

引用格式: 张建羽, 吕敦玉, 刘松波, 等, 2024. 郑州市西部山地丘陵区地质灾害发育特征及危险性评价 [J]. 地质力学学报, 30 (4): 647–658. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2022116](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2022116)

Citation: ZHANG J Y, LYU D Y, LIU S B, et al., 2024. Development characteristics and risk assessment of geological hazards in the mountainous and hilly areas of western Zhengzhou City [J]. Journal of Geomechanics, 30 (4): 647–658. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2022116](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2022116)

郑州市西部山地丘陵区地质灾害发育特征及危险性评价

张建羽^{1,2}, 吕敦玉^{1,2}, 刘松波^{1,2}, 王翠玲^{1,2}, 孟舒然^{1,2}

ZHANG Jianyu^{1,2}, LYU Dunyu^{1,2}, LIU Songbo^{1,2}, WANG Cuiling^{1,2}, MENG Shuran^{1,2}

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061;

2. 中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 河北 石家庄 050061

1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;*

2. *Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environmental Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*

Development characteristics and risk assessment of geological hazards in the mountainous and hilly areas of western Zhengzhou City

Abstract: [Objective] The mountainous and hilly areas of western Zhengzhou City have a complex geological environment, affected by rainfall and human engineering activities. Geological hazards such as collapses, landslides, and debris flows occur frequently. In particular, the “7·20” extreme rainstorm that occurred on July 20, 2021 caused many geological hazards, resulting in heavy casualties and huge economic losses. Therefore, analyzing and summarizing the development characteristics of geological hazards and conducting a risk assessment is necessary for this region. At present, the risk assessment of geological hazards is mainly conducted using a single method that has limitations including slightly low evaluation accuracy. In addition, an overall geological hazard risk assessment has not yet been conducted in the mountainous and hilly areas of western Zhengzhou City. [Methods] Based on the research and analysis of the geological environment background and the distribution characteristics of geological hazards in the study area, eight evaluation factors were selected: slope, landform, engineering geological rock group, elevation, distance from fault, distance from river, rainfall, and human engineering activities. The weighted information method which incorporates elements of the information quantity model and analytic hierarchy process, was used to evaluate the risk of geological hazards in the study area. [Results] The low-, medium-, and high-risk areas are 1387.14 km², 1803.18 km², and 1066.47 km², respectively, accounting for 32.59%, 42.36%, and 25.05% of the total area, respectively. The medium- and high-risk areas are mainly distributed in the tectonic erosion medium-low mountains and loess hills in the central part of the four cities, the tectonic erosion medium-low mountains south of Dengfeng, and the loess hilly areas in northern Gongyi and Xingyang. The terrain has steep slopes and deep gullies, and the main stratigraphic lithology is clastic rocks intercalated with carbonate rocks, soft and hard rock layers, and loess. Fault structures are developed, and geological hazards are prone to occur under the action of inducing factors and are highly dangerous. The majority (93.11%) of geological hazards are distributed in medium- and high-risk areas, with hazard point densities of 0.1752 km⁻² and 0.2869 km⁻², respectively. The spatial distribution of geological hazard points is consistent with the geological hazard risk assessment results. The rationality of the evaluation results was assessed by a Receiver Operating Characteristic curve, yielding an AUC value of 0.868. The evaluation accuracy met the requirements for hazard assessment. [Conclusion] Geological hazards have the largest information value

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20211309)

This research is financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD20211309).

第一作者: 张建羽 (1977—), 男, 本科, 工程师, 主要从事工程地质、城市地质调查研究工作。Email: 948965331@qq.com

通讯作者: 吕敦玉 (1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事城镇化进程中的地质环境效应研究。Email: lvdunyu@foxmail.com

收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2023-11-18; 录用日期: 2023-11-30; 网络出版日期: 2024-05-20; 责任编辑: 吴芳

in the range of $>40^\circ$ slopes loess hilly landforms, loess engineering geological rock groups, and 24-h maximum rainfall of 500–550 mm. The risk of geological hazards is positively correlated with distance from faults and water systems — the closer the distance, the higher the risk. The risk of geological disasters in the study area is controlled by the terrain slope and landform and is closely related to the lithology of the formation, which is an important factor in inducing geological disasters. The weighted information method, which has high accuracy and rationality, was used to evaluate the geological hazard risk. [Significance] The results of this study can provide a basis and technical support for geological hazard prevention and management in the mountainous and hilly areas of western Zhengzhou City and serve as a valuable point of reference for urban planning and infrastructure geological hazard risk assessment in the study area.

Keywords: Zhengzhou City; geological hazards; development characteristics; risk assessment; weighted information method

摘要: 郑州市西部山地丘陵区地质环境条件复杂, 崩塌、滑坡及泥石流等地质灾害频发, 尤其是2021年“7·20”特大暴雨引发了大量地质灾害。地质灾害危险性评价主要采用单一方法进行, 存在评价准确性略低等问题。通过对研究区地质环境背景、地质灾害分布特征的分析研究, 选取坡度、地貌、工程地质岩组、高程、距断裂距离、距河流距离、24小时最大降雨量和人类工程活动强度8个评价因子, 采用加权信息量法, 对研究区进行地质灾害危险性评价。结果表明: 低、中、高危险区面积分别为1387.14 km²、1803.18 km²、1066.47 km², 分别占总面积的32.59%、42.36%、25.05%, 地质灾害点的空间分布与地质灾害危险性评价结果基本一致, 利用受试者工作特征(ROC)曲线检验评价结果合理, 研究结论可为郑州市西部山地丘陵区地质灾害防治提供准确的依据。

关键词: 郑州市; 地质灾害; 发育特征; 危险性评价; 加权信息量法

中图分类号: P694; X43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2024) 04-0647-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022116

0 引言

郑州市西部山地丘陵区地处伏牛山脉剥蚀山地和黄土丘陵向黄淮平原过渡的交接地带, 地质条件复杂, 受降雨和人类工程活动影响, 崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频发, 给人民生命和财产安全构成了巨大威胁。2021年郑州市“7·20”特大暴雨使城市遭受重大人员伤亡和经济损失, 郑州市西部山地丘陵区四市(荥阳市、巩义市、新密市、登封市)因灾死亡失踪251人(国务院灾害调查组, 2022), 同时引发大量地质灾害。因此, 开展地质灾害危险性评价十分必要。

地质灾害危险性评价可以为国土规划、地质灾害防治和监测预警提供基础依据(吴树仁等, 2009; 王磊等, 2011; 张茂省等, 2019)。目前, 地质灾害危险性评价方法较多, 国内外尚没有统一的方法和标准(张春山等, 2008; 张向营等, 2018), 常用的方法主要有信息量模型、层次分析法、模糊综合评判法、逻辑回归分析、灰色聚类法和熵权法等(Pourghasemi et al., 2012; 邓辉等, 2014; Ali et al., 2019; 郎秋玲等, 2019), 这些方法的理论不同、含义不同, 对评价数

据的需求不同, 各有优点和不足(李春燕等, 2017)。其中信息量模型是一种定量分析的方法, 具有科学、客观和迅速的特点, 被广泛应用于区域地质灾害易发性、危险性评价(Clerici et al., 2002; 杜春兰等, 2008; 廖丽萍等, 2019; 周静静等, 2019), 评价过程可较好的反映致灾因子和地质灾害的关联性(张超等, 2019; 刘乐等, 2021), 但其并未考虑各影响因子所占权重(赵东亮等, 2021), 评价精度较差。而层次分析法能够将复杂的定性决策问题系统化、层次化、简明化, 合理的综合计算出各指标的权重(孙冉等, 2015; 冯卫等, 2021), 缺点是具有一定的主观性(郑师谊等, 2012)。

已有研究主要采用单一方法对郑州市某个县(市)进行地质灾害危险性评价(丁丽等, 2016; 王庆超, 2018), 存在评价准确性略低等问题。因此, 此次工作采用加权信息量法, 即将信息量模型和层次分析法结合, 对郑州市西部山地丘陵区进行地质灾害危险性评价, 两种方法的结合使用, 使主观分析和客观实际相结合, 评价结果更接近实际情况, 希望此次研究成果能为区域地质灾害防治工作提供基础依据。

1 研究区概况

1.1 区域地质环境

研究区位于郑州市西部山地丘陵区,北依黄河,南临箕山,西与洛阳市接壤,东部为郑州市主城区,介于北纬 $34^{\circ}15'40''\sim 34^{\circ}59'00''$,东经 $112^{\circ}43'00''\sim 113^{\circ}40'00''$ 之间,行政单元包括荥阳市、巩义市、新密市、登封市四市,面积约 4257 km^2 ,常住人口约307万,境内铁路、公路纵横,四通八达,交通便捷。研究区属温带大陆性季风气候,多年平均降水量 624 mm ,降雨时空分布不均,汛期降雨占70%左右。区内河流众多,其中伊洛河、汜水河属黄河水系,索河、颍河、双洎河、溱河属淮河水系。

研究区地势西高东低,高程一般在 $100\sim 1200\text{ m}$ 。地貌类型复杂多样,中西部、南部构造侵蚀中低山由嵩山、箕山组成,山势陡峻,沟谷发育;构造剥蚀丘陵位于中低山前部,地势较和缓;黄土丘陵在北部和中东部地区分布较广,沟壑纵横;冲洪积倾斜平原位于区域东北部和东南部,自西向东缓倾;山间洪积平原分布于西南部,地形波状高低起伏;河谷阶地沿河流条带状分布;北部为黄河河漫滩(图1)。区内地层属华北地层区的嵩箕地层小区,前新生界地层出露于中低山及丘陵地区,主要为花岗岩、片岩、石英岩、砂岩、灰岩、页岩等。新生界地层为新近系湖相沉积的黏土岩、砂砾岩、泥灰岩和第四系黄土、粉质黏土及粉细砂等。

研究区横跨嵩箕台隆和华北台坳2个构造单元,地质构造较复杂,主要有嵩山断裂、五指岭断裂、月湾断层、新中断层等断裂,区域地壳稳定性为基本稳定(张建羽等,2023)。

1.2 地质灾害分布特征

研究区地质灾害类型包括崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷,以崩塌为主。如2005年6月郑州市惠济区黄河大观引黄干渠沿线崩塌毁坏房屋7间,砸伤1人(陈光宇等,2009);2021年7月20日荥阳市崔庙镇翟沟村后沟组房后黄土边坡滑坡,造成2人遇难,王宗店南头组岩体滑坡造成3人遇难(刘传正和黄帅,2022);1956年登封市清泥宫、贺窑村泥石流爆发,摧毁数百间民房(甄习春等,2012);2016年郑州市中原路文化宫路发生地面塌陷,造成1人死亡(吕敦玉等,2021)。据河南省地质环境监测院统计,2021年区内共发育地质灾害隐患点

668处,其中崩塌502处,滑坡97处,泥石流17处,地面塌陷52处,地质灾害隐患点分布如图1所示,统计情况见表1。

崩塌规模以小、中型为主,仅3处大型崩塌,主要为黄土崩塌,少量岩质崩塌。崩塌隐患点主要分布在:①南部中低山、剥蚀丘陵地区大断裂附近的脆性岩层或软硬相间的岩系地层;②人类采矿活动强烈地区和主要公路、铁路、河流两侧地带;③黄土丘陵地区。滑坡规模以小、中型为主,仅4处大型滑坡,包括土质滑坡和岩质滑坡2种,隐患点主要分布于中部、南部山区坡度大,岩石破碎的斜坡地带以及北部、中东部黄土丘陵地区。泥石流以中、大型为主,仅有3处小型泥石流,时间上与每年的6—9月强降雨一致,空间上主要分布于西南部中低山区的沟谷中,组成物质为松散碎屑物和堆放不当的废弃矿石、矿渣。地面塌陷以小型为主,少量中型,隐患点分为2种:因采矿引发的地面塌陷和由于黄土湿陷性引起的地面塌陷。前者分布于人类采矿活动区域,主要分布在以地下开采煤、铝土等矿产资源为主的巩义、新密矿区等地;后者与湿陷黄土分布位置高度一致。

2 地质灾害主要评价因子选取与状态分级

评价地质灾害的因子有很多,可分为2类:基础因子和诱发因子。其中,基础因子即为区内的地质环境,决定着地质灾害的类型、分布、规模和强度,主要包括地形地貌、地层岩性、区域构造、水文条件等(刘乐等,2021);诱发因子是引发地质灾害的外部条件,主要包括降雨量、地震及人类工程活动强度等(周学铖和廖黎明,2019;刘传正和陈春利,2020;李信等,2022),尤其是极端天气气候事件会诱发更大范围、危害更大的地质灾害(殷志强等,2013)。通过对郑州市西部山地丘陵区地质灾害的分布特征、形成机理的研究认为:由于受地形地貌的控制,研究区内地质灾害的分布在高程上具有明显不均匀性;岩土体作为斜坡的基本组成,其性质对斜坡的稳定性具有控制作用;断裂构造往往使得岩土体结构遭到破坏,影响其稳定性;河流的侵蚀和下切使得边坡应力条件改变进而导致边坡失稳。因此,选取坡度、地貌、工程地质岩组、高程、距断裂距离、距河流距离作为基础因子。研究区内

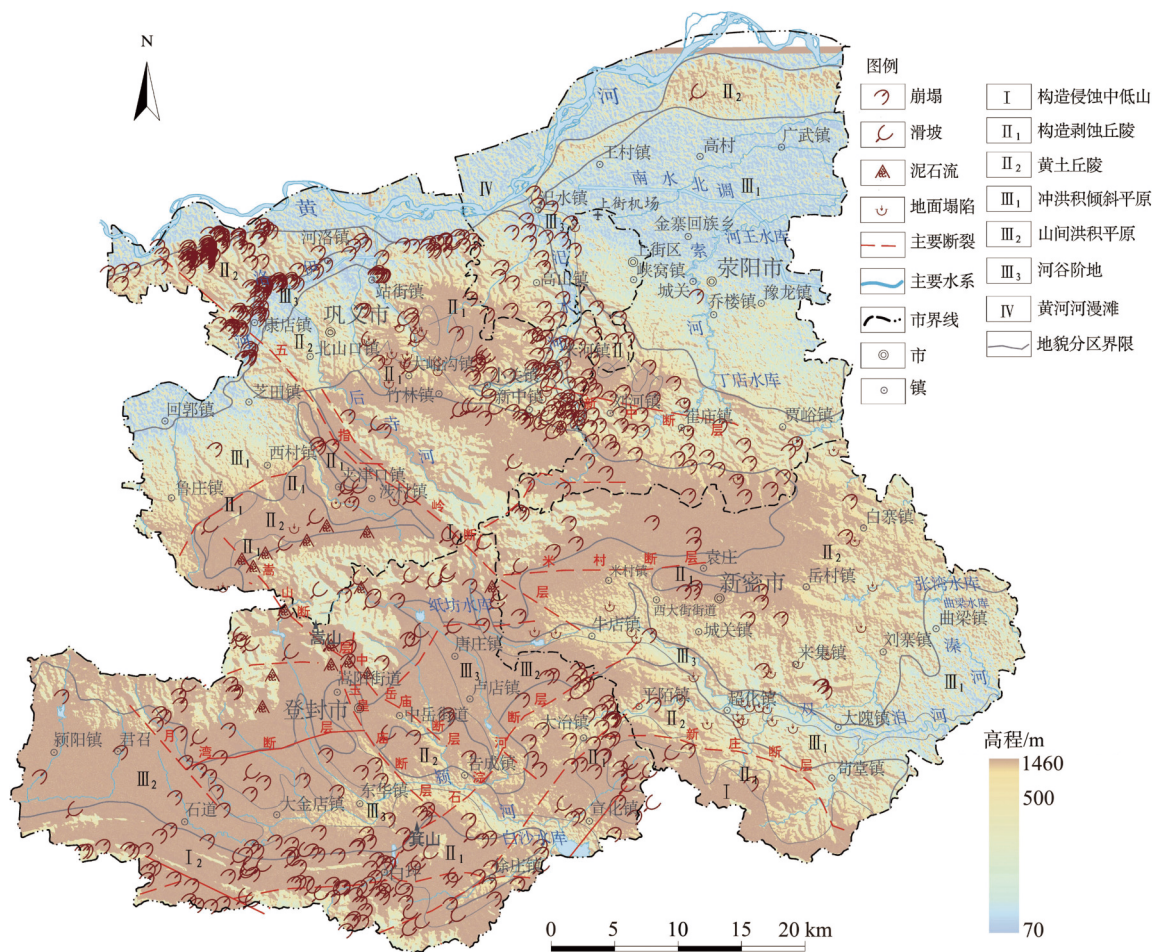


图 1 研究区地质灾害隐患点分布图
Fig. 1 Distribution map of geological hazard hidden danger points in the study area

表 1 研究区地质灾害隐患点统计表

Table 1 Statistical table of geological hazard hidden danger points in the study area

灾害类型	灾害点/处	百分比/%	威胁人数/人	威胁财产/万元
崩塌	502	75.1	25955	79638
滑坡	97	14.5	3790	8117
泥石流	17	2.6	2554	12806
地面塌陷	52	7.8	2895	8964
合计	668	100.0	35194	109525

道路、房屋的建设多采用切坡施工,人类活动强度较大;泥石流发生的水动力条件主要来自降雨;而郑州市在历史上和现今地震强度小且频度低(吕敦玉等, 2021),对研究区的地质灾害诱发作用不明显。因此,选取 24 小时最大降雨量、人类工程活动强度作为诱发因子,并对各因子进行分级(图 2)。

2.1 基础因子

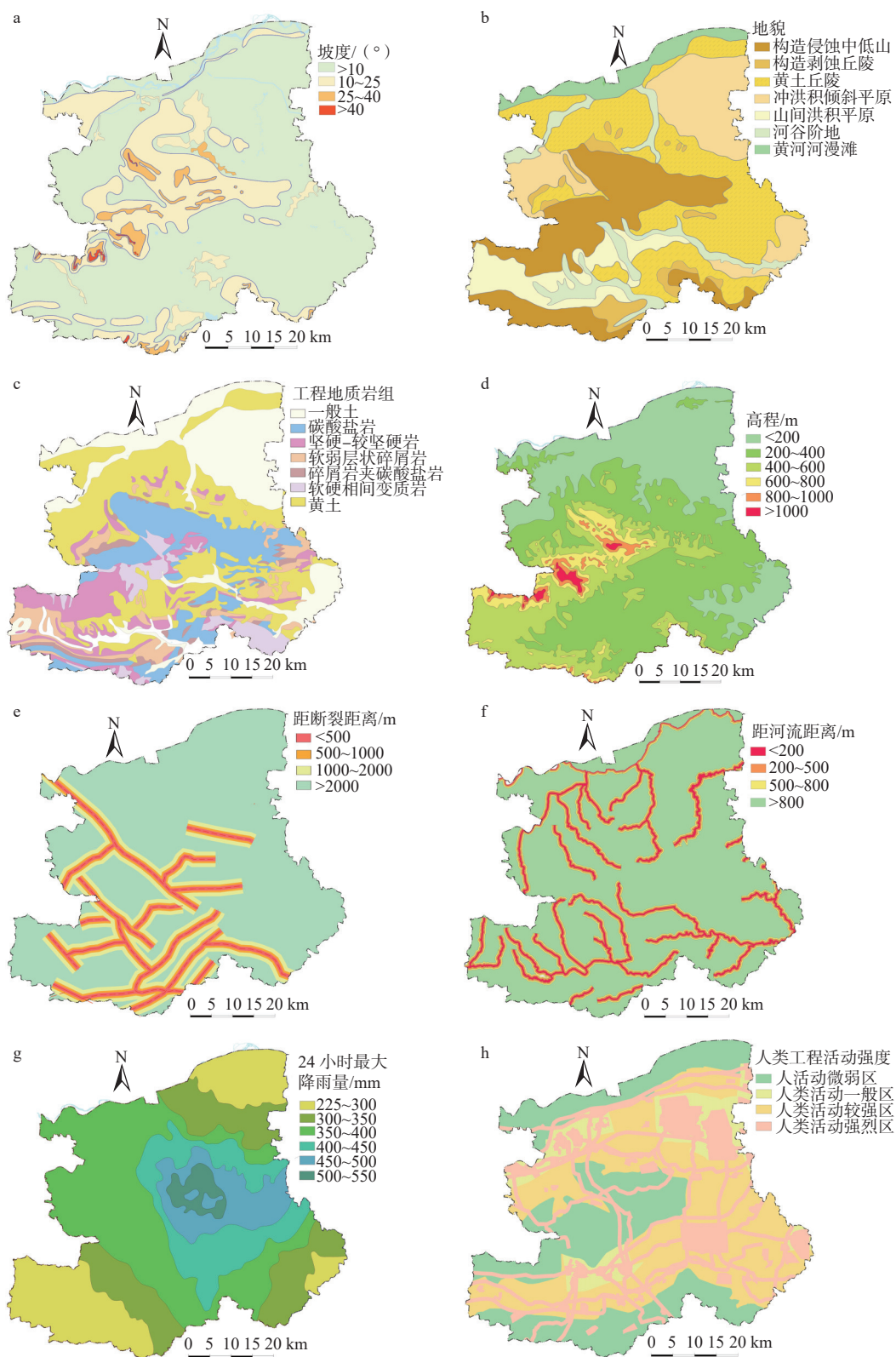
(1)坡度

斜坡体的坡度与斜坡稳定性密切相关,坡度越

大,斜坡上松散体越不稳定,同时,陡坡为流水提供了更大的势能,为地质灾害的发生提供了动力条件。因此,坡度对地质灾害的发生有明显的控制作用(魏国灵等, 2020)。结合已有研究成果(于开宁等, 2023),综合考虑研究区地质灾害与坡度之间的关系,将坡度分为 0°~10°、10°~25°、25°~40°、>40° 共 4 个级别(图 2a)。

(2)地貌

地貌对地质灾害的发生具有巨大的影响,是形



a—坡度; b—地貌; c—工程地质岩组; d—高程; e—距断裂距离; f—距河流距离; g—24小时最大降雨量; h—人类工程活动强度

图2 地质灾害危险性评价影响因子分级图

Fig. 2 Grading map of influencing factors of geological hazard risk assessment

a—slope; b—landform; c—engineering geological rock group; d—elevation; e—distance from fault; f—distance from river; g—24-h maximum rainfall; h—human engineering activity factors

成地质灾害的基本条件。研究区地貌类型较多,地貌对地质灾害的控制作用明显,按地貌成因形态分为构造侵蚀中低山、构造剥蚀丘陵、黄土丘陵、冲洪积倾斜平原、山间洪积平原、河谷阶地和黄河河漫滩共7种地貌类型(图2b)。

(3) 工程地质岩组

地层岩性是地质灾害发生的物质基础和主控因子(黄润秋等, 2008; 杜国梁等, 2016)。研究区岩土类型多样, 根据成因类型、结构强度和工程性质划分为一般土(包括粉土、黏性土、砂土等)、黄土、碳酸盐岩、坚硬-较坚硬岩浆岩、变质岩、碎屑岩和软弱层状碎屑岩、软硬相间变质岩、碎屑岩夹碳酸盐岩共7种工程地质岩组(图2c)。

(4) 高程

地质灾害通常多发生在特定的海拔高度范围内(赵东亮等, 2021), 区内地形起伏较大, 高程差别也很大, 根据研究区高程实际分布情况与地质灾害相关性分析, 划分为0~200 m、200~400 m、400~600 m、600~800 m、800~1000 m、>1000 m共6个级别(图2d)。

(5) 距断裂距离

断裂加剧了地形起伏, 位能差加大, 并且断裂造成岩体整体性破坏, 产生断层面、裂隙面、节理面等多种软弱结构面, 从而促进地质灾害的形成和发展。研究区内断裂构造较发育, 中低山丘陵区在断裂带附近, 地质灾害相对密集, 呈带状分布, 其他地区的隐伏断层对地质灾害没有影响。断裂为线状影响因子, 对比已有研究(樊芷吟等, 2018)并结合研究区实际情况, 以500 m间距向断裂两边做3级缓冲区分析, 将距断裂距离划分为0~500 m、500~1000 m、1000~2000 m、>2000 m共4个级别(图2e)。

(6) 距河流距离

河流的侵蚀是导致地质灾害发生的重要因素, 主要表现为侵蚀作用对斜坡前缘抗力的削弱和临空面的增加造成斜坡失稳(邱海军等, 2015)。区内河流较多且都处于河流的中上游, 河流侵蚀、侧蚀作用强烈, 特别是河流流经黄土丘陵地区, 冲刷现象明显, 致使两侧边坡更加陡峭, 引发地质灾害的发生。根据灾害分布规律和水系的相对位置, 运用GIS的缓冲分析功能, 以河流中心线分别向两侧0~200 m、200~500 m、500~800 m、>800 m进行分级(图2f)。

2.2 诱发因子

(1) 24小时最大降雨量

降雨会增加土体重力, 润滑滑动面, 是地质灾害的重要诱发因子(李郎平等, 2017)。郑州市降雨量时空分布不均, 汛期降雨占70%左右, 对郑州市地质灾害有强烈地诱发作用, 历年地质灾害多发生在降雨后。此次研究对2021年郑州市“7·20”特大暴雨诱发的地质灾害进行了调查统计, 结果显示特大暴雨诱发地质灾害288处, 其中崩塌269处, 滑坡18处, 泥石流1处, 造成重大人员伤亡和财产损失。郑州市西部山地丘陵区四市降雨最集中的时段在19日20时至20日20时, 平均降雨量达363.3 mm, 根据7月19日20时至20日20时降雨量等值线图(吴泽斌和万海滨, 2022), 将降雨量分为225~300 mm、300~350 mm、350~400 mm、400~450 mm、450~500 mm、500~550 mm共6个等级(图2g)。

(2) 人类工程活动强度

人类工程活动会对地形地貌等地质条件造成破坏, 使地质灾害发生的几率和危害程度在一定程度上加强。区内与地质灾害密切相关的人类工程活动主要有交通建设、切坡建房、水利建设、矿山开采等, 很难对其进行定量描述, 一般经济越发达, 基础建设活动越频繁, 相应的人类工程活动强度则越大, 因此按研究区内经济发展和基础建设等情况将人类工程活动强度分为微弱、一般、较强、强烈4个等级(图2h)。

3 地质灾害危险性评价

3.1 评价方法

采用加权信息量法, 也就是结合信息量模型和层次分析法的方法, 计算加权信息量值, 从而对研究区进行危险性评价。

3.1.1 信息量模型

信息量模型是由信息论发展而来的一种统计分析预测法, 认为灾害发生与多种影响因素有关, 灾害的发生与预测过程中获得的信息数量及质量密切相关。通过对评价因子分级, 分析统计各个评价因子等级对灾害发生的“贡献率”, 叠加各因子“贡献率”, 得到信息量, 信息量值越大, 则灾害发生的可能性越大(吴兴贵等, 2024), 各评价因子 x_i 对研究区地质灾害的信息量可用以下公式确定:

$$I(x_i,D)=\ln\frac{N_i/N}{S_i/S}\tag{1}$$

式(1)中 $I(x_i,D)$ 为评价因子 x_i 对地质灾害 (D) 提供的信息量; N_i 为分布在评价因子 x_i 中的地质灾害点个数; N 为研究区地质灾害点总数; S_i 为评价因子 x_i 所占面积, km^2 ; S 为研究区总面积, km^2 。

3.1.2 层次分析法

层次分析法是一种多目标决策分析的方法, 运用层次分析法计算评价因子的权重时, 首先建立评价因子的层次结构, 通过两两比较的方式确定各因子的相对重要性, 建立判断矩阵, 再采用方根法或和积法计算特征向量和特征根, 经一致性检验后, 确定各因子的权重。

(1) 建立层次结构模型

根据危险性评价目的性及评价因子的从属关系, 建立评价模型的层次结构(图 3)。

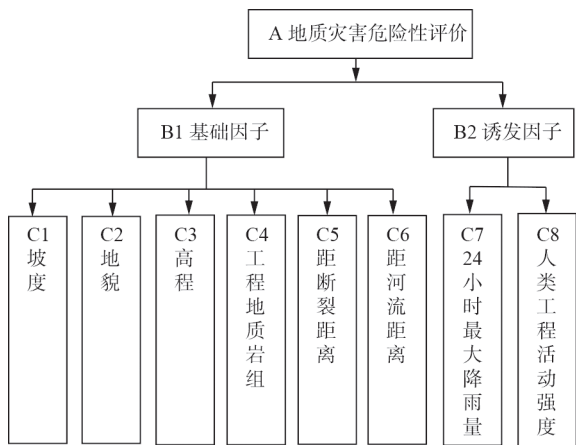


图 3 地质灾害危险性评价层次结构图
Fig. 3 Hierarchical structure diagram of geological hazard risk assessment

(2) 构造判断矩阵

根据建立好的地质灾害危险性评价层次结构模型, 采用 1~9 标度法, 根据各评价因子的相互关系, 两两比较构造判断矩阵, 并进行一致性检验, 计

表 3 B1-C 判断矩阵及权重

Table 3 B1-C judgment matrix and weight							
B1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	W_i
C1	1	5	6	3	8	7	0.4651
C2	1/5	1	2	1/2	4	3	0.1305
C3	1/6	1/2	1	1/4	3	2	0.0823
C4	1/3	2	4	1	6	5	0.2324
C5	1/8	1/4	1/3	1/6	1	1/2	0.0361
C6	1/7	1/3	1/2	1/5	2	1	0.0537

$\lambda_{\max}=6.1780$, $CI=0.0356$, $RI=1.26$, $CR=0.0283<0.1$

算出权重(表 2—4)。

将 B1、B2 层归一化后的权重 W_i 在 A 层下再次归一化后, 得到 A-C 层次的 8 项因子的权重总排序(表 5)。

表 2 A-B 判断矩阵及权重

Table 2 A-B judgment matrix and weight			
A	B1	B2	W_i
B1	1	5	0.8333
B2	1/5	1	0.1667

$\lambda_{\max}=2$, $CI=0$, $RI=0$, $CR=0<0.1$
注: W_i —第 i 个评价因子的权重; $\lambda_{\max}$ —判断矩阵最大特征值; CI —一致性指标; RI —随机一致性指标; CR —一致性比率, 若 $CR<0.1$, 则认为判断矩阵通过一致性检验, 所求权重值是合理的, 下表同。

3.1.3 加权信息量法

文章采用加权信息量法进行地质灾害危险性评价。首先用层次分析法求各个因子的权重, 采用信息量模型计算出各个因子中不同类别的信息量值, 再将各因子权重与对应的信息量相乘并求和, 然后得到加权信息量值。计算公式为:

$$I=\sum_{i=1}^nW_iI(x_i,D)=\sum_{i=1}^nW_i\ln\frac{N_i/N}{S_i/S}\tag{2}$$

公式(2)中 I 为评价单元的加权信息量; $I(x_i,D)$ 、 N_i 、 N 、 S_i 、 S 同公式(1)。

3.2 地质灾害危险性评价分区

按照公式(2)计算得到评价因子各分级下的加权信息量值(表 6)。运用 ArcGIS 系统的空间分析功能, 将信息量值赋给相应的栅格图层, 单元大小为 $500\text{ m}\times500\text{ m}$, 再进行栅格叠加运算, 分别得到各评价单元的综合加权信息量值, 生成地质灾害综合加权信息量值叠加图, 图中综合信息量值范围在 $-1.0896\sim0.7489$, 数值越大, 反映各级别因子对地质灾害发生的作用越大, 地质灾害发生的几率就越大。采用自然断点法, 按信息量对栅格叠加图进行重新分类, 将郑州市西部山地丘陵区地质灾害危险性划分为: 高危险区、中危险区、低危险区(图 4)。

表4 B2-C 判断矩阵及权重

Table 4 B2-C judgment matrix and weight

B2	C7	C8	W_i
C7	1	4	0.8
C8	1/4	1	0.2

$\lambda_{\max}=2$, $CI=0$, $RI=0$, $CR=0<0.1$

表5 A-C 层次总权重排序

Table 5 Ranking of the total weights of layers A-C

A	B	A-B权重	C	B-C权重	A-C权重
地质灾害危险性评价	B1	0.8333	C1	0.4651	0.3876
			C2	0.1305	0.1087
			C3	0.0823	0.0686
			C4	0.2324	0.1937
			C5	0.0361	0.0301
	B2	0.1667	C6	0.0537	0.0446
			C7	0.8000	0.1334
			C8	0.2000	0.0333

$CR=(0.8333 \times 0.0356 + 0.1667 \times 0) / (0.8333 \times 1.26 + 0.1667 \times 0) = 0.0283 < 0.1$

4 评价结果分析与检验

4.1 评价结果分析

结合已发生地质灾害情况,研究区地质灾害危

表6 地质灾害危险性评价因子加权信息量表

Table 6 Weighted information scale of geological hazard risk evaluation factors

评价因子	分级	N_i	N_i/N	S_i	S_i/S	信息量	权重	加权信息量
地形坡度/(°)	0~10	141	0.2111	3026.94	0.7111	-1.2146	0.3876	-0.4708
	10~25	428	0.6407	1073.4301	0.2522	0.9325		0.3614
	25~40	89	0.1332	146.2915	0.0344	1.3550		0.5252
	>40	10	0.0150	10.1339	0.0024	1.8387		0.7127
地貌	冲洪积倾斜平原	21	0.0314	775.0863	0.1821	-1.7565	0.1087	-0.1909
	黄河河漫滩	2	0.0030	225.2701	0.0529	-2.8722		-0.3122
	山间洪积平原	47	0.0704	379.7426	0.0892	-0.2374		-0.0258
	河谷阶地	68	0.1018	335.1929	0.0787	0.2568		0.0279
	黄土丘陵	319	0.4775	1379.5019	0.3241	0.3877		0.0421
	构造剥蚀丘陵	40	0.0599	185.4328	0.0436	0.3182		0.0346
	构造侵蚀中低山	171	0.2560	976.5689	0.2294	0.1096		0.0119
	<200	171	0.2560	1317.3781	0.3095	-0.1898		-0.0130
高程/m	200~400	304	0.4551	1752.2913	0.4116	0.1003	0.0686	0.0069
	400~600	154	0.2305	812.9577	0.1910	0.1883		0.0129
	600~800	29	0.0434	249.9416	0.0587	-0.3019		-0.0207
	800~1000	5	0.0075	91.2935	0.0214	-1.0527		-0.0722
	>1000	5	0.0075	32.9333	0.0077	-0.0331		-0.0023
	一般土	67	0.1003	1099.9754	0.2584	-0.9464	0.1937	-0.1833
工程地质岩组	碳酸盐岩	87	0.1302	692.5129	0.1627	-0.2224		-0.0431
	坚硬-较坚硬岩	68	0.1018	469.6385	0.1103	-0.0805		-0.0156
	软弱层状碎屑岩	42	0.0629	329.4227	0.0774	-0.2077		-0.0402
	软硬相间变质岩	37	0.0554	216.7597	0.0509	0.0841		0.0163
	碎屑岩夹碳酸盐岩	26	0.0389	114.5522	0.0269	0.3690		0.0715
	黄土	341	0.5105	1333.9341	0.3134	0.4880		0.0945
距断裂距离/m	>2000	402	0.6018	3011.4432	0.7074	-0.1617	0.0301	-0.0049
	1000~2000	121	0.1811	583.7909	0.1371	0.2782		0.0084
	500~1000	68	0.1018	324.3219	0.0762	0.2898		0.0087
	<500	77	0.1153	337.2395	0.0792	0.3750		0.0113
	>800	436	0.6527	3294.3728	0.7739	-0.1703	0.0446	-0.0076
距河流距离/m	500~800	71	0.1063	332.0601	0.0780	0.3093		0.0138
	200~500	80	0.1198	368.1142	0.0865	0.3256		0.0145
	<200	81	0.1213	262.2484	0.0616	0.6771		0.0302
	225~300	76	0.1138	893.4056	0.2099	-0.6123		-0.0817
	300~350	87	0.1302	792.6438	0.1862	-0.3575		-0.0477
24小时最大降雨量/mm	350~400	263	0.3937	1435.6581	0.3373	0.1548	0.1334	0.0207
	400~450	125	0.1871	626.8523	0.1473	0.2396		0.0320
	450~500	74	0.1108	391.6921	0.0920	0.1856		0.0248
	500~550	43	0.0644	116.5436	0.0274	0.8549		0.1140
	微弱	129	0.1931	1445.3425	0.3395	-0.5643	0.0333	-0.0188
人类工程活动强度	一般	34	0.0509	252.7182	0.0594	-0.1539		-0.0051
	较强	221	0.3308	1230.7963	0.2891	0.1347		0.0045
	强烈	284	0.4251	1327.9385	0.3120	0.3096		0.0103

险性显著受到地形坡度、地貌控制, 且与地层岩性密切相关。高危险区主要分布于中部构造侵蚀中低山及北部黄土丘陵区, 地形坡度大, 冲沟深切, 分布碎屑岩夹碳酸盐岩、软硬相间岩层及厚层黄土, 断裂构造发育, 在诱发因子作用下很容易发生地质灾害, 危险性大, 地质灾害类型主要为崩塌、滑坡和泥石流。中危险区主要分布于黄土丘陵及构造剥蚀丘陵区, 地形坡度较大, 冲沟切割较深, 分布较厚黄土及软弱层状碎屑岩、软硬相间岩层, 人类工程活动较强或强烈, 在降雨影响下较容易发生地质灾害, 危险性中等, 地质灾害主要类型为崩塌、滑坡。低危险区主要分布于冲洪积倾斜平原、山间洪积平原、黄河河漫滩区, 地形较平坦, 分布一般土, 发生地质灾害少, 危险性低。

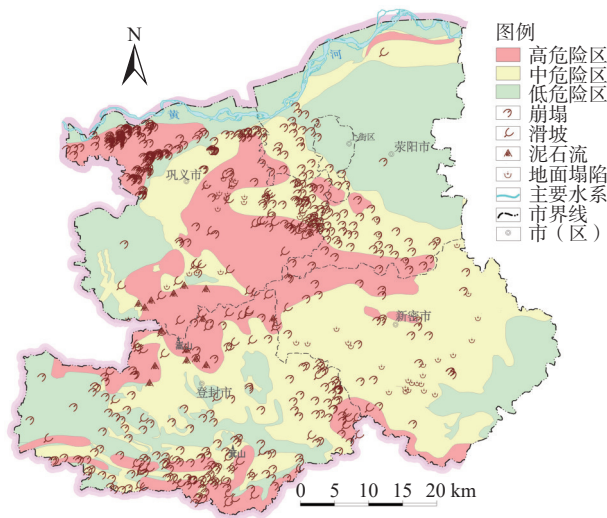


图 4 研究区地质灾害危险性评价图

Fig. 4 Geological hazard risk assessment map in the study area

对危险性评价各分区面积及地质灾害点进行统计(表 7), 结果表明在面积占研究区 67.41% 的中、高危险区分布着 93.11% 的地质灾害, 其灾点密度分别为 0.1752 个/ km^2 和 0.2869 个/ km^2 。

表 7 地质灾害危险性评价结果统计表

Table 7 Statistical table of geological disaster risk assessment results

危险性分区	灾害点/个	灾点占比/%	面积/ km^2	面积占比/%	灾点密度/个/ km^2
低危险区	46	6.89	1387.14	32.59	0.0332
中危险区	316	47.30	1803.18	42.36	0.1752
高危险区	306	45.81	1066.47	25.05	0.2869

4.2 合理性检验

ROC 曲线, 即受试者工作特征曲线, 是地质灾

害区域评价精度验证的常用方法, 具有相当高的准确性(张晓东等, 2018)。因此, 文章采用 ROC 曲线对地质灾害危险性评价结果进行检验。以研究区危险性分区面积累计比为横轴, 地质灾害点累计发生数量比为纵轴, 形成曲线, 曲线下面积(AUC)用来预测结果合理性, AUC 值范围为 0.5~1, AUC 值越大表示评价结果精度越高, 一般 AUC 值范围在 0.7~0.9 说明评价准确率较好, AUC 值大于 0.9 时评价准确率极好。运用 SPSS 软件进行运算得到此次危险性评价的 ROC 曲线(图 5), AUC 值为 0.868, 证明危险性评价结果具有较好的合理性。

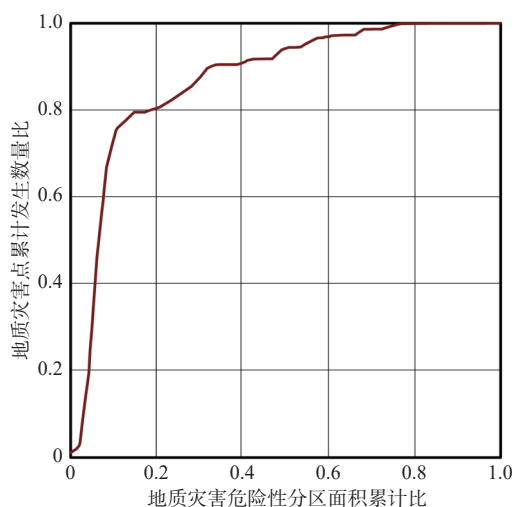


图 5 地质灾害危险性评价 ROC 曲线

Fig. 5 ROC curve of hazard risk assessment results

5 结论

(1)以郑州市西部山地丘陵区为研究对象, 选取坡度、地貌、工程地质岩组、高程、距断裂距离、距河流距离、24 小时最大降雨量、人类工程活动强度共 8 个评价因子, 采用加权信息量法进行地质灾害危险性评价, 得到低危险区面积 1387.14 km^2 , 占总面积的 32.59%; 中危险区面积 1803.18 km^2 , 占总面积的 42.36%; 高危险区面积 1066.47 km^2 , 占总面积的 25.05%。

(2)根据地质灾害危险性评价因子加权信息量值的计算结果: 地质灾害在坡度 $>40^\circ$ 、黄土丘陵地貌、黄土工程地质岩组、24 小时最大降雨量 500~550 mm 范围信息量值最大。地质灾害危险性与其距断裂、水系距离基本成正相关, 距离越近危险性越高。这表明研究区地质灾害危险性受地形坡度、

地貌控制明显,且与地层岩性密切相关,降雨量是诱发地质灾害的一个重要因素。中高危险区主要分布于四市中部的构造侵蚀中低山、黄土丘陵和登封南部的构造侵蚀中低山以及巩义、荥阳北部黄土丘陵区,地层岩性主要为碎屑岩夹碳酸盐岩、软硬相间岩层及黄土。

(3)采用 ROC 曲线对危险性评价结果进行检验, AUC 值为 0.868,评价合理性较高,证明信息量模型和层次分析法相结合的加权信息量模型在郑州市西部地区地质灾害危险性评价中有很好的适用性,评价结果可为郑州市西部山地丘陵区地质灾害防治提供准确的依据。

致谢:感谢河南省地质环境监测院提供 2021 年郑州市地质灾害隐患点统计数据。

References

- ALI S, BIERMANN S P, HAIDER R, et al., 2019. Landslide susceptibility mapping by using a geographic information system (GIS) along the China-Pakistan Economic Corridor (Karakoram Highway), Pakistan[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(5): 999-1022.
- CHEN G Y, WANG L, JIAO H J, et al., 2009. Environmental geological survey and evaluation report of major cities in Henan Province (Zhengzhou City)[R]. Zhengzhou: Henan Geological Survey Institute. (in Chinese)
- CLERICI A, PEREGO S, TELLINI C, et al., 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method[J]. *Geomorphology*, 48(4): 349-364.
- DENG H, HE Z W, CHEN Y, et al., 2014. Application of information quantity model to hazard evaluation of geological disaster in mountainous region environment: a case study of Luding County, Sichuan Province[J]. *Journal of Natural Disasters*, 23(2): 67-76. (in Chinese with English abstract)
- DING L, LI Z X, LI X W, et al., 2016. AHP-based assessment of geological hazards risk in Dengfeng city[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 27(2): 92-96. (in Chinese with English abstract)
- DU C L, LU W F, LI J F, et al., 2008. Analysis on the hazard degree of geological disasters[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 4(6): 1169-1176. (in Chinese with English abstract)
- DU G L, ZHANG Y S, GAO J C, et al., 2016. Landslide susceptibility assessment based on GIS in Bailongjiang watershed, Gansu Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 22(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- FAN Z Y, GOU X F, QIN M Y, et al., 2018. Information and logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of geological hazards[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26(2): 340-347. (in Chinese with English abstract)
- 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. (in Chinese with English abstract)
- HUANG R Q, XU X N, TANG C, et al., 2008. Geological environment assessment and geological hazards management[M]. Beijing: Science Press: 151-179. (in Chinese)
- Investigation Group on Disaster of State Council of China, 2022. Investigation report on the “7.20” extraordinary rainstorm disaster in Zhengzhou city, Henan province[R]. Beijing: Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. (in Chinese)
- LANG Q L, ZHANG Y C, ZHANG J Q, et al., 2019. Analysis of debris flow hazard factors based on combination weighting theory[J]. *Journal of Catastrophology*, 34(1): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- LI C Y, MENG H, ZHANG R L, et al., 2017. Risk assessment of geo-hazard of China in county unit[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 44(2): 160-166. (in Chinese with English abstract)
- LI L P, LAN H X, GUO C B, et al., 2017. Geohazard susceptibility assessment along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area using an improved frequency ratio method[J]. *Geoscience*, 31(5): 911-929. (in Chinese with English abstract)
- LI X, XUE G C, LIU C Z, et al., 2022. Evaluation of geohazard susceptibility based on information value model and information value-logistic regression model: a case study of the central mountainous area of Hainan Island[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(2): 294-305. (in Chinese with English abstract)
- LIAO L P, YU M, WEN H T, et al., 2019. Evaluation on the susceptibility of collapse and landslide in Rongxian County, Southeastern Guangxi[J]. *Earth and Environment*, 47(4): 518-526. (in Chinese with English abstract)
- LIU C Z, CHEN C L, 2020. Research on the origins of geological disasters in China[J]. *Geological Review*, 66(5): 1334-1348. (in Chinese with English abstract)
- LIU C Z, HUANG S, 2022. Research on “7 · 20” mountain torrents and geological disasters in Zhengzhou City, Henan Province of China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 30(3): 931-943. (in Chinese with English abstract)
- LIU L, YANG Z, SUN J, et al., 2021. Study on risk assessment of geological hazards in Huizhou District, Huangshan City, Anhui Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(2): 110-116. (in Chinese with English abstract)
- LV D Y, LIU C L, MENG S R, et al., 2021. Zhengzhou urban geological survey report[R]. Shijiazhuang: Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese)
- POURGHASEMI H R, PRADHAN B, GOKCEOGLU C, 2012. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran[J]. *Natural Hazards*, 63(2): 965-996.
- QIU H J, CUI P, WANG Y M, et al., 2015. Spatial distribution structure of loess landslides and cause analysis based on correlated fractal dimension[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(3): 546-555. (in Chinese with English abstract)
- SUN R, WANG C D, XIA Z B, et al., 2015. Geological disasters risk assessment in Fee County based on AHP-information method[J]. *Environmental Science & Technology*, 38(6P): 430-435. (in Chinese with English abstract)

- WANG L, ZHANG C S, YANG W M, et al., 2011. Risk assessment of geo-hazards by using GIS in Gangu County, Gansu Province[J]. Journal of Geomechanics, 17(4): 388-401. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q C, 2018. Study on geological hazards and countermeasures in Gongyi City[D]. Xi'an: Chang'an University: 1-77. (in Chinese with English abstract)
- WEI G L, JIN Y L, QIU J A, et al., 2020. Susceptibility assessment of geological hazard in Luhe County of eastern Guangdong[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 31(1): 51-56. (in Chinese with English abstract)
- WU S R, SHI J S, ZHANG C S, et al., 2009. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment[J]. Geological Bulletin of China, 28(8): 995-1005. (in Chinese with English abstract)
- WU X G, WANG Y D, WANG L T, et al., 2024. Hazard assessment of landslides in Lancang County, Yunnan Province based on weighted information value model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 35(3): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- WU Z B, WAN H B, 2022. A brief analysis of "7·20" extreme rainstorm disaster of four cities in mountainous area of Zhengzhou in Henan Province in 2021[J]. China Flood & Drought Management, 32(3): 27-31. (in Chinese)
- YIN Z Q, MENG H, LIAN J F, et al., 2013. Study on the geological disasters response to climate change in different temporal scales[J]. Geological Review, 59(6): 1110-1117. (in Chinese with English abstract)
- YU K N, WU T, WEI A H, et al., 2023. 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, 34(2): 146-155. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C, TIAN Y T, ZHANG Y F, 2019. Geo-hazard risk assessment in Shijiba Town at Longnan area in Gansu Province[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 38(7): 83-89. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C S, HAN J L, SUN W F, et al., 2008. Assessments of geohazard danger zoning in Longxian County, Shaanxi, China[J]. Geological Bulletin of China, 27(11): 1795-1801. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J Y, LÜ D Y, LIU C L, et al., 2023. Characteristics of rock-soil stratigraphic structure in Zhengzhou City and suggestions for development and utilization of underground space[J]. Geological Review, 69(1): 305-315. (in Chinese with English abstract)
- 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. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X D, LIU X N, ZHAO Z P, et al., 2018. Comparative study of geological hazards susceptibility assessment: constraints from the information value + logistic regression model and the CF + logistic regression model[J]. Geoscience, 32(3): 602-610. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X Y, ZHANG C S, MENG H J, et al., 2018. Landslide susceptibility assessment of new Jing-Zhang high-speed railway based on GIS and information value model[J]. Journal of Geomechanics, 24(1): 96-105. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO D L, LANCUO Z M, HOU G L, et al., 2021. Assessment of geological disaster susceptibility in the Hehuang Valley of Qinghai Province[J]. Journal of Geomechanics, 27(1): 83-95. (in Chinese with English abstract)
- ZHEN X C, SHANG Z P, QI S, et al., 2012. Research on geological hazards and prevention in Henan Province[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press. (in Chinese)
- ZHENG S Y, ZHANG X J, YANG Y, et al., 2012. The application of analytic hierarchy process to the danger evaluation of collapse and slide in Lujiang basin segment of Nujiang valley, western Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 31(2-3): 356-365. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU J J, ZHANG X M, ZHAO F S, et al., 2019. Research on risk assessment of geological hazards in Qinling-Daba mountain area, south Shaanxi Province[J]. Journal of Geomechanics, 25(4): 544-553. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU X C, LIAO L M, 2019. Geological hazard assessment in Sakya county of Tibet autonomous region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 30(6): 113-116. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈光宇, 王利, 焦红军, 等, 2009. 河南省主要城市环境地质调查评价报告(郑州市)[R]. 郑州: 河南省地质调查院.
- 邓辉, 何政伟, 陈晔, 等, 2014. 信息量模型在山地环境地质灾害危险性评价中的应用: 以四川泸定县为例[J]. 自然灾害学报, 23(2): 67-76.
- 丁丽, 李再兴, 李学问, 等, 2016. 基于层次分析法的登封市地质灾害危险性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 27(2): 92-96.
- 杜春兰, 陆文凤, 李剑锋, 等, 2008. 地质灾害危险度研究: 以重庆市渝北区为例[J]. 地下空间与工程学报, 4(6): 1169-1176.
- 杜国梁, 张永双, 高金川, 等, 2016. 基于GIS的白龙江流域甘肃段滑坡易发性评价[J]. 地质力学学报, 22(1): 1-11.
- 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等, 2018. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报, 26(2): 340-347.
- 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.
- 国务院灾害调查组, 2022. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R]. 北京: 中华人民共和国应急管理部.
- 黄润秋, 许向宁, 唐川, 等, 2008. 地质环境评价与地质灾害管理[M]. 北京: 科学出版社: 151-179.
- 郎秋玲, 张以晨, 张继权, 等, 2019. 基于组合赋权理论的泥石流孕灾因子分析[J]. 灾害学, 34(1): 68-72.
- 李春燕, 孟晖, 张若琳, 等, 2017. 中国县域单元地质灾害风险评估[J]. 水文地质工程地质, 44(2): 160-166.
- 李郎平, 兰恒星, 郭长宝, 等, 2017. 基于改进频率比法的川藏铁路沿线及邻区地质灾害易发性分区评价[J]. 现代地质, 31(5): 911-929.
- 李信, 薛桂澄, 柳长柱, 等, 2022. 基于信息量模型和信息量-逻辑回归模型的海南岛中部山区地质灾害易发性研究[J]. 地质力学学报, 28(2): 294-305.
- 廖丽萍, 于森, 文海涛, 等, 2019. 广西东南部容县崩塌滑坡的易发性评价[J]. 地球与环境, 47(4): 518-526.

- 刘传正, 陈春利, 2020. 中国地质灾害成因分析[J]. 地质论评, 66(5): 1334-1348.
- 刘传正, 黄帅, 2022. 郑州西部山区“7·20”山洪地质灾害成因研究[J]. 工程地质学报, 30(3): 931-943.
- 刘乐, 杨智, 孙健, 等, 2021. 安徽黄山市徽州区地质灾害危险性评价研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 32(2): 110-116.
- 吕敦玉, 刘长礼, 孟舒然, 等, 2021. 郑州城市地质调查报告[R]. 石家庄: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所.
- 邱海军, 崔鹏, 王彦民, 等, 2015. 基于关联维数的黄土滑坡空间分布结构及其成因分析[J]. 岩石力学与工程学报, 34(3): 546-555.
- 孙冉, 王成都, 夏哲兵, 等, 2015. 基于AHP-信息量法的费县地质灾害风险评价[J]. 环境科学与技术, 38(6P): 430-435.
- 王磊, 张春山, 杨为民, 等, 2011. 基于GIS的甘肃省甘谷县地质灾害危险性评价[J]. 地质力学学报, 17(4): 388-401.
- 王庆超, 2018. 巩义市地质灾害区划与防治对策研究[D]. 西安: 长安大学: 1-77.
- 魏国灵, 金云龙, 邱锦安, 等, 2020. 粤东陆河县地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 31(1): 51-56.
- 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等, 2009. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 28(8): 995-1005.
- 吴兴贵, 王宇栋, 王蓝婷, 等, 2024. 基于加权信息量模型的云南澜沧县滑坡危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 35(3): 1-10.
- 吴泽斌, 万海斌, 2022. 2021年河南郑州山区4市“7·20”特大暴雨灾害简析[J]. 中国防汛抗旱, 32(3): 27-31.
- 殷志强, 孟晖, 连建发, 等, 2013. 基于不同时间尺度的地质灾害对气候变化响应研究[J]. 地质论评, 59(6): 1110-1117.
- 于开宁, 吴涛, 魏爱华, 等, 2023. 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, 34(2): 146-155.
- 张超, 田运涛, 张宇飞, 2019. 甘肃陇南石鸡坝乡幅地质灾害危险性评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 38(7): 83-89.
- 张春山, 韩金良, 孙炜锋, 等, 2008. 陕西陇县地质灾害危险性分区评价[J]. 地质通报, 27(11): 1795-1801.
- 张建羽, 吕敦玉, 刘长礼, 等, 2023. 河南郑州市岩土地层结构特征及地下空间开发利用建议[J]. 地质论评, 69(1): 305-315.
- 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.
- 张晓东, 刘湘南, 赵志鹏, 等, 2018. 信息量模型、确定性系数模型与逻辑回归模型组合评价地质灾害敏感性的对比研究[J]. 现代地质, 32(3): 602-610.
- 张向营, 张春山, 孟华君, 等, 2018. 基于GIS和信息量模型的京张高铁滑坡易发性评价[J]. 地质力学学报, 24(1): 96-105.
- 赵东亮, 兰措卓玛, 侯光良, 等, 2021. 青海省河湟谷地地质灾害易发性评价[J]. 地质力学学报, 27(1): 83-95.
- 甄习春, 商真平, 戚赏, 等, 2012. 河南省地质灾害及防治研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社.
- 郑师谊, 张绪教, 杨艳, 等, 2012. 层次分析法在滇西怒江河谷潞江盆地崩塌与滑坡地质灾害危险性评价中的应用[J]. 地质通报, 31(2-3): 356-365.
- 周静静, 张晓敏, 赵法锁, 等, 2019. 陕南秦巴山区地质灾害危险性评价研究[J]. 地质力学学报, 25(4): 544-553.
- 周学铨, 廖黎明, 2019. 西藏萨迦县地质灾害危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 30(6): 113-116.