

基于AHP-突变理论组合模型的地质灾害危险性评价

于开宁, 吴涛, 魏爱华, 武玉璞, 代锋刚, 刘煜

Geological hazard assessment based on the models of AHP, catastrophe theory and their combination: A case study in Pingshan County of Heibei Province

YU Kaining, WU Tao, WEI Aihua, WU Yupu, DAI Fenggang, and LIU Yu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202201012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渤海海域海底地质灾害危险性区划

Risk zonation on the submarine geological hazards in Bohai Sea

宋玉鹏, 孙永福, 杜星, 刘晓瑜, 王振豪, 曹成林 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 140-146

基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province

张以晨, 郎秋玲, 陈亚南, 张继权, 田书文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 104-110

基于层次分析法的北京市地质环境质量综合评价

Comprehensive evaluation method of geological environment quality in Beijing based on AHP

郭学飞, 王志一, 焦润成, 曹颖 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 70-76

安徽黄山市徽州区地质灾害危险性评价研究

Study on risk assessment of geological hazards in Huizhou District, Huangshan City, Anhui Province

刘乐, 杨智, 孙健, 刘钦, 彭鹏, 段俊斌 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 110-116

甘肃定西地区地质灾害危险性评价

Risk assessment of geological hazards in Dingxi region of Gansu Province

沈迪, 郭进京, 陈俊合 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 134-142

基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价

Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County

曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 100-109



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202201012

于开宁, 吴涛, 魏爱华, 等. 基于 AHP-突变理论组合模型的地质灾害危险性评价——以河北平山县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 146-155.

YU Kaining, WU Tao, WEI Aihua, et al. Geological hazard assessment based on the models of AHP, catastrophe theory and their combination: A case study in Pingshan County of Hebei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 146-155.

基于 AHP-突变理论组合模型的地质灾害危险性评价 ——以河北平山县为例

于开宁^{1,2}, 吴涛¹, 魏爱华¹, 武玉璞², 代锋刚¹, 刘煜²

(1. 河北地质大学河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北石家庄 050031; 2. 河北省地质环境监测院河北省地质资源环境监测与保护重点实验室, 河北石家庄 050011)

摘要: 河北平山县受地形地貌、地质构造和生态环境等因素的影响, 崩滑流等地质灾害频发。选取地形起伏度、坡度、坡向、河网密度、断裂带密度、地层岩性、NDVI、土地利用类型及地质灾害点密度 9 个评价因子, 用 AHP 和突变理论分别求各评价因子权重, 并按最小信息熵法结合, 建立 AHP-突变理论组合模型并应用, 对比基于三种方法的平山县地质灾害危险性评价结果。结果表明: 组合模型的评价结果精度更高, 符合该区地质灾害发育特征; 组合模型法将主客观结合, 综合考虑因子的影响, 评价结果可靠。该研究为平山县及类似地区地质灾害危险性评价提供一种新的尝试和方法。

关键词: 地质灾害; 危险性评价; 层次分析法; 突变理论; 组合模型

中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2023)02-0146-10

Geological hazard assessment based on the models of AHP, catastrophe theory and their combination: A case study in Pingshan County of Hebei Province

YU Kaining^{1,2}, WU Tao¹, WEI Aihua¹, WU Yupu², DAI Fenggang¹, LIU Yu²

(1. Heibei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Heibei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 2. Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Enviroment Monitoring and Protection, Hebei Geo-Enviroment Monitoring, Shijiazhuang, Hebei 050011, China)

Abstract: Pingshan County, Hebei was affected by topography, geological structure, ecological environment and other factors, geological disasters such as landslides occurred frequently. Nine evaluation factors including topographic relief, slope, aspect, river network density, fault zone density, stratigraphic lithology, NDVI, land use type and geological disaster point density were selected. The weights of each evaluation factor were calculated by AHP and catastrophe theory, and the combination model of AHP and catastrophe theory was established and applied according to the minimum information entropy weight method. The results of geological disaster risk assessment in Pingshan County based on three methods were compared. The results show that

收稿日期: 2022-01-17; 修订日期: 2022-04-08

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 河北省重点地质灾害勘查项目(2019150); 河北省自然科学基金(D2022403032)

第一作者: 于开宁(1965-), 男, 山东乳山人, 博士, 教授, 主要从事水资源与环境地质研究工作。E-mail: 1211931193@qq.com

通讯作者: 刘煜(1982-), 男, 河北石家庄人, 学士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治、地质环境监测与演化研究工作。

E-mail: 16222420@qq.com

the evaluation results of the combined model have higher accuracy and are in line with the development characteristics of geological disasters in this area. Combined model method combines subjective and objective, considering the influence of factors, the evaluation results are reliable. This study provides a new attempt and method for geological disaster risk assessment in Pingshan County and similar areas.

Keywords: geological disasters; risk assessment; analytic hierarchy process; catastrophe theory; combination model

0 引言

地质灾害危险性评价是防灾减灾的重要依据,在自然及社会因素的综合影响下,地质环境日益遭到破坏,地质灾害不时爆发,威胁着人民生命及财产安全,扼制着区域的经济的发展。平山县地处太行山脉—华北平原的过渡带和滹沱河流域的中游,有着地形起伏大、构造与水系发育,岩性复杂等特点,这些因素的综合作用导致了平山县是石家庄市地质灾害发生的高危地区。同时,平山县作为红色革命圣地有着其独特的价值—纪念革命先烈,弘扬革命文化。近年来,平山县地质灾害频发,基于河北省环境监测院针对平山县自2013—2021年地质灾害点与隐患点的不完全统计数据,该区有138处地质灾害点,145处地质灾害隐患点,威胁着当地人民生命及财产安全,破坏了革命圣地的生态环境,直接经济损失达千万元,制约着区域经济的发展。选择平山县作为研究区,具有典型示范性。

近年来,我国十分重视区域地质灾害的治理及预测,随着地质灾害评价的迅速发展,地质灾害的各类评价方法也得以普及应用,高泽民等^[1]、洪增林等^[2]、Mejia-Navarro等^[3]、魏会龙等^[4]、王磊等^[5]、YU等^[6]和张晓敏等^[7]采用TBOR、TBOG、信息量法、AHP和灰色理论等方法分析研究地质灾害特征并评价。其中,以层次分析法为代表的传统地质灾害危险性评价方法也得到了发展,郭学飞等^[8]、李小龙等^[9]、何珊等^[10]、Kayastha等^[11]、侯圣山等^[12]和Wicaksono等^[13]将模糊综合评价、灾害熵理论、数值模拟应用于AHP并改进用于地质灾害预测评价等研究,为防灾减灾提供了参考。然而,主要应用于社会变革管理与组织发展等领域的突变理论得到了广泛应用,其中,陈绪新等^[14]、冯平等^[15]、李绍飞等^[16]均将其应用于水文地质领域中,并且突变理论可以很好地描述大多数地质灾害从平衡状态至失稳状态之间的灾变现象,如袁颖等^[17]、尚志海等^[18]、温晓艺等^[19],均通过该法计算影响地质灾害各因子的权重并应用在地质灾害的评价过程中。参考以上研究可知,层次分析法在评价过程中忽略了客观分析,而突变理论却缺少主观分析。由此可以看出,单一的评价方法虽有其独特的优

点,但评价结果精度低,缺乏说服力。而陈菊艳等^[20]、杜国梁等^[21]、李博^[22]、刘璐瑶等^[23]、Shahinuzzaman等^[24]、宁娜等^[25]、覃乙根等^[26]分别把确定性系数、AHP、逻辑回归、信息量,灰色关联分析和主成分分析等方法两两结合并应用于评价,均取得了更好的效果。因此,各类评价方法间的交叉耦合更能科学准确地对评价结果进行描述。

本文以河北省平山县为研究区,将层次分析法与突变理论组合,通过结合平山县地质灾害空间分布特征并从主、客观方面综合考虑评价因子对地质灾害的影响,建立AHP-突变理论组合模型评价指标体系,从而得到研究区地质灾害危险性评价结果,为该区及类似地区的地质灾害危险性评价提供新方法并为防灾减灾工作提供合理可靠的依据。

1 研究区概况

平山县位于河北省西南部太行山麓,西邻原居地孟县,北靠保定市富平县,东连灵寿县,南接井陘和鹿泉区(图1)。平山县属温带大陆性季风气候,多年平均气温12.8℃,最高气温42.1℃,最低气温-26.5℃,区内降水量差异性较大,多年平均降水量560.3mm。

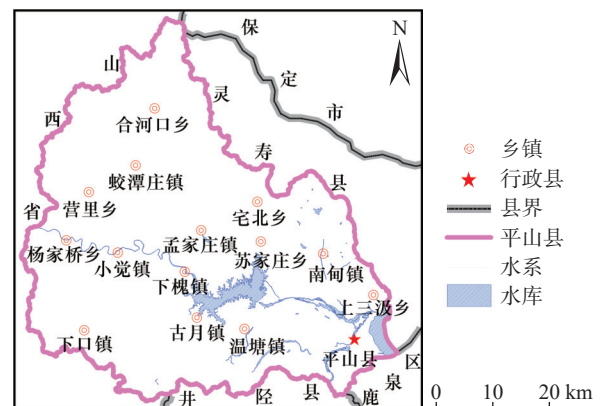


图1 平山县地理位置

Fig. 1 Geographical location of Pingshan County

地形总体趋势西高东低、北高南低,属于侵蚀构造山地区,自西往东分别是侵蚀构造中山亚区、侵蚀构造低山亚区、剥蚀丘陵亚区、侵蚀堆积台地亚区及河谷平

原亚区。在大地构造上,本区属于中朝准地台的一个相对稳定的Ⅱ级构造单元—山西断隆的东侧边沿,横跨 2 个三级构造单元,依次是五台台拱(Ⅲ29)、沁源台陷(Ⅲ210),均属新华夏构造体系。

本次研究数据源于河北省环境监测院针对平山县在 2013-2021 年间地质灾害点与隐患点的勘察报告与基础图件,并通过地理空间数据云下载 Landsat8 遥感和 DEM 数据经处理得到地形起伏度、坡度、坡向、NDVI 等栅格数据。经整理,平山县内地质灾害类型主要包括泥石流、滑坡、崩塌等,重大地质灾害点位共计 14 个,同时石家庄地区的崩滑流地质灾害隐患点也主要集中在平山县地区(图 2),其中,泥石流隐患点 84 个,崩塌隐患点 32 个,滑坡隐患点 29 个。研究区地质灾害点与隐患点共 159 个,故本次研究将灾害点与隐患点相结合的方式对平山县的地质灾害进行危险性评价,具体灾害点分布见图 3。

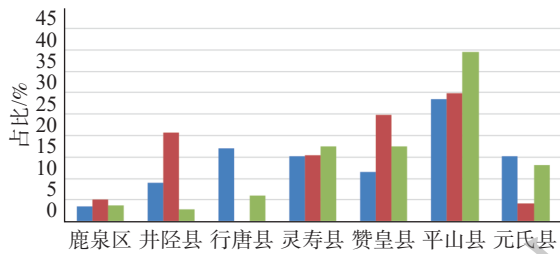


图 2 石家庄市崩滑流地质灾害隐患点分布

Fig. 2 Distribution of potential and geological hazard points of collapse, landslide and debris flow in Shijiazhuang



图 3 平山县灾害点分布

Fig. 3 Distribution of geological hazard points in Pingshan County

2 评价指标体系的建立与因子分析

2.1 评价指标体系的建立

地质灾害的影响因子具有多样性,针对不同区域地

质灾害的评价研究,选取的评价因子也不尽相同。由于各个影响因子互相联系、相互作用,同时影响因子还具备不同的结构层次,因此评价指标体系的建立在危险性评价中尤为重要。本次研究依据平山县地质环境条件与地质灾害发育程度并参照中外研究,建立了地质灾害危险性评价指标体系(图 4)。

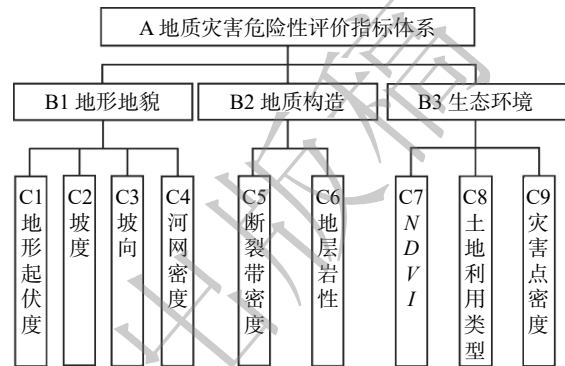


图 4 地质灾害危险性评价指标体系

Fig. 4 Geological hazard risk evaluation index system

2.2 评价因子分析

根据平山县地质环境和地质灾害发育程度,并参考借鉴较为广泛使用的评价指标体系,本次研究分别从地形地貌、地质构造以及生态环境 3 项指标中选择了地形起伏度、坡度、坡向、河网密度、断裂带密度、地层岩性、NDVI、土地利用类型以及地质灾害点密度等 9 个具代表性且影响大的评价因子,并加以综合分析。

2.2.1 地形地貌指标

地形地貌指标是影响地质灾害危险性的首要因素,主要包括地形起伏度、坡度、坡向、河网密度等因子。

地形起伏度是区分地貌类型的重要指标,同时又直接影响到地质灾害危险性的高低。此次研究将研究区地形起伏度划分为 4 个等级,见图 5(a)。

坡度是地质灾害发生的重要影响因素。一般认为,坡度愈大,灾害易发性愈高,危险性愈大。因此,根据研究区的实际状况,将坡度划分为 4 个等级,见图 5(b)。

就坡向而言,不同坡向的坡体因日照时间不同而影响着坡体的稳定,在不同程度上影响着地质灾害的危险性。基于 GIS 的坡向分析,将研究区坡向分为 9 种类型,见图 5(c)。

水具有流动性和侵蚀性,在其流动过程中会对沿途的岩土体造成一定程度的破坏。据了解,研究区水系发达,并且存在水库,以河网密度来定义区内水系发育程度,按照自然间断法将其分为 4 个等级,见图 5(d)。

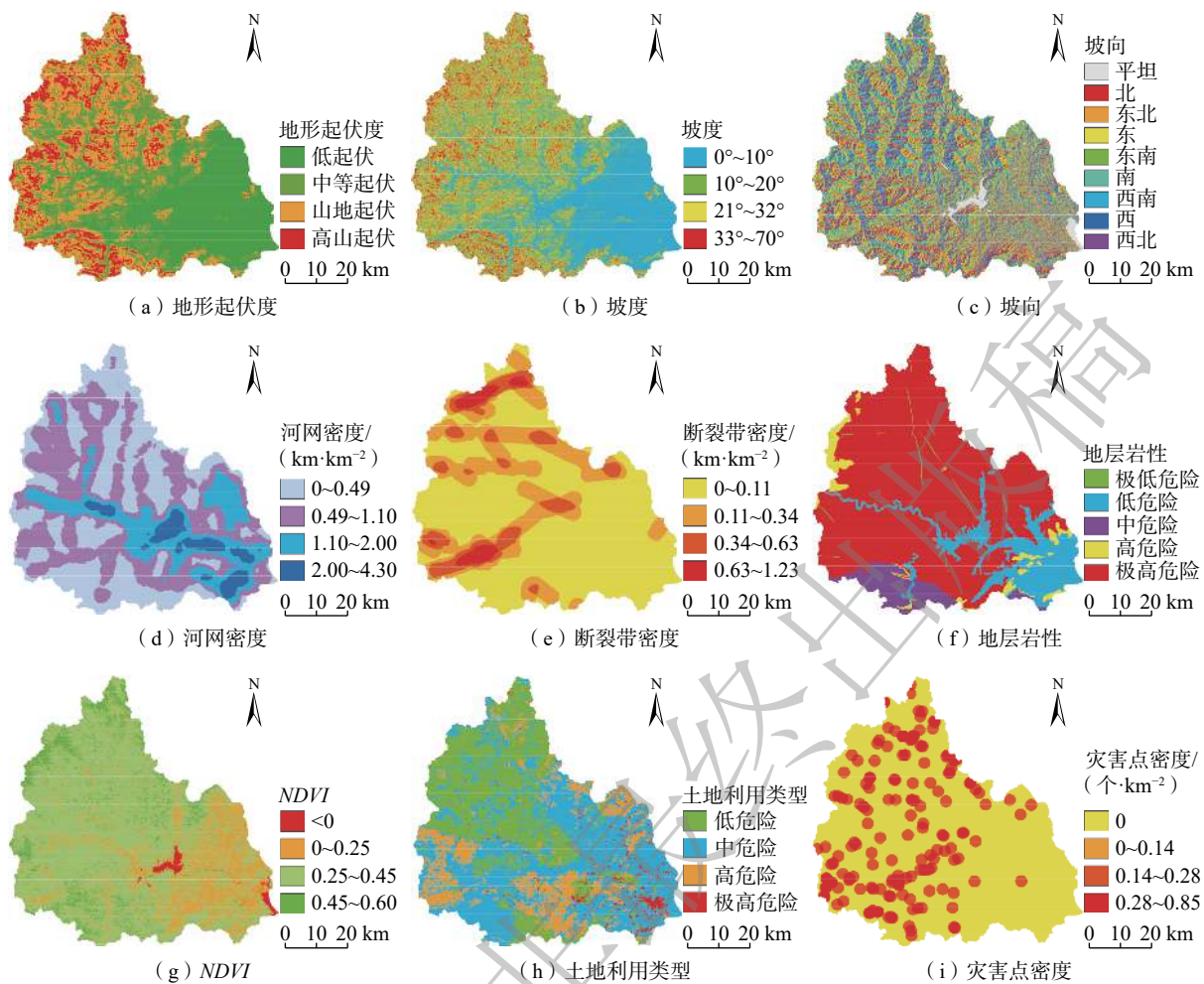


图 5 各评价因子分级

Fig. 5 Classification of each evaluation factor

2.2.2 地质环境指标

地质环境指标作为影响地质灾害危险性的基本因素,主要包括断裂带密度,地层岩性等因子。

通常情况下地质灾害发育在断裂带附近的软弱结构面,由此可知断裂带直接影响着地质构造的发育及其危害程度。本文基于 GIS 的线密度分析将研究区断裂带进行密度划分,按照自然间断法将断裂带密度划分为 4 个等级,见图 5(e)。

地质灾害的发生直接反映了地层岩性的特点,同时地层岩性的不同所导致的地质灾害的危险程度也不同。本文结合研究区的地层年代和岩性特点并将其模糊量化,针对发生地质灾害的危险程度将岩性划分成 5 个等级,见图 5(f)。

2.2.3 生态环境指标

生态环境指标作为影响地质灾害危险性的外部影响因素,主要有归一化植被指数(NDVI)、土地利用类型和地质灾害点的密度等因子。

不同的 NDVI 直接反映着不同的植被覆盖程度和水土保持能力的差异,从而间接影响地质灾害的发育和危险程度。本次评价将归一化植被指数划分为四个等级,其中 $NDVI < 0$ 表明该处植被的发育不良或呈逆向增长,见图 5(g)。

区域不同的土地利用类型影响着地质灾害发生的危险程度,本文根据研究区的土地利用类型并结合地质灾害发育情况,将 16 类不同土地类型进行危险程度的划分,共划分为四个等级,见图 5(h)。

已知地质灾害点的密度,可以直观地表现出区域危险程度的大小,而通过踏勘确定未发生地质灾害的隐患点也能间接反映该区域的危险程度,从而灾害与隐患点密度均在不同程度上影响着地质灾害的危险性。故本次研究将灾害点与隐患点相结合,灾害和隐患点密度其值愈大,区域内的地质灾害危险性也就愈大。综合研究区内灾害点密度及其分级效果,按自然间断法将其分为四个等级,用于表示研究区内地质灾害点的分布状况,

见图 5(i)。

3 地质灾害危险性评价模型

本文应用层次分析法和突变理论并将其组合,汲取层次分析法的主观优点和突变理论的客观优点,分别计算两种方法的评价因子权重并通过最小信息熵法来计算组合模型的评价因子权重,建立地质灾害评价模型,从而进行危险性评价与分析。

3.1 层次分析法

层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP)是由 Saaty 在 20 世纪 70 年代初期所创,它将主观定性分析和量化分析融为一体,是一个系统化、层次化的权重决策分析法。它逻辑性较强,并将与地质灾害问题相关的各种因素进行主观分析和量化分析,划分为分析和决策问题的目标、方法和准则。具体步骤如下^[27-28]:

(1) 首先需要根据构建的层评价指标体系(图 4),并依据 1—9 标度法建立起判断矩阵。

其中各准则层评价因子的判断矩阵分别是:

$$A-B \text{ 准则层: } \begin{pmatrix} 1 & 3 & 7 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 \end{pmatrix};$$

$$B-C1 \text{ 准则层: } \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 3 & 5 \\ 3 & 1 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/7 & 1/3 & 1 \end{pmatrix};$$

$$B-C2 \text{ 准则层: } \begin{pmatrix} 1 & 1/5 \\ 5 & 1 \end{pmatrix};$$

$$B-C3 \text{ 准则层: } \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/7 & 1 \end{pmatrix};$$

(2) 然后依据建立的判断矩阵,计算各指标的权重,步骤如下:

① 将判断矩阵每一列归一化:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

② 将按列归一化后的矩阵按行相加:

$$M_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

③ 将向量 $M = (M_1, M_2, \dots, M_n)^T$ 归一化求得特征向量:

$$W_i = \frac{M_i}{\sum_{j=1}^n M_j}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

④ 计算判断矩阵的最大特征根,并进行一致性检验 ($CR < 0.1$):

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

式中: n ——矩阵阶数;

CI ——一致性指标;

RI ——评价随机一致性指标。

当 $CR < 0.1$ 时,即判断矩阵的一致性通过检验,表明得到的权重值可靠有效。

经计算,目标层(A)与准则层(B)的 $\lambda_{\max} = 4.12$,一致性指标 $CR = 0.0061$;准则层(B)与评价因子层(C)的 $\lambda_{\max-1} = 4.12$, $CR = 0.044$; $\lambda_{\max-2} = 2$, $CR = 0$; $\lambda_{\max-3} = 3.065$, $CR = 0.0565$ 。经比较得知,判断矩阵的一致性指标 CR 均 < 0.1 ,最后再进行归一化,得到各评价因子的权重值(表 1)。

3.2 突变理论

突变理论 (Catastrophe theory) 是 Rene Thin 创立的一门深入研究突变(质变)现象的新型数理学科,可以很好地描述大多数地质灾害从平衡状态至失稳状态之间的灾变现象,由于其应用模式简单而得到广泛应用。

突变理论评价法根据评估指标中的多种原因,按照评估目标构建起多层次指标,并将底层指数分别经归一化运算后得出了突变模糊归属度函数,而中间和顶部的模糊隶属函数则由底部逐渐向上运算而来^[14-19],具体步骤:

(1) 首先根据控制变量维数确定突变模型,然后对底层指标进行标准化处理。

(2) 标准化后,把底层指标值依据各突变模型的归一化公式(默认按大小 a, b, c, d 排列)代入计算(表 2),得到模糊隶属度函数值。

(3) 底层指标的每一类模糊隶属度函数值的叠加计算遵循互补原则,依次向上得到上层指标的综合优先级,最后经归一化得到上层各指标层的权重。

(4) 将底层指标每个因子的模糊隶属度函数值进行归一化,得到底层指标的权重,然后将底层指标的权重和上层各指标层的权重对应相乘得到每种评价因子的权重。

3.3 AHP-突变理论组合模型

基于 AHP 层次分析法所得到的各评价因子权重受

表 1 各评价方法求得权重对比
Table 1 Weight comparison of each evaluation method

目标层	准则层	评价因子层	AHP权重 w_1	突变理论权重 w_2	AHP-突变组合模型权重 w_3
A平山县地质 灾害危害性评价	B1 地形地貌	C1 地形起伏度	0.176 1	0.079 5	0.135 9
		C2 坡度	0.373 1	0.071 7	0.188 0
		C3 坡向	0.081 5	0.079 5	0.092 5
		C4 河网密度	0.038 0	0.081 8	0.064 1
	B2 地质构造	C5 断裂带密度	0.040 5	0.106 5	0.075 5
		C6 地层岩性	0.202 6	0.248 6	0.257 9
		C7 NDVI	0.024 9	0.118 2	0.062 4
	B3 生态环境	C8 土地利用类型	0.056 7	0.122 0	0.095 6
		C9 灾害点密度	0.006 5	0.092 1	0.028 1

表 2 状态变量的突变模型
Table 2 Catastrophe model of state variable

突变模型	控制变量维数	势函数	归一化公式
折叠突变	1	$\frac{1}{3}x^3 + ax$	$x_a = \sqrt{a}$
尖点突变	2	$\frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx$	$x_a = \sqrt{a}; x_b = \sqrt[3]{b}$
燕尾突变	3	$\frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx$	$x_a = \sqrt{a}; x_b = \sqrt[3]{b}; x_c = \sqrt[4]{c}$
蝴蝶突变	4	$\frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}ax^4 + \frac{1}{3}bx^3 + \frac{1}{2}cx^2 + dx$	$x_a = \sqrt{a}; x_b = \sqrt[3]{b}; x_c = \sqrt[4]{c}; x_d = \sqrt[5]{d}$

主观因素的影响,且采用突变理论评价法所得到的各评价因子权重值更偏向于客观性,为科学组合两类方法的评价因子权重值,此次研究通过最小信息熵法将二种权重值组合^[29-30],计算方法为:

$$\min F = \sum_{i=1}^9 W_i(\ln W_i - \ln W_{1i}) + \sum_{i=1}^9 W_i(\ln W_i - \ln W_{2i}) \quad (7)$$

用拉格朗日乘法解得:

$$w_i = \frac{\sqrt{W_{1i}W_{2i}}}{\sum_{i=1}^9 \sqrt{W_{1i}W_{2i}}}, i = 1, 2, \dots, 9 \quad (8)$$

式中: w_{1i} ——由 AHP 层次分析法求得的权重值;
 w_{2i} ——由突变理论求得的权重值;
 w_i ——AHP-突变理论熵权组合模型的权重值。
 经计算可得到各评价因子的基于 AHP-突变理论组合权重(表 2)。

4 评价结果与分析

4.1 评价结果

利用 GIS 的栅格计算器工具,根据公式:

$$S_j = \sum_{i=1}^9 w_i I_i \quad (j = 1, 2, 3) \quad (9)$$

式中: S_j ——基于不同方法的评价结果;
 w_i ——不同方法的各评价因子权重值;
 I_i ——区域各评价因子的背景值。

经叠加计算,得出三种评价方法的平山县地质灾害危险性评价结果。将评价结果经归一化后,遵循自然间断点法则并结合平山县地质灾害特征,将评价结果进行重分类,将危险性划分为极高危险区 [0.45 ~ 1]、高危险区 [0.33 ~ 0.45]、中危险区 [0.19 ~ 0.33] 和低危险区 [0 ~ 0.19], 见图 5、图 6、图 7。通过计算并对比三种评价方法的各危险区的面积(表 3), 可得平山县地质灾害危险性分布特征。

4.2 结果分析

通过基于 AHP、突变理论和 AHP-突变理论组合模型三种评价方法,对平山县地质灾害的危险性评价结果进行了结果分析,具体分析如下:

(1) AHP 评价结果分析

基于 AHP 平山县危险性分区(图 6)可以直观地看出极高危险区和高危险区主要分布在蛟潭庄镇以北的北部地区、杨家桥乡以东和宅北乡以西的中西部地区,下口镇—古月镇以南的西南部地区,面积占比为 41.49%。中危险区主要分布在中部地区,以下槐镇为中心沿河流向四周发散,伴随高危险地区出现,面积占比为 33.37%。低危险区主要分布在平山县—下槐镇—苏

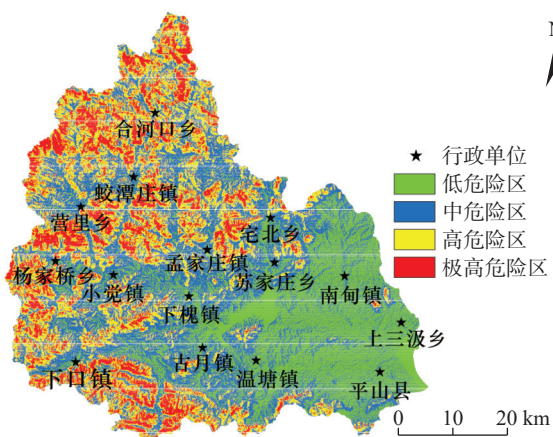


图 6 基于 AHP 平山县地质灾害危险性分区

Fig. 6 Geological hazard zoning in Pingshan County based on AHP

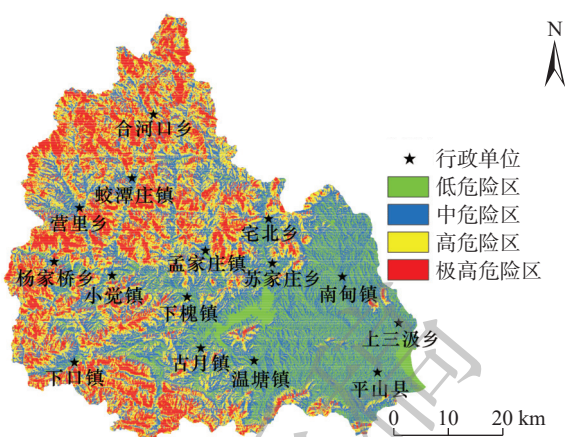


图 8 基于 AHP-突变组合模型平山县地质灾害危险性分区

Fig. 8 Geological hazard zoning in Pingshan County based on AHP - catastrophe combination model

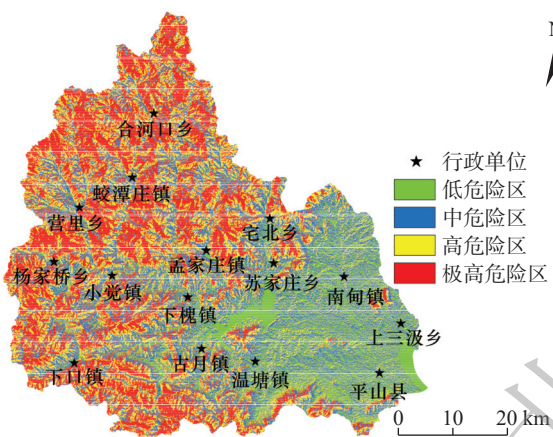


图 7 基于突变理论平山县地质灾害危险性分区

Fig. 7 Geological hazard zoning in Pingshan County based on catastrophe theory

表 3 危险性分区统计与对比
Table 3 Risk zoning statistics and comparison

评价方法	危险性等级	面积占比/%
AHP	低	25.14
	中	33.37
	高	27.16
	极高	14.33
突变理论	低	13.96
	中	26.36
	高	28.16
	极高	31.51
AHP-突变理论组合模型	低	18.39
	中	32.61
	高	27.49
	极高	21.51

家庄乡以东,南甸镇—上三汲乡—平山镇以西的东部地区,面积占比为 25.14%。

综上,该地区基于 AHP 的危险性评价主要受地形因素,岩性构造和河流因素的影响,地形变化较大且断裂带较发育,岩性风化程度强烈,地质灾害的发生对人们的安全构成极大的威胁。

(2) 突变理论评价结果分析

基于突变理论平山县危险性分区(图 7)可以直观地看出极高危险区和高危险区主要分布在杨家桥乡—孟家庄镇以北的中北部地区和小觉镇—古月镇以西的西南部地区,面积占比为 59.67%。中危险区主要分布在苏家庄乡—下槐镇—古月镇以东的地区以及伴随极高、高危险区分布,面积占比为 26.36%。低危险地区主要本部在平山县—苏家庄乡以东的东部地区,面积占比为 13.96%。

可见,该地区基于突变理论的危险性评价主要受地质构造和地形地貌的影响,地质灾害主要发育在断裂集中带以及坡度较高的地方,灾害特点通常表现为中小规模,强度中等,但影响范围较大。

(3) AHP-突变理论组合评价结果分析

基于 AHP 突变组合模型的平山县危险性分区(图 8)可以看出高危险区和极高危险区主要分布在营里乡—蛟潭庄镇以北的北部地区,杨家桥乡—孟家庄镇—宅北乡一带的中西部地区和下口镇—古月镇的以南的西南部山区,面积占比为 49%。中危险区主要分布在古月镇、下槐镇和苏家庄乡以东的东部地区以及沿河流分布的部分西部地区,面积占比为 32.61%,此分区内人口密度较大,环境因河流冲刷和人类改造的土地利用类型强烈,区内灾害点分布较少,灾害规模较小。低风险地区零星分布在研究区中西部地势平坦区和东部地区,面积占比为 18.39%。

可得,该地区基于AHP-突变组合模型的危险性评价,主要受地形因素,地质构造因素,部分土地利用类型以及植被生长等因素的综合影响,表现出地质灾害的孕育不仅与地形地质条件有关,还与人类活动而改造的土地利用类型有关。

(4) 对比分析

通过基于不同评价方法的地质灾害危险性评价分区对比(图6、图7、图8、表3),可以看出,三类评价方法下的危险性分区分布情况基本保持一致,但不同危险性分区的占比存在差异。极高、高危险区分布的占比在不同评价方法中从高到低依次为:突变理论评价(59.67%)、AHP-突变理论组合模型评价(49%)、AHP评价(41.49%)。

不同评价方法下的危险性评价结果分区受不同因素的综合影响,而AHP-突变理论组合模型评价方法更具有科学性,更适用于平山县地区。AHP评价在评价因子划分权重中受人为主观影响,未对评价因子客观分析,使评价结果与地形特征十分相似;在突变理论评价过程中评价因子的权重均是由不同因子的数据大小排列而划分,其结果受客观数据的影响,缺少人为主观分析;然而AHP-突变理论组合模型评价将前两者因子权重通过最小信息熵法组合,其评价结果的不同危险性分区占比值均介于AHP评价和突变理论评价下所对应的危险性分区占比。例如,AHP评价结果主要受地形地貌的影响,极高和高危险区占比41.49%,主要分布在地形起伏大的地区;突变理论评价结果主要受地质构造和外部环境的影响,极高和高危险区占比59.67%,主要分布在岩性风化剧烈的地区;而AHP-突变理论组合模型评价从地形地貌和地质构造出发,结合生态环境进行评价,既从客观上分析数据,又结合平山县实际情况人为主观分析,结果中极高和高危险区占比49%,数值介于前两者之间。

以河口乡以东的地区为例,在AHP评价结果中主要以中、高危险区为主,极高风险区集中分布在该地区东部;在突变理论结果中评价结果中极高危险区占绝大部分,高、中危险区零星分布;而在实际调查中该地区整体地势高,坡度大,中部断裂带集中,岩性风化强烈,但存在部分水系,池塘等平坦地区,所以该地区危险性分区应主要以极高、高危险区为主,沿河流分布中、低危险区,其分布特征与AHP-突变理论组合模型评价结果相符。综上,可以说明AHP-突变理论组合模型评价的可靠性和合理性。

5 结论

(1) 通过选取并分析平山县地质灾害危险性的9个评价因子,表明各评价因子的空间分布特征存在较大差异,均在一定程度上影响着平山县地质灾害的发育,综合影响着该区地质灾害的危险性。

(2) 对比三种方法下平山县地质灾害危险性评价结果可知,AHP-突变理论组合模型评价综合考虑了各评价因子对地质灾害危险性的影响,相较于AHP和突变理论的评价结果,组合模型评价法从主观和客观方面综合考虑评价因子对地质灾害的影响,评价结果更加合理、准确。

(3) 平山县地质灾害危险性分区具有一定的空间差异性,其危险程度自西向东逐渐降低,不同程度的危险区具有其独自的特点。受地形、岩性及构造的影响,区内极高和高危险区主要分布在研究区的北部、中西部和西南部地区;中危险和低危险区受植被发育情况和受人类改造的土地利用类型的影响,主要分布在研究区的中东部和东南部地区。

综上,AHP-突变理论组合模型评价方法能够有效解决单一评价方法求解问题的局限性。把传统的层次分析法与广泛应用的突变理论相结合,综合考虑主、客观因素的影响,评价结果的精度更高;适用于地形起伏大、构造发育、岩性风化剧烈、河网发达等特点的侵蚀构造山区。为平山县及类似地区的地质灾害危险性评价和防灾减灾工作提供新的方法和可靠依据。

参考文献(References):

- [1] 高泽民,丁明涛,杨国辉,等.川藏铁路孜热—波密段泥石流灾害危险性评价[J].*工程地质学报*,2021,29(2):478-485. [GAO Zemin, DING Mingtao, YANG Guohui, et al. Hazard assessment of debris flow along zire-Bomi section of Sichuan-Tibet railway [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(2): 478-485. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 洪增林,李永红,张玲玉,等.一种基于主成分分析法的区域性地质灾害危险性评估方法[J].*灾害学*,2020,35(1):118-124. [HONG Zenglin, LI Yonghong, ZHANG Lingyu, et al. A method of regional geological hazard assessment based on principle component analysis [J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(1): 118-124. (in Chinese with English abstract)]
- [3] MEJIA-NAVARRO M, WOHL E E. Geological hazard and risk evaluation using GIS: methodology and model applied to Medellin, Colombia [J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 1994(4): 459-481.

- [4] 魏会龙, 施秋华, 周金文, 等. 基于层次分析法的深圳市地面坍塌危险性评价 [J]. 中国矿业, 2021, 30(增刊 2): 110-116. [WEI Huilong, SHI Qiuhua, ZHOU Jinwen, et al. Risk assessment of ground collapse in Shenzhen based on analytic hierarchy process [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(Sup 2): 110-116. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王磊, 常鸣, 邢月龙. 基于信息量法模型与 GIS 的滑坡地质灾害风险性评价 [J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(2): 14-20. [WANG Lei, CHANG Ming, XING Yuelong. Risk assessment of landslide geological hazards based on information method model and GIS [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2021, 32(2): 14-20. (in Chinese with English abstract)]
- [6] YU Kaining, FAN Cunliang, LI Jian, et al. Formation Characteristic and Comprehensive Classification of Debris Flow in Typical Mountain Area of the North of China [C]. The XVIII Kerulien International Conference on Geology. Geological Engineering and Mining Exploration in Central Asia. Australia: Aussino Academic Publishing House, 2013: 819-826.
- [7] 张晓敏, 李辉, 刘海南, 等. 基于灰色系统理论的陕西省地质灾害趋势预测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(5): 7-12. [ZHANG Xiaomin, LI Hui, LIU Hainan, et al. Trend prediction of geological hazards in Shaanxi Province based on Grey System Theory [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5): 7-12. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 郭学飞, 王志一, 焦润成, 等. 基于层次分析法的北京市地质环境质量综合评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(1): 70-76. [GUO Xuefei, WANG Zhiyi, JIAO Runcheng, et al. Comprehensive evaluation method of geological environment quality in Beijing based on AHP [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(1): 70-76. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 等. 基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析——以白龙江流域武都段为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 107-115. [LI Xiaolong, SONG Guohu, XIANG Lingzhi, et al. Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong River Basin [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 107-115. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 何珊, 李志军, 董富权, 等. 基于层次分析法的多元信息成矿预测研究——以西藏洛扎地区为例 [J]. 地质与勘探, 2018, 54(1): 148-157. [HE Shan, LI Zhijun, DONG Fuquan, et al. Multiple information metallogenic prediction based on the analytic hierarchy process: A case study of the lhozhang area in Tibet [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(1): 148-157. (in Chinese with English abstract)]
- [11] KAYASTHA P, DHITAL M R, DE SMEDT F. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, west Nepal [J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 398-408.
- [12] 侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 等. 基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 143-151. [HOU Shengshan, CAO Peng, CHEN Liang, et al. Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 143-151. (in Chinese with English abstract)]
- [13] WICAKSONO Y S, SIHOMBING F H, INDRA T L. Landslide susceptibility map of Bogor Area using analytical hierarchy process [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 538(1): 012050.
- [14] 陈绪新, 秦哲, 付厚利, 等. 基于尖点突变模型饱水边坡稳定性分析 [J]. 地质与勘探, 2018, 54(2): 376-380. [CHEN Xuxin, QIN Zhe, FU Houli, et al. Analysis on stability of water-saturation slopes based on the cusp catastrophic model [J]. Geology and Exploration, 2018, 54(2): 376-380. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 冯平, 李绍飞, 李建柱. 基于突变理论的地下水环境风险评价 [J]. 自然灾害学报, 2008, 17(2): 13-18. [FENG Ping, LI Shaofei, LI Jianzhu. Catastrophe theory-based risk evaluation of groundwater environment [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(2): 13-18. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李绍飞, 孙书洪, 王向余. 突变理论在海河流域地下水环境风险评价中的应用 [J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1312-1317. [LI Shaofei, SUN Shuhong, WANG Xiangyu. Application of catastrophe theory to risk assessment of groundwater environment for river basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1312-1317. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 袁颖, 李佳玉. 岩质边坡稳定性评价的尖点突变理论模型 [J]. 地质与勘探, 2021, 57(1): 183-189. [YUAN Ying, LI Jiayu. A cusp catastrophe theory model for evaluation of rock slope stability [J]. Geology and Exploration, 2021, 57(1): 183-189. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 尚志海, 蔡文慧, 欧先交, 等. 基于突变理论的梅州市地质灾害灾度评估 [J]. 安全与环境工程, 2014, 21(3): 55-59. [SHANG Zhihai, CAI Wenhui, OU Xianjiao, et al. Geological hazard degree assessment of Meizhou City based on catastrophe theory [J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(3): 55-59. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 温晓艺, 郑秀清, 陈军锋, 等. 基于突变理论的地质灾害

- 危险性评价 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(4): 575-581. [WEN Xiaoyi, ZHENG Xiuqing, CHEN Junfeng, et al. Risk assessment of geological disaster based on catastrophe theory [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, 50(4): 575-581. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 陈菊艳,朱斌,彭三曦,等.基于AHP和GIS的矿区岩溶塌陷易发性评估——以贵州林歹岩溶矿区为例[J].*自然灾害学报*, 2021, 30(5): 226-236. [CHEN Juyan, ZHU Bin, PENG Sanxi, et al. Assessment of susceptibility to Karst collapse in mining area based on AHP and GIS: A case study in Lindai Karst mining area in Guizhou [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(5): 226-236. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 杜国梁,杨志华,袁颖,等.基于逻辑回归-信息量的川藏交通廊道滑坡易发性评价[J].*水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 102-111. [DU Guoliang, YANG Zhihua, YUAN Ying, et al. Landslide susceptibility mapping in the Sichuan-Tibet traffic corridor using logistic regression-information value method [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 102-111. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李博. GRA——FAHP模型的煤层底板突水危险性评价 [J]. *地质论评*, 2015, 61(5): 1128-1134. [LI Bo. Risk assessment model of coal floor water-irruption based on GRA-FAHP [J]. *Geological Review*, 2015, 61(5): 1128-1134. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘璐瑶,高惠瑛,李照.基于CF与Logistic回归模型耦合的永嘉县滑坡易发性评价[J].*中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(10): 121-129. [LIU Luyao, GAO Huiying, LI Zhao. Landslide susceptibility assessment based on coupling of CF model and logistic regression model in Yongjia County [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, 51(10): 121-129. (in Chinese with English abstract)]
- [24] SHAHINUZZAMAN M, HAQUE M N, SHAHID S. Delineation of groundwater potential zones using a parsimonious concept based on catastrophe theory and analytical hierarchy process [J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29(3): 1091-1116.
- [25] 宁娜,马金珠,张鹏,等.基于GIS和信息量法的甘肃南部白龙江流域泥石流灾害危险性评价[J].*资源科学*, 2013, 35(4): 892-899. [NING Na, MA Jinzhu, ZHANG Peng, et al. Debris flow hazard assessment for the Bailongjiang River, southern Gansu [J]. *Resources Science*, 2013, 35(4): 892-899. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 覃乙根,杨根兰,江兴元,等.基于确定性系数模型与逻辑回归模型耦合的地质灾害易发性评价——以贵州省开阳县为例[J].*科学技术与工程*, 2020, 20(1): 96-103. [QIN Yigen, YANG Genlan, JIANG Xingyuan, et al. Geohazard susceptibility assessment based on integrated certainty factor model and logistic regression model for Kaiyang, China [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(1): 96-103. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 杨宁,陶志斌,高松,等.基于AHP的DRASTIC模型对莱州地区地下水脆弱性研究[J].*地质学报*, 2019, 93(增刊1): 133-137. [YANG Ning, TAO Zhibin, GAO Song, et al. Study of groundwater vulnerability in Laizhou using AHP-based DRASTIC model [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(Sup 1): 133-137. (in Chinese with English abstract)]
- [28] YING X, ZENG G M, CHEN G Q, et al. Combining AHP with GIS in synthetic evaluation of eco-environment quality—a case study of Hunan Province, China [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 209(2/3/4): 97-109.
- [29] 夏兴生,朱秀芳,李月臣,等.基于AHP-PCA熵组合权重模型的三峡库区(重庆段)农业生态环境脆弱性评价[J].*南方农业学报*, 2016, 47(4): 548-556. [XIA Xingsheng, ZHU Xiufang, LI Yuechen, et al. Evaluation for vulnerability of agroecological environment in Three Gorges Reservoir area(Chongqing section)based on AHP-PCA entropy combination weight mode [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(4): 548-556. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 杨康,薛喜成,段钊,等.基于AHP-LR熵组合模型的子长市地质灾害危险性评价[J].*科学技术与工程*, 2021, 21(27): 11551-11560. [YANG Kang, XUE Xicheng, DUAN Zhao, et al. Risk assessment of geological hazards in Zichang County based on AHP-LR entropy combined model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(27): 11551-11560. (in Chinese with English abstract)]