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

青海东部暴雨过程特征及灾害风险评估方法研究

祁门紫仪 李万志 王振海 余迪 段丽君 高成忠

Study of rainstorm events characteristics and disaster risk assessment method in eastern Qinghai

QI Menziyi，LI Wanzhi，WANG Zhenhai，YU Di，DUAN Lijun，Gao Chengzhong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-168

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

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

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
Analysis of rainfall disaster-causing factors weight and hazard assessment of non-typhoon rainstorms in Fujian Province
暴雨灾害. 2025, 44(4): 526-534 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-129

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

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

基于城市暴雨内涝数学模型的福州内涝灾害风险评估
Risk assessment of rainstorm waterlogging disaster based on urban rainstorm waterlogging mathematical model in Fuzhou city
暴雨灾害. 2020, 39(1): 89-95 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.01.010

基于地形订正技术的安徽冰雹灾害风险区划
Risk zoning of hail disaster in Anhui Province based on terrain correction technology
暴雨灾害. 2023, 42(5): 606-612 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-021

关注微信公众号，获得更多资讯信息

祁门紫仪,李万志,王振海,等.2025.青海东部暴雨过程特征及灾害风险评估方法研究[J].暴雨灾害,44(5):612−620. QI Menziyi, LI Wanzhi, WANG Zhenhai, et al. 2025. Study of rainstorm events characteristics and disaster risk assessment method in eastern Qinghai [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):612−620 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−168

青海东部暴雨过程特征及灾害风险评估方法研究

祁门紫仪[1, 3], 李万志[1, 3], 王振海[2], 余迪[1], 段丽君[1], 高成忠[4]

(1. 青海省气候中心, 西宁 810001; 2. 青海省气象局科技与预报处, 西宁 810001; 3. 青海省温室气体及碳中和重点实验室, 西宁 810001; 4. 青海省格尔木市气象局, 格尔木 816099)

摘　要: 为评估青海东部人口稠密区的暴雨灾害风险程度, 提升暴雨灾害防御能力, 基于 1961—2021 年青海东部 25 个国家气象观测站逐日降雨资料, 首先采用百分位法确定单站极端日降水阈值, 并分析暴雨过程特征, 然后结合地理信息、遥感和社会经济数据, 利用暴雨灾害风险评估技术、熵权法和专家打分法构建暴雨灾害风险评估模型, 最后利用 2022—2024 年的暴雨过程实际灾情进行了检验。结果表明: (1) 1961—2021 年, 青海东部暴雨过程次数、日最大降雨量、过程累计降雨量、过程持续时间均呈增加趋势; (2) 青海东部地区暴雨过程强度指数总体呈增加趋势, 并在东北部以及南部存在两个高值区; (3) 青海东部暴雨灾害风险总体呈东北高、西部低的分布, 其中西宁市、大通县、湟源县、湟中区、门源县、互助县、乐都区、民和县为暴雨灾害的高风险区; (4) 检验结果显示, 发生灾情的乡镇 72.04% 出现在高和较高风险区, 仅 13.17% 出现在暴雨灾害风险较低和低风险区, 暴雨灾害风险评估模型较好地评估青海东部暴雨天气致灾的情况。

关键词: 暴雨灾害; 暴雨过程强度指数; 致灾危险性; 风险评估; 青海东部

中图法分类号: P426.616　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−168

Study of rainstorm events characteristics and disaster risk assessment method in eastern Qinghai

QI Menziyi[1, 3], LI Wanzhi[1, 3], WANG Zhenhai[2], YU Di[1], DUAN Lijun[1], Gao Chengzhong[4]

(1. *Qinghai Provincial Climate Center*, *Xining* 810001; 2. *Science and technology and forecasting Department of Qinghai Meteorological Bureau*, *Xining* 810001; 3. *Qinghai Provincial Key Laboratory of Greenhouse Gases and Carbon Neutrality*, *Xining* 810001; 4. *Golmud Meteorological Bureau of Qinghai Provincial*, *Golmud* 816099)

Abstract: This study aim to assess the risk of rainstorm disasters and enhance the ability to prevent rainstorm disasters in the densely-populated areas of eastern Qinghai. Based on the daily precipitation data of 25 national meteorological stations in eastern Qinghai , firstly, the extreme daily precipitation threshold was identified by the percentile method, the rainstorm event characteristics from 1961 to 2021 was analyzed. Then, the rainstorm disaster risk assessment model was constructed used the rainstorm disaster risk assessmen technology combined with geographic information, remote sensing and socioeconomic data, and model factor weight coefficient was caculated by entropy weight method. Finally, the actual disaster conditions of rainstorm events in 2022-2024 were used for evaluation and verification. The results are as follows. (1) From 1961 to 2021, the number of rainstorm events, daily maximum precipitation, events cumulative precipitation, and event duration in eastern Qinghai all showed an increasing trend. (2) The intensity index of rainstorm events in eastern Qinghai shows an overall increasing trend, with peaks occurring in the northeast and south. (3) The rainstorm disaster risks in eastern Qinghai is high in the northeast and low in the west. Among them, the Xining urban area, Datong County, Huangyuan County, Huangzhong District, Menyuan County, Huzhu County, Ledu District and Minhe County are high-risk areas. (4) 72.04% of the townships with disaster conditions appeared in high-risk areas, and only 13.17% appeared in low-risk areas of rainstorm disaster risks. The rainstorm disaster risk assessment model well reflected the disaster situation caused by rainstorms in eastern Qinghai.

Key words: rainstorm disasters; Rainstorm Process Intensity Index; hazard of disaster; risk assessment; eastern region of Qinghai Province

收稿日期: 2024−09−18; **定稿日期**: 2025−02−24

资助项目: 青海省科技厅重点研发与转化计划项目 (2023-SF-111); 青海省气象局科研项目 (QXZD2023-02, QXMS2025-04)

第一作者: 祁门紫仪, 主要从事气象灾害风险评估技术研究。E-mail: qimenziyi@163.com

通信作者: 李万志, 主要从事气象灾害风险评估技术研究。 E-mail: li_wanzhi@163.com

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

引　言

气候变暖背景下, 极端气候事件发生的频率、强度和持续时间都呈增加趋势, 这将放大和加剧未来气候灾害的风险 (张庆云等, 2008; Diffenbaugh et al., 2017), 对人类生活、农业生产、社会经济等方面产生较大影响 (Jiang et al., 2020; 闵爱荣等, 2025)。极端暴雨作为极端气候事件中对区域水文、生态及社会系统影响最为直接的类型之一, 其强度变化不仅是极端气候加剧的重要表现, 更是评估气候灾害风险需重点关注的核心要素, 因此对暴雨天气强度特征及其风险的深入研究对防灾减灾具有重要意义。

学者们针对暴雨天气强度综合评估做了许多研究工作, 如王莉萍等 (2015) 针对中国 4 个暴雨灾害敏感区, 通过确定降雨过程指标因子, 构建了降雨过程综合强度评估模型和强度等级划分标准。邹燕等 (2014)通过选取福建省区域性降雨过程指标因子, 构建了区域性暴雨过程的综合强度评估模型及等级划分标准。然而, 暴雨天气强度仅反映了其致灾潜力的内在属性, 要全面研判其可能造成的实际影响, 还需从致灾因子、孕灾环境、承灾体等多因子的耦合视角出发, 将强度分析延伸至灾害风险评估层面 (王妮等, 2024)。周月华等 (2019) 研究指出, 暴雨灾害风险评估是在暴雨发生强度的基础上, 进一步结合外在环境和承灾体特征进行定量的评定和估计。针对暴雨灾害风险评估方法, IPCC 第五次评估报告 (AR5) 中给出了风险评估公式 (IPCC, 2014), 指出风险评估基础和先决条件是致灾因子的危险性、承灾体的脆弱性和暴露度, 这也与国内外学者研究得到的结论一致 (Kim and Marcouiller, 2017)。基于 AR5 给出的风险评估公式, 学者们还结合云模型 (万昔超等, 2017)、AHP-熵权法 (谢捷等, 2022) 或者多层加权主成分分析 (Multi Layer Weighted Principal Component Analysis, MLWPCA) (Chen et al., 2020) 等方法, 完成了重庆市、天津市静海区、中国西南地区以及渠江流域等地区的暴雨灾害风险评估 (宋怡轩等, 2023; 谢涛等, 2024), 验证了该公式的适用性。但不同区域的暴雨灾害风险表现及影响因素存在显著不同, 仍然需要针对特定区域的暴雨天气特征及灾害风险因素进行系统性研究。

青海东部是青海人口、城镇、经济活动最为密集的区域, 暴雨灾害发生次数多, 防灾能力较差, 严重影响当地群众生命财产安全 (Li et al., 2022)。研究显示, 进入 21 世纪后, 青海地区暖湿季节的降雨向日数更多、强度更强、极值更大、时间更集中的方向发展 (冯晓莉等, 2020), 降雨强度呈增加趋势, 暴雨致灾风险也相应增大。例如, 2022 年青海东部相继发生“8.18 大通山洪灾害”和“9.01 互助滑坡灾害”, 造成近 30 人伤亡, 2024 年 9 月 3 日至 4 日该地区又出现了有气象数据以来最强降雨过程, 造成数万人员撤离。针对该地区暴雨灾害风险评估研究工作, 李万志等 (2019)、Li 等 (2022) 基于不同量级降水日数与承灾体暴露度分析指出, 青海东部为暴雨灾害高风险区; 未来该地区承灾体暴露度和暴雨灾害致灾危险性均为青海省增加最为显著的地区。因此, 在全球气候变暖背景下, 继续认识和揭示青海东部暴雨天气特征, 评估其可能引发的灾害风险非常有意义。

目前, 针对青海东部暴雨灾害过程分析及风险评估方面的工作多从降水量级 (李万志等, 2019) 方面进行, 缺少对暴雨过程中的日最大降水量、累计降水量和持续时间等指标因子的考虑, 本文利用 1961—2021 年青海省东部 25 个国家气象观测站 (以下简称国家站) 的逐日降水观测资料, 采用百分位法确定极端降水阈值, 分析暴雨过程天气特征, 然后结合地理信息、遥感和社会经济数据, 利用暴雨灾害风险评估技术、熵权法和专家打分法构建青海东部暴雨灾害风险评估模型, 最后基于 2022—2024 年实际暴雨灾情对风险评估结果进行了检验, 研究结果可更全面评价青海东部地区暴雨致灾风险水平, 为地方政府有效开展灾害防御工作提供科学决策依据。

1　资料、研究区与方法介绍

1.1　资料介绍

本文使用的降雨资料来源于青海省气象信息中心, 包括 1961—2021 年青海东部 25 个国家站的逐日降雨观测数据, 用于设置暴雨过程强度指标因子, 计算暴雨过程强度。

地理信息数据采用 2021 年国家信息中心下发的 1∶25 万的境界、水系、居民点及 90 m 分辨率的数字高程模拟 DEM (Digital Elevation Model) 等基础地理信息数据, 用于计算孕灾环境影响系数。

所用的遥感数据为研究区范围内的 920 景 MODIS 数据 (MOD13Q1), 从中提取该数据的植被指数波段 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 用于计算孕灾环境影响系数。

社会经济数据 (包括人口及 GDP 数据) 来源于中国科学院地理科学与资源研究院出版的“2019 年中国人口、GDP 空间分布公里网格数据集”, 该数据集人口、GDP 的计算综合考虑土地利用类型、夜间灯光亮度、居民点密度及其与 GDP 的空间互动规律

等信息, 通过空间插值生成的 1 km×1 km 空间格网数据, 用于计算承灾体暴露度。

耕地数据基于 Landsat 8 遥感影像, 经过人工目视解译后, 生成 2020 年土地利用类型数据, 并提取了土地利用类型数据中的耕地类型, 该数据空间分辨率为 1 km×1 km, 用于计算承灾体暴露度。

灾情数据来自中国气象局灾情直报系统中的气象灾情数据、气象灾害综合风险普查得到的灾情记录以及灾情公报、气象灾害大典、地方志中的相关灾情数据等, 时间范围为 2022—2024 年, 用于对风险评估结果进行验证。

1.2 研究区介绍

青海东部共计 23 个市 (县、区), 国家站 25 个, 除平安区外, 均有 60 a 以上的长年代气象观测资料。该地区属于高原大陆性气候, 年平均气温为 4.0 ℃, 年降水量为 419.2 mm 。《青海省气象灾害统计年鉴》(青海省统计局, 2021) 指出, 2020 年, 青海东部主要城市中西宁市常驻人口及生产总值占比分别为 41.7% 和 45.7%, 海东市常驻人口和生产总值占比分别为 22.9% 和 17.1%, 累计占比分别达到 64.6% 和 62.8%, 是青海省人口和经济的集中区, 同时该地区暴雨灾害发生次数多、影响大, 所以本研究以青海东部作为研究对象 (图 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 暴雨相关定义

采用百分位法计算青海省极端日降雨阈值, 99% 分位数的日极端降雨阈值为 26.3 mm。因此本文在识别暴雨过程时, 在此基础上进一步参考青海省地方标准《气象灾害分级指标》(青海省市场监管局, 2018), 规定日降雨量≥25 mm 时即达到暴雨标准, 将单站日降雨量 ≥10 mm, 持续天数 ≥1 d, 且过程期间出现 ≥25 mm的降水过程称为暴雨过程 (Li et al., 2022)。

1.3.2 归一化方法

计算暴雨过程强度时, 首先要对各评价指标进行归一化处理 (Rupp et al., 2013)。正向指标计算公式为

$$X_{ij}=0.5+0.5\times\frac{A_{ij}-A_i^{\min}}{A_i^{\max}-A_i^{\min}} \tag{1}$$

负向指标计算公式为

$$X_{ij}=1-0.5\times\frac{A_{ij}-A_i^{\min}}{A_i^{\max}-A_i^{\min}} \tag{2}$$

式 (1)、(2) 中, X_{ij} 为 j 站点第 i 个指标的归一化值; A_{ij} 为 j 站点第 i 个指标值; $A_i^{\min}$ 和 $A_i^{\max}$ 分别为第 i 个指标值中的最小值和最大值。

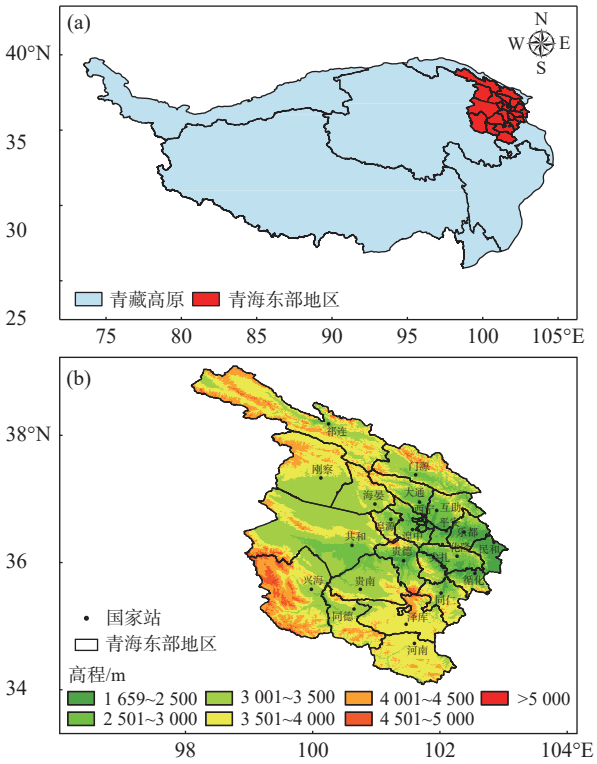


图 1 青海东部地理位置 (a) 及国家站 (黑点) 高程(b, 色斑) 分布图

Fig. 1 (a) Geographical location and (b) distribution map of national stations (black dots) and elevation (shaded) in eastern Qinghai

1.3.3 暴雨灾害风险评估技术

本文利用暴雨灾害风险评估技术构建暴雨灾害风险评估模型首先选取风险评价指标及各指标因子, 建立风险评价指标体系, 然后计算指标因子权重系数优化评估体系, 最终确定暴雨灾害风险指数 (周月华等, 2019)。本文进行暴雨灾害风险评估时考虑致灾危险性和承灾体暴露度。致灾危险性由暴雨过程强度和孕灾环境影响系数两部分组成。暴雨过程强度、孕灾环境影响系数和承灾体暴露度计算暴雨灾害风险时采用加权综合评价法 (谢五三等, 2023), 通过累加当年所有暴雨过程的强度指数, 得到年暴雨过程强度指数。加权综合评价法计算公式为

$$E_{\mathrm{VI}}=\sum_{i=1}^{n}W_i\times D_{ij} \tag{3}$$

式 (3) 中 E_{VI} 为指标因子加权求和后的值; W_i 为评价指标 i 的权重; D_{ij} 为评价指标 i 中指标因子 j 的归一化值; n 为评价指标个数。各评价指标、指标因子及其权重见表 1。

建立的暴雨灾害风险评估模型如下

$$M_{\mathrm{DRI}}=\left(E_{\mathrm{V}}^{W_{\mathrm{e}}}\right)\left(V_{\mathrm{I}}^{W_{\mathrm{h}}}\right) \tag{4}$$

式 (4) 中 M_{DRI} 为暴雨灾害风险指数, E_{V}、V_{I} 分别表示致灾危险性和承灾体暴露度指数; W_{e}、W_{h} 是致灾

表 1 暴雨灾害风险评价指标体系及权重分配

Table 1 Storm water disaster risk assessment index system and factor weights allocation

一级指标	二级指标	三级指标	四级指标
暴雨灾害风险A	致灾危险性 B_1(0.5)	暴雨过程强度 C_1(0.6)	日最大降水量 D_1(0.19)
			累计降水量 D_2(0.39)
			过程持续时间 D_3(0.42)
		孕灾环境影响系数 C_2(0.4)	地形起伏度 D_4(0.27)
			坡度 D_5(0.27)
			河网密度 D_6(0.15)
			距水体远近 D_7(0.15)
			植被覆盖度 D_8(0.16)
	承灾体暴露度 B_2(0.5)		人口密度 C_3(0.4)
			GDP C_4(0.4)
			地均耕地面积 C_5(0.2)

注: 暴雨过程强度评价指标因子权重采用熵权法计算(Delgado and Romero, 2016), 承灾体暴露度和孕灾环境影响系数的指标因子权重均采用专家打分法给出(顾荣直等, 2024)

危险性和承灾体暴露度指数的权重。

最后, 利用自然断点法将青海东部暴雨灾害风险划分为 5 个等级, 分别为: 低风险、较低风险、中风险、较高风险和高风险。

1.3.4 熵权法

熵权法是一种基于信息熵原理的权重计算方法, 可避免主观因素对评价权重的影响 (刘媛媛等, 2020)。本文使用熵权法对暴雨过程强度进行量化评估。首先针对暴雨过程的累计降水量、日最大降水量、持续时间等 m 个评价指标(指标研究区的像元数为 n) 构建指标矩阵 r_{ij}; 然后对各指标进行标准化处理后计算各指标特征比值 P_{ij}, 根据特征比值计算各评价指标的信息熵, 熵值越小表明该指标在区分暴雨过程强度差异中的作用越显著; 最后确定各指标信息熵对应的权重值。计算方法如下

$$P_{ij}=\frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} r_{ij}} \tag{5}$$

根据标特征比值 P_{ij} 和像元数 n 计算第 j 个指标的信息熵 S_j, 当标特征比值 P_{ij}=0 时, 令 $P_{ij}\ln P_{ij}$=0, 计算得出指标的信息熵, 熵值计算方法如下

$$S_j=-\frac{1}{\ln n}\sum_{j=1}^{n} P_{ij}\ln P_{ij} \tag{6}$$

根据指标信息熵计算出对应的权重值 W_j, 其中 $0\leqslant W_j\leqslant 1$, 计算方法如下

$$w_j=\frac{1-S_j}{\sum_{j=1}^{m}(1-S_j)} \tag{7}$$

最后, 根据每个指标的熵权重即可计算出暴雨灾害风险指数。

1.3.5 专家打分法

本文评估按照 9 位专家凭借自己的经验对孕灾环境影响系数、承灾体暴露度的各指标因子进行打分, 根据打分结果对指标进行筛选, 并按照表 2 中步骤确定各指标因子权重。

表 2 专家打分法确定权重步骤

Table 2 Steps for determining weights using Analytic Hierarchy Process

步骤	具体内容
(1)建立递阶层次结构	构造包含目标层、指标层和子指标层的3层结构, 目标层是确定暴雨灾害风险指数, 指标层包含敏感性、易损性和危险性3方面, 指标层有分别包含各影响因子指标, 从而确定风险评价指标体系。
(2)通过比较构造判别矩阵$\boldsymbol{A}$	采用 1~9 标度方法, 对各层指标的两两元素相对重要性程度进行量化, 构造两者比较判断矩阵$\boldsymbol{A}$。
(3)计算权重W	比较判断矩阵$\boldsymbol{A}$的特征根$AW=\lambda_{max}W$的解, 经过归一化后为统一层次相应因子的重要性权重值。
(4)进行一致性检验	一致性指标$C_I=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$, 当平均随机性$R_I$指标比率$C_R=\frac{C_I}{R_I}$小于0.1时, 则判断矩阵$\boldsymbol{A}$的一致性为合理; 若$C_R\geqslant 0.1$, 则说明判断矩阵$\boldsymbol{A}$不合理。

2 青海东部暴雨过程特征分析

基于识别出的青海东部暴雨过程，分析暴雨过程发生次数、过程持续天数、过程日最大降水量、过程累计降水量的时空特征，并计算暴雨过程强度指数，得到暴雨过程强度分布。

2.1 暴雨过程指标因子的时间变化特征

1961—2021 年，青海东部年均暴雨过程次数为 26.5 站次，呈增加趋势，增加速率为 2.1 站次·(10 a)$^{-1}$，20 世纪 60 至 80 年代暴雨过程次数相对较少，90 年代开始增多，21 世纪 10 年代为暴雨过程次数最多的时段，年均 34 站次，其中 2018 年为暴雨过程最多的年份，达 68 站次 (图 2a)。

暴雨过程的平均日最大降水量、累计降水量、持续时间分别为 35.3 mm、39.5 mm、1.3 d，均呈增加趋势，增加速率分别为 2.3 mm·(10 a)$^{-1}$、3.0 mm·(10 a)$^{-1}$、0.1 d·(10 a)$^{-1}$。其中日最大降水量呈先减少后增加的变化趋势，20 世纪 80 年代最小，之后持续增加，到 20 世纪 10 年代达到最大 (图 2b)；过程累计降水量和过程持续天数呈波动性变化，最少时段和最多时段与日最大降水量相同，分别出现在 20 世纪 80 年代和 21 世纪 10 年代 (图 2c、d)。

暴雨过程的平均日最大降水量、累计降水量、持续时间分别为 35.3 mm、39.5 mm、1.3 d，均呈增加趋势，增加速率分别为 2.3 mm·(10 a)$^{-1}$、3.0 mm·(10 a)$^{-1}$、0.1 d·(10 a)$^{-1}$，和暴雨过程次数变化趋势相似，均呈先减少后增加的变化趋势，20 世纪 80 年代最小，然后持续增加，到 20 世纪 10 年代达到最大 (图 2b、c、d)。

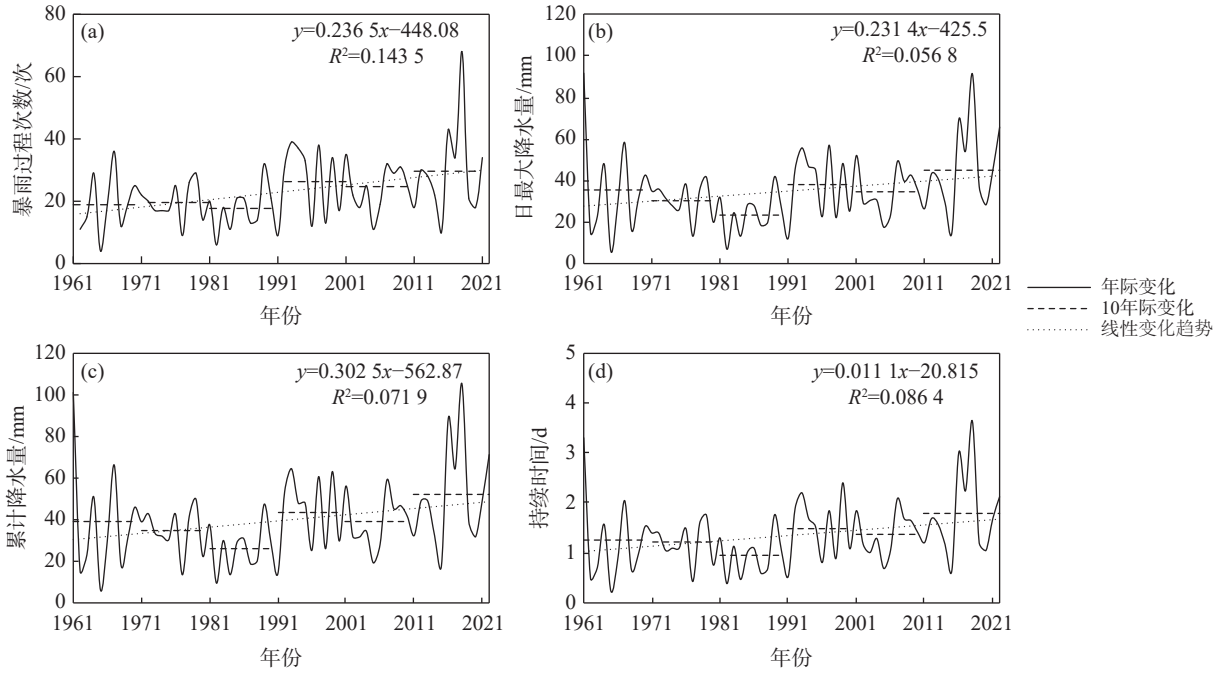


图 2 1961—2021 年青海东部暴雨过程次数 (a)、过程日最大降水量 (b)、过程累计降水量 (c)、过程持续时间 (d) 年变化

Fig. 2 Annual variation of (a) the number of heavy rainfall processes, (b) process daily maximum precipitation, (c) process cumulative precipitation, and (d) process duration days in eastern Qinghai from 1961 to 2021

2.2 暴雨过程指标因子的空间变化特征

青海东部暴雨过程次数总体呈东多西少趋势，其中西宁、湟中、大通、互助以及河南县暴雨过程次数均在 50 次以上，湟中最多，达 69 次 (图 3a)。暴雨过程的平均日最大降水量分布趋势与暴雨过程次数基本一致，高值区主要分布在大通、西宁、民和、互助、湟中等地，其中大通平均日降水量最大，为 41.3 mm (图 3b)；暴雨过程累计降水量和过程持续时间分布特征基本一致，东北部和南部高，其他地区低，其中互助、刚察、贵南、大通、湟中、河南累计降水量都在 80 mm 以上 (图 3c)，互助、大通、刚察、湟中、贵南、河南平均过程持续时间都在 2.5 d 以上 (图 3d)。

2.3 暴雨过程强度

按照公式 (3) 计算 1961—2021 年青海东部暴雨过程强度指数，结果显示总体呈增加趋势。在年代变化上暴雨过程强度总体呈先降后增趋势，20 世纪 80 年代暴雨过程强度达到最低值后开始增加，到 21 世纪 10 年代达到最大值，其中 2018 年为暴雨过程强度最高的年份 (图 4a)。空间分布上，暴雨过程强度在东北部和南部存在两个高值中心，站点包括大通、湟中、互助、门源、刚察、贵南、河南、泽库等地 (图 4b)。

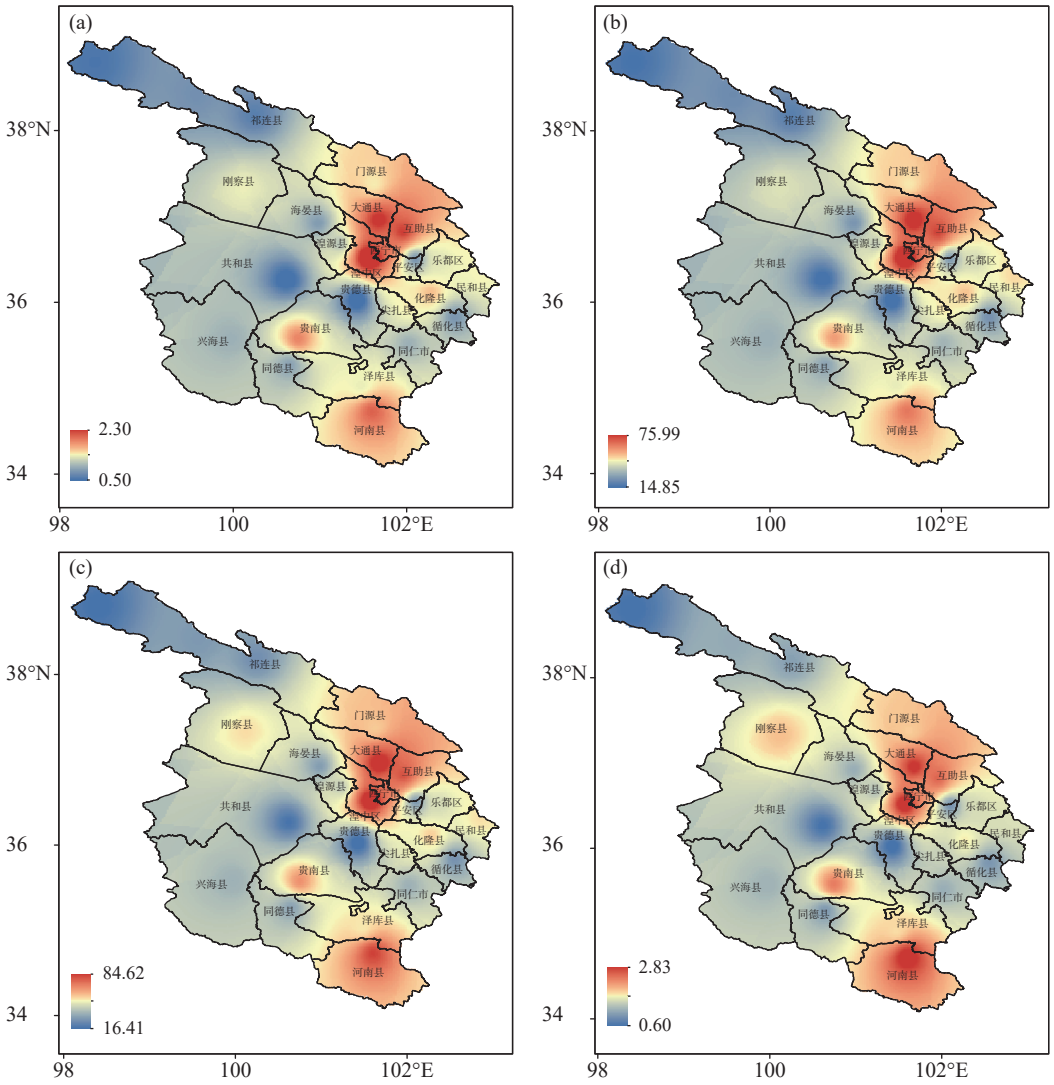


图 3 1961—2021 年青海东部暴雨过程次数 (a, 单位: 次)、日最大降水量 (b, 单位: mm)、累计降水量 (c, 单位: mm) 及过程持续时间 (d, 单位: d) 分布图

Fig. 3 Distribution of (a, unit: number) the number of heavy rainfall processes, (b, unit: mm) maximum daily precipitation, (c, unit: mm) accumulated precipitation and (d, unit: day) process duration in eastern Qinghai from 1961 to 2021

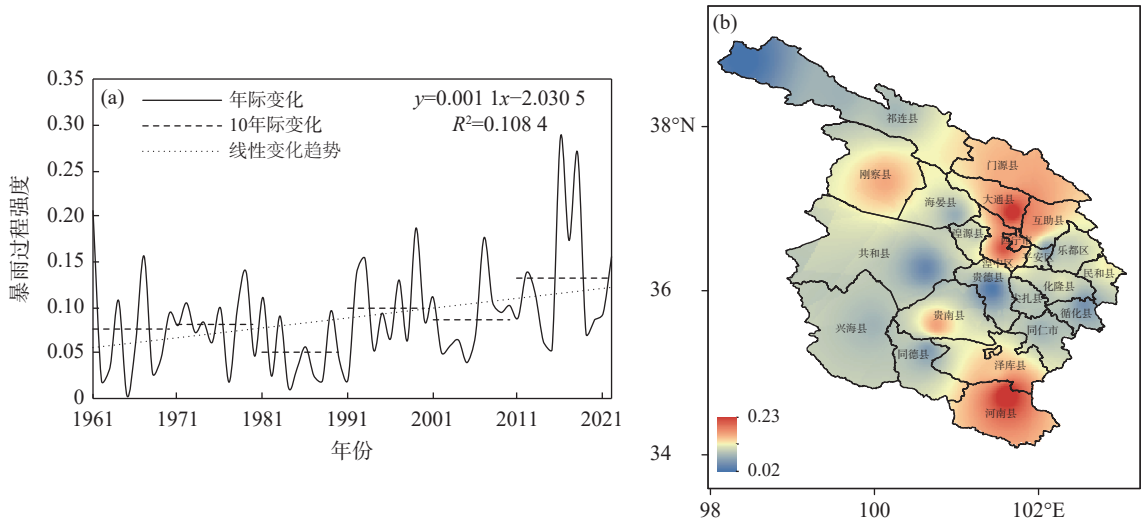


图 4 1961—2021 年青海东部暴雨过程强度年变化 (a) 和空间分布 (b)

Fig. 4 (a) Interannual variation and (b) spatial distribution of intensity of heavy rainfall processes index in eastern Qinghai from 1961 to 2021

3 青海东部暴雨灾害风险评估及检验

本节首先分别分析暴雨致灾危险性三个指标的分布特征，然后基于历史灾情实况对暴雨致灾危险性指数分布进行检验。

3.1 暴雨灾害风险评估

暴雨灾害风险评估考虑致灾危险性和承灾体暴露度，致灾危险性由暴雨过程强度和孕灾环境影响系数两部分组成，暴雨过程强度为熵权法计算获得，孕灾环境影响系数和承载体暴露度由专家打分法得到。从青海东部暴雨灾害孕灾环境敏感性等级分布 (图 5a) 可见，孕灾环境高、较高敏感区主要集中在门源、刚察、海晏、大通、湟源、湟中、西宁、互助、民和、化隆、循化、尖扎、同仁、贵德、同德、河南、泽库的部分地区。基于暴雨过程强度和孕灾环境影响系数计算暴雨致灾危险性指数，绘制致灾危险性分布图 (图 5b) 可见，暴雨致灾危险性呈东高西低的分布，其中门源、大通、西宁、湟中、互助、河南、泽库的部分地区为暴雨致灾高危险区，刚察、海晏、湟源、平安、乐都、民和、化隆、循化、尖扎、同仁、贵南为致灾较高危险区，其他地区为致灾的中危险区和低危险区。从青海东部暴雨灾害承灾体暴露度分布 (图 5c) 可见，承灾体高和较高暴露区主要在东部地区，包括西宁、大通、湟源、湟中、互助、化隆、乐都、循化、民和、平安、尖扎、门源等地，其余地区为承灾体脆弱性较低和低等级区。

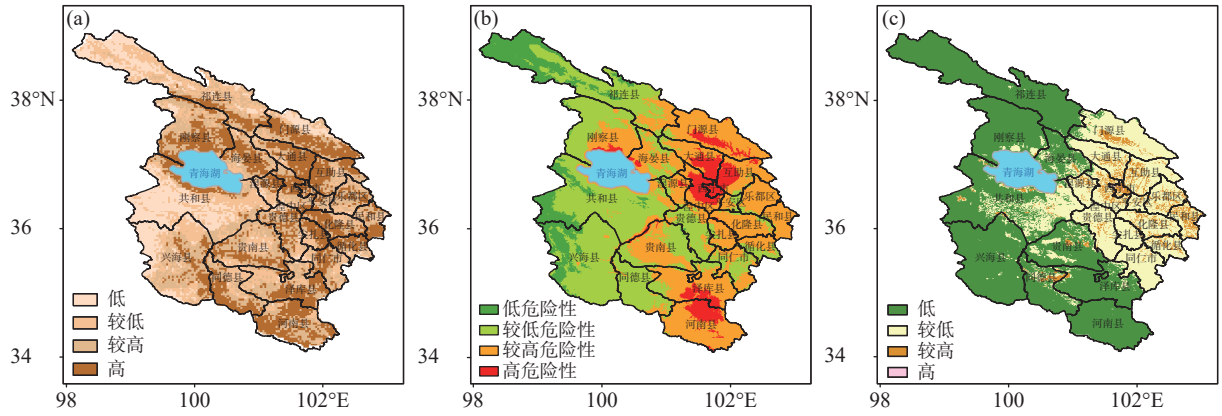


图 5 1961—2021 青海东部暴雨灾害孕灾环境敏感性 (a)、致灾危险性 (b)、承灾体暴露度 (c) 等级分布

Fig. 5 Level distribution map of (a) environmental sensitivity and (b) disaster risk and (c) exposure degree of disaster bearing body of rainstorm Disaster in Eastern Qinghai from 1961 to 2021

3.2 暴雨灾害风险检验

通过暴雨致灾危险性结合承灾体的暴露度，计算青海东部暴雨灾害风险指数，绘制暴雨灾害风险区划图 (图 6) 可见，青海东部暴雨灾害风险总体呈东北部高、西部低的分布形势，其中西宁、大通、湟源、湟中、门源、互助、乐都、民和的部分地区为暴雨灾害的高风险区，主要由于该区域致灾危险性、承灾体暴露度均较高；刚察、尖扎、化隆、平安、循化、贵南、同德的部分地区为暴雨灾害的较高风险区，这些区域主要由于致灾危险性较高或承灾体暴露度较高造成的；其他地区为暴雨灾害的中风险、较低风险和低风险区，多由于这些区域本身致灾危险性或承灾体暴露度较低造成的。

通过在风险图中叠加近 3 a (2022—2024 年) 发生暴雨灾害的乡镇数 (图 6) 还可发现，40.32% 发生灾情的乡镇出现在暴雨灾害风险的高风险区，31.72% 发生在暴雨灾害风险的较高风险区，高和较高风险区出现灾情的乡镇数量占比达 75.13%，14.59% 发生

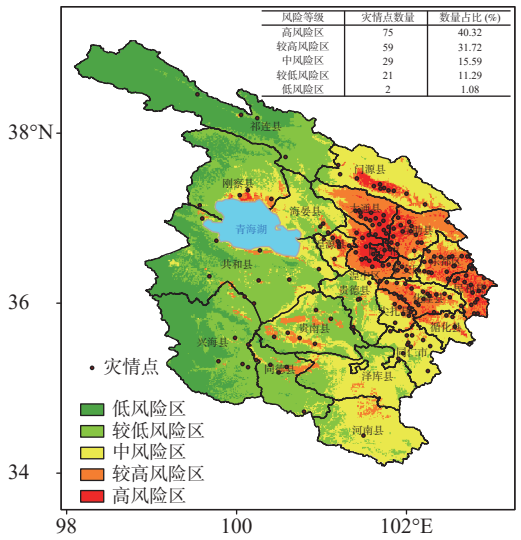


图 6 青海东部暴雨灾害风险区划 (色斑) 和 2022—2024 年暴雨灾害灾情点 (黑点) 分布

Fig. 6 District division of the risk (shadeds) and the locations (the black dots) between 2022-2024 of heavy rainfall disasters in the eastern part of Qinghai

在暴雨灾害风险的中风险区, 9.73% 发生灾害暴雨灾害风险的较低风险区, 发生在低风险区的仅占 0.54%。由此看出, 暴雨灾害风险评估结果可较好地反映了青海东部暴雨灾害灾情发生情况。

4 结论与讨论

本文基于 1961—2021 年青海东部 25 个国家站逐日降雨资料, 首先采用百分位法确定单站极端日降水阈值, 并分析暴雨过程特征, 然后结合地理信息、遥感和社会经济数据, 利用暴雨灾害风险评估技术构建暴雨灾害风险评估模型, 最后利用 2022—2024 年的暴雨过程实际灾情进行了检验。得出如下结论:

(1) 1961—2021 年, 青海东部年均暴雨过程次数为 26.5 次, 呈增加趋势, 增加速率为 2.1 站次·(10 a)$^{-1}$; 年均过程日最大降水量为 35.3 mm, 增加速率为 2.3 mm·(10 a)$^{-1}$; 年均过程累计降水量为39.5 mm, 增加速率为 3.0 mm·(10 a)$^{-1}$; 年均过程持续时间为 1.3 d, 增加速率为 0.1 d·(10 a)$^{-1}$。

(2) 1961—2021 年青海东部暴雨过程强度总体呈增加趋势, 21 世纪 10 年代达到最大值。暴雨过程强度指数在东北部和南部存在两个高值中心, 站点包括大通、湟中、互助、民和、刚察、贵南、河南。

(3) 青海东部暴雨致灾危险性总体呈东高西低的分布, 其中大通、西宁、湟源、湟中、尖扎、贵南、河南的部分地区为致灾的高危险区; 大通、湟源、湟中、互助、平安、化隆、乐都、循化、民和等地为承灾体高暴露区。

(4) 青海东部暴雨灾害风险总体呈东北高、西部低的分布, 西宁、大通、湟源、湟中的部分地区为暴雨灾害高风险区, 贵南、兴海、同德、民和、乐都、尖扎、化隆、刚察的部分地区为较高风险区, 其他地区为中风险、较低风险和低风险区。

(5) 暴雨灾害风险分布叠加近 3 a 暴雨灾害的乡镇数量可见, 40.32% 发生灾情的乡镇出现在暴雨灾害的高风险区, 31.72% 发生在较高风险区, 高和较高风险区出现灾情的乡镇数量占比达 72.04%。

随着全球气候持续增暖, 降水的极端性不断增强, 各地致灾因子的发生频率和强度也会随之改变, 加上社会经济发展造成承灾体暴露度不断加大, 未来需对青海东部地区评估指标因子进一步更新和完善, 通过增加数据类别和提高数据精度对已有的技术方法进行改进, 并通过跟踪检验对评估模型进行优化, 以提升暴雨灾害风险评估结果的准确性。

参考文献 (References):

冯晓莉,申红艳,李万志,等.2020. 1961-2017 年青藏高原暖湿季节极端降水时空变化特征[J].高原气象,39(4):694−705. Feng X L, Shen H Y, Li W Z, et al. 2020. Spatiotemporal changes for extreme precipitation in wet season over the Qinghai-Tibetan plateau and the surroundings during 1961-2017 [J]. Plateau Meteorology,39(4):694−705 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2020.00029

顾荣直,田心如,禹梁玉,等.2024.江苏寒潮天气过程风险预评估方法研究[J].气象学报,82(2):247−256. Gu R Z, Tian X R, Yu L Y, et al. 2024. Research on risk preassessment method for cold wave weather process in Jiangsu province [J]. Acta Meteorologica Sinica,82(2):247−256 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2024.20230085

李万志,余迪,冯晓莉,等.2019.基于风险度的青海省暴雨洪涝灾害风险评估[J].冰川冻土,41(3):680−688. Li W Z, Yu D, Feng X L, et al. 2019. Risk assessment of rainstorm and flood disasters based on the hazard grades/indices in Qinghai Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,41(3):680−688 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0240.2019.0033

刘媛媛,王绍强,王小博,等.2020.基于 AHP_熵权法的孟印缅地区洪水灾害风险评估[J].地理研究,39(8):1892−1906. Liu Y Y, Wang S Q, Wang X B, et al. 2020. Flood risk assessment in Bangladesh, India and Myanmar based on the AHP weight method and entropy weight method [J]. Geographical Research,39(8):1892−1906 (in Chinese). doi:10.11821/dlyj020190679

闵爱荣,张文,王晓芳,等.2025. 2022 年 4-10 月我国主要暴雨天气过程简述[J].暴雨灾害,44(2):264−276. Min A R, Zhang W, Wang X F, et al. 2025. Major heavy rainfall events in China from April to October in 2022 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):264−276 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−223

气象灾害分级指标[S]. DB63/T372-2018. 2018. Classification index of meteorological disasters [S]. DB63/T372-2018.2018.

青海省统计局. 2021. 青海统计年鉴-2020[M]. 北京:中国统计出版社有限公司. Qinghai Provincial Bureau of Statistics. 2020. Qinghai Statistical Yearbook-2020 [M]. Beijin:China Statistical Publishing House Company, Limited.

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 rive basin based on GIS [J]. Plateau and Mountain Research,43(2):67−71 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2023.02.009

万昔超,殷伟量,孙鹏,等.2017.基于云模型的暴雨洪涝灾害风险分区评价[J].自然灾害学报,26(4):77−83. Wan X C, Yin W L, Sun P, et al. 2017. Risk division assessment of rainstorm-flood disasters based on cloud model [J]. Journal of Natural Disasters,26(4):77−83 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2017.0409

王莉萍,王秀荣,王维国.2015.中国区域降水过程综合强度评估方法研究及应用[J].自然灾害学报,24(2):186−194. Wang L P, Wang X R, Wang W G. 2015. Research and application of comprehensive intensity evaluation method for regional rainfall process in China [J]. Journal of Natural Disasters,24(2):186−194 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2015.0224

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

谢捷,刘玮,徐月顺,等.2022.基于 AHP-熵权法的西宁地区汛期暴雨灾害风险评估[J].自然灾害学报,31(3):60−74. Xie J, Liu W, Xu Y S, et al. 2022. Rainstorm disaster risk assessment in Xining area in rainy season based on the AHP weight method and entropy weight method [J]. Journal of Natural Disasters,31(3):60−74 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2022.0306

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

谢涛,余亮,周浩,等.2024.基于极端梯度提升算法的重庆市暴雨灾害风险评估[J].气象科学,44(6):1140−1153. Xie T, Yu L, Zhou H, et al. 2024. Evaluation of dual-doppler radar wind retrieval methods based on observation system simulation experiment [J]. Journal of the Meteorological Sciences,44(6):1140−1153 (in Chinese). doi:10.12306/2024jms.0020

张庆云,陶诗言,彭京备.2008.我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展[J].大气科学,32(4):815−825. Zhang Q Y, Tao S Y, Peng J B. 2008. The studies of meteorological disasters over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,32(4):815−825 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2008.04.10

邹燕,叶殿秀,林毅,等.2014.福建区域性暴雨过程综合强度定量化评估方法[J].应用气象学报,25(3):360−364. Zou Y, Ye D X, Lin Y, et al. 2014. A quantitative method for assessment of regional heavy rainfall intensity [J]. Journal of Applied Meteorological Science,25(3):360−364 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001−7313.2014.03.014

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

Chen J, Ji J, Wang H, et al. 2020. Risk assessment of urban rainstorm disaster based on multi-layer weighted principal component analysis: a case study of Nanjing, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,17(15):5523. doi:10.3390/ijerph17155523

Delgado A, Romero I. 2016. Environmental conflict analysis using an integrated grey clustering and entropy-weight method: A case study of a mining project in Peru [J]. Environmental Modelling & Software,77(12):108−121. doi:10.1016/j.envsoft.2015.12.011

Diffenbaugh N S, Singh D, Mankin J S, et al. 2017. Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,114(19):4881−4886. doi:10.1073/pnas.1618082114

IPCC Working Group II. 2014. The contribution to the IPCC's fifth assessment report(WG II AR5) [R]. Cambridge:Cambridge University Press

Jiang T, Su B, Huang J, et al. 2020. Each 0.5℃ of warming increases annual flood losses in china by more than 60 billion USD [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,101(8):E1464−E1474. doi:10.1175/BAMS−D−19−0182.1

Kim H, Marcouiller D W. 2017. Mitigating flood risk and enhancing community resilience to natural disasters: plan quality matters [J]. Environmental Hazards,17(5):1−21. doi:10.1080/17477891.2017.1407743

Li W Z, Chen R S, Sun S, et al. 2022. Characteristics of rainstorm intensity and its future risk estimation in the upstream of yellow river basin [J]. Atmosphere,13(12):2082. doi:10.3390/atmos13122082

Rupp D E. 2013. Evaluation of CMIP5 20th century climate simulations for the Pacific Northwest USA [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,118(19):10884−10906. doi:10.1002/jgrd.50843.doi:10.1002/jgrd.50843

(责任编辑 张 文)