

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.05.020

基于概率统计的河北省暴雨致灾风险评估

侯奇奇^{1,2}, 景华^{1,3}, 高宇俊^{1,2}, 耿雪莹^{1,2}, 杨帅^{1,2}, 胡会芳³

1. 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050000; 2. 廊坊市气象局, 河北 廊坊 065000;
3. 河北省气象灾害防御中心, 石家庄 050000

摘要: 根据河北省142个气象观测站点逐日逐小时降水资料, 提取降水量、降水强度、降水历时、降水分布4个暴雨过程评价指标, 基于百分位分布和概率统计方法, 建立暴雨致灾风险评估模型。结果表明, 暴雨致灾风险与降水量、降水强度、降水历时以及降水分布等因素紧密相关, 其中降水量影响最大, 其次为降水强度、降水历时; 暴雨过程发生频次随暴雨致灾能力综合指数E值呈现先增大后减少的偏正态分布趋势, 在2.0~3.5之间发生次数最多; 暴雨致灾概率和历史个例平均直接经济损失与风险等级呈正相关关系, 致灾风险IV级暴雨过程致灾概率小, 造成的平均直接经济损失低, III、II级暴雨过程致灾概率和平均直接经济损失依次增大, I级暴雨灾害过程致灾概率最大, 可达92%, 造成直接经济损失最大, 危险性极高。

关键词: 暴雨致灾风险; 综合指数; 概率统计; 评估模型

中图分类号: P426.616

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2022)05-0178-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Risk Assessment of Heavy Rain in Hebei Province Based on Probability Statistics

HOU Qiqi^{1,2}, JING Hua^{1,3}, GAO Yujun^{1,2},
GENG Xueying^{1,2}, YANG Shuai^{1,2}, HU Huifang³

1. Hebei State Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment, Shijiazhuang 050000, China;
2. Langfang Meteorological Bureau, Langfang Hebei 065000, China;
3. Hebei Meteorological Disaster Prevention Center, Shijiazhuang 050000, China

Abstract: With the daily and hourly precipitation data from 142 meteorological observation stations in Hebei Province, four evaluation indexes of rainstorm process including precipitation, precipitation intensity, precipitation duration, and precipitation distribution were extracted. A model for risk assessment of rainstorm disaster was established based on percentiles distribution and probability statistics methods. The re-

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 河北省省级科技计划项目(18225346); 环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201803); 廊坊市气象局科研项目(2021-07)。

作者简介: 侯奇奇, 硕士, 主要从事气象灾害风险评估研究。

通信作者: 景华, 高级工程师。

sults showed that the disaster risk of heavy rain is closely related to factors such as precipitation, precipitation intensity, precipitation duration, and precipitation distribution. Among them, precipitation has the largest impact, followed by precipitation intensity and precipitation duration. The frequency of historical torrential rain processes occurred showed a partial normal distribution trend that first increased and then decreased with the change of the comprehensive index of rainstorm disaster-causing ability (E), and occurred most frequently between 2.0 and 3.5. The disaster probability of heavy rain and the average direct economic loss of historical individual cases were positively correlated with the risk level. The disaster caused by disaster risk probability of class IV rainstorm process is small, and the average direct economic loss is low. The hazard probability and the average direct economic loss of class III and II rainstorm process increase sequentially. The class I rainstorm disaster process has the greatest disaster probability, reaching 92%, causing the greatest direct economic loss and extremely dangerous.

Key words: rainstorm risk; comprehensive index; probability statistics; assessment model

河北省地处华北平原,东临渤海湾,西倚太行山,地形复杂,气候多样,是气象灾害多发、频发省份。暴雨洪涝是河北省最严重的气象灾害之一,据统计,河北省平均每年有72个县(市)出现暴雨洪涝灾害,占全部气象灾害造成直接经济损失的35.24%^[1]。灾害评估是防灾、减灾、救灾的重要环节,在评价防灾、减灾效益,制定防灾、减灾决策和社会经济发展规划中起着重要作用^[2]。关于暴雨洪涝灾害风险的研究,前人已经开展大量工作。宋楠等^[3]基于分布式水文模型HBV-D对河流暴雨洪涝灾害的临界面雨量阈值进行研究。杨秋珍等^[4]通过建立淹水程度机理模型对叶菜暴雨涝害损失开展综合评估。陈艳秋等^[5]对区域性暴雨事件历史资料进行统计,利用概率统计分析建立暴雨事件评估模型。牛叔超等^[6]用概率分布统计、马尔科夫模型和统计决策理论对致洪大暴雨开展风险评估和最优决策。陈亚宁^[7]采用灰色聚类分析的方法对新疆暴雨洪水灾害进行了灾情损失评估和灾害等级划分。袁慧敏等^[8]通过计算平均降水量、降水强度、覆盖范围和持续时间4个评估指标的分布概率密度函数的反函数,以数年一遇的概率等级作为等级标准,建立暴雨过程综合评估模型。程肖侠等^[9]采用等级评估、序位评估方法对单站单日暴雨进行暴雨等级评估,并建立反映单站暴雨过程的综合评估指数。韩秀君等^[10]通过分析暴雨常规资料和灾情资料,对历史暴雨过程进行评估,应用统计分析方法,建立暴雨致灾指标与灾害影响预评估的关系。石艳等^[11]利用平均降水量、降水强度和覆盖范围3个指标,建立基于距离函数的暴雨事件快速评估模型。吴振玲等^[12]利用欧氏距离等数学方法,针对暴雨灾害的平均降水强度、最大降水影响范围、持续时间等方面,研究海河流域暴雨灾害的气象评估模型。王莉萍等^[13]基于百分位分布和概率统计对评价指标进行精细化指数划分,建立降水过程综合强度评估模型。刘慧等^[14]基于突变理论,从致灾因子、孕灾环境、承灾体和防灾减灾能力4个方面,综合分析了衡阳暴雨灾害风险的时间演变和空间变化情况。目前,关于河北省暴雨洪涝灾害风险的系统研究还相对较少,本研究基于河北省暴雨洪涝历史个例,建立河北省暴雨致灾风险评估模型,开展暴雨洪涝灾害定量评估,结合历史灾情数据对其进行验证,对于准确发布河北省暴雨灾害天气预警,制定科学防灾、减灾、救灾决策具有重要意义。

1 资料来源及方法

1.1 暴雨资料来源

本研究采用2004—2019年河北省气象数据和暴雨洪涝灾情数据,其中,气象资料选取河北省142个气象观测站点2004—2019年的逐日(20时—20时)、逐小时气象资料,来自河北省气象信息中心。2004—2018年历史暴雨个例资料来自河北省气象台,2004—2019年暴雨洪涝灾情数据来自河北省气象灾害防御

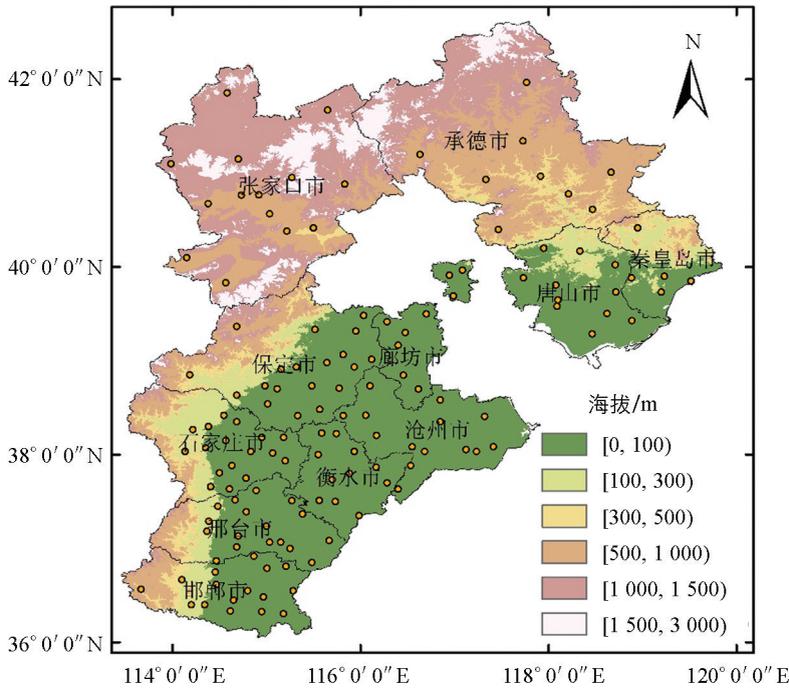
中心灾情数据库, 主要包括灾情发生时间、直接经济损失、受灾人口等. 河北省地形图由国家基础地理信息中心提供的审图号为 GS(2016)3149 号的标准地图制作.

1.2 资料处理

根据河北省 142 个气象观测站点逐日降水资料, 筛选观测站日降水量 ≥ 50 mm 的观测记录, 结合河北省气象台提供的 2004—2018 年暴雨个例、影响系统以及暴雨灾害过程资料, 归纳整理 2004—2018 年 104 个暴雨过程和 2019 年 8 个暴雨过程. 考虑河北省地形复杂多样, 根据河北省山脉分布情况, 将海拔 ≥ 100 m 的气象站点划分为山地站点, 其余为平原站点(图 1). 根据逐日、逐小时降水资料, 统计历史暴雨过程前 3 天降水量(R_{3d} , mm)、降水区平均降水量(R_{ave} , mm)、过程最大降水量(R_{max} , mm)、最大日降水量(R_{dmax} , mm)、最大小时雨强(R_{hmax} , mm/h)、过程总历时(T_{all} , h)、站点平均历时(T_{ave} , h)、过程降水站次(D_r , 个)、过程暴雨站次(D_{hr} , 个)、山地暴雨站次(D_{mhr} , 个)、过程受灾人口(万人)、直接经济损失(万元)等, 建立暴雨灾害影响数据库. 其中, 为去除经济损失的年际影响, 将历史暴雨过程造成的直接经济损失进行修正, 将其全部修订到 2018 年.

$$S = S_0 \times E_{2018} / E_{\text{当年}}$$

式中: S 为修正后的直接经济损失(万元); S_0 为某次暴雨过程造成的直接经济损失(万元); E_{2018} 为 2018 年河北省 GDP 值(万元); $E_{\text{当年}}$ 为该次暴雨过程发生当年河北省 GDP 值(万元).



审图号: GS(2016)3149.

图 1 河北省地形和气象站点分布

1.3 选取暴雨致灾能力评估指标

根据前人对暴雨致灾要素的研究^[11-13]以及进行专家咨询, 结合暴雨洪涝致灾特点, 选取降水量(E_a)、降水强度(E_p)、降水分布(E_d)和降水历时(E_t)4 类评估指标来评价暴雨致灾能力. 暴雨洪涝灾害是承灾体和暴雨过程综合作用的后果, 前期降水造成的土壤水分饱和、河道水位上涨等, 会与后期暴雨过程产生的降水效应叠加, 使得暴雨过程致灾危险性增大^[15]. 为更好表征前期降水和暴雨过程对致灾能力的影响, 选取过程前 3 日降水量、降水区平均雨量以及过程最大降水量 3 个因素作为降水量(E_a)的评价指标. 暴雨强度表示单位时间内单位面积上的降雨量, 选取最大日降水量和最大小时雨强作为表征降水强度(E_p)的评价指标. 地形高度的增加, 能明显扩大地面降水分布范围, 地面最大降水量也有所增加^[16], 且山区暴雨是

触发崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害的重要外界条件, 给人民生命财产安全带来极大威胁^[17]. 为更好研究地形对暴雨致灾能力的影响, 本研究选取降雨站次比、暴雨站次比、山地暴雨站次比 3 个评价指标来判定降水分布指标(E_d). 由于天气系统的移动性和过程性, 不同站点降水过程的起止时间和持续时间存在差异, 综合考虑暴雨过程的过程性、移动性以及局地性, 选取降雨过程总历时和降水区站点平均小时历时作为降水历时指标(E_t)的评价指标, 各项指标权重通过层次分析法^[18]确定. 具体如表 1 所示. 为消去单位量纲不同所造成的影响, 在计算时所用资料都经过标准化处理.

表 1 暴雨评估指标选取

评估层	指标层		权重
降水量(E_a)	前 3 天降水量	R_{3a}	0.22
	平均降水量	R_{ave}	0.39
	过程最大降水量	R_{max}	0.39
降水历时(E_t)	过程总小时历时	T_{all}	0.40
	站点平均小时历时	T_{ave}	0.60
降水分布(E_d)	降水比例	$D_r/142$	0.22
	暴雨比例	D_{hr}/D_r	0.39
	山地暴雨比例	D_{mhr}/D_r	0.39
降雨强度(E_p)	最大日降水量	R_{dmax}	0.60
	最大小时雨量	R_{hmax}	0.40

1.4 建立暴雨致灾风险评估模型

统计降水量(E_a)、降水强度(E_p)、降水分布(E_d)和降水历时(E_t)概率分布特征, 根据不同暴雨评估指标发生概率, 按照百分数构建标准矩阵 A (表 2), 通过与历时资料对比, 将降水历时(E_t)等幅增加 0.2 以提高降水历时在致灾风险评估中的精准度. 经过无量纲处理, 建立无量纲等级标准矩阵 A^* (表 3), 通过计算矩阵 A^* 各行向量的标准差 S_i^* 与均值 μ^* , 计算各评估指标变异系数为 w_i^* , 对变异系数归一化后, 为提高指标区分度, 将归一化后的变异系数扩大 10 倍后计算得到各指标的权重(表 4).

表 2 暴雨洪涝等级标准矩阵 A

百分位	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
降水量(E_a)	0.071	0.091	0.111	0.133	0.160	0.181	0.214	0.261	0.341	0.850
降水历时(E_t)	0.153	0.214	0.252	0.284	0.314	0.337	0.372	0.424	0.500	0.950
降水分布(E_d)	0.193	0.239	0.277	0.308	0.336	0.360	0.421	0.458	0.486	0.710
降雨强度(E_p)	0.2616	0.3027	0.3304	0.3471	0.3725	0.4036	0.4632	0.5347	0.6173	1.05

表 3 无量纲等级标准矩阵 A^*

百分位	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
降水量(E_a)	0.083	0.107	0.131	0.157	0.188	0.213	0.252	0.307	0.401	1
降水历时(E_t)	0.161	0.226	0.266	0.299	0.330	0.355	0.392	0.446	0.526	1
降水分布(E_d)	0.271	0.337	0.390	0.433	0.474	0.507	0.593	0.645	0.685	1
降雨强度(E_p)	0.249	0.288	0.315	0.331	0.355	0.384	0.441	0.509	0.588	1

表 4 评估指标权重值计算

评估指标	标准差 S_i^*	均值 μ^*	变异系数 w_i^*	权重
降水量(E_a)	0.256	0.284	0.901	3.91
降水历时(E_l)	0.224	0.400	0.560	2.43
降水分布(E_d)	0.200	0.533	0.374	1.63
降雨强度(E_p)	0.209	0.446	0.469	2.03

利用综合指标评价法,构建暴雨致灾能力综合指数 E ,建立暴雨致灾风险评估模型。

$$E = 3.91 * E_a + 2.43 * E_p + 1.63 * E_d + 2.03 * E_l$$

2 结果与分析

2.1 暴雨致灾风险等级划分

应用暴雨致灾风险评估模型,计算 2004—2018 年 104 个暴雨过程的暴雨致灾能力综合指数 E ,并绘制 E 的分布直方图(图 2),可知暴雨发生频次随 E 值变化呈先增加后减少的偏正态分布趋势,其中发生频次的峰值出现在 2.0~3.5 附近,且 E 值在 2.02~2.5 附近暴雨发生频次最高,其次为 2.9~3.5 附近。 E 值超过 5.0 的暴雨过程较少出现, E 值超过 5.5 的暴雨过程仅出现过 2 次,分别为 2012 年 7·21 和 2016 年 7·19 特大暴雨灾害过程,其中 2016 年 7·19 特大暴雨事件降雨强度大,持续时间长,累计雨量多,全省平均过程降水量 156.2 mm,分布范围覆盖全省,致灾能力综合指数 E 值达 7.69,为历史暴雨过程最高。

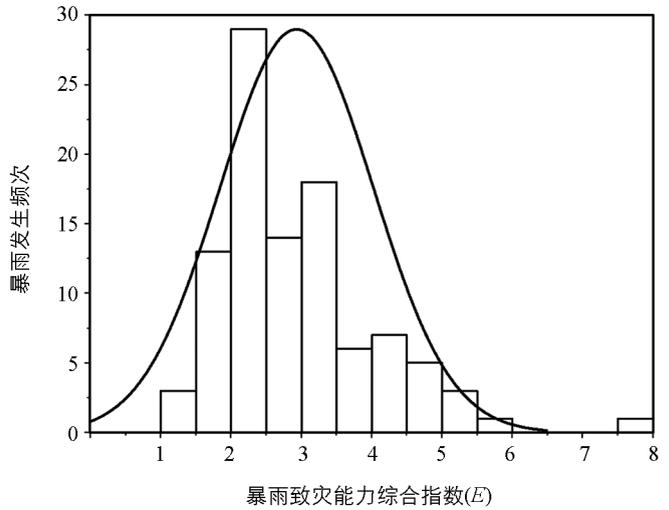


图 2 历史暴雨过程暴雨致灾能力综合指数 (E) 分布直方图

综合分析不同 E 值的暴雨过程发生概率,选取 20%,50%,75%百分数对应 E 值作为暴雨致灾风险等级划分阈值,将暴雨致灾风险分为低、较高、高、极高 4 个等级。其中, $E \geq 3.36$ 时,该暴雨过程致灾等级为极高级别,极易发生暴雨洪涝灾害,当 $2.76 \leq E < 3.36$ 时,暴雨洪涝灾害发生可能性高,致灾危险性为高级别,具体暴雨致灾风险等级的划分如表 5 所示。

表 5 暴雨致灾风险等级划分

暴雨致灾风险等级	E 指数范围	级别分值
极高	$E \geq 3.36$	I
高	$2.76 \leq E < 3.36$	II
较高	$2.04 \leq E < 2.76$	III
低	$E < 2.04$	IV

2.2 暴雨洪涝灾害模型验证

统计 2004—2018 年暴雨灾情历史资料,对不同等级暴雨过程的致灾概率和平均直接经济损失进行分析,对暴雨模型进行验证(表 6)。由表 6 可知,暴雨灾害风险等级的评估结论与历史灾情特点相对吻合。历史暴雨过程造成的直接经济损失与 E 值变化基本呈正相关, E 值越高,造成直接经济损失越大,暴雨过程致灾概率和平均直接经济损失均随致灾风险等级的升高而增大,其中 IV 级暴雨致灾概

率为 47.34%, 平均直接经济损失为 4 708.48 万元, III 级暴雨致灾概率为 80.65%, 平均直接经济损失为 6 096.87 万元, 当暴雨致灾风险等级达到 II 级时, 致灾概率为 88.00%, 平均直接经济损失达到 18 041.15 万元. I 级暴雨过程致灾概率最大, 为 92.00%, 其中包括造成河北省重大暴雨洪涝灾害的 2012 年 7·21 和 2016 年 7·19 特大暴雨过程^[19], 历史个例平均直接经济损失超过 30 亿元, 致灾危险性极高.

表 6 历史暴雨过程灾情统计结果

暴雨致灾风险等级	级别分值	致灾概率/%	平均直接经济损失/万元
极高	I	92.00	305 279.04
高	II	88.00	18 041.15
较高	III	80.65	6 096.87
低	IV	47.37	4 708.48

统计 2019 年 6—8 月 8 次全省性暴雨过程资料, 并对暴雨致灾风险评估进行验证(表 7). 可知 2019 年汛期未出现 I 级致灾风险的暴雨过程, 其中致灾风险为 IV 级的暴雨过程仅出现 1 次, 未造成经济损失, III 级致灾风险的暴雨过程共出现 4 次, 其中仅 7 月 5 日—7 月 7 日暴雨过程造成直接经济损失 2 555.6 万元, 致灾概率为 25%. II 级致灾风险暴雨过程出现 3 次, 均造成一定经济损失, 致灾概率达到 100%, 平均直接经济损失达 12 891.11 万元, 其中 8 月 11 日—8 月 13 日暴雨过程, 降水量最大, 降水历时最长, 致灾能力综合指数达 3.14, 造成直接经济损失最多, 为 28 400.00 万元, 与研究结果基本一致. 从表 7 中同时可以看出, 2019 年暴雨过程造成直接经济损失比历史暴雨过程损失少, 其原因可能与气象预报准确率提高和当地防灾、减灾水平提升有较大关系.

表 7 2019 年 6—8 河北省 8 次暴雨过程评估结果

降水过程	降水量 (E_a)	降水强度 (E_p)	降水分布 (E_d)	降水历时 (E_t)	致灾能力 综合指数(E)	致灾风险 等级	造成直接 经济损失/万元
2019/7/5—2019/7/7	0.12	0.23	0.27	0.51	2.51	III	2 555.60
2019/7/9—2019/7/10	0.12	0.19	0.33	0.33	2.16	III	0
2019/7/16—2019/7/17	0.04	0.15	0.28	0.32	1.64	IV	0
2019/7/22—2018/7/23	0.10	0.21	0.31	0.34	2.09	III	0
2019/7/28—2019/7/30	0.19	0.37	0.44	0.46	3.27	II	9 874.53
2019/8/1—2019/8/2	0.19	0.25	0.21	0.37	2.44	III	0
2019/8/9—2019/8/10	0.18	0.38	0.31	0.38	2.91	II	398.80
2019/8/11—2019/8/13	0.25	0.22	0.25	0.59	3.14	II	28 400.00

3 结论与讨论

通过对 2004—2019 年河北省暴雨历史资料进行了统计, 在概率统计分析的基础上, 对降水量、降水强度、降水分布和降水历时 4 个指标进行基于百分数的客观分级, 建立暴雨洪涝等级标准矩阵, 求取暴雨致灾能力综合指数(E), 建立暴雨致灾风险评估模型, 具体结果如下:

根据暴雨致灾能力综合评估指数(E)概率分布特征, 将河北省暴雨灾害风险分为低、较高、高、极高 4 个等级. 暴雨过程频次随 E 值变化呈现先增大后减少的偏正态分布趋势, III 级暴雨过程发生次数最多, 其次为 IV 级, I 级暴雨过程次数最少. 暴雨致灾概率和平均直接经济损失与致灾风险等级呈正相关关系, IV 级暴雨过程造成平均直接经济损失最低, III、II 级暴雨过程造成平均直接经济损失依次增大, I 级暴雨灾害过程致灾概率最大, 造成平均直接经济损失最大, 危险性极高.

利用历史暴雨过程资料,构建包含灾情数据的暴雨灾害影响数据库,综合分析降水量、降水强度、降水分布以及降水历时对暴雨致灾风险的影响,建立暴雨致灾风险评估模型,在有效利用暴雨预报资料的基础上,对暴雨致灾风险进行预评估,在实际应用中具有一定的统计意义和业务参考价值.另外,自然灾害风险评估是致灾因子,孕灾环境,承灾体以及防灾、减灾能力综合作用的结果,而在本研究中,仅考虑了暴雨过程的气象致灾因子和部分地形(山地、平原)因素,今后可结合具体地形中坡度、坡向对暴雨致灾影响,不同地区承灾体暴露程度等,对不同地市甚至县级区域开展精细化、量化暴雨致灾风险评估,为科学预判气象灾害风险变化趋势和特点,有效开展气象灾害防御提供科学决策依据.

参考文献:

- [1] 孙霞,俞海洋,孙斌,等.河北省主要气象灾害时空变化的统计分析[J].干旱气象,2014,32(3):388-392.
- [2] 李春梅,刘锦奎,潘蔚娟,等.暴雨综合影响指标及其在灾情评估中的应用[J].广东气象,2008,30(4):1-4.
- [3] 宋楠,马振峰,范广洲,等.基于分布式水文模型的嘉陵江流域暴雨洪涝致灾风险阈值研究[J].西南大学学报(自然科学版),2018,40(2):186-192.
- [4] 杨秋珍,李军,谈建国,等.上海暴雨涝害和叶菜损失综合评估模型及其应用[J].自然灾害学报,1997,6(4):104-114.
- [5] 陈艳秋,袁子鹏,盛永,等.基于概率分析的暴雨事件快速评估模型[J].气象与环境学报,2006,22(5):62-65.
- [6] 牛叔超,朱桂林,刘月辉.致洪大暴雨的风险评估及气象效益[J].气象科技,2000,28(1):30-32,35.
- [7] 陈亚宁.灾害损失评估的灰色聚类分析[J].西北大学学报(自然科学版),1999,29(6):551-555.
- [8] 袁慧敏,王秀荣,范广洲,等.长江中下游沿江地区暴雨过程综合评估模型及应用[J].气象,2012,38(10):1189-1195.
- [9] 程肖侠,梁奇琛,蔡新玲.陕西省单站暴雨特征及评估方法[J].干旱区地理,2014,37(1):66-73.
- [10] 韩秀君,孙晓巍,李爽,等.辽宁暴雨致灾指标及灾害影响预评估[J].气象与环境学报,2014,30(6):80-84.
- [11] 石艳,李怀志.贵州省区域性暴雨事件快速评估模型研究[J].贵州气象,2012,36(6):36-37,39.
- [12] 吴振玲,史得道,吕江津,等.利用欧氏距离函数评估海河流域暴雨灾害[J].灾害学,2012,27(3):48-53.
- [13] 王莉萍,王秀荣,张立生,等.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,2018,44(11):1479-1488.
- [14] 刘慧,刘波,许霞,等.基于突变理论的湖南衡阳暴雨灾害风险评估[J].灾害学,2019,34(3):221-226.
- [15] 史瑞琴,刘宁,李兰,等.暴雨洪涝淹没模型在洪灾损失评估中的应用[J].暴雨灾害,2013,32(4):379-384.
- [16] 廖菲,胡娅敏,洪延超.地形动力作用对华北暴雨和云系影响的数值研究[J].高原气象,2009,28(1):115-126.
- [17] 刘玉平,杨丽娜,梁钰.邢台西部山区地质灾害形成的成因分析[J].地质灾害与环境保护,2008,19(2):33-37.
- [18] 程乾生.层次分析法 AHP 和属性层次模型 AHM [J].系统工程理论与实践,1997,17(11):26-29.
- [19] 孙玉龙,张素云,赵铁松,等.河北省“7·19”特大暴雨灾害评估和分析[J].中国水利,2018(3):44-45.

责任编辑 包颖