氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

基于优势分析法的河北省暴雨对房屋致灾阈值研究

孙玉龙 王丽荣 张琪 李婷 魏铁鑫

Threshold Research of Rainstorm Disaster on the Houses in Hebei Province Based on Dominance Analysis Method

SUN Yulong WANG Lirong ZHANG Qi LI Ting WEI Tiexin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20099

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

西南地区两次典型大暴雨环境场的对比分析

Comparative Analysis of Environmental Fields of Two Typical Rainstorm Cases in Southwest China

气候与环境研究. 2019, 24(1): 73 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18043

利用慢特征分析法提取二维非平稳系统中的外强迫特征

Extracting the Driving Force Signal from Two-dimensional Non-stationary System Based on Slow Feature Analysis

气候与环境研究. 2018, 23(3): 287 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17097

基于短时强降水特征的北京暴雨蓝色预警指标研究

A Study on the Blue Rainstorm Warning Index Based on Characteristics of Short-Period Heavy Rainfall in Beijing

气候与环境研究. 2018, 23(3): 268 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17089

基于人工智能技术的热带气旋灾害评估方法研究:以广东省为例

A Study on Evaluation Method of Tropical Cyclone Disaster Assessment Based on Artificial Intelligence Technology:Taking Guangdong Province as an Example

气候与环境研究. 2018, 23(4): 504 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18001

长江中下游地区近年暴雨变化特征研究

Variation Characteristics of Rainstorms in Middle-Lower Reaches of the Yangtze River in Recent 60 Years

气候与环境研究. 2019, 24(6): 755 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19075

2013年“苏力”台风西行登陆引发闽南大暴雨成因的模拟研究

A Numerical Investigation of the Formation Mechanism for the Extremely Heavy-Rain Event in Southern Fujian Induced by Westward-Moving Typhoon Soulik in 2013

气候与环境研究. 2017, 22(3): 365 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16181

关注微信公众号，获得更多资讯信息

孙玉龙, 王丽荣, 张琪, 等. 2021. 基于优势分析法的河北省暴雨对房屋致灾阈值研究 [J]. 气候与环境研究, 26(3): 289−298. SUN Yulong, WANG Lirong, ZHANG Qi, et al. 2021. Threshold Research of Rainstorm Disaster on the Houses in Hebei Province Based on Dominance Analysis Method [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (3): 289−298. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20099

基于优势分析法的河北省暴雨对房屋致灾阈值研究

孙玉龙[1, 2] 王丽荣[1] 张琪[3] 李婷[1] 魏铁鑫[1]

1 河北省气象灾害防御中心，石家庄 050021
2 河北省气象与生态环境重点实验室，石家庄 050021
3 南京信息工程大学应用气象学院，南京 210044

摘 要 利用河北省 1984～2014 年 142 个国家气象站的降水资料和历史灾情，以房屋为承灾体，基于优势分析法确定致灾因子的影响权重，构建暴雨综合致灾指数模型。以影响环境脆弱性的要素为指标，运用 K-mean 聚类分析法将河北省分成 5 个区域，采用指数函数拟合房屋损失与综合致灾指数的关系，反推出各个类型区不同灾情等级对应的综合致灾指数阈值，并通过 2015～2019 年的 124 个灾情案例进行验证。结果表明：河北省暴雨造成的房屋灾情事件发生次数总体呈现出北多南少的特征，北部山区普遍在 10 次以上。致灾因子中过程总雨量的影响权重最大，为 68%，最大日降水量、持续日数、过程最大小时雨强所占权重分别为 22%、6% 和 4%。模拟灾情的最佳等级分割点为损坏房屋 1180、335、235 间，此时模拟灾情等级与实际灾情等级一致的比例最高（67.4%）。阈值检验中，2015～2019 年灾情案例的准确率为 69.8%，轻度灾情等级的准确率最高。

关键词 暴雨 房屋 致灾阈值 优势分析法
文章编号 1006-9585(2021)03-0289-10 **中图分类号** P429 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20099

Threshold Research of Rainstorm Disaster on the Houses in Hebei Province Based on Dominance Analysis Method

SUN Yulong[1, 2], WANG Lirong[1], ZHANG Qi[3], LI Ting[1], and WEI Tiexin[1]

1 *Hebei Meteorological Disaster Prevention Center*, *Shijiazhuang* 050021
2 *Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province*, *Shijiazhuang* 050021
3 *College of Applied Meteorology*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

Abstract The influence weights of the disaster factors were determined to construct a comprehensive hazard index model based on the dominance analysis method with the houses as the disaster-bearing bodies by using the precipitation data of 142 national meteorological stations in Hebei Province and the historical disaster data from 1984 to 2014. Taking the environment vulnerability elements as indicators, Hebei was divided into five regions based on the K-mean clustering analysis method. An exponential function was used to fit the change of house loss and comprehensive index. The thresholds of different grades in each district were then determined and verified by 124 cases from 2015 to 2019. Results showed that the number of housing disasters caused by heavy rain in the north was higher than that in the south, with more than 10 times in the mountainous area. The influence weight of the total rainfall process (68%) was the largest. The weights of the maximum daily rainfall, duration, and maximum hourly rainfall were 22%, 6%, and 4%. The best

收稿日期 2020-08-11；**网络预出版日期** 2021-03-03
作者简介 孙玉龙，男，1991 年出生，硕士，工程师，主要从事气象灾害风险评估方面的研究。E-mail: fengxuelone@163.com
通讯作者 王丽荣，E-mail: wlr_wzy@163.com
资助项目 河北省科技厅重点研发项目 19275408D
Funded by Key Research and Development Project of Science and Technology Department of Hebei Province (Grant 19275408D)

classification points of simulated disaster were 1180, 335, and 235 damaged houses, and the proportion of the simulated disaster level consistent with the actual disaster level was the highest (67.4%). In the threshold test, the accuracy rate of disaster cases from 2015 to 2019 was 69.8%, and the accuracy rate of the mild disaster level was the highest.

Keywords Rainstorm, House, Disaster threshold, Dominance analysis approach

1 引言

全球变暖的背景下，极端天气气候事件频发，其中暴雨灾害是发生较为频繁、危害较严重的气象灾害之一（Zhai et al., 2005; Fujibe et al., 2006; 赵凡等, 2014）。河北省地形复杂，境内有七大水系，各河上游山高坡陡、源短流急，且河道上宽下窄，极易引发暴雨洪涝灾害。同样的暴雨过程作用在不同类型的承灾体上，如农田、道路、房屋，受灾程度会截然不同（葛鹏和岳贤平, 2013; 金有杰等, 2014）；即使是同类型的承灾体，由于承灾体所处的环境和内部结构特征的差异，受灾程度也会有很大差异（张斌等, 2010; Wu et al., 2011）。暴雨引发洪水、内涝导致房屋倒塌是威胁城乡居民人身和财产安全的一大隐患，房屋是暴雨灾害影响的一种重要承灾体（杨辰等, 2015）。随着社会经济的发展，城乡房屋及房屋内财产经济价值总量增加，暴雨导致房屋损坏所造成的经济损失更为严重（樊高峰等, 2012; 林琳, 2013）。在暴雨性天气发生前，为各级政府部门提供有针对性的灾害预估信息，是有关部门有效组织避险防灾等工作的重要依据，是气象部门决策服务的首要工作和迫切需要解决的问题。因此有必要加强暴雨对房屋致灾阈值的研究。

目前，国内已有一些关于暴雨致灾阈值方面的研究，史军等（2016）利用时空过程分析法研究了暴雨积水与降水强度以及累积雨量的关系，建立了上海市中心城区暴雨内涝的阈值指标；郭广芬等（2009）采用耿贝尔极值Ⅰ型分布和百分位方法确定湖北省暴雨洪涝各等级的阈值；刘耀龙等（2011）以温州市为例，通过随机抽样调查问卷的方法研究暴雨内涝灾造成的房屋损失；李茜等（2015）利用陕西省自动站实时暴雨数据、历年暴雨灾情数据、地理数据和社会经济数据，采用主成分分析法、层次分析法，并结合 GIS 技术，构建了陕西省农业暴雨灾害风险度实时评估模型；赖文泽（2016）利用多智能体理论构建了暴雨洪涝房屋风险动态评估概念体系，并对淮河流域真实地理环境的暴雨洪涝房屋风险进行了动态评估。暴雨导致房屋损失，一方面是由局地强降水导致积水或诱发洪水对房屋冲刷引起（朱政等, 2011; 韩秀君等, 2014; 翁莉等, 2015），另一方面是与不同地区的环境脆弱性有关（陆敏等, 2010）。而在以往的研究中，较少考虑到环境脆弱性对致灾阈值的影响，且没有与实际的灾情损失建立联系，目前，从预报预警角度，专门针对河北省房屋这一重要影响对象开展的暴雨致灾阈值研究较少。

针对以上问题，本研究利用河北省历史降水资料和实际灾情数据，构建暴雨综合致灾指数模型，以影响环境脆弱性的要素为指标，对河北省进行分区研究，通过实际灾情确定不同分区的综合致灾指数阈值，并辅以验证，以期为河北省暴雨灾害的风险预警和防御提供技术支撑。

2 数据与方法

2.1 研究区概括

河北省地处季风气候区，东临渤海，西依太行山，北靠蒙古高原，南部为华北大平原，地势西北高、东南低，南北跨越 6.5 个纬距，海拔落差 2000 余米（图 1），属于灾害多发省份；夏季降水集中，且降水量占全年总降水量的 70% 左右，容易引发暴雨洪涝灾害。2016 年 7 月 19～21 日，河北省出现了自“63·8”特大暴雨以来最强暴雨天气过程，此次暴雨共造成全省 10.499 万间房屋倒塌，严重损坏房屋 12.498 万间，一般损坏房屋 33.260 万间，全省直接经济损失约 574.57 亿元（陈小雷, 2018）。

2.2 数据来源

气象数据为河北省 1984～2019 年 142 个国家地面观测站的逐日降水资料，来自河北省气象局。灾情数据来自河北省各市档案局、救灾办、水利局、气象局、民政厅等单位以及《中国气象灾害大典（河北卷）》、报表文件等资料，经过逐条核对、审查剔除异常和除重，构建房屋暴雨灾害案例库。地理信息数据包括 30 m 分辨率数字化高程模型（Digital Elevation Model, DEM）数据、2015 年河北省土地利用类型数据和行政区划矢量数据，来自

河北省第三测绘院。

2.3　灾情数据校正

由于不同年代间房屋自身脆弱性的差异，进行长时间序列的暴雨灾情研究时，需要进行年代校正，以增强不同年代间灾情损失数据的可比性。根据历史灾情数据计算各个时期（每 5 年为一个时期，第一时期为 6 年）所有灾情案例的房屋损失间数平均值和案例对应的五日累积降水量平均值，得到各个时期单间房屋损坏所需的雨量，以 2010～2014 年为基准时期，将各个时期的单位损失雨量与基准时期的比值作为校正系数（表 1），房屋实际损失间数乘以年代校正系数，即为 2010～2014 年房屋脆弱性水平下的损失量。校正后的房屋损失间数与过程降水量相关系数较校正前有显著提高，由 0.340 提高到 0.435，都达到了极显著水平。因此，本研究统一采用年代校正后的房屋损失数据。

2.4　环境脆弱性指标处理

由于不同类型地区的环境脆弱性存在显著差异，同样强度同样持续时间的暴雨作用在不同地区，造成的房屋损失会有不同，因此选取与暴雨导致房屋损失相关的要素作为指标进行分区研究：土地利用类型数据（草地面积、林地面积、农用地面积、水域面积）；与地形有关的平均海拔、地形起伏；居民地的洼地面积（分城镇和农村）以及居民地密度。

表 1　河北省 1984 ~ 2014 年间年代房屋损失校正系数

Table 1　Age correction factor for housing losses in Hebei Province during 1984−2014

时间	平均损失/间	平均雨量/mm	单位损失雨量/mm	校正系数	校正后平均损失/间
1984～1989年	2675.62	116.83	0.04	0.88	2354.55
1990～1994年	1539.03	125.39	0.08	1.63	2508.62
1995～1999年	10236.24	161.79	0.02	0.32	3275.60
2000～2004年	2309.23	131.70	0.06	1.14	2632.52
2005～2009年	369.94	75.21	0.20	4.07	1502.00
2010～2014年	1682.89	83.98	0.05	1.00	1682.89

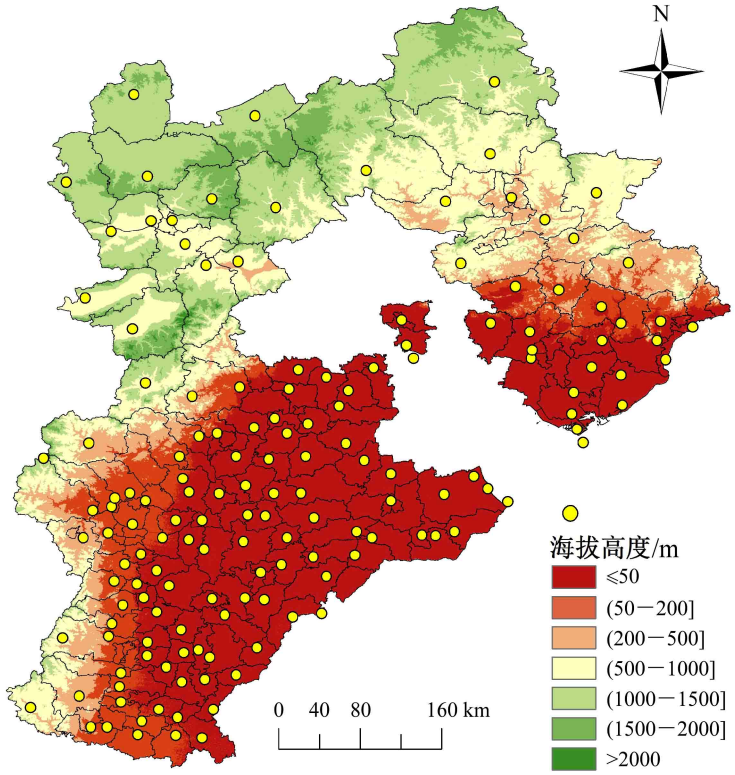

图 1　河北省地形及国家标准气象站分布

Fig. 1　Distribution of topographic and national standard weather stations in Hebei Province

相关指标的处理过程如下：1）以土地利用类型数据为基础，提取各县草地、林地、农用地、水域面积（王思远等, 2001），将各县市的各土地利用类型面积与县域总面积的比值作为分区因子指标值。2）将全省 30 m 分辨率的 DEM 数据经洼地填充处理（周蕾等, 2017）后，计算各县内所有栅格的海拔高度平均值作为平均海拔；所有栅格海拔高度的标准差作为地形起伏指标值。3）提取城镇和农村居民地范围，将低洼地的面积占居民地面积的比值作为居民地洼地面积指标值。4）提取各县范围内居民地个数，将居民地个数与县域面积的比值作为居民地密度的指标值。

2.5 优势分析法

传统的确定要素相对重要性的方法有斜率基础指标法，如回归系数等，存在的主要问题是当模型中增加或减少自变量时两个自变量相互间的关系可能会发生改变。因而采用传统方法确定指标的相对重要性可能有误差。

优势分析方法（Azen and Budescu, 2003）是将全模型所衍生出的所有子模型进行全面比较分析后，再对各自变量的相对重要性进行分析。其判定各自变量之间相对重要性的标准为：在所有子模型中，各自变量的总平均贡献值占模型方差的百分比。判定的相对重要性不会夸大或忽视任一自变量对因变量的重要性，解决了采用传统的斜率基础指标和方差降低指标判定法所存在的问题。因此，本研究采用优势分析法确定与暴雨灾害密切相关的致灾因子的影响权重。

3 结果与分析

3.1 房屋损坏事件次数的空间分布

河北省 1984～2014 年各县市发生暴雨房屋灾情事件次数的空间分布总体呈现出北多南少的特征（图 2），北部山区（尤其张家口和承德）普遍在 10 次以上，次数最多的为承德市丰宁满族自治县，多达 28 次；分布在南部平原地区的暴雨房屋受损灾情事件少，大多低于 5 次，部分县市在该时间范围内未出现过暴雨导致房屋受损灾情。

3.2 环境分区

不同类型区之间环境脆弱性差异较大，暴雨对房屋的致灾程度会有较大的不同，因此需要分区研究致灾阈值。河北省地理环境具有以下特征：草地和林地在山区分布多，平原区分布少，农用地空间分布规律则正好相反；水域面积无明显的空间分布规律，在沿海地区分布较多；山区和平原地区的地

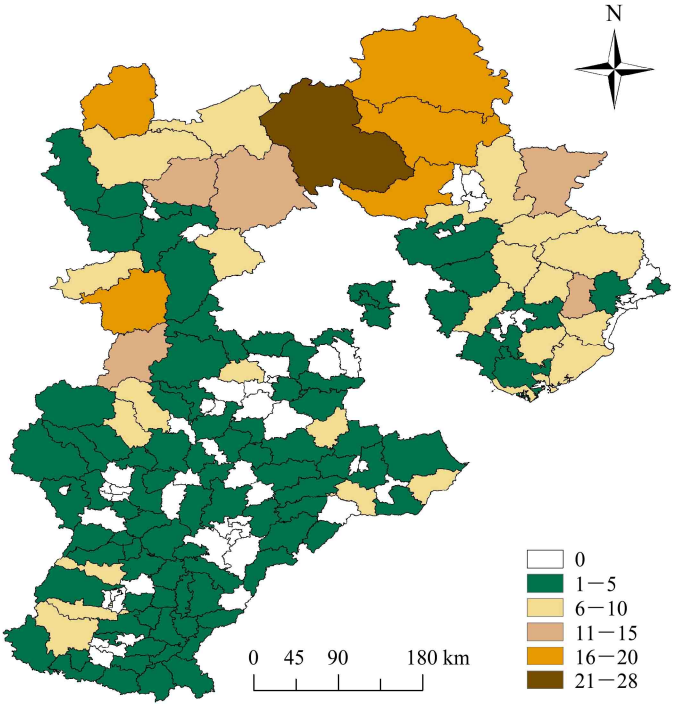

图 2 河北省 1984～2014 年各县发生暴雨房屋灾情事件个数分布

Fig. 2 Distribution of the number of rainstorm-house disasters in Hebei Province from 1984 to 2014

形起伏度差别很大，在平原区沿海区域地形起伏较小；平原地区居民地分布密集，山区分布整体稀疏，但西北部山区几个县市的居民地分布较密集。采用 K-mean 聚类分析法（王千等, 2012），综合考虑河北省的环境特征及分区连续度，最后确定为 5 个分区：I 区为沿海平原区，平均海拔最低，同时水域面积大（水库、坑塘为主）；II 区为平原山地过渡区，地势起伏开始明显增大；III 区为北部高山区，地势起伏大，IV 区为西部低山区，环境受人为扰动较大；V 区为内陆平原区，地形平坦，降水较沿海平原区少（图 3）。

3.3　暴雨综合致灾指数模型

选取与暴雨致灾密切相关的降水过程雨量、最大日降水、持续日数、过程最大小时雨强作为致灾因子，与案例灾情数据进行相关分析，4 个因子与灾情的相关系数分别为：0.496、0.268、0.167 和 0.170。可见，这 4 个因子对暴雨房屋灾害的发生都存在影响，但是持续日数和过程最大小时雨强这两个因子与灾情数据的相关性较低，降水过程雨量和最大日降水为主要致灾因子。

采用优势分析法构建暴雨综合致灾指数模型，全模型中含有 4 个预测变量（过程雨量 X_1、过程最大日降水量 X_2、持续天数 X_3、最大小时雨强 X_4），以房屋损失间数为因变量，当各预测变量被加入到不含该预测变量自身的子模型后，计算该变量所带来的增值贡献，各个致灾因子的总平均贡献度百分比表示各自的重要程度（表 2）。可以看到，在对房屋损失进行预测时，致灾指标中过程总雨量的贡献度最高，为 68%；最大日降水量次之，为 22%；持续天数和最大小时雨强贡献率较低，分别为 6% 和 4%。

为了使 4 个预测变量具有可比性，将数据进行标准化处理，计算所有暴雨灾情案例的过程雨量、最大日降水、连续日数、最大小时雨强的样本平均值，分别为 51.29 mm、38.33 mm、2.61 d、19.90 mm，将实际降水要素数据除以样本资料平均值作为研究样本数据，以各因子的贡献度所占百分比（表 2，k 表示子模型中的变量数量）作为构建暴雨综合致灾指标的权重系数，建立暴雨综合致灾指数模型：

$$I = 0.68\frac{X_1}{\overline{X}_1} + 0.22\frac{X_2}{\overline{X}_2} + 0.06\frac{X_3}{\overline{X}_3} + 0.04\frac{X_4}{\overline{X}_4}, \quad (1)$$

其中，I 为暴雨综合致灾指数，$\overline{X}_1$、$\overline{X}_2$、$\overline{X}_3$、$\overline{X}_4$分别表示暴雨房屋灾情案例的过程雨量、最大日降水量、连续日数、最大小时雨强的平均值。

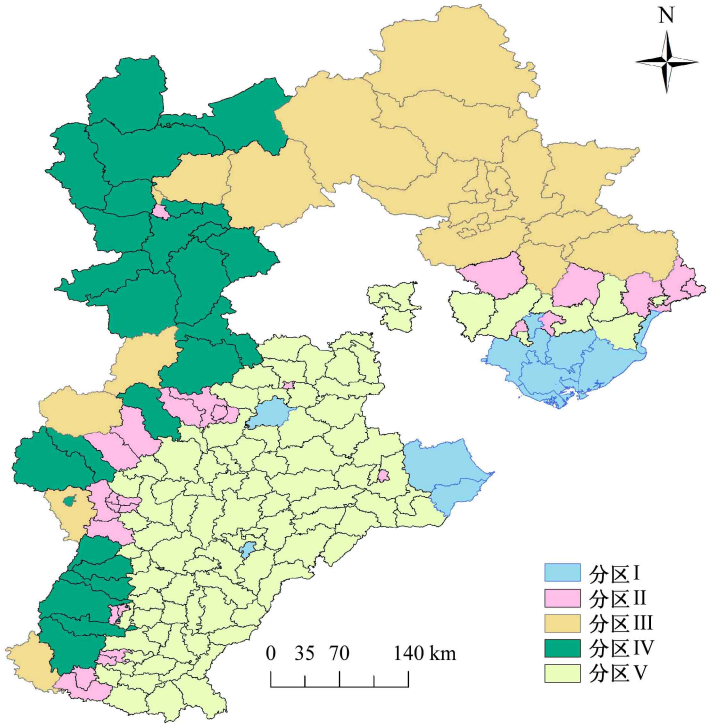

图 3　河北省地理环境分区

Fig. 3　Geographical environment subdivision of Hebei Province

表 2 河北省 1984～2014 年各致灾因子对房屋损失的总平均贡献及增值贡献

Table 2 Value-added contribution and total average contribution of each disaster-causing factor to housing losses in Hebei Province from 1984 to 2014

模型中的变量	贡献	增值贡献			
		X_1	X_2	X_3	X_4
k=0	0.00	0.25	0.07	0.03	0.03
X_1	0.25	—	0.10	0.00	0.02
X_2	0.07	0.28	—	0.03	0.00
X_3	0.03	0.22	0.07	—	0.03
X_4	0.03	0.24	0.04	0.03	—
k=1时平均贡献		0.25	0.07	0.02	0.02
X_1、X_2	0.35	—	—	0.03	0.00
X_1、X_3	0.25	—	0.13	—	0.02
X_1、X_4	0.27	—	0.08	0.00	—
X_2、X_3	0.10	0.28	—	—	0.00
X_2、X_4	0.07	0.28	—	0.03	—
X_3、X_4	0.06	0.21	0.04	—	—
k=2时平均贡献		0.25	0.08	0.02	0.01
X_1、X_2、X_3	0.38	—	—	—	0.00
X_1、X_2、X_4	0.35	—	—	0.03	—
X_1、X_3、X_4	0.27	—	0.11	—	—
X_2、X_3、X_4	0.10	0.28	—	—	—
k=3时平均贡献		0.28	0.11	0.03	0.00
X_1、X_2、X_3、X_4	0.38	—	—	—	—
总平均贡献		0.26	0.08	0.02	0.01
百分比		68%	22%	6%	4%

3.4 暴雨综合致灾指数和房屋损失的指数拟合

对暴雨综合致灾指数和房屋损失进行回归拟合，结合房屋损失随暴雨综合指数变化的散点图可以发现，暴雨综合致灾指数较低时房屋损失增幅较小，随着暴雨综合致灾指数的加大，房屋损失量大幅增加，指数模型能够很好地拟合房屋损失随暴雨综合致灾指数的变化（图 4），各分区的拟合效果都达到了 0.01 极显著水平，且 5 种类型区中的平原区拟合效果要优于山区。

通过相关分析，5 类分区中，分区 I 案例的实际灾情与模拟灾情相关系数最高，达到了 0.84，分区 III 次之（0.81），但是与分区 I 非常接近，考虑到位于分区 III 内的案例数（77 个）要远远多于分区 I（25 个），因此认为分区III的拟合优度更好，暴雨综合致灾指数模型（公式 1）在分区 III 内的适用性最好。

为评价拟合效果，根据房屋损失和暴雨综合致灾指数的拟合函数，通过实际灾情反推模拟灾情，将实际灾情损失与模拟灾情损失进行相关分析，两者相关系数为 0.690，较灾情与暴雨综合指数之间的相关系数（0.455）有显著提高，均达到 0.01 极显著水平。图 5 中虚线为 1:1 分割线，虽然两者间极为相关，指数函数较好地模拟了灾情损失，但普遍存在模拟值比实际值偏低的情况。

3.5 灾情等级划分

以灾情案例中房屋倒塌和损坏的总间数为基础，采用最优分割法（Li et al., 2015）对河北省各县暴雨房屋损失灾情案例进行等级划分，综合考虑各个等级内灾情案例分布的比例，以损失 100、300 和 1000 间房屋为分割点，将灾情案例划分为轻、中、重、特重四个等级（表 3）。

表 3 河北省 1984～2014 年各分区实际灾情损失与模拟灾情损失的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between actual disaster and simulated disaster in each area in Hebei Province during 1984−2014

分区	相关系数R	拟合优度	案例个数
I	0.84	0.71	25
II	0.77	0.59	21
III	0.81	0.66	77
IV	0.68	0.46	58
V	0.72	0.52	72

3.6 各分区的暴雨综合致灾指数阈值

由于 3.4 部分中存在模拟灾情普遍较实际灾情偏低的情况，因而需对其等级划分标准进行调整。首先根据表 3 中的实际灾情等级划分标准确定每个案例的实际灾情等级，每个案例都有对应的降水数据，通过公式（1）计算得到每个案例的暴雨综合致灾指数，再根据图 4 中房屋损失与暴雨综合致灾指数的关系式得到每个案例的模拟房屋损失，通过 MATLAB 采用遍历的方法（即考虑到任何一种灾情等级划分情况），每一种情况均为一个等级划分标准，每个案例的模拟房屋损失对照当前等级划分标准得到一个模拟灾情等级，然后统计模拟等级与实际等级一致的案例数，将一致案例数最高的情况作为最佳分割点，以损失房屋 1180、335、235 间为灾情等级分割点时，一致率最高，为 67.4%，为最佳等级分割点。根据各个分区的指数拟合函数，

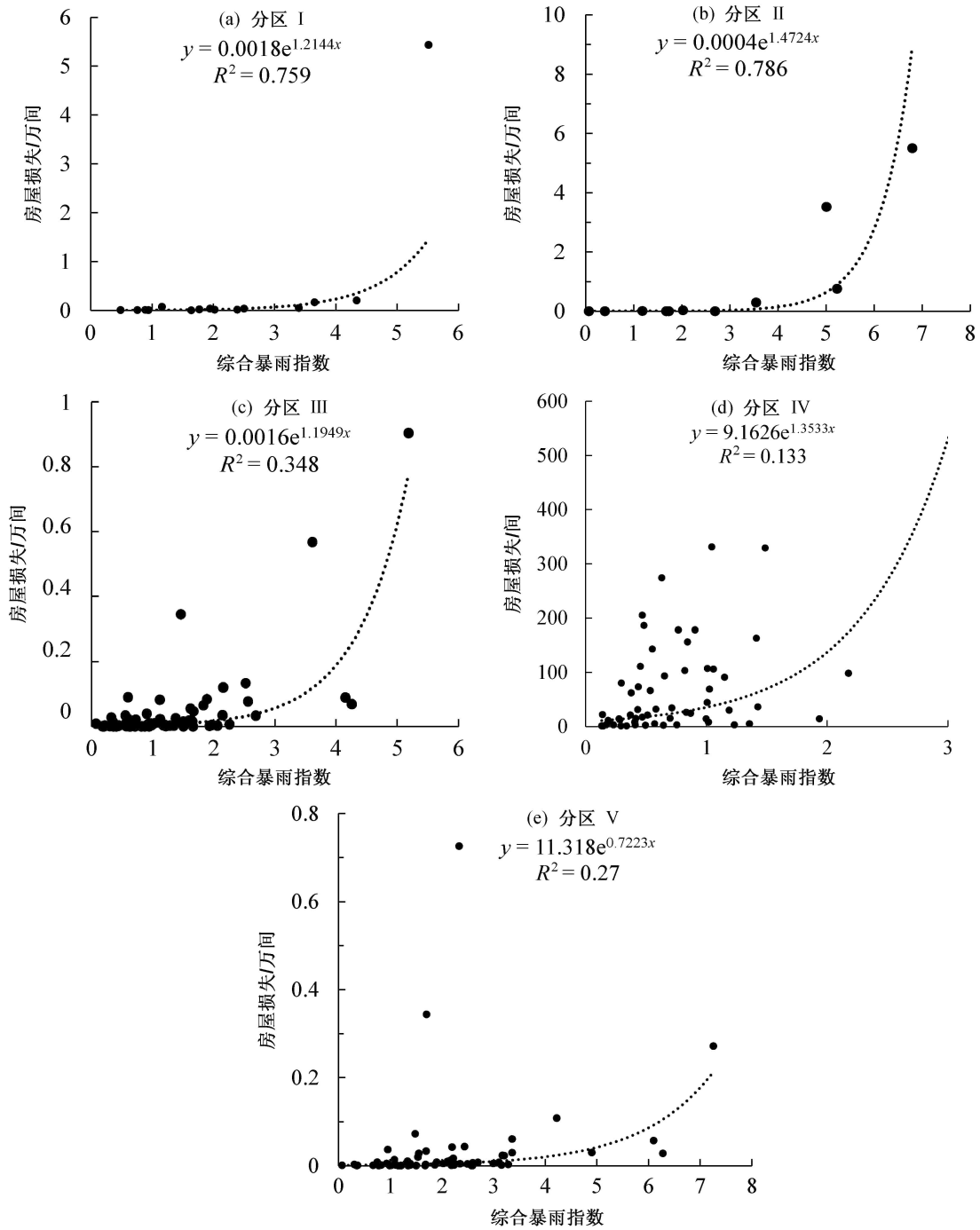

图 4　河北省 1984～2014 年不同分区暴雨综合致灾指数与房屋损失的指数拟合

Fig. 4　Fitting of composite rainstorm disaster index and housing loss index in different partitions in Hebei Province during 1984−2014

分别计算最佳等级分割点对应的暴雨综合致灾指数值，即为不同灾情等级的暴雨综合致灾指数阈值（表 4）。

4　阈值检验

为评估暴雨综合致灾指数阈值标准，采用

表 4　河北省 1984 ~ 2014 年房屋灾情等级划分标准

Table 4　Classification standard of housing disaster grades in Hebei Province during 1984−2014

灾情等级	房屋损失/间	占比
轻度	≤100	60%
中度	（100, 300]	17%
重度	（300, 1000]	13%
特重	>1000	10%

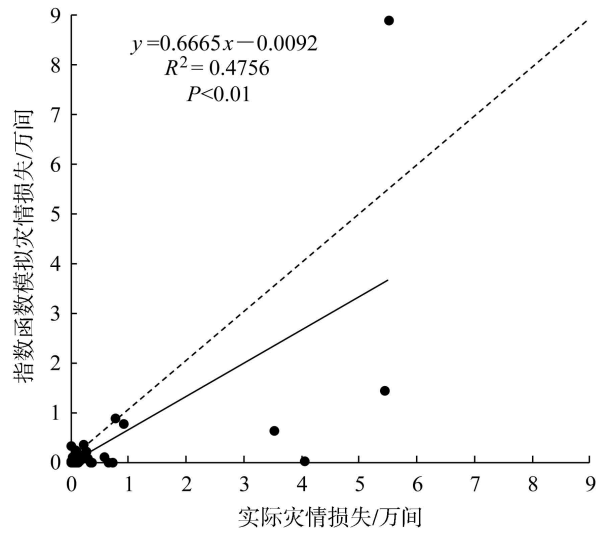

图 5 河北省 1984～2014 年实际灾情损失与模拟灾情损失的对比

Fig. 5 Comparison of actual and simulated disaster losses in Hebei Province during 1984−2014

表 5 河北省 1984～2014 年各分区不同灾情等级的暴雨综合致灾指数阈值

Table 5 Thresholds of the rainstorm composite disaster index with different disaster levels in each region in Hebei Province during 1984−2014

不同分区	指数阈值			
	轻度灾情	中度灾情	重度灾情	特重灾情
分区I	[0.49, 2.11]	(2.11, 2.40]	(2.40, 3.44]	>3.44
分区II	[0.40, 2.76]	(2.76, 3.00]	(3.00, 3.85]	>3.85
分区III	[0.21, 2.26]	(2.26, 2.55]	(2.55, 3.61]	>3.61
分区IV	[0.23, 2.40]	(2.40, 2.66]	(2.66, 3.59]	>3.59
分区V	[0.27, 4.20]	(4.20, 4.69]	(4.69, 6.43]	>6.43

表 6 河北省 2015～2019 年暴雨综合致灾指数模型的评估结果

Table 6 Evaluation results of rainstorm-integrated disaster index model in Hebei Province during 2015−2019

等级	案例个数	准确个数	准确率
所有等级（原始）	124	81	65.3%
所有等级（筛选）	116	81	69.8%
轻度	71	54	76.1%
中度	2	1	50.0%
重度	17	10	58.8%
特重	26	16	61.5%

2015～2019 年的 124 个灾情案例进行验证分析，通过公式（1）计算得到每个案例的暴雨综合致灾指数，对照表 5 确定预测灾情等级；以 3.6 中确定的损失房屋 1180、335、235 间为灾情等级分割点，表 6 中统计了该等级划分标准下 2015～2019 年的案例中实际等级为轻、中、重、特重 4 个等级的案例个数，准确个数为实际等级和预测等级一致的案例数。由于 8 个案例中的降水时间和灾情发生时间明显不匹配，因此予以剔除，对比分析剩余 116 个案例：其中，81 个案例的预测等级与实际等级一致，准确率为 69.8%（表 6）；14 个案例的预测结果与实际仅相差一个等级。轻度灾情等级的准确率最高，为 76.1%；特重灾情等级次之，准确率为 61.5%；中度灾情等级的案例仅有 2 个，该等级的准确率有待进一步验证。

5 结论

本文以房屋为承灾体，基于优势分析法构建暴雨综合致灾指数模型，拟合房屋损失与综合致灾指数的关系，计算不同分区暴雨对房屋的综合致灾指数阈值，得到以下结论：

（1）综合考虑河北省的环境特征及分区连续度，研究区可分为五个区域：I 区为沿海平原区，平均海拔最低，同时水域面积大（水库、坑塘为主）；II 区为平原山地过渡区，地势起伏开始明显增大；III 区为北部高山区，IV 区为西部低山区；V 区为内陆平原区，地形平坦，降水较沿海平原区少。1984~2014 年间，河北省暴雨造成的房屋灾情事件发生次数总体呈现出北多南少的特征，北部山区普遍在 10 次以上，南部平原地区的大多低于 5 次。

（2）暴雨综合致灾指数模型的四个要素中，过程总雨量对房屋损失的影响权重最大，为 68%；最大日降水量次之，为 22%；持续天数和最大小时雨强贡献率较低，分别为 6% 和 4%。指数函数能够很好地拟合五个分区的房屋损失随暴雨综合致灾指数的变化，但普遍存在模拟值较实际值偏低的情况。模拟灾情的最佳等级分割点为损坏房屋 1180、335、235 间，此时的准确率为 67.4%。

（3）阈值检验中，2015~2019 年有 81 个案例的预测等级与实际等级一致，占总案例数的 69.8%；14 个案例的预测结果与实际仅相差一个等级。轻度灾情等级的准确率最高，为 76.1%。

本研究在确定暴雨致灾综合指数的过程中，采用优势分析法来判定各个致灾因子的相对重要性，因此不会夸大或忽视任一因子的重要性，解决了传统的斜率基础指标和方差降低指标判定方法存在的

问题。本文的研究结果能够用于实际业务中河北省暴雨灾害风险预警服务产品的制作，对于气象灾害防御体系的完善有重要意义。同时，由于阈值检验的中度灾情等级案例过少，因此对于中度灾害阈值结果的说服力有多欠缺，有必要利用互联网、文献资料等途径，深入挖掘损失数据，利用更多或者长时间序列的灾情进一步验证。

参考文献（References）

Azen R, Budescu D V. 2003. The dominance analysis approach for comparing predictors in multiple regression [J]. Psychological Methods, 8(2): 129−148. doi:10.1037/1082-989X.8.2.129

陈小雷. 2018. 河北省暴雨洪涝灾害评估—2016 年 7 月 19～21 日特大暴雨过程 [M]. 北京: 气象出版社, 80pp. Chen Xiaolei. 2018. Evaluation of Heavy Rain Disasters in Hebei Province—The Process of Extraordinary Heavy Rain on July 19−21, 2016 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 80pp.

樊高峰, 何月, 顾骏强. 2012. 基于 GIS 的浙江省暴雨灾害及其危险性评价 [J]. 中国农学通报, 28(32): 293−299. Fan Gaofeng, He Yue, Gu Junqiang. 2012. The rainstorm disaster and its risk assessment based on GIS in Zhejiang Province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 28(32): 293−299. doi:10.3969/j.issn.1000-6850.2012.32.051

Fujibe F, Yamazaki N, Kobayashi K. 2006. Long-term changes of heavy precipitation and dry weather in Japan (1901−2004) [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 84(6): 1033−1046. doi:10.2151/jmsj.84.1033

葛鹏, 岳贤平. 2013. 洪涝灾害承灾体易损性的时空变异——以南京市为例 [J]. 灾害学, 28(1): 107−111. Ge Peng, Yue Xianping. 2013. A study of the variation in time and area of the vulnerability of floods bearing bodies —A case study of Nanjing [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 28(1): 107−111. doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2013.01.023

郭广芬, 周月华, 史瑞琴, 等. 2009. 湖北省暴雨洪涝致灾指标研究 [J]. 暴雨灾害, 28(4): 357−361. Guo Guangfen, Zhou Yuehua, Shi Ruiqin, et al. 2009. Study on index of heavy rain flood disaster grade in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 28(4): 357−361. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2009.04.012

韩秀君, 孙晓巍, 李爽, 等. 2014. 辽宁暴雨致灾指标及灾害影响预评估 [J]. 气象与环境学报, 30(6): 80−84. Han Xiujun, Sun Xiaowei, Li Shuang, et al. 2014. Disaster-causing index of rainstorm and pre-assessment of disaster effect in Liaoning Province [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 30(6): 80−84. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2014.06.012

金有杰, 曾燕, 邱新法, 等. 2014. 人口与 GDP 空间化技术支持下的暴雨洪涝灾害承灾体脆弱性分析 [J]. 气象科学, 34(5): 522−529. Jin Youjie, Zeng Yan, Qiu Xinfa, et al. 2014. Vulnerability analysis of flood disasters hazard-affected body under the support of spatialization technology of population and GDP [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 34(5): 522−529. doi:10.3969/2013jms.0030

赖文泽. 2016. 基于多智能体的暴雨洪涝房屋风险动态评估研究 [D]. 中国科学技术大学硕士学位论文, 65pp. Lai Wenze. 2016. The study on the dynamic house risk assessment model for rainstorm−flood utilization multi-agent [D]. M. S. thesis (in Chinese), University of Science and Technology of China, 65pp.

Li Y B, Li J, You F, et al. 2015. Comprehensive evaluation model of agricultural drought disaster risk [J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 46(2): 165−174.

李茜, 蔡新玲, 徐军昶, 等. 2015. 陕西省暴雨灾害风险实时评估技术研究 [J]. 中国农学通报, 31(25): 241−246. Li Qian, Cai Xinling, Xu Junchang, et al. 2015. Research on real-time risk assessment of rainstorm in Shaanxi Province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 31(25): 241−246. doi:10.11924/j.issn.1000-6850.casb15020069

林琳. 2013. 近 30 年我国主要气象灾害影响特征分析 [D]. 兰州大学硕士学位论文, 99pp. Lin Lin. 2013. Studies on the impact of main meteorological disaster in China within recent 30 years [D]. M. S. thesis (in Chinese), Lanzhou University, 99pp.

刘耀龙, 陈振楼, 王军, 等. 2011. 经常性暴雨内涝区域房屋财（资）产脆弱性研究——以温州市为例 [J]. 灾害学, 26(2): 66−71. Liu Yaolong, Chen Zhenlou, Wang Jun, et al. 2011. Study on property (capital) vulnerability of houses in regular rainstorm water−logging areas —taking Wenzhou City as example [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 26(2): 66−71. doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2011.02.013

陆敏, 刘敏, 权瑞松, 等. 2010. 上海暴雨灾害的系统特征与脆弱性分析 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), (2): 9−15. Lu Min, Liu Min, Quan Ruisong, et al. 2010. Analysis of system characteristics and vulnerability of rainstorm hazards in Shanghai [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science) (in Chinese), (2): 9−15. doi:10.3969/j.issn.1000-5641.2010.02.002

史军, 穆海振, 杨涵洧, 等. 2016. 上海中心城区暴雨内涝阈值研究 [J]. 暴雨灾害, 35(4): 344−350. Shi Jun, Mu Haizhen, Yang Hanwei, et al. 2016. Study on the threshold of rainstorm waterlogging in the urban areas of Shanghai [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 35(4): 344−350. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.04.006

王思远, 刘纪远, 张增祥, 等. 2001. 中国土地利用时空特征分析 [J]. 地理学报, 56(6): 631−639. Wang Siyuan, Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, et al. 2001. Analysis on spatial−temporal features of land use in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 56(6): 631−639. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2001.06.001

王千, 王成, 冯振元, 等. 2012. K-means 聚类算法研究综述 [J]. 电子设计工程, 20(7): 21−24. Wang Qian, Wang Cheng, Feng Zhenyuan, et al. 2012. Review of K-means clustering algorithm [J]. Electronic Design Engineering (in Chinese), 20(7): 21−24. doi:10.3969/j.issn.1674-6236.2012.07.008

翁莉, 马林, 徐双凤. 2015. 城市暴雨灾害风险评估及防御对策研究——以江苏省南京市为例 [J]. 灾害学, 30(1): 130−134. Weng Li, Ma Lin, Xu Shuangfeng. 2015. The urban rainstorm disaster risk assessment and defensive measures —A case study of Nanjing of

Jiangsu Province [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 30(1): 130−134. doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2015.01.025

Wu J J, He B, Lü A F, et al. 2011. Quantitative assessment and spatial characteristics analysis of agricultural drought vulnerability in China [J]. Natural Hazards, 56(3): 785−801. doi:10.1007/s11069-010-9591-9

杨辰, 王强, 金雪欢, 等. 2015. 基于 GIS 的上海市社区暴雨积涝模拟研究 [J]. 自然灾害学报, 24(2): 195−202. Yang Chen, Wang Qiang, Jin Xuehuan, et al. 2015. GIS-based simulation study on community rainstorm waterlogging in Shanghai Municipality [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 24(2): 195−202. doi:10.13577/j.jnd.2015.0225

Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18(7): 1096−1108. doi:10.1175/JCLI-3318.1

张斌, 赵前胜, 姜瑜君. 2010. 区域承灾体脆弱性指标体系与精细量化模型研究 [J]. 灾害学, 25(2): 36−40. Zhang Bin, Zhao Qiansheng, Jiang Yujun. 2010. Research on indexes system about regional vulnerability of hazard-affected bodies and fine spatial quantitative model [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 25(2): 36−40. doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2010.02.007

赵凡, 赵常军, 苏筠. 2014. 北京“7•21”暴雨灾害前后公众的风险认知变化 [J]. 自然灾害学报, 23(4): 38−45. Zhao Fan, Zhao Changjun, Su Yun. 2014. Changes in risk public perception before and after the “7•21” rainstorm disaster in Beijing [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 23(4): 38−45. doi:10.13577/j.jnd.2014.0406

周蕾, 蒋如乔, 祝士杰. 2017. 顾及局部微地形特征的 DEM 洼地处理算法 [J]. 地理与地理信息科学, 33(5): 50−55, 86. Zhou Lei, Jiang Ruqiao, Zhu Shijie. 2017. A method of depression filling with consideration of local micro-relief features [J]. Geography and Geo-Information Science (in Chinese), 33(5): 50−55, 86. doi:10.3969/j.issn.1672-0504.2017.05.008

朱政, 郑伯红, 贺清云. 2011. 城市暴雨灾害的影响程度及对策研究——以长沙市为例 [J]. 自然灾害学报, 20(3): 105−112. Zhu Zheng, Zheng Bohong, He Qingyun. 2011. Study on effect degree and countermeasures against urban rainstorm disasters: A case of Changsha City [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 20(3): 105−112. doi:10.13577/j.jnd.2011.0317