系数客观赋权法和自然断点法建立热带气旋致灾因子危险性评估模型, 评估结果表明: 选择降水 7 个因子和大风 4 个因子作为评估指标体系合理; 雨高危险性区域位于沿海, 南平和三明地区雨危险性较低; 风较高危险性区域明显窄于雨较高危险性区域, 危险性等级向内陆降低远快于降水, 其中罗源湾至崇武沿海因受台湾岛地形屏障保护, 危险性比沿海南北部小 1 个等级; 风雨综合致灾危险性, 沿海县市皆为较高危险性区域, 其中中部沿海高危险性区域小, 沿海南北部大, 另外登陆粤东热带气旋沿海北上滞留在闽西上空的低压云团造成闽西北部存在较高危险性区域; 在热带气旋登陆影响过程中, 精细化致灾因子危险性评估更具有针对性, 且与灾情相符, 为气象灾害决策服务提供了更有价值的参考信息。

**关键词:** 热带气旋; 致灾因子; 降水; 风; 危险性评估

## 引言

福建省位于中国东南沿海, 濒临西北太平洋, 热带气旋活动频繁, 年平均登陆台风数仅次于广东省和台湾省, 位居第 3。热带气旋带来的大风、暴雨和风暴潮等次生灾害对沿海城市的基础设施、财产、人身安全和农业生产活动均造成严重影响, 其直接经济损失约占总损失的一半以上<sup>[1]</sup>。开展热带气旋(精细化)灾害风险评估技术研究, 对加强区域防灾、抗灾能力, 降低灾后救灾难度具有重大意义。

热带气旋带来的大风和强降水的天气学机理方面已有大量研究<sup>[2-4]</sup>, 为热带气旋灾害风险评估奠定了良好基础。热带气旋灾害风险研究作为热带气旋灾害风险管理的重要课题, 已成为当代国际减灾组织、灾害研究普遍关注的热点问题<sup>[5]</sup>。目前国内热带气旋灾害评估可以划分为以下几个方面: 热带气旋灾害系统理论研究、热带气旋灾害风险评估、热带

气旋灾害灾情评估、热带气旋灾害经济损失评估、热带气旋灾害减灾防灾能力评估、热带气旋灾害生态评估等<sup>[6-13]</sup>。开展热带气旋灾害风险研究是制定热带气旋灾害综合减灾和应急管理对策的基础和依据<sup>[14]</sup>, 热带气旋灾害风险评估体系包括热带气旋致灾因子危险性、孕灾环境、承灾体脆弱性和防灾减灾能力四大方面<sup>[15-16]</sup>, 许多学者对热带气旋灾害风险评估进行了深入探讨<sup>[17-24]</sup>, 魏章进等<sup>[25]</sup>基于熵值法得到综合指数以划分灾害等级; 卢耀健等<sup>[26]</sup>利用组合权重构建灾情指数序列和致灾源指数序列, 计算每个热带气旋灾害风险值, 并进行等级划分; 许红师等<sup>[27]</sup>开展多元致灾因子相互作用下的热带气旋灾害事件联合重现期和失效概率分析, 为全面评估热带气旋灾害影响提供新思路。热带气旋致灾危险性研究是台风灾害风险研究基础, 人们选取热带气旋暴雨、大风、强度和持续时间等作为评估热带气旋致灾因子危险性的程度指标, 并计算灾害风险指数<sup>[28-32]</sup>, 效果良好。在灾害风险评估中, 致灾因子危险性及承

2021-12-23 收到, 2022-02-25 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2018YFB1501104)

\* 通信作者, 邮箱: fzzry@163.com

灾体脆弱性<sup>[33]</sup>被广泛用于描述风险大小。抗灾能力强的承灾体能够应对致灾临界状态,不会形成灾害,抗灾能力弱的承灾体会形成不同程度的损失,后者脆弱性明显大于前者,发生灾害风险大。风险程度还与承灾体暴露在灾害影响区域内的数量有关,数量越大风险越大。由于承灾体空间分布十分复杂,且存在很大不确定性,因此准确预报风险源(致灾因子)的时空分布,通过空间化技术叠加高敏感区域的承灾体脆弱性和暴露度,根据致灾阈值发布预警,是减小灾害风险的一种有效途径。本文通过合理选择致灾因子,探讨福建热带气旋灾害危险性评估技术,充分利用精细到乡镇的区域自动气象站数据以及灾情信息,研制满足实时决策服务需求的单一热带气旋精细化致灾因子危险性评估方法,实现对热带气旋灾害风险动态监测、预警和评估功能,为热带气旋灾害链的预报、预测以及防灾减灾措施提供科学依据。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据来源

根据福建省地方标准《登陆和影响福建热带气旋》(DB35/T 1413—2014),登陆热带气旋定义为热带风暴及以上等级的热带气旋中心自海上直接登陆福建省陆地。影响热带气旋定义为当热带风暴及以上等级的热带气旋中心位于福建省热带气旋警戒区内(图1)但未登陆福建,受其影响出现下列情况之一者为影响热带气旋:①沿海至少有1个站点极大风

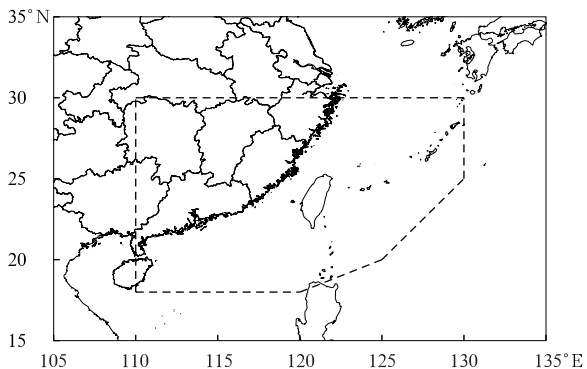


图1 福建省热带气旋警戒区

Fig. 1 Tropical cyclone warning zone for Fujian

不低于8级;②国家地面气象观测站至少有1个站日降水量不小于50 mm。以1981—2021年福建省66个具有稳定长序列的国家气象观测站(以下简称国家站)为基础,筛选出383个登陆和影响的热带气旋样本,建立致灾因子危险性评估模型。选取全国综合气象信息共享平台(CIMISS)数据库中自2010年起较为完整的1038个区域自动气象站风雨数据。

本文插图中所涉及的中国国界基于审图号为GS(2017)3320号标准地图制作,底图无修改。

### 1.2 计算方法

本文采用数据标准化、客观赋权<sup>[34]</sup>和自然断点法<sup>[35-36]</sup>等方法建立热带气旋致灾因子危险性评估模型。各评价因子量纲和数量级不同,需进行标准化处理。在确定评估模型参数时,发现不同的标准化方法权重系数不变,而正规标准化法需要站点多年数据平均值和方差,但区域自动气象站数据无法满足该条件,故采用极差标准化法。

采用相关系数和信息熵两种客观赋权法可确定致灾因子权重系数,但因信息熵法考虑因子变异性,用于本指标体系中不连续变量(如台风过程大暴雨日数)易丢失信息,故本文采用相关系数法求取各评价因子的权重系数。

## 2 评估模型建立

### 2.1 评估因子选取

热带气旋致灾是由其带来的风雨和风暴潮引发,热带气旋本身强度和登陆地段决定了可能带来的风雨强度。每个热带气旋均有固定的自身危险性指数,每个地点风雨不同,风雨危险性指数也不同,可将热带气旋自身和其带来的风雨灾害分别进行危险性评估,本文重点分析风雨危险性。

暴雨洪涝灾害由强度大、范围广、持续时间长的降水造成,因此暴雨洪涝灾害因子考虑日降水量、过程降水量、短历时强降水和强降水站数。大风灾害多考虑近海船舶和工程建筑抗风能力,选取最大风速和极大风速,以及承灾体可能承受的极限风速。不同致灾因子组合得到的危险性评估不一样。经过多轮合理性试验,根据热带气旋灾害的气候特征和灾情,确定降水采用7个因子,大风采用4个因子,致灾因子具体详见表1。

表 1 热带气旋灾害致灾因子危险性评估指标体系

Table 1 Risk assessment index system of tropical cyclone disaster-causing factors

等级	降水因子	大风因子
第 1 级	雨危险性	风危险性
第 2 级(气象要素)	降水	风速
第 3 级(因子)	过程日最大降水量(单站),过程累积最大降水量(单站), 过程 1 h 最大降水量,过程 3 h 最大降水量,过程暴雨 站日数,过程大暴雨站日数,过程特大暴雨站日数	过程日最大风速(单站),过程日极大风速(单站), 过程最大风速不低于 8 级站日数, 过程极大风速不低于 12 级站日数

2.2 因子权重系数确定

热带气旋灾害范围广往往超过县域,不宜采用小区域独立的评估模型,因为构建模型的矩阵差异,可引起多个不合理的风险高值区。为了保证风险指数的区域可比性,本文以福建全省为基础,采用统一的权重系数构建评估模型。

确定权重系数的信息矩阵构成有两种方案:方案 1 按照热带气旋过程时间统计福建省风雨危险性评价第 3 级指标的 11 个因子,通过极差标准化变换,分别构建风雨(第 3 级)权重系数计算信息矩阵;方案 2 采用单站历年热带气旋风、雨第 3 级指标 11 个因子极值,构建福建省空间信息矩阵,采用相关系数客观赋权法建模。根据福建热带气旋灾害成因和灾害气候特征可知,方案 1 建模合理。进一步分析表明,方案 2 权重系数仅考虑单站可能最强热带气旋致灾因子组合构成的一种全省空间分布形态,而方案 1 权重系数充分考虑每个热带气旋过程存在的个体差异和强风、强降雨落区随机等匹配信息,更符合热带气旋致灾机理。

2.3 评估模型

2.3.1 热带气旋雨危险性评估模型

根据热带气旋降水 7 个危险性评估因子构建雨危险性评估模型:

$$H_p = 0.1213 \times P_1 + 0.1217 \times P_2 + 0.1352 \times P_3 + 0.1273 \times P_4 + 0.1429 \times P_5 + 0.1389 \times P_6 + 0.2126 \times P_7 \quad (1)$$

式(1)中,  $H_p$  为热带气旋雨危险性指数,  $P_1$  为过程最大日降水量,  $P_2$  为过程最大降水量,  $P_3$  为过程 1 h 最大降水量,  $P_4$  为过程 3 h 最大降水量,  $P_5$  为过程暴雨(日降水量不小于 50 mm)站日数,  $P_6$  为过程大暴雨(日降水量不小于 100 mm)站日数,  $P_7$  为过程特大暴雨(日降水量不小于 250 mm)站日数。

由式(1)可以看到,各级暴雨站日数权重系数大,表明强降水范围和持续时间是决定致灾风险的关键,式(1)中 1 h 最大降水量权重系数大于日最大降水量和过程最大降水量的权重系数,表明短时强

降水也是致灾的关键因素,以上结论完全符合雨致灾风险原理。

2.3.2 热带气旋风危险性评估模型

根据热带气旋大风 4 个危险性评估因子构建风危险性评估模型:

$$H_w = 0.2044 \times W_1 + 0.2600 \times W_2 + 0.1992 \times W_3 + 0.3363 \times W_4 \quad (2)$$

式(2)中,  $H_w$  为热带气旋风危险性指数,  $W_1$  为过程最大风速,  $W_2$  为过程最大风速不低于 8 级站日数,  $W_3$  为过程极大风速,  $W_4$  为过程极大风速不低于 12 级站日数。

由式(2)可以看到,极大风速的权重系数达到 0.5355,高于最大风速的权重系数,其中以超过某级别的风速范围和持续日数权重系数为大,显然达到某阈值的时空范围因子才是决定致灾风险的关键。由式(2)还可以看到,以往评估风速危险性大多仅考虑最大风速,随着观测技术能力提高,观测数据的积累,极大风速在各种现代风工程设计和维护中的关键作用日益凸显,且极大风速和最大风速的致灾机理不同,均须慎重考虑。

2.3.3 热带气旋致灾因子综合危险性评估模型

热带气旋登陆影响福建省,  $H_p$  和  $H_w$  值不同,根据经验,构建热带气旋风雨致灾因子综合危险性评估模型如下:

$$H = 0.6 \times H_p + 0.4 \times H_w \quad (3)$$

式(3)中,  $H$  为热带气旋综合危险性指数。需要说明的是,式(1)~(3)中各因子已采用极差标准化处理,其值为 0~1。

3 致灾因子危险性评估

3.1 热带气旋致灾因子危险性区划

采用自然断点分级法,处理县级尺度雨危险性指数、风危险性指数和风雨综合危险性指数,得到各级危险性阈值(表 2)。

图 2 中雨危险性的空间分布,整个沿海地区处

表2 县级尺度热带气旋灾害致灾因子危险性等级

等级	含义	降水因子	大风因子	风雨综合因子
1	低危险	0~0.2060	0~0.0995	0~0.1255
2	较低危险	0.2061~0.2967	0.0996~0.1954	0.1256~0.2158
3	中等危险	0.2968~0.4017	0.1955~0.2853	0.2159~0.3209
4	较高危险	0.4018~0.5230	0.2854~0.4495	0.3210~0.4490
5	高危险	0.5231~1	0.4496~1	0.4491~1

于较高危险性区域以上等级,其中北部沿海除福安外,崇武以南沿海除厦门、同安和龙海外,中部沿海除平潭和福清龙高半岛外,皆属于雨高危险性区域,龙岩地区北部也属于雨高危险性区域,这些区域是热带气旋雨引发的山洪地质灾害高发区;低危险性区域集中在南平和三明地区。

图2中风危险性的空间分布,较高危险性区域明显窄于雨危险性,危险性等级向内陆降低速度远大于雨危险性。高危险性区域主要分布于罗源以北沿海,厦门、同安、龙海和东山,漳浦和长乐局部。总体看,罗源湾至崇武沿海因受台湾岛地形屏障保护,风危险性比沿海南北部小1个等级。

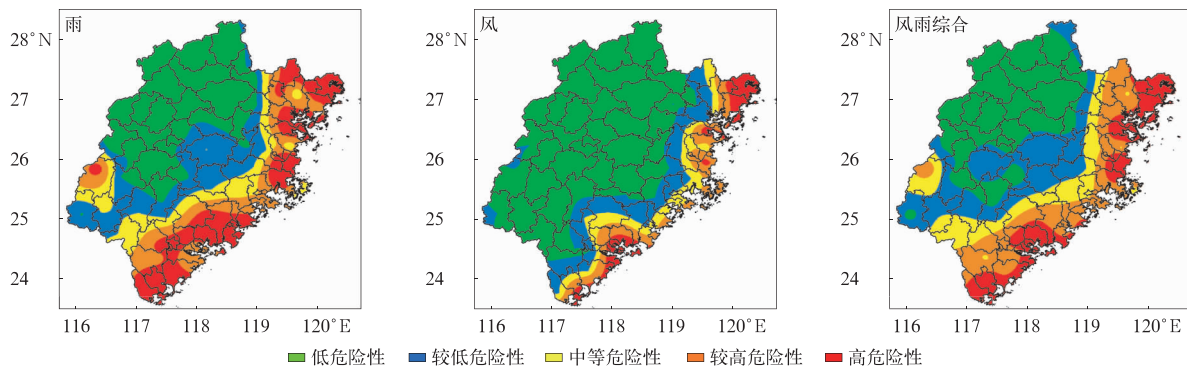


图2 雨、风和风雨综合危险性分布

Fig. 2 Risk distribution of rain induced, wind induced, wind and rain induced

由图2中风雨综合危险性的空间分布可见,沿海县市皆为较高危险以上等级,其中中部沿海高危险性区域小,沿海南北部大。较高危险性区域向内陆延伸出狭长的中等危险性区域,经鹭峰山—戴云山—博平岭山脉连线的西坡(相当于正面登陆热带气旋的背风坡)属于较低危险性区域。在闽西北部存在较高危险性区域,由登陆粤东热带气旋沿海北上滞留在闽西上空低压云团造成<sup>[30]</sup>。

### 3.2 精细化热带气旋过程致灾因子危险性评估

由于热带气旋的路径、登陆地点、登陆强度、环流背景等不同,致灾危险性等级和分布区域差异很

大,有必要研制单个热带气旋危险性评估阈值,满足实时防灾减灾需求。2010年以来,福建省区域自动气象站数量增加且观测质量不断提升,为乡镇级尺度热带气旋灾害致灾因子危险性分析提供了保障。

#### 3.2.1 区域自动气象站危险性指数计算

选取区域自动气象站有记录以来热带气旋过程逐时雨风数据,统计热带气旋过程致灾因子危险性指标的标准化变量(最大值和最小值),采用福建省统一的权重系数计算每个热带气旋危险性指数,结合县级尺度危险性指数,采用自然断点法得到的可用于每个热带气旋过程的乡镇级尺度危险性阈值(表3)。

表3 乡镇级尺度热带气旋灾害致灾因子危险性等级

等级	含义	降水因子	大风因子	风雨综合因子
1	低危险	0~0.2252	0~0.2124	0~0.1051
2	较低危险	0.2253~0.3206	0.2125~0.2767	0.1052~0.2041
3	中等危险	0.3207~0.4312	0.2768~0.3300	0.2042~0.2917
4	较高危险	0.4313~0.5413	0.3301~0.4039	0.2918~0.4078
5	高危险	0.5414~1	0.4040~1	0.4079~1

### 3.2.2 致灾因子危险性评估对比

2018 年超强台风玛莉亚(1808)(简称玛莉亚)是 1949 年以来 7 月首次登陆福建省的最强热带气旋,强风区主要集中在中北部沿海,9 个县(市)城区极大风速突破有气象记录以来 7 月极值。因强降雨未出现在城市化的国家站,县级尺度危险性评估与

乡镇级尺度危险性评估差异明显(图 3)。风危险性评估中加入区域自动气象站数据后大风灾害空间分布精细化,对比乡镇级尺度危险性区划图和县级尺度危险性区划图,前者的防灾减灾更具有针对性。总体受灾区域与乡镇级尺度风雨综合图上的高危险性区域相吻合,综合危险性分布符合灾情记载。

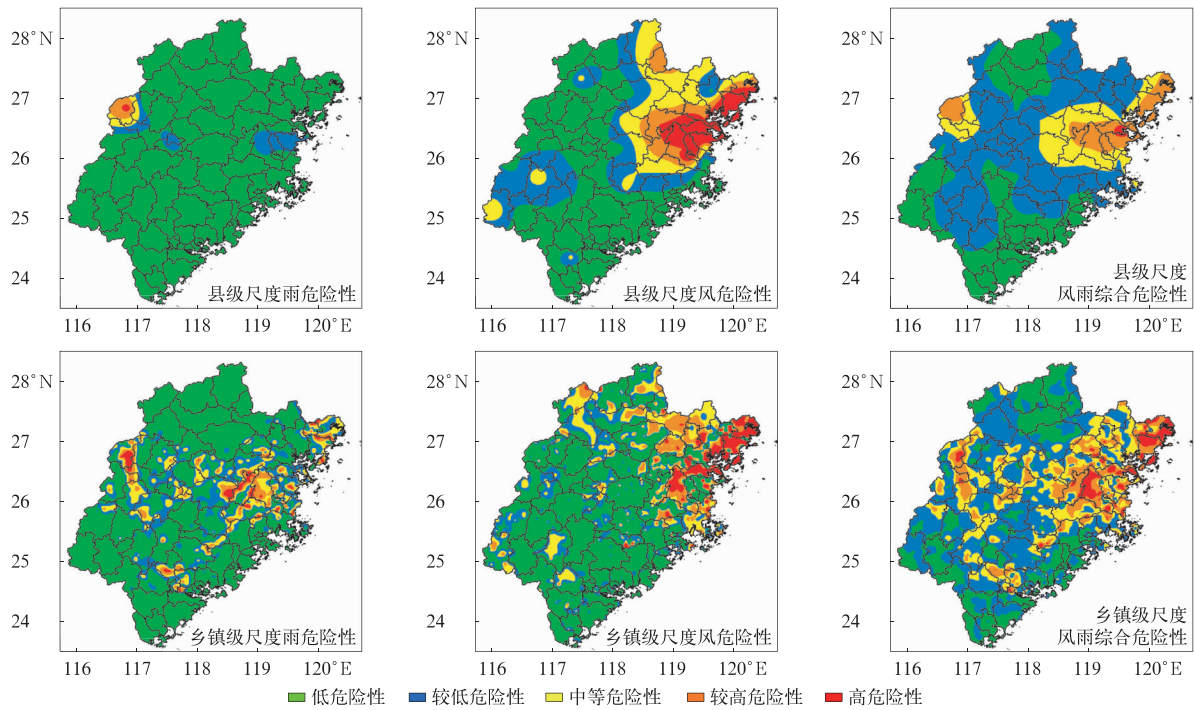


图 3 热带气旋玛莉亚致灾因子危险性分布

Fig. 3 Risk distribution of disaster factors by tropical cyclone Maria

### 3.3 典型热带气旋灾害致灾因子危险性分析

选取 2005 年以来对福建省影响严重(直接经济损失超过 50 亿元)的 2005 年超强台风龙王(0519)(简称龙王)、2006 年超强台风桑美(0608)(简称桑美)、2015 年超强台风苏迪罗(1513)(简称苏迪罗)、2016 年超强台风尼伯特(1601)(简称尼伯特)和超强台风莫兰蒂(1614)(简称莫兰蒂)5 个热带气旋,分析致灾因子危险性和致灾特点,发现致灾因子高危险性区域与实际灾害发生区域极为吻合,表明本研究所选的致灾因子和分析方法合理。

#### 3.3.1 雨灾为重的典型热带气旋

2005 年 10 月 2 日龙王在厦门登陆,短时超强降水是其最大特点。龙王登陆时无区域自动气象站数据,由国家站数据(图 4)可知,高危险性区域在福州地区,福州市发生罕见城市内涝灾害。2016 年 7 月 9 日尼伯特在泉州石狮登陆,高危险性区域(图

4)内的大樟溪、木兰溪、九龙江北溪、晋江西溪等 10 条河流发生超警戒水位以上洪水,其中梅溪闽清站洪峰水位超保证水位 5.18 m(历史最大洪水),莆田濂溪站洪峰水位超保证水位 0.66 m,闽清梅溪和金沙溪、永泰清凉溪和富泉溪、闽侯木源溪等山洪沟暴发山洪,梅溪中游全国最大古民居单体建筑宏琳厝被冲毁,莆田市城区、秀屿区、仙游县、闽清县、永泰县、古田县等 6 个县(区)出现大面积内涝。

#### 3.3.2 风灾为重的典型热带气旋

除了 2018 年的玛莉亚外,桑美也是以风灾为重的热带气旋。2006 年 8 月 10 日桑美在闽浙交界处登陆,高危险性区域位于福鼎、柘荣和寿宁(图 5),瞬时强风是其最大特点。据记载,苍南风电场瞬时风速达  $81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,福鼎合掌岩瞬时风速为  $75.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,闽浙最大风速均打破其省份的大风记录,破坏性极大,成为登陆热带气旋中因大风造成灾害最重

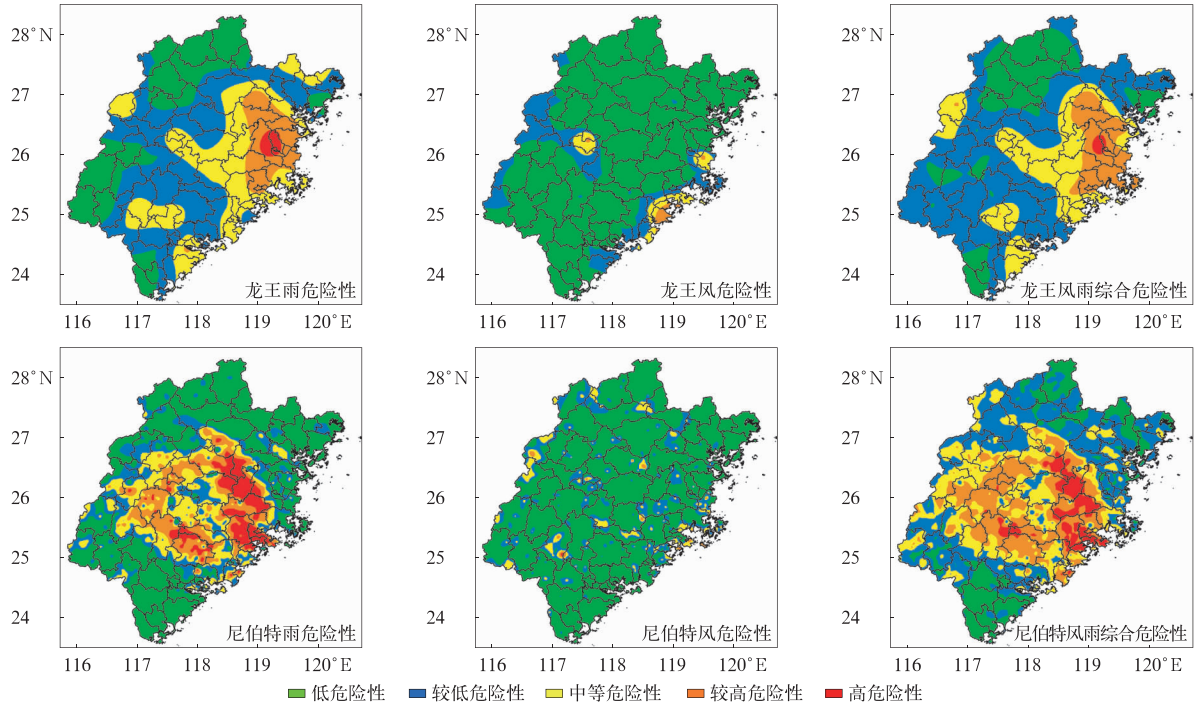


图 4 雨灾型热带气旋致灾因子危险性分布

Fig. 4 Risk distribution of disaster factors by tropical cyclones with rain disasters

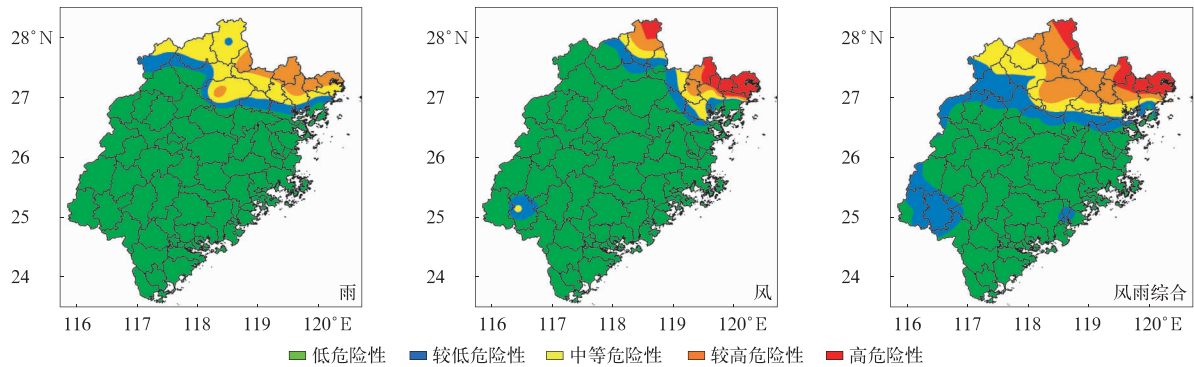


图 5 风灾型热带气旋桑美致灾因子危险性分布

Fig. 5 Risk distribution of disaster factors by tropical cyclone Saomai with wind disaster

的热带气旋。

3.3.3 风雨并重的典型热带气旋

苏迪罗和莫兰蒂属于典型风灾叠加雨灾的热带气旋,特别是莫兰蒂,高危险区域位于厦门、泉州经济开发区,造成损失惨重。受苏迪罗登陆影响,沿海有 37 站风力达 14 级以上,以莆田涵江的  $53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  最大,霞浦、福州皆打破国家站历史纪录;10 个县市(区)36 站过程降水量不小于 500 mm,福州、周宁日雨量突破历史极值。高危险区域集中在热带气旋登陆地点以北沿海,范围广,严重受灾区位于高危险区域内(图 6)。福州市市内涝时长为 38 h,最大

水深为 1.2 m。周宁县城区内涝历时 5 h,最大水深为 0.8 m。鳌江连江站洪峰超警戒水位 2.67 m,山仔水库入库洪峰为  $5250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,约 30 年一遇;交溪福安站洪峰超警戒水位 5.89 m,接近保证水位,闽江支流梅溪闽清站洪峰超警戒水位 1.96 m。

莫兰蒂降水高危险区域除热带气旋中心附近的厦门、泉州外,宁德的内陆县市和北部沿海是降水高危险区域(图 6)。大风高危险性区域集中在长乐以南沿海小区域和热带气旋登陆消亡的路径上,在热带气旋登陆地点附近,出现超过 17 级的阵风,最大值出现在厦门湖里区滨海街道( $66.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),厦门

站最大阵风达到 16 级( $54.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),仅次于 5903 号强台风(厦门阵风 17 级, $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),又恰逢天文大潮,海潮顶托,城市内涝、房屋倒塌、基础设施损

坏、水电路讯中断,厦门全城电力供应基本瘫痪、全面停水;泉州、漳州大面积停电;晋江山美水库遭遇 75 年一遇大洪水。

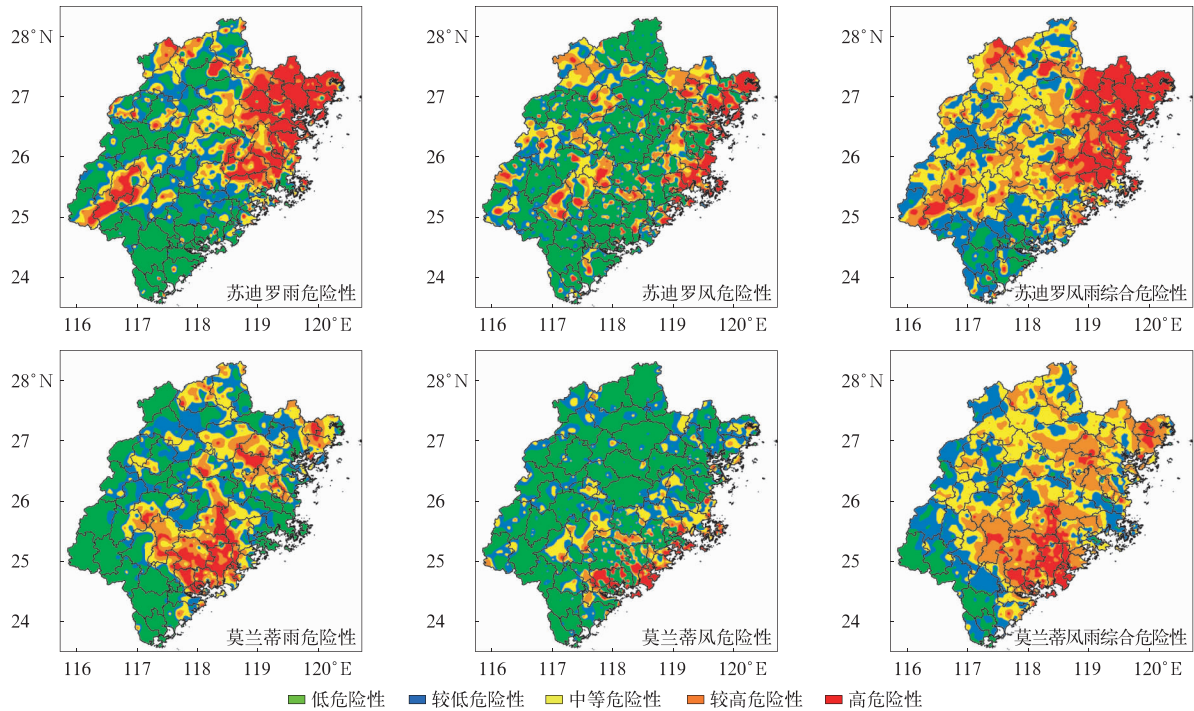


图 6 风雨并重热带气旋致灾因子危险性分布

Fig. 6 Risk distribution of disaster factors for tropical cyclones with both wind and rain

由以上的典型热带气旋个例结合风雨影响区域可以看到,直接经济损失明显受到承灾体和经济发展水平影响,莫兰蒂危害福建黄金海岸,导致直接经济损失 361.9 亿元,远高于尼伯特(124.4 亿元)、苏迪罗(96.34 亿元)、桑美(63.57 亿元)和龙王(74.78 亿元)。

#### 4 结论与讨论

研究表明:

1) 按照热带气旋过程时间计算福建省大风(4 个)、降水(7 个)危险性评价第 3 级指标因子并进行相关系数客观赋权法建模;采用历史热带气旋风雨序列构建福建省统一因子权重系数,评估不同站点致灾危险性指数,结果符合热带气旋致灾机理。

2) 热带气旋雨高危险性指数区域位于沿海,南平和三明地区雨危险性较低。风较高危险性区域明显窄于雨较高危险性区域,危险性等级向内陆降低速度远大于雨危险性,其中罗源湾至崇武沿海因受

台湾岛地形屏障保护,风危险性比沿海南北部小 1 个等级。

3) 福建省沿海为热带气旋灾害气象致灾因子较高危险性区域,其中中部沿海高危险性区域小,南北部大。较高危险性区域向内陆延伸出狭长的中等危险性区域,经鹞峰山—戴云山—博平岭山脉连线的西坡(相当于正面登陆热带气旋的背风坡)属于较低危险性区域,在闽西北部有一个较高危险性区域,由登陆粤东沿海热带气旋北上后滞留在闽西上空低压云团造成。

4) 引进区域自动气象站风雨信息,乡镇级尺度致灾因子危险性评估图更具有针对性,且与灾情更加吻合。随着智能网格预报技术准确度和精细度的提高,利用历史热带气旋致灾因子,构建基于格网空间分辨率的长年代时间序列,确定致灾因子危险性评估模型权重系数,同样也能获得精细化的热带气旋风雨致灾因子危险性评估,同时还可避免地面站点数据缺测带来的问题。

本文所选的致灾因子和分析方法合理,热带气

旋个例危险性评价结果可靠、适应性好。具体受灾程度,更多取决于承灾体的脆弱性和暴露、孕灾环境以及防灾减灾能力,属于热带气旋灾害综合风险评估范畴,今后将在深入了解和准确评估致灾因子危险性的基础上,进一步开展福建省热带气旋灾害综合风险评估研究。

### 参考文献

- [1] 陈香. 沿海地区台风灾害系统脆弱性过程诊断与评估——以福建省为例. 灾害学, 2007, 22(3): 6-10.  
Chen X. Vulnerability diagnosis and assessment of typhoon disaster system at coastal regions, a case study of Fujian Province. *J Catastrophology*, 2007, 22(3): 6-10.
- [2] 李欣, 张璐. 北上台风强降雨形成机制及微物理特征. 应用气象学报, 2022, 33(1): 29-42.  
Li X, Zhang L. Formation mechanism and microphysics characteristics of heavy rainfall caused by northward-moving typhoon. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 29-42.
- [3] 杨舒楠, 端义宏. 台风温比亚(1818)降水及环境场极端性分析. 应用气象学报, 2020, 31(3): 290-302.  
Yang S N, Duan Y H. Extremity analysis on the precipitation and environmental field of Typhoon Rumbia in 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3): 290-302.
- [4] 程正泉, 林良勋, 杨国杰, 等. 超强台风威马逊快速增强及大尺度环流特征. 应用气象学报, 2017, 28(3): 318-326.  
Cheng Z Q, Lin L X, Yang G J, et al. Rapid intensification and associated large-scaled circulation of super Typhoon Rammasun in 2014. *J Appl Meteor Sci*, 2017, 28(3): 318-326.
- [5] Dille M, Chen R S, Deichmann U, et al. Natural Disaster Hotspots: A Risk Analysis Synthesis Report. Washington DC: Hazard Management Unit, World Bank, 2005: 1-132.
- [6] 魏章进, 隋广军, 唐丹玲. 台风灾情评估及方法综述. 灾害学, 2012, 27(4): 107-113.  
Wei Z J, Sui G J, Tang D L. An Overview of assessment and approaches on typhoon disaster. *J Catastrophology*, 2012, 27(4): 107-113.
- [7] 殷洁, 戴尔阜, 吴绍洪. 中国台风灾害综合风险评估与区划. 地理科学, 2013, 33(11): 1370-1376.  
Yin J, Dai E F, Wu S H. Integrated risk assessment and zoning of typhoon disaster in China. *Sci Geogr Sinica*, 2013, 33(11): 1370-1376.
- [8] 韩金, 戴尔阜. 基于系统动力学的台风减灾决策研究. 灾害学, 2021, 36(2): 220-227; 234.  
Han J, Dai E F. System-dynamics-based disaster reduction decision for typhoon disaster. *J Catastrophology*, 2021, 36(2): 220-227; 234.
- [9] 叶丁嘉, 王国复, 尹宜舟, 等. 基于灰色关联法的县域台风灾情评估方法初探. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 68-75.  
Ye D J, Wang G F, Yin Y Z, et al. Study on typhoon disaster assessment at county level based on grey relational analysis. *J Marine Meteor*, 2019, 39(1): 68-75.
- [10] 何立富, 陈双, 郭云谦. 台风利奇马(1909)极端强降雨观测特征及成因. 应用气象学报, 2020, 31(5): 513-526.  
He L F, Chen S, Guo Y Q. Observation characteristics and synoptic mechanisms of Typhoon Lekima extreme rainfall in 2019. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5): 513-526.
- [11] 陈有利, 朱宪春, 胡波, 等. 基于BP神经网络的宁波市台风灾情预估模型研究. 大气科学学报, 2018, 41(5): 668-675.  
Chen Y L, Zhu X C, Hu B, et al. Investigate on the pre-assessment of typhoon disaster in Ningbo based on BP neural network. *Trans Atmos Sci*, 2018, 41(5): 668-675.
- [12] Tan R P, Zhang W D. Multiple attribute decision making method based on DEMATEL and fuzzy distance of trapezoidal fuzzy neutrosophic numbers and its application in typhoon disaster evaluation. *J Intell Fuzzy Syst*, 2020, 39(3): 3413-3439.
- [13] 张容焱, 徐宗焕, 游立军, 等. 福建热带气旋风雨空间分布特征及风险评估. 应用气象学报, 2012, 23(6): 672-682.  
Zhang R Y, Xu Z H, You L J, et al. Wind and rainfall features and risk assessment of tropical cyclone in Fujian. *J Appl Meteor Sci*, 2012, 23(6): 672-682.
- [14] 陈楷俊, 陈艺仪, 陈菁. 近30年粤东地区台风灾害风险评估与分析. 水土保持研究, 2019, 26(3): 362-366; 372.  
Chen K J, Chen Y Y, Chen J. Risk assessment and analysis of typhoon disaster in east Guangdong in the period 1989—2017. *Res Soil Water Conserv*, 2019, 26(3): 362-366; 372.
- [15] 孔莉莎, 张秀芝. 西北太平洋历史台风风场重建模型参数试验. 应用气象学报, 2022, 33(1): 56-68.  
Kong L S, Zhang X Z. Sensitive experiments on reconstruction model of historical typhoon wind field in the Northwest Pacific Ocean. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 56-68.
- [16] 朱婧, 陆逸, 李国平, 等. 基于县级分辨率的福建省台风灾害风险评估. 灾害学, 2017, 32(3): 204-209.  
Zhu J, Lu Y, Li G P, et al. Risk assessment of typhoon disaster in Fujian Province of each country. *J Catastrophology*, 2017, 32(3): 204-209.
- [17] 林茹馨, 叶金玉. 中国台风研究进展的可视化分析. 防灾科技学院学报, 2020, 22(1): 38-45.  
Lin R X, Ye J Y. Visualization analysis of the typhoon researches in China. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 2020, 22(1): 38-45.
- [18] 张悦, 李珊珊, 陈灏, 等. 广东省台风灾害风险综合评估. 热带气象学报, 2017, 33(2): 281-288.  
Zhang Y, Li S S, Chen H, et al. Evaluation of typhoon disaster risk in Guangdong Province. *J Trop Meteor*, 2017, 33(2): 281-288.
- [19] 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. 灾害学, 2019, 34(1): 73-77.  
Yu X B, Yu X R, Ji Z H, et al. Risk assessment and analysis of typhoon disaster in China's south-east coastal areas-based on information diffusion theory. *J Catastrophology*, 2019, 34



- (1):73-77.
- [20] 刘合香,卢耀健,王萌,等.基于信息扩散技术的华南极端台风灾害风险评估.热带海洋学报,2020,39(3):31-41.  
Liu H X, Lu Y J, Wang M, et al. Risk assessment of extreme typhoon disasters based on information diffusion technology. *J Trop Ocean*, 2020, 39(3): 31-41.
- [21] 周亚飞,程霄楠,蔡靖,等.台风灾害综合风险评价研究.中国公共安全(学术版),2013(1):31-37.  
Zhou Y F, Cheng X N, Cai J, et al. Study on comprehensive risk assessment of typhoon disasters. *China Public Security (Academy Edition)*, 2013(1): 31-37.
- [22] 李祚泳,徐源蔚,汪嘉杨,等.基于投影寻踪回归的规范指标的气象灾情评估.应用气象学报,2016,27(4):480-487.  
Li Z Y, Xu Y W, Wang J Y, et al. Evaluation model of meteorological disaster loss with normalized indices based on projection pursuit regression. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(4): 480-487.
- [23] 杨挺,端义宏,徐晶,等.城市效应对登陆热带气旋妮姐降水影响的模拟.应用气象学报,2018,29(4):410-422.  
Yang T, Duan Y H, Xu J, et al. Simulation of the urbanization impact on precipitation of landfalling tropical cyclone Nida (2016). *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(4): 410-422.
- [24] 张永恒,范广洲,马清云,等.浙江省台风灾害影响评估模型.应用气象学报,2009,20(6):772-776.  
Zhang Y H, Fan G Z, Ma Q Y, et al. The evaluation model of typhoon disaster influence on Zhejiang Province. *J Appl Meteor Sci*, 2009, 20(6): 772-776.
- [25] 魏章进,马华铃,唐丹玲.基于改进熵值法的台风灾害风险趋势评估.灾害学,2017,32(3):7-11.  
Wei Z J, Ma H L, Tang D L. Trend assessment of typhoon disasters based on the improved entropy method. *J Catastrophology*, 2017, 32(3): 7-11.
- [26] 卢耀健,刘合香,王萌.基于组合权重和模糊随机方法的台风灾害风险评估.模糊系统与数学,2020,34(2):151-163.  
Lu Y J, Liu H X, Wang M. Typhoon disaster risk assessment based on combined weights and fuzzy stochastic methods. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2020, 34(2): 151-163.
- [27] 许红师,练继建,宾零陵,等.台风灾害多元致灾因子联合分布研究.地理科学,2018,38(12):2118-2124.  
Xu H S, Lian J J, Bin L L, et al. Joint distribution of multiple typhoon hazard factors. *Sci Geogr Sinica*, 2018, 38(12): 2118-2124.
- [28] 牛海燕,刘敏,陆敏,等.中国沿海地区台风致灾因子危险性评估.华东师范大学学报(自然科学版),2011,31(6):20-25;35.  
Niu H Y, Liu M, Lu M, et al. Risk assessment of typhoon hazard factors in China coastal areas during last 20 years. *Journal of East China Normal University (Nat Sci Ed)*, 2011, 31(6): 20-25; 35.
- [29] 刘方田,许尔琪.海南省台风特点与灾情评估时空关联分析.灾害学,2020,35(2):217-223.  
Liu F T, Xu E Q. Spatio-temporal correlation analysis of typhoon characteristics and disaster assessment in Hainan Province. *J Catastrophology*, 2020, 35(2): 217-223.
- [30] 张张伟,张京红,赵志忠,等.基于GIS的海南岛台风灾害致灾因子危险性分析.安徽农业科学,2011,39(11):6587-6590.  
Zhang Z W, Zhang J H, Zhao Z Z, et al. Analysis of risks in Hainan Island typhoon hazard factor based on GIS. *J Anhui Agri Sci*, 2011, 39(11): 6587-6590.
- [31] 巩在武,胡丽.台风灾害评估中的影响因子分析.自然灾害学报,2015,24(1):203-213.  
Gong Z W, Hu L. Influence factor analysis of typhoon disaster assessment. *J Nat Disa*, 2015, 24(1): 203-213.
- [32] 张丽佳,刘敏,陆敏,等.中国东南沿海地区台风危险性评价.人民长江,2010,41(6):81-83;91.  
Zhang L J, Liu M, Lu M, et al. The hazard assessment of typhoon in southeast coastal areas of China. *Yangtze River*, 2010, 41(6): 81-83; 91.
- [33] Blaikie P, Cannon T, Davis I, et al. At Risk: Natural Hazard, People's Vulnerability and Disasters. London: Routledge, 1994:1-210.
- [34] 李柏年.模糊数学及其应用.合肥:合肥工业大学出版社,2007.  
Li B N. Fuzzy Mathematics and Application. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2007.
- [35] 蔡一乐,曹诗颂,杜明义,等.中国地级市人为热总量的估算及驱动因素分析.地球信息科学学报,2021,23(3):405-418.  
Cai Y L, Cao S S, Du M Y, et al. Estimation and analysis of driving factors of total AHF in prefecture-level of China. *J Geo-info Sci*, 2021, 23(3): 405-418.
- [36] 林蓉璇,王鑫.基于ArcGIS对广东省暴雨洪涝灾害风险的初步研究.广东水利水电,2016(5):41-45.  
Lin R X, Wang X. Preliminary study about Guangdong flood disaster risk based on ArcGIS. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2016(5): 41-45.
- [37] 郑新江,卢乃锰,罗敬宁,等."96.8.8"福建成灾暴雨水汽图像特征分析.海洋预报,1997,14(4):51-58.  
Zheng X J, Lu N M, Luo J N, et al. Analysis of the characteristics of water vapor image of rainstorm in Fujian Province on 8 August 1996. *Marine Forecasts*, 1997, 14(4): 51-58.

## Refined Risk Assessment of Tropical Cyclone Disasters in Fujian

Zhuang Yao<sup>1,2)</sup> Bao Ruijuan<sup>1)</sup> Zhang Rongyan<sup>3)</sup> Gao Shiyan<sup>3)</sup> Pan Hang<sup>3)</sup> Chen Si<sup>3)</sup> Lin Xin<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (*Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350028*)

<sup>2)</sup> (*Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350028*)

<sup>3)</sup> (*Fujian Climate Center, Fuzhou 350028*)

### Abstract

Tropical cyclones have brought huge economic losses to Fujian Province. In order to achieve dynamic monitoring and early warning of wind and rain disaster risks caused by tropical cyclones, the disaster-causing mechanism of tropical cyclones is analyzed. A refined risk assessment method is developed to meet the needs of real-time decision-making on disaster prevention, mitigation, and reducing the economic losses caused by tropical cyclones.

Through multiple rounds of rationality tests, 7 rain-induced disaster factors and 4 wind-induced disaster factors are picked out based on the tropical cyclone wind and rain data of 66 national meteorological stations from 1981 to 2021. And then, the risk assessment model of tropical cyclone disaster factors is established using the range standardization and correlation coefficient objective weighting method, and the risk level is divided by the natural breakpoint method and the disaster impacts.

The results show that the risk assessment index system of disaster factors is reasonable, and the spatial distribution of disaster risk is investigated. The high rain risk areas are located along the coast, and the rain risk of Nanping and Sanming areas is low; the high wind risk area is significantly narrower than the high rain risk area, and the risk level decreases fast inland. Among them, the coastal areas from Luoyuan Bay to Chongwu are protected by the terrain barrier of Taiwan, and the risk is one level lower than that of the north and south parts of the coast. In addition, after the tropical cyclone lands on the east coast of Guangdong and moves northward, it often stays in the low-pressure cloud over the west of Fujian, resulting in a high risk area in the northwest of Fujian. Based on the spatial distribution of a single tropical cyclone, the disaster situation and the encrypted wind and rain data of regional stations, using the function of GIS and combining several typical tropical cyclone cases, a reasonable threshold for hazard classification is designed. It is targeted, especially urban waterlogging and mountain torrent disasters, which are basically consistent with the disaster situation, and provide more valuable reference information for meteorological disaster decision-making services.

**Key words:** tropical cyclone; hazard-inducing factors; precipitation; wind; risk assessment