

## 西藏林芝多雄河流域高位雪崩易发性评价

张平平, 李 滨, 高浩源, 万佳威

### Research on high-altitude avalanche susceptibility area zoning based on informativeness modeling in the Duoxiong River Basin, Nyingchi area of Xizang Autonomous Region

ZHANG Pingping, LI Bin, GAO Haoyuan, and WAN Jiawei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202402021>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 独库高速公路克扎依—巩乃斯段雪崩易发性评价

Avalanche susceptibility evaluation of the Kezhayi to Gongnaisi section of the Duku expressway

程秋连, 刘杰, 杨治纬, 张天意, 王斌 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 60-71

#### 加权信息量模型在云南澜沧县滑坡危险性评价中的应用

Hazard assessment of landslides in Lancang County, Yunnan Province based on weighted information value model

吴兴贵, 王宇栋, 王蓝婷, 丁梓逸 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(3): 119-128

#### 雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译

Remote sensing interpretation of development characteristics of high-position geological hazards in Sedongpu gully, downstream of Yarlung Zangbo River

李壮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 33-41

#### 基于信息量、加权信息量与逻辑回归耦合模型的云南罗平县崩滑灾害易发性评价对比分析

Comparative analyses of susceptibility assessment for landslide disasters based on information value, weighted information value and logistic regression coupled model in Luoping County, Yunnan Province

杨得虎, 朱杰勇, 刘帅, 马博, 代旭升 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(5): 43-53

#### 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流过程模拟及运动特征分析

Numerical runout modeling and dynamic analysis of the ice avalanche-debris flow in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet

李昆仲, 张明哲, 邢爱国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 18-27

#### 基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202402021

张平平, 李滨, 高浩源, 等. 西藏林芝多雄河流域高位雪崩易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 44-57.

ZHANG Pingping, LI Bin, GAO Haoyuan, et al. Research on high-altitude avalanche susceptibility area zoning based on informativeness modeling in the Duoxiong River Basin, Nyingchi area of Xizang Autonomous Region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(6): 44-57.

## 西藏林芝多雄河流域高位雪崩易发性评价

张平平<sup>1,2</sup>, 李滨<sup>1,2</sup>, 高浩源<sup>1,2</sup>, 万佳威<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 随着全球气候变暖, 冰雪融化速率加剧, 雪崩灾害事件频发, 严重威胁高寒山区的人民生命财产和交通廊道安全。以雅鲁藏布江下游多雄河流域为研究对象, 基于遥感解译和野外调查, 识别并验证了 70 个雪崩点, 运用皮尔逊相关系数进行共线性分析, 综合选取了高程、坡度、坡向、坡面曲率、地表切割深度、地表覆盖类型、植被覆盖度、地形湿度指数、年平均最低气温、归一化差雪指数等 10 个评价因子构建雪崩易发性评价体系, 通过 ArcGIS 平台使用信息量模型进行雪崩易发性分区, 将研究区分为低易发、中易发、高易发区三类, 并采用 ROC 曲线进行了精度检验。结果表明: 雪崩易发性评价模型 AUC 值为 0.835, 具有较好的预测精度; 低易发、中易发、高易发区面积分别为 60.61 km<sup>2</sup>、74.33 km<sup>2</sup>、96.91 km<sup>2</sup>, 分别占研究区总面积的 26.14%、32.06%、41.80%, 其中高易发区主要分布在中高及高海拔地区, 以多雄拉山、拉格最为典型。最后依据主-被动防御措施相结合提出空-天-地一体化监测预警技术和相应建筑结构。该研究可为多雄河流域防灾减灾提供技术支撑和科学参考。

**关键词:** 多雄河流域; 雪崩; 遥感解译; 信息量模型; 易发性; 防御措施

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)06-0044-14

## Research on high-altitude avalanche susceptibility area zoning based on informativeness modeling in the Duoxiong River Basin, Nyingchi area of Xizang Autonomous Region

ZHANG Pingping<sup>1,2</sup>, LI Bin<sup>1,2</sup>, GAO Haoyuan<sup>1,2</sup>, WAN Jiawei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

**Abstract:** With global climate warming, the rate of snow and ice melting has accelerated, leading to frequent avalanche disasters, which seriously threaten people's lives and properties and the safety of transportation corridors in alpine mountainous areas. Taking the Daxiong River Basin downstream of the Yarlung Zangbo River as the research object, 70 avalanche points were identified and verified based on remote sensing interpretation and field investigation. Pearson correlation coefficient analysis was used for conducting covariance analysis, and 10 evaluation factors including elevation, slope, slope direction,

收稿日期: 2024-02-28; 修订日期: 2024-04-28

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2244226); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230538)

第一作者: 张平平(2001—), 女, 江西南昌人, 地质工程专业, 硕士研究生, 主要从事工程地质与地质灾害研究。

E-mail: 2393211031@qq.com

通讯作者: 李滨(1980—), 男, 山东滨州人, 地质工程专业, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害防灾减灾研究。

E-mail: libin1102@163.com

ground curvature, surface cutting depth, surface cover type, vegetation coverage, TWI, average annual minimum temperature, and NDSI were comprehensively selected to construct an avalanche susceptibility evaluation system. The information value model was used for avalanche susceptibility zoning on the ArcGIS platform, dividing the study area into three categories: low susceptibility, medium susceptibility, and high susceptibility zones, and accuracy verification was conducted using ROC curve. The results show that the *AUC* value of the avalanche susceptibility evaluation model is 0.835, indicating good predictive accuracy. The areas of low, medium, and high susceptibility zones are 60.61 km<sup>2</sup>, 74.33 km<sup>2</sup>, and 96.91 km<sup>2</sup>, respectively, accounting for 26.14%, 32.06%, and 41.80% of the total area of the study area. High susceptible zones are mainly located in mid-to-high and high-altitude areas, with Mount Duoxiongla, and Lage being typical. Finally, based on the combination of active and passive defense measures, integrated monitoring and early warning techniques, and corresponding architectural structures are proposed, providing technical support and scientific reference for disaster prevention and mitigation in the Duoxiong River Basin.

**Keywords:** Duoxiong River Basin; avalanche; remote sensing; information value model; susceptibility; defensive measure

## 0 引言

雪崩是高寒山区斜坡上的积雪在重力驱动作用下倾泻而下的一种自然现象,常常裹挟岩屑、土壤、树枝等,流通时速度可超过 200 km/h,压力可达 50 T/m<sup>2</sup>,具有突发性、群发性、难预测性,以及高速和高能的运动特性<sup>[1]</sup>。由于其运动过程的高流量、高速度和巨大的冲击压力,雪崩可以以其方式破坏一切,如森林、人类、财产、道路网络和通信,严重威胁中高纬度多雪山区公路交通和人们的生命安全<sup>[2-4]</sup>。随着全球气候变暖,冰雪融化速率加剧,雪崩灾害事件频发,对国民经济造成巨大损失。

雪崩易发性评价可以帮助定义雪崩灾害的空间格局,为区域土地空间规划和雪崩灾害预防提供重要参考。国外对雪崩易发性研究较早,方法较成熟,广泛学者采用模糊评价、频率比、层次分析等传统评价方法,结合 GIS 空间数据分析进行雪崩易发性评价<sup>[5-8]</sup>。模糊评价法适合解决模糊的,难以量化的问题,但难以确定各评价指标的权重;频率比是一种常见的统计分析法,但单一的频率比模型往往忽视了各指标因子的所占权重;层次分析法是一种定性的分析决策方法,取决于专家经验,受主观影响较大。随着机器学习算法的普及,雪崩易发性评价更加趋向自动化。机器学习模型可以分为监督学习、无监督学习、半监督学习和强化学习 4 类,均是利用现有数据作为经验让机器训练学习,提高工作效率,其中包含随机森林、支持向量机、人工神经网络、K-means 聚类等多种算法。且一般混合模型预测雪崩易发性的准确性和性能优于单个模型。Yariyan 等<sup>[9]</sup>采用 4 种学习模型(径向基函数、多层感知器、模

糊 ARTMAP 和 SOM),混合 K-means 聚类,结合 3 种统计算法(频率比、统计指数和证据权重),建立了 4 种新的混合模型用于绘制伊朗西北部 Zarrinehroud 和 Darvan 流域的雪崩易发性分区图,并根据 *AUC* 值选取了 K-means-SOM 混合模型进行易发性分区,其应用结果可在类似雪崩山区中进行测试。国内关于雪崩的研究正处在快速发展中,雪崩区域性研究主要集中在西藏东南、新疆、天山等高寒地区,研究手段主要是在野外调查的基础上,结合多期卫星遥感解译建立雪崩数据库,运用 GIS 手段进行空间分析<sup>[10-13]</sup>,采用机器学习模型和统计算法进行雪崩易发性评价<sup>[10-13]</sup>。文洪等<sup>[14]</sup>运用主成分分析法进行雪崩影响因子分析,结合信息量和确定性系数分别建立加权模型对帕隆藏布江流域进行雪崩易发性区划;信息量是一种基于信息论的统计预测方法,确定性系数是一种概率函数方法,二者均为量化方法,具有科学依据,但对数据信息要求较高。2022 年该学者<sup>[15]</sup>继续对青藏高原沙鲁里山区进行室内遥感解译和野外调查验证建立雪崩数据库,筛选 14 个评价因子,依托 GIS 平台使用 4 种机器学习模型进行雪崩易发性评价,为川藏铁路工程建设的雪崩防灾减灾工作提供科学依据和方法借鉴。

然而,雅鲁藏布江流域地处构造断裂带,地震频繁,构造运动强烈,内外动力地质作用复杂,高位雪崩频发,加之区域地质环境恶劣,人迹稀少,对雪崩研究匮乏。近年来,雅鲁藏布江下游多雄河流域地质灾害频繁,雪崩严重威胁人类生命财产安全,在查明地质背景条件下开展流域内的高位雪崩易发性区划研究对防灾减灾具有重要意义。前期通过室内遥感解译和野外调查验证

共解译出多雄河流域 70 个雪崩灾害点, 结合研究区相关地形地质资料、水文气象资料综合选取 15 个评价因子进行多重共线性分析, 采用相关性分析最终确定 10 个评价因子构建雪崩易发性评价指标体系。由于雪崩验证点数量较少, 采用机器学习算法训练精度有限, 基于 ArcGIS 平台运用信息量模型对多雄河流域雪崩进行易发性评价, 并采用 ROC 曲线进行了精度检验, 证明了该模型的可靠性, 并得到与实际情况接近的雪崩易发性区划图。区划结果能够有效为多雄河流域雪崩灾害的预测预防提供参考依据。

### 1 研究区概况

#### 1.1 地理位置

多雄河流域位于西藏墨脱县, 与派墨公路近乎平行(图 1a), 起源于多雄拉雪山冰川, 源头海拔约 3 732 m, 呈东—东南走向, 经拉格、汗密、老虎嘴、解放大桥最终汇入雅鲁藏布江, 全程高差达 3 000 m。本次研究区位于多雄河源头至汗密段, 区域面积约 230 km<sup>2</sup>, 该段干流长约 22 km, 区内派墨公路里程约 43 km(图 1b)。

#### 1.2 地质概况

研究区位于喜马拉雅东构造结, 区内受河流下切作用强烈形成高山峡谷地貌, 地势由北向南急剧下降, 最高位置为多雄拉山, 海拔约 4 500 m, 最低位置为汗密,

海拔约 2 200 m。受印度板块推覆作用导致山体隆升, 区域内断层构造发育, 主要断裂带为 NE 向断层及 NW 向正断层, 于拉格雪山处交汇。强烈的构造活动使得海拔 4 000 m 的斜坡区域差异风化强烈, 东北坡凹槽地貌发育, 冬季容易富集积雪, 气温回升引起积雪消融。多雄河流域出露地层为元古代前寒武纪南迦巴瓦岩群及全新统沉积物, 全新统沉积物地层主要分布在多雄拉山及拉格雪山附近, 岩性为砂质角砾岩、泥质角砾岩及泥质砂岩; 其余地区均为南迦巴瓦岩群, 岩性主要为花岗片麻岩等变质岩(图 2)。根据中国地震局《中国地震动参数区划图(GB 18306—2015)》, 研究区地震动峰值加速度为 0.4 g(地震烈度 9 度及以上), 地震活动发育频繁。

#### 1.3 水文气候

多雄河流域属雅鲁藏布江支流, 地处大陆高原寒流与印度洋暖流交汇处, 气候属山地寒带至山地热带的垂直分布带, 雨量充沛, 日照充足, 年降水量约 2 083 mm, 年均气温 3.8 °C, 积雪厚度最大可达 0.84 m, 风速可达 5 m/s。区内独特的气候与环境孕育了丰富的动植物生态系统, 复杂的地形和充沛的降水为雪崩的发育奠定了地形基础并提供了丰富的物质条件。

#### 1.4 历史灾害

多雄河流域曾发生过多雄拉雪崩(图 3a)、阳嘎拉雪崩(图 3b)、弄加曲雪崩、拉格雪崩(图 3c)、大岩洞雪

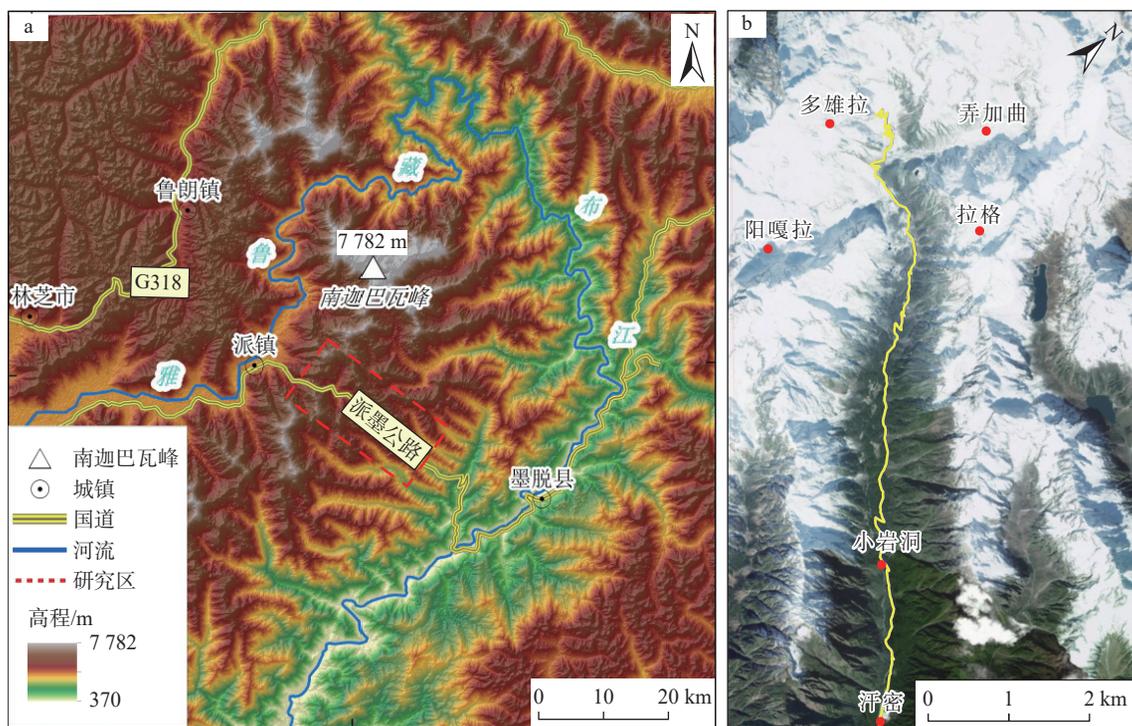


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographic location of the study area

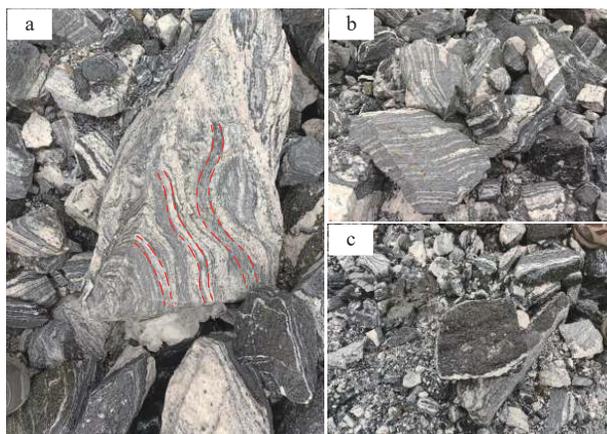


图 2 南迦巴瓦岩群花岗岩

Fig. 2 Granite gneiss of the Nangabawa group

崩等大型雪崩灾害,造成派墨公路多次中断及人员伤亡。其中多雄拉山位于喜马拉雅南坡,隘口风势大、山体陡峭、凹槽发育,积雪厚度大,雪崩灾害频发。据报道,2021年4月1日,西藏米林县与墨脱县交界处派墨公路多雄拉隧道出口发生雪崩,造成4人死亡,2022年2月5日隧道口再次发生雪崩,造成5人被埋,且在2023年1月17日,隧道南向出口发生特大型雪崩,雪崩堆积体长3 km、宽1.3 km、平均厚度2 m,体积超 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,造成过往17辆车被埋,被困人员高达81余人,摧毁公路段长达5 km。可见该区域雪崩灾害高发,严重威胁派墨公路交通运行与人员安全,亟需进行雪崩灾害易发性评价。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

采用10 m分辨率DEM通过ArcGIS平台表面分析工具及栅格计算器提取高程、坡度、地形起伏度、地面粗糙度、坡面曲率、高程变异系数、地表切割深度、地形湿度指数; Landsat8 卫星影像来源于地理空间数据云 <https://www.gscloud.cn/>, 通过 ENVI 平台提取植被覆盖度与归一化差雪指数; 土地覆盖数据来源于武汉大学钟燕飞教授团队2020年制作的全国10 m分辨率土地覆盖制图<sup>[16]</sup>; 2000—2022年年平均降雨量及2000—2022年年均最低气温来源于国家青藏高原科学数据中心 <https://data.tpdc.ac.cn/>; 年平均最大风速来源于中国气象数据网 <http://data.cma.cn/>; 道路水系分布来源于全国地理信息资源目录服务系统 <https://www.webmap.cn/>; 雪崩灾害点编录数据来源于室内多期卫星遥感解译、调查报告及野外验证,共编录研究区70处雪崩灾害点(图3)。

文中所用评价因子不同精度数据之间通过插值进

行匹配,插值可以根据有限的样本数据点预测栅格中的像元值,通过将附近已知点值代入到数学公式中实现对未知点值的预测,可以实现任何地理点数据(如高程、降雨、化学物质浓度和噪声等级)未知值的预测。

归一化差雪指数原始分辨率为30 m,采用ArcGIS数据管理工具中的栅格重采样技术更改栅格数据集的空间分辨率为10 m,重采样插值技术执行最邻近分配法,是速度最快的插值方法,因为插值不会创建新值,可将像素值更改内容最小化,适用于离散数据(如土地利用分类)。

气象数据为墨脱县及米林县下的3个乡镇气象数据点,运用ArcGIS空间分析工具中的插值分析,通过反距离权重法将气象数据点插值得到整个研究区气象数据栅格表面,输出表面栅格分辨率为10 m,从而和DEM数据匹配。

### 2.2 信息量模型

信息量模型是一种基于信息论的统计预测方法,其原理是对地质灾害区信息数据进行统计分析,将影响灾害的各因子实测值转化为信息量值,来衡量灾害的易发性<sup>[17-19]</sup>。同崩滑灾害类似,雪崩也是在多种因素相互作用下而形成的,通过叠加各个因素的信息量,建立雪崩易发性评价模型,信息量越大,则雪崩易发性越高<sup>[20-22]</sup>,单因子信息量值计算方法如下:

$$I_i = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (1)$$

式中:  $I_i$ ——单一评价因子的信息量值;

$N_i$ ——该评价因子分类中雪崩灾害点的数量;

$N$ ——研究区雪崩灾害点总数量;

$S_i$ ——单一评价因子所占的栅格数量;

$S$ ——研究区总栅格数量。

将每个评价单元内的所有单因子信息量分类分级进行叠加计算,即可得到雪崩灾害发生的总信息量,计算公式为:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (2)$$

式中:  $I$ ——雪崩易发性的总信息量值;

$n$ ——评价因子数量。

### 2.3 评价单元

评价单元是评价因子定量提取及计算最基础的单元,对于易发性评价,选择合适的制图单元能够有效提高评价效率,常见作为区域易发性评价单元的主要有栅格单元、斜坡单元、地貌单元、地形学单元和均一条件

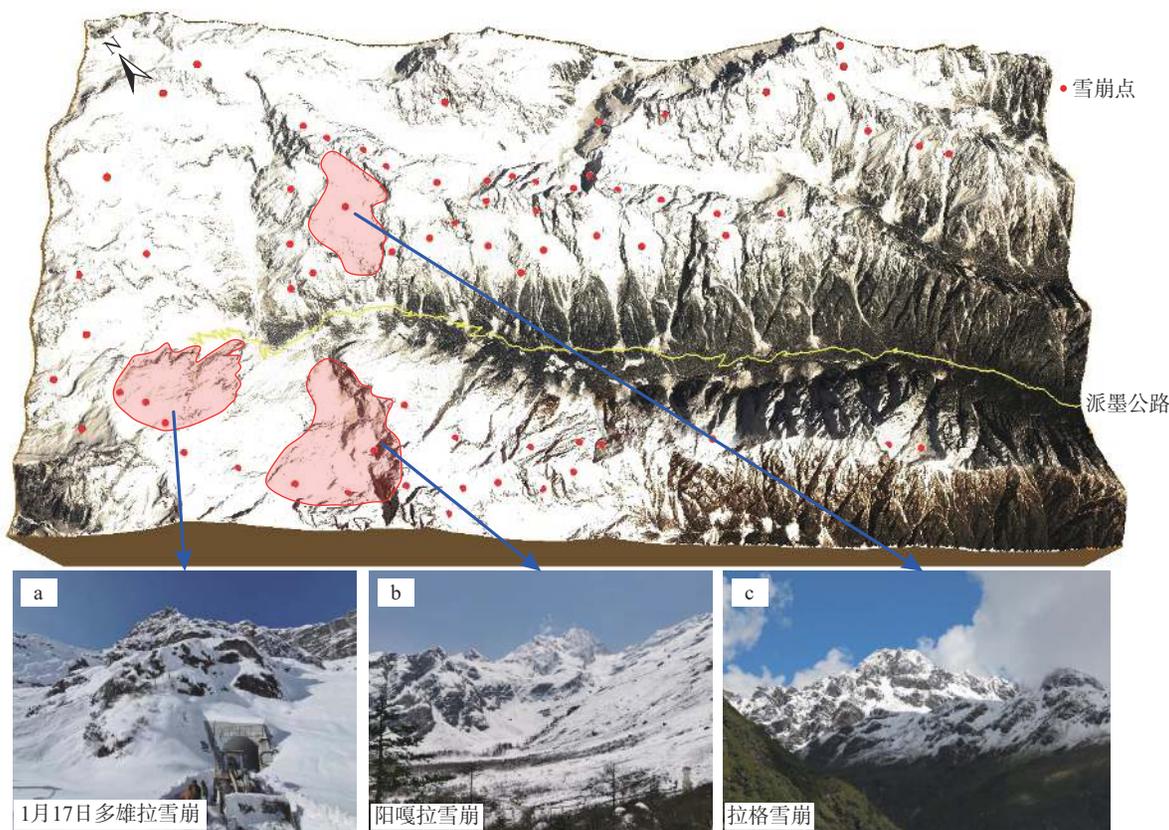


图 3 多雄河流域雪崩灾害点分布图

Fig. 3 Distribution map of avalanche sites in the Duoxiong River Basin

条件单元五类<sup>[23]</sup>。近年来,栅格单元和斜坡单元的运用最为广泛,栅格单元也俗称网格单元,具有提取数据简单、便于编程处理,DEM精度要求高等特点;斜坡单元属于地形单元之一,能够很好的反映地质灾害的地形地貌特征,但由于其不连续问题,在易发性评价中精度相对较差,划分结果难以满足实际需要<sup>[24-25]</sup>。因此选取栅格单元作为评价单元,设置单元分辨率为 10 m×10 m,将研究区栅格共划分 2 395 行,2 150 列,约为 2.3×10<sup>6</sup> 个栅格单元。

### 3 雪崩评价因子提取与分析

#### 3.1 雪崩评价因子提取

雪崩的形成受积雪物理性质和外部条件影响,积雪物理性质包括积雪密度、厚度、硬度、雪层结构、雪晶大小与形状、含水率、雪温等;外部条件包括温度梯度、海拔、相对高差、坡度、坡向、植被类型与覆盖率、风速、风向、降雪等<sup>[26]</sup>。评价因子的选取需综合考虑自身积雪特性、静态地形因素和动态气象因素<sup>[25]</sup>,以及能否全面反映雪崩形成条件和是否可以被量化表达<sup>[15]</sup>。综合选取了 14 个可量化提取因子及 1 个定性化植被覆盖因子,包含:高程、坡度、坡向、坡面曲率、地形起

伏度、地面粗糙度、高程变异系数、地表切割深度、土地覆盖类型、植被覆盖度、地形湿度指数、年平均降雨量、年平均最低气温、年平均最大风速、归一化差雪指数。基于 ArcGIS 平台提取 15 个因子作为多雄河流域雪崩易发性评价因子,并制作评价因子专题图(图 4)。

#### 3.2 多重共线性分析

进行雪崩易发性评价时,所选因子并非相互独立,彼此之间存在一定的相关性,进行多重共线性分析可以去除高相关性的评价因子,使结果更加高效和精确。采用容忍度 (*TOL*)和方差膨胀因子 (*VIF*)进行多重共线性分析,当 *TOL* 大于 0.1, *VIF* 小于 10 的时候,所选评价因子之间相互独立,不存在相关关系;反之 *TOL* 大于 0.1, *VIF* 值大于 10 则认为评价因子之间存在相关性,且 *VIF* 值越大,相关性越强<sup>[27]</sup>。通过 ArcGIS 平台将除土地覆盖类型外的 14 个评价因子全部赋值到雪崩灾害点属性表中,在 SPSS 数据统计分析软件中使用皮尔逊相关系数对该 14 个雪崩评价因子进行共线性诊断,结果显示存在较多相关性较高因子,根据 *VIF* 值大小依次剔除年平均降雨量、地形起伏度、高程变异系数、年平均最大风速、地面粗糙度 5 个因子,最终筛选出高程、坡度、坡向、坡面曲率、地表切割深度、植被覆盖度、地

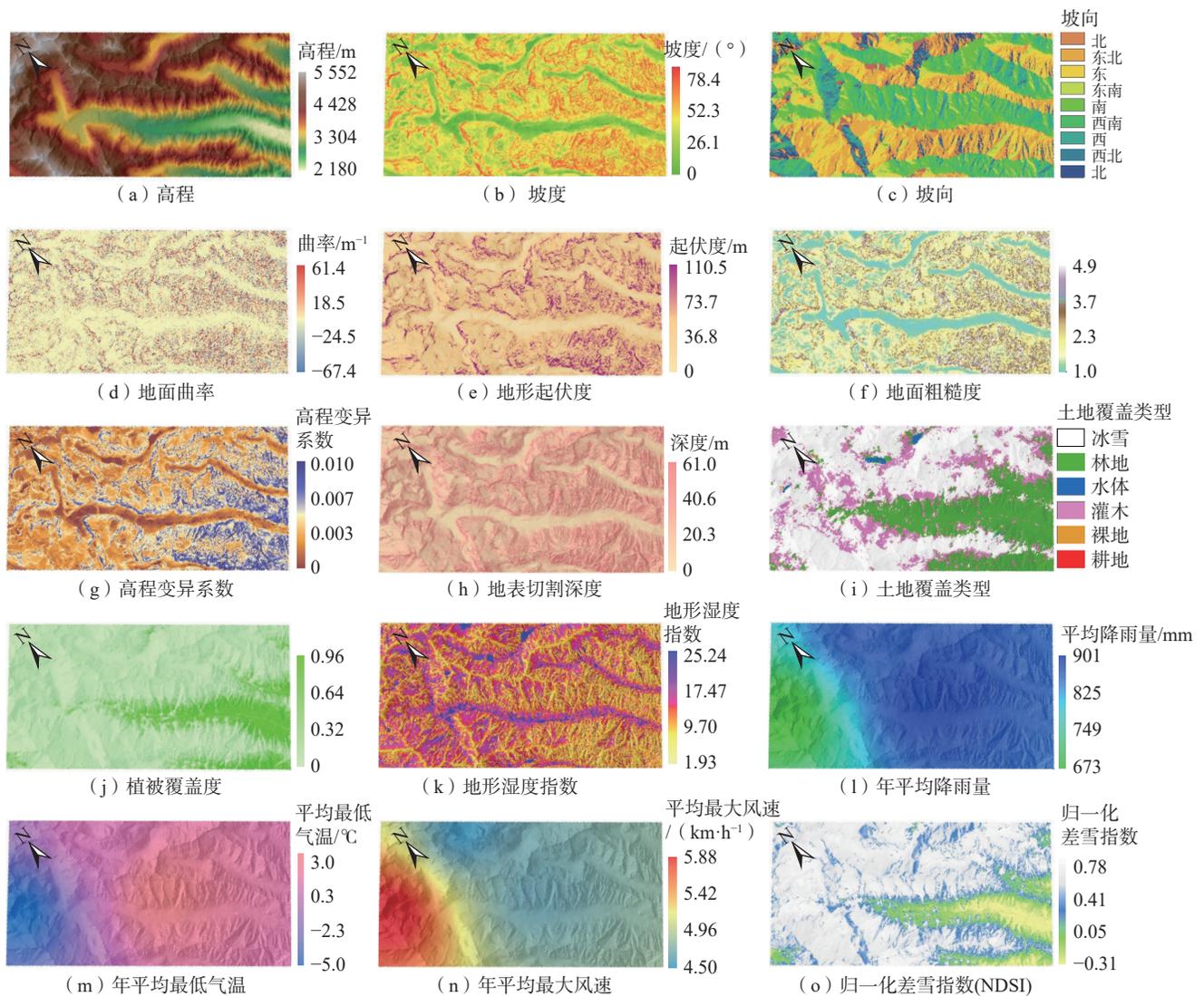


图 4 雪崩评价因子制图

Fig. 4 Mapping of avalanche evaluation factors

表 1 评价因子 TOL 及 VIF 值

Table 1 Tolerance (TOL) and variance inflation factor (VIF) values of evaluation factors

因子	容忍度	方差膨胀因子	因子	容忍度	方差膨胀因子
高程	0.650	1.538	植被覆盖度	0.532	1.880
坡度	0.127	7.858	地形湿度指数	0.612	1.633
坡向	0.703	1.422	年平均最低气温	0.732	1.366
坡面曲率	0.831	1.204	归一化差雪指数	0.667	1.498
地表切割深度	0.152	6.597			

形湿度指数、年平均最低气温、归一化差雪指数等 9 个评价因子(表 1), 结合此前未进行相关性分析的土地覆盖类型共计 10 个雪崩评价因子进行雪崩易发性评价。

### 3.3 雪崩评价因子分析

基于 ArcGIS 平台, 采用自然断点法对评价因子专题图进行重分类, 分级结果见表 2。结合相关理论知识

阐述各评价因子对雪崩灾害的贡献特性, 并分析雪崩点随评价因子不同区间的发育规律, 绘制雪崩灾害点分布频率图(图 5)。

#### 3.3.1 地形因子

雪崩是在重力驱动作用下积雪层的下滑力大于雪体内部的摩擦力及黏聚力, 表面形成拉张裂缝, 源区雪

表 2 评价因子分级  
Table 2 Grading of evaluation factors

因子类型	雪崩评价因子	分级
地形因子	高程/m	<3 500、3 500~3 800、3 800~4 100、4 100~4 400、4 400~4 700、4 700~5 000、>5 000
	坡度/(°)	<20、20~30、30~40、40~50、>50
	坡向	北、东北、东、东南、南、西南、西、西北
	坡面曲率/m <sup>-1</sup>	<-7.8、-7.8~-2.3、-2.3~-0、0~6.8、>6.8
	地表切割深度/m	<5.0、5.0~9.6、9.6~15、15~22、>22
地貌因子	土地覆盖类型	耕地、林地、灌木、水体、裸地、冰雪
	植被覆盖度	<0.025、0.025~0.05、0.05~0.075、0.075~0.1、>0.1
水文因子	地形湿度指数	<5.1、5.1~6.8、6.8~8.8、8.8~12、>12
气象因子	年平均最低气温/°C	<-3.4、-3.4~-1.8、-1.8~-0.2、-0.2~1.4、>1.4
	归一化差雪指数	<0.4、0.4~0.5、0.5~0.6、0.6~0.7、>0.7

体脱离滑动,流通时崩塌分离的现象。地形因子为雪崩的发育及流通提供能量条件,并且是雪崩预测中唯一恒定不变的参数。

高程为雪崩的发育提供潜在动力势能,影响温度梯度变化,也控制着降雨、降雪以及植被的分布。随着海拔的升高,气温降低,植被覆盖率下降,降雨和降雪的几率增大,且当海拔位于雪线以上时源区常年积雪,为雪崩的发育提供丰富的物质条件。但当海拔升高到一定程度时,地形变得越来越陡峭,积雪不易在山坡积累,也不易形成雪崩。研究区海拔分布于 2 180~5 552 m,将其重新分类为 7 类,结果显示:雪崩数量随海拔的升高先增加后减少,雪崩主要分布在海拔 3 800~4 700 m 范围类,约占总雪崩数量的 81.4%,见图 5(a)。

坡度对雪崩源区的物质堆积至关重要,坡度过陡不易积雪,难以形成较厚的雪体,坡度过缓积雪的下滑力远远小于雪层之间的内聚力,难以释放积雪,研究表明,雪崩源区坡度普遍在 30°~50°<sup>[28-29]</sup>。研究区坡度范围分布在 0~78°之间,将其重分类为 5 类,其中,坡度在 20°~50°时,雪崩频数约占总雪崩数量的 82.9%,见图 5(b)。

坡向分为向阳坡和背阳坡,接受太阳光照的向阳坡在冬季温度升高,水汽蒸发速度快,积雪不利于积累,但太阳持续辐射容易造成雪体结构破坏而引发雪崩;背阳坡温度较低,水汽含量高,环境湿润,积雪量较大,为雪崩的发育提供物质基础。研究区朝南为向阳坡,朝北为背阳坡,雪崩灾害点主要分布在东北—东、南—西南方向,其中南向坡向雪崩最为发育,见图 5(c)。

坡面曲率反映了坡的形态,雪崩源区易在底部坡度较缓,后缘陡峭的凹型坡内富集,结合一定的坡度(>36°),积雪积累到一定程度后有着较高的雪崩发生频

率<sup>[30-31]</sup>。研究区坡面曲率范围在-67.4~61.4,将其重新分类为 5 类,其中雪崩主要分布在坡面曲率-2.3~6.8,约占总雪崩数量的 90%,见图 5(d)。

地表切割深度为宏观地形因子,表征了地表被侵蚀切割的情况,其本质上是较大地表区域内高程信息的变异及组合特征,而高程差异恰好是赋予雪崩发育所需能量的具体体现。研究区地表切割深度范围分布在 0~61 m,雪崩灾害点主要分布在 0~15 m,约占雪崩总数的 91.4%,见图 5(e)。

### 3.3.2 地貌因子

雪崩常常发生在贫瘠的斜坡地区,Kumar 等<sup>[5]</sup>根据印度喜马拉雅山的经验判断森林地区对于雪崩的贡献仅为 10%,灌木、草地对雪崩的贡献约 30%,而有 60%的雪崩来自贫瘠的地区。茂盛的植被能够锁固积雪层,抑制雪崩的发生,而裸地、耕地表面则容易在冬季形成薄冰壳,使坡面变得平滑从而增大雪崩的风险<sup>[31]</sup>。研究区植被类型主要为针叶林、阔叶林和灌丛<sup>[32]</sup>,土地覆盖类型为耕地及裸地,高海拔地区常年冰雪覆盖,雪崩灾害点主要集中在冰雪地区,约占总雪崩数量的 88.6%,见图 5(f)。

将研究区 Landsat8 遥感数据大气校正后计算归一化植被指数 (NDVI),计算公式如下<sup>[33]</sup>:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (3)$$

式中: NIR——近红外波段;

R——红外波段。

使用空间统计选取 5% 和 95% 累计百分比作为置信度区间最小值和最大值计算植被覆盖度 (FVC),计算公式如下 (*lt* 代表小于, *gt* 代表大于, *le* 代表小于等于, *ge* 代表大于等于):

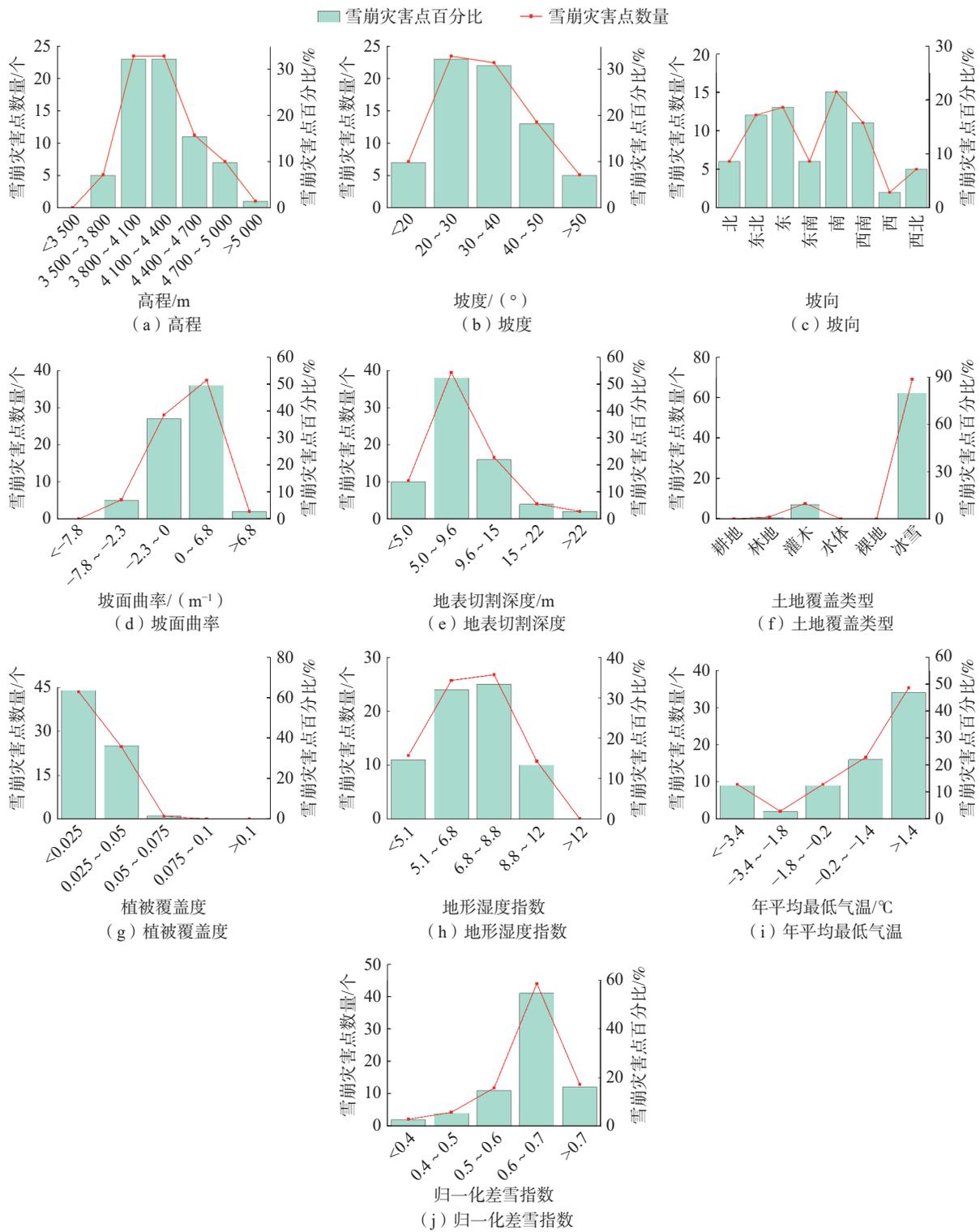


图 5 雪崩灾害点频率分布图

Fig. 5 Frequency distribution map of avalanche disaster points

$$FVC = (b_{1t}NDVI_{soil}) \times 0 + (b_{1gt}NDVI_{veg}) \times 1 + (b_{1ge}NDVI_{soil} \text{ and } b_{1le}NDVI_{veg}) \times \left( \frac{b_1 - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \right) \quad (4)$$

式中:  $NDVI_{veg}$ ——置信度区间最大值(完全被植被覆盖);  
 $NDVI_{soil}$ ——置信度区间最小值(裸地);  
 $b_1$ —— $NDVI$ 。

计算结果表明,高海拔地区植被覆盖度远低于沟谷地区,且多雄拉山至拉格段植被覆盖度最低,而从小岩洞至汗密段植被覆盖度较高,最大值为 0.96。雪崩主要分布在植被覆盖度 0~0.05 区间,约占雪崩灾害点总数的 98.6%,见图 5(g)。

### 3.3.3 水文因子

多雄河流域水系丰富,干流分布在两侧群山中间,山体坡脚遭受河流的侵蚀导致斜坡应力释放、岩体失效和土体漂移<sup>[9]</sup>,影响山体稳定性,这将增加雪崩的可能性。地形湿度指数是区域地形对径流流向和蓄积影响的物理指标,用于研究土壤中含水率分布情况,表征了雪崩的湿度条件,高地形湿度指数值表明具有雪崩运动潜力的地区更易发生雪崩<sup>[10]</sup>。研究区地形湿度指数范围在 1.93~25.24,雪崩主要分布在 5.1~12,约占雪崩灾害点总数的 84.3%,见图 5(h)。

### 3.3.4 气象因子

气候气象为雪崩的发生提供必要的物质条件。降雨可以湿润斜坡表面,减小雪层与斜坡之间的摩擦力,且随着雨滴渗入积雪层,雪崩体积增大<sup>[34]</sup>;气温决定了降雪的分布堆积情况,温度越低,降雪的可能性越大,储存时间越长,积雪厚度也越大,雪崩发生概率越高。从多雄拉至汗密气候变化由高原寒带气候至山地热带气候,降雨量依次升高,年均最低气温呈现升高趋势,总体范围在-5~3℃。雪崩灾害点在各范围区间均有分布,但变化趋势为随温度升高呈现递增趋势,这是因为从拉格雪山至汗密低海拔地区虽然平均温度显著增加,但拉格至汗密高海拔地区气温依旧较低,从而导致雪崩依然频发,雪崩主要集中在年平均气温-0.2~3℃,约占雪崩灾害点总数的 71.4%,见图 5(i)。

归一化差雪指数 (*NDSI*) 表征了研究区积雪特征,将研究区 2 月 Landsat 8 遥感数据导入 ENVI 5.3 中利用可见光(主要是绿光)及短波红外波段的组合计算影像中积雪的覆盖部分,计算公式如下<sup>[32]</sup>:

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} \quad (5)$$

式中: *Green*——0.5~0.6 μm 范围的绿波段;

*SWIR*——1.55~1.75 μm 范围的短波红外波段。

结果显示研究区 *NDSI* 值范围在-0.31~0.77 之间,当 *NDSI* 大于 0.2 时即为有积雪覆盖,且 *NDSI* 值越大积雪覆盖厚度越深。雪崩数量随 *NDSI* 值的升高先增加后减少,这是因为随着 *NDSI* 值的升高,雪崩物质基础越丰富,当 *NDSI* 值过高时说明地形较平缓,积雪难以下滑,雪崩不易发生。*NDSI* 值范围在 0.5~0.77 区间的雪崩灾害点数量最多,约占雪崩灾害点总数的 94.3%,见图 5(j)。

## 4 雪崩易发性评价

### 4.1 雪崩易发性制图

基于 ArcGIS 平台,计算所选评价因子信息量值(表 3),使用空间分析工具中的重分类将信息量值赋给评价因子分级栅格,构建雪崩评价模型,结合地图代数处理工具计算各栅格的总信息量值,根据总信息量值大小依次自然断点法分为低易发区、中易发区、高易发区三类,得到雪崩易发性分区图(图 6)。

### 4.2 ROC 曲线检验

为了检验雪崩易发性区划结果的准确性,采用 ROC 曲线来检验雪崩易发性评价的精度,根据曲线下与坐标轴围成的面积 (*AUC*) 对其进行量化,取值范围

表 3 雪崩评价因子信息量

Table 3 Summary table of avalanche evaluation factors information

影响因子	分级	所占栅格数	$S_i/S$	雪崩数/个	$N_i/N$	$\ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \times 10^4$
高程/m	<3 500	773 678	0.332 7	0	0.000 0	-10 000
	3 500~3 800	361 921	0.155 7	5	0.071 4	-7 790
	3 800~4 100	404 881	0.174 1	23	0.328 6	6 349
	4 100~4 400	342 622	0.147 4	23	0.328 6	8 019
	4 400~4 700	251 617	0.108 2	11	0.157 1	3 730
	4 700~5 000	150 366	0.064 7	7	0.100 0	4 359
	>5 000	40 031	0.017 2	1	0.014 3	-1866
坡度/(°)	<20	395 019	0.170 3	7	0.100 0	-5 322
	20~30	433 150	0.186 7	23	0.328 6	5 652
	30~40	620 720	0.267 6	22	0.314 3	1 610
	40~50	526 804	0.227 1	13	0.185 7	-2011
	>50	344 244	0.148 4	5	0.071 4	-7 311

表 3(续)

影响因子	分级	所占栅格数	$S_i/S$	雪崩数/个	$N_i/N$	$\ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \times 10^4$
坡向	北	274 973	0.118 5	6	0.085 7	-3 241
	东北	380 618	0.164 1	12	0.171 4	439
	东	374 654	0.161 5	13	0.185 7	1 397
	东南	208 242	0.089 8	6	0.085 7	-461
	南	387 634	0.167 1	15	0.214 3	2 488
	西南	394 473	0.170 0	11	0.157 1	-789
	西	203 495	0.087 7	2	0.028 6	-11 217
	西北	95 848	0.041 3	5	0.071 4	5 475
坡面曲率/ $m^{-1}$	<-7.8	47 568	0.020 5	0	0.000 0	-10 000
	-7.8~-2.3	220 487	0.094 8	5	0.071 4	-2 834
	-2.3~0	911 810	0.392 2	27	0.385 7	-166
	0~6.8	1 086 647	0.467 3	36	0.514 3	957
	>6.8	58 634	0.025 2	2	0.028 6	1 249
地表切割深度/m	<5.0	464 283	0.198 9	10	0.142 9	-3 310
	5.0~9.6	813 384	0.348 5	38	0.542 9	4 433
	9.6~15	665 568	0.285 1	16	0.228 6	-2 211
	15~22	314 928	0.134 9	4	0.057 1	-8 591
	>22	76 041	0.032 6	2	0.028 6	-1 312
土地覆盖类型	耕地	2 005	0.000 9	0	0.000 0	-10 000
	林地	604 215	0.259 9	1	0.014 3	-29 010
	灌木	399 471	0.171 8	7	0.100 0	-5 413
	水体	12 408	0.005 3	0	0.000 0	-10 000
	裸地	1 238	0.000 5	0	0.000 0	-10 000
	冰雪	1 305 652	0.561 6	62	0.885 7	4 557
植被覆盖度	<0.025	1 738 908	0.747 9	44	0.628 6	-1 739
	0.025~0.05	208 206	0.089 6	25	0.357 1	13 833
	0.05~0.075	141 003	0.060 6	1	0.014 3	-14 458
	0.075~0.1	121 527	0.052 3	0	0.000 0	-10 000
	>0.1	115 290	0.049 6	0	0.000 0	-10 000
地形湿度指数	<5.1	624 456	0.269 2	11	0.157 1	-5 382
	5.1~6.8	864 592	0.372 7	24	0.342 9	-834
	6.8~8.8	601 375	0.259 2	25	0.357 1	3 205
	8.8~12	182 304	0.078 6	10	0.142 9	5 977
	>12	47 210	0.020 3	0	0.000 0	-10 000
年平均最低气温/ $^{\circ}C$	<-3.4	232 991	0.100 2	9	0.128 6	2 492
	-3.4~-1.8	163 430	0.070 3	2	0.028 6	-9 003
	-1.8~-0.2	206 279	0.088 7	9	0.128 6	3 710
	-0.2~1.4	512 660	0.220 5	16	0.228 6	359
	>1.4	1 209 587	0.520 3	34	0.485 7	-687
归一化差雪指数	<0.4	609 750	0.262 3	2	0.028 6	-22 172
	0.4~0.5	212 535	0.091 4	4	0.057 1	-4 701
	0.5~0.6	386 757	0.166 4	11	0.157 1	-572
	0.6~0.7	857 925	0.369 1	41	0.585 7	4 617
	>0.7	257 355	0.110 7	12	0.171 4	4 371

为 0 至 1, 当  $0.5 < AUC \leq 0.7$  时, 模型精度较差; 当  $0.7 < AUC \leq 0.8$  时, 评价准确性可以接受; 当  $0.8 < AUC \leq 0.9$  时, 模型具有较好的性能;  $AUC > 0.9$  则表明模型性能出色。

由于研究区范围较小, 雪崩灾害点数量较少, 因此

选取所有雪崩灾害点作为检验样本, 再通过 GIS 创建随机点来生成等量的随机样本, 共计 140 个样本数据, 提取样本总信息量值作为检验变量, 将验证样本赋值“1”以及随机样本赋值“0”作为状态变量, 进行 ROC 曲线分析, 得到结果见图 7, 从图 7 中可以看出  $AUC$  值为

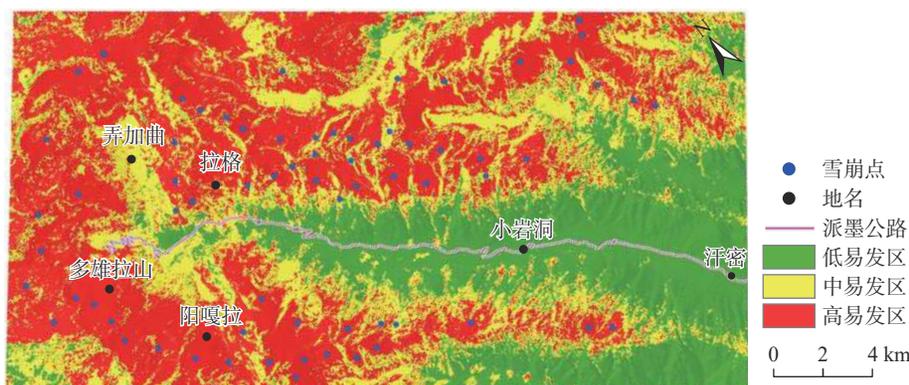


图 6 雪崩易发性分区图

Fig. 6 Avalanche susceptibility zoning map

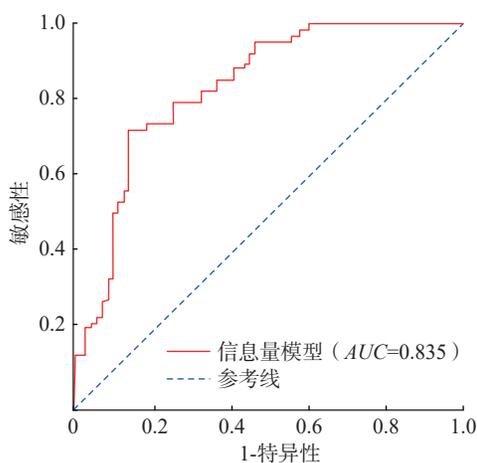


图 7 验证数据集 ROC 曲线

Fig. 7 ROC curve of the data set

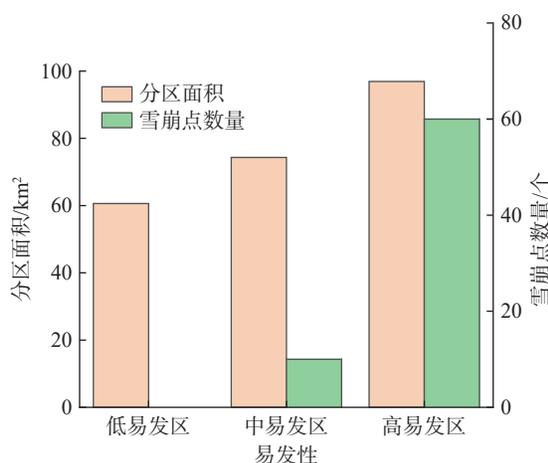


图 8 多雄河流域雪崩分区结果

Fig. 8 Results of avalanche zoning in the Duoxiong River Basin

0.835, 表明该模型具有较好的预测精度。

### 4.3 雪崩评价结果

雪崩易发性分区结果表明(表 4): 多雄河流域低易发区面积为 60.61 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 26.14%, 主要分布在 3 300 m 以下的低海拔地区, 区内未分布雪灾害点; 中易发区面积为 74.33 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 32.06%, 主要分布在弄加曲以及 3 300 ~ 3 700 m 区间的中低海拔地区, 区内分布有 10 处雪崩灾害点, 占雪崩点总数的 14.29%; 高易发区面积为 96.91 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 41.80%, 主要分布在 3 700 ~ 5 500 m 的中高海拔和高海拔地区, 区内分布有 60 处雪崩灾害点, 占雪崩灾害点总数的 85.71%, 分区结果柱状图见图 8。

表 4 雪崩分区结果

Table 4 Avalanche zoning results

易发性	面积/km <sup>2</sup>	面积占比/%	雪崩点数量/个	雪崩点占比/%
低易发区	60.61	26.14	0	0
中易发区	74.33	32.06	10	14.29
高易发区	96.91	41.80	60	85.71

### 4.4 多雄河流域雪崩防治建议

针对多雄河流域雪崩易发性分区结果, 结合国内外有关雪崩防护技术提出以下防护措施:

(1)高易发区: 多雄河流域靠近公路段的多雄拉山、拉格等高海拔地区雪崩灾害易发性较高, 为保障人员生命财产安全, 目前采取的主要措施为雪崩高发时间段关闭道路, 疏散人群, 但此举时间成本过高, 且不利于山区人们的交通出行。因此, 对于雪崩高易发区, 考虑高海拔和极端环境限制, 采用空-天-地一体化积雪动态监测手段。

主要监测思路: 地——在人为可抵达区域设立雪崩气象监测站, 对相关气候要素如大气压、温度、风速、风向、湿度、降水等进行监测, 了解导致雪崩活动的具体条件; 天——航空搭载激光扫描仪生成分布式积雪表面模型, 根据积雪物理参数(如密度、黏聚力、摩擦系数)计算雪崩发生的临界雪深值, 使用 GB-SAR 技术(地面干涉合成孔径雷达)穿透积雪, 已知雪密度的话可以计算雪深值; 空——结合卫星遥感数据进行积雪时空演

化规律分析,提供积雪分布信息。

当地面气象数据变化曲线呈现出明显的趋势,雪深监测数值接近临界雪深,且卫星数据提取积雪覆盖范围超过一定值时,应当及时通知有关道路部门紧急预警,封锁道路,采取定向爆破方式进行人工释放,将雪崩运动路径上的损失降至最低,待气象数据和雪深监测数值稳定后,清理道路恢复交通。

(2)中易发区:多雄河流域弄加曲以及 3 300~3 700 m 区间的中低海拔地区雪崩易发性中等,雪崩规模中等,冲击压力有限,可以采用雪崩防护措施进行预防,减少雪崩危害。

防护措施主要是在雪崩源区、雪崩流通区及雪崩堆积区搭建分区防护结构,防护思路为控制积雪的堆积或以运动形式减速及偏转。具体防护手段:雪崩源区——利用支撑结构防止雪崩释放,控制起始区雪的堆积,如雪堆围栏、雪网、挡风板、雪滑三脚架等;雪崩流通区——采取引导和偏转雪崩防护结构,使雪崩路径方向稳定或将其偏转到另一个方向,如雪崩导向坝(墙)、雪崩偏转坝(墙)等;雪崩堆积区——放置捕捉或减缓雪崩冲击的建筑物,如拦挡坝(墙)、冲击墙、雪崩阻断墙等<sup>[35]</sup>。

通过合理建造和布置雪崩防护结构,使其在应力承受能力、总重量、支撑反力大小和安装便利性之间达到最佳平衡<sup>[35]</sup>,有效控制雪崩发展带来的危害。

(3)低易发区:多雄河流域 3 300 m 以下的低海拔地区雪崩易发性较低,且一般靠近公路,因此雪崩防治措施主要是修建护坡工程保护公路遭受雪崩威胁,设立警示牌提醒行人注意安全。护坡工程:边坡设立拦网拦截雪体裹挟的块石树枝、公路两侧修建排水洞以便雪水消融后及时排出,颁布相应法规禁止对森林地区乱砍滥伐。

今后多雄河流域防灾减灾工作仍需要积极开展,有关部门应加强空-天-地一体化积雪动态监测和雪崩防护结构建造,结合相关研究机构查明雪崩的触发机制,实现让雪崩可预可防的治理目标。

## 5 结论

(1)采用皮尔逊相关性系数对高程、坡度、坡向、坡面曲率、地形起伏度、地面粗糙度、高程变异系数、地表切割深度、植被覆盖度、地形湿度指数、年平均降雨量、年平均最低气温、年平均最大风速,归一化差雪指数进行多重共线性分析。根据容忍度和方差膨胀因子结果,最终选取高程、坡度、坡向、坡面曲率、地表切割

深度、地表覆盖类型、植被覆盖度、地形湿度指数、年平均最低气温、归一化差雪指数等 10 个评价因子构建雪崩易发性评价模型;

(2)基于 ArcGIS 平台计算评价因子信息量值,利用空间叠加分析功能进行雪崩易发区分区,将研究区分为低易发区、中易发区、高易发区,并使用 ROC 曲线验证模型评价精度,结果表明 AUC 值为 0.835,预测精度较高;

(3)基于信息量模型划分的低易发、中易发、高易发区面积分别为 60.61 km<sup>2</sup>、74.33 km<sup>2</sup>、96.91 km<sup>2</sup>,分布占研究区总面积的 26.14%、32.06%、41.80%,且有 85.71% 的雪崩灾害点分布在高易发区,与野外调查结果较吻合。

(4)根据雪崩易发性分区结果,对不同雪崩分区提出相应监测预警技术和防护结构措施,减少时间成本和经济损失,以期多雄河流域防灾减灾提供技术支撑和科学参考。

## 参考文献(References):

- [1] NASERY S, KALKAN K. Snow avalanche risk mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis: The case of Van, Turkey [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(9): 782.
- [2] 舒晓燕,巫锡勇,文洪,等.新疆天山伊阿铁路区域雪崩易发性与潜在释放区识别对比研究[J].*工程地质学报*, 2023, 31(4): 1200-1212. [SHU Xiaoyan, WU Xiyong, WEN Hong, et al. Comparison of snow avalanche susceptibility assessment and potential snow avalanche release areas identification along Yining-Aksu railway, Xinjiang Tianshan Mountains [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(4): 1200-1212. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张根,孙春卫,杨成业,等.帕隆藏布流域沟槽型雪崩发育特征及分布规律研究[J].*高原科学研究*, 2021, 5(1): 35-43. [ZHANG Gen, SUN Chunwei, YANG Chengye, et al. Study on the developmental characteristics and distribution pattern of grooved avalanche in Palongzangbu River Basin [J]. *Plateau Science Research*, 2021, 5(1): 35-43. (in Chinese with English abstract)]
- [4] KUMAR S, SRIVASTAVA P K, SNEHMANI, et al. Geospatial probabilistic modelling for release area mapping of snow avalanches [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 165: 102813.
- [5] KUMAR S, SRIVASTAVA P K, GORE A, et al. Fuzzy-frequency ratio model for avalanche susceptibility mapping [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(12): 1168-1184.
- [6] KUMAR S, SRIVASTAVA P K, SNEHMANI. Geospatial

- modelling and mapping of snow avalanche susceptibility [ J ] . *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2018, 46(1): 109 – 119.
- [ 7 ] AKBAR M, BHAT M S, CHANDA A, et al. Integrating traditional knowledge with GIS for snow avalanche susceptibility mapping in Kargil-Ladakh Region of trans-himalayan India [ J ] . *Spatial Information Research*, 2022, 30(6): 773 – 789.
- [ 8 ] VAROL N. Avalanche susceptibility mapping with the use of frequency ratio, fuzzy and classical analytical hierarchy process for Uzungol Area, Turkey [ J ] . *Cold Regions Science and Technology*, 2022, 194: 103439.
- [ 9 ] YARIYAN P, OMIDVAR E, MINAEI F, et al. An optimization on machine learning algorithms for mapping snow avalanche susceptibility [ J ] . *Natural Hazards*, 2022, 111(1): 79 – 114.
- [ 10 ] YANG Jinming, HE Qing, LIU Yang. Winter–spring prediction of snow avalanche susceptibility using optimisation multi-source heterogeneous factors in the western Tianshan Mountains, China [ J ] . *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1340.
- [ 11 ] CHOUBIN B, BORJI M, MOSAVI A, et al. Snow avalanche hazard prediction using machine learning methods [ J ] . *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 123929.
- [ 12 ] BIAN Rui, HUANG Kaiyang, LIAO Xin, et al. Snow avalanche susceptibility assessment based on ensemble machine learning model in the central Shaluli Mountain [ J ] . *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 880711.
- [ 13 ] LIU Yang, CHEN Xi, YANG Jinming, et al. Snow avalanche susceptibility mapping from tree-based machine learning approaches in ungauged or poorly-gauged regions [ J ] . *Catena*, 2023, 224: 106997.
- [ 14 ] 文洪, 王栋, 王生仁, 等. 藏东南帕隆藏布流域雪崩关键影响因素与易发性区划研究 [ J ] . *工程地质学报*, 2021, 29(2): 404 – 415. [ WEN Hong, WANG Dong, WANG Shengren, et al. Key predisposing factors and susceptibility mapping of snow avalanche in Parlung-Tsangpo catchment, southeast Tibetan Plateau [ J ] . *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(2): 404 – 415. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 文洪, 巫锡勇, 赵思远, 等. 基于机器学习法的青藏高原沙鲁里山系中段雪崩易发性评价研究 [ J ] . *冰川冻土*, 2022, 44(6): 1694 – 1706. [ WEN Hong, WU Xiyong, ZHAO Siyuan, et al. Snow avalanche susceptibility evaluation in the central Shaluli Mountains of Tibetan Plateau based on machine learning method [ J ] . *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(6): 1694 – 1706. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] LIU Yinhe, ZHONG Yanfei, MA Ailong, et al. Cross-resolution national-scale land-cover mapping based on noisy label learning: A case study of China [ J ] . *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 118: 103265.
- [ 17 ] 杨得虎, 朱杰勇, 刘帅, 等. 基于信息量、加权信息量与逻辑回归耦合模型的云南罗平县崩滑灾害易发性评价对比分析 [ J ] . *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(5): 43 – 53. [ YANG Dehu, ZHU Jieyong, LIU Shuai, et al. Comparative analyses of susceptibility assessment for landslide disasters based on information value, weighted information value and logistic regression coupled model in Luoping County, Yunnan Province [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(5): 43 – 53. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 孙小勇, 魏龙, 唐华, 等. 基于 GIS 的崩滑地质灾害孕灾地质条件分析——以西藏嘉黎县为例 [ J ] . *中国地质调查*, 2024, 11(4): 92 – 100. [ SUN Xiaoyong, WEI Long, TANG Hua, et al. Analysis of the disaster-pregnancy geological conditions of collapse and landslide based on GIS: A case study of Jiali County in Tibet [ J ] . *Geological Survey of China*, 2024, 11(4): 92 – 100. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 李信, 薛桂澄, 柳长柱, 等. 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*, 2022, 28(2): 294 – 305. [ LI Xin, XUE Guicheng, LIU Changzhu, et al. 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*, 2022, 28(2): 294 – 305. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等. 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*, 2018, 26(2): 340 – 347. [ FAN Zhiyin, GOU Xiaofeng, QIN Mingyue, et al. Information and logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of geological hazards [ J ] . *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(2): 340 – 347. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 杜国梁, 杨志华, 袁颖, 等. 基于逻辑回归-信息量的川藏交通廊道滑坡易发性评价 [ J ] . *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 102 – 111. [ DU Guoliang, YANG Zhihua, YUAN Ying, et al. Landslide susceptibility mapping in the Sichuan-Tibet traffic corridor using logistic regression-information value method [ J ] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 102 – 111. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] 孙滨, 祝传兵, 康晓波, 等. 基于信息量模型的云南东川泥石流易发性评价 [ J ] . *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(5): 119 – 127. [ SUN Bin, ZHU Chuanbing, KANG Xiaobo, et al. Susceptibility assessment of debris flows based on information model in Dongchuan, Yunnan Province [ J ] . *The*

- Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 119 – 127. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] 陈晓利, 周本刚, 冉洪流, 等. 汶川地震中擂鼓镇地区的滑坡崩塌规律及预测 [ J ] . 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(6): 1371 – 1379. [ CHEN Xiaoli, ZHOU Bengang, RAN Hongliu, et al. Analysis and prediction of the spatial distribution of landslides triggered by Wenchuan earthquakes in leiguzhen region [ J ] . Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(6): 1371 – 1379. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 24 ] 张清全. 帕隆藏布干流沟槽型雪崩空间分异特征及易发性评价研究 [ D ] . 成都: 西南交通大学, 2021. [ ZHANG Qingquan. Spatial differentiation characteristics and susceptibility assessment of channeled snow avalanche in Parlung-Tsangpo main stream [ D ] . Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 25 ] PARSHAD R, SRIVASTVA P K, SNEHMANI, et al. Snow avalanche susceptibility mapping using remote sensing and GIS in Nubra-Shyok Basin, Himalaya, India [ J ] . Indian Journal of Science and Technology, 2017, 10(31): 1 – 12.
- [ 26 ] SCHWEIZER J, BRUCE JAMIESON J, SCHNEEBELI M. Snow avalanche formation [ J ] . Reviews of Geophysics, 2003, 41(4): 1016.
- [ 27 ] TAMURA R, KOBAYASHI K, TAKANO Y, et al. Mixed integer quadratic optimization formulations for eliminating multicollinearity based on variance inflation factor [ J ] . *Journal of Global Optimization*, 2019, 73(2): 431 – 446.
- [ 28 ] SCHWEIZER J, JAMIESON J B. Snow cover properties for skier triggering of avalanches [ J ] . Cold Regions Science and Technology, 2001, 33(2/3): 207 – 221.
- [ 29 ] 王世金, 任贾文. 国内外雪崩灾害研究综述 [ J ] . 地理科学进展, 2012, 31(11): 1529 – 1536. [ WANG Shijin, REN Jiawen. A review of the progresses of avalanche hazards research [ J ] . Progress in Geography, 2012, 31(11): 1529 – 1536. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 30 ] 边瑞. 基于集成机器学习模型的沙鲁里山系中段雪崩易发性评价研究 [ D ] . 成都: 西南交通大学, 2021. [ BIAN Rui. Snow avalanche susceptibility assessment based on ensemble machine learning model in the central Shaluli Mountain [ D ] . Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 31 ] 陈联君. 基于多源数据的雪崩危险性评价——以北疆地区为例 [ D ] . 武汉: 中国地质大学, 2021. [ CHEN Lianjun. Avalanche hazard assessment based on Multi-Source data [ D ] . Wuhan: China University of Geosciences, 2021. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 32 ] XI Ning, MEI Gang. Avalanche susceptibility mapping by investigating spatiotemporal characteristics of snow cover based on remote sensing imagery along the pemo highway: A critical transportation road in Tibet, China [ J ] . *Water*, 2023, 15(15): 2743.
- [ 33 ] 江琪, 季民. 淮北市植被覆盖度提取及时空变化分析研究 [ J ] . 测绘与空间地理信息, 2023, 46(10): 85 – 88. [ JIANG Qi, JI Min. Extraction of vegetation cover and analysis of spatial and temporal changes in Huaibei City [ J ] . *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2023, 46(10): 85 – 88. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 34 ] HEYWOOD L. Rain on snow avalanche events—some observations [ C ] //Proceedings of the 1988 international snow science workshop. 1988: 135 – 136.
- [ 35 ] RUDOLF-MIKLAU F, SAUERMOSEER S, MEARS A I. The technical avalanche protection handbook [ M ] .2014.