

文章编号:1673-9469(2020)03-0098-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2020.03.015

## 镇巴县地质灾害发育规律与危险性评价

史琳鹏<sup>1</sup>,范文<sup>1,2\*</sup>,李培<sup>3</sup>,曹琰波<sup>1</sup>,柴小庆<sup>1</sup>,全倬梁<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054; 2. 信息产业部电子综合勘察设计院,陕西 西安 710054;  
3. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710054)

**摘要:**以“汉江中游任河流域镇巴县幅地质灾害调查及专题研究”项目为依托,基于区域地质环境概况、遥感解译与野外实地考察,研究了镇巴县幅地质灾害的发育规律。在此基础上,选择坡高、坡度、坡形、降雨量、工程地质岩组、距断层距离、距河流距离、人类工程活动与灾害点密度9种评价因子,采用层次分析法建立各评价因子的判断矩阵,确定地质灾害危险性评价指数,对镇巴县幅地质灾害危险性进行评价和分区。结果表明:(1)镇巴县幅地质灾害类型主要为滑坡、崩塌、泥石流,其中滑坡93处,崩塌6处,泥石流4处;(2)地质灾害多发育在坡形为凹凸面坡、坡度为 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 、起伏度为0~30 m的斜坡中,且集中分布在河谷两侧的高程为500~800 m的低山区;(3)地质灾害危险性可分为高、中、低三类,面积分别为62.05、143.43、224.57 km<sup>2</sup>。高危险区主要分布在泾洋河流域,占总面积的14.4%。

**关键词:**镇巴县;地质灾害;发育规律;层次分析法;危险性评价

**中图分类号:**P694

**文献标识码:**A

## Development Regularity and Risk Assessment of Geohazards in Zhenba County

SHI Linpeng<sup>1</sup>, FAN Wen<sup>1,2\*</sup>, LI Pei<sup>3</sup>, CAO Yanbo<sup>1</sup>, CHAI Xiaoqing<sup>1</sup>, QUAN Zhuoliang<sup>1</sup>

(1. School of Geology Engineering and Geomatic, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710054;  
2. China Electronic Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an, Shanxi 710054;  
3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710054)

**Abstract:** Based on the project of “Geological Hazard Investigation and Special Research of Zhenba County in the Middle River of Hanjiang River”, and combined with regional geological environment overview, remote sensing interpretation and fieldwork, the development regularity of geological hazards in Zhenba County were studied. According to the results, there are nine conditioning evaluation factors: slope height, slope, slope shape, rainfall, engineering geological rock group, distance from fault, distance from river, human engineering activity and disaster point density, which were extracted. Then the judgment matrix of conditioning factors and factor classes were conducted by analytic hierarchy process method, and geological hazard index was built. Finally the geological hazard of Zhenba County was assessed and the risk of geological hazard map was classified. The results are as follows: (1) the main types of geological disasters in Zhenba County are landslides, collapses, and debris flows, including 93 landslides, 6 collapses, and 4 debris flows; (2) Geological disasters are mostly developed in concave-convex slopes, slopes with angles of  $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ , slopes with undulations of 0~30 m, and are concentrated in low mountains with elevations of 500~800 m on both sides of the valley; (3) The risk of geological

收稿日期:2020-06-02

基金项目:中国地质调查局项目(211526180107);陕西省科技厅重点项目资助(2019ZDLSF07-0701);国家自然科学基金资助项目(41702293)

作者简介:史琳鹏(1995-),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事地质工程与地质灾害等方面的研究工作。

\* 通讯作者:范文(1967-),男,内蒙古呼和浩特人,博士,教授,博士生导师,主要从事山区地质灾害、黄土微视光学等方面的研究工作。

hazard map can be classified into three classes, including high, moderate, and low, with an area of 62.05 km<sup>2</sup>, 143.43 km<sup>2</sup> and 224.57 km<sup>2</sup> respectively. High-risk areas are mainly distributed in the Jingyang River Basin, accounting for 14.4% of the total area.

**Key words:** Zhenba County; geological disaster; distribution; analytic hierarchy process; risk assessment

镇巴县地处秦岭山区,区域地质构造、地形地貌复杂多变,地质环境脆弱,是地质灾害高发、频发的典型地区之一<sup>[1-2]</sup>。加之受人类工程活动的影响,区内地质灾害频发不断,具有强度大、范围广、数量多等特点<sup>[3-4]</sup>。

2000年7月13日,镇巴、紫阳两县遭受特大暴雨,引发山洪、滑坡及泥石流,致236人死亡,392人受伤,7.95亿元的直接经济损失,成为2000年全国五大自然灾害区之一<sup>[5]</sup>。为了保障人民群众的生命和财产安全,对该区地质灾害的危险性评价研究显得尤为重要。

本文依托《汉江中游任河流域镇巴县幅地质灾害调查及专题研究》项目,基于野外调查,分析了镇巴县幅地质灾害的发育分布规律。基于层次分析法对镇巴县幅地质灾害进行了危险性评价,研究成果可为镇巴县城乡规划与地质灾害防治提供参考。

### 1 地质环境概况

#### 1.1 地理位置

研究区位于陕西省汉中市镇巴县,属汉江支流泾洋河流域。国家干线川陕公路(G210国道)纵贯工作区南北,中东部有由梁家湾通往镇巴县城的镇节路,西部有沿着月滩河由北向南贯穿工作区的长沙路,同时由襄渝铁路及包(包头)-茂(茂名)高速公路穿越镇巴县东南角,连通省会西安与工作区,距离西安市约220 km。区域内省道S310贯穿泾洋河流域,有通村便道,交通便利,水电及通讯条件良好。

#### 1.2 地形地貌

研究区西部为大巴山,东部为米仓山。区内地质构造以褶皱、断层为主,岩性以变质岩和沉积岩为主。地形高程在580~1980 m之间,以山地为主。按照地貌图制图规范,将区内地形根据其绝对高程和相对高程的大小划分为三类:低山区、中山区和河谷阶地区。

#### 1.3 地质构造与地层岩性

研究区位于镇巴-大池坝隐伏断裂附近以北

及司上鸡心岭褶皱束以西的龙门-大巴台缘隆褶皱带,因工作区地处两大构造单元的过渡带,区内褶皱、断裂构造发育,地质灾害常有发生。

区内出露的地层由老到新包括南华系、震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、二叠系、三叠系和侏罗系地层,岩性主要以灰岩为主,其次还不同程度分布有砂岩、泥岩、页岩和硅质岩(图1)。

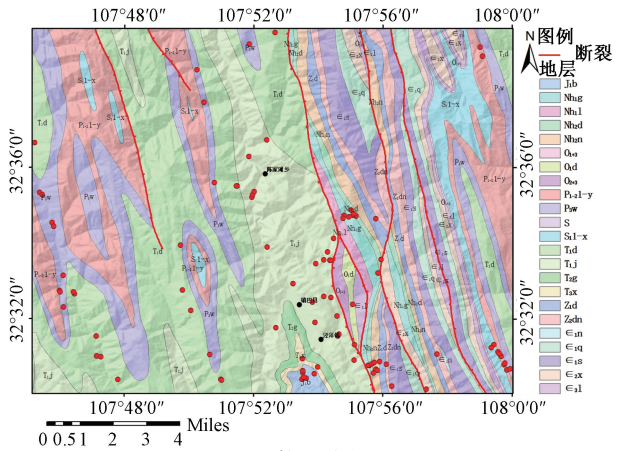


图1 构造岩性图

Fig. 1 The map of tectonic lithologic

#### 1.4 气候条件

研究区属北亚热带湿润大陆季风气候类型,气候湿润,夏季多雨,秋季多为连阴雨,冬季稳定较为舒适。据2006—2015年降水统计资料可知,多年平均降水量1279.5 mm,多年最大降水量1963.4 mm(2011年),最小降水量915.4 mm(2008年)。并且夏、秋两季月平均降水量占全年最多。月平均降水量最多月份为5—9月,最小月份为1月。多年月平均降水量1月以后逐月增加,7月份平均降水量为最高(292 mm),一般7月份以后月平均降水量逐渐减少。降雨往往是斜坡失稳的决定性因素<sup>[6]</sup>。

### 2 地质灾害类型

通过91卫图助手下载精度为0.5 m的2015、2018年的GoogleEarth亚米级高分辨率影像,采用目视解译的方法对该区域地质灾害进行遥感解译。最后基于遥感解译与野外实地考察,得到研究区主要灾害类型有滑坡、崩塌、泥石流三种。其中滑坡93处,崩塌6处,泥石流4处(图2)。

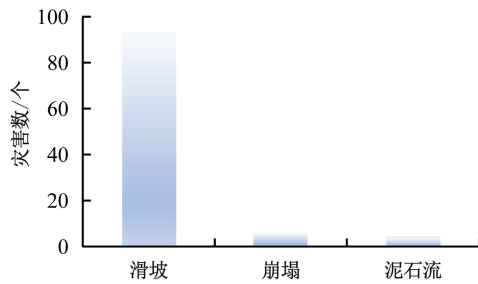


图2 地质灾害类型分布

Fig. 2 Distribution of geological disasters types

按照《崩塌滑坡泥石流调查与风险评估技术要求》(试用版)中对滑坡类型进行划分,滑坡按照物质组成划分为土质、岩质、碎屑滑坡,分别占57%、19%、24%;按扩展方式主要分为推移式、扩大式和牵引式,分别占80%、1%、19%;按照滑坡的规模均为小型滑坡。崩塌均为小型崩塌,其中岩质崩塌6处,无土质崩塌;破坏方式以滑移式最为发育,倾倒式次之;根据滑动状态,处于休止阶段和破坏阶段各占50%;对其稳定性进行分析,不稳定和基本稳定分别占34%和66%。泥石流按照物质组成划分,其中泥石流和水石流分别占75%和25%;按照规模等级划分,此次调查泥石流均为中型泥石流;按照水源类型划分,调查区内均为暴雨型泥石流;按照地貌划分,均为山区泥石流;按照流域形态划分,均为沟谷型泥石流,流域呈扇形或狭长条形,均可划分出物源区,流通区与堆积区。

### 3 地质灾害的空间发育规律

由于研究区内地质灾害类型主要为滑坡,占灾害总数的90%,因此本文主要研究了滑坡的发育分布规律<sup>[7-9]</sup>。选取8个因子:坡形、坡度、起伏度、高程、地貌、工程岩组、距断裂距离、距水系距离,以评价各因子分级同地质灾害分布的相关性<sup>[10]</sup>。

#### 3.1 坡形与滑坡灾害

根据坡面形态可以将斜坡分成凹面型坡、平坡和凸面型坡,根据DEM提取的曲率是对地面坡

度沿最大坡降方向地面高程变化率的度量,可以间接地表示坡面形态。曲率>0为凸面型坡,曲率<0为凹面型坡,曲率=0为平坡<sup>[11]</sup>(图3(a))。统计分析灾害与坡形的关系,结果如表1和图3(b)所示。可见,灾害密度在0附近为最小,越往两侧灾害密度越大。由于在0附近地形较为平坦,滑坡发生较少,往左右两侧曲率增加,地势变陡,易发生滑坡灾害。

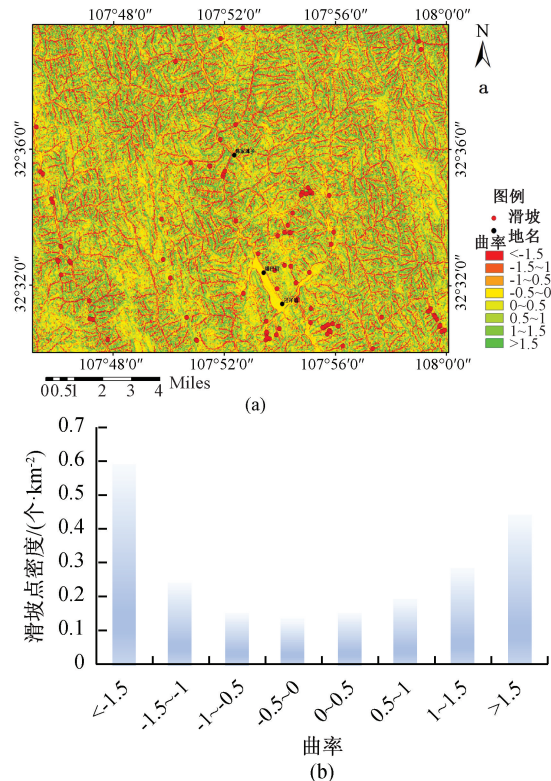


图3 滑坡点分布与坡形关系

Fig. 3 Relation between the distribution of landslide sites and slope shape

#### 3.2 坡度与滑坡灾害

将坡度划分为6个等级:0°~10°、10°~20°、20°~30°、30°~40°、40°~50°、>50°(图4(a))。对灾害在不同坡度区间的数量关系进行统计,结果如表2和图4(b)所示。可见,灾害密度在0°~10°坡度区间最大,达0.37个/km<sup>2</sup>,其次为20°~30°坡度区间。经分析,人类活动多集中在较平坦地区,

表1 滑坡分布与坡形的关系

Tab. 1 Relation between landslide distribution and slope shape

项目	曲率							
	<-1.5	-1.5~-1	-1~-0.5	-0.5~0	0~0.5	0.5~1	1~1.5	>1.5
面积/km <sup>2</sup>	25.5	45.6	68.3	97.4	75.8	53.4	43.2	24.8
面积百分比/%	5.88	10.51	15.74	22.44	17.47	12.3	9.95	5.71
灾害个数/个	15	11	10	13	11	10	12	11
密度/(个·km <sup>-2</sup> )	0.59	0.24	0.15	0.13	0.15	0.19	0.28	0.44

加剧了斜坡的变形运动。

表 2 滑坡分布与坡度的关系

Tab. 2 Relation between landslide distribution and gradient

项目	坡度/°					
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	>50
面积/km <sup>2</sup>	18.9	51.6	117.9	160.7	74.8	9.7
面积百分比/%	4.4	11.9	27.2	37.1	17.3	2.2
灾害个数/个	7	8	39	30	8	1
密度/(个·km <sup>-2</sup> )	0.37	0.15	0.33	0.19	0.11	0.10

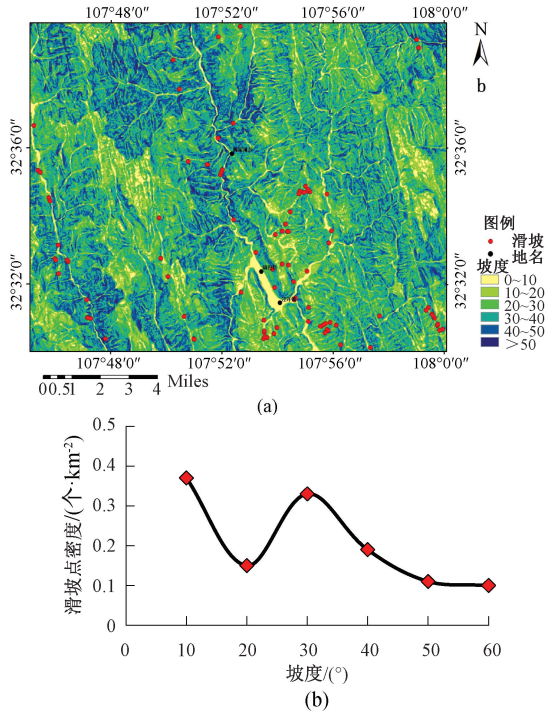


图 4 滑坡点分布与坡度关系

Fig. 4 Relation between the distribution of landslide sites and gradient

### 3.3 起伏度与滑坡灾害

将起伏度划分为 5 个等级:0~10、10~30、30~50、50~70、>70(图 5(a))。对灾害在不同起伏度区间的数量关系进行统计,结果如表 3 和图 5(b)所示。可见,起伏度 0~30 m 的区域灾害密度最大,其次 30~50 m 区域范围,起伏度>50 m 的区域灾害密度较小,主要因为起伏度>50 m 的区域受人类工程经济活动影响较小,起伏度>70 m 的区域无灾害分布。

### 3.4 高程与滑坡灾害

研究区以低山为主,高差较大,海拔高度变化范围在 580~1 980 m 之间。

根据调查区高程对灾害点的贡献程度不同,可将高程分为不同的类,并近似认为每一类的贡

表 3 滑坡分布与起伏度的关系

Tab. 3 Relation between landslide distribution and fluctuation

项目	起伏度/m				
	0~10	10~30	30~50	50~70	>70
面积/km <sup>2</sup>	36	272	116	9	1
面积百分比/%	8.3	62.7	26.7	2	0.3
灾害个数/个	9	68	15	1	0
密度/(个·km <sup>-2</sup> )	0.25	0.25	0.13	0.11	0

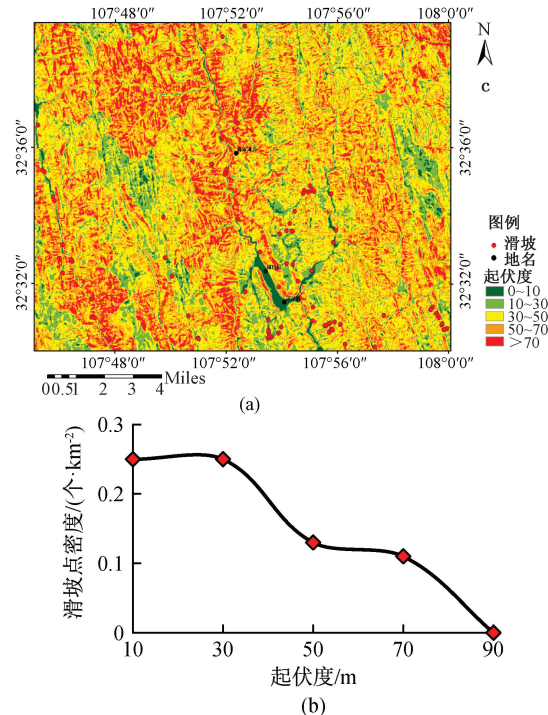


图 5 滑坡点分布与起伏度关系

Fig. 5 Relation between the distribution of landslide sites and fluctuation

献程度相同。将高程分为以下 5 类:500~800 m、800~1 000 m、1 000~1 200 m、1 200~1 400 m、>1 400 m(图 6(a))。对灾害在不同高程区间的数量关系进行统计,结果如表 4 和图 6(b)所示。可见,灾害密度随着高程的增加而减少,滑坡主要发生在 500~800 m 之间,这主要有两个原因:一是该区域大多是河谷区,区内的公路、厂房等设施往往是沿河道修建,使得斜坡容易发生变形滑塌;二是高程在 500~800 m 区间的地形较为陡峭,是区域上河流从宽谷进入峡谷的过渡部位,因此滑坡灾害最为发育。

### 3.5 地貌与滑坡灾害

研究区可分为中山区、低山区和河谷阶地地貌(图 7(a))。在 Arcgis 软件中叠加分析地质灾害和地形地貌,可见地质灾害在各类地貌中均有分布。分析结果如表 5 和图 7(b)所示。可见,低

表 4 滑坡分布与高程的关系

Tab. 4 Relation between landslide distribution and elevation

项目	高程/m				
	500~800	800~1 000	1 000~1 200	1 200~1 400	>1400
面积/km <sup>2</sup>	25.58	64.91	85.39	89.81	165.17
面积百分比/%	6.6	15	19.8	20.8	38.3
灾害个数/个	25	38	13	4	13
密度/(个·km <sup>-2</sup> )	0.87	0.58	0.15	0.04	0.08

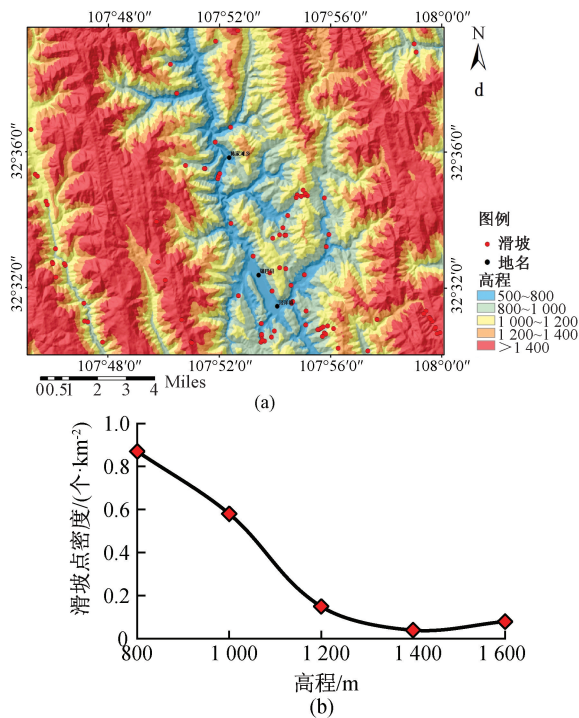


图 6 滑坡点分布与高程关系

Fig. 6 Relation between the distribution of landslide sites and elevation

山区的地质灾害分布最多;灾害密度以低山区最大,约 0.59 个/km<sup>2</sup>,中山区最小。主要原因为大多人类工程活动都分布在低山区和河谷阶地,促使了灾害的发生。

表 5 滑坡分布与地貌的关系

Tab. 5 Relation between landslide distribution and landform

项目	地貌类型		
	中山区	低山区	河谷阶地
面积/km <sup>2</sup>	339.50	87.79	6.64
面积百分比/%	78.24	20.23	1.53
灾害个数/个	38	52	3
密度/(个·km <sup>-2</sup> )	0.11	0.59	0.45

### 3.6 工程岩组与滑坡灾害

研究区发育有不同地质时期的多种岩组。根据各种岩石建造组合特征,将调查区出露地层划

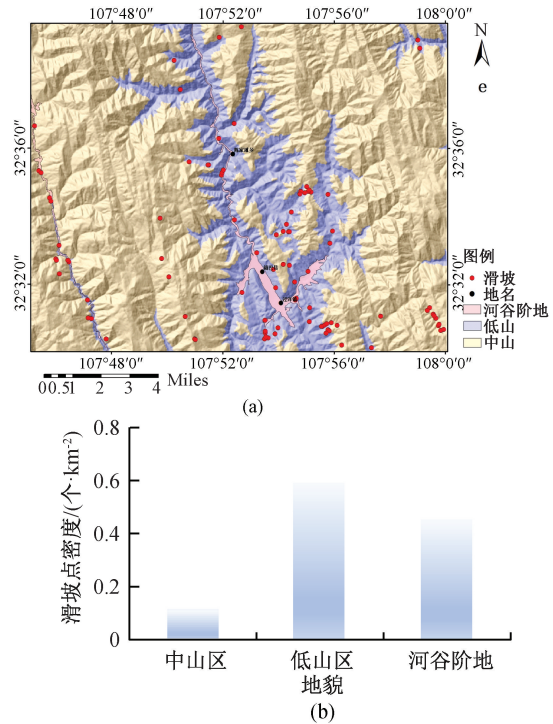


图 7 滑坡点分布与地貌关系

Fig. 7 Relation between the distribution of landslide sites and landform

分为碳酸盐岩建造、碎屑岩建造、松散堆积三种建造类型。按照岩层单层厚度、岩质类型和岩体结构划分,该区内主要为坚硬、较坚硬厚、中、薄层灰岩、白云质灰岩岩组(I),坚硬、较坚硬灰岩夹软弱泥、页、粉砂岩岩组(II),碎屑岩建造按照单层厚度、岩质类型和岩体结构进一步划分为软弱泥、页、粉砂岩夹坚硬、较坚硬灰岩岩组(III),较坚硬、软弱厚、中、薄层石英砂岩岩组(IV),软弱中薄层泥、页、粉砂岩互层岩组(V),松散岩类主要是第四系松散堆积物(VI)(图 8(a))。统计分析灾害点与工程岩组的关系,结果如表 6 和图 8(b)所示。可见,第四系松散堆积物地区的灾害密度最大。

表 6 滑坡分布与工程岩组的关系

Tab. 6 Relation between landslide distribution and engineering petrofabric

项目	岩组编号					
	I	II	III	IV	V	VI
面积/km <sup>2</sup>	251.6	83.2	40.1	18	41.1	6.68
面积百分比/%	58	19	9	4	9	1
灾害个数/个	47	8	3	8	21	6
密度/(个·km <sup>-2</sup> )	0.21	0.1	0.07	0.44	0.51	0.87

### 3.7 断裂与滑坡灾害

研究区主要发育有司上小洋坝断裂、大池坝

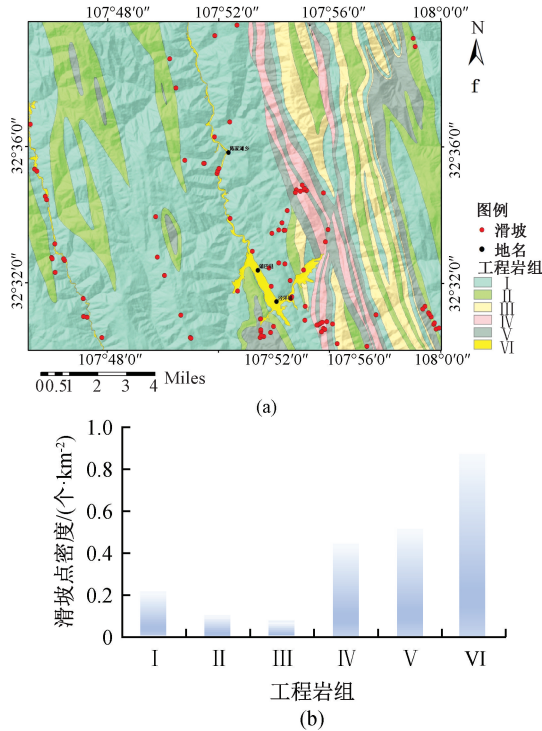


图 8 滑坡点分布与工程岩组关系

Fig. 8 Relation between the distribution of landslide sites and engineering petrofabric

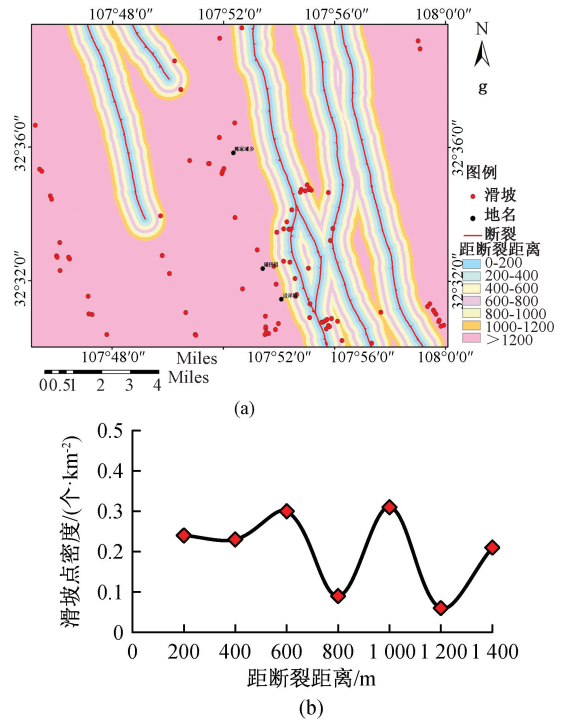


图 9 滑坡点分布与断裂关系

Fig. 9 Relation between the distribution of landslide sites and fault

镇巴断裂以及其他小断裂。依据地质图中断裂信息,统计分析断裂对地质灾害的影响,根据距断裂的距离划分为 7 个区域:<200 m、200~400 m、400~600 m、600~800 m、800~1 000 m、1 000~1 200 m、>1 200 m(图 9(a))。统计分析灾害与断裂的关系,结果如表 7 和图 9(b)所示。可见,随着距断裂距离的增加,灾害并无明显的减少。表明断裂对研究区地质灾害的分布控制作用不明显。

表 7 滑坡分布与断裂的关系

**Tab. 7 Relation between landslide distribution and fault**

项目	距断裂距离/m						
	<200	400	600	800	1 000	1 200	>1 200
面积/km <sup>2</sup>	33	34	33	32	29	29	244
面积百分比/%	7.6	7.8	7.6	7.4	6.7	6.7	56.2
灾害个数/个	8	8	10	3	9	2	53
密度/(个·km <sup>-2</sup> )	0.24	0.23	0.3	0.09	0.31	0.06	0.21

### 3.8 水系与滑坡灾害

研究区水系众多,其中主要河流为泾洋河、牧羊河,并且伴有大量的支流。由于河水的侧向侵蚀和下切作用不断侵蚀河流两岸的坡脚,另一方面,由于河水的软化作用使岩体的强度降低,以及河流水位的涨落所引发的动水压力变化,流域内的

坡体稳定性相对较差。将河流影响范围划分为 4 个区域:<200、200~400、400~600、>600 m,叠加地质灾害(图 10(a))。统计分析各距离区间范围内灾害分布,结果如表 8 和图 10(b)所示。可见,在 0~600 m 范围内,随着与河流距离的增大,地质灾害数量和密度明显减少,表明在此区域内河流对地质灾害有很强的控制作用。

表 8 滑坡分布与河流的关系

**Tab. 8 Relation between landslide distribution and river**

项目	距河流距离/m			
	<200	400	600	>600
面积/km <sup>2</sup>	94.85	84.15	73.11	178.84
面积百分比/%	22.0	19.5	17.0	41.5
灾害个数/个	42	14	5	32
密度/(个·km <sup>-2</sup> )	0.44	0.17	0.07	0.18

## 4 地质灾害风险评价

### 4.1 评价方法及层次结构模型

传统层次分析法其基本原理是将决策中有关的元素分解为目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析<sup>[12-15]</sup>。通过对影响因素的两两比较,综合决定影响因子的权重<sup>[16-17]</sup>。采用一致性比率(CR)来判断评价因子比较结果的合理

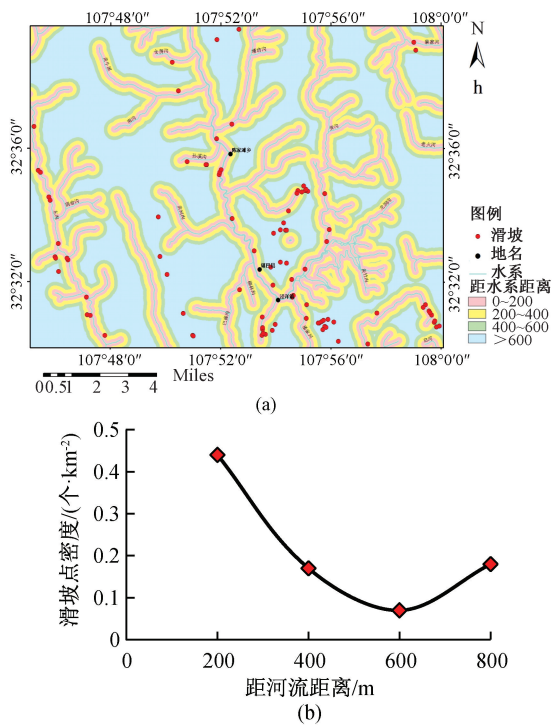


图 10 滑坡点分布与河流关系

Fig. 10 Relation between Landslide distribution and river

性,其范围在 0~1 之间。该方法具有成熟、可靠等优点,缺点是由专家打分具有一定的主观性,并且需要反复调整判断矩阵直至满足一致性检验<sup>[18]</sup>。

改进层次分析法调整了矩阵的运算方法,不用进行一致性检验。具体步骤为:(1)对判断矩阵进行对数计算,(2)求最优传递矩阵,(3)对最优传递矩阵进行幂计算得到拟最优矩阵,(4)归一化求权重系数。从而降低了因反复调整判断矩阵而带来的主观性,使得分析结果更加合理准确<sup>[19]</sup>。

在进行调查区地质灾害危险性分区时,依据灾害的发育特点,以地质灾害危险性作为目标层,历史状况、地质环境条件和破坏动力条件构成二级评价因子,进而选取对调查区地质灾害危险性影响明显的因素作为三级评价因子(图 11),包括灾害点密度、坡高指标、坡度指标等 9 种。首先采用专家打分和 Matlab 软件确定各因子的评价权重,然后使用 Arcgis 软件进行空间分析,并将该 9 种因子进行量化和归一化处理,利用栅格将各因子的权重进行叠加计算,计算公式为:

$$B = \sum_{i=1}^n b_i r_i \quad (1)$$

式中: $B$  为滑坡发育程度指数; $b_i$  为第  $i$  个评价指标; $r_i$  为第  $i$  个评价指标的权重; $n$  为评价指标的总数。最后选取合理的分区界线值对得到的栅格图片进行分区,将全区划分为高、中、低危险区。

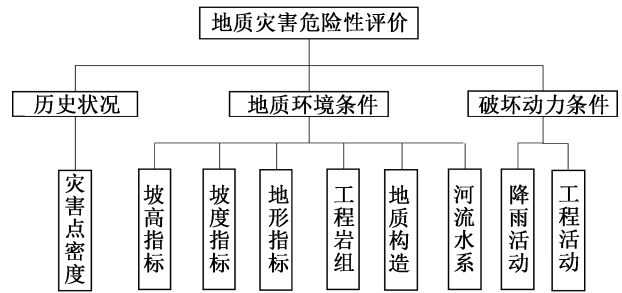


图 11 危险性评价层次结构模型

Fig. 11 Risk assessment hierarchy model

## 4.2 评价因子权重的确立

### (1) 构造判断矩阵

通过野外实地灾害调查,分析因子对灾害的影响规律,以此来判断该因子对于灾害形成的贡献度大小,并与专家打分结合起来,最终确定该调查区的评价因子判断矩阵,用来表示评价因子对滑坡灾害的影响程度。

### (2) 确定各因子权重系数

对判断矩阵(表 9)进行以 10 为底的对数运算得到矩阵  $A$ ,通过 Matlab 数值分析软件求得最优传递矩阵  $B$ ,并对其进行以 10 为底的幂运算得到拟最优矩阵  $C$ (表 10),再对矩阵  $C$  进行列归一化并每行数字相加得到向量  $D$ ,最后对向量  $D$  进行归一化处理,得到相对权重系数向量  $E$ (表 11)<sup>[20-21]</sup>。

## 4.3 影响因子的量化及归一化处理

为消除不同影响因素在定量化过程中不同量纲的影响,方便影响因子统计叠加综合评判,采用极大值归一化进行数据无量纲处理<sup>[22]</sup>。

$$y_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: $y_i$  为数据无量纲处理后的数据; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$  分别为各主控因素量化值的最大值、最小值。

## 4.4 评价结果分析

根据各评价指标,将调查区的指标量以及权重进行叠加计算,获取全区的危险程度指标,以 Arcgis 中的自然断点法为划分依据,找出临界点作为分界点,将调查区划分为高危险区(-0.23 ~ -0.03)、中危险区(-0.03 ~ 0.08)、低危险区(0.18 ~ 0.47)(图 12)。

由上图可以看出,地质灾害高危险区主要集中在调查区中部及东部,分布于泾洋河及其支流孙溪沟、潘家河、白河等地,途径镇巴县泾洋镇,部分位于蔡家河流域。由于山前缓坡坡度较小,地

表 9 滑坡影响因子判断矩阵

Tab. 9 Landslide effect factors of the judgment matrix

因子	坡高	坡度	地形	工程岩组	地质构造	河流水系	降雨	工程活动	灾害密度
坡高	1	1/5	1/4	1/3	1/5	1/8	1/4	1/7	1/9
坡度	5	1	1/5	1/5	1/3	1/2	1/5	1/3	1/4
地形	4	5	1	1/3	1/3	1/5	1	1/6	1/7
工程岩组	3	5	3	1	1/2	1/5	1/4	1/5	1/7
地质构造	5	3	3	2	1	1/3	1/2	1/4	1/5
河流水系	8	2	5	5	3	1	1/3	1/3	1/4
降雨	4	5	1	4	2	3	1	1/4	1/5
工程活动	7	3	6	5	4	3	4	1	1/3
灾害密度	9	4	7	7	5	4	5	3	1

表 10 滑坡影响因子拟最优矩阵

Tab. 10 Landslide effect factors of the transitivity matrices

因子	坡高	坡度	地形	工程岩组	地质构造	河流水系	降雨	工程活动	灾害密度
坡高	1.000 0	0.524 0	0.377 7	0.333 8	0.235 2	0.154 3	0.160 0	0.081 8	0.052 7
坡度	1.908 6	1.000 0	0.720 8	0.637 1	0.448 9	0.294 5	0.305 5	0.156 1	0.100 5
地形	2.647 9	1.387 4	1.000 0	0.883 9	0.622 9	0.408 6	0.423 8	0.216 6	0.139 5
工程岩组	2.995 9	1.569 7	1.131 4	1.000 0	0.704 7	0.462 3	0.479 5	0.245 1	0.157 8
地质构造	4.251 3	2.227 5	1.605 5	1.419 0	1.000 0	0.656 0	0.680 4	0.347 8	0.224 0
河流水系	6.480 5	3.395 5	2.447 4	2.163 2	1.524 4	1.000 0	1.037 2	0.530 1	0.341 4
降雨	6.248 2	3.273 8	2.359 7	2.085 6	1.469 7	0.964 2	1.000 0	0.511 1	0.329 2
工程活动	12.224 5	6.405 1	4.616 6	4.080 5	2.875 5	1.886 3	1.956 5	1.000 0	0.644 0
灾害密度	18.982 7	9.946 1	7.168 9	6.336 3	4.465 2	2.929 2	3.038 1	1.552 8	1.000 0

$$D = [0.1584 \ 0.3024 \ 0.4203 \ 0.4752 \ 0.6741 \ 1.0278 \ 0.9909 \ 1.9395 \ 3.0114]^T$$

$$E = [0.0176 \ 0.0336 \ 0.0467 \ 0.0528 \ 0.0749 \ 0.1142 \ 0.1101 \ 0.2155 \ 0.3346]^T$$

表 11 各评价因子的权重系数

Tab. 11 The weight coefficient of each evaluation factor

因子	坡高	坡度	坡形	工程岩组	地质构造	河流水系	降雨	工程活动	灾害点密度
权重	0.017 6	0.033 6	0.046 7	0.052 8	0.074 9	0.114 2	0.110 1	0.215 5	0.334 6

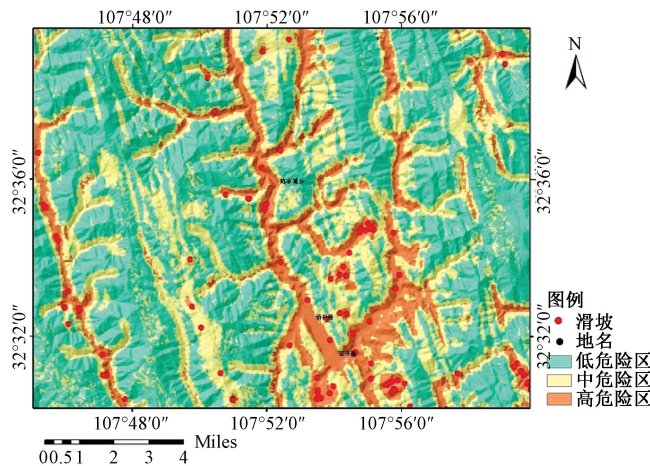


图 12 地质灾害危险性分区图

Fig. 12 Geological hazard zoning map

形平缓,更适宜于人类工程活动,比如耕地和修建房屋等,尤其是调查区的公路多是沿河道开挖,也

使得高危险区往往是在主河道两侧。高危险区总面积约 62.05 km<sup>2</sup>,灾害点密度为 1.176 个/km<sup>2</sup>;

而中危险区域主要为泾阳河流域,月滩河流域等主要河道及其支流,这些地段人类工程活动以耕地和修建房屋开挖道路为主,总面积约 $143.43\text{ km}^2$ ,灾害点密度为 $0.125\text{ 个}/\text{km}^2$ ;低危险区主要为无人区,总面积约 $224.57\text{ km}^2$ ,灾害点密度为 $0.009\text{ 个}/\text{km}^2$ 。

## 5 结论

1) 地质灾害多发育在曲率较大的凹凸面坡、坡度为 $0^\circ\sim 10^\circ$ 、起伏度为 $0\sim 30\text{ m}$ 的斜坡中,且集中分布在河谷两侧的高程 $500\sim 800\text{ m}$ 的低山区。在 $0\sim 600\text{ m}$ 范围内随着地质灾害与河流距离的增加,灾害数量和密度明显减少。

2) 利用改进层次分析法评价了镇巴县幅地质灾害的危险性,可分为高、中、低三类,面积分别为 $62.05$ 、 $143.43$ 、 $224.57\text{ km}^2$ 。高危险区主要分布在泾洋河流域,途经镇巴县城和泾阳镇,占调查区面积的 $14.4\%$ 。研究成果可为镇巴县防灾减灾工作提供参考。

## 参考文献:

- [1] 向阳. 镇巴县地质灾害特征及重点地段地质灾害评价[J]. 陕西地质, 2019, 37(1): 95-101.
- [2] 李培, 范文, 于国强, 等. 秦岭矿产资源开采区斜坡灾害发育规律与识别研究——以山阳-商南钒矿开采区为例[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1162-1169.
- [3] 范文, 熊炜, 杨志华, 等. 秦巴山区浅表层滑坡变形破坏机理年度总结报告[R]. 西安: 长安大学, 2012.
- [4] 熊炜, 范文. 秦巴山区浅表层滑坡成灾规律研究[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 228-233.
- [5] 金葆志, 苗家房. 陕南2000年“7.13”山地灾害成因分析及防御对策[J]. 灾害学, 2000, 16(2): 37-44.
- [6] 范立民, 何进军, 李存购. 秦巴山区滑坡发育规律研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 44-49.
- [7] 梁京涛, 王军, 汪友明, 等. 汶川8.0级地震触发地质灾害发育分布规律研究[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 63-68.
- [8] 张杰, 康晓波, 鲁慧, 等. 哀牢山中段地质灾害空间分布规律研究——以元江县为例[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 720-732.
- [9] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 27(12): 2585-2592.
- [10] 戴岚欣, 许强, 范宣梅, 等. 2017年8月8日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1151-1164.
- [11] 王盈, 金家梁, 袁仁茂. 藏东南地区地质灾害空间分布及影响因素分析[J]. 地震研究, 2019(3): 0428-0438.
- [12] 郜洪强, 樊延恩. 层次分析法在垃圾填埋场适宜性评价中的应用[J]. 中国地质, 2009(6): 1433-1442.
- [13] 程远, 刘志斌, 刘松玉, 等. 基于层次分析法的大跨浅埋公路隧道施工风险识别[J]. 岩土工程学报, 2011(S1): 191-196.
- [14] FAN Wen, WEI Xinsheng, CAO Yanbo, et al. Landslide Susceptibility Assessment Using the Certainty Factor and Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(5): 906-925.
- [15] 张晓东, 刘湘南, 赵志鹏, 等. 基于层次分析法的盐池县地质灾害危险性评价[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 183-192.
- [16] 李亚兰, 门玉明. 基于改进层次分析法的地下建筑火灾安全评价研究[J]. 灾害学, 2018, 27(12): 43-47.
- [17] 姚玉增, 任群智, 李仁峰, 等. 层次分析法在山地地质灾害危险性评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2010(2): 130-135.
- [18] 郑师宜, 张绪教, 杨艳, 等. 层次分析法在滇西怒江河谷潞江盆地地段崩塌与滑坡地质灾害危险性评价中的应用[J]. 地质通报, 2012(02-03): 56-66.
- [19] 杨秀贵, 仇森, 冯一鸣. 改进层次分析法的滑坡灾害危险性[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2013(6): 773-778.
- [20] 郭隆鑫, 李希建, 刘柱. 基于GIS与改进层次分析法的奉节县滑坡易发性区划[J]. 煤炭工程, 2020, 52(3): 172-176.
- [21] 王甜甜, 靳德武, 杨建, 等. 改进层次分析法在矿井水文地质类型划分中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(1): 121-126.
- [22] 许嘉慧, 孙德亮, 王月, 等. 基于GIS与改进层次分析法的奉节县滑坡易发性区划[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2020, 37(2): 36-44.

(责任编辑 周雪梅)