



地球环境学报

Journal of Earth Environment

ISSN 1674-9901, CN 61-1482/X

《地球环境学报》网络首发论文

题目：基于 PCA 与改进 AHP-CRITIC 法的地质灾害风险评价研究——以神木市为例
作者：李嘉昊，谢婉丽，严明，刘琦琦，何高锐
收稿日期：2022-04-10
网络首发日期：2023-04-06
引用格式：李嘉昊，谢婉丽，严明，刘琦琦，何高锐. 基于 PCA 与改进 AHP-CRITIC 法的地质灾害风险评价研究——以神木市为例[J/OL]. 地球环境学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1482.X.20230406.1531.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

稿件类型：Article

收稿：2022-04-10

录用：2022-05-02

DOI: 10.7515/JEE222051

基金项目：国家自然科学基金项目（41972292，41772323）；陕西省重点研发计划项目（2022ZDLSF06-03）；国家重点研发计划项目（2017YFD0800501）

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41972292, 41772323); Shaanxi Province Key R&D Program (2022ZDLSF06-03); National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800501)

通信作者：谢婉丽, Email: xiewanli@nwu.edu.cn

Corresponding Author: XIE Wanli, E-mail: xiewanli@nwu.edu.cn

基于 PCA 与改进 AHP-CRITIC 法的地质灾害风险评价研究——以神木市为例

李嘉昊^{1,2,3}, 谢婉丽^{1,2*}, 严明^{1,2}, 刘琦琦^{1,2}, 何高锐^{1,2}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069
2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031

摘要：神木市是西部地区重要的能源城市，对能源的过度开发利用引发了大量地质灾害，严重阻碍着居民生产生活和城市发展建设，因此开展地质灾害风险评价研究是该地区可持续发展的必由之路。为解决多因子综合作用对评价精度的影响，根据神木市地质环境及社会经济情况选取合适的评价因子分别建立危险性和易损性评价体系，利用主成分分析（PCA）法判断、提取主成分来避免因子间相关性的干扰，计算各因子综合分值得到危险性区划图；首次将改进层次分析（AHP）-CRITIC 主客观组合赋权法应用于承灾体易损性评价当中，通过该方法计算因子综合权重得到各乡镇易损指数。叠加危险区划图和易损指数图完成神木市地质灾害风险性分区，将风险区划为高、较高、中、较低和低五个等级，分别占全市面积 5.31%、7.72%、14.17%、17.08%和 55.72%，表明研究区风险等级中等偏低。可为同类型地区地质灾害风险评价工作提供参考依据。

关键词：地质灾害；主成分分析；危险性分区；组合赋权法；易损指数；黄土高原地区

Research on geological hazard risk assessment based on PCA and improved AHP-CRITIC method: a case study of Shenmu, Shaanxi Province

LI Jiahao^{1,2,3}, XIE Wanli^{1,2*}, YAN Ming^{1,2}, LIU Qiqi^{1,2}, HE Gaorui^{1,2}

1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China
2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China
3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China

Abstract: Background, aim, and scope Shenmu is an important energy city in the western region. Excessive development and utilization of energy have caused many geological disasters, seriously hindering residents' production and life and cities' development and construction. Therefore, conducting geological disaster risk assessment research is the only way to sustainable development in this region. However, the influence of the multi-factor comprehensive effect on assessment accuracy must be solved in the risk assessment process. **Materials and methods** According to the Shenmu geological environment and social and economic conditions, appropriate evaluation factors are selected to establish hazard and vulnerability. Principal Component Analysis (PCA) is used to judge and extract the principal components to correlate different factors, and the comprehensive score is calculated to obtain the hazard zoning map of each factor; the improved Analytic Hierarchy Process (AHP)-CRITIC subjective and objective combination weighting method is applied for the first time to evaluate the vulnerability of the disaster-bearing body and to calculate the comprehensive weight of factors determining the vulnerability index of each town. **Results** The geological risk zoning is realized by superimposing the hazard zoning map and the vulnerability index map in the study area. The risk zoning is divided into five levels: high, mid-to-high, medium, mid-to-low, and low, accounting for 5.31%, 7.72%, 14.17%, 17.08% and 55.72% of the city's area, separately. **Discussion** The high and mid-to-high risk areas are distributed in the junction of river terraces and loess hills and the gully of loess hills areas. Different factors control these areas, including landform, lithology, rainfall and human engineering activities. The terrain is up and down, and the slope stability is poor; therefore, it is easy to form high-risk rocky bodies; geological disasters develop frequently, showing higher risk. The medium-risk areas are mainly located in the 1—3 km buffer zone outside the high-risk area; the upper reaching Kuye River and the middle and upper reaching Tuwei River. Its distribution characteristics are similar to high-risk areas and distributed with leaf veins, showing an obvious watershed. The mid-to-low and low risk areas are mostly located in the northwestern aeolian sand areas and other flat, open and sparsely populated areas. In addition, the economy of these areas is relatively lagging, road transportation and buildings are not dense, and the cultivated land is small; therefore, its vulnerability and hazard level are low. The evaluation results are consistent with the actual situation of the area, and the disaster point position is the same as that of a high-risk area. **Conclusions** The risk level of Shenmu is moderately low, with low local manifestations in the northwest and high along the river in the north, central and southeastern areas, showing a distribution of leaf veins. **Recommendations and perspectives** The PCA and the improved AHP-CRITIC combined weighting methods have good application effects and accurate evaluation results in geological disaster risk assessment, providing more choices and reference values for risk assessment work in other similar regions.

Key words: geological disaster; principal component analysis; hazard zoning; combination weighting method; vulnerability index; Loess Plateau

我国疆域辽阔,地形地貌复杂,长久以来都遭受着地质灾害的威胁,严重阻碍着国民经济持续发展。尤其是进入新世纪,人类频繁的工程建设活动和极端天气导致地质灾害频发。随着“十三五”期间对地质灾害防治体系的全面构建,全国地质灾害发生的频率及其造成的人员和经济损失均有所下降,但依然不能满足我国庞大的人口密度、复杂多样的地质环境对地灾防治工作提出的更高要求。因此,开展区域性地质灾害风险调查与评价工作,科学地判定地质灾害对区内生命财产及社会经济的影响程度,意义重大。

神木市位于陕西省榆林市北部,地处黄土高原地区,区内梁峁遍布,沟壑纵横,河谷侵蚀剧烈的奇异地貌造就了脆弱的生态环境(陈怡平等, 2015),加之黄土特殊的工程地质特性(张茂省等, 2016; Xie et al., 2018a; Xie et al., 2018b; Xie et al., 2021),导致区内地质灾害发育点多面广;另一方面,随着神木市经济发展迅猛,城镇化脚步加快,削坡建房、垦荒耕种、修隧架桥、煤矿开采等人类工程活动进一步加剧了灾害发育。近几年已有学者对神木市地质灾害分布规律(李永红等, 2016)、演变过程(韩健楠等, 2017)以及环境承载力(李仁伟, 2020)进行了研究,但还未有学者系统地进行过地质灾害风险评价研究,因此,对神木市地质灾害风险性开展评价研究是平衡该地区自然环境与社会发展之间关系的必然要求。

自 20 世纪 70 年代国外学者首次对地质灾害开展风险调查评价至今(Westgate and O'keefe, 1977; Carrara, 1983; Brabb, 1985; Cross, 1998),半个多世纪以来,随着研究理论与技术手段的不断提升,评价方法也层出不穷(唐亚明等, 2015; 魏晓旭和颜长珍, 2019; 张茂省等, 2019; Wang et al., 2019; Wang et al., 2021)。主流方法如信息量法(谭玉敏等, 2015)、层次分析法(冯卫等, 2021)、BP 神经网络(王绅皓等, 2021)、逻辑回归模型(马思远等, 2019)、模糊评判法(谢婉丽等, 2018a; 谢婉丽等, 2018b)等已被广泛运用至风险评价工作当中且成果颇丰。

近年来,在国内外学者的不断探索下,地质灾害风险评价研究又取得了新的进展:Chen et al. (2018)对江西崇仁县滑坡进行风险评价的过程中评价比较了四种机器学习方法,结果表明 RF 模型在预测精度上表现最佳。Abedini et al. (2019)于某区域浅层滑坡空间预测中对支持向量机和逻辑模型树进行了评估比较,却发现 SVM 模型在空间预测中远优于 LMT 模型,这说明预测模型性能在不同研究区差异较大。另一方面对于耦合模型的探索也在继续,杨康等(2021)将 AHP 法与逻辑回归(LR)的熵组合模型用于延安子长地区灾害危险性评价,从结果来看耦合模型精度明显优于单一模型。但 Dou et al. (2020)利用集成机器学习与支持向量机混合算法对日本九州岛北部降雨型滑坡进行预测时却发现 SVM-boosting 模型性能最好而 SVM-stacking 性能最差,意味着耦合模型并不一定会提升评价性能。此外还有学者在既有方法上不断寻求革新,如洪增林等(2020)

提出基于 PCA 法的灾害风险评价方法，依靠已知在册点信息选取主成分，通过方差贡献率获得权重，最后采用综合评价指标将研究区进行分级。Sun et al. (2020) 采用基于贝叶斯算法的超参数优化对 RF 模型进行优化，优化后的模型在滑坡危险性预测中表现出较高精度，且与历史上研究区滑坡分布特征高度吻合。

以上案例都取得了较好的评价效果，但对于耦合模型的效果仍存在争议，尚不能取得大范围应用。而单模型评价中往往要求因子间相互独立，因子间相关性较大时则会影响评价精度；且对于承灾体易损性评价不够重视，所使用的方法诸如层次分析（AHP）法、信息量法、模糊综合评判等也是各有优劣，导致评价结果不够精确，如 AHP 法虽过程简单结果直观，但其主观性较强，一般的客观评价方法则通常忽视了评价因子间的相关性及主观决策的作用（谢彦初等，2022）。针对上述问题，本文在对神木市地质灾害分布发育特征进行了实地调查的基础上，结合神木市地质环境条件和社会经济概况，选取坡度、坡向、坡高等 10 个因子作为危险性评价因子，基于 GIS 与 RStudio 软件运用 PCA 法计算主成分系数实现地质灾害危险性分区；选取人口密度、建筑密度等 5 个因子作为易损性评价因子，首次使用改进 AHP-CRITIC 法计算主客观综合权重，通过易损指数实现承灾体易损性评价；结合二者评价结果划分风险等级，为区内防灾减灾工作提供理论依据和科学支撑，对人与自然协调发展具有重要的现实意义。

1 研究区概况

神木市位于陕西省北部黄土高原地区，地理坐标 109° 40′ 00″ —110° 54′ 37″ E, 38° 12′ 31″ —39° 27′ 40″ N，总面积约 7635 km²。区内构造简单，褶皱和断层不发育，地震活动较少；岩土体以风成黄土、中细沙及硬质砂岩与软弱泥岩互层为主；年均降雨量在 400—450 mm，主要集中于 7—9 月，且多以暴雨形式出现。区内发育各类灾害点共 220 处，统计结果见表 1。

表 1 区内灾害类型统计表

Tab. 1 Disaster types in the area

| 灾害类型 | 数量 | 占比 |
|----------------------|----------|----------|
| Disaster type | Quantity | Ratio /% |
| 滑坡 Landslide | 40 | 18.18 |
| 崩塌 Collapse | 163 | 74.09 |
| 地面塌陷 Ground collapse | 17 | 7.73 |

由图 1 可知，灾害地貌上多分布于黄土丘陵及河流阶地区，占 99%以上；按流域分超过半数灾点位于窟野河流域范围；按乡镇分以永兴街道和贺家川镇为最，有 4 个镇不发育灾害点。区内灾害发育以地形地貌条件为基础，斜坡结构决定了坡体破坏方式；岩土体类型为灾害的发生提供了丰富的物源，同时其自身性质也成为灾害发生的内因；水文地质条件加速了地质灾害的发生；而气候、地震及人类工程活动则充当着诱发因素的角色。

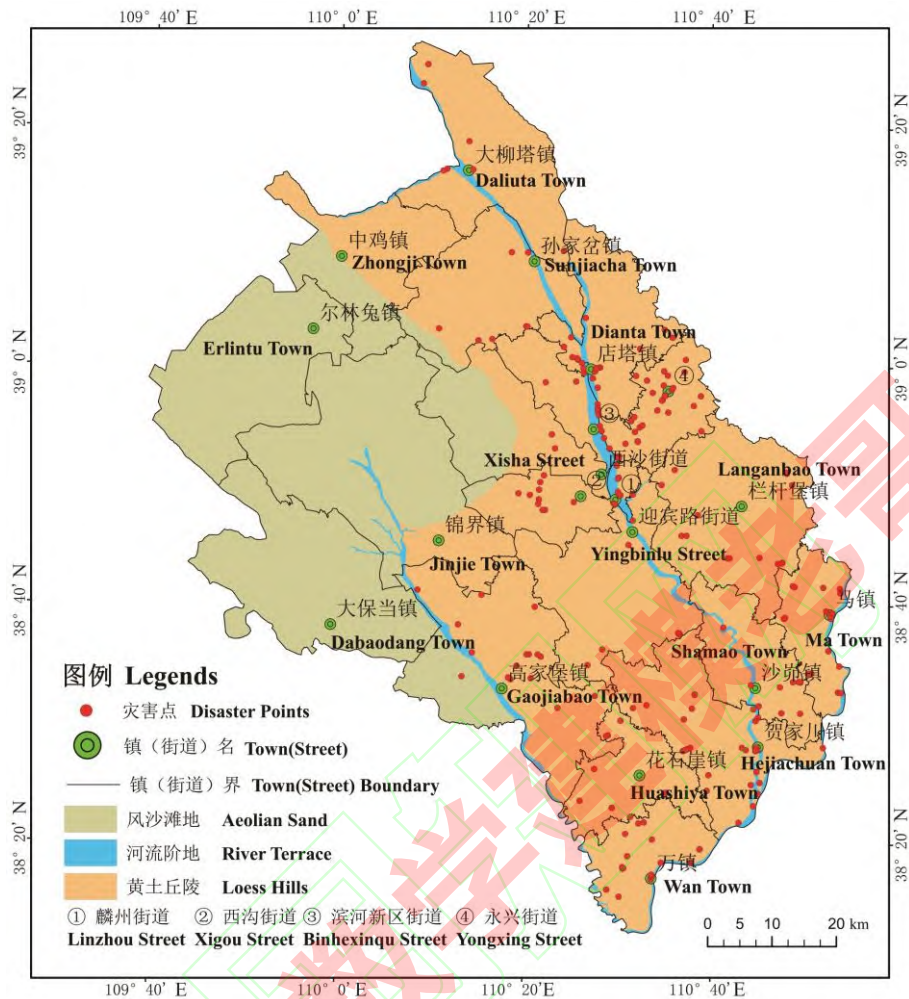


图1 研究区灾害点分布图

Fig. 1 Distribution map of disasters in the study area

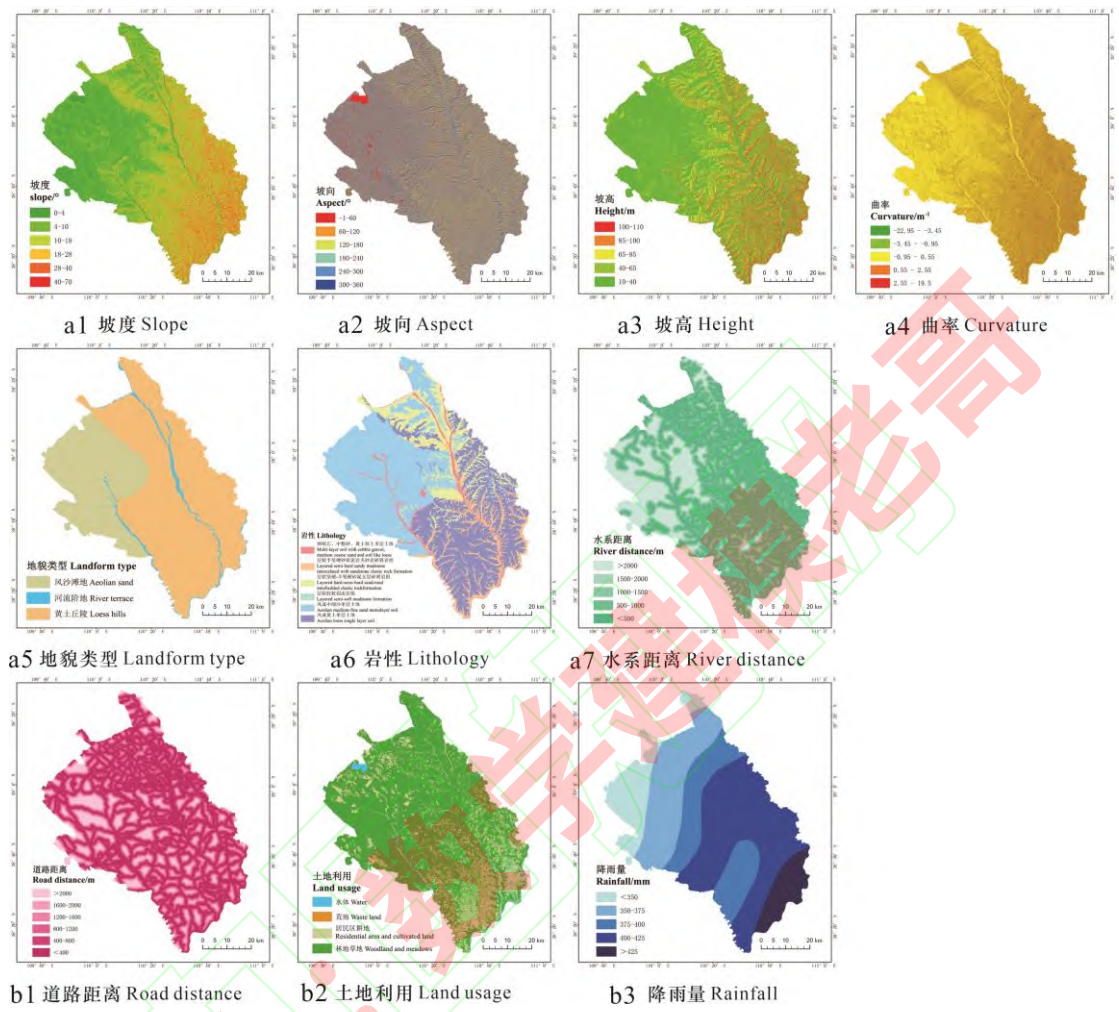
2 基于 PCA 法的地质灾害危险性评价

根据研究区地质环境及灾害点孕灾条件,选取坡度、坡向、坡高、坡面曲率、岩性、地貌类型、水系距离 7 个孕灾条件因子及道路距离、土地利用、降雨(取多年平均降雨量) 3 个诱发因子作为危险性评价指标(图 2)。

考虑神木市已有数据精度和比例尺,采用栅格作为评价单元。根据神木市面积大小以 50 m×50 m 规格将研究区划为约 299.98 万个栅格。

PCA 是一种通过大量相关变量向一组很少的无关变量的转化来解决多变量数据中信息过度复杂问题的数据处理方法,每个成分变量在最大化各因子贡献率的同时尽可能保留了原始数据的信息,可以理解为对数据进行“降维”处理(余丰华等, 2015)。通过对因子相关性的大量测试后发现,因子间相关性越强则越能用更少的主成分解释更多的样本特征,故可以很好地解决因子间相关性过大的问题。以下数据分析均通过 RStudio 软

件实现。



a: 孕灾条件因子, b: 诱发因子。a: pregnancy condition factors, b: inducing factors.

图2 危险性评价因子图层

Fig. 2 Hazard assessment factor layer

2.1 主成分数量判断

首先计算因子间相关系数。由于主成分计算基于各因子间相关系数实现，而通常上百个样本数据即可准确判断各因子间相关性，不需要过度依赖大量样本数据，故本次评价利用 220 个灾害点数据即可完成。将选取的评价因子归一化并提取至灾害点，输出灾点属性表并保存为“.csv”格式作为样本数据。利用 RStudio 中“cor”函数计算相关性，结果见表 2。

利用碎石准则判断主成分数量，碎石准则是一种通过碎石曲线图中各因素对应特征值的大小来判断因素数量的方法。加载“psych”函数包运行“fa.parallel”函数，通过相关系数矩阵输出碎石曲线见图 3。

表2 相关系数矩阵

Tab. 2 Correlation coefficient matrix

[illegible]

| | | | | | | | | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|---|
| distance | | | | | | | | | | |
| 地貌类型 | | | | | | | | | | |
| Landform | 0.056 | -0.121 | -0.111 | -0.009 | -0.003 | 0.100 | -0.067 | -0.037 | 1 | |
| 降雨 | | | | | | | | | | |
| Rainfall | -0.076 | -0.003 | 0.097 | 0.081 | 0.079 | 0.119 | -0.040 | 0.053 | 0.033 | 1 |

图 3 中横纵坐标为各主成分及其对应特征值，红线则表示与初始矩阵大小相等的一组随机数据矩阵相应的平均特征值，根据“Kaiser-Harris”准则及平行分析（Kabacoff, 2016），通常保留特征值大于 1 或者特征值大于与初始矩阵大小相等的随机数据矩阵平均特征值的主成分，这意味着该主成分对方差的解释度大于单个因子。两种准则均表明保留 5 个主成分即可解释因子集的大部分信息，故提取 5 个主成分。

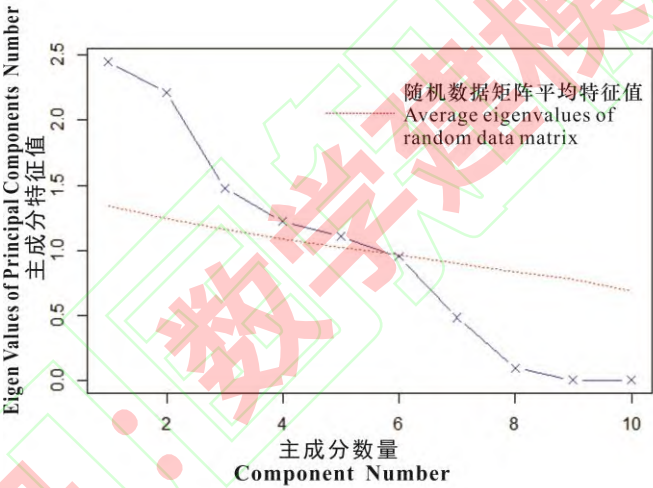


图 3 碎石曲线图

Fig. 3 Scree plot with parallel analysis

2.2 主成分计算

键入代码“principal(r=relate[-1,],nfactors=5,rotate=“none”)”计算主成分，其中“[-1,]”表示表头不计入计算；“nfactors=5”表示保留 5 个主成分；“rotate=“none””表示主成分不旋转。得到主成分载荷见表 3。

表 3 主成分载荷表

Tab. 3 Principal component loadings

| 主成分 | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Principal component | | | | | |
| 坡度 Slope | 0.777 | 0.080 | 0.500 | 0.186 | 0.004 |

| | | | | | |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 坡向 Aspect | 0.260 | -0.467 | 0.693 | -0.424 | -0.106 |
| 坡高 Height | -0.918 | -0.306 | 0.134 | 0.091 | -0.053 |
| 曲率 Curvature | -0.613 | -0.302 | 0.266 | 0.508 | 0.179 |
| 土地利用 Land usage | -0.082 | 0.946 | 0.077 | -0.146 | -0.027 |
| 岩性 Lithology | 0.276 | 0.009 | -0.044 | 0.637 | 0.347 |
| 道路距离 Road distance | -0.324 | 0.908 | 0.129 | 0.004 | 0.100 |
| 水系距离 River distance | 0.408 | -0.162 | -0.368 | -0.149 | 0.706 |
| 地貌类型 Landform | 0.439 | -0.007 | -0.343 | 0.446 | -0.647 |
| 降雨 Rainfall | -0.128 | -0.248 | -0.616 | -0.309 | -0.12 |

表 3 中 PC 栏表示主成分载荷，即各个主成分与评价因子之间的相关系数，一般理解为主成分对每个因子的解释度。而表 4 则表示主成分对整个因子集的解释度。

表 4 方差贡献度表

Tab. 4 Variance contribution

| 主成分 Principal component | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| 特征值 SS loadings | 2.45 | 2.22 | 1.48 | 1.22 | 1.11 |
| 方差贡献度 Proportion var | 0.25 | 0.22 | 0.15 | 0.12 | 0.11 |
| 累计方差贡献度 Cumulative var | 0.25 | 0.47 | 0.61 | 0.74 | 0.85 |
| 方差贡献度比例 Proportion explained | 0.29 | 0.26 | 0.17 | 0.14 | 0.13 |
| 累计方差贡献度比例 Cumulative proportion | 0.29 | 0.55 | 0.72 | 0.87 | 1.00 |

通常累计方差贡献度达到 80%即表示该组主成分基本可以解释整个因子集，由表 4 可知 5 个主成分对因子集累计解释度为 85%，表明因子集大部分信息已被保留。

主成分是一个较为模糊的概念，它并不代表某一个或几个评价因子，通过对主成分进行正交旋转来改变各主成分对各因子的解释度，可以更直观地看到各主成分的含义，但旋转不会改变累计解释度。本文使用方差极大旋转（rotate = “varimax”），结果见表 5。

表 5 主成分旋转载荷表

Tab. 5 Loadings after principal component rotation

| 主成分 | RC1 | RC2 | RC3 | RC4 | RC5 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

| Principal component | | | | | | |
|---------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 坡度 | Slope | -0.430 | -0.110 | 0.813 | 0.134 | 0.136 |
| 坡向 | Aspect | -0.074 | -0.486 | 0.563 | -0.578 | -0.251 |
| 坡高 | Height | 0.907 | -0.040 | -0.269 | -0.223 | -0.140 |
| 曲率 | Curvature | 0.864 | -0.111 | 0.086 | 0.227 | -0.097 |
| 土地利用 | Land usage | -0.202 | 0.935 | 0.066 | -0.096 | -0.010 |
| 岩性 | Lithology | 0.019 | -0.066 | 0.251 | 0.727 | 0.086 |
| 道路距离 | Road distance | 0.080 | 0.968 | 0.048 | 0.013 | -0.102 |
| 水系距离 | River distance | -0.492 | -0.276 | -0.177 | 0.490 | -0.509 |
| 地貌类型 | Landform | -0.244 | -0.150 | -0.020 | 0.161 | 0.905 |
| 降雨 | Rainfall | -0.142 | -0.234 | -0.689 | -0.126 | 0.036 |

由表 5 可知，RC1 中坡高和曲率载荷较大，RC4 中岩性和坡向载荷较大，代表 RC1 和 RC4 对坡体自身特性解释较多，可以理解为坡体特征指数；RC2 对土地利用和道路距离解释较多，可以理解为人类工程活动指数；RC5 中地貌类型和水系距离载荷较大，可认为它代表了地理环境指数；而 RC3 并不容易归类，它对坡度和降雨解释度较大，可以认为它是一个较均衡的主成分。

使用“write.csv”函数将各主成分权重（即主成分系数）导出，从导出结果可以发现，每个因子在主成分上的权重即为旋转之后的主成分载荷。

2.3 危险性评价结果

将表 5 中各主成分系数分别乘给对应的因子图层，相加后乘以该主成分的标准差，然后根据各主成分方差贡献度比例将得到的五个主成分图层进行叠加，计算过程如下：

$$P_1 = \sqrt{2.45}(-0.43X_1 - 0.074X_2 + \cdots - 0.142X_{10}) \quad (1)$$

$$P_2 = \sqrt{2.22}(-0.11X_1 - 0.486X_2 + \cdots - 0.234X_{10}) \quad (2)$$

$$P_3 = \sqrt{1.48}(0.813X_1 - 0.563X_2 + \cdots - 0.689X_{10}) \quad (3)$$

$$P_4 = \sqrt{1.22}(0.134X_1 - 0.578X_2 + \cdots - 0.126X_{10}) \quad (4)$$

$$P_5 = \sqrt{1.11}(0.136X_1 - 0.251X_2 + \cdots + 0.036X_{10}) \quad (5)$$

$$P = 0.29P_1 + 0.26P_2 + 0.17P_3 + 0.14P_4 + 0.13P_5 \quad (6)$$

最终输出危险性分区图见图 4。

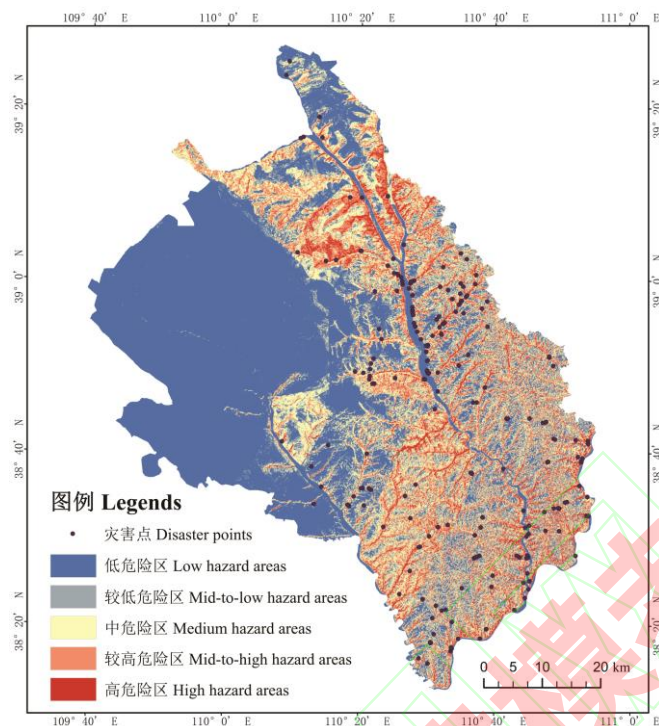


图4 研究区地质灾害危险性等级分区图

Fig. 4 Geological hazard level zoning map in study area

由图 4 可知神木市高及较高危险区在窟野河、秃尾河及黄河沿岸河流阶地与黄土梁峁地貌相接的区域以及梁峁区内部坡度、坡高较大的区域分布较多，呈现出“叶脉状”分布规律。而整个西北部地区则整体为低危险区，这是由于该地区主要为平缓的风沙滩地地貌。表 6 中统计了神木市各危险性分区面积及占比，由高到低分别为 443.07 km²、1003.67 km²、1656.26 km²、535.34 km² 和 3675.05 km²，各占全区面积 6.06%、13.72%、22.65%、7.32%和 50.25%。

表 6 各危险区面积统计表

Tab. 6 Area of each hazard zone

| 危险性等级 Hazard grade | 面积 Area/km ² | 占比 Ratio/% |
|--------------------|-------------------------|------------|
| 高 High | 443.07 | 6.06 |
| 较高 Mid-to-high | 1003.67 | 13.72 |
| 中 Medium | 1656.26 | 22.65 |
| 较低 Mid-to-low | 535.34 | 7.32 |
| 低 Low | 3675.05 | 50.25 |

虽然从灾点分布及危险性分区来看，评价结果与实际情况基本相符，但对于整个研究区来说，该结果对区内各部分的评价是否准确还需验证。利用 R 语言生成 ROC 曲线，并与同因子条件下逻辑回归（LR）模型评价

结果的 ROC 曲线进行对比（图 5）。

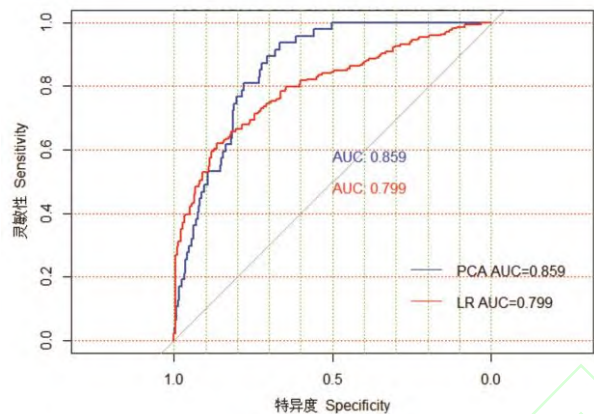


图 5 PCA 法与 LR 模型 ROC 曲线对比图

Fig. 5 Comparison of ROC curve between PCA method and LR model

根据以往经验，AUC 值（area under curve，即曲线与横坐标及直线 $x=1$ 所围图形面积）大于 0.8 时意味着模型精度较高，由图可知 PCA 法的 AUC 值为 0.859，表示该方法的评价结果精确，而 LR 模型评价结果的 AUC 值仅为 0.799，小于 PCA 法，这是由于 LR 模型对评价因子独立性要求较高，而当评价因子间相关性较大时，PCA 法则表现更佳。从结果来看，PCA 法从适用性和精确性上讲都更为适合该地区地质灾害风险评价工作。

3 地质灾害风险性评价

3.1 基于改进 AHP-CRITIC 组合赋权法的承灾体易损性评价

改进 AHP-CRITIC 组合赋权法通过分别计算因子主客观权重，再利用最小鉴别信息原理叠加来求取综合权重（赵书强和汤善发，2019）。其中 AHP 法提供了主观决策作用，CRITIC 法考虑了因子相关性，二者结合可使评价结果更精确。该方法在中药学及化工领域应用广泛（张娇等，2020；刘晓悦等，2021），本文首次将该方法应用于承灾体易损性评价当中。

3.1.1 方法介绍

（1）AHP 法是一种基于专家打分的主观赋权法，目前在风险评价工作中应用广泛。传统 AHP 法往往因判断矩阵不满足一致性检验而无法应用，只能重新构造判断矩阵直到一致性检验通过，增加了太多无谓的工作量。而改进 AHP 法采用标度构造法构造判断矩阵，通过因子重要程度排序确定相邻因子间标度值，再利用相邻因子间的标度值来确定矩阵中的其他元素，这样无论如何选择选择标度，所构造的矩阵都具有有一致性（李娜娜和何正友，2009）。本文采用 1—2 标度来构造判断矩阵（表 7）。

表 7 标度值含义

Tab. 7 Meaning of scale value

| 标度值 | Scale values | 重要程度 | Importance |
|-----|--------------|------|----------------------|
| 1.0 | | 同等重要 | Equally important |
| 1.2 | | 稍微重要 | Slightly important |
| 1.4 | | 一般重要 | Generally important |
| 1.6 | | 强烈重要 | Strongly important |
| 1.8 | | 绝对重要 | Absolutely important |

判断矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & s_{12} & s_{12}s_{23} & \cdots & \prod_{i=1}^n s_{i(i+1)} \\ \frac{1}{s_{12}} & 1 & s_{23} & \cdots & \prod_{i=2}^n s_{i(i+1)} \\ \frac{1}{s_{12}s_{23}} & \frac{1}{s_{23}} & 1 & \cdots & \prod_{i=3}^n s_{i(i+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\prod_{i=1}^n s_{i(i+1)}} & \frac{1}{\prod_{i=2}^n s_{i(i+1)}} & \frac{1}{\prod_{i=3}^n s_{i(i+1)}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: s_{ij} 表示因子间对应标度值, $\prod_{j=1}^n s_{i(i+1)}$ 表示两因子间相邻因子标度值的累乘。

于是各评价因子权重为:

$$x_j = \frac{(\prod_{i=1}^n r_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{j=1}^n (\prod_{i=1}^n r_{ij})^{\frac{1}{n}}} \quad (8)$$

(2) CRITIC 法属于客观赋权法的一种, 该方法通过标准差和相关系数来反映样本离散性和因子间冲突性, 标准差越大说明离散程度越大, 因子权重也就越大; 相关系数越大说明因子间冲突性越强, 其权重也就越小 (王瑛和姜芸芸, 2017; 王雯雯, 2019)。CRITIC 法在考虑样本信息量和因子相关性的基础上还利用变异系数使标准差所反映的离散性更加贴合实际, 具有显著的优越性 (王瑛等, 2014)。

①对于含有 n 个指标的 m 个样本, 其评价矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: a_{ij} 为第 j 个因子在第 i 个样本上的取值。

②选取因子归一化:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_j(a_{ij})}{\max_j(a_{ij}) - \min_j(a_{ij})} \quad (10)$$

③变异系数计算:

$$\bar{a}_j = \frac{\sum_{i=1}^m a_{ij}}{m} \quad (11)$$

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (a_{ij} - \bar{a}_j)^2} \quad (12)$$

$$\mu_j = \frac{s_j}{\bar{a}_j} \quad (13)$$

式中： \bar{a}_j 为各评价因子平均值； s_j 为标准差； μ_j 为变异系数。

④相关系数矩阵计算：

$$\kappa_{ij} = \frac{cov(y_k, y_l)}{(s_k s_l)}, \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad l = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式中： κ_{ij} 表示因子间的相关系数， $cov(y_k, y_l)$ 表示因子间的协方差

⑤因子信息量计算：

$$\omega_j = \mu_j \sum_{i=1}^n (1 - \kappa_{ij}), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

于是各评价因子权重为：

$$y_j = \frac{\omega_j}{\sum_{i=1}^n \omega_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

(3) 综合权重由最小鉴别信息原理求取，其结果能尽可能接近两者而不产生偏重。

$$z_j = \frac{\sqrt{x_j y_j}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{x_j y_j}} \quad (17)$$

3.1.2 易损指数计算

根据研究区社会经济情况，综合选取人口密度、道路密度、建筑密度、耕地密度及 GDP 密度五个指标作为评价因子。由于研究区面积较大且易损性因子难以细致化，故本次以研究区 20 个镇（街道）作为评价单元来建立易损性评价体系。

(1) 采用改进 AHP 法对各评价因子进行计算，根据以往经验及专家判断，选取相邻因子间标度值见表 8（因子顺序为：①人口密度、②建筑密度、③道路密度、④耕地密度及⑤GDP 密度）。

表 8 相邻因子间标度值

Tab. 8 Scale value between adjacent factors

| 相邻因子 Adjacent factor | ①—② | ②—③ | ③—④ | ④—⑤ |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 标度值 Scale value | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 1.3 |

将表 8 中的标度值带入式(9)的矩阵当中，得到判断矩阵如下：

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1.300 & 1.560 & 1.716 & 2.231 \\ 0.769 & 1 & 1.200 & 1.320 & 1.716 \\ 0.641 & 0.833 & 1 & 1.100 & 1.430 \\ 0.583 & 0.758 & 0.909 & 1 & 1.300 \\ 0.448 & 0.583 & 0.699 & 0.769 & 1 \end{bmatrix}$$

将上述矩阵中的元素代入式(10)，求得各评价因子主观权重 x_j 见表 9。

表 9 评价因子主权重

Tab. 9 Subjective weights of evaluation factors

| 人口密度 | 建筑密度 | 道路密度 | 耕地密度 | GDP 密度 |
|--------------------|------------------|--------------|-------------------------|-------------|
| Population density | Building density | Road density | Cultivated land density | GDP density |
| 0.358 | 0.231 | 0.172 | 0.140 | 0.098 |

由表 9 可知，各因子主权重大小与标度值密切相关，反映出该方法受主观因素影响较大。

(2) 将原始数据代入式(11)–(16)得到因子客观权重，运算结果见表 10。

表 10 中各因子客观权重 y_j 由其相关系数矩阵和各因子对应数据的标准差获得，避免了主观因素影响，但该方法过于依赖数据，当样本数据量不够大时，其计算结果就会产生偏差，如表中对于道路密度权重的计算相比实际情况偏小。

将 x_j 和 y_j 代入式(17)，得到综合权重 $z_j = \{0.356, 0.230, 0.098, 0.177, 0.139\}$ 。这种结合降低了主观和客观方法的误差，所得综合权重与实际情况更加相符。

(3) 各镇（街道）易损性指数 η_i 可由如下公式计算：

$$\eta_i = \sum_{j=1}^5 b_{ij} z_j \quad (18)$$

根据式(14)将原始数据进行归一化，将得到的结果及 z_j 代入式(18)，求得各镇（街道）的易损性指数 η_i ，结果见表 11。

表 10 计算结果表

Tab. 10 Calculation result

| 参数 | 人口密度 | 建筑密度 | 道路密度 | 耕地密度 | GDP 密度 |
|-------------|--------------------|------------------|--------------|-------------------------|-------------|
| Parameter | Population density | Building density | Road density | Cultivated land density | GDP density |
| \bar{a}_j | 288.257 | 0.023 | 0.672 | 0.197 | 0.332 |
| s_j | 970.507 | 0.050 | 0.264 | 0.133 | 0.538 |
| μ_j | 3.367 | 2.188 | 0.394 | 0.678 | 1.620 |
| ω_j | 6.215 | 4.000 | 0.965 | 3.930 | 3.451 |
| y_j | 0.349 | 0.225 | 0.054 | 0.221 | 0.194 |

表 11 各镇（街道）归一化数据及易损性指数表

Tab. 11 Normalized data and vulnerability index of each town(street)

| 人口密度 | 建筑密度 | 道路密度 | 耕地密度 | GDP 密度 | η_i |
|------|------|------|------|--------|----------|
|------|------|------|------|--------|----------|

| | Population density | Building density | Road density | Cultivated land density | GDP density | |
|-------------------|--------------------|------------------|--------------|----------------------------|-------------|-------|
| 滨河新区街道 | 0.080 | 0.088 | 0.902 | 0.183 | 0.245 | 0.204 |
| Binhexinqu Street | | | | | | |
| 西沙街道 | 0.043 | 0.032 | 0.216 | 0.165 | 0.144 | 0.093 |
| Xisha Street | | | | | | |
| 麟州街道 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.823 |
| Linzhou Street | | | | | | |
| 迎宾路街道 | 0.030 | 0.014 | 0.075 | 0.615 | 0.018 | 0.132 |
| Yingbinlu Street | | | | | | |
| 永兴街道 | 0.003 | 0.006 | 0.227 | 0.357 | 0.024 | 0.091 |
| Yongxing Street | | | | | | |
| 西沟街道 | 0.008 | 0.041 | 0.205 | 0.424 | 0.119 | 0.124 |
| Xigou Street | | | | | | |
| 高家堡镇 | 0.004 | 0.022 | 0.014 | 0.311 | 0.006 | 0.063 |
| Gaojiabao Town | | | | | | |
| 店塔镇 | 0.013 | 0.035 | 0.669 | 0.174 | 0.146 | 0.129 |
| Dianta Town | | | | | | |
| 孙家岔镇 | 0.007 | 0.030 | 0.470 | 0.207 | 0.341 | 0.139 |
| Sunjiacha Town | | | | | | |
| 大柳塔镇 | 0.035 | 0.063 | 0.222 | 0.116 | 0.442 | 0.131 |
| Daliuta Town | | | | | | |
| 花石崖镇 | 0.001 | 0.018 | 0.050 | 0.821 | 0.003 | 0.155 |
| Huashiya Town | | | | | | |
| 中鸡镇 | 0.003 | 0.036 | 0.176 | 0.342 | 0.025 | 0.090 |
| Zhongji Town | | | | | | |
| 贺家川镇 | 0.002 | 0.021 | 0.192 | 0.660 | 0.002 | 0.141 |
| Hejiachuan Town | | | | | | |
| 尔林兔镇 | 0.002 | 0.011 | 0 | 0.262 | 0.002 | 0.050 |
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Erlintu Town | | | | | | |
| 万镇 | 0.002 | 0.032 | 0.017 | 1 | 0.006 | 0.187 |
| Wanzhen Town | | | | | | |
| 大保当镇 | 0.009 | 0.020 | 0.072 | 0.169 | 0.081 | 0.056 |
| Dabaodang Town | | | | | | |
| 马镇 | 0.002 | 0.023 | 0.241 | 0.862 | 0.004 | 0.183 |
| Mazhen Town | | | | | | |
| 栏杆堡镇 | 0 | 0 | 0.090 | 0.517 | 0 | 0.100 |
| Langanbao Town | | | | | | |
| 沙峁镇 | 0.002 | 0.017 | 0.040 | 0.791 | 0.002 | 0.149 |
| Shamao Town | | | | | | |
| 锦界镇 | 0.010 | 0.017 | 0.001 | 0.148 | 0.214 | 0.064 |
| Jinjie Town | | | | | | |
| z_j | 0.356 | 0.230 | 0.098 | 0.177 | 0.139 | |

传统方法如模糊评判法往往根据易损程度大小将镇（街道）单元由高到低划分为几个等级（李宇亮等，2014；蔡向阳和铁永波，2016），这种方法在镇（街道）数量较少或各镇（街道）易损程度较均匀时能起到简化评价过程且不影响评价精度的作用，但对于神木这种镇（街道）数量多且易损性跨度大、不均匀的地区，这样简单地划分并不能如实反映各镇（街道）易损程度且无法体现同一级别里各镇（街道）之间的易损差异，对评价结果影响较大。而改进 AHP-CRITIC 法通过易损性指数的形式使得每个镇（街道）单元易损程度得以量化，且能体现出各单元之间的差异，在此基础上进行风险分区将更为精确。由于 ArcGIS 重分类不保留小数，此处以 $1000\eta_i$ 作为易损性指数赋值，得到易损性指数图见图 6。

由图 6 可知麟州街道易损性远高于其他镇（街道），为 823，这是由于麟州街道为神木市中心，其人口、建筑、道路和 GDP 密度均远高于其他镇（街道）；其次为滨河新区街道，该区位于市中心外围，亦表现出较高易损性；再次为万镇、马镇及贺家川等镇，这些镇位于神木市东南部黄河沿岸，虽人口及 GDP 密度不高，但这些地区由于沿河，主要以农耕为主，故耕地密度为控制这些地区易损性的主要因素；易损性低的镇有尔林兔镇、大保当镇、高家堡镇和锦界镇，这些镇均位于神木市西北部风沙滩地区，该区域耕地、人口密度等均较其他地区小，故在易损性上表现为较低的易损程度。

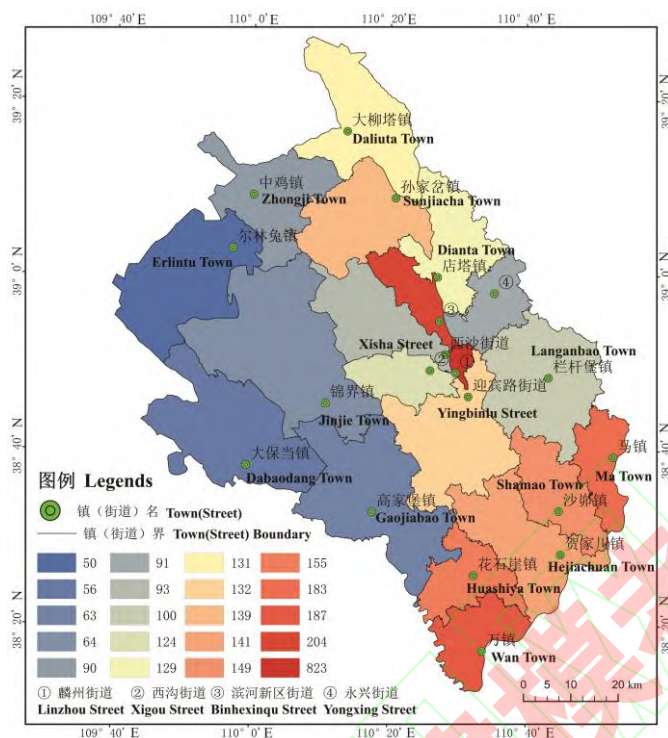


图6 研究区各镇(街道)易损性指数图

Fig. 6 Vulnerability index map of each town (street) in the study area

3.2 地质灾害风险区划

将各乡镇(街道)易损性指数图与危险性分区图进行叠加,得到神木市地质灾害风险分区见图7。对各风险区面积及其占比进行统计,结果如表11所示。

由表12可知,神木市风险区面积由高到低分别为387.79 km²、564.34 km²、1036.58 km²、1249.38 km²和4075.30 km²,分别占全市总面积5.31%、7.72%、14.17%、17.08%和55.72%。其中高、较高风险区基本沿窟野河、黄河及秃尾河下游沿岸分布,沿垂直河岸方向向沟谷内部延伸,该区涉及到的镇(街道)按区域可大致分为三部分:北部为孙家岔及大柳塔镇;中部为滨河新区街道、麟州街道和迎宾路街道;南部为马镇镇、沙峁镇、贺家川镇、花石崖镇及万镇镇。

中风险区除了在高风险区周围分布以外,还在窟野河上游及秃尾河中游部分分布较多,从行政区划上讲涉及到的镇(街道)与高风险区类似,此外在窟野河上游中鸡镇及秃尾河中游高家堡镇分布较多。较低及低风险区主要分布于区内西北部的风沙滩地地区,包括尔林兔镇、大保当镇、锦界镇、高家堡镇、中鸡镇及西沙街道,另外在黄土丘陵区地势平坦、人烟稀少的地方亦有零星分布。总体上看,神木市地质灾害风险性中等偏低,局部表现为西北部低,北部、中部及南部高,高风险区呈现出沿区内三条主要河流沿岸的“叶脉”状分布。

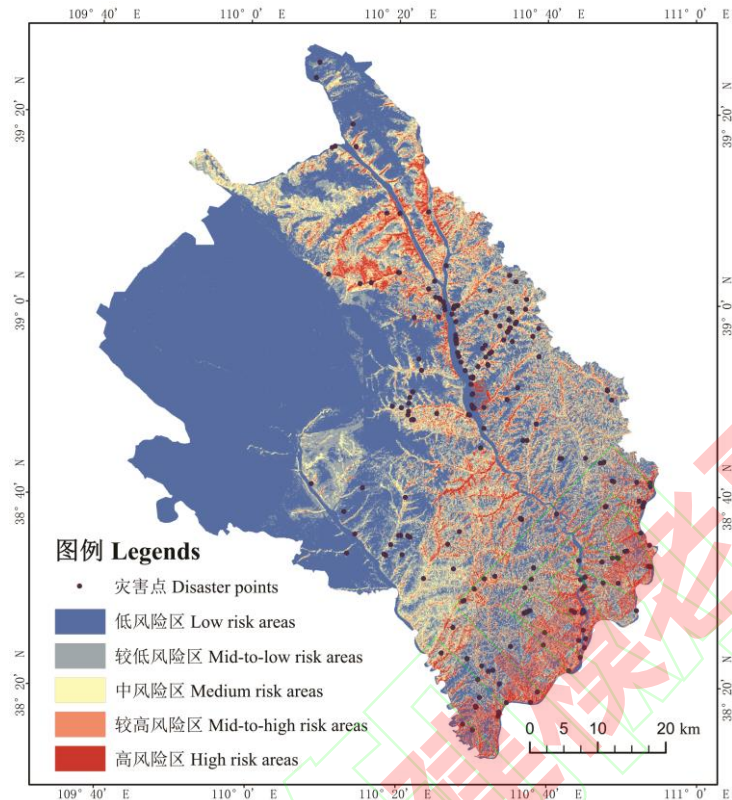


图 7 研究区地质灾害风险分区图

Fig. 7 Geological disaster risk zoning map in the study area

表 12 神木市各风险区面积统计表

Tab. 12 Area of each risk zone in Shenmu

| 风险等级 Risk grade | 面积 Area/km ² | 占比 Ratio/% |
|------------------|-------------------------|------------|
| 高风险 High | 387.79 | 5.31 |
| 较高风险 Mid-to-high | 564.34 | 7.72 |
| 中风险 Medium | 1036.58 | 14.17 |
| 较低风险 Mid-to-low | 1249.38 | 17.08 |
| 低风险 Low | 4075.30 | 55.72 |

4 结论

本文针对风险评价工作中评价因子间复杂的相关性提出主成分分析（PCA）法和改进 AHP-CRITIC 法分别对地质灾害危险性和承灾体易损性进行评价。选取坡度、坡高等 10 个评价因子建立危险性评价体系，基于 RStudio 软件运用 PCA 法提取主成分，根据主成分贡献率计算得到神木市地质灾害危险性分区图；选取人口密度和建筑密度等 5 个指标作为评价因子建立易损性评价体系，首次将改进 AHP-CRITIC 组合赋权法应用于地质灾害风险评价当中，借助该方法求得各镇（街道）易损性指数；通过叠加危险性分区图和易损性指数图完成

神木市风险性分区。主要结论如下:

(1) 危险性区划结果表明, 神木市地质灾害危险性分布特征明显, 高及较高危险区在窟野河、秃尾河及黄河沿岸河流阶地与黄土丘陵地貌相接的区域以及梁峁区内部坡度、坡高较大的区域分布较多; 西北部地区由于地貌因素影响, 整体表现为低危险性。利用 ROC 曲线进行精度检验并与 LR 模型对比, 表明 PCA 法在适用性和精确性上表现俱佳。

(2) 易损性分析结果表明: 各镇(街道)中麟州街道易损性最高, 滨河新区街道次之, 再次为万镇、马镇及贺家川等南部黄河沿岸乡镇, 西北部尔林兔镇、大保当镇、高家堡镇和锦界镇则表现出低易损性。改进 AHP-CRITIC 法既提升了评价过程中的客观性, 又考虑了主观决策的作用, 从结果来看, 各镇(街道)易损程度与其实际情况相符。

(3) 风险区划结果表明: 神木市风险区面积由高到低分别为 387.79 km^2 、 564.34 km^2 、 1036.58 km^2 、 1249.38 km^2 和 4075.3 km^2 , 分别占全市总面积 5.31%、7.72%、14.17%、17.08% 和 55.72%。其中高及较高风险区主要分布于河流阶地与黄土梁峁区交界地带以及黄土梁峁区沟壑地带; 中风险区主要位于较高风险区外围 1—3 km 缓冲区内以及窟野河上游、秃尾河中上游部分; 而较低及低风险区大部分位于西北部风沙滩地区以及其他区域地势平坦开阔人烟稀少的地区。总体上来说研究区风险等级不高, 局部表现为西北部低, 北部、中部及东南沿河地区高。

(4) 从评价结果来看, PCA 法和改进 AHP-CRITIC 组合赋权法在风险评价中不但应用效果好且评价结果精确, 可为其他同类地区风险评价工作提供更多选择和参考价值, 具有广阔的应用前景。

参考文献

- 蔡向阳, 铁永波. 2016. 我国山区城镇地质灾害易损性评价研究现状与趋势 [J]. 灾害学, 31(4): 200–204. [Cai X Y, Tie Y B. 2016. Progress of urban geological disaster vulnerability assessment in domestic [J]. *Journal of Catastrophology*, 31(4): 200–204.]
- 陈怡平, 骆世明, 李凤民, 等. 2015. 对延安黄土沟壑区农业可持续发展的建议 [J]. 地球环境学报, 6(5): 265–269. [Chen Y P, Luo S M, Li F M, et al. 2015. Proposals on the sustainable development of agriculture in Yan'an gully regions [J]. *Journal of Earth Environment*, 6(5): 265–269.]
- 冯卫, 唐亚明, 马红娜, 等. 2021. 基于层次分析法的咸阳市多灾种自然灾害综合风险评价 [J]. 西北地质, 54(2): 282–288. [Feng W, Tang Y M, Ma H N, et al. 2021. Comprehensive risk assessment of multi-hazard natural disasters in Xianyang city based on AHP [J]. *Northwestern Geology*, 54(2): 282–288.]
- 韩健楠, 刘海南, 贺卫中, 等. 2017. 陕西榆神府生态脆弱矿区地质灾害演化过程 [J]. 灾害学, 32(1): 177–182. [Han J N, Liu H N, He W Z, et al. 2017. Evolutionary process of geological hazards in yushenfu ecological fragile mining area [J]. *Journal of Catastrophology*,

32(1): 177–182.]

- 洪增林, 李永红, 张玲玉, 等. 2020. 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*, 35(1): 118–124. [Hong Z L, Li Y H, Zhang L Y, et al. 2020. A method of regional geological hazard assessment based on principle component analysis [J]. *Journal of Catastrophology*, 35(1): 118–124.]
- Kabacoff R I. 2016. R 语言实战 [M]. 第 2 版. 王小宁, 刘甌芯, 黄俊文, 等. 译. 北京: 人民邮电出版社: 298–304. [Kabacoff R I. 2016. *R in Action* [M]. 2nd edition. Wang X N, Liu X J, Huang J W, et al. translated. Beijing: Posts & Telecom Press: 298–304.]
- 李娜娜, 何正友. 2009. 主客观权重相结合的电能质量综合评估 [J]. *电网技术*, 33(6): 55–61. [Li N N, He Z Y. 2009. Power quality comprehensive evaluation combining subjective weight with objective weight [J]. *Power System Technology*, 33(6): 55–61.]
- 李仁伟. 2020. 神木市地质环境承载力评价研究 [D]. 西安: 西安科技大学. [Li R W. 2020. Research on the evaluation of geological environment carrying capacity of Shenmu City [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology.]
- 李永红, 刘海南, 范立民, 等. 2016. 陕西榆神府生态环境脆弱区地质灾害分布规律 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 27(3): 116–121. [Li Y H, Liu H N, Fan L M, et al. 2016. Distribution of geological hazards in Yushenfu ecological environment fragile area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 27(3): 116–121.]
- 李宇亮, 王豪伟, 邓红兵, 等. 2014. 城市规划区地质灾害易损性评价 [J]. *环境科学与技术*, 37(S2): 526–529, 610. [Li Y L, Wang H W, Deng H B, et al. 2014. The geological disaster vulnerability assessment in urban planning area [J]. *Environmental Science & Technology*, 37(S2): 526–529, 610.]
- 刘晓悦, 杨伟, 张雪梅. 2021. 基于改进层次法与 CRITIC 法的多维云模型岩爆预测 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 48(2): 118–124. [Liu X Y, Yang W, Zhang X M. 2021. Rockburst prediction of multi-dimensional cloud model based on improved hierarchical analytic method and critic method [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 48(2): 118–124.]
- 马思远, 许冲, 田颖颖, 等. 2019. 基于逻辑回归模型的九寨沟地震滑坡危险性评估 [J]. *地震地质*, 41(1): 162–177. [Ma S Y, Xu C, Tian Y Y, et al. 2019. Application of logistic regression model for hazard assessment of earthquake-triggered landslides: a case study of 2017 Jiuzhaigou (China) Ms7.0 Event [J]. *Seismology and Geology*, 41(1): 162–177.]
- 谭玉敏, 郭栋, 白冰心, 等. 2015. 基于信息量模型的涪陵区地质灾害易发性评价 [J]. *地球信息科学学报*, 17(12): 1554–1562. [Tan Y M, Guo D, Bai B X, et al. 2015. Geological hazard risk assessment based on information quantity model in Fuling district, Chongqing city, China [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 17(12): 1554–1562.]
- 唐亚明, 张茂省, 李政国, 等. 2015. 国内外地质灾害风险管理对比及评述 [J]. *西北地质*, 48(2): 238–246. [Tang Y M, Zhang M S, Li Z G, et al. 2015. Review and comparison on inland and overseas geo-hazards risk management [J]. *Northwestern Geology*, 48(2): 238–246.]
- 王绅皓, 谢婉丽, 奚家米, 等. 2021. 基于 GIS 与 BP 神经网络的矿区塌陷易发性预测 [J]. *煤矿安全*, 52(9): 218–223, 230. [Wang S H, Xie W L, Xi J M, et al. 2021. Prediction of mine collapse risk based on GIS and BP neural network [J]. *Safety in Coal Mines*, 52(9): 218–

- 王雯雯. 2019. 基于改进 CRITIC-云模型的区域生态安全评价研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学. [Wang W W. 2019. Research on regional ecological security evaluation based on improved CRITIC-cloud model [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology.]
- 王瑛, 姜芸芸. 2017. 基于改进 CRITIC 赋权法和模糊优选法的大气质量评价 [J]. *统计与决策*, (17): 83–87. [Wang Y, Jiang Y Y. 2017. Air quality evaluation based on improved CRITIC weighting method and fuzzy optimization method [J]. *Statistics & Decision*, (17): 83–87.]
- 王瑛, 蒋晓东, 张璐. 2014. 基于改进的 CRITIC 法和云模型的科技奖励评价研究 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 41(4): 118–124. [Wang Y, Jiang X D, Zhang L. 2014. Research on the evaluation of science and technological awards based on improved CRITIC method and cloud model [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 41(4): 118–124.]
- 魏晓旭, 颜长珍. 2019. 生态承载力评价方法研究进展 [J]. *地球环境学报*, 10(5): 441–452. [Wei X X, Yan C Z. 2019. Research and model application in ecological carrying capacity [J]. *Journal of Earth Environment*, 10(5): 441–452.]
- 谢婉丽, 滕宏泉, 杜蕾, 等. 2018a. 大西安地区滑坡分类及其特征分析 [J]. *地球环境学报*, 9(1): 79–88. [Xie W L, Teng H Q, Du L, et al. 2018a. An analysis of landslide classifications and characteristics in Xi'an [J]. *Journal of Earth Environment*, 9(1): 79–88.]
- 谢婉丽, 滕宏泉, 杜蕾, 等. 2018b. 基于 GIS 结合模糊信息方法在灾害危险性区划中的应用——以大西安地区崩滑地质灾害为例 [J]. *灾害学*, 33(3): 111–116. [Xie W L, Teng H Q, Du L, et al. 2018b. The application of GIS-based fuzzy information method in disaster risk division—taking the landslide geological hazard in the Great Xi'an Region as an example [J]. *Journal of Catastrophology*, 33(3): 111–116.]
- 谢彦初, 汪磊, 孙德安, 等. 2022. 基于组合赋权和聚类方法的膨胀土边坡防护工程健康诊断模型与应用 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 53(1): 258–268. [Xie Y C, Wang L, Sun D A, et al. 2022. Health diagnosis model with combination weight and clustering method for protection works of expansive soil slope and its application [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 53(1): 258–268.]
- 杨康, 薛喜成, 段钊, 等. 2021. 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*, 21(27): 11551–11560. [Yang K, Xue X C, Duan Z, et al. 2021. Risk assessment of geological hazards in Zichang County based on AHP-LR entropy combined model [J]. *Science Technology and Engineering*, 21(27): 11551–11560.]
- 余丰华, 刘正华, 夏跃珍, 等. 2015. 基于敏感指数主成分分析法的浙江沿海突发性地质灾害易发区评价 [J]. *灾害学*, 30(4): 64–68. [Yu F H, Liu Z H, Xia Y Z, et al. 2015. Evaluation of the unexpected geological disasters distributions in coastal region of Zhejiang Province base on sensitivity coefficient and principal component analysis [J]. *Journal of Catastrophology*, 30(4): 64–68.]
- 张娇, 蒋倩倩, 张伯言, 等. 2020. 基于 AHP-CRITIC 法正交优选乌甘袋泡茶提取工艺及抗炎作用研究 [J]. *中草药*, 51(8): 2177–2184. [Zhang J, Jiang Q Q, Zhang B Y, et al. 2020. Study on extraction process and anti-inflammatory effect of Wugan Tea based on AHP-

- CRITIC analysis [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 51(8): 2177–2184.]
- 张茂省, 胡炜, 孙萍萍, 等. 2016. 黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望 [J]. *地球环境学报*, 7(4): 323–334. [Zhang M S, Hu W, Sun P P, et al. 2016. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides [J]. *Journal of Earth Environment*, 7(4): 323–334.]
- 张茂省, 薛强, 贾俊, 等. 2019. 山区城镇地质灾害调查与风险评价方法及实践 [J]. *西北地质*, 52(2): 125–135. [Zhang M S, Xue Q, Jia J, et al. 2019. Methods and practices for the investigation and risk assessment of geo-hazards in mountainous towns [J]. *Northwestern Geology*, 52(2): 125–135.]
- 赵书强, 汤善发. 2019. 基于改进层次分析法、CRITIC 法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价 [J]. *电力自动化设备*, 39(3): 143–148, 162. [Zhao S Q, Tang S F. 2019. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 39(3): 143–148, 162.]
- Abedini M, Ghasemian B, Shirzadi A, et al. 2019. A comparative study of support vector machine and logistic model tree classifiers for shallow landslide susceptibility modeling [J]. *Environmental Earth Sciences*, 78(18): 560. DOI: 10.1007/s12665-019-8562-z.
- Brabb E E. 1985. Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping [C]// Japan Landslide Society. Proceedings of IVth International Conference and Field Workshop in Landslides. Tokyo: 17–22.
- Carrara A. 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation [J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 15(3): 403–426.
- Chen W, Peng J B, Hong H Y, et al. 2018. Landslide susceptibility modelling using GIS-based machine learning techniques for Chongren County, Jiangxi Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 626: 1121–1135.
- Cross M. 1998. Landslide susceptibility mapping using the Matrix Assessment Approach: a Derbyshire case study [J]. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 15: 247–261.
- Dou J, Yunus A P, Bui D T, et al. 2020. Improved landslide assessment using support vector machine with bagging, boosting, and stacking ensemble machine learning framework in a mountainous watershed, Japan [J]. *Landslides*, 17(3): 641–658.
- Sun D L, Wen H J, Wang D Z, et al. 2020. A random forest model of landslide susceptibility mapping based on hyperparameter optimization using Bayes algorithm [J]. *Geomorphology*, 362: 107201. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107201.
- Wang K, Zhang S J, DelgadoTéllez R, et al. 2019. A new slope unit extraction method for regional landslide analysis based on morphological image analysis [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(6): 4139–4151.
- Wang K, Zhang S J. 2021. Rainfall-induced landslides assessment in the Fengjie County, Three-Gorge Reservoir area, China [J]. *Natural Hazards*, 108(1): 451–478.
- Westgate K N, O'Keefe P. 1977. The human and social implications of earthquake risk for developing countries [J]. *Public Administration and*

Development, 16(1): 24–29.

Xie W L, Guo Q Y, Wu J Y, et al. 2021. Analysis of loess landslide mechanism and numerical simulation stabilization on the Loess Plateau in Central China [J]. *Natural Hazards*, 106(1): 805–827.

Xie W L, Li P, Vanapalli S K, et al. 2018a. Prediction of the wetting-induced collapse behaviour using the soil-water characteristic curve [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 151: 259–268.

Xie W L, Li P, Zhang M S, et al. 2018b. Collapse behavior and microstructural evolution of loess soils from the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Mountain Science*, 15(8): 1642–1657.

