



陕西省志丹县黄土滑坡空间分布规律与形态特征研究

李德坤¹, 何芝远², 孔嘉旭², 赵李³, 武孟⁴, 牟家琦², 郑佳²

1. 西安煤航遥感信息有限公司, 陕西 西安 710199; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
3. 咸阳百灵学校, 陕西 咸阳 712000; 4. 西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069

摘要: 滑坡空间分布与形态特征能够反映滑坡发育程度, 为区域内滑坡灾害防治提供依据. 本研究以志丹县黄土滑坡为研究对象, 基于 GIS 空间分析选取最邻近指数与核密度估计分析志丹县滑坡空间分布规律, 通过统计分析的方法研究滑坡形态特征. 结果表明, 志丹县滑坡最邻近指数约为 0.177, 在空间上呈聚集型分布; 核密度估计最大值出现在周河两岸的斜坡地带且呈带状分布, 具有多个高密度聚集区域; 滑坡面密度与点密度的计算结果分别为 0.26% 和 0.19 个/km²; 滑坡坡度多集中于 70° 以上, 坡向多集中于南和南东方向, 坡高则集中于 40 m 以下的斜坡. 通过聚类分析将研究区滑坡划分为不同类别的角度特征、高度特征、地质环境特征.

关键词: 黄土; 滑坡; 空间分析; GIS; 地质灾害; 陕西省

SPATIAL DISTRIBUTION AND MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LOESS LANDSLIDE IN ZHIDAN COUNTY, SHAANXI PROVINCE

LI De-shen¹, HE Zhi-yuan², KONG Jia-xu², ZHAO Li³, WU Meng⁴, MU Jia-qi², ZHENG Jia²

1. Coal-aerophotogrammetry Remote Sensing Information Co., Ltd., Xi'an 710199, China; 2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Xianyang Bailing School, Xianyang 712000, Shaanxi Province, China;
4. Department of Geology, Northwest University/State Key Laboratory of Continental Dynamics, Xi'an 710069, China

Abstract: The spatial distribution and morphological characteristics of landslides can reflect their development degree and provide a basis for landslide prevention in the region. Taking the loess landslide in Zhidan County as the study object, the nearest neighbor index (NNI) and kernel density estimation (KDE) are selected based on GIS to analyze the spatial distribution regularity of landslide. The morphological characteristics of landslide are studied through statistical analysis. The results show that the INNI value of the study area is about 0.177, with aggregated distribution of landslide in space. The maximum KDE value distributes in the slopes on both sides of Zhouhe River in belts with multiple high-density areas. The calculated landslide area density and point density are 0.26% and 0.19 per square kilometer respectively. The slope gradients of landslide are generally above 70°, the aspects mainly concentrated in south and southeast, and the slope heights mostly below 40 m. The landslide in the study area can be classified into three different morphological types by angle, height and geological environment characteristics through cluster analysis.

Key words: loess; landslide; spatial analysis; GIS; geological disaster; Shaanxi Province

收稿日期: 2021-04-21; 修回日期: 2021-06-11. 编辑: 张哲.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金——长安大学优秀博士学位论文培育资助项目(300102262713).

作者简介: 李德坤(1996—), 男, 硕士, 主要从事工程地质与黄土地质灾害等研究, 通信地址 陕西省西安市碑林区太白北路 229 号, E-mail//550366651@qq.com

通信作者: 孔嘉旭(1994—), 男, 博士, 主要从事工程地质与黄土地质灾害等研究, 通信地址 陕西省西安市碑林区太白北路 229 号, E-mail//1052938693@qq.com

0 引言

滑坡是斜坡土体在河流冲刷、地下水活动、人工切坡以及重力作用下沿滑动面向下滑移的地质灾害现象^[1-2]。滑坡灾害广泛分布于中国西北和西南的山地地区,20世纪80年代以来,据统计中国至少发生过41万处滑坡,滑坡面积约为 $173 \times 10^4 \text{ km}^2$,占国土总面积的18.10%,造成的人员伤亡和经济损失难以估量^[3-5]。黄土主要分布于黄土高原,具有大孔隙性、水敏性等性质,黄土的特殊物理力学性质导致了滑坡不仅频繁发生、分布范围较为广泛,而且形成机制颇为复杂^[6-7]。通过探究滑坡空间分布模式,分析滑坡形态特征参数有助于预防滑坡灾害,为滑坡地质灾害提供治理依据,最终减少人员伤亡和财产损失^[8-9]。

随着“3S”与计算机等技术高速发展,通过空间分析能够有效地认识滑坡灾害的分布模式与发育程度,众多研究人员利用全球现有公开的滑坡资料数据库开展了大量滑坡时空分布特征研究^[10-12]。Guzzetti等^[13]采用航空影像解译和现场调查的方法对意大利台伯河盆地上游滑坡分布进行了综合分析,发现滑坡发生的形态、规模与所处地质环境有关。许冲等^[14]基于GIS和遥感技术构建了2008年汶川地震滑坡数据库,分析了超过197 000个同震滑坡的分布状况,研究发现滑坡大多沿映秀-北川断裂分布,多发生于断裂的上盘。Guo等^[15]通过现场调查、遥感影像和GIS分析了2015年尼泊尔戈尔喀7.8级地震所引发的1481次滑坡,探究了滑坡坡度、岩性对滑坡发生的作用规律,进一步研究了滑坡面积与规模的幂律关系。Neska等^[16]通过野外调查与GIS技术分析了地形因素对滑坡空间分布的影响作用,确定了不用地形因素对滑坡形成的作用程度。目前关于滑坡灾害空间分布的研究大多集中于地震诱发滑坡,然而对于黄土滑坡分布规律研究较少,同时大多研究仅基于统计分析获得滑坡分布特征,未能进一步利用数据挖掘的方法探究滑坡形态特征之间的联系。

陕西省志丹县地处黄土丘陵沟壑区,覆盖着厚度数十米至数百米不等的黄土,其特殊的水敏性加上该地区夏季强降雨的原因导致滑坡频繁发生。因此,本研究以志丹县黄土滑坡为对象,通过现场调查与无人机摄影测量获取滑坡坐标、形态特征等参数,基于最邻近指数与核密度估计方法分析滑坡空间分布,然后利

用特征分析总结滑坡形态特征,最后通过层次聚类分析探究滑坡形态并对其进行分类。

1 研究区概况

研究区位于陕西省北部的志丹县境内,以保安街道城镇区域为主体,覆盖面积约为 209.59 km^2 。该地区地处黄土高原腹地,地势由西北向东南缓倾。地貌特点表现为梁峁起伏、沟壑纵横、河谷深切、基岩裸露,起伏较大的地表有利于地质灾害的形成和发育。研究区地层由老至新依次为白垩纪下统(K_1)、新近系上新统(N_2)和第四系(Q),风成黏土和黄土构成第四系、新近系岩性,第四系地层在全区范围内覆盖范围较广。黄土结构特性表现为垂直节理发育,节理切割而成的黄土多为柱状、棱状体。节理密集的斜坡加之降雨入渗影响,会影响斜坡土体稳定性,造成黄土崩滑灾害的发生^[17]。志丹县全境位于半湿润-半干旱区,属于暖温带大陆季风气候,全县多年平均降雨量 524.5 mm ,年内降雨多集中在6—9月份,其间降水量最大达 383.6 mm ,占据全年总降水量的74%。单月降水强度最大为7月份,平均降水量 120.6 mm ,占全年总量的23%。平均每年暴雨次数为0.7次,最大次数为1961年达到3次,且集中在6—9月。志丹县境内主要发育有洛河、周河、杏子河3条河流,均属黄河流域,3条河流的支流纵横交错构成树枝状水文网,水网密度约 3.3 km/km^2 ^[18-19]。其中周河流经保安街道城镇区域(图1)。

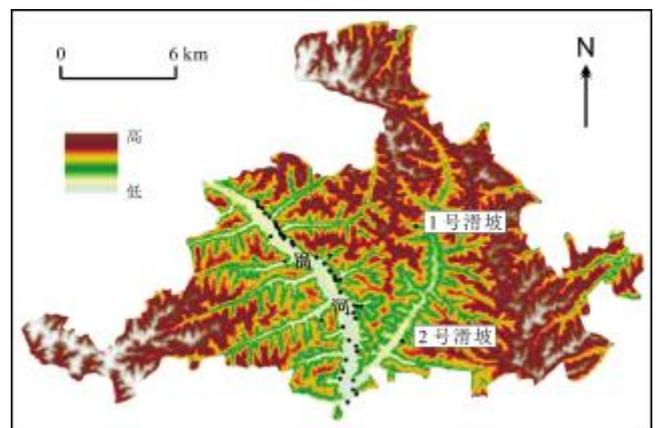


图1 志丹县保安街道城镇滑坡分布

Fig. 1 Distribution of landslides in Bao'an sub-district, Zhidan County

2 数据来源及研究方法

通过现场地质调查与无人机摄影测量技术获取了志丹县研究区内 47 个滑坡的坐标及基本形态特征等参数,包括滑坡的岩土体性质、坡型、坡度、坡向、坡高数据。

空间分析能够揭示滑坡地质灾害的发展过程与分布模式。本研究首先利用 GIS 空间分析中的最邻近指数与核密度估计的方法将滑坡灾害点转化为点数据进行空间分布规律分析,然后利用统计分析和聚类分析方法分析研究区内滑坡的形态特征规律。

2.1 最邻近指数

最邻近指数(nearest neighbor index, NNI)是一种分析地物点空间分布相互邻近程度的指标,基本原理是计算平均观测距离与假设随机分布中的邻域间的平均距离的比率^[20-21]。其计算公式为:

$$I_{NNI} = \frac{r}{0.5\sqrt{A/N}} \quad (1)$$

式中: r 为研究区域内滑坡点的平均距离, N 为所有滑坡点的数量, A 为研究区面积。如果 I_{NNI} 小于 1,其空间分布模式为聚类;如果 I_{NNI} 大于 1,其空间分布模式趋向于离散或竞争。

2.2 核密度分析

核密度估计(kernel density estimation, KDE)的原理是借助移动单元格对点进行密度估计。目前已成为探索空间点分布模式的有效手段,并且其结果具有良好的可视性,被广泛用于各类事件的空间分布探测中^[22-23]。其公式表示为:

$$d = \frac{1}{r^2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{3}{\pi} \left(1 - \frac{(S-S_i)^2}{r^2} \right) \right]^2 \quad (2)$$

式中: n 为滑坡点数, r 为半径, S 为待估计对象的位置, S_i 为落在以 S 为圆心、 r 为半径的圆形范围内的第 i 个估计对象的位置。而半径 r 的计算公式为:

$$r = 0.9 \times \min \left(D_{SD} \times \sqrt{\frac{1}{\ln 2} \times D_n} \right) \times n^{-0.2} \quad (3)$$

式中: D_{SD} 为标准距离, D_n 为加权平均中心的中值距离。

2.3 特征分析

特征分析属于数据分析的内容,即从一组数据中提取该组数据的特征式,这些特征式对评价数据整体性质至关重要。主要评价数据的指标包括描述数据集中程度的中心趋势统计量、描述数据离散程度的散布程度统计量、描述数据分布的分布形状统计量^[24]。中心

趋势统计量主要包括平均数(mean)、中位数(median)、众数(mode);散布程度统计量主要包括标准差(STD)或方差、四分位差、最大最小值;分布形状统计量主要包括偏度系数(skewness coefficient)、峰度系数(kurtosis coefficient)。偏度用于衡量数据分布的对称性,能够判定数据分布的对称程度以及方向。

2.4 聚类分析

聚类分析属于数据挖掘的内容,即把一组数据按照相似性和差异性分为几个子集,同类别数据间的相似程度尽可能高,不用类别数据间相似程度尽可能低。聚类分析能够有效地从多个维度构建完整的滑坡形态数据之间存在的某种关系,如将高程、岩性、坡度、断裂等滑坡特征进行分类,探究其在相似程度上的分类规律^[25-27]。针对本研究统计的滑坡样本数据,采用基于层次的聚类分析方法进行数据挖掘,算法则采用 Ward 算法。Ward 算法以欧氏距离平方作为两类之间的距离,首先将集合中每个样本合成一类,在进行类别合并运算时,计算类重心间方差,将离差平方和增加幅度最小的两类先合并,再依次逐渐合并所有类别^[24-25]。详细算法如下:将 n 个区域样本分成 K 类,即可分为 G_1, G_2, \dots, G_k ,用 $X_i^{(l)}$ 来表示 G_l 中的第 i 个样本(这里 $X_i^{(l)}$ 是 p 维向量,即有 p 个坐标系聚类指标), n_l 表示 G_l 中的样本个数, \bar{X} 是 G_l 的重心(即该类样本的均值),则 G_l 中样本的离差平方和表示为:

$$S_l = \sum_{i=1}^{n_l} (X_i^{(l)} - \bar{X}^{(l)})^2 (X_i^{(l)} - \bar{X}^{(l)}) \quad (4)$$

则 K 类的类内离差平方和为:

$$S = \sum_{l=1}^k S_l = \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^{n_l} (X_i^{(l)} - \bar{X}^{(l)})^2 (X_i^{(l)} - \bar{X}^{(l)}) \quad (5)$$

3 结果与分析

3.1 滑坡空间分布特征

通过 GIS 中的邻域分析工具计算最邻近指数,将志丹县 47 个城镇地区滑坡空间坐标数据导入,分别获得 47 个邻近距离,最终计算得到了最邻近指数(I_{NNI})为 0.177,计算结果小于 1。结果表明志丹县城镇滑坡空间分布模式呈现空间聚集趋势(图 2)。

核密度估计结果最大值出现在沟谷地带的两侧斜坡,其值达到 4.13 个/km²,表明该区域滑坡分布密集程度较大。沿周河两岸斜坡地带出现了多个聚集区域,

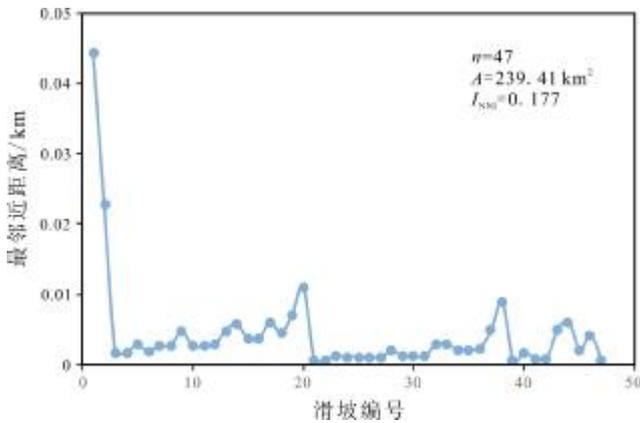


图 2 研究区最近邻指数计算结果

Fig. 2 Calculation result of nearest neighbor index in the study area

整体呈带状分布. 该区域滑坡分布可能与河流侵蚀作用有关, 不断变化的水位改变了斜坡土体的浮托力, 降低其稳定性从而频繁诱发滑坡. 结合图 1 和图 3 可以发现, 仅有滑坡编号为 1 和 2 的在志丹县城镇滑坡空间分布上较为分散, 滑坡受河流冲刷影响较小, 经现场调查发现以上两处滑坡与人类工程活动有关. 进一步根据志丹县城镇滑坡面积、数量与研究区面积计算了滑坡的面密度(LAP, 滑坡面积与总面积比值×100%)与滑坡点密度(LND, 滑坡数量与总面积比值), LAP 与 LND 的计算结果分别为 0.26% 和 0.19 个/km².

3.2 滑坡形态特征

经过现场调查统计了志丹县 47 个城镇滑坡的地层与坡形特征. 志丹县城镇滑坡按物质组成可以分为黄土滑坡与黄土-基岩滑坡, 所占比例分别为 46% 和 54%, 可见差异并不大. 研究区内滑坡坡型可以分为直线形、阶梯形、凸形、凹形, 所占比例分别为 49%、17%、23%、11%, 表明直线形滑坡数量最多, 这是由于直线

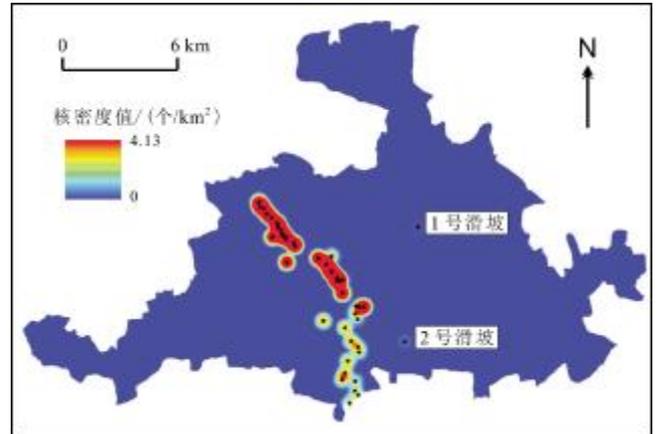


图 3 研究区核密度估计结果

Fig. 3 Kernel density estimation results in the study area

形斜坡地形较为平直, 更容易发生入渗, 斜坡内部土壤含水率增加, 抗剪强度逐渐降低, 最终诱发滑坡地质灾害^[28]. 相反阶梯形、凸形、凹形 3 种坡型的滑坡地形较为复杂, 不利于外界水分的入渗.

研究区 47 个滑坡的坡度、坡向、坡高统计见图 4, 滑坡形态特征分析结果见表 1. 研究区滑坡坡度主要集中于 70° 以上, 占有所有滑坡的 40.4%; 坡度整体离散程度较小, 数据中心大致位于中间, 坡向分布较为分散. 滑坡坡向以南和南东向最多, 占有所有滑坡的 50%; 坡向整体离散程度极大, 数据整体呈对称分布, 坡向整体分布呈分散形态. 滑坡坡高主要集中于 40 m 以下的边坡, 占有所有滑坡的 65.9%; 坡高整体离散程度较大, 数据整体呈非对称结构, 数据中心偏下.

3.3 滑坡形态聚类分析

利用 Ward 系统聚类分析方法对志丹县城镇滑坡进行聚类分析. 滑坡形态特征包括 5 个要素, 分别为坡度(X_1)、坡向(X_2)、坡高(X_3)、岩土体性质(X_4)、坡型

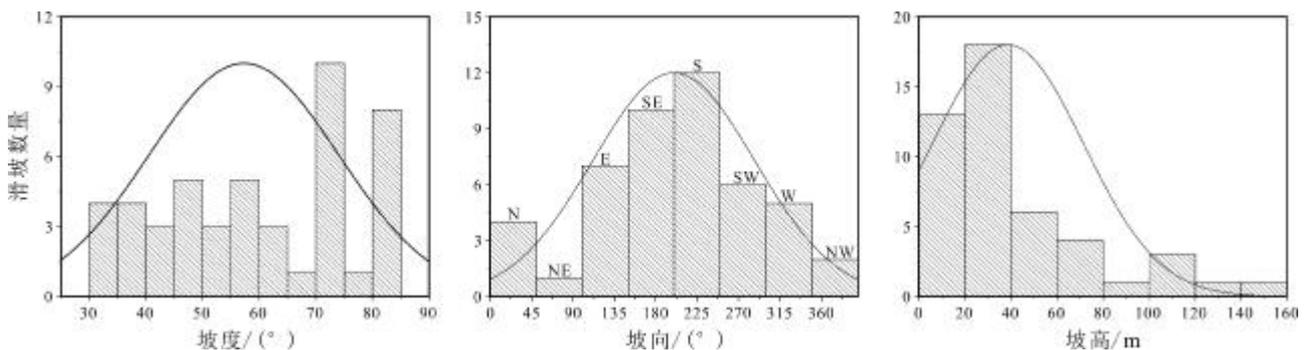


图 4 滑坡坡度、坡向、坡高直方图

Fig. 4 Histograms for slope gradient, aspect and height of landslide

表1 滑坡坡度、坡向、坡高特征分析结果

Table 1 Analysis results of slope gradient, aspect and height of landslide

滑坡形态	散布程度统计量					分布形状统计量				中心趋势统计量	
	平均数	中位数	众数	标准差	最大值	最小值	四分位数			偏度系数	峰度系数
							25%	50%	75%		
坡度	57.29	58	70	16.76	80	30	45	58	70	-0.15	-1.29
坡向	199.57	214	63	88.17	350	15	138	214	260	-0.29	-0.42
坡高	38.57	25	15	32.87	142	10	15	25	50	1.68	2.25

(X_5), 基于相似性原则的树状图(图5)结果表明, 滑坡形态特征划分为3类结果最优. 根据聚类分析分类结果(表2), 可以总结出以下滑坡形态特征蕴含的规律:

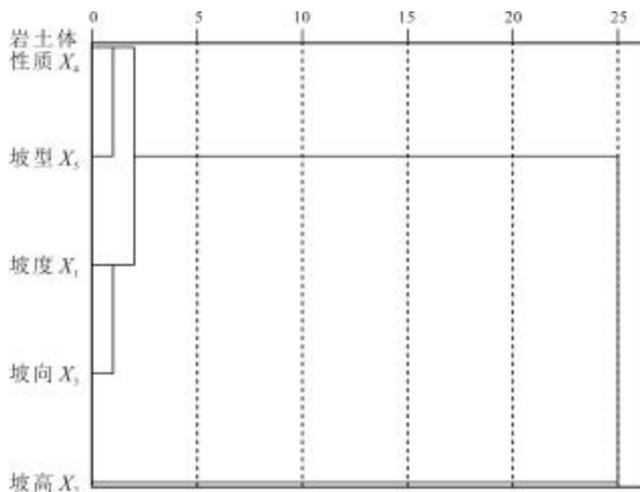


图5 聚类分析结果树状图

Fig. 5 Dendrogram of cluster analysis results

表2 聚类分析分类结果

Table 2 Classification results of cluster analysis

滑坡形态特征指标	类别	分类结果
坡度 X_1 、坡向 X_2	第一类	角度特征
坡高 X_3	第二类	高度特征
岩土体性质 X_4 、坡型 X_5	第三类	地质环境特征

第一类特征在坡度和坡向方面较明显, 突出了志丹县城镇滑坡的角度特征. 研究区内滑坡角度多发育于 70° 以上, 占有所有滑坡的 40.4%. 坡度影响着滑坡的有效临空面以及应力状态, 坡度越大, 坡脚应力越集中, 发生滑坡可能性越大^[29]. 研究区内滑坡坡向以南和南东向的阳坡为主, 占有所有滑坡的 50%. 阳坡斜坡土体受到更强烈的风化作用, 降雨和日照辐射作用强

于阴坡, 斜坡内部软弱结构变化较大, 土体结构与强度逐渐降低^[30].

第二类特征在坡高方面较为明显, 突出了志丹县城镇滑坡的高度特征. 通常情况下坡高越高, 滑坡体的势能越大, 斜坡稳定性越低, 易于发生滑坡, 而研究区内滑坡坡高主要集中于 40 m, 占有所有滑坡的 65.9%, 多由低矮边坡发育形成滑坡.

第三类特征在岩土体性质和坡型方面较明显, 突出了志丹县城镇滑坡的地质环境特征. 黄土具有大孔隙结构、垂直节理发育等结构特征, 以及水敏性和湿陷性等特殊物理性质, 在降雨入渗和河流侵蚀作用下, 土体结构不断软化, 逐渐形成滑动剪切面, 最终诱发滑坡地质灾害. 黄土-基岩滑坡往往发育形成时间要长, 水分入渗形成软化带导致斜坡失稳需要的时间更久. 不同坡型对滑坡形成发育影响程度具有明显差异性^[31]. 结合研究区滑坡的坡型特征分析结果发现, 区内直线形滑坡发育数量最多, 平缓的地形条件有利于外界水分入渗, 降低土体自身强度.

4 结论

1) 最邻近指数(I_{NNI})为 0.177, 表明志丹县城镇滑坡空间分布整体呈集聚型; 核密度估计结果表明滑坡核密度最大值位于周河两岸的斜坡地带, 多个高密度中心呈带状分布, 滑坡频发与河流侵蚀作用有关; 滑坡的面密度(LAP)与滑坡点密度(LND)的计算结果分别为 0.26% 和 0.19 个/ km^2 .

2) 通过滑坡形态特征统计分析, 发现滑坡坡度主要分布于 70° 以上, 坡向主要分布于南和南东向, 坡高主要分布于 40 m 以下的斜坡; 黄土滑坡与黄土-基岩滑坡分别为 46% 和 54%, 对滑坡发生影响差异不大; 滑坡坡型可以分为直线形、阶梯形、凸形、凹形, 其中直

线形滑坡数量最多。

3)通过滑坡形态特征聚类分析得到了3种最优分类结果,第一类是在坡度和坡向方面较明显的角度特征,第二类是在坡高方面较明显的高度特征,第三类是在岩土体性质和坡型较明显的地质环境特征。

参考文献(References):

- [1]许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596-608.
- Xu Q. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan Province: Characteristics, genetic mechanism and suggestions [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(5): 596-608.
- [2]黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.
- Huang R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433-454.
- [3]Nadim F, Kjekstad O, Peduzzi P, et al. Global landslide and avalanche hotspots[J]. *Landslides*, 2006, 3(2): 159-173.
- [4]徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312.
- Xu Z J, Lin Z G, Zhang M S. Loess in China and loess landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1297-1312.
- [5]张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540.
- Zhang M S, Li T L. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(4): 530-540.
- [6]张江伟, 李小军, 迟明杰, 等. 滑坡灾害的成因机制及其特征分析[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(6): 42-49.
- Zhang J W, Li X J, Chi M J, et al. Analysis of formation mechanism and characteristics of landslide disasters[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(6): 42-49.
- [7]Wang J D, Gu T F, Zhang M S, et al. Experimental study of loess disintegration characteristics[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(6): 1317-1329.
- [8]彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684-691.
- Peng J B, Lin H Z, Wang Q Y, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(4): 684-691.
- [9]许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 黄土滑坡典型工程地质问题分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 287-293.
- Xu L, Dai F C, Kwong A K L, et al. Analysis of some special engineering-geological problems of loess landslide[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(2): 287-293.
- [10]Hu S, Qiu H J, Wang X G, et al. Acquiring high-resolution topography and performing spatial analysis of loess landslides by using low-cost UAVs[J]. *Landslides*, 2018, 15(3): 593-612.
- [11]孟华君. 基于几何形态的地震滑坡数字化分类研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- Meng H J. Digital classification of earthquake induced landslide based on geometry shape[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [12]王俊豪, 魏云杰, 梅傲霜, 等. 基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡信息多维提取与应用分析[J]. 中国地质, 2021, 48(2): 388-401.
- Wang J H, Wei Y J, Mei A S, et al. Multidimensional extraction of UAV tilt photography-based information of loess landslide and its application[J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 388-401.
- [13]Guzzetti F, Ardizzone F, Cardinali M, et al. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 279(3/4): 222-229.
- [14]许冲, 徐锡伟, 吴熙彦, 等. 2008年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 25-44.
- Xu C, Xu X W, Wu X Y, et al. Detailed catalog of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake and statistical analyses of their spatial distribution[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(1): 25-44.
- [15]Guo C W, Huang Y D, Yao L K, et al. Size and spatial distribution of landslides induced by the 2015 Gorkha earthquake in the Bhoté Koshi River watershed[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(10): 1938-1950.
- [16]Nseka D, Kakembo V, Bamutaze Y, et al. Analysis of topographic parameters underpinning landslide occurrence in Kigezi highlands of southwestern Uganda[J]. *Natural Hazards*, 2019, 99(2): 973-989.
- [17]杨文璐, 邱海军, 裴艳茜, 等. 典型黄土丘陵区浅层黄土滑坡稳定性评价——以延安市志丹县为例[J]. 第四纪研究, 2019, 39(2): 408-419.
- Yang W L, Qiu H J, Pei Y Q, et al. Evaluation of shallow loess landslide stability in typical loess hilly region: A case study of Zhidan County in Yan'an area of Shaanxi Province[J]. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(2): 408-419.
- [18]刘朋飞. 黄土高原地区环境变迁与地质灾害关系研究——以延安地区滑坡为例[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- Liu P F. Study on the environmental change and geological disasters of the loess plateau region: Take the landslide of Yan'an as an example[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [19]李明, 杜继稳, 高维英. 陕北黄土高原区地质灾害与降水关系[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4): 599-606.
- Li M, Du J W, Gao W Y. Study on the relationship between geological disasters and precipitation in the loess plateau in north Shaanxi Province[J]. *Arid Zone Research*, 2009, 26(4): 599-606.
- [20]王新胜, 滕德贵, 谢伟, 等. 山地城市滑坡灾害空间分布特征及影

- 响因素分析[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(8): 87-96.
- Wang X S, Teng D G, Xie W, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of landslide disasters in mountain cities[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(8): 87-96.
- [21]董丞妍, 罗明良, 张斌. 四川芦山余震序列空间格局分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4): 45-50.
- Dong C Y, Luo M L, Zhang B. Analysis of spatial pattern of Lushan aftershocks sequence[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4): 45-50.
- [22]Qiu H J, Cui Y F, Hu S, et al. Temporal and spatial distributions of landslides in the Qinba Mountains, Shaanxi Province, China[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 599-621.
- [23]张诗茹, 蒋建军, 缪亚敏, 等. 基于SBAS技术的岷江流域潜在滑坡识别[J]. 山地学报, 2018, 36(1): 91-97.
- Zhang S R, Jiang J J, Miao Y M, et al. Application of the SBAS technique in potential landslide identification in the Minjiang watershed[J]. Mountain Research, 2018, 36(1): 91-97.
- [24]许领, 戴福初. 泾阳南塬黄土滑坡特征参数统计分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(5): 28-32.
- Xu L, Dai F C. Statistical analysis of the characteristic parameters of loess landslides at the South Jingyang Plateau[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(5): 28-32.
- [25]桂蕾, 殷坤龙, 王佳佳. 基于聚类分析的滑坡灾害危险性区划研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 100-105.
- Gui L, Yin K L, Wang J J. Landslide hazard zonation based on cluster analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 100-105.
- [26]何玉花, 张东水, 李燕婷, 等. 基于聚类的黄河上游干流地区滑坡特征研究[J]. 地理空间信息, 2017, 15(11): 60-64.
- He Y H, Zhang D S, Li Y T, et al. Research on landslide characteristics in the main stream area of the Yellow River upper reaches based on clustering[J]. Geospatial Information, 2017, 15(11): 60-64.
- [27]Melchiorre C, Matteucci M, Azzoni A, et al. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation[J]. Geomorphology, 2008, 94(3/4): 379-400.
- [28]樊晓一, 胡晓波, 张睿骁, 等. 开阔型地形条件对滑坡运动距离的影响研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(5): 188-196.
- Fan X Y, Hu X B, Zhang R X, et al. Study on the open topography influence on the moving distances of landslides[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(5): 188-196.
- [29]王欢, 潘代洪, 靳艳彩. 重庆黔江区斜坡坡度对滑坡发育的贡献率[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(5): 81-84.
- Wang H, Pan D H, Jin Y C. Contributing rate of slope gradient to landslide growth in Qianjiang District of Chongqing[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(5): 81-84.
- [30]Wu C Y, Qiao J P, Wang M. Landslides and slope aspect in the three gorges reservoir area based on GIS and information value model[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, 11(4): 773-779.
- [31]Zeng R Q, Meng X M, Zhang F Y, et al. Characterizing hydrological processes on loess slopes using electrical resistivity tomography: A case study of the Heifangtai Terrace, Northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 742-753.

(上接第 205 页/Continued from Page 205)

- [18]陈卫忠, 杨建平, 邹喜德, 等. 裂隙岩体宏观力学参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1569-1575.
- Chen W Z, Yang J P, Zou X D, et al. Research on macro mechanical parameters of fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1569-1575.
- [19]刘飞, 秦胜伍, 乔双双, 等. 基于神经网络模型的斜坡地质灾害易发性评价: 以吉林永吉为例[J]. 世界地质, 2019, 38(4): 1166-1176.
- Liu F, Qin S W, Qiao S S, et al. Slope geological hazards susceptibility evaluation based on neural network model: A case study from Yongji County of Jilin Province[J]. Global Geology, 2019, 38(4): 1166-1176.
- [20]李庆海, 李飞, 蒋楚生. 巴中车站高边坡破坏机理分析及整治措施[J]. 路基工程, 2015, 33(1): 195-199.
- Li Q H, Li F, Jiang C S. Analysis on failure mechanism of high slope at Bazhong railway station and the countermeasures[J]. Subgrade Engineering, 2015, 33(1): 195-199.