

孙子荣,秦拓,杨丽杰,等. 基于信息扩散理论的庆阳市极端降水风险分析[J]. 陕西气象,2025(6):46-52.

文章编号:1006-4354(2025)06-0046-07

基于信息扩散理论的庆阳市极端降水风险分析

孙子荣¹,秦拓²,杨丽杰²,郭海瑛¹

(1. 环县气象局,甘肃环县 745700;2. 庆阳市气象局,甘肃庆阳 745000)

摘要:为精确把握极端降水事件的风险特征,选取1978—2022年庆阳市逐日降水资料,基于年最大日降水量、极端降水日数、极端降水总量3项极端降水指数分析极端降水的时空分布规律,并利用信息扩散理论完成极端降水风险评估及区划研究。结果表明:近45 a庆阳市极端降水指数总体呈上升趋势,全市多数站点变化趋势不显著;极端降水指数呈现东南高、西北低的分布特征;极端降水的致灾频次和风险概率随极端降水指数的增大先增后减;轻灾等级下西北部发生的风险概率更大,东南部为中灾的高风险区,中部为重灾的高风险地区;地形对极端降水风险有一定影响。

关键词:极端降水;信息扩散理论;风险评估;庆阳市

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

近年来我国异常气候、极端天气事件呈现出发生频率高、影响范围广以及灾损更严重的趋势^[1-4]。庆阳市位于甘肃省最东部,处于季风边缘地带的大陆腹地,受季风影响明显,地貌为黄河中下游黄土高原沟壑区^[5],加之地势高低不同,呈现为山川塬为主、沟崩梁相间的复杂地形。在这样特殊的气候、地理和地形条件下,频发重发的极端降水事件极易引发山洪、泥石流、城市内涝等灾害^[6-7],给社会经济、生产生活带来严重影响。因此,研究极端降水事件时空分布特征及其发展趋势,精确把握极端降水风险特征是十分有必要的。

极端降水事件发生的原因十分复杂,各类因素不确定性强且很难量化,利用传统统计学方法很难得出连续稳定结果。信息扩散理论^[8]被引入自然灾害风险评价研究中并广泛运用。该方法能够有效弥补样本信息的不足,已取得较好的效果^[9-17]。如卢珊等^[13]利用气候学统计信息扩散理

论评估模型,对秦岭北麓汛期暴雨洪涝灾害进行气候变化特征及灾害风险评估;王学强等^[16]基于信息扩散理论的风险评估模型对发生不同暴风雪日数的概率风险进行估计;段莹等^[17]对贵州省高温分布特征进行描述,并基于信息扩散理论对灾害危险性进行分析。本研究利用信息扩散理论从时间、空间上分析庆阳市极端降水事件风险发生规律,完成风险评估及区划研究,以期提高对极端降水风险的认识,为庆阳市区域发展政策的制定、防灾减灾以及生态环境建设提供可靠依据。

1 研究区域概括

庆阳市地跨 $106^{\circ}45' \sim 108^{\circ}50' E$ 与 $35^{\circ}10' \sim 37^{\circ}20' N$ 之间,属温带大陆性季风气候,降水量南部多于北部,年均降水量在 $426.9 \sim 628.3$ mm。地势东、西、北三面高而中南部低,东依子午岭,西接六盘山,北靠羊圈山脉,全市海拔 $885 \sim 2089$ m,最高点在北部马家大山,海拔 2089 m,最

收稿日期:2024-06-24

作者简介:孙子荣(1999—),女,汉族,甘肃环县人,学士,助理工程师,主要从事综合气象业务、预报预警服务和相关研究工作。

通信作者:秦拓(1996—),男,汉族,甘肃镇原人,学士,工程师,主要从事气象服务和气象观测技术研究工作。

基金项目:甘肃省青年科技基金计划(23JRRM0750);甘肃省气象局气象科研项目(Ms2023-08);甘肃省气象局人才计划项目(2425rczx-B-QNYXRC-05);庆阳市气象局气象科研项目(QY2023-15)

低点在南部政平河滩,海拔 885 m。北部为黄土丘陵沟壑区,东部为黄土丘陵区,中南部为黄土高原沟壑区。特殊的地形地貌特征对极端降水事件的发生有着一定的促进作用。

2 资料与方法

2.1 资料及指标

研究数据包括庆阳市 DEM 数据、8 个气象站(西峰、环县、华池、庆城、镇原、合水、宁县、正宁)1978—2022 年逐日降水数据和 2010—2022 年暴雨洪涝灾情数据;DEM 数据来源于 SRTM 数字地形高程数据库,降水数据来源于甘肃省气象信息中心,灾情数据从全国气象灾害管理系统下载获取。依据庆阳市气候和地理地形条件,并参考

已有的研究^[18-20],选取世界气象组织(WMO)规定的 3 项极端降水指数^[6,21](见表 1),对降水极端性及其引发的高影响灾害风险性进行分析研究。考虑到影响因素存在差异,不同地区极端降水事件不可能完全以同一标准简单定义,因此依据每个观测站的日降水数据定义了不同的极端降水阈值,具体为:将某站 1978—2022 年逐年的日降水数据按照升序排列,以排序第 95 个百分位的 45 a 平均值作为极端降水事件的阈值,当某日的日降水量大于该阈值时,则认为当日出现了极端降水事件^[6],对年内出现极端降水事件的日数及降水量进行累加,得到年极端降水日数和极端降水总量。

表 1 极端降水指数

极端降水指数	定义	单位
年最大日降水量	年内最大的日降水量	mm
极端降水日数	日降水量大于极端降水阈值的总日数	d
极端降水总量	日降水量大于极端降水阈值的降水量总和	mm

2.2 风险评估方法

2.2.1 信息扩散理论 信息扩散理论的思想是:在样本容量小的情况下,所有样本点提供的信息是不完备的,存在模糊不确定性,此时应该把样本点携带的信息看作样本点的代表,一个模糊集的观测样本点^[12]。通过信息扩散可以充实样本空间,获取更多信息,具有操作简便,风险识别精度高的优点,在西北地区气象灾害风险评估应用中也得到了较好的效果^[12-13]。首先假设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为过去 n 年极端降水指数的实际观测样本集合,以样本数据的最大值和最小值设定信息扩散范围,按照固定间隔离散得到信息论域集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$,通过(1)式,将实际观测样本点 x_i 所携带的信息扩散到 U 中的所有点。

$$\begin{cases} f_i(u_j) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - u_j)^2}{2h^2}} \\ h = 2.6851 \times \frac{b-a}{n-1} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $f_i(u_j)$ 是 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 扩散到 u_j

($j = 1, 2, \dots, m$)的信息量, u_j 为信息吸收点, n 是样本总数, m 是离散点总数, h 是信息扩散系数,由样本数据的最大值 b 和最小值 a 及观测样本总数 n 确定。对扩散后的信息进行归一化处理:

$$\mu_{x_i}(u_j) = \frac{f_i(u_j)}{\sum_{j=1}^m f_i(u_j)} \quad (2)$$

式(2)中 μ_{x_i} 为样本点 x_i 的归一化信息分布。最后对 μ_{x_i} 进行处理,计算风险概率:

$$\begin{cases} q(u_j) = \sum_{i=1}^n \mu_{x_i}(u_j) \\ p(u_j) = \frac{q(u_j)}{\sum_{j=1}^m q(u_j)} \end{cases} \quad (3)$$

$q(u_j)$ 表示落在 u_j 点上的样本个数, $p(u_j)$ 为落在 u_j 处的频率值,即概率的估计值,代表极端降水指数不同情况下发生的可能性,其超越概率的表达式如下:

$$P(u \geq u_j) = \sum_{k=j}^m p(u_k) \quad (4)$$

P 为超越 u_j 时的风险评估值,代表各极端降

水指数在不同灾害等级下的超越概率风险值。

2.2.2 层次分析法 在各类风险评估分析^[22-23]中,层次分析法是一种常见的确定指标权重的决策分析方法。首先将复杂问题分解为三个层次,确定层次结构,将庆阳市极端降水风险作为目标层,极端降水作为准则层,年最大日降水量、极端降水日数、极端降水总量作为方案层;接着衡量各极端降水指数在极端天气事件中的相对重要程度,对极端降水指数进行两两比较判断,构建判断矩阵(见表2),计算矩阵特征向量获得不同极端降水指数的权重;最后对权重进行一致性检验,检验构建的判断矩阵是否存在逻辑问题,若通过了一致性检验,则表明各极端降水指数的权重合理。

表2 极端降水指数判断矩阵

极端降水指数	年最大日降水量	极端降水频数	极端降水总量
年最大日降水量	1	2	3
极端降水日数	1/2	1	2
极端降水总量	1/3	1/2	1

2.2.3 加权综合分析法 利用层次分析法得到各项极端降水指数的权重,将多个极端降水指数化为一个能够反映极端降水风险的单指标,更为全面客观地进行分析评估。用公式表达为:

$$C_v = \sum_{i=1}^3 P_i \omega_i \quad (5)$$

其中: C_v 是极端降水指数的评价因子总值; P_i 是第*i*项极端降水指数的风险评估值($P \geq 0$),通过信息扩散理论计算得出; ω_i 是第*i*项极端降水指数的权重值($0 \leq \omega < 1$),通过层次分析法计算得出。

3 结果分析

3.1 极端降水时空特征分析

3.1.1 极端降水指数时间演变特征 从图1给出的全市平均极端降水指数时间演变趋势来看,庆阳市平均年最大日降水量呈上升趋势,上升速率为0.040 mm/a,但未通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,其中1985—1998年呈现上升趋势,1978—1984年、1999—2022年表现为下降趋势,2010年以来年最大日降水量变化趋于平稳,滑动平均线与

趋势线几乎重合,最小值出现在2015年为37.5 mm。全市平均极端降水日数、极端降水总量变化趋势基本一致,分别以0.042 d/a、1.586 mm/a的速率显著上升,均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验;年际变化先降后升,1978—1997年都表现为下降趋势,1998年之后呈现为大幅度波动上升趋势,随着时间年际波动明显变大,2017—2022年极端降水日数、极端降水总量滑动平均线处于趋势线以上,最高值均出现在2017年,分别为9.5 d、352.8 mm,次高值均出现在2021年,分别为9.1 d、313.3 mm,最低值出现在2015年,为2.3 d、76.5 mm,峰值与谷值相差7.2 d、276.3 mm。

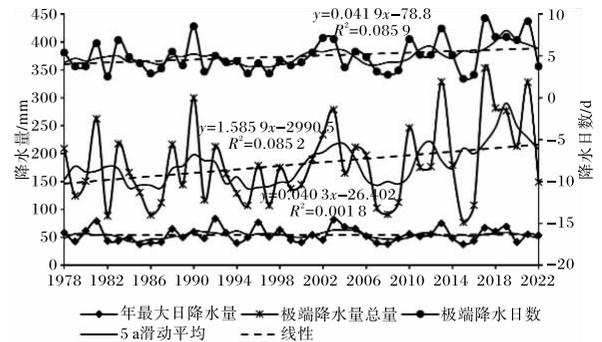


图1 1978—2022年庆阳市平均极端降水指数时间演变特征

表3为庆阳市各站点极端降水指数线性回归系数。可以看出,华池、环县、宁县、正宁年最大日降水量趋于增加,其余站点趋于减少,各站点均未

表3 1978—2022年庆阳市极端降水指数线性回归系数

站点	回归系数		
	年最大日降水量	极端降水总量	极端降水日数
合水	-0.017	1.448	0.044
华池	0.330	1.797	0.023
环县	0.113	1.447	0.047
宁县	0.316	2.482*	0.055*
庆城	-0.155	1.549	0.051*
西峰	-0.017	1.886	0.055*
镇原	-0.355	0.476	0.026
正宁	0.108	1.602	0.035
全市	0.040	1.586*	0.042*

注:*代表通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。

通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,表明全市年最大日降水量变化趋势不明显。极端降水总量整体呈现增加趋势,宁县增长趋势最大,以 2.482 mm/a 的速率显著上升,并且宁县也是唯一通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验的站点。极端降水日数总体趋于增加,其中宁县、庆城、西峰 3 个站点分别以 0.055 、 0.051 、 0.055 d/a 的速率显著增加,通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,是全市增长趋势较大的 3 个站点。

3.1.2 极端降水指数空间分布特征 多年平均极端降水指数空间分布图(图 2)中,年最大日降水量、极端降水日数、极端降水总量总体均由西北向东南增大;最小值中心均出现在环县,分别为 49.1 mm 、 3.9 d 、 138.8 mm ;较大值区依次向南

收缩,面积逐渐减小,年最大日降水量最大值出现在合水、西峰,为 56.4 mm ,极端降水总量、极端降水日数最大值中心出现在正宁,分别为 214.2 mm 、 5.8 d 。其中宁县与周围区域相差较大,年最大日降水量、极端降水日数、极端降水总量最大相差 7.4 mm 、 0.7 d 、 25.2 mm ,平均相差 4.5 mm 、 0.5 d 、 15.0 mm 。

3.2 极端降水事件风险概率分析

以庆阳市 1978—2022 年极端降水指数作为样本,年最大日降水量从 $0\sim 140\text{ mm}$ 每隔 10 mm 选取 15 个控制点,极端降水日数从 $0\sim 17\text{ d}$ 每隔 1 d 选取 18 个控制点,极端降水总量从 $0\sim 600\text{ mm}$ 每隔 50 mm 选取 13 个控制点,从而利用信息扩散理论计算得到各控制点上的风险概率 $p(u_i)$ 。根据庆阳市地形特点挑选北部黄土丘陵沟壑区的环县、中南部黄土高原沟壑区的西峰、东部黄土丘陵区正宁三个站点进行分析。从图 3a 可看出,各站点年最大日降水量达到 $40\sim 50\text{ mm}$ 时风险概率最大,超过 100 mm 风险概率很小,其中环县出现暴雨($\geq 50\text{ mm}$)的可能性最小,正宁出现暴雨的可能性最大。从图 3b 可看出,各站点极端降水日数风险概率差异较大:环县、西峰风险概率均在 4 d 时达到最大,西峰的概率峰值明显大于环县;正宁在降水日数为 6 d 时风险概率达到峰值,为 0.18 。其中环县极端降水日数风险值主要集中在 $1\sim 5\text{ d}$,且该范围内风险概率基本一致,均在 0.14 上下浮动,出现 5 d 以上的极端降水日数的概率均小于其他两个站点。当极端降水日数大于 10 d 时,3 个站点的风险概率随之减小,均小于 0.10 ,在极端降水日数大于 14 d 时,仅正宁有发生的可能性。图 3c 中,各站点极端降水总量跨度较大,说明具有较强的不确定性,环县在极端降水总量达到 100 mm 时风险概率最大,出现极端降水总量为 0 mm 的风险性水平显著高于其他站点,即不发生极端降水的可能性高于其他站点;西峰在极端降水总量达到 150 mm 时风险概率最大,为 0.24 ;正宁在 250 mm 时达到最大。随着极端降水总量量级的增加,发生的可能性也随之减小,当极端降水总量大于等于 500 mm 时仅正宁有发生的风险,其他站点均为零风险。

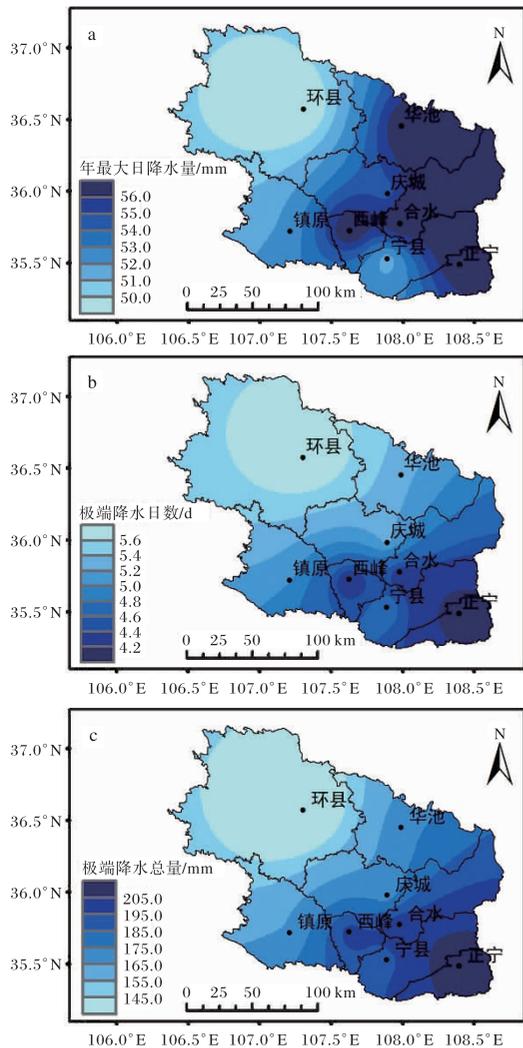


图2 1978—2022年庆阳市年最大日降水量(a)、极端降水日数(b)和极端降水总量(c)空间分布特征 (审图号为GS(2019)3082号,下同)

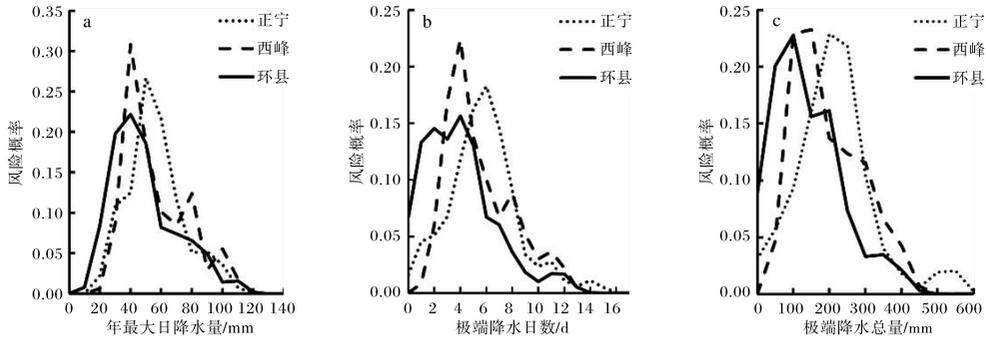


图3 1978—2022年庆阳代表站点年最大日降水量(a)、极端降水日数(b)和极端降水总量(c)风险概率曲线图

3.3 极端降水事件综合风险评估

对庆阳市极端降水引发的气象灾害进行分析。选取2010—2022年的灾情数据及极端降水指数作为样本,统计极端降水指数不同区间范围内,洪涝灾害发生的次数和平均直接经济损失(见图4),并计算极端降水指数与平均直接经济损失

的相关系数。结果显示:庆阳市极端降水日数、极端降水总量、年最大日降水量与暴雨洪涝灾害平均直接经济损失的相关系数分别为0.726、0.861、0.938,均通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,即极端降水指数越大,引发洪涝灾害的危害就越大。灾害发生次数随着极端降水指数增大先增后降,而年最大日降水量在0~10 mm时灾害发生次数和经济损失均为0,故不讨论年最大日降水小于10 mm的情况。

根据各极端降水指数下平均直接经济损失曲线斜率突变情况设定相应的阈值^[24],将极端降水事件引发的灾害分为轻灾、中灾、重灾3级,具体如下表4所示。

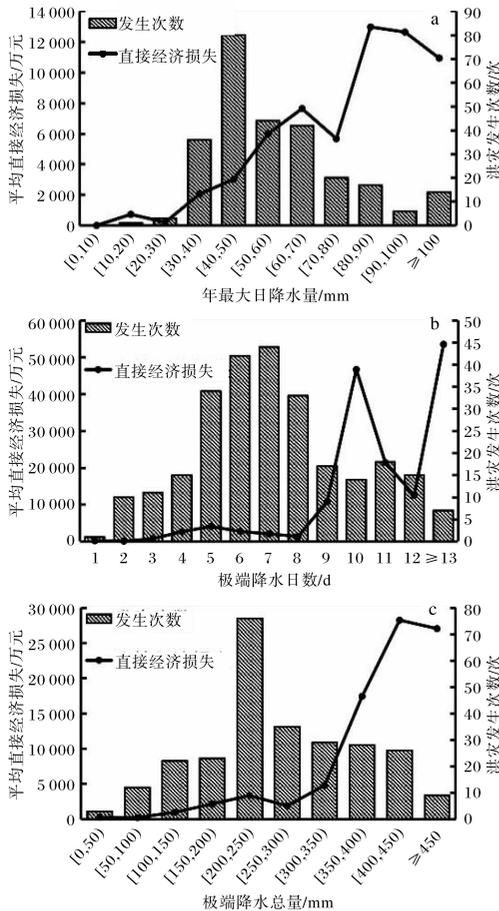


图4 2010—2022年庆阳市不同区间极端降水指数与暴雨洪涝灾害、直接经济损失的关系

表4 庆阳市极端降水灾害等级划分标准

极端降水指数	轻灾	中灾	重灾
年最大日降水量/mm	[10,30)	[30,80)	≥ 80
极端降水日数/d	[0,4)	[4,9)	≥ 9
极端降水总量/mm	[0,150)	[150,350)	≥ 350

结合各极端降水指数风险概率与层次分析法计算得出的权重,通过加权综合分析法得到极端降水灾害不同等级风险值,绘制极端降水灾害风险空间分布图(图5)。可以看出,全市发生极端降水灾害中灾的风险概率最高,轻灾次之,重灾发生的可能性最小。轻灾的区划图(图5a)中全市发生轻灾的风险概率为0.18~0.42,风险概率北高南低,差异明显。高值区主要分布在庆阳市西北部,风险值基本在0.3以上,重现期为3a左右,环县发生轻灾的风险最高;东南部风险概率较

低,基本都在 0.2 以下,重现期为 5~6 a,风险低值中心出现在正宁。图 5b 中灾风险分布图中,全市风险概率明显增大,为 0.52~0.72,基本不到 2 a 便会出现一次中灾。发生周期较短,再现较为频繁,风险概率分布情况与轻灾相反,庆阳市南部由轻灾低风险区转为中灾高风险区,北部转为低值中心。在图 5c 重灾分布图中,全市风险概率最小,总体表现为中部、东部高而西北部和中南部低,高风险区面积较小,发生重灾的可能性最大值出现在西峰,可能性最小值出现在宁县,仅为 0.04,至少 25 a 才发生一次重灾。

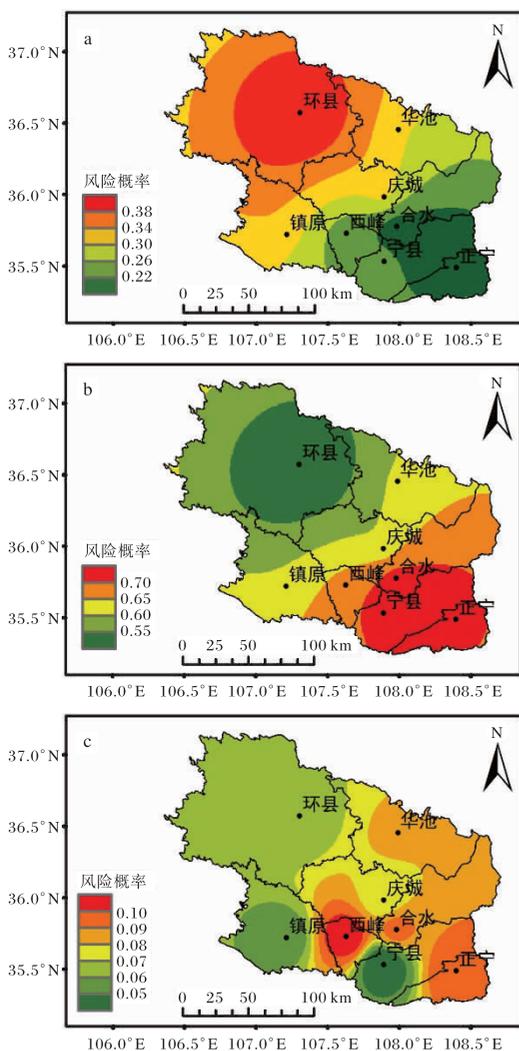


图 5 庆阳市各等级(a 轻灾,b 中灾,c 重灾)极端降水灾害风险概率分布图

3.4 极端降水风险的影响机制研究

地形是影响极端降水发生和空间分布的重要

因素。对比庆阳市高程地形图(图 6)和不同等级灾害下的风险分布图(图 5)可以发现,庆阳市出现轻灾的高风险概率区分布在海拔较高的黄土丘陵沟壑区,出现中灾的高风险区域对应着海拔较低的南部,出现重灾的风险低值中心对应海拔最低的宁县。地形高度在一定程度上影响着不同等级极端降水灾害发生的风险概率,与发生轻灾、中灾风险概率的相关系数分别为 0.63、-0.67,均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,表明海拔高度越高,发生轻灾的概率越高,发生中灾的概率越低,海拔高度与发生重灾风险概率的相关性较弱。

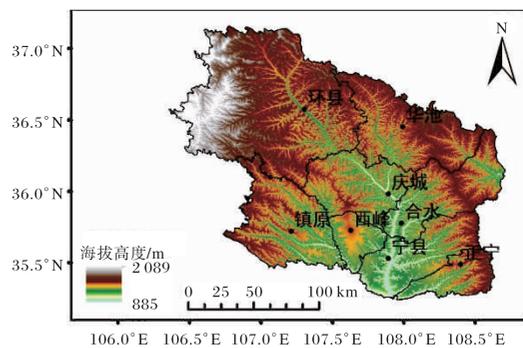


图 6 庆阳市高程地形图

4 结论

(1)从时间演变趋势来看,庆阳市平均极端降水指数均呈现上升的趋势,极端降水日数和极端降水总量年际变化先降后升,波动幅度明显增大,年最大日降水量变化趋势较为平缓,全市大多数站点未通过显著性检验,总体来看极端降水变化趋势不显著。从空间分布来看全市极端降水总体由东南向西北减小,多年平均极端降水指数最小值中心均出现在环县,年最大日降水量、极端降水总量、极端降水日数较大值区依次向南收缩。

(2)极端降水指数风险概率曲线基本为多峰型,变化差异明显,年最大日降水量风险概率主要集中在 100 mm 以内,极端降水日数风险水平分布在 10 d 以内,极端降水总量在 400 mm 以内。环县作为北部代表站不发生极端降水的可能性最高,其风险概率峰值对应的极端降水指数小于西峰、正宁;当极端降水指数量级增大时,正宁的风险概率值最大,西峰次之,环县最小。

(3)极端降水灾害随着等级的升高,风险概率

先升后降。全市轻灾 3~6 a 一遇,风险概率由西北向东南降低;中灾不到 2 a 一遇,风险高值区集中在庆阳市南部;重灾发生概率最低,全市大部分站点处于低风险区。地形对极端降水的发生有一定影响。

(4)本研究将极端降水指数与信息扩散风险评估模型系统性结合,完成庆阳市极端降水风险评估与区划,并考虑了实际灾情,在一定程度上能够反映出极端降水事件引发的灾害影响。但仍存在一些不足,一方面因为研究时段较长,为确保数据完整性仅选取境内 8 个国家站的数据,研究结论与实际情况可能存在偏差;另一方面地形并非唯一影响极端降水风险的因素,因此在未来的研究中需深刻剖析极端降水风险影响机制。

参考文献:

- [1] 吴佳,周波涛,徐影. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应:CMIP5 模式模拟评估和预估[J]. 地球物理学报,2015,58(9):3048-3060.
- [2] 卢珊,胡泽勇,王百朋,等. 近 56 年中国极端降水事件的时空变化格局[J]. 高原气象,2020,39(4):683-693.
- [3] 王澄海,张晟宁,李课臣,等. 1961~2018 年西北地区降水的变化特征[J]. 大气科学,2021,45(4):713-724.
- [4] NING G,LUO M,ZHANG W,et al. Rising risks of compound extreme heat-precipitation events in China[J]. International Journal of Climatology,2022,42(11):5785-5795.
- [5] 韩晶,张谋草,路亚奇,等. 庆阳市主要农业气象灾害特征分析及年景评估[J]. 湖北农业科学,2021,60(2):44-49.
- [6] 迟潇潇. 1960-2009 年中国极端降水时空特征及风险分析[D]. 上海:上海师范大学,2016.
- [7] 张天峰,姜惠峰,张红芬,等. 庆阳市城市内涝预报预警指标研究[J]. 湖北农业科学,2020,59(13):77-83.
- [8] 黄崇福,王家鼎. 模糊信息优化处理技术及其应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1995:145-195.
- [9] LI Q. Fuzzy approach to analysis of flood risk based on variable fuzzy sets and improved information diffusion methods[J]. Natural Hazards and Earth System Science,2013,13(2):239-249.
- [10] 管玥,刘佳鸿,何奇瑾,等. 基于信息扩散理论分析华北平原夏玉米花期高温热害的风险概率[J]. 中国农业气象,2021,42(7):606-615.
- [11] 李霞,宋喃喃,刘银萍,等. 基于信息扩散理论的江苏省雷电灾害风险评估[J]. 暴雨灾害,2021,40(5):564-568.
- [12] 冯丽云. 基于信息扩散技术的西安市降水规律研究[J]. 华北水利水电学院学报,2011,32(6):33-34.
- [13] 卢珊,高红燕,张宏芳. 基于信息扩散方法的秦岭北麓汛期暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 中国农学通报,2015,31(29):235-240.
- [14] 孙燕玲,闫爱霞,王健. 基于信息扩散理论的淄博市高影响天气关注度研究[J]. 陕西气象,2023(2):74-80.
- [15] 邹德全,邹承立,田洪进,等. 基于信息扩散技术的遵义市暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 安全与环境学报,2022,22(4):2070-2077.
- [16] 王学强,孟雪峰. 基于信息扩散理论的暴风雪变化特征及风险研究[J]. 内蒙古气象,2021(2):20-24.
- [17] 段莹,龙俐,胡欣欣. 基于信息扩散理论的贵州省高温分布特征及风险分析[J]. 中低纬山地气象,2021,45(4):23-29.
- [18] 汪宝龙,张明军,魏军林,等. 西北地区近 50 a 气温和降水极端事件的变化特征[J]. 自然资源学报,2012,27(10):1720-1733.
- [19] 李凤,李毅,于强,等. 1961—2019 年陕西省极端旱涝事件的时空演变规律[J]. 陕西气象,2020(6):23-29.
- [20] 焦美龄,路亚奇,王燕凌. 1965—2015 年庆阳塬区气温和降水极端事件分析[J]. 中国农学通报,2017,33(12):74-81.
- [21] KARL T R,NICHOLLS N,GHAZI A. CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes;workshop summary[J]. Climatic Change,1999,42:3-7.
- [22] 田晓璐. 卫辉市大风灾害风险区划及评价[J]. 陕西气象,2021(3):55-60.
- [23] 王洁,张中杰,曲晓黎,等. 基于层次分析法的朔黄铁路暴雨灾害风险评估[J]. 气象科技,2022,50(6):870-877.
- [24] 周静静,张晓敏,赵法锁,等. 陕南秦巴山区地质灾害危险性评价研究[J]. 地质力学学报,2019,25(4):544-553.