

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 Fen, HONG Guoping, ZHAO Xiaofang, 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

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

王芬¹,洪国平^{2,3},赵小芳²,何明琼⁴,刘静⁴,罗金芳¹,邓凯¹

(1. 湖北省孝感市气象局,孝感 432100;2. 武汉区域气候中心,武汉 430074;3. 中国气象局武汉暴雨研究所 中国气象局流
域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室 武汉 430205;4. 湖北省气象服务中心,武汉 430205)

摘 要:暴雨过程致灾危险性评估是暴雨灾害风险评估的基础和重要环节,可为气象防灾减灾提供重要技术支撑。利用孝感市7个国家气象观测站及120个区域气象观测站逐日、逐时降水量观测资料及地理信息资料,采用暴雨过程灾害危险性动态评估方法,对2021年8月12日发生于湖北省孝感市的一次区域性暴雨过程进行了致灾危险性评估。基于暴雨过程降水特征量分析,确定暴雨过程致灾因子,采用信息熵权法确定4个致灾因子权重系数,计算了暴雨过程强度指数;基于暴雨区下垫面特征分析,明确地形影响系数、水系影响系数为孕灾环境因子,并等权求和构成孕灾环境综合指数;暴雨过程致灾危险性指数由暴雨过程强度指数和孕灾环境综合指数加权构成,采用自然断点法将暴雨过程致灾危险性指数划分为5个等级,基于GIS绘制了暴雨过程致灾危险等级分区图,利用主要承灾体灾情数据验证了危险性评估结果的合理性。结果表明:(1)此次暴雨过程具有来势猛、短时降水量大、降水集中等特点,暴雨过程86.1%降水量集中在6 h以内,最大6 h降水量达50 a一遇,选取致灾因子时重点考虑短历时降水量;(2)孝南区大部、云梦县中部、应城市东北部、安陆市西南部为暴雨过程致灾高危险区,而较高危险区覆盖孝感市中部,这与暴雨强度及地形、水系河网等环境敏感性有关;(3)高和较高危险区对应暴雨灾情较重的区域,实际灾害等级达到“大型”灾害等级,致灾危险性评估结果反映了主要承灾体灾害损失实际。

关键词:暴雨过程;致灾因子;危险性评估;承灾体;孕灾环境;强度指数

中图法分类号:P426.616 **文献标志码:**A **DOI:**10.12406/byzh.2023–068

Research of rainstorm event disaster hazard assessment method—A case study of “8·12” rainstorm event in Xiaogan City

WANG Fen¹, HONG Guoping^{2,3}, ZHAO Xiaofang², HE Mingqiong⁴, LIU Jing⁴, LUO Jingfang¹, DENG Kai¹

(1. Xiaogan Meteorological office of Hubei Province, Xiaogan 432100;2. Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074; 3. China
Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and
Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205;
4. Hubei Province Meteorological Service Center, Wuhan 430205)

Abstract: The assessment of disaster-causing hazards for the rainstorm event is a fundamental and key aspect of assessing the risk of rainstorm disasters, which can provide essential technical support for meteorological disaster prevention and mitigation. Using the hourly and daily precipitation data from 7 national meteorological observation stations and 120 regional automatic weather stations in Xiaogan City, as well as geographic information data, etc., a regional rainstorm event disaster-causing hazard that occurred in Xiaogan City on 12 August 2021 was evaluated base on dynamic assessment method of disaster hazard assessment of rainstorm process. By analyzing rainfall characteristic quantity, the disaster-causing factors were identified. Four disaster-causing factors were calculated using the information entropy-weight method, and the rainstorm event intensity index was calculated. The topographic-effected indices and the drainage-effected indices were determined as environmental factors based on analyzing the underlying surface characteristics in the rainstorm area. Then a synthetical index of disaster-prone environment was calculated using equal weighted summation of these indices. The disaster-causing hazard indices of the rain-

收稿日期: 2023–04–17;定稿日期:2023–10–15

资助项目: 湖北省气象局科技发展基金项目(2022Z05–13)

第一作者: 王芬,主要从事应用气象学研究。E-mail: 280059525@qq.com

通信作者: 洪国平,主要从事气候评估与气象灾害风险评估研究。E-mail: 287204515@qq.com

storm event are composed of the weighted intensity indices of rainfall and the synthetical indices of disaster-prone environment. It was divided into five levels by using the Jenks natural breaks method, and the hazard level zonation chart for the rainstorm event was created using GIS. Finally, the hazard evaluation results were validated by the real rainstorm disaster data from the main affected area. The main results are as follows. (1) The “8.12” rainstorm event was characterized by its suddenness, heavy short-term rainfall, and concentrated precipitation, with 86.1% precipitation concentrated in 6 hours, and maximum precipitation in 6 hours of being up to a 50-year recurrence period, so the disaster-causing factors were selected by mainly considering the short-term precipitation. (2) The highest-level disaster hazard zones are located in most of Xiaonan district, central Yunmeng, north-east Yingcheng City, and southwest Anlu City, while the higher-level disaster hazard zone covers almost all the central part of Xiaogan City. Note that the results depend on the rainstorm intensity, the environment of the terrain, and the river network. (3) The highest- and higher-level hazard zones were areas corresponding to the regions with heavy rainstorm damage, with the actual disaster level reaching the “major” disaster level. The hazard assessment results actually reflected the actual losses in the main affected area.

Key words: rainstorm event; disaster-causing factor; hazard assessment; hazard-bearing body; disaster-prone environment; intensity index

引言

暴雨灾害是我国主要自然灾害之一,强度大、范围广、持续时间长的暴雨过程常引发洪涝、城市内涝以及山洪、泥石流、滑坡等灾害,造成重大经济财产损失和人员伤亡(陶玮等,2021;张柳红等,2021;李莹和赵姗姗,2022)。在全球气候变化背景下,极端暴雨频发,如2012年京津冀“7·21”极端暴雨(湛芸等,2012),2021年河南“7·20”极端暴雨(奇道日娜等,2022)等。因此,开展暴雨灾害危险性预评估,在灾害发生前对灾害强度和位置进行预估,对于政府应急响应和公众及时采取防范措施减轻灾害损失具有重要意义。

近年来,暴雨过程综合强度及致灾危险性评估已成为研究热点,并取得有应用价值的研究成果。在暴雨过程综合强度评估方法研究中,王莉萍等(2018)、邹燕等(2014)、伍红雨等(2019)、张顺谦等(2019)以降水强度、持续时间、覆盖范围等指标建立了区域性降水过程或暴雨过程综合强度评估模型,分别对中国范围任意区域、福建省、广东省、四川省的暴雨过程综合强度进行定量评估。在暴雨致灾危险性评估方法研究中,除了考虑暴雨过程综合强度外,一般还增加了环境因子的影响。任洪玉等(2018)在全国山洪灾害危险性评价中,以多年暴雨极值平均和变异系数加权的暴雨指标、表征地形起伏度的地形指标相乘得到山洪灾害危险度指数,用于对全国山洪灾害危险性进行分区。王秀荣等(2016)以单站降雨综合指数(考虑暴雨强度和持续时间)为致灾因子,以高程指数、高程标准差指数、河网密度指数、土壤类型指数为孕灾环境因子,采用加权求和法构建中国4类降雨区暴雨灾害综合风险评估模型。孟旭芹等(2022)在对承德市精细化山洪灾害风险区划方法中,选取山洪灾害频次、1 h和3 h最小致灾降水量阈值作为山洪灾害危险性评价指标,将地形影响因子作为山洪灾害风险评价的一部分。中国气象局(2021)给出了暴雨致灾危险性评估技术规范(以下简

称中国局规范),采用单站多年历次暴雨过程的最大小时降水量、最大日降水量、过程累积降水量及持续日数为致灾因子,孕灾环境指数综合考虑海拔高度、地形高程标准差、水系及地质灾害易发条件的影响,对识别出的每次暴雨过程,均采用了相同的致灾因子和孕灾环境影响因子,致灾危险性区划结果显示的是各地暴雨灾害危险性总体分布特征。谢五三等(2023)根据中国局规范,并结合安徽实际,分别计算山洪和平原内涝致灾危险性指数,并将两者叠加得到融合山洪和平原内涝的安徽省暴雨综合致灾危险性分布。苏涛等(2023)同样采用中国局规范对湖南长沙县暴雨灾害危险性进行区划。

已有研究成果大多针对各地暴雨过程综合强度及致灾危险性总体分布特征,在暴雨致灾危险性评估中,确定致灾因子及孕灾环境影响因子后一般是固定不变的,即每次暴雨过程强度计算取相同的致灾因子和孕灾环境影响因子。实际上每次暴雨过程特征量不同,因此对单次暴雨过程致灾因子的选取应根据暴雨过程具体实际确定,暴雨区孕灾环境因子也应根据暴雨区下垫面特征选取,从而提高单次暴雨过程致灾危险性评估的针对性。本文结合孝感市2021年8月11—12日暴雨过程(以下简称“8·12”过程),通过对暴雨过程特征量和下垫面孕灾环境敏感性的分析,确定致灾因子及孕灾环境影响因子,提出了针对一次暴雨过程灾害危险性动态评估方法,并利用实际灾情数据对评估结果进行了合理性验证,以期为抢险救灾、防灾应急响应及减轻灾害风险提供技术支撑。

1 研究区概况及资料与方法

1.1 研究区概况

孝感地处湖北省东北部,桐柏山、大别山之南,长江以北,汉江以东,由大别山、桐柏山向江汉平原过渡,呈坡状地貌。北部山峰高度多在海拔400~800 m之间,最高海拔高程873.7 m;东北部与西北部山岳之

间形成较宽的河谷地形,有较多北南向河流穿过;中部为丘陵地带,地面高程在海拔50~150 m之间;南部为平原湖区,属江汉平原北延部分,地面高程在海拔50 m以下(图1)。孝感位于我国南北气候的交界线上,属中纬度亚热带温湿季风大陆性气候区,初夏、梅雨期暴雨频繁,易发生暴雨洪涝灾害。

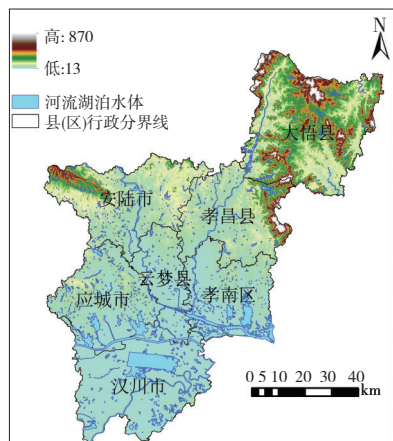


图1 孝感市地形高程(单位:m)与水体的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of DEM (unit: m) and waterbody in Xiaogan City

1.2 资料说明

使用的资料包括:(1) 孝感市1961—2020年7个国家气象观测站(以下简称国家站)20—20时(北京时,下同)日降水量、小时降水量和2021年8月11日20时—12日20时7个国家站和120个区域气象观测站(以下简称区域站)日降水量、小时降水量,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。前者用于极端暴雨事件判别、降水量重现期分析,后者用于“8·12”过程特征量及强度分析。气象观测站的空间分布较均匀(图2)。(2) 地理信息数据包括数字高程模型(DEM),来源于美国航空航天局卫星雷达影像数据(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM),精度为30 m×30 m;水系河网数据来源于中国气象局;地理行政边界矢量数据来源于第一次全国气象灾害综合风险普查领导小组办公室。(3) “8·12”过程灾情数据,来源于孝感市民政局及农业局。

1.3 研究方法

首先明确单站暴雨过程,对相关概念定义如下:

(1) 单站暴雨日为前一日20时至当日20时国家站或区域站降水量 ≥ 50 mm;(2) 单站暴雨过程指单站暴雨日持续1 d及以上或中断日出现中到大雨(日降水量10.0~49.9 mm)、且前后日均为暴雨日的降水过程,过程开始日、结束日分别为暴雨过程首个、最后一个暴雨日。

基于“8·12”暴雨过程特征量分析确定表征暴雨过程危险性的致灾因子。根据中国局规范和气象行业标准 QX/T 405—2017,在危险性、风险评价中涉及多评价

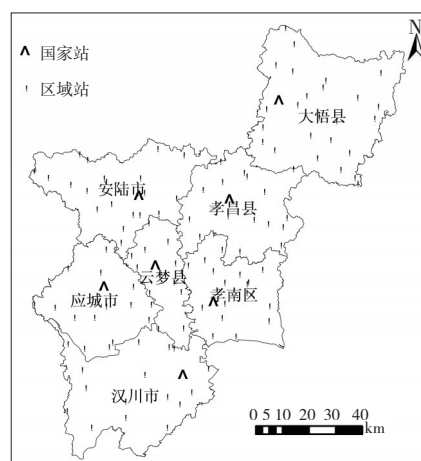


图2 孝感市气象观测站的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of meteorological observation stations in Xiaogan City

因子的权重系数时可采用信息熵赋权法确定。信息熵表示系统的有序程度,一个系统的有序程度越高,则熵值越大、权重越小,反之,则权重越大。即对于一个评价指标,指标值之间的差距越大,则该指标在综合评价中所起的作用越大。采用信息熵法计算各致灾因子权重系数,采用致灾因子加权求和计算暴雨过程强度指数。根据暴雨区下垫面特征分析暴雨孕灾环境敏感性,依据海拔高程和水系河网数据,计算暴雨孕灾环境综合指数。将暴雨过程强度指数与孕灾环境综合指数加权求和构建暴雨过程致灾危险性指数模型,基于ArcGIS平台的空间分析模块,采用自然断点法对危险性指数分级。对暴雨区国家站日降水量进行排位,采用百分位数法判断极端事件,采用极值I型概率分布函数拟合最大6 h降水量、日降水量重现期,利用实际灾情数据验证致灾危险性评估结果的合理性。

2 暴雨过程致灾危险性评估与验证

2.1 暴雨过程致灾因子选取

2021年8月11日20时—12日20时受对流层中层西风带低值系统东移和中低层中尺度江淮切变线影响,孝感市自西向东发生了一次强降水过程,降水区位于孝感市中北部,中部一带降水量最大(图3)。强降水带先后影响安陆、应城、云梦、孝昌、大悟及孝感城区,造成了城市内涝、房屋受损和农作物受淹等灾害,具有来势猛、短时降水量大、降水集中等特点。区域内7个国家站中有6站日降水量超过50 mm,其中最大日降水量为199.6 mm(云梦县站),为一次区域性暴雨过程(洪国平,2020)。孝感市84个区域站日降水量超过50 mm,其中42站出现大暴雨、8站特大暴雨,最大1 h降水量为98.1 mm(云梦县伍洛站),最大日降水量为235.4 mm(京珠高速孝南区京珠向k1115站)。区

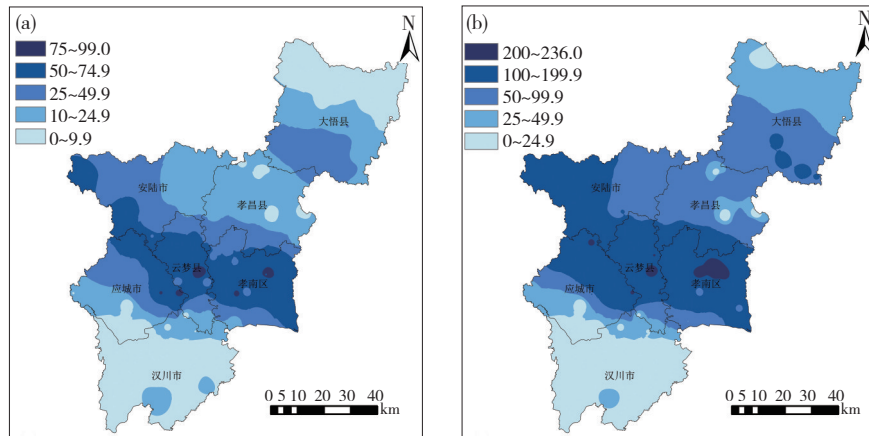


图3 2021年8月11日20时—12日20时孝感最大1 h降水量(a)和日降水量(b)的空间分布(单位: mm)

Fig.3 Spatial distribution for (a) maximum hourly precipitation and (b) day precipitation in Xiaogan City from 20:00 BT on 11 to 20:00 BT on 12 August, 2021 (unit: mm)

域内近71%的站点出现暴雨及以上量级降水。根据单站暴雨过程定义,共有90站出现单站暴雨过程,暴雨过程时长为1 d。

“8·12”过程降水最强时段主要出现在12日05—14时(图4a),过程累积降水量最大的孝南区京珠高速k1115站小时降水量(图4b)显示,其最大连续3 h、6 h

降水量分别为189.2 mm (12日9—11时)、228.9 mm (12日8—13时)。90个暴雨站降水过程中的最大1 h、最大3 h、最大6 h降水量占各站过程总降水量的平均值分别为32.2 %、60.6 %、86.1 % (图4c),可见暴雨过程主要降水量集中在6 h以内。因此,选取暴雨过程致灾因子时重点考虑短时降水量。

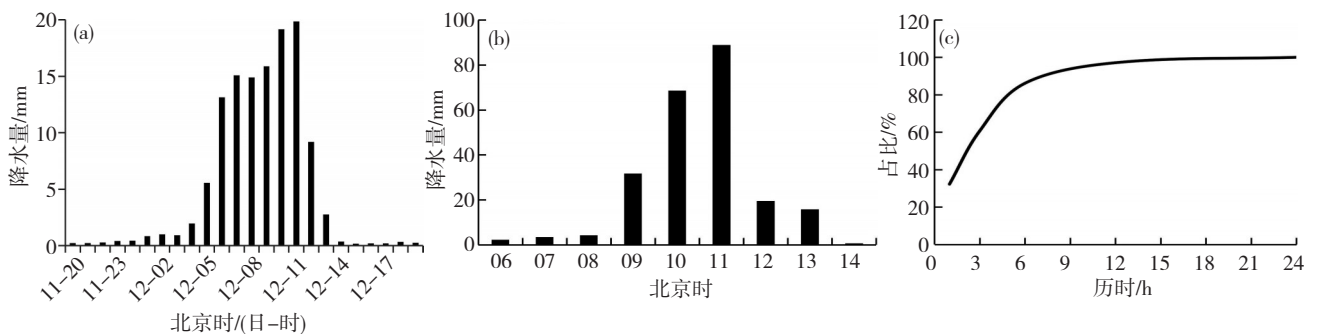


图4 2021年8月11日20时—12日20时孝感市90个暴雨站平均的逐小时降水量演变(a),8月12日06—14时孝南区京珠高速k1115站逐小时降水量演变(b)和90个暴雨站平均的不同历时最大降水量在各站过程总降水量占比(c)

Fig.4 Evolution of (a) mean hourly precipitation of 90 rainstorm stations from 20:00 BT on 11 August to 20:00 BT on 12 August, and (b) hourly precipitation of k1115 station in Jingzhu expressway from 06:00 BT to 14:00 BT on 12 August, and (c) mean ratio of different duration maximum precipitation to process precipitation of 90 rainstorm stations in Xiaogan City from 20:00 BT on 11 August to 20:00 BT 12 August, 2021

2.2 暴雨过程致灾因子与强度指数

针对“8·12”过程历时短(24 h以内)、降水量集中(最大6 h降水量占过程总降水量86.1 %)、短时雨量大(最大1 h降水量98.1 mm)等特征,选取过程最大1 h、最大3 h、最大6 h降水量及日降水量4个指标为致灾因子。取达到单站暴雨过程标准的90个暴雨站的4个致灾因子值,构成原始数据矩阵,按信息熵赋权法计算得到4个致灾因子的熵权重分别为: $a=0.297\ 2$, $b=0.273\ 0$, $c=0.232\ 5$, $d=0.197\ 4$,结果表明降水历时越短的因子,熵值越小,熵权越大,提供的有用信息量越大。对4个致灾因子加权求和构建单站暴雨过程强度指数公式(I_i)

$$I_i = a \times R_{1h} + b \times R_{3h} + c \times R_{6h} + d \times R_{24h} \quad (1)$$

式(1)中, R_{1h} 、 R_{3h} 、 R_{6h} 、 R_{24h} 分别为归一化后的单站暴雨过程最大1 h、最大3 h、最大6 h及日降水量等4个致灾因子,归一化公式如下(QX/T 405—2017)

$$d_{ij} = 0.5 + 0.5 \times \frac{a_{ij} - x_{\min(i)}}{x_{\max(i)} - x_{\min(i)}} \quad (2)$$

式(2)中, d_{ij} 为j站第i个指标的归一化值, a_{ij} 为j站第i个指标值, $x_{\max(i)}$ 、 $x_{\min(i)}$ 分别为第i个指标值中的最大值和最小值。计算了90个单站暴雨过程强度指数值(I_i),通过ArcGIS平台空间分析模块,采用反距离权重插值法(IDW),将基于站点的 I_i 值插值到30 m×30 m的格网,然后绘制暴雨过程强度指数分布图(图5),可见

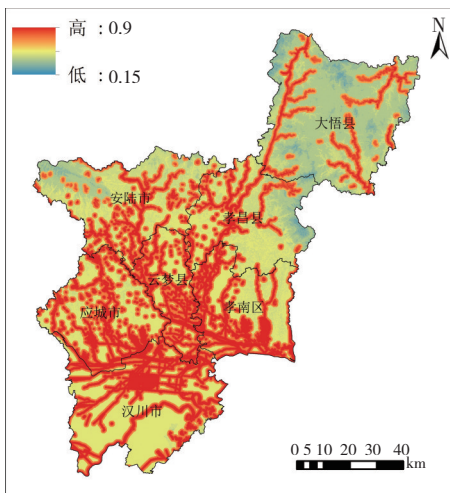


图6 孝感市“8·12”暴雨过程孕灾环境综合指数的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of synthesis disaster-prone environment indices of “8·12” rainstorm process in Xiaogan City

的特点,采用更精细的5级危险等级分级和自然断点法划分,绘制出危险等级分区图(图7)。可见孝南区大部、云梦县中部、应城市东北、安陆市西南为暴雨致灾高危险区,而较高危险区几乎覆盖整个孝感市中部,这与暴雨强度及地形、水系水体等环境敏感性有关。

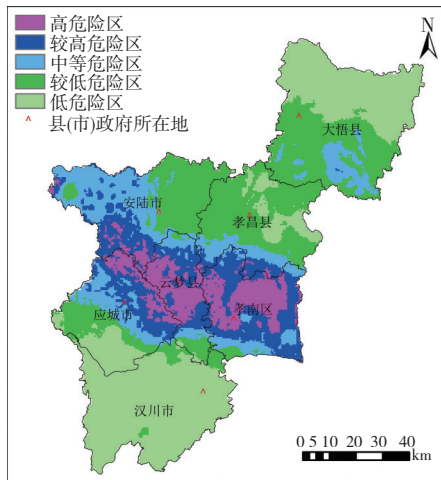


图7 孝感市“8·12”暴雨过程致灾危险性等级的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of disaster hazard zonation for “8·12” rainstorm process in Xiaogan City

上文评估了此次暴雨过程危险等级空间上的相对差异,下面对此次暴雨过程强度的历史排位进行评估。分析孝感市国家站1961—2020年长序列日暴雨量及“8·12”过程日雨量排位表明,“8·12”过程中位于暴雨区中心的云梦站、孝南站日暴雨量分别排第4、5位,采用95%百分位值作为极端暴雨事件阈值,则云梦站、孝南站均达到极端暴雨事件等级。重现期分析表明,孝南站最大6 h降水量达50 a一遇,日降水量(11日20时—12日20时)为10 a一遇,云梦站最大6 h降水量接近50 a一遇,日降水量为10 a一遇,可见“8·12”过程的短时暴雨强度比日降水量强度更强。

2.5 灾情验证

收集到的“8·12”过程灾情表明,灾害主要发生在孝南区、云梦县、应城市、安陆市,孝南区、应城市城区部分道路和小区,内涝深度30~60 cm,孝昌县、临空区、双峰山部分乡镇农作物受淹、房屋受损。根据孝感市民政局灾情数据,孝感全市累计受灾人口33.404 8万人,其中紧急避险0.705万人,转移安置0.137 7万人;农作物受灾面积 $1.815 \times 10^4 \text{ hm}^2$,成灾 $9.606 \times 10^3 \text{ hm}^2$,绝收 $3.025 \times 10^3 \text{ hm}^2$;倒塌房屋32间,严重损房38间;直接经济损失5.4亿元。重灾区位于危险性分区图的高和较高危险区。根据直接经济损失指标,此次暴雨灾害属“大型”(Ⅱ级)灾害等级(陶玮等,2021)。未发生暴雨次生地质灾害,孕灾环境综合指数不考虑地质灾害易发条件影响是合理的。综上,实际灾情数据与致灾危险性评估结果基本相符。

3 结论与讨论

基于孝感市“8·12”过程降水特征确定暴雨致灾因子,根据暴雨区地形、水系等环境敏感性特征确定孕灾环境因子,计算致灾危险性指数,按自然断点法划分为5级,绘制了孝感市“8·12”过程危险性等级分区图,并利用实际灾情数据验证评估结果的合理性,得到如下主要结论:

(1) 根据暴雨过程86.1%降水量集中在6 h以内的特征,选取暴雨过程最大1 h、最大3 h、最大6 h及日降水量作为致灾因子是合理的。采用信息熵赋权法确定致灾因子权重系数,计算结果表明降水历时越短的因子,熵值越小,熵权越大,提供的有用信息量越大;对致灾因子加权求和得到暴雨过程强度指数,孝南区中北部、云梦县中部、应城市东北部、安陆市西部、孝昌县南部、大悟县南部暴雨过程强度指数相对较高。

(2) 孝感“8·12”过程致灾高危险区位于孝南区大部、云梦县中部、应城市东北部、安陆市西南部,而较高危险区几乎覆盖整个孝感市中部,这与暴雨强度和地形、水系水体等环境敏感性有关。位于暴雨区中心的云梦站、孝南站过程日暴雨量分别排1961—2020年第4、5位,均达到极端暴雨事件等级,最大6 h降水量、日降水量重现期分别为50 a一遇、10 a一遇。

(3) 承灾体灾情数据验证表明,重灾区位于危险性分区的高和较高危险区,此次灾害等级属“大型”灾害等级,主要承灾体灾情损失与致灾危险性评估结果基本相符。

本研究给出的暴雨过程致灾因子选取方法、暴雨区孕灾环境敏感性分析法适用于暴雨过程致灾危险性的动态评估、复盘评估,结合智能网格预报,也可适用于即将发生的暴雨过程灾害危险性预估。但暴雨

过程灾害危险性评估中还存在如下主要问题:一是地形和水系的分辨率不高,本文采用了30 m×30 m栅格分辨率的数值高程模型,仍不能精细地刻画暴雨区微地形(如中小河流)的变形度,对于城市暴雨内涝的评估也达不到街道级的精细刻画。二是本文采用的统计方法只能给出暴雨致灾空间上的不同等级危险区范围,未能给出影响时间,这是采用统计方法研究的不足。今后可结合水文动力模型模拟方法,开展暴雨淹没地点、水深、淹没时间、淹没面积等精细化模拟,进行暴雨洪涝灾害的更精细化评估研究。

参考文献(References):

- 湛芸,孙军,徐珺,等.2012.北京721特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J].气象,38(10):1255–1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al. 2012. Analysis and thinking on the extreme of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing part 1 observation and thinking [J]. Meteorological Monthly,38(10):1255–1266 (in Chinese)
- DB33/T 2025—2017浙江省地方标准《暴雨过程危险性等级评估技术规范》[S].Assessment technical specification for the risk level of rainstorm eventes [S] (in Chinese)
- 洪国平.2020.区域性暴雨过程评价指标在湖北的本地化修订与应用[J].暴雨灾害,39(5):470–476. Hong G P. 2020. Localized revision and application of assessing indices for regional heavy rainfall events in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,39(5):470–476 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2020.05.005
- 李莹,赵姗姗.2022.2001—2020年中国洪涝灾害损失与致灾危险性研究[J].气候变化研究进展,18(2):154–165. Li Y, Zhao S S. 2022. Floods losses and hazards in China from 2001 to 2020 [J]. Climate Change Research,18(2):154–165 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673–1719.2021.196
- 孟旭芹,童俊,彭九慧.2022.基于GIS的承德市精细化山洪灾害风险区划[J].沙漠与绿洲气象,16(6):118–123. Meng X Q, Tong J, Peng J H. 2022. Fine risk division of mountain torrent disaster in Chengde City based on GIS [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(6):118–123 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2022.06.015
- QX/T 405—2017雷电灾害风险区划技术指南[S]. Technical guidelines for lightning disaster risk zoning [S] (in Chinese)
- 奇道日娜,何立富,王秀明,等.2022.“7·20”河南极端暴雨精细观测及热动力成因[J].应用气象学报,33(1):1–15. Chyi D R N, He L F, Wang X M, et al. 2022. Fine observation characteristics and thermodynamic mechanisms of extreme heavy rainfall in Henan on 20 July 2021 [J]. Journal of Applied Meteorological Science,33(1):1–15 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20220101
- 任洪玉,杜俊,丁文峰,等.2018.基于GIS的全国山洪灾害风险评估[J].灾害学,33(4):86–92. Ren H Y, Du J, Ding W F, et al. 2018. Risk assessment of mountain torrent disaster based on GIS in China [J]. Journal of Catastrophology,33(4):86–92 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000–811X.2018.04.016
- 苏涛,赵恩榕,姚蓉,等.2023.湖南省长沙县暴雨灾害危险性评估与区划研究[J].水电能源科学,41(5):1–5. Su T, Zhao E R, Yao R, et al. 2023. Study on risk assessment of rainstorm disaster and zoning in Changsha County [J]. Water Resources and Power,41(5):1–5 (in Chinese). doi:10.20040/j.cnki.1000–7709.2023.20221412
- 陶玮,郭婷,吴瑞姣,等.2021.安徽省暴雨灾害预警等级的划分及其应用[J].暴雨灾害,40(2):174–181. Tao W, Guo T, Wu R J, et al. 2021. Classification of early warning levels for rainstorm disaster and its application in Anhui province [J]. Torrential Rain and Disasters,40(2):174–181 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2021.02.009
- 王莉萍,王秀荣,张立生,等.2018.一种区域降水过程综合强度评估方法的探索和应用[J].气象,44(11):1479–1488. Wang L P, Wang X R, Zhang L S, et al. 2018. Exploration and application of comprehensive intensity evaluation method for regional precipitation process [J]. Meteorological Monthly,44(11):1479–1488 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.10000–0526.2018.11.011
- 王秀荣,吕冬亮,王莉萍,等.2016.一种简化的暴雨灾害风险及影响评估方法和应用研究—以京津冀“7·21”暴雨事件为例[J].气象,42(2):213–220. Wang X R, Lu Z L, Wang L P, et al. 2016. Simplified assessment method and application research of rainstorm disaster and impact—using Jing-Jin-Ji “7.21” heavy rain as an example [J]. Meteorological Monthly,42(2):213–220 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2016.2.009
- 伍红雨,邹燕,刘尉.2019.广东区域性暴雨过程的定量化评估及气候特征[J].应用气象学报,30(2):233–244. Wu H Y, Zou Y, Liu W. 2019. Quantitative assessment of regional heavy rainfall process in Guangdong and its climatological characteristics [J]. Journal of Applied Meteorological Science,30(2):233–244 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20190210
- 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
- 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. Quantitative assessment method of regional heavy rainfall process comprehensive intensity in Fujian [J]. Journal of Applied Meteorological Science,25(3):360–364 (in Chinese)
- 张柳红,郑璟,伍红雨,等.2021.广东暴雨洪涝灾害损失定量评估[J].暴雨灾害,40(1):87–93. Zhang L H, Zheng J, Wu H Y, et al. 2021. Quantitative assessment of disaster loss caused by rainstorms and floods in Guangdong [J]. Torrential Rain and Disasters,40(1):87–93 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2021.01.011
- 张顺谦,王春学,陈文秀,等.2019.四川省暴雨过程强度及损失评估方法研究[J].暴雨灾害,38(1):79–85. Zhang S Q, Wang C X, Chen W X, et al. 2019. Study on evaluation method of intensity and loss of rainstorm in Sichuan Province [J]. Torrential Rain and Disasters,38(1):79–85 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2019.01.010
- 中国气象局.2021.全国气象灾害综合风险普查技术规范《暴雨灾害调查与风险评估技术规范(灾害调查类)》[S]. China Meteorological Administrator. 2021. Technical specification for national meteorological disaster comprehensive risk survey: technical specification for rainstorm disaster investigation and risk assessment (disaster investigation) [S]. (in Chinese)

(责任编辑 唐永兰)