

# 基于因子相关性—聚类分析的巴谢河流域滑坡危险性评价

杨志昆, 梁收运, 陈卓, 赵红亮

(兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000)

**摘要:**巴谢河流域是甘肃省东部滑坡高易发区域, 滑坡活动频繁。基于遥感解译与野外调查, 分析了地形地貌因子、地层岩性、植被覆盖、人类工程活动等因子对流域内滑坡的相关性。结果表明: 滑坡分布与地形地貌关系密切, 高程 2 000~2 200 m、坡度 15°~40°、阳坡坡向及沟谷密度 1~2.5 km/km<sup>2</sup> 的范围内, 滑坡尤为发育; 滑坡与地层岩性、植被、人类活动等也有较好的对应关系, 其中岩性为马兰黄土及泥岩、NDVI 在 0.2~0.3 与距离道路 600 m 的范围内滑坡易于发生。依据各因子与滑坡的相关性对其进行聚类分析, 将整个研究区域分 4 个危险区: 高、中、低和极低危险区, 所占研究区面积比例分别为 30.9%、21.7%、30.3%、17.1%。

**关键词:**因子相关性; 聚类分析; 巴谢河流域; 滑坡; 危险性评价

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0305-05

## Assessment of Hazard of Landslide in the Baxie River Basin Based on Factor Correlativity-Cluster Analysis

YANG Zhikun, LIANG Shouyun, CHEN Zhuo, ZHAO Hongliang

(Department of Geological Engineering, College of Civil Engineering and  
Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Baxie River Basin is the area where the landslides frequently occur in the eastern part of Gansu Province. Based on the field investigation and remote sensing interpretation, the influential factors on landslides were analyzed. The results indicate that the distribution of landslides is closely related to the landform and physiognomy, presenting a high concentration in the ranges of elevation of 2 000~2 200 m, slope gradients of 15°~40°, relief amplitude of 100~200 m, sunny slope, cutting depth of 50~100 m and gully density of 1~2.5 km/km<sup>2</sup>. In addition, the distribution of landslides is well correlated with the lithology, vegetation cover and human activities, especially with the lithology of Malan loess and mudstone, Normalized Difference Vegetation Index of 0.2~0.3 and scopes of 0~600 m distance from the roads. According to the correlation between each factor and landslide, the cluster analysis is carried out to divide the study area into four dangerous areas: high danger zone (accounting for 30.9% of whole area), moderate danger zone (accounting for 21.7% of whole area), low danger zone (accounting for 30.3% of whole area), and extremely low danger zone (accounting for 17.1% of whole area), respectively.

**Keywords:** factor correlativity; cluster analysis; hazard assessment; Baxie River Basin; landslide

甘肃省滑坡分布广泛、种类繁多、危害严重, 境内滑坡集中分布于陇中黄土高原和陇南基岩山区两大地貌单元<sup>[1]</sup>。陇南山区以基岩滑坡和堆积层滑坡为主, 前人以其中滑坡强烈发育的白龙江流域甘肃段为

研究对象, 探讨了该段地形地貌与地层岩性<sup>[2-3]</sup>、活动构造及水文<sup>[4]</sup>等工程地质条件对滑坡灾害的控制作用。陇中黄土高原可分为陇西和陇东两部分, 以黄土滑坡和黄土—泥岩滑坡居多, 陇西地区滑坡发育程度

大于陇东,巴谢河流域作为陇西地区临夏盆地滑坡密集发育的典型区<sup>[5]</sup>,引起了一些学者的注意。庄乐和<sup>[6]</sup>通过分析洒勒山滑坡的成因机制,认为巴谢河流域滑坡的形成是被水浸湿的泥岩产生膨胀力所致。曹炳兰等<sup>[7]</sup>将巴谢河流域滑坡分为4类:单层结构滑坡、双层结构滑坡、联合结构滑坡与整体结构滑坡,同时阐述了4类滑坡的发育特征,并指出地形地貌、坡体结构、地下水等条件是谷坡进行稳定性分区的基础。

巴谢河流域位于甘肃临夏盆地东侧,处于SN向正断层的上盘位置,地层近水平<sup>[8]</sup>。流域属于典型的黄土梁峁地形,深大沟谷纵横,山体破坏严重,因此区内滑坡广泛分布,历史上发生过多重大滑坡灾害,如巴峰山滑坡、红庄滑坡、洒勒山滑坡。截至目前为止,该区域滑坡仍在不断发生,2016年6月10日,受连续降雨的影响,果园乡陈何村就发生了约50万m<sup>3</sup>滑坡,毁坏公路,掩埋车辆。

本文基于2002—2015年四期GoogleEarth遥感影像资料对流域内所发生滑坡进行解译,结合野外调查,以30m分辨率DEM及Landsat8遥感数据为基础,借助GIS平台,从地形地貌、地层岩性、植被及人类活动等4个方面分析其对滑坡发育的相关性,然后依据其相关性对巴谢河流域滑坡进行聚类分析,得出滑坡危险性分区,从而为流域滑坡防治、国土资源开发及工程建设等提供参考依据。

## 1 研究区概况

巴谢河流域位于甘肃省东乡县境内,地处陇中黄土高原西部第三系临夏盆地内,海拔高程约1842~2483m,属黄土低山丘陵地带,区内梁峁与冲沟相间分布,水土流失较为严重,河谷主要由河漫滩及四级阶地组成,呈阶梯状展布构成了滑坡的临空面。流域内出露地层由老到新主要为新近系临夏组泥岩、第四系下中更新统冲积—湖积亚黏土及微胶结砾石层、上更新统马兰黄土和冲积亚黏土及砂砾、全新统洪积—冲积砂质黏土及砂砾。洪积—冲积砂质黏土及砂砾多分布于河漫滩及Ⅰ级阶地处,冲积亚黏土及砂砾构成Ⅲ级阶地堆积物,大多分布在中、下游地区。马兰黄土在全区广泛分布,披覆在老地层之上。冲积—湖积亚黏土及微胶结砾石层在区内零星分布,不整合于下伏泥岩之上。新近系泥岩构成研究区四级阶地及河漫滩的基座,多分布于上游地区。此外,还有部分面积很小的白垩系河口群砂、泥岩在流域出口处出露。流域气候类型属内陆半干旱气候,近30a来平均年降雨量为540.6mm,夏季降雨多,7—9月份占全年总降水量的58.5%,暴雨多出现在7月、8月

份<sup>[9]</sup>。该区域地下水属河谷潜水,其运动规律大致是顺河谷方向,从上游向下游以泉水的形式进行排泄。

## 2 滑坡影响因素分析

地形地貌为滑坡提供能量与活动空间,地层岩性、新构造运动影响则制约滑坡的空间分布,地震、水文及人类活动是滑坡形成的重要触发因素。巴谢河流域内褶皱、断裂不发育,间歇性的上升运动促使巴谢河下切,河流侵蚀加强,斜坡临空面增大,破坏其原有平衡状态,致使滑坡易于形成。雨水易沿黄土垂直节理下渗,在下伏相对隔水的泥岩顶面形成饱水带,增加斜坡自重,软化黄土、泥岩,降低其抗剪强度,加速斜坡的失稳。气候的季节性变化引起地下水往斜坡深部运移富集,冻结滞水促使土体软化范围扩大及静、动水压力增大,导致斜坡发生变形破坏,如1983年3月发生的洒勒山滑坡和1986年3月洒勒山滑坡局部再次发生滑动,皆是在解冻融化期发生<sup>[9]</sup>。针对流域内滑坡形成条件,从地形地貌、地层岩性、植被及人类活动4个方面本文对研究区所调查和解译的249处滑坡进行分析。

### 2.1 地形地貌

2.1.1 高程 高程因素是影响滑坡灾害发生的一个重要因素,该区域滑坡主要分布高程为2000~2200m,共有滑坡184处,占滑坡总数的73.9%,滑坡面积 $6.19 \times 10^6 \text{ m}^2$ ,占滑坡总面积的66.89%(图1A)。随着高程的增加,滑坡的数量与面积均表现出先增大后减小的趋势,其中在2000~2100m和2100~2200m内滑坡数量最多,各有84处和100处,分别占滑坡总数的33.73%,40.16%,滑坡面积分别为 $2.49 \times 10^6 \text{ m}^2$ , $3.7 \times 10^6 \text{ m}^2$ ,各占滑坡总面积的26.89%,40%。

2.1.2 坡度 坡度是黄土滑坡发育的一个重要内在因素,对研究区滑坡坡度进行统计(图1B),滑坡多发生在15°~40°的斜坡上,共有滑坡188处,占滑坡总数的75.5%,滑坡面积 $6.50 \times 10^6 \text{ m}^2$ ,占滑坡总面积的70.17%。随着斜坡坡度的增加,区内滑坡的数量与面积均表现出先增大后减小的趋势,其中在15°~20°和20°~25°内滑坡数量最多,各有47处和54处,分别占滑坡总数的18.88%,21.69%,滑坡面积分别为 $2.72 \times 10^6 \text{ m}^2$ , $1.58 \times 10^6 \text{ m}^2$ ,各占滑坡总面积的29.4%,17.1%。而在小于15°或大于40°的斜坡地段,滑坡发生较少。

2.1.3 坡向 坡向的不同,造成不同坡向气候条件的差异,并对植被、土壤、地貌、水文等产生影响,通过统计(图1C)可知,该流域阳坡滑坡数量与面积分别为138处、 $6.85 \times 10^6 \text{ m}^2$ ,各占55.42%,74.01%。阴坡滑坡

数量与面积为 111 处、 $2.41 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 各占 44.58%, 25.99%。坡向在  $135^\circ \sim 180^\circ$ ,  $270^\circ \sim 315^\circ$  的阳坡地段与  $45^\circ \sim 90^\circ$ ,  $90^\circ \sim 135^\circ$  的阴坡地段滑坡数量最多, 各有 82 处和 77 处, 分别占滑坡总数的 32.93%, 30.92%, 滑坡面积分别为  $3.93 \times 10^6 \text{ m}^2$ ,  $1.53 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 各占滑坡总面积的 42.48%, 16.51%。

2.1.4 沟谷密度 沟谷密度是地表破碎程度的重要表征参数, 通过对该区域沟谷密度值的提取(图 1D), 其结果表明大部分滑坡产生于  $1 \sim 2.5 \text{ km/km}^2$  的沟谷密度范围内, 共有滑坡 200 处, 占滑坡总数的 80.32%, 滑坡面积  $5.80 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 占滑坡总面积的 62.64%。沟谷密度在  $1.5 \sim 2 \text{ km/km}^2$  内滑坡数量最多, 共 95 处, 占 38.15%, 滑坡面积  $2.36 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 占 25.5%。在沟谷密度小于  $0.5 \text{ km/km}^2$  的时候, 滑坡数量较少, 面积达到最大。

2.2 地层岩性

地层岩性是滑坡形成、演化的重要因素, 为滑坡的发育提供物质基础<sup>[10]</sup>。本研究区域发生在马兰黄土( $Q_3^{2\text{col}}$ )中的滑坡数量与面积最多, 分别为 172 处、 $4.37 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 各占 69.08%, 47.24%(图 1E)。其次为新近系临夏组泥岩( $N_2l^4 + N_2l^3$ ), 滑坡数量与面积分别为 52 处、 $2.85 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 各占 20.88%, 30.75%。

2.3 植被

植被指数(NDVI)可以表征植被覆盖程度, 且 NDVI 愈大, 植被覆盖度愈高<sup>[11]</sup>, 根据 Landsat8 遥感数据, 运用 ArcGIS 的栅格计算器工具提取 NDVI, 并分段对滑坡进行相关统计(图 1F)。滑坡多发育在 0.2~0.3 的 NDVI 范围内, 共 171 处, 占滑坡总数的 68.67%, 滑坡面积  $4.51 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 占滑坡总面积的 48.67%。随 NDVI 值增加, 植被覆盖度增大, 滑坡数量与面积整体呈现出递减趋势。且 NDVI 在 0.1~0.2 范围内, 植被覆盖度最低, 滑坡面积最大。

2.4 人类工程活动

人类工程活动同样是诱发滑坡的重要因素, 根据统计显示(图 1G), 距离道路 600 m 内是滑坡发育密集区, 共有滑坡 188 处, 占滑坡总数的 75.5%, 滑坡面积  $7.64 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 占滑坡总面积的 82.5%。随着与道路距离的增加, 滑坡的数量与面积均表现衰减性。

3 滑坡危险性分析

3.1 研究方法

本文分析了地形地貌因子、地层岩性、植被覆盖、人类工程活动等因子对流域内滑坡的影响程度。根据各个因子对滑坡的相关性, 采用 4 级量化指标对 7 个评价因子进行统一分类(表 1), 分别赋值为 1, 2, 3, 4, 赋值越

高, 代表着与滑坡的相关性越强, 反之亦然。根据滑坡危险性评价指标量化表, 通过 ArcGIS 的空间分析能力, 对各因子进行重分类, 得到各因子分级图(图 2)。

聚类分析是重要的数据挖掘方法, 目的是寻找数据集中所包含的簇结构<sup>[12]</sup>。聚类分析是一种重要的无监督学习方法, 已经成为各个领域广泛认可的数据分析工具。聚类分析的目的是寻找数据集中的“自然分组”, 即所谓的“簇”。通俗地讲, 簇是指相似元素的集合, 聚类分析就是一个在数据集中寻找相似元素集合的无监督学习过程。当前, 聚类分析的新方法层出不穷<sup>[13]</sup>, 既有基于层次的聚类算法<sup>[14]</sup>也有基于划分<sup>[15]</sup>、图论<sup>[16]</sup>、密度和网格<sup>[17]</sup>的聚类算法。

本文采用 ISO 聚类算法对滑坡进行聚类分析, 它是一种迭代过程, 用于将各个候选像元指定给聚类时计算最小欧氏距离, 从处理软件指定的任意平均值开始, 每个聚类一个任意平均值。将每个像元指定给最接近的平均值(多维属性空间中的所有平均值)。基于首次迭代后从属于每个聚类的像元的属性距离, 重新计算各个聚类的新平均值。重复执行此过程: 将各个像元指定给多维属性空间中最接近的平均值, 然后基于迭代中像元的成员资格计算各个聚类的新平均值, 通过迭代次数指定该过程的迭代次数。

在 ISO 聚类确定了多维属性空间中像元自然分组特征的基础上, 采用最大似然法判定研究区域的任意一个空间单元属于哪一个子类。该方法将各个像元指定给以特征文件表示的类时, 会同时考虑类特征的方差和协方差。假设类样本呈正态分布, 则可使用均值向量和协方差矩阵作为类的特征。如果给定了每个像元值的这两个特征, 则可计算每个类的统计概率, 以确定像元作为该类的成员资格。针对先验概率权重指定默认的 EQUAL 选项时, 每个像元将被分配给它最有可能具有成员资格的类。

表 1 滑坡危险性评价指标及其赋值

| 评价指标                            | 危险等级评分值                          |                                |                                   |                               |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
|                                 | 1                                | 2                              | 3                                 | 4                             |
| 高程/m                            | >2200                            | <2000                          | 2000~2100                         | 2100~200                      |
| 坡度/(°)                          | <15,                             | 30~35                          | 25~30,                            | 15~25                         |
|                                 | >40                              |                                | 35~40                             |                               |
| 坡向/(°)                          | 0~45                             | 180~225,                       | 225~270                           | 45~180,                       |
|                                 |                                  | 315~360                        |                                   | 270~315                       |
| 沟谷密度/<br>(km·km <sup>-2</sup> ) | 0.5~1,                           | <0.5                           | 1~1.5,                            | 1.5~2                         |
|                                 | >2.5                             |                                | 2~2.5                             |                               |
| 地层岩性                            | K <sub>1</sub> hk <sup>2</sup> , | Q <sub>3</sub> <sup>al</sup> , | Q <sub>3</sub> <sup>al</sup> -al, | Q <sub>3</sub> <sup>col</sup> |
|                                 | Q <sub>1+2</sub> <sup>al</sup>   | N <sub>2</sub> l <sup>4</sup>  | N <sub>2</sub> l <sup>3</sup>     |                               |
| NDVI                            | >0.35                            | 0.3~0.35                       | 0.1~0.2                           | 0.2~0.3                       |
| 距道路距离/m                         | >900                             | 600~900                        | 300~600                           | <300                          |

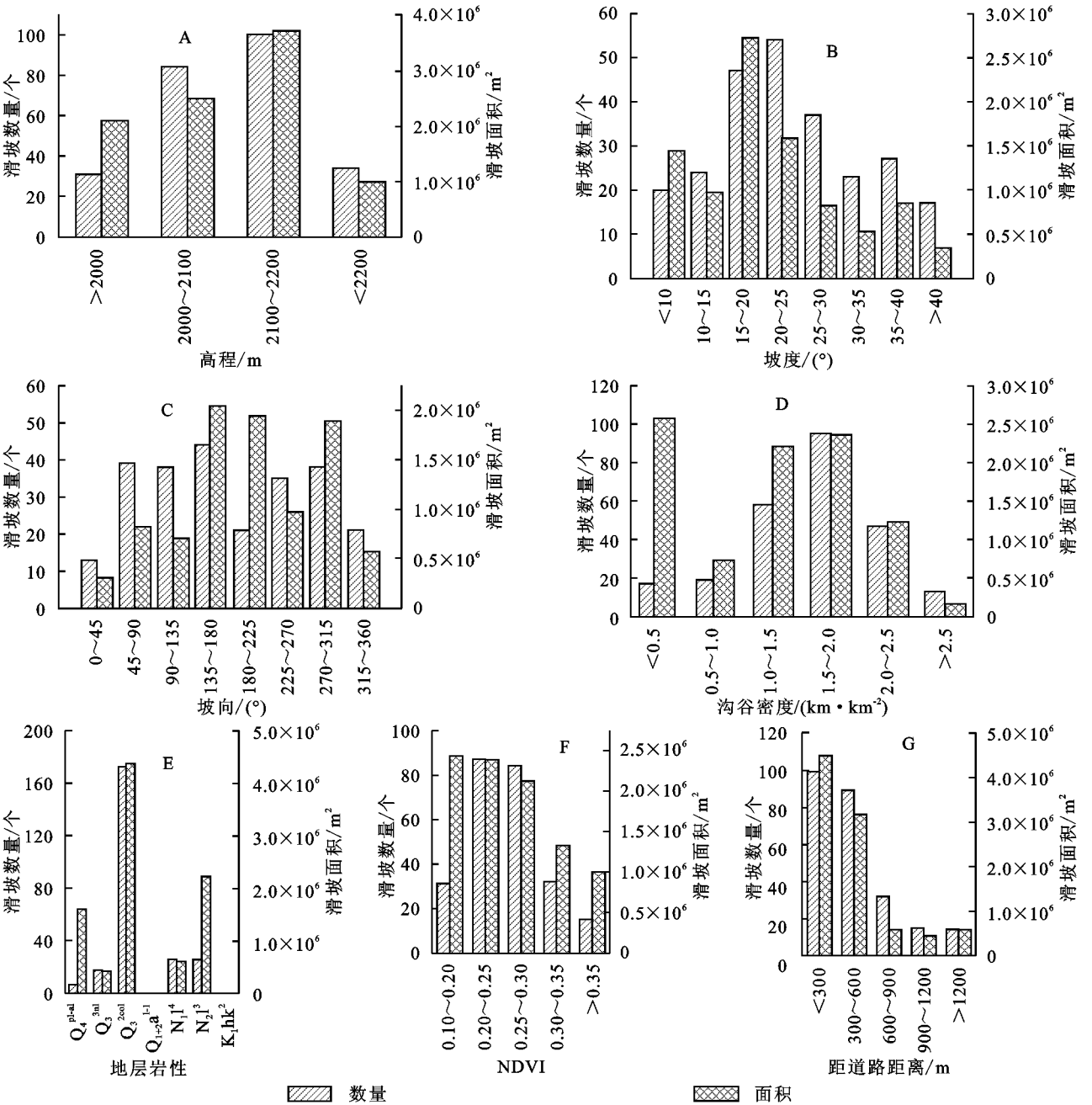


图 1 滑坡数量/面积与各因子关系直方图

3.2 危险性评价

基于 ArcGIS 的多元分析功能,采用聚类分析的方法对巴谢河流域的滑坡进行危险性评价(图 3)。将该区域滑坡进行分类,分别是高危险区、中危险区、低危险区和极低危险区。然后结合滑坡灾害点的分布,对危险性分区的特征进行分析。分区结果显示:滑坡高危险区面积为 129.8 km<sup>2</sup>,占总面积的 30.9%,共分布滑坡灾害点 188 个,灾害点密度为 1.45 个/km<sup>2</sup>;滑坡中危险区面积为 91.4 km<sup>2</sup>,占总面积的 21.7%,共分布滑坡灾害点 44 个,灾害点密度为 0.48 个/km<sup>2</sup>;滑坡低危险区面积为 127.4 km<sup>2</sup>,占总面积的 30.3%,共分布滑坡灾害点 15 个,灾害点密度为 0.12 个/km<sup>2</sup>;滑坡极低危险区面积为 71.8

km<sup>2</sup>,占总面积的 17.1%,共分布滑坡灾害点 2 个,灾害点密度为 0.03 个/km<sup>2</sup>。根据评价结果可表明,巴谢河流域滑坡危险性较强,灾害点密度大,危险区域较为广泛,高危险区多处于沟谷地区,属于村民居住区域,人类工程活动频繁,应加以重视,采取相应的治理措施,以保护当地居民生命财产安全。

表 2 滑坡危险性评价结果

| 危险性单元 | 面积/<br>km <sup>2</sup> | 占全区<br>面积/% | 滑坡<br>数量/个 | 灾害密度/<br>(个·km <sup>-2</sup> ) |
|-------|------------------------|-------------|------------|--------------------------------|
| 高危险区  | 129.8                  | 30.9        | 188        | 1.45                           |
| 中危险区  | 91.4                   | 21.7        | 44         | 0.48                           |
| 低危险区  | 127.4                  | 30.3        | 15         | 0.12                           |
| 极低危险区 | 71.8                   | 17.1        | 2          | 0.03                           |

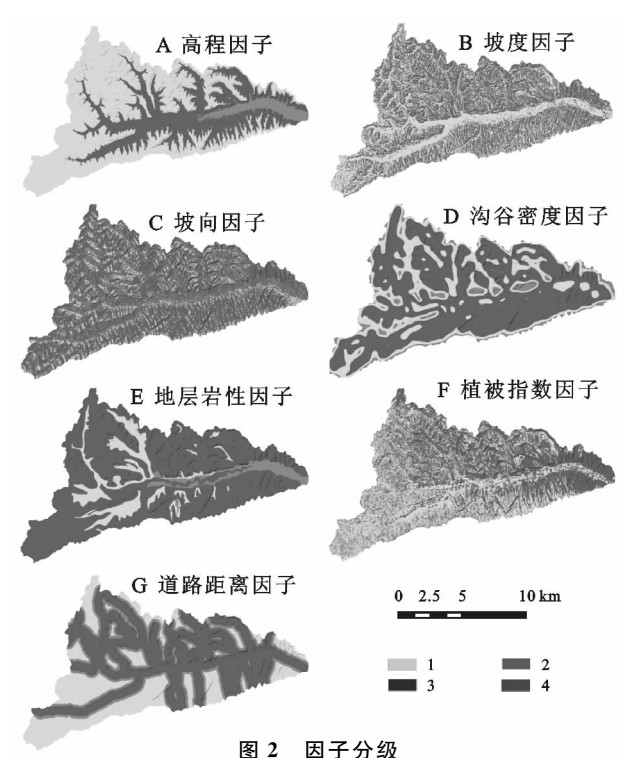


图 2 因子分级

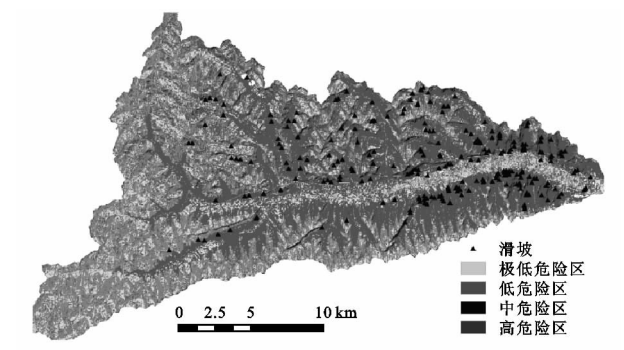


图 3 滑坡危险性分区

4 结论

(1) 通过遥感解译与野外调查,分析巴谢河流域地形地貌、地层岩性、植被覆盖、人类工程活动等对滑坡的相关性,结果表明绝大部分滑坡集中在高程 2 000~2 200 m、坡度 15°~40°范围内。阳坡滑坡数量与面积均大于阴坡,滑坡沟谷密度 1~2.5 km/km<sup>2</sup> 的范围内集中明显,且随着切割深度、沟谷密度的增加,滑坡数量呈现出先增后减的趋势。黄土与泥岩是区内主要的易滑地层,在这两种地层中滑坡分布最广。NDVI 在 0.2~0.3 和距离道路 600 m 的范围内容易发生滑坡,且随 NDVI 值、道路距离的增大,滑坡数量与面积均表现出衰减性。

(2) 基于各因子对巴谢河流域滑坡的相关性,对其进行聚类分析,将该区域滑坡进行分为 4 类:高危险区、中危险区、低危险区和极低危险区,所占研究区

面积比例分别为 30.9%,21.7%,30.3%,17.1%。评价结果表明:巴谢河流域滑坡危险性较强,灾害点密度大,高危险区域面积较为广泛,多处于沟谷地区。应加以重视和治理。

参考文献:

[1] 吴玮江,王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州:兰州大学出版社,2006.

[2] 杜国梁,张永双,高金川,等. 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,2016,22(1):1-11.

[3] 郭富赞,孟兴民,陈冠,等. 白龙江流域地貌演化及其对地质灾害的影响[J]. 人民长江,2016,47(7):37-43.

[4] 苏琦,梁明剑,袁道阳,等. 白龙江流域构造地貌特征及其对滑坡泥石流灾害的控制作用[J]. 地球科学,2016,41(10):1758-1770.

[5] 王江红. 陇中盆地滑坡的发育规律及其影响因子研究[D]. 兰州:兰州大学,2011:18-20.

[6] 庄乐和. 巴谢河流域发生滑坡的机制与防治措施[M]// 聂德新. 工程地质科学新进展. 成都科技大学出版社,1989.

[7] 曹炳兰,陈剑平,王连俊. 巴谢河流域滑坡分布特征及谷坡稳定性分析[J]. 水土保持通报,1990,10(1):44-52.

[8] 方小敏,李吉均,朱俊杰,等. 甘肃临夏盆地新生代地层绝对年代测定与划分[J]. 科学通报,1997,42(14):1457-1471.

[9] 吴玮江. 季节性冻融作用与斜坡整体变形破坏[J]. 中国地质灾害与防治学报,1996,7(4):59-64.

[10] Xu C, Dai F, Xu X, et al. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China [J]. Geomorphology, 2012,145:70-80.

[11] He S, Pan P, Dai L, et al. Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China [J]. Geomorphology, 2012,171:30-41.

[12] 王骏,王士同,邓赵红. 聚类分析研究中的若干问题[J]. 控制与决策,2012,27(3):321-328.

[13] Xu R. Survey of clustering algorithms[M]. New York: Ieee Press, 2005.

[14] 孙吉贵,刘杰,赵连宇. 聚类算法研究[J]. 软件学报,2008,19(1):48-61.

[15] Hathaway R J, Hu Y. Density-Weighted Fuzzy c-Means Clustering[M]. New York: Ieee Press, 2009.

[16] Lee C H, Zaiane O R, Park H H, et al. Clustering high dimensional data: A graph-based relaxed optimization approach[J]. Information Sciences An International Journal, 2008,178(23):4501-4511.

[17] Yujian L. A clustering algorithm based on maximalθ-distant subtrees [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(5):1425-1431.