



引文格式: 贾丽娜, 陈世昌. 基于 AHP 和 GIS 的舟曲地质灾害易发性评价[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 23-33. DOI: 10.12401/j.nwg.2023094

Citation: JIA Lina, CHEN Shichang. Geological Hazard Susceptibility Evaluation Based on AHP and GIS in Zhouqu County, Gansu[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 23-33. DOI: 10.12401/j.nwg.2023094

基于 AHP 和 GIS 的舟曲地质灾害易发性评价

贾丽娜, 陈世昌

(甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室, 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 舟曲县是中国罕见的滑坡、泥石流地质灾害高发区, 其防灾减灾工作具有一定的挑战性。依托舟曲县 1:50 000 地质灾害风险调查工作, 深入分析孕灾地质条件, 选取地质灾害频率比、地质灾害面积模数比、地质灾害体积模数比、坡度、坡度变化率、坡形、切割深度、沟壑密度、岩土体类型、地质构造、植被指数 11 个评价因子, 建立 AHP 评价模型, 确定各因子权重, 运用 GIS 平台综合评价舟曲县地质灾害易发性。结果显示: 舟曲县地质灾害极高易发区和高易发区的面积分别为 68.98 km²、390.9 km², 分别占县域总面积的 2.29% 和 12.97%, 主要分布在人员财产集中的白龙江流域、石门沟流域、拱坝河流域中下游和博峪河流域舟曲段中部区域; 中易发区、低易发区对应的面积分别为 1 166.21 km² 和 1 387.76 km²。研究成果为舟曲县城镇整体规划和地质灾害防治提供决策参考。

关键词: 地质灾害; 易发性评价; 孕灾地质条件; AHP; 舟曲县

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)01-0023-11

Geological Hazard Susceptibility Evaluation Based on AHP and GIS in Zhouqu County, Gansu

JIA Lina, CHEN Shichang

(Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources of Gansu Province, Geological Environment Monitoring Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Zhouqu County is a rare national area with a high incidence of landslides and debris flows, and its disaster prevention and mitigation work is challenging. Relying on the 1:50 000 geological disaster risk survey work in Zhouqu County, we deeply analyze the geological conditions for disaster, select 11 evaluation factors of geological disaster frequency ratio, geological disaster area modulus ratio, geological disaster volume modulus ratio, slope, slope change rate, slope shape, cutting depth, gully density, rock and soil type, faults, vegetation index, establish an evaluation model using analytic hierarchy process (AHP), determine the weight assignment of each factor, and use The GIS platform was used to comprehensively evaluate the vulnerability of geological disasters in Zhouqu County.. The results show that the areas of extremely high-prone and high-prone areas are 68.98 km² and 390.9 km² respectively in Zhouqu County, Gongba River Basin, middle area of Zhouqu section of

收稿日期: 2022-09-11; 修回日期: 2023-04-20; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 甘肃省自然资源厅风险调查和重点隐患排查项目“甘南州舟曲县 1:5 万地质灾害风险调查”(甘资财发[2020]16号)资助。

作者简介: 贾丽娜(1990-), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要从事水工环地质方面工作。E-mail: 448158813@qq.com。

Boyu River Basin, where people and properties are concentrated. The corresponding areas of the middle-prone and low-prone areas are 1 166.21 km² and 1 387.76 km², respectively. The research results provide references for the overall planning of Zhouqu County and geological disaster prevention and control.

Keywords: geohazards; susceptibility assessment; disaster formation conditions; analytic hierarchy process (AHP); Zhouqu County

舟曲县山大沟深、岩体破碎、构造发育、软岩遍布、暴雨和地震频发、多发,地质灾害十分发育,是全国滑坡、泥石流强烈发育区之一(汪美华等, 2023),被列为长江上游水土保持重点治理县。从2010年开始舟曲县相继发生了“8.8”特大山洪泥石流、南峪江顶崖滑坡、东山牙豁口滑坡和2021年的立节北山、果耶磨里滑坡,灾害的发生造成了巨大经济财产损失和人员伤亡,同时也为防灾减灾工作带来一定挑战。因此,舟曲县地质灾害防治工作备受重视,地质灾害调查评价、监测预警等综合防治体系愈加完善(刘传正等, 2020),避险搬迁有序进行。易发性评价作为地质灾害调查评价的基础工作(吴树仁等, 2009),可为城镇规划发展以及工程建设提供决策参考。

关于地质灾害易发性的研究,关注点多在评价方法。自20世纪60年代起,评价方法由单一的数学统计法和机器学习模型(Ayalew et al., 2005; 许冲等, 2009; 张俊等, 2016; 方然可等, 2021; 赵东亮等, 2021; 张林梵等, 2022; 孟晓捷等, 2022; 贾俊等, 2023),逐渐发展到多方法结合(Capparelli et al., 2011; 许英姿等, 2016; 贾丽娜等, 2018; 张玘恺等, 2020; 罗路广等, 2021a; 王高峰等, 2021; 张文居等, 2022),不同方法各有千秋,快速、精准地建立模型在实际工作中更为实用。在评价因子选取方面,往往忽略孕灾地质条件分析,过分依赖个人经验,导致有的评价因子缺乏针对性和代表性(罗路广等, 2021b)。

鉴于此,笔者依托2020~2021年实施完成的《舟曲县1:50 000地质灾害风险调查评价》项目(陈世昌等, 2021),利用最新的地质灾害调查数据,研究区域内孕灾地质条件和地质灾害发育的相关性,选取合适的评价因子,运用层次分析法,进行舟曲县地质灾害易发性评价,为地方政府防灾减灾提供可靠的参考依据。

1 孕灾地质条件分析

孕灾地质条件包括多种基础地质要素,是研究地质灾害形成的关键,也是易发性制图的根基(乐琪浪

等, 2015; 王高峰等, 2016, 2017)。

1.1 地形地貌与地质灾害

地形地貌分为宏观和微观,共同构成地质灾害形成的重要条件。宏观地貌例如山区、河谷,受构造运动影响,形成过程漫长且不易改变;微观地貌例如坡高、坡度,除自然形成外,还明显受人类工程活动影响,其变化往往会引发不同规模的地质灾害。

1.1.1 宏观地形地貌与地质灾害的关系

研究区位于西秦岭中高山区,山峻谷深,沟壑纵横,侵蚀切割强烈,宏观上分为侵蚀构造山地和侵蚀堆积河谷平原。地质灾害隐患点多集中在侵蚀构造山地。

在侵蚀构造山区,遭受侵蚀、强风化作用的基岩构成中山、高山主体,表层覆盖较厚松散的残坡积层,局部裸露基岩节理裂隙发育,岩石极为破碎,在自然状态下较易发生滑坡、崩塌等地质灾害,雨季暴雨时可作为泥石流灾害提供充足的物源(熊德清等, 2021)。

1.1.2 微观地形地貌与地质灾害的关系

(1)对滑坡、崩塌的影响

坡形直接影响崩滑灾害的形成(孙萍萍等, 2019)。凸形、直线形、阶梯形和凹形是区内坡形的主要类型。对研究区172处斜坡类灾害的统计分析表明,崩塌灾害发生于应力集中程度高的凸形和直线形正向类型斜坡。滑坡主要发生于凹形和凸形斜坡,占总滑坡数量的63.6%。部分滑坡群分布于高陡坡体的第一斜坡带,坡脚处多无岩土体支撑,坡形多呈直线形或凸形;受构造、地下水影响发生过多次滑动的大滑坡多分布在山体坡脚较缓斜坡上,天然坡度20°左右,斜坡形态一般呈凹形(表1)。

表1 崩塌、滑坡对应坡形统计表

Tab. 1 Slope shape statistics corresponding to collapse and landslide

| 序号 | 坡面形态 | 灾体数量 (个) | 所占比例 (%) | 灾害类型 | |
|----|------|-------------|-------------|------|----|
| | | | | 滑坡 | 崩塌 |
| 1 | 凸形 | 40 | 23.3 | 35 | 5 |
| 2 | 凹形 | 54 | 31.4 | 54 | 0 |
| 3 | 直线形 | 53 | 30.8 | 26 | 27 |
| 4 | 阶梯型 | 25 | 14.5 | 25 | 0 |
| | 合计 | 172 | 100.0 | 140 | 32 |

坡度影响斜坡的应力大小与分布。利用 DEM 提取坡度, 统计不同坡度区间的灾害数量。统计结果如下: 崩塌所在斜坡坡度为 40°~85°, 多分布在 60°以上的陡崖; 滑坡所在斜坡坡度为 15°~60°, 多分布于 25°~45°之间的陡坡地段(表 2)。

表 2 不同坡度区间崩塌滑坡发生概率统计表

Tab. 2 Statistics of collapse and landslide occurrence in different slope gradient intervals

| 序号 | 坡度区间(°) | 灾害总数 | | 灾害类型 | | | |
|----|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | | 滑坡 | | 崩塌 | |
| | | 数量 (个) | 比率 (%) | 数量 (个) | 比率 (%) | 数量 (个) | 比率 (%) |
| 1 | 0~10 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 |
| 2 | 11~20 | 26 | 15.1 | 26 | 18.6 | 0 | 0.0 |
| 3 | 21~30 | 42 | 24.4 | 42 | 30.0 | 0 | 0.0 |
| 4 | 31~40 | 45 | 26.2 | 43 | 30.7 | 2 | 6.3 |
| 5 | 41~50 | 27 | 15.7 | 19 | 13.6 | 8 | 25.0 |
| 6 | 51~60 | 13 | 7.6 | 10 | 7.1 | 3 | 9.4 |
| 7 | 61~70 | 7 | 4.1 | 0 | 0.0 | 7 | 21.9 |
| 8 | 71~80 | 7 | 4.1 | 0 | 0.0 | 7 | 21.9 |
| 9 | 81~90 | 5 | 2.9 | 0 | 0.0 | 5 | 15.6 |
| 合计 | | 172 | 100 | 140 | 100 | 32 | 100 |

坡高控制斜坡的应力大小。低边坡受人类工程活动影响强烈, 多发生削坡建房、建厂等, 较大临空面易发育崩塌; 高边坡(主要指 100~400 m 之间)的影响因素较多, 易发生滑坡。根据统计结果, 坡高 0~100 m 区间内, 崩塌发生的次数及比率最高, 数量有

19 处, 占崩塌总数 59.4%; 滑坡发生比率较高的区间是 50~400 m, 共 95 处, 占滑坡总数的 67.8%(表 3)。

表 3 不同坡高区间崩塌滑坡发生概率统计表

Tab. 3 Statistics of collapse and landslide occurrence in different slope height intervals

| 序号 | 坡高区间 (m) | 数量(个) | | 灾害类型 | | | |
|----|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 比率(%) | | 滑坡 | | 崩塌 | |
| | | 数量 (个) | 比率 (%) | 数量 (个) | 比率 (%) | 数量 (个) | 比率 (%) |
| 1 | 0~50 | 29 | 16.9 | 18 | 12.9 | 11 | 34.4 |
| 2 | 51~100 | 31 | 18.0 | 23 | 16.4 | 8 | 25.0 |
| 3 | 101~200 | 41 | 23.8 | 35 | 25.0 | 6 | 18.8 |
| 4 | 201~300 | 19 | 11.0 | 16 | 11.4 | 3 | 9.4 |
| 5 | 301~400 | 23 | 13.4 | 21 | 15.0 | 2 | 6.3 |
| 6 | 401~500 | 9 | 5.2 | 9 | 6.4 | 0 | 0.0 |
| 7 | 501~600 | 8 | 4.7 | 8 | 5.7 | 0 | 0.0 |
| 8 | 601~700 | 6 | 3.5 | 5 | 3.6 | 1 | 3.1 |
| 9 | >700 | 6 | 3.5 | 5 | 3.6 | 1 | 3.1 |
| 合计 | | 172 | 100.0 | 140 | 100.0 | 32 | 100.0 |

(2)对泥石流的影响

影响泥石流的地形地貌主要包括主沟纵坡、沟坡坡度、流域面积和相对高差, 其控制着泥石流的形成(白永健等, 2014a)。

主沟纵坡为泥石流的形成提供动力。对区内 124 条泥石流沟谷的主沟纵坡进行统计(表 4)发现, 平均主沟纵坡为 10%~50%的沟谷占总数的 75.8%, 说明在此区间的沟床比降对泥石流的形成和运动最

表 4 泥石流主沟纵坡统计表

Tab. 4 Statistics of longitudinal slope of main gully of debris flow

| 序号 | 主沟纵坡(‰) | 泥石流数量(条) | 比例 (%) | 泥石流类型 | | 易发程度 | | |
|----|---------|----------|-----------|-------|-----|------|-----|-----|
| | | | | 泥石流 | 水石流 | 高易发 | 中易发 | 低易发 |
| 1 | <100 | 13 | 10.5 | 13 | 0 | 0 | 10 | 3 |
| 2 | 100~200 | 37 | 29.8 | 37 | 0 | 0 | 37 | 0 |
| 3 | 200~300 | 29 | 23.4 | 29 | 0 | 0 | 27 | 2 |
| 4 | 300~400 | 16 | 12.9 | 16 | 0 | 1 | 13 | 2 |
| 5 | 400~500 | 12 | 9.7 | 2 | 0 | 1 | 10 | 1 |
| 6 | 500~600 | 11 | 8.9 | 10 | 1 | 0 | 9 | 2 |
| 7 | 600~700 | 4 | 3.2 | 3 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| 8 | 700~800 | 1 | 0.8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | >800 | 1 | 0.8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 合计 | | 124 | 100.0 | 112 | 2 | 2 | 107 | 15 |

为有利;主沟纵坡 $>10\%$ 的占总数的89.5%,这与舟曲县山大谷深的地形地貌有关。

沟坡坡度影响松散物质堆积量和降雨汇集速度。据统计,泥石流在 $26^\circ\sim 45^\circ$ 之间最为发育,共计100条,占总数的80.6%;高易发和中易发泥石流的数量分别为2条和90条,分别占各自类型总数的100%和84.1%(表5)。

流域面积小利于泥石流的形成。对区内124条泥石流进行统计,10 km²以下的有90条,占总数的72.6%。此区间内,易发性中、高泥石流分别为76条和2条,均占到各自类别数量的70%以上(表6)。

相对高差为泥石流的形成提供动能和势能。94条泥石流发育于500~2 000 m的相对高差,占总量的75.8%,反映了舟曲县地形起伏较大的特征(表7)。

表5 泥石流山坡坡度统计表

Tab. 5 Statistics of debris flow in different slope ranges

| 序号 | 坡度区间($^\circ$) | 泥石流数量(条) | 所占比例 (%) | 泥石流类型 | | 易发程度 | | |
|----|------------------|----------|-------------|-------|-----|------|-----|-----|
| | | | | 泥石流 | 水石流 | 高易发 | 中易发 | 低易发 |
| 1 | <25 | 2 | 1.6 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 2 | $26\sim 35$ | 46 | 37.1 | 45 | 1 | 1 | 44 | 1 |
| 3 | $36\sim 45$ | 54 | 43.5 | 54 | 0 | 1 | 46 | 7 |
| 4 | $46\sim 55$ | 15 | 12.1 | 14 | 1 | | 11 | 4 |
| 5 | >55 | 7 | 5.6 | 7 | 0 | 0 | 4 | 3 |
| 总计 | | 124 | 100 | 122 | 2 | 2 | 107 | 15 |

表6 泥石流流域面积统计表

Tab. 6 Statistics of debris flow in different watershed areas

| 序号 | 流域面积 (km ²) | 泥石流数量 (条) | 比例 (%) | 泥石流类型 | | 易发程度 | | |
|----|----------------------------|--------------|-----------|-------|-----|------|-----|-----|
| | | | | 泥石流 | 水石流 | 高易发 | 中易发 | 低易发 |
| 1 | <1 | 40 | 32.3 | 38 | 2 | 1 | 31 | 8 |
| 2 | $1\sim 5$ | 37 | 29.8 | 37 | 0 | 0 | 34 | 3 |
| 3 | $5\sim 10$ | 13 | 10.5 | 13 | 0 | 1 | 11 | 1 |
| 4 | $10\sim 20$ | 9 | 7.3 | 9 | 0 | 0 | 8 | 1 |
| 5 | $20\sim 50$ | 16 | 12.9 | 16 | 0 | 0 | 14 | 2 |
| 6 | $50\sim 100$ | 8 | 6.5 | 8 | 0 | 0 | 8 | 0 |
| 7 | >100 | 1 | 0.8 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 合计 | | 124 | 100 | 122 | 2 | 2 | 107 | 15 |

表7 泥石流相对高差统计表

Tab. 7 Statistics of debris flow in different relative elevation ranges

| 序号 | 相对高差 (m) | 泥石流数量 (条) | 比例 (%) | 泥石流类型 | | 易发程度 | | |
|----|-----------------|--------------|-----------|-------|-----|------|-----|-----|
| | | | | 泥石流 | 水石流 | 高易发 | 中易发 | 低易发 |
| 1 | <200 | 4 | 3.2 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 2 | $200\sim 500$ | 17 | 13.7 | 16 | 1 | 0 | 15 | 2 |
| 3 | $500\sim 1000$ | 42 | 33.9 | 41 | 1 | 1 | 33 | 8 |
| 4 | $1000\sim 1500$ | 31 | 25.0 | 31 | 0 | 1 | 27 | 3 |
| 5 | $1500\sim 2000$ | 21 | 16.9 | 21 | 0 | 0 | 20 | 1 |
| 6 | >2000 | 9 | 7.3 | 9 | 0 | 0 | 8 | 1 |
| 合计 | | 124 | 100 | 122 | 2 | 2 | 107 | 15 |

1.2 地质构造与地质灾害

地质构造通过对地形地貌、地层岩性、断裂褶皱和地震分布的控制,影响着地质灾害的发育程度与分布规律(白永健等,2014b)。

(1) 构造控制地质灾害的总体分布

区域性总体抬升的新构造运动是控制区内地质灾害发育的重要因素。研究区发育的崩滑灾害受控于西秦岭褶皱带,尤其是白龙江断裂褶皱带,构造线呈北西~南东向展布,经多期强烈的构造运动,地质构造十分发育,利于地质灾害的形成。

(2) 断裂对崩塌、滑坡的控制

断裂对崩滑灾害具有控制性,常造成岩体破碎、地下水活动异常等(彭建兵,2006;张永双等,2016)。

舟曲县滑坡呈带状集中分布于断裂带两侧附近,以坪定-化马断裂带为典型。沿该断裂带的北坪定乡-东山乡 25km 长的范围内发育有多处较大规模滑坡,形成一个锁儿头-泄流坡-中牌滑坡密集带。

崩塌分布也明显受断裂控制,特别是三眼峪沟、罗家峪沟、峪子沟等几条较大支沟的中下游区断裂与沟谷岸坡交汇位置基岩、碎石土崩塌较为发育。白龙江南岸山区硬质岩区发育的断裂带与沟谷陡崖交互地带也是基岩崩塌密集分布的地带。

1.3 工程地质岩组与地质灾害

工程地质岩组是崩滑流形成的“地基”式组成,控制地质灾害发育(黄润秋等,2008)。

(1) 对泥石流的控制

研究区泥石流分为两种类型:泥石流和水石流,与地层分布息息相关。泥石流发育区多为志留系、泥盆系板岩、千枚岩以及石炭系灰岩,受构造运动影响,岩体构造裂隙发育,风化较强,力学性质一般。水石流发育区多集中于中生界硬质岩,地层岩性及岩土体结构对斜坡的稳定较为有利,滑坡、崩塌等重力堆积物不发育,山坡、沟道中堆积的松散固体物质相对较少,受固体物质补给量的限制,灾害以山洪为主,局部发育水石流沟。

研究区易发泥石流的地层主要有古生界千枚岩、板岩等变质岩,此类地层岩体本身较为破碎,加之风化作用,使得表面堆积有较厚松散物质,为泥石流的形成提供固体物质储备。棱角状碎屑使其具有较强裹挟能力,易侵蚀沟床,促进泥石流的发育。

(2) 对滑坡、崩塌的控制

区内易发生滑坡的地层有:第四系黄土、碎石土

堆积层和中~古生界千枚岩、板岩等。黄土的特殊物理力学性质为滑坡的发育提供了基本条件,疏松、不稳定的结构,决定了其内聚力较低。碎石土堆积层土石混杂,结构松散,底部与基岩的接触面倾向坡外,内部分布有倾向坡外且较连续的由千枚岩等变质岩风化岩屑构成的细粒土透镜体夹层,抗剪能力差,且相对隔水,千枚岩、板岩、片岩等软弱岩层的存在,使得这些岩土质斜坡的稳定性大为降低。

区内易发生崩塌的地层有:第四系黄土,志留系、泥盆系千枚岩、板岩,二迭系、三叠系灰岩和其它硬质基岩。值得一提的是,其它硬质基岩形成较早,发育节理裂隙,在降雨、特别是地震作用下,易发生崩塌。区内西南部较大沟谷中常见以落石的形式崩落于沟谷之中,沟谷乡间公路两侧也有发育。

1.4 生态环境与地质灾害

生态环境主要指地表植被,它通过地表保护、控制径流等间接影响地质灾害的发育。

(1) 对滑坡的影响

地表缺乏植被保护,会加速表层风化,降雨迅速流入孔隙裂缝中,下渗至坡体软弱面,易形成滑坡。

(2) 对泥石流的影响

植被叶片的蒸腾作用可消耗一定的降雨,同时根茎、落叶等能够吸收部分地表降雨,调节地面雨水的径流量以及径流速度,从而降低雨水裹挟松散物质的动能,对泥石流的形成具有抑制作用。

2 地质灾害易发性评价

2.1 数据源

数据源主要包括(表 8):①地质灾害隐患点的数据来自 2021 年开展的舟曲县 1:50 000 地质灾害风险调查评价项目。②DEM 数据为 30 m×30 m 分辨率的公开数据源,用于提取坡度、坡型、切割深度、沟壑密度等地形地貌参数。③1:50 000 孕灾地质条件图(图 1),用于提取岩土体类型、地质构造等信息。④2019 年 4 月的 ETM+遥感数据,用于计算植被指数 NDVI。

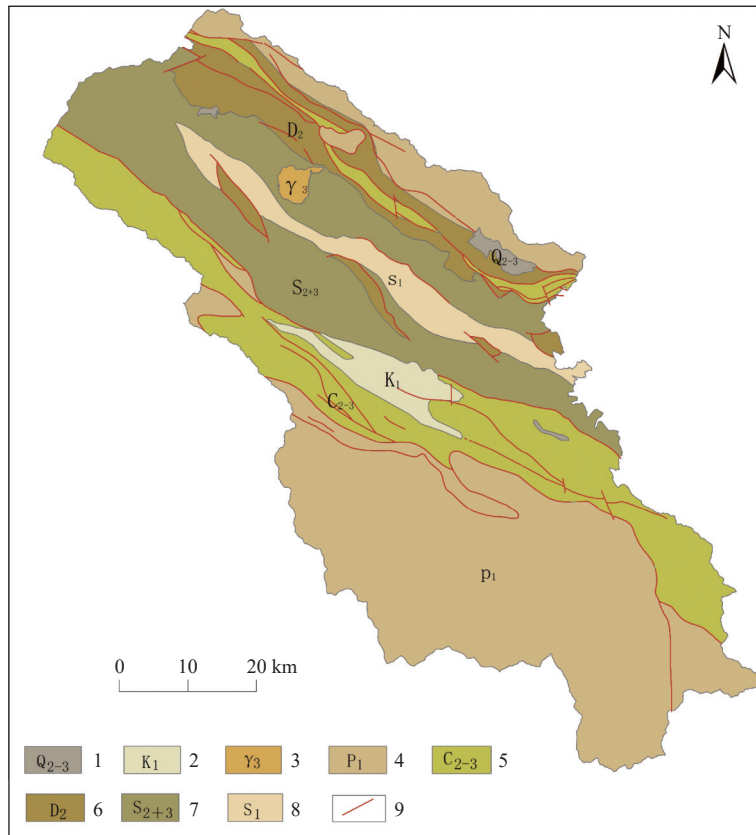
根据调查成果,舟曲县共确定地质灾害隐患点 299 处,其中泥石流 124 处,占总数 41.5%,滑坡 140 处,占总数 46.8%,崩塌 32 处,占总数 10.7%,地面塌陷 3 处,占总数 1%(图 2)。

研究区地质灾害易发性评价采用层次分析法,依

表8 数据来源一览表

Tab. 8 List of data sources

| 基础数据 | 数据来源 | 数据格式 | 说明 |
|-------|-------------------------|------|----------------------------|
| 地质数据 | 1:50 000孕灾地质条件图 | SHP | 提取地质构造、岩土体类型等 |
| DEM数据 | 地理空间数据云 | TIFF | 30 m×30 m分辨率, 用于提取地形地貌相关数据 |
| 遥感数据 | ETM+ | TIFF | 2019年4月数据, 用于计算NDVI |
| 隐患点数据 | 舟曲县1:50 000地质灾害风险调查评价成果 | SHP | 用于构建发育因子指标 |



1. 第四系中上更新统黄土; 2. 白垩系下统砂岩; 3. 燕山期花岗岩; 4. 二叠系下统砂岩、板岩; 5. 石炭系中上统灰岩;
6. 侏罗系中统板岩; 7. 志留系中上统千枚岩、板岩; 8. 志留系下统灰岩; 9. 地质构造

图1 舟曲县孕灾地质条件图

Fig. 1 Map of Disaster-prone geological conditions in Zhouqu County

据评价因子的内在关系, 建立层次结构模型, 并逐个评判各因子之间的重要程度, 建立判断矩阵, 最终确定所有因子的权重。

2.2 指标体系

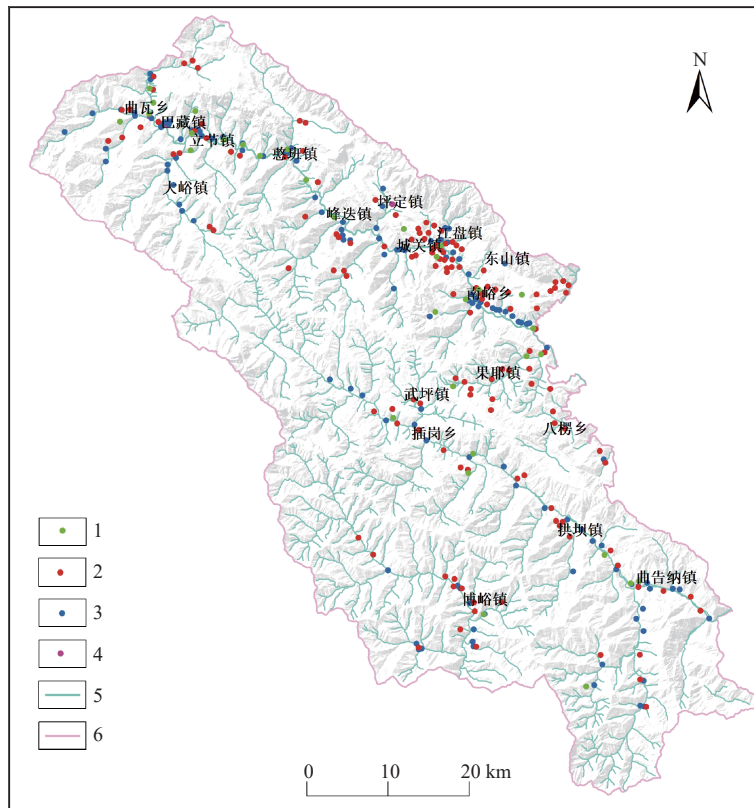
地质灾害易发性是地质灾害发育现状的具体表现, 同时需要考虑孕灾地质环境背景的复杂性。因此, 本研究评价指标体系构建如下: 地质灾害易发性→发育因子、孕灾地质条件因子→11个具体的评价指标(图3)。

2.3 评价模型

地质灾害易发性评价采用线性组合, 根据评价指标体系, 建立11个评价因子的量化数据库, 消除量纲进行归一化处理, 确定其权重, 运用GIS的栅格计算器工具, 叠加处理, 具体评价模型为:

$$Y = w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + \dots + w_nx_n \quad (1)$$

式中: Y 为易发性指数; w_1, w_2, \dots, w_n 为各评价因子; x_1, x_2, \dots, x_n 为各评价因子对应的权重。



1. 崩塌; 2. 滑坡; 3. 泥石流; 4. 地面塌陷; 5. 水系; 6. 县界

图2 舟曲县地质灾害分布图

Fig. 2 Map of geological hazard distribution in Zhouqu County

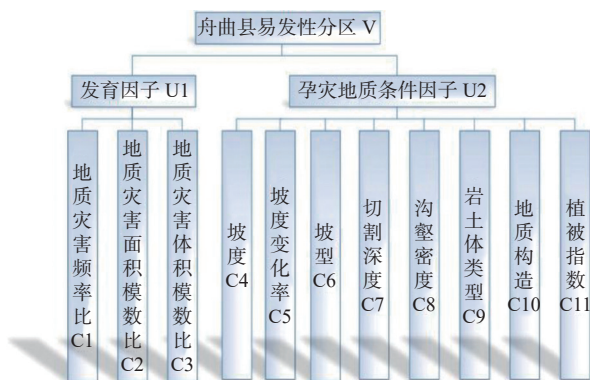


图3 地质灾害易发性评价指标体系

Fig. 3 Evaluation index system of geohazards susceptibility

2.4 评价指标量化

(1) 发育因子

发育因子主要考虑地质灾害发育程度, 与其分布和数量有关, 还得考虑灾害的规模大小。基于准确性与可操作性, 地质灾害数量、面积与体积资料详实, 可作为发育因子的评价指标。将全域划分为 2.5 km×2.5 km 的网格, 以小网格为基准进行计算(图 4)。

地质灾害频率比(C1): 设某单元格为(m, n), 其面积为 S(m, n), 单元内发育灾害数量为 q(m, n), 单元内的灾害频率密度为:

$$fq(m, n) = q(m, n)/S(m, n) \quad (2)$$

全域总面积 S, 总灾害数量 Q, 频率比为:

$$f_0 = Q/S \quad (3)$$

则: 第(m, n)单元格灾害频率比为:

$$Rf(m, n) = fq(m, n)/f_0 \quad (4)$$

同理, 地质灾害面积模数比(C2)与地质灾害体积模数比(C3)不再赘述。

(2) 孕灾地质条件因子

根据孕灾地质条件分析结果, 共选取了地形地貌数据、岩土体类型数据等八个对地质灾害发育影响较大的因子, 进行归一化处理(图 5), 量化信息见表 9。

2.5 易发性分区

获得基础评价因子的归一化图层后, 按照 AHP 模型, 运用 GIS 进行叠加计算, 运用自然间断法将叠加结果分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区等 4 类, 对应的面积分别为 68.98 km²(占总面积

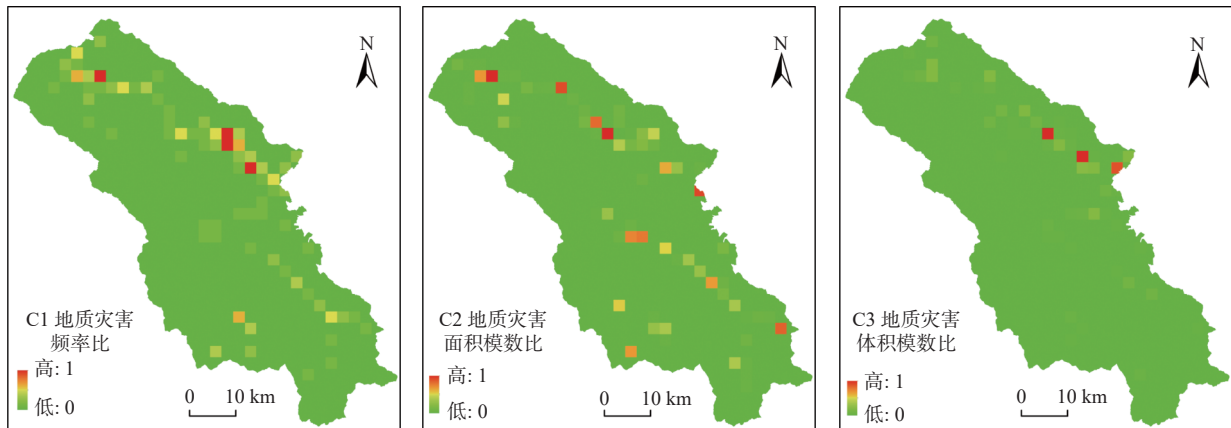


图4 地质灾害发育因子归一化图

Fig. 4 Normalized map of geohazards development factors

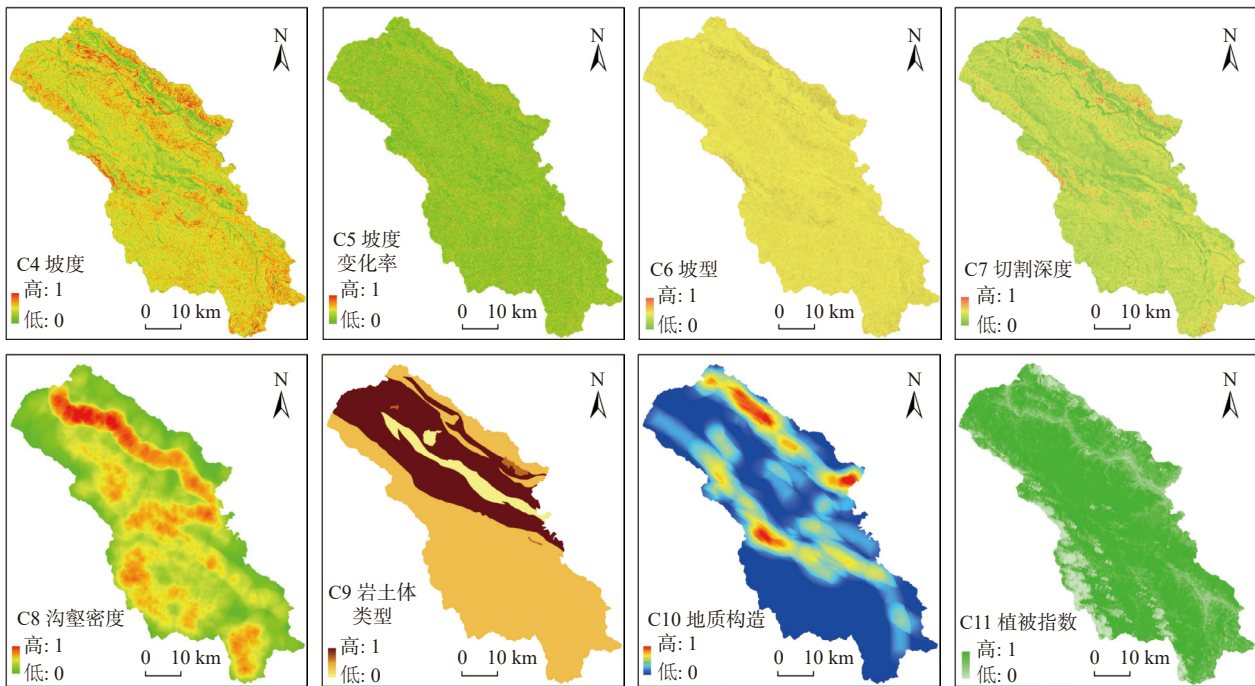


图5 地质灾害孕灾因子归一化图

Fig. 5 Normalized map of geohazards -pregnant factors

表9 孕灾地质条件因子量化一览表

Tab. 9 Quantitative list of disaster-pregnant geological conditions

| 序号 | 分类 | 孕灾因子 | 数据源 | 指标量化过程(意义) |
|----|--------|-------|------------------------|--|
| 1 | 地形地貌数据 | 坡度 | DEM (30 m× 30 m) | DEM数据提取。研究区内崩滑灾害所在斜坡坡度区间为10°~70°,本次评价将坡度上限的易发程度定义为1,坡度下限的易发程度定义为0,进行归一化处理。 |
| 2 | | 坡度变化率 | | DEM数据提取。反映坡度变化情况,与斜坡拉张应力区的分布呈正相关,其变化越大,说明斜坡内部应力也随之变大,稳定性差。 |
| 3 | | 坡形 | | DEM数据提取。可用地表曲率表征,以零为界,大于或等于零表明是直线/凸型斜坡,小于零表明是凹型/阶梯型坡斜坡。 |
| 4 | | 切割深度 | | DEM数据提取。可用高程差表示,即平均值与最小值之差,表明区域地形地貌的起伏度以及沟谷的发育程度。 |
| 5 | | 沟壑密度 | | DEM数据提取。衡量地表破碎程度,可用流域内水文网的长度表征。 |
| 6 | 岩土类型数据 | 岩土体类型 | 1:50 000孕灾地质条件图 | 岩土体类型的矢量数据。根据岩土体的工程地质特性,易发性由高到低分别赋予4~1,最后栅格化并归一。 |
| 7 | 构造数据 | 地质构造 | | 利用断层矢量数据。以区内第四纪以来发育的活动断裂为基准线,利用线密度分析工具,以3km为搜索半径进行分析。 |
| 8 | 环境变量数据 | 植被覆盖率 | ETM+ | 利用2019年4月ETM+遥感数据,计算求取植被指数NDVI。 |

的 2.29%)、390.9 km²(占总面积的 12.97%)、1 166.21 km²(占总面积的 38.70%)、1 387.76 km²(占总面积的 46.05%)(表 10, 图 6)。

根据分区结果, 地质灾害极高易发区主要分布在县域北部白龙江流域(曲瓦-巴藏-立节-憨班-峰迭-舟曲县城-南峪-大川-两河口)以及石门沟流域, 高易发区域主要分布在拱坝河流域中下游和博峪河流域舟曲段中部区域, 中易发区呈条带状贯穿了舟曲县中部和北部部分区域, 低易发区位于舟曲县东北边缘与宕昌接壤地带以及西南边缘与文县、四川省九寨沟县接壤地带。

为验证易发性分区的可靠性, 对落入各分区的灾害点进行统计, 并计算频率比(灾害点数量占比/易发面积占比), 由计算结果可知, 极高易发区和高易发区虽然面积只占全县面积的 15.26%, 但区内灾害点占比达 73.58%, 频率比也与易发性等级相呼应。

表 10 地质灾害易发性统计表

Tab. 10 Statistics of geohazards susceptibility

| 易发等级 | 指数区间 | 面积(km ²) | 总面积占比(%) | 区内灾害点数量(个) | 频率比 |
|-------|-----------------|----------------------|----------|------------|--------|
| 低易发区 | 0.059 9~0.291 5 | 1 387.76 | 46.05 | 17 | 0.123 |
| 中易发区 | 0.291 5~0.419 9 | 1 166.21 | 38.70 | 62 | 0.535 |
| 高易发区 | 0.419 9~0.699 3 | 390.9 | 12.97 | 149 | 3.842 |
| 极高易发区 | 0.699 3~0.701 9 | 68.97 | 2.29 | 71 | 10.369 |

3 结论

(1) 地形地貌是舟曲县地质灾害发生的先决条件。易发生滑坡的微地貌为: 坡形为凹形或凸形, 坡度范围为 15°~60°, 多分布于 25°~45°的陡坡地段, 坡高为 50~400 m 区间内; 易发生崩塌的微地貌为: 坡形为直线形, 坡度范围为 40°~85°, 多分布在 60°以上的陡崖, 坡高 0~100 m 区间内; 易发生泥石流的微地貌: 沟谷平均主沟纵坡为 10%~50%, 山坡坡度优势区间为 26°~45°, 流域面积为 0~10 km²。

(2) 舟曲县地质灾害受地质构造控制明显。其中滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害隐患点主要分布于坪定—化马断裂带等几大断裂构造带内及其次级断层的两侧附近。

(3) 工程地质岩组是滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害发生、发展的重要内因和物质基础。志留系、泥盆系等古生界地层出露区是泥石流灾害最易发的地

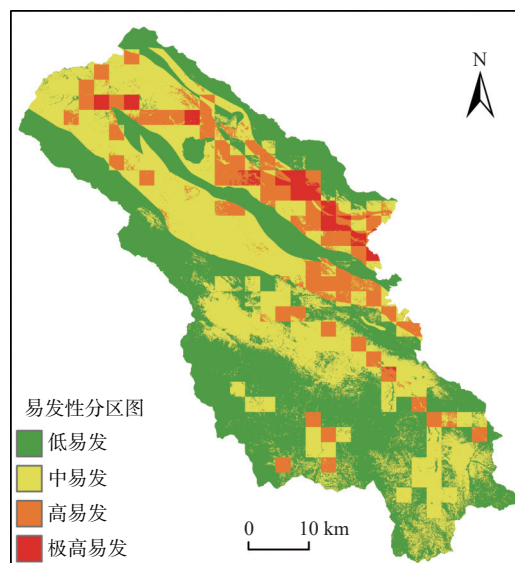


图6 舟曲县地质灾害易发性分区图

Fig. 6 Division of geohazards susceptibility in Zhouqu County

区, 易滑地层有黄土、碎石土堆积层、千枚岩、板岩等地层, 易崩地层有第四系黄土、志留系、泥盆系千枚岩、板岩, 二迭系、三叠系灰岩和其它硬质基岩。

(4) 根据孕灾地质条件分析, 舟曲县地质灾害易发性评价指标分为发育因子和孕灾地质条件因子, 其中发育因子包括地质灾害频率比、地质灾害面积模数比、地质灾害体积模数比, 孕灾地质条件因子包括坡度、坡度变化率、坡形、切割深度、沟壑密度、岩土体类型、地质构造、植被指数, 建立 AHP 评价模型, 确定各因子权重, 综合评价舟曲县地质灾害易发性。

(5) 舟曲县地质灾害易发性评价结果分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区, 对应的面积分别为 68.98 km²(占总面积的 2.29%)、390.9 km²(占总面积的 12.97%)、1 166.21 km²(占总面积的 38.70%)、1 387.76 km²(占总面积的 46.05%)。地质灾害极高易发区主要分布在县域北部白龙江流域以及石门沟流域, 高易发区域主要分布在拱坝河流域中下游和博峪河流域舟曲段中部区域。应用频率比法进行不同分

区内灾害点数量统计,结果与易发性等级相呼应,验证了本研究易发性分区的可靠性。

参考文献(References):

- 白永健,李明辉,王东辉,等.金沙江中游巴塘县地质灾害发育特征及成灾规律分析[J].中国地质灾害与防治学报,2014b,25(02):103-109.
- BAI Yongjian, LI Minghui, WANG Donghui, et al. Characteristics and disastrous rule research of geohazards in batang county, the middle reaches of Jinsha river[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014b, 25(02): 103-109.
- 白永健,铁永波,倪俊勇,等.鲜水河流域地质灾害时空分布规律及孕灾环境研究[J].灾害学,2014a,29(4):69-75.
- BAI Yongjian, TIE Yongbo, NI Huayong, et al. Temporal-Spatial Distribution and Environment Pregnant of Geohazards in Xi-anshui River of Sichuan, China[J]. Journal of Catastrophology, 2014a, 29(4): 69-75.
- 陈世昌,丛凯,王玉飞,等.舟曲县1:50000地质灾害风险调查评价[R].兰州:甘肃省地质环境监测院,2021.
- 方然可,刘艳辉,苏永超,等.基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型[J].水文地质工程地质,2021,48(01):181-187.
- FANG Ranke, LIU Yanhui, SU Yongchao, et al. A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(01): 181-187.
- 黄润秋,许向宁,唐川,等.地质环境评价与地质灾害管理[M].北京:科学出版社,2008.
- HUANG Runqiu, XU Xiangning, TANG Chuan, et al. Geological Environmental Assessment and Geological Hazard Management[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- 贾丽娜,梁收运.基于最优组合赋权法的华池县地质灾害易发性评价[J].地质灾害与环境,2018,29(04):61-67.
- JIA Lina, LIANG Shouyun. Assessment of geohazards susceptibility for Huachi County by the optimal combined weight method[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2018, 29(04): 61-67.
- 贾俊,毛伊敏,孟晓捷,等.深度随机森林和随机森林算法的滑坡易发性评价对比以汉中市略阳县为例[J].西北地质,2023,56(3):239-249.
- JIA Jun, MAO Yimin, MENG Xiaojie, et al. Comparison of Landslide Susceptibility Evaluation by Deep Random Forest and Random Forest Model: A Case Study of Lueyang County, Hanzhong City[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 239-249.
- 乐琪浪,王洪德,高幼龙,等.三峡库区望霞危岩体孕灾地质环境条件分析[J].地球学报,2015,36(02):204-212.
- LE Qilang, WANG Hongde, GAO Youlong, et al. An Analysis of Disaster-pregnant Geological Environment Conditions of the Wangxia Unstable Rock Mass in the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(02): 204-212.
- 刘传正,陈春利.中国地质灾害成因分析[J].地质论评,2020,66(05):1334-1348.
- LIU Chuanzheng, CHEN Chunli. Research on the origins of geological disasters in China[J]. Geological Review, 2020, 66(05): 1334-1348.
- 罗路广,裴向军,崔圣华,等.九寨沟地震滑坡易发性评价因子组合选取研究[J].岩石力学与工程学报,2021a,40(11):2306-2319.
- LUO Luguang, PEI Xiangjun, CUI Shenghua, et al. Combined selection of susceptibility assessment factors for Jiuzhaigou earthquake-induced landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021a, 40(11): 2306-2319.
- 罗路广,裴向军,黄润秋,等. GIS支持下CF与Logistic回归模型耦合的九寨沟景区滑坡易发性评价[J].工程地质学报,2021b,29(02):526-535.
- LUO Luguang, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Landslide susceptibility assessment in Jiuzhaigou scenic area with GIS based on certainty factor and Logistic regression model[J]. Journal of Engineering Geology, 2021b, 29(02): 526-535.
- 孟晓捷,张新社,曾庆铭,等.基于加权信息量法的黄土滑坡易发性评价——以1:5万天水市麦积幅为例[J].西北地质,2022,55(2):249-259.
- MENG Xiaojie, ZHANG Xinshe, ZENG Qingming, et al. The Susceptibility Evaluation of Loess Landslide Based on Weighted Information Value Method: Taking 1: 50 000 Map of Maiji District of Tianshui City As an Example[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 249-259.
- 彭建兵.中国活动构造与环境灾害研究中的若干重大问题[J].工程地质学报,2006,14(01):5-12.
- PENG Jianbing. Some important problems to be addressed in research of active tectonics and environmental disasters in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(01): 5-12.
- 孙萍萍,张茂省,程秀娟,等.黄土高原地质灾害发生规律[J].山地学报,2019,37(05):737-746.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, CHENG Xiujian, et al. On the Regularity of Geological Hazards on the Loess Plateau in China[J]. Mountain Research, 2019, 37(05): 737-746.
- 王高峰,高幼龙,王洪德,等.基于图幅调查的六盘山镇滑坡易发性分析[J].科学技术与工程,2017,17(36):22-29.
- WANG Gaofeng, GAO Youlong, WANG Hongde, et al. Analyses on Landslide Susceptibility of Liupan Shan Town Based on Map Sheet Survey[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(36): 22-29.

- 王高峰, 郭宁, 邓兵, 等. 不同组合模型区域滑坡易发性及精度分析[J]. 西北地质, 2021, 54(02): 259–272.
- WANG Gaofeng, GUO Ning, DENG Bing, et al. Analysis of Landslide Susceptibility and Accuracy in Different Combination Models[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(02): 259–272.
- 王高峰, 王爱军, 田运涛, 等. 基于图幅调查的六盘山镇孕灾地质条件分析[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(05): 364–369.
- WANG Gaofeng, WANG Aijun, TIAN Yuntao, et al. Analysis on Disaster-Pregnant Geological Environment of Liupanshan Town Based on Map Sheet Survey[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(05): 364–369.
- 汪美华, 李勇, 裴叶青. 甘肃临夏盆地韩集北山滑坡群致灾特征与稳定性评价[J]. *地质通报*, 2023, 42(2–3): 460–468.
- WANG Meihua, LI Yong, PEI Yeqing. Disaster characteristics and stability evaluation of the Hanjin Beishan landslide group in Linxia Basin, Gansu Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(2–3): 460–468.
- 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. *地质通报*, 2009, 28(8): 995–1005.
- WU Shuren, SHI Jusong, ZHANG Chunshan, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8): 995–1005.
- 熊德清, 崔笑烽. 喜马拉雅山脉地震带主要地质灾害与地形地貌关系——以西藏日喀则地区为例[J]. *地质通报*, 2021, 40(11): 1967–1980.
- XIONG Deqing, CUI Xiaofeng. The relationship between main geological hazard and topography in the Himalayan seismic belt: A case study in the Xigaze area, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(11): 1967–1980.
- 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. GIS 支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(S2): 3978–3985.
- XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. GIS-Based Landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan earthquake region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S2): 3978–3985.
- 许英姿, 卢玉南, 李东阳, 等. 基于 GIS 和信息量模型的广西花岗岩分布区滑坡易发性评价[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(04): 693–703.
- XU Yingzi, LU Yunan, LI Dongyang, et al. GIS and information model based landslide susceptibility assessment in granite area of Guangxi province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(04): 693–703.
- 张俊, 殷坤龙, 王佳佳, 等. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(02): 284–296.
- ZHANG Jun, YIN Kunlong, WANG Jiajia, et al. Evaluation of landslide susceptibility for Wanzhou district of Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(02): 284–296.
- 张林梵, 王佳运, 张茂省, 等. 基于 BP 神经网络的区域滑坡易发性评价[J]. *西北地质*, 2022, 55(2): 260–270.
- ZHANG Linfan, WANG Jiayun, ZHANG Maosheng, et al. Evaluation of Regional Landslide Susceptibility Assessment Based on BP Neural Network[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 260–270.
- 张玘恺, 凌斯祥, 李晓宁, 等. 九寨沟县滑坡灾害易发性快速评估模型对比研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(08): 1595–1610.
- ZHANG Qikai, LING Sixiang, LI Xiaoyu, et al. Comparison of landslide susceptibility mapping rapid assessment models in Jiuzhaigou County, Sichuan province, China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(08): 1595–1610.
- 张文居, 孟陆波, 李磊, 等. 汶马高速公路斜坡地质灾害分布规律及演化模式[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(2): 196–203.
- ZHANG Wenjun, MENG Lubo, LI Lei, et al. Distribution law and evolution model of geological hazards on the slope of Wenchuan-Maerkang expressway, Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(2): 196–203.
- 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. *地球学报*, 2016, 37(03): 277–286.
- ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, YAO Xin, et al. Research on the Geohazard Effect of Active Fault on the Eastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(03): 277–286.
- 赵东亮, 兰措卓玛, 侯光良, 等. 青海省河湟谷地地质灾害易发性评价[J]. *地质力学学报*, 2021, 27(01): 83–95.
- ZHAO Dongliang, LANCUO Zhouma, HOU Guangliang, et al. Assessment of geological disaster susceptibility in the Hehuang Valley of Qinghai Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 2021, 27(01): 83–95.
- Ayalew L, Yamagishi H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakudayahiko Mountains, Central Japan[J]. *Geomorphology*, 2005, 65(1–2): 15–31.
- Capparelli G, Versace P. FLAIR and SUSHI: two mathematical models for early warning of landslide induced by rainfall[J]. *Landslides*, 2011, 8(1): 67–79.