暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

福建省暴雨致灾因子权重分析及非台风暴雨致灾危险性评估

林昕 杨开甲 张容焱

Analysis of rainfall disaster-causing factors weight and hazard assessment of non-typhoon rainstorms in Fujian Province

LIN Xin，YANG Kaijia，ZHANG Rongyan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-129

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

暴雨过程致灾危险性评估方法研究——以孝感市“8·12”暴雨过程为例
Research of rainstorm event disaster hazard assessment method-A case study of "8·12" rainstorm event in Xiaogan City
暴雨灾害. 2023, 42(6): 724-730 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-068

安徽省暴雨致灾危险性评估
Disaster-causing hazard assessment of rainstorms in Anhui Province
暴雨灾害. 2023, 42(3): 353-359 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-118

安徽省雪灾危险性精细化评估与区划
Refinded hazard assessment and regionalization of snow disaster in Anhui Province
暴雨灾害. 2024, 43(5): 580-586 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-184

基于GIS的安徽省雷电致灾危险性评估与区划
Assessment and zoning of lightning disaster-causing hazards in Anhui Province based on GIS
暴雨灾害. 2024, 43(6): 733-740 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-186

基于风雨综合指数的安徽省台风灾害房屋风险评估方法
Risk assessment method of housing damage by typhoon disaster based on comprehensive wind and rain intensity index in Anhui Province
暴雨灾害. 2024, 43(3): 363-370 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-073

基于GIS的咸宁市枇杷气象灾害危险性评价
Risk assessment of meteorological disasters of loquat planting in Xianning of Hubei based on GIS
暴雨灾害. 2023, 42(1): 105-112 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-202

关注微信公众号，获得更多资讯信息

林昕,杨开甲,张容焱.2025.福建省暴雨致灾因子权重分析及非台风暴雨致灾危险性评估[J].暴雨灾害,44(4):526−534. LIN Xin, YANG Kaijia, ZHANG Rongyan. 2025. Analysis of rainfall disaster-causing factors weight and hazard assessment of non-typhoon rainstorms in Fujian Province [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):526−534 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−129

福建省暴雨致灾因子权重分析及非台风暴雨致灾危险性评估

林昕[1, 2, 3], 杨开甲[1], 张容焱[1, 3]

(1. 福建省气候中心 武夷山国家气候观象台, 福州 350008; 2. 福建省龙岩市气象局, 龙岩 364021; 3. 福建省灾害天气重点实验室, 福州 350008)

摘　要: 开展暴雨致灾因子重要性分析和危险性评估对防范暴雨灾害至关重要。基于福建省 1981—2020 年 66 个国家气象观测站及 2010—2020 年 1 038 个省级气象观测站降水量观测数据, 利用相关系数赋权法计算比较了 5 个季节 (早春、雨季、夏季、秋季和冬季) 非台风暴雨和 3 个时段 (早、一般和晚) 台风暴雨的致灾因子权重系数, 并采用综合指数法开展非台风暴雨致灾危险性评估和检验。结果表明: (1) 强降水范围是各季节非台风暴雨和晚台风暴雨致灾的最主要因素, 短历时强降水是夏季非台风暴雨、早台风暴雨和一般台风暴雨致灾的主要因素。(2) 1981—2020 年福建省非台风暴雨过程综合危险性以 2010 年 6 月 14—26 日过程最大; 危险性空间分布总体呈东西高、中间低的特征, 西北内陆和东南沿海分别存在两个较高和高危险区。(3) 利用非台风暴雨致灾危险性评估模型对 2010—2020 年 3 次非台风暴雨过程评估显示, 福建非台风暴雨致灾危险性空间分布与实际灾情基本相符。

关键词: 暴雨灾害; 致灾因子; 非台风暴雨; 危险性评估

中图法分类号: P426.6　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−129

Analysis of rainfall disaster-causing factors weight and hazard assessment of non-typhoon rainstorms in Fujian Province

LIN Xin[1, 2, 3], YANG Kaijia[1], ZHANG Rongyan[1, 3]

(1. *Fujian Climate Center* , *Wuyishan National Climatological Observatory*, *Fuzhou* 350008; 2. *Longyan Meteorological Bureau of Fujian Province*, *Longyan* 364021; 3. *Fujian Key Laboratory of Severe weather*, *Fuzhou* 350008)

Abstract: Conducting an importance analysis of rainfall disaster-causing factors and hazard assessment is crucial for preventing rainstorm disasters. Based on precipitation observation data from 66 national meteorological stations from 1981 to 2020 and 1,038 provincial meteorological stations from 2010 to 2020 in Fujian Province, the correlation coefficient weighting method was used to calculate and compare the weight coefficients of the rainfall disaster-causing factors of non-typhoon rainstorms in 5 seasons (early spring, rainy season, summer, autumn and winter) and typhoon rainstorms in 3 periods (early, common and late). Then, the comprehensive index method was employed to conduct the hazard assessment and validation of non-typhoon rainstorms. The results are as follows: (1) The spatial extent of heavy precipitation is the primary factor in causing disasters for non-typhoon rainstorms in all seasons and for late typhoon rainstorms. Short-duration intense precipitation is the major factor causing disasters in summer non-typhoon rainstorms, early typhoon rainstorms, and common typhoon rainstorms. (2) The results of the disaster risk assessment of non-typhoon rainstorms show that the hazard of the non-typhoon rainstorm event from June 14 to 26, 2010 was the highest. There is an overall spatial distribution indicating a pattern of being high in the east and west while low in the central area, with two contiguous high and very high risk areas in the northwest inland and southeast coastal areas, respectively. (3) The spatial distributions of disaster risk for three historical non-typhoon rainstorm events from 2010 to 2020 obtained from the non-typhoon rainstorm disaster assessment model are basically consistent with the disaster situation.

Key words: rainstorm disaster; disaster-causing factor; non-typhoon rainstorms; hazard assessment

收稿日期: 2024−06−22; **定稿日期**: 2024−11−11

资助项目: 水利部重大科技项目 (SKS-2022006)

第一作者: 林昕, 主要从事气候变化研究。E-mail: 562711522@qq.com

通信作者: 张容焱, 主要从事气象灾害风险评估研究。E-mail: fzzry@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

引　言

暴雨是福建省最主要的气象灾害之一。据统计, 2001—2020 年福建省因暴雨 (不含台风) 造成的直接经济损失约占气象灾害总损失的 31% (王岩等, 2023)。为减轻暴雨灾害损失, 需要全面认识和恰当评价暴雨灾害可能造成的风险, 为各级政府有效地指导防灾减灾提供科学依据。开展暴雨灾害风险评估技术研究, 对提升福建的气象防灾减灾能力具有重大意义。

目前针对大流域或者一定区域的暴雨灾害风险评估技术思路, 多从致灾因子的危险性、孕灾环境的敏感性、承灾体的脆弱性和防灾减灾能力等方面选择表征指标, 建立灾害综合风险评估模型 (刘家福和张柏, 2015; 周月华等, 2019; 宋怡轩等, 2023)。其中, 致灾因子是导致暴雨灾害发生的直接原因, 其危险性评估是暴雨灾害风险评估的基础 (杨秋珍等, 2010), 实质是对致灾因子影响时间跨度、空间范围、概率和强度等特征进行研究, 进而获得危险性强弱。危险性评估常见的方法有概率分析法和综合指数法。概率分析法是寻找研究对象的最优联合概率分布形态, 通过计算频率 (重现期) 来分析暴雨致灾危险性, 如赵铁松等 (2020) 以连续降水日数和累积降水量作为子牙流域降水事件的特征指标, 吉中会等 (2022) 选取年暴雨日数和年最大日降水量作为淮河流域暴雨的特征指标, 周晓等 (2023) 采用暴雨过程持续时间、累计降水量和最强小时雨量作为阳江地区暴雨的特征指标, 均利用 Copula 函数求算特征指标联合概率进行危险性评估; 唐明秀等 (2023) 以年暴雨日数、暴雨量和暴雨强度作为指标, 使用核密度函数得到我国 5、10、20、50 a 这 4 个重现期下的各暴雨要素取值, 并通过聚类算法给出暴雨危险性等级的空间分布。然而, 概率分析法注重于分析致灾因子变化的空间分布特征, 目前未用于暴雨过程的定量评估。综合指数法首先筛选表征暴雨致灾的相关因子, 归一化去量纲后, 采用加权或指数等不同的函数表达, 综合得到致灾危险性指数。利用该方法, 黄晓梅和程先富 (2019)、李乐乐等 (2023)、谢五三等 (2023)、王妮等 (2024) 分析了不同区域暴雨致灾危险性的总体空间分布特征, 这些研究侧重于总体风险的静态区划研究; 针对单次暴雨过程的风险评估, 范擎宇等 (2016) 和王芬等 (2023) 分别基于松花江流域、湖北孝感市的暴雨过程开展危险性评估与分析, 并利用实际灾情对评估结果进行验证; 孙素琴等 (2024) 结合智能网格降水预报, 并叠加人口、经济、耕地等承灾体, 对江西的单次暴雨过程进行了风险预估。综合指数法在国外也有类似的应用, 如 Ikhvan 和 Mera(2021) 采用多指标合成的综合指数对印尼巴东洪水的危险性和脆弱性进行评估, 并分析确定在危险性和脆弱性评估中的最显著因子。Kelly 和 Kuleshov(2022) 应用 3 个指标研制洪水灾害指数 FHI (Flood Hazard Index), 评估澳大利亚 Hawkesbury-Nepean 流域单次洪水事件危险性。然而, 这些研究往往仅针对其中一个方面, 并没有从暴雨发生的季节及天气气候背景或不同需求情景等角度综合认识暴雨危险性特征。

福建暴雨按形成性质可分为台风暴雨和非台风暴雨两类 (陈兴伟等, 2019)。台风暴雨为台风天气系统所致的暴雨, 多发生在后汛期, 庄瑶等 (2022) 针对福建省热带气旋 (本文通称台风) 的致灾危险性进行评估, 对台风造成的风、雨灾害分别构建危险性评估模型; 而福建非台风暴雨包括冷暖空气交绥的锋面暴雨、局地热对流形成的暴雨等, 一年四季均有可能发生。尽管都是暴雨, 但在不同季节背景条件下由于致灾机理不同, 相应的致灾因子的重要程度和危险性分布特征也会有差异。为研究不同时段福建省台风和非台风过程暴雨致灾因子重要性及非台风暴雨致灾危险性, 本文选取与庄瑶等(2022)研究台风暴雨致灾危险性相同的 7 个暴雨致灾因子, 采用相同的数据处理方法, 利用相关系数赋权法比较了不同季节非台风暴雨与不同时段台风过程的暴雨致灾因子权重系数, 揭示不同气候背景下福建省非台风暴雨和台风暴雨的致灾成因, 然后构建非台风暴雨致灾危险性评估模型, 最后开展非台风暴雨危险性评估和检验, 以期提升福建省暴雨防灾减灾能力。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的资料包括福建省 1981—2020 年 66 个国家气象观测站 (以下简称国家站) 及 2010—2020 年 1 038 个省级气象观测站 (以下简称省级站) 日、小时降水资料。其中, 以国家站降水资料为基础, 筛选暴雨过程, 建立危险性评估模型; 利用省级站降水资料开展暴雨过程危险性精细化评估及检验。以上降水数据均来源于国家气象信息中心全国综合气象信息共享平台“天擎”, 并由该平台进行了质控。

1.2 研究方法

1.2.1 暴雨的相关定义

根据福建业务规定, 福建暴雨日和暴雨过程定义如下:

(1) 暴雨日。全省至少出现 3 个以上国家站日降

水量 (前一日 20 时至当日 20 时, 北京时, 下同)≥50 mm 的雨日。

(2) 暴雨过程。暴雨持续日数至少 1 d 或者间断 1 d 且间断日的日降水量满足以下条件之一, ①至少 1 个国家站 ≥50 mm, ②至少 5 个国家站 ≥25 mm。暴雨过程的首个 (最后一个) 暴雨日为暴雨过程的开始日 (结束日), 持续时间为开始日至结束日的日数。1981—2020 年福建省共出现 866 次暴雨过程。

福建的季节划分 (王岩等, 2023) 和全国传统季节划分略有区别, 其中 3—6 月为春季, 又根据降水性质和强度不同, 分为早春季 (3—4 月) 和雨季 (5—6 月); 夏季为 7—9 月; 秋季为 10—11 月; 冬季为 12 月—2 月。福建的汛期一般指 4—9 月, 其中 4—6 月称前汛期; 7—9 月称后汛期, 又称台风季, 其时段与夏季重合。考虑到不同季节、不同时段的降水性质存在差异, 本文按照福建特殊的划分标准区分福建台风暴雨和非台风暴雨。

(3) 台风暴雨。庄瑶等 (2022) 根据福建省地方标准《登陆和影响福建热带气旋》(福建省质量技术监督局, 2014), 统计得到 1981—2020 年共 383 个台风登陆或影响福建, 受其影响而出现的暴雨过程共计 252 个。按照台风登陆或影响的月份进行划分, 影响时段在 7—9 月, 即台风季, 期间的暴雨称“一般台风暴雨”, 合计 196 个; 早于 7 月的称“早台风暴雨”, 合计 37 个; 晚于 9 月的称“晚台风暴雨”, 合计 19 个。

(4) 非台风暴雨。除“台风暴雨”外的暴雨过程, 1981—2020 年共计 614 个。影响时段在 3—4 月的称“早春季暴雨”, 合计 149 个; 5—6 月的称“雨季暴雨”, 合计 237 个; 7—9 月的称“夏季暴雨”, 合计 153 个; 10—11 月的称“秋季暴雨”, 合计 37 个; 12 月—2 月的称“冬季暴雨”, 合计 38 个。

1.2.2 暴雨致灾因子及危险性评估模型

(1) 暴雨致灾因子。暴雨的危险性往往与降雨的总量、强度、空间范围、时间持续性等因素有关。本文参照庄瑶等 (2022)选取 7 个暴雨致灾因子分别从降雨强度和时空范围两个方面表征暴雨危险性, 详见表 1。

(2) 暴雨致灾因子权重系数。暴雨致灾因子权重系数反映了致灾因子影响重要性大小。为了分析不同类型、不同时期的降雨致灾因子特征, 根据前文 1.2.1 季节和时段划分, 分别构建 5 个季节的非台风暴雨的降雨致灾因子矩阵和 3 个时段的台风暴雨的降雨致灾因子矩阵。数据处理方法见文献 (庄瑶等, 2022), 按照 1981—2020 年相应季节、相应时段的暴雨过程起止日期, 统计表 1 中 7 个降雨致灾因子, 通过极差标准化 (林蓉璇和王鑫, 2016) 变换后, 采用相关系数赋权法确定降雨致灾因子权重系数 (李柏年, 2007)。相关系数法是一种客观赋权方法, 利用致灾因子的相关系数矩阵的内部依连结构来确定权重, 如果相关程度越高, 因子的独立性越差, 在指标体系中的作用越小, 权重系数也就越小。相关系数赋权法可以减少确定权重的主观性, 同时在多因子综合评价中减少因子之间的影响, 从而得到更加可信的评价结果。

(3) 非台风暴雨致灾危险性评估模型及分级。非台风暴雨致灾危险性评估模型采用综合指数法构建, 具体模型如下

$$H = \sum_{k=1}^{r} w_k h_k \tag{1}$$

式中, H为致灾因子的危险性, 是影响致灾因子的多个因素综合作用的表达, r是致灾因子的个数, w_k是其第k个致灾因子的权重系数, h_k是第k个致灾因子。危险性分级采用自然断点分级法 (林蓉璇和王鑫, 2016)。

2 暴雨致灾因子权重分析

由于致灾因子的权重系数是通过历史暴雨过程综合信息得到, 必然隐含了分季节、分时段致灾暴雨的天气气候背景。图 1 比较了 1981—2020 年不同季节非台风暴雨过程和不同时段台风暴雨过程各暴雨致灾因子的权重系数。图 1a 可见不同季节非台风暴雨的致灾因子权重系数差异明显, 早春季和雨季暴雨各因子权重系数曲线走势接近, 这与形成的天气背景相一致, 表征时空范围的因子比重偏大, 并随暴雨级别增大而加大, 表示强降水范围是早春季和雨季暴雨致灾的主要因素, 符合季风雨带大范围、长时间的特点。夏季最典型的是表征短历时降雨的因子所占权重较其他季节明显偏大, 符合夏季对流性强

表 1 福建省暴雨危险性致灾因子

Table 1 Disaster-causing factors of rainstorms hazard in Fujian province

一级指标	二级指标 (物理意义)	三级指标 (致灾因子)
暴雨危险性	降水强度	过程日最大雨量
		过程累计最大雨量
		过程1 h最大雨量
		过程3 h最大雨量
	降水时空范围	过程暴雨站日数
		过程大暴雨站日数
		过程特大暴雨站日数

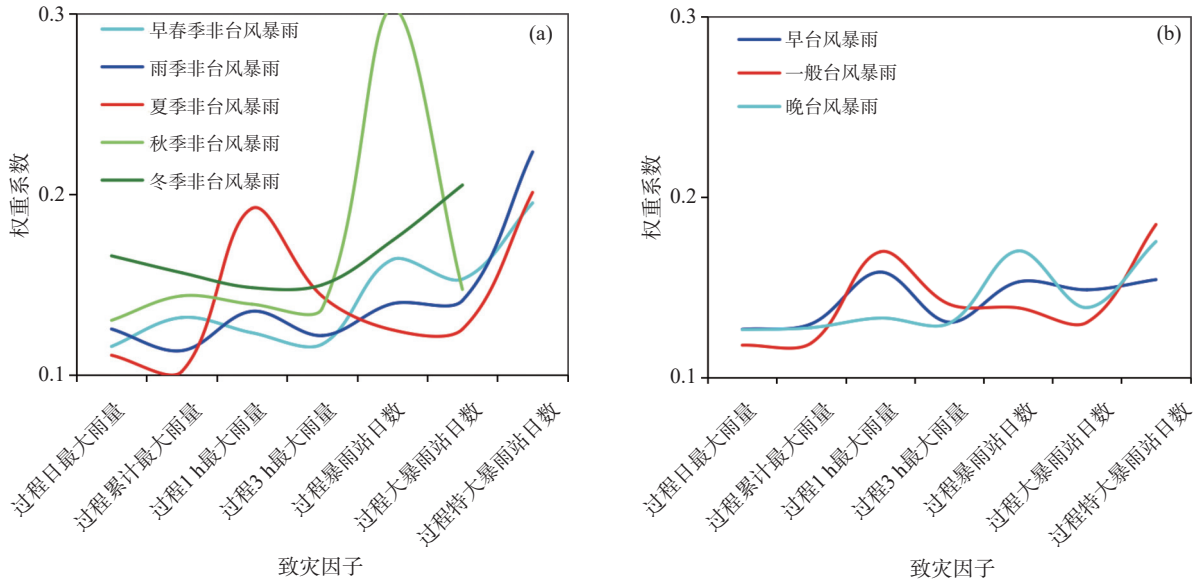

图 1 1981—2020 年福建不同季节非台风暴雨 (a) 和不同时段台风暴雨 (b) 致灾因子权重系数比较

Fig. 1 Comparison of weight coefficients of disaster-causing factors for (a) non-typhoon rainstorms and (b) typhoon rainstorms from 1981 to 2020 in Fujian Province

降水特征, 另外特大暴雨站日数因子权重系数大也表明了夏季致灾暴雨不仅时间短、量大, 还要达到一定的时空范围。秋、冬季往往是福建的少雨期, 从未出现特大暴雨, 且相较于降水强度, 降水时空范围才是暴雨致灾的主要因素; 尤其是秋季, 暴雨时空范围权重大、贡献突出, 这是由于秋季是夏季风向冬季风过渡的季节, 冷空气势力逐渐增强, 但热带系统仍较活跃, 两者相互作用容易引发较大范围的强降水。

不同时段的台风暴雨各致灾因子的权重系数 (图 1b) 同样存在明显差异。早台风和一般台风暴雨共同的重要因子有 1 h 雨量, 早台风暴雨表征时空范围的因子也很重要, 符合雨季期间季风雨带和台风共同作用的特征; 一般台风暴雨仅特大暴雨时空站日数因子显得重要, 与夏季非台风暴雨类似。晚台风暴雨则是表征时空范围的“过程暴雨站日数”因子显得重要, 表明需要冷空气入侵, 维持较长时间的暴雨才易致灾。

根据前文 1.2.1 季节和时段划分, 对比时间接近的非台风暴雨和台风暴雨的致灾因子权重系数 (图 1), 除“夏季暴雨”和“一般台风”的重要致灾因子基本相同外, “雨季暴雨”和“早台风”、“秋季暴雨”和“晚台风”的重要致灾因子均有差异。例如, “雨季暴雨”中特大暴雨站日数因子权重明显偏大, 而“早台风”中 1 h 最大雨量和过程暴雨、大暴雨、特大暴雨站日数等致灾因子权重接近; “秋季暴雨”未出现特大暴雨站, 而“晚台风”特大暴雨站日数因子权重大。

综上所述, 不同季节非台风暴雨和不同时段台风暴雨权重系数的大小和差异, 一定程度上反映了各时期暴雨气候特点和影响系统的不同。依据以上分类的致灾因子权重系数构建的暴雨危险性评估模型, 只能用作该类型暴雨危险性大小的比较。因此, 为了客观全面地评价暴雨过程的致灾因子危险性程度, 需要对非台风暴雨和台风暴雨分别建立危险性评估模型, 后者庄瑶等 (2022) 已完成, 本文仅构建包含所有季节非台风暴雨的危险性评估模型。同时, 为了对比非台风暴雨和台风暴雨各致灾因子重要性差异, 下文也列出了台风暴雨危险性评估模型。

3 非台风暴雨致灾危险性评估模型的检验和区划

3.1 非台风暴雨致灾危险性评估模型

综合 1981—2020 年福建省 614 个非台风暴雨历史样本, 按照每个样本的过程时间构建致灾因子矩阵, 通过极差标准化和相关系数客观赋权法, 分别得到表征强度、时空范围和综合的致灾因子危险性评估模型

$$H_{\mathrm{E}} = 0.2497\times P_1 + 0.2737\times P_2 + 0.2478\times P_3 + 0.2288\times P_4 \quad (2)$$

$$H_{\mathrm{A}} = 0.2404\times D_1 + 0.2095\times D_2 + 0.5500\times D_3 \quad (3)$$

$$H_{\mathrm{P}} = 0.1202\times P_1 + 0.1104\times P_2 + 0.1256\times P_3 + 0.1151\times P_4 + 0.1486\times D_1 + 0.1432\times D_2 + 0.2369\times D_3 \quad (4)$$

式 (2)—(4) 中, H_{E}表示非台风暴雨强度危险性指数, H_{A}表示非台风暴雨时空范围危险性指数, H_{P}表示非

台风暴雨综合危险性指数，P_1表示过程最大降水，P_2表示日最大降水，P_3表示过程 1 h 最大降水，P_4表示过程 3 h 最大降水，D_1表示暴雨站日数，D_2表示大暴雨站日数，D_3表示特大暴雨站日数。

从式 (4) 可见，非台风暴雨表征时空范围的因子 (各级暴雨站日数) 权重系数比表征强度的因子 (雨量) 要大，表明非台风暴雨危险性取决于暴雨天气的影响范围和持续时间，大范围、长时间的暴雨更易致灾。

相比而言，表示台风暴雨综合危险性指数 H_{TCP} 的评估模型式 (5) 中，表征强度的各因子权重普遍高于非台风暴雨，且以日最大降水 (P_2)、3 h 最大降水 (P_4) 2 个因子的差异更明显；而表征时空范围的各因子权重普遍小于非台风暴雨，并且暴雨级别愈大、差异愈大。

$$H_{TCP}=0.1213\times P_1+0.1217\times P_2+0.1252\times P_3+0.1273\times P_4+0.1429\times D_1+0.1389\times D_2+0.2126\times D_3 \quad (5)$$

3.2 非台风暴雨致灾危险性历史评估

采用 1981—2020 年国家站降水资料，致灾因子取单次非台风暴雨过程的站点最大值，根据式 (2) 至式 (4) 计算得到非台风暴雨过程综合危险性指数，根据指数大小排序，可进行非台风暴雨过程危险性历史评估。综合危险性指数位列前十的过程见表 2。1981 年以来，综合危险性指数最高的是 2010 年 6 月 14—26 日过程，指数 0.87，远远高于位居第二的 2005 年 6 月 18—23 日过程 (0.69)，前者直接经济损失也是有灾情记载中最大的一次，超过 144 亿元。另外，还分别计算了强度和时空范围危险性指数 (表略)，强度危险性最大的是 1983 年 6 月 13—21 日过程，其次是 1998 年 6 月 9—17 日过程；时空范围危险性最大的是 2010 年 6 月 14—26 日过程，其次是 1994 年 5 月 1—3 日过程。

3.3 危险性区划

根据式 (4)，采用 1981—2020 年国家站降水资料，各站点致灾因子取历次非台风暴雨过程对应指标的最大值，标准化基数取全部站点致灾因子极值，可得到福建省各国家站非台风暴雨综合危险性指数，将各站指数按照自然断点分级法划分危险性等级 (表 3)，可得到福建省非台风暴雨危险性等级的静态空间区划 (图 2)。

由图 2 可知，福建省非台风暴雨危险性空间分布差异显著，总体上呈现东西高、中间低的分布状态。较高和高危险区的分布大致有两个成片区域，一个位于西北内陆的南平、三明；另一个位于东南沿海的漳州，平潭、宁德存在局地较高和高危险区。闽西和福州、莆田、泉州内陆区域属于较低危险区。

这种暴雨致灾危险性静态空间分布特征可能是由于福建省非台风致灾暴雨多是冷暖空气交绥导致的系统性锋面降水，由于南下冷空气受到武夷山脉阻挡，入海变得缓慢，来自东南部海上暖湿气流沿着闽西北、闽中两大山带爬坡，在冷空气和地形抬升共同作用下，产生强降水并落在了两大山带的东南侧，特别是在雨季期间，降水先起于南部沿海，随时间北推至闽西北内陆地区，暖湿气流逐渐加强，雨势也随之加强。因此，图 2 中闽西北内陆、闽东南沿海两个较高和高危险区的分布正是福建非台风暴雨雨带气候特征的分布形态，主雨带在闽西北内陆地区，闽东南沿海为次雨带 (刘静等, 2016)，而位于两条雨带之

表 2 1981—2020 年福建非台风暴雨过程致灾危险性前十名致灾因子列表

Table 2 Disaster-causing factors of top 10 non-typhoon rainstorms events by hazard level from 1981 to 2020 in Fujian Province

排序	发生时间	过程日最大降水/mm	过程最大降水总量/mm	过程1 h最大降水/mm	过程3 h最大降水/mm	暴雨站日数	大暴雨站日数	特大暴雨站日数	综合危险性指数
1	2010年6月14—26日	266.6	783.6	67.2	120.9	99	33	2	0.87
2	2005年6月18—23日	347.9	764.5	46.9	99.0	99	21	1	0.69
3	2002年6月11—18日	265.9	657.1	66.4	125.4	61	33	1	0.68
4	1994年5月1—3日	345.0	391.2	63.4	130.2	28	10	2	0.63
5	2015年5月19—20日	367.9	411.3	57.4	119.5	18	5	2	0.59
6	2000年6月17—19日	315.7	439.7	46.6	111.0	48	27	1	0.58
7	2008年6月12—14日	299.7	494.1	83.6	161.7	28	12	1	0.57
8	1998年6月19—24日	255.4	589.9	37.6	81.9	49	22	1	0.53
9	1983年6月13—21日	245.1	537.2	89.6	193.3	49	18	0	0.52
10	2004年8月25—28日	289.3	535.0	49.6	116.5	24	12	1	0.49

表 3 1981—2020 年福建非台风暴雨致灾危险性分级

Table 3 Hazard classification for non-typhoon rainstorms from 1981 to 2020 in Fujian Province

等级	含义	综合危险性指数
1	低危险性	0.000 0~0.204 7
2	较低危险性	0.204 8~0.283 9
3	较高危险性	0.284 0~0.504 5
4	高危险性	0.504 6~1.000 0

间的大部分地区危险性相对较低。

由于福建最多雨的时期在雨季 (5—6 月) 和夏季 (7—9 月), 降水量均占全年降水量的 31%, 图 3 分别给出这两个季节的非台风暴雨危险性区划, 由图可见, 雨季非台风暴雨危险性指数大值区 (较高危险等级及以上, 下同) 位于西部内陆和中南部沿海 (图 3a), 其空间分布与图 2 较为相似, 表明在福建非台风暴雨危险性中雨季贡献大。夏季非台风暴雨危险性大值区较为分散, 内陆和沿海均有多处 (图 3b), 符合夏季非台风降水对流性强、“遍地开花”的特征。由于分季节危险性指数是根据季节模型和季节内因子极值标准化后所得, 相应的危险性区划只能解释该季节内哪些区域非台风暴雨危险性高, 并不能在季节间进行对比。

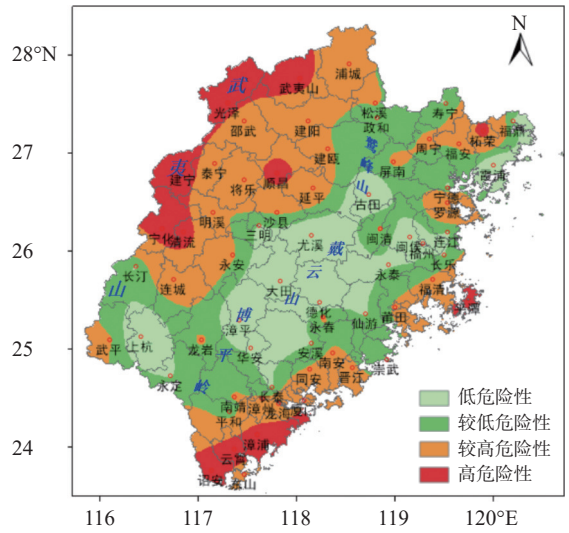

图 2 1981—2020 年福建省非台风暴雨危险性区划

Fig. 2 Hazard zoning of non-typhoon rainstorms from 1981 to 2020 in Fujian Province

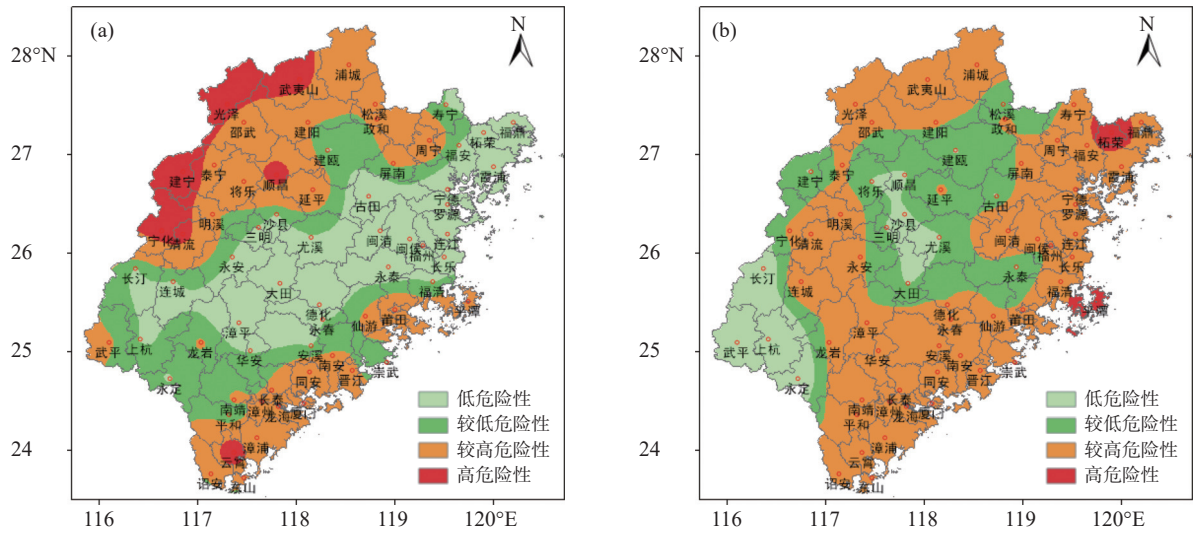

图 3 1981—2020 年福建雨季非台风暴雨 (a) 和夏季非台风暴雨 (b) 危险性区划

Fig. 3 Hazard zoning of non-typhoon rainstorms in (a) monsoon and (b) summer from 1981 to 2020 in Fujian Province

3.4 危险性精细化评估及检验

还可以根据式 (4), 采用 2010—2020 年省级站降水资料, 致灾因子取单次非台风暴雨过程对应指标, 标准化基数取各站点致灾因子极值, 进而得到单次暴雨过程致灾的空间分布, 按照自然断点分级法划分危险性分级见表 4。

本文选取 2010 年 6 月 14—26 日、2015 年 5 月 19—20 日和 2016 年 5 月 5—10 日 3 次非台风暴雨过程, 绘制暴雨过程累积降水量及危险性空间分布 (图 4), 验证评估模型在单个暴雨过程中的敏感性。由图 4 可知, 2010 年 6 月 14—26 日暴雨过程的危险性指数大值区主要分布于福建省内陆, 2015 年 5 月

表 4 1981—2020 年福建非台风暴雨致灾危险性评估分级

Table 4 Hazard assessment classification for non-typhoon rainstorms from 1981 to 2020 in Fujian Province

等级	含义	综合危险性指数
1	低危险性	0.000 0~0.400 0
2	较低危险性	0.400 1~0.460 0
3	较高危险性	0.460 1~0.580 0
4	高危险性	0.580 1~1.000 0

19—20 日暴雨过程中三明和龙岩交界处的宁化、清流、永安、长汀、连城等地暴雨危险性高，2016 年 5 月 5—10 日暴雨过程福建省西北部处于危险性指数大值区。3 次暴雨过程的致灾危险性空间分布差

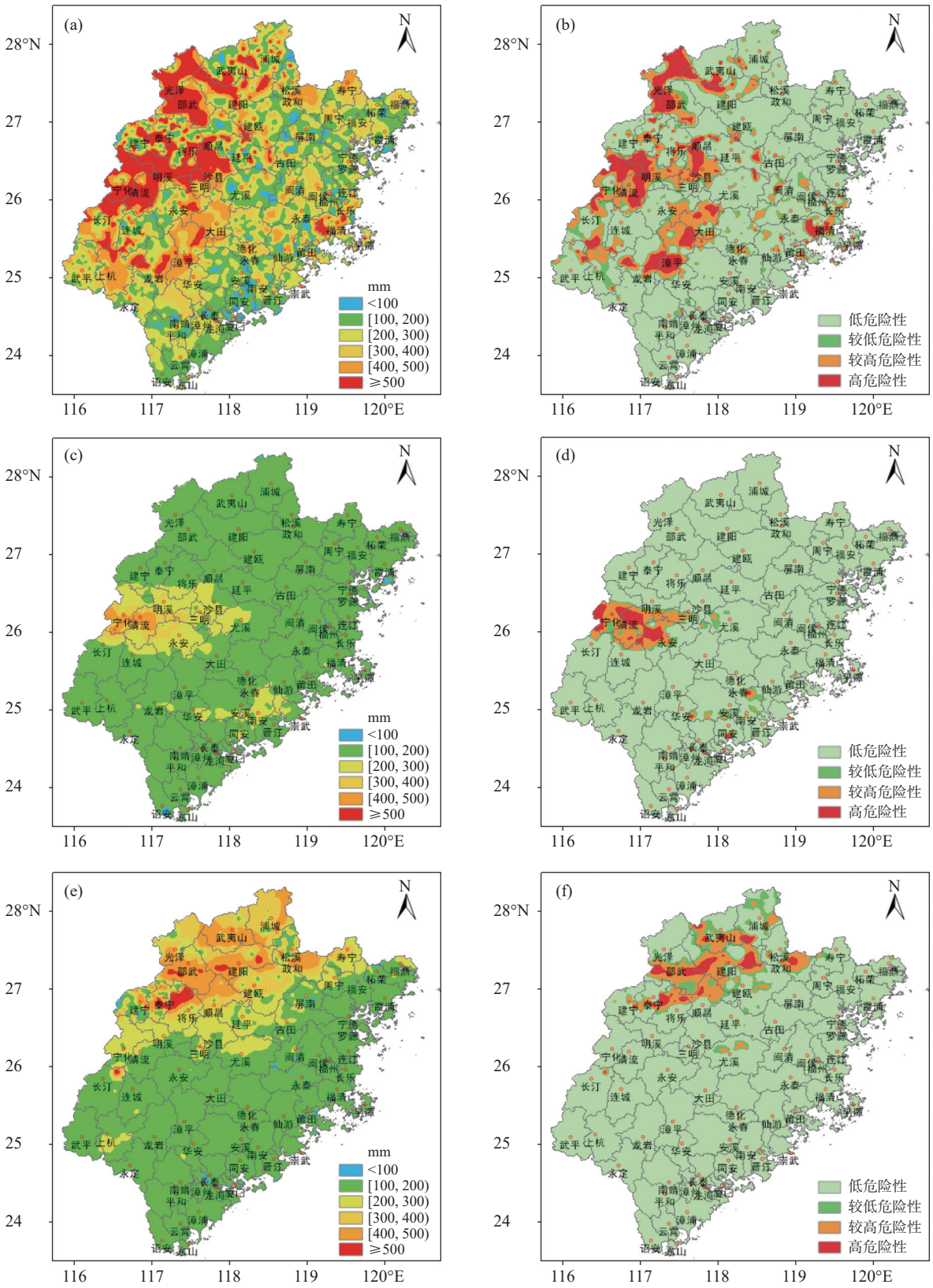

图 4 福建 2010 年 6 月 14—26 日 (a、b)、2015 年 5 月 19—20 日 (c、d) 和 2016 年 5 月 5—10 日 (e、f) 非台风暴雨过程累积降水量 (a、c、e) 和危险性 (b、d、f) 空间分布

Fig. 4 Distribution of the (a, c, e) accumulated rainfall and (b, d, f) hazard index of typical non-typhoon rainstorm events on (a, b) June14-26, 2010, (c, d) May 19-20, 2015, and (e, f) May 5-10, 2016, in Fujian Province

异显著, 危险性指数大值区 (图 4b、d、f) 要比降水量大值区 (图 4a、c、e) 更为集中, 危险性指数分布图更具决策指导意义。结合收集的灾情记录 (鹿世瑾和王岩, 2012; 王岩等, 2023), 3 次暴雨过程的重灾区均落在高危险区内, 表明本文非台风暴雨危险性评估模型构建具有合理性。

4 结论与讨论

本文利用 1981—2020 年福建省 66 个国家站及 2010—2020 年 1 038 个省级站降水量资料, 通过相关系数法客观赋权, 对比分析了 5 个季节 (早春、雨季、夏季、秋季和冬季) 非台风暴雨和 3 个时段 (早、一般和晚) 台风暴雨的致灾因子权重系数, 并采用综合指数法建模并评估和检验福建非台风暴雨致灾危险性, 得出主要结论如下:

(1) 不同季节非台风暴雨和不同时段台风暴雨的致灾因子权重系数的大小和差异, 一定程度上反映了致灾暴雨的成因与特点。强降水范围是各季节非台风暴雨和晚台风暴雨致灾的最主要因素, 短历时强降水是夏季暴雨、早台风暴雨和一般台风暴雨致灾的主要因素。

(2) 1981—2020 年福建省非台风暴雨过程的综合危险性以 2010 年 6 月 14—26 日暴雨过程最大。危险性指数空间分布东西高、中间低, 成片的较高和高危险区分布在西北内陆和东南沿海。

(3) 利用非台风暴雨致灾危险性评估模型对 3 次非台风暴雨过程进行精细化检验评估显示, 单次非台风暴雨过程的致灾危险性空间分布基本与实际灾情一致, 表明非台风暴雨危险性评估模型是合理的。

本文给出的非台风暴雨危险性评估模型也适用于正在发生或即将发生的非台风暴雨过程, 可以根据“前期雨量实况+预报降水量”或仅根据预报降水量开展暴雨危险性预估。但基于省级站开展精细化危险性评估时前期站数较少, 由于时空范围的致灾因子选取的是“站日数”, 在进行非台风暴雨过程危险性强度比对和历史排位时, 会对结果造成一定影响。后续可以考虑用“站日比例”, 或采用实况网格数据, 如 CLDAS (Chinese Land Dada Assimilation System) 降水数据等, 以减少评估结果受站点数量多少的影响。此外, 本文仅考虑了致灾因子危险性, 还可进一步结合孕灾环境、承灾体、防灾减灾能力等综合分析福建暴雨的风险性差异。

参考文献 (References):

陈兴伟,高路,陈莹,等.2019.台风与非台风暴雨洪水的分类研究[J].中国防汛抗旱,29(4):18−21. Chen X W, Gao L, Chen Y, et al. 2019. Study on the classification of typhoon and non-typhoon related rainstorm flood [J]. China Flood & Drought Management,29(4):18−21 (in Chinese). doi:10.16867/j.issn.1673−9264.2018251

范擎宇,何福红,马国斌,等.2016.基于过程降雨的暴雨灾害危险性评估—以松花江流域为例[J].地理与地理信息科学,32(2):100−140. Fan Q Y, He F H, Ma G B, et al. 2016. Risk assessment of rainstorm disaster based on process rainfall: a case study of Songhua River basin [J]. Geography and Geo-Information Science,32(2):100−140 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1672−0504.2016.02.019

福建省质量技术监督局.2014. DB35/T 1413-2014 登陆和影响福建热带气旋[S]. Fujian Provincial Administration of Quality and Technology Supervision. 2014. DB35/T 1413-2014 Tropical cyclone landing and impacting in Fujian [S] (in Chinese)

黄晓梅,程先富.2019.安徽省沿江地区暴雨洪涝灾害危险性评估[J].安徽师范大学学报 (自然科学版),42(2):151−158. Huang X M, Cheng X F. 2019. Evaluation about the flood hazard mainly caused by rainstorms in the area along the Yangtze River in Anhui Province [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science),42(2):151−158 (in Chinese). doi:10.14182/j.cnki.1001−2443.2019.02.009

吉中会,张蝶,于小兵.2022.淮河流域暴雨危险度时空特征分析[J].暴雨灾害,41(5):580−587. Ji Z H, Zhang D, Yu X B. 2022. Analysis of the spatiotemporal characteristics of the danger degree of the torrential rain in the Huaihe River basin [J]. Torrential Rain and Disasters, 41(5):580−587 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2021−132

李柏年.2007.模糊数学及其应用[M].合肥:合肥工业大学出版社:169. Li B N. 2007. Fuzzy Mathematics and Application [M]. Hefei:Hefei Unicersity of Technology Press:169 (in Chinese)

李乐乐,钞锦龙,赵德一,等.2023. 1957—2019 年山西省暴雨时空分布特征与暴雨灾害风险评估[J].干旱区地理,46(5):689−699. Li L L, Chao J L, Zhao D Y, et al. 2023. Spatiotemporal distribution characteristics of rainstorm and risk assessment of rainstorm disasters in Shanxi Province from 1957 to 2019 [J]. Arid Land Geography,46(5):689−699 (in Chinese). doi:10.12118/j.issn.1000−6060.2022.425

林蓉璇, 王鑫.2016.基于 ArcGIS 对广东省暴雨洪涝灾害风险的初步研究[J].广东水利水电,(5):41−45. Lin R X, Wang X. 2016. Preliminary study about Guangdong flood disaster risk based on ArcGIS [J]. Guangdong water resources and hydropower,(5):41−45 doi:10.3969/j.issn.1008−0112.2016.05.011

刘静, 管兆勇, 龚振彬,等.2016.近 30a 福建省前汛期极端降水事件特征及其成因[J].气象科学,36(1):28−35. Liu J, Guan Z Y, Gong Z B, et al. 2016. Characteristics and causes of extreme precipitation events over Fujian province during May and July in recent three decades [J]. Journal of the Meteorological Sciences,36(1):28−35. (in Chinese) doi:3969/2015jms.0082

刘家福,张柏.2015.暴雨洪灾风险评估研究进展[J].地理科学,35(3):346−351. Liu J F, Zhang B. 2015. Progress of rainstorm flood risk assessment [J]. Scientia Geographica Sinica,35(3):346−351 (in Chinese). doi:10.13249/j.cnki.sgs.2015.03.013

鹿世瑾,王岩.2012.福建气候 (第 2 版) [M].北京:气象出版社:488. Lu S J, Wang Y. 2012. The Climate of Fujian (The second edition) [M]. Beijing:China Meteorological Press:488 (in Chinese)

宋怡轩,郭洁,何永青,等.2023.基于 GIS 的渠江流域暴雨洪涝灾害风险评估与区划[J].高原山地气象研究,43(2):67−71. Song Y X, Guo J, He Y Q, et al. 2023. Risk Assessment of Rainstorm and Flood

Disasters in Qujiang River Basin Based on GIS [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,43(2):67−71 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.02.009

孙素琴,吴静,唐春燕,等.2024.基于智能网格预报的江西暴雨灾害风险预评估研究[J].灾害学,39(1):37−44. Sun S Q, Wu J, Tang C Y, et al. 2024. Research on risk pre-assessment of rainstorm disaster based on intelligent grid forecasting in Jiangxi Province [J]. Journal of Catastrophology,39(1):37−44 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−811X.2024.01.007

唐明秀,孙劭,朱秀芳,等.2023.中国不同气候区的暴雨危险性分析[J].自然灾害学报,32(2):151−160. Tang M X, Sun S, Zhu X F, et al. 2023. Hazard analysis of rainstorms in different climatic regions of China [J]. Journal of Natural Disasters,32(2):151−160 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2023.0217

王芬,洪国平,赵小芳,等.2023.暴雨过程致灾危险性评估方法研究—以孝感市“8.12”暴雨过程为例[J].暴雨灾害,42(6):724−730. Wang F, Hong G P, Zhao X F, et al. 2023. Research of rainstorm event disaster hazard assessment method-A case study of “8.12” rainstorm event in Xiaogan City [J]. Torrential Rain and Disaster,42(6):724−730 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−068

王妮,崔彩霞,张连成.2024.新疆新源县暴雨洪涝灾害风险区划[J].沙漠与绿洲气象,18(4):30−35. Wang N, Cui C X, Zhang L C. 2024. Risk zonation of heavy rainfall and flood disasters in Xinyuan County, Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(4):30−35 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.04.005

王岩,林昕,吴滨.2023.福建气候 (第 3 版) [M].福州:福建科学技术出版社:342-343. Wang Y, Lin X, Wu B. 2023. The Climate of Fujian (The third edition) [M]. Fuzhou:Fujian Science & Technology Press:342-343 (in Chinese)

谢五三,唐为安,王胜.2023.安徽省暴雨致灾危险性评估[J].暴雨灾害,42(3):353−359. Xie W S, Tang W A, Wang S. 2023. Disaster-causing hazard assessment of rainstorms in Anhui Province [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):353−359 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−118

杨秋珍,徐明,李军.2010.对气象致灾因子危险度诊断方法的探讨[J].气象学报,68(2):277−284. Yang Q Z, Xu M, Li J. 2010. A quantitative and objective approach to diagnosing the hazard degree of the meteorological disastrous factors [J]. Acta Meteorologica Sinica,68(2):277−284 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2010.028

赵铁松,王丽荣,郭恩亮,等.2020.基于 Copula 函数的降水事件危险性评估—以子牙河流域典型区为例[J].自然灾害学报,29(6):199−208. Zhao T S, Wang L R, Guo E L, et al. 2020. Hazard assessment of precipitation events based on copula function-take the typical area of Ziya River basin as an example [J]. Journal of Natural Disasters,29(6):199−208 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2020.0621

周晓,吴瑞雅,郭泽勇,等.2023.基于 C-Vine-Copula 函数的暴雨致灾危险性联合分布研究[J].气象与环境科学,46(5):104−111. Zhou X, Wu R Y, Guo Z Y, et al. 2023. Study on joint distribution of rainstorm disaster risk based on C-Vine-Copula function [J]. Meteorological and Environmental Sciences,46(5):104−111 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2023.05.013

周月华,彭涛,史瑞琴.2019.我国暴雨洪涝灾害风险评估研究进展[J].暴雨灾害,38(5):494−501. Zhou Y H, Peng T, Shi R Q. 2019. Research progress on risk assessment of heavy rainfall and flood disasters in China [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):494−501 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2019.05.011

庄瑶,鲍瑞娟,张容焱,等.2022.福建热带气旋灾害精细化危险性评估[J].应用气象学报,33(3):319−328. Zhuang Y, Bao R J, Zhang R Y, et al. 2022. Refined risk assessment of tropical cyclone disaster in Fujian [J]. Journal of Applied Meteorological Science,33(3):319−328 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20220306

Ikhvan A, Mera M. 2021. Case study: Significant factors in hazard and vulnerability assessments in flood mitigation in Padang City [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,708(1):012026. doi:10.1088/1755−1315/708/1/012026

Kelly M, Kuleshov Y. 2022. Flood hazard assessment and mapping: a case study from Australia’s Hawkesbury-Nepean catchment [J]. Sensors,22:6251. doi:10.3390/s22166251

(责任编辑 张 文)