

冶力关国家地质公园崩滑—碎屑流危险性评价初探

施紫越¹, 辛存林¹, 焦志鹏¹, 刘海博^{1,2}, 刘 昕³

(1.西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070;

2.中国地震局 地震预测研究所, 北京 100036; 3.兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

摘 要:“崩滑—碎屑流”是包含有崩塌、滑坡、泥石流的一类特殊运动形式,具有速度快、滑程远、危险性高等特征,确定其分布区域是进行灾害防治的基础。冶力关国家地质公园地处青藏高原东北缘,区内地质环境条件复杂,中小规模崩滑—碎屑流在园区局部呈密集分布。选取 11 个相关影响因素,借助 ArcGIS 与 maxEnt 进行崩滑—碎屑流的危险性评价。结果表明:崩滑—碎屑流主要发育在石炭纪、二叠纪地层中,基岩表面多裸露、破碎,物源类型以风化岩质为主;极高危险区与高危险区位于研究区的西北部 and 南部,占总面积的 8.71%;maxEnt 训练数据集的 AUC 值为 0.982,测试数据集的 AUC 值为 0.964,灾害点密度随危险性等级的升高而增加,与危险性等级的划分原则相符。该研究结果反映了在高寒气候环境下,极低的地表温度与反复冻融的冻胀力不直接诱发崩滑—碎屑流,但昼夜温差与季节性温差可能加速了岩土体的崩解变形与裂隙扩大,同时 maxEnt 的高精度评价能够为同类型地质公园的灾害治理及其评价提供借鉴。

关键词:冶力关; 崩滑—碎屑流; 高寒区; 危险性评价; maxEnt

中图分类号:P694

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0411-08

Preliminary Analysis on Hazard Risk Assessment on Rockslide-Debris Flow of Yeligan National Geopark

SHI Ziyue¹, XIN Cunlin¹, JIAO Zhipeng¹, LIU Haibo^{1,2}, LIU Xin³

(1.College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University,

Lanzhou 730070, China; 2.Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration,

Beijing 100036, China; 3.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Rockslide-debris flow is a special movement form including collapse, landslide and debris flow, which has the characteristics of high speed, long sliding range and high risk. The identification of its distribution area is the basis of disaster prevention and control. Yeligan National Geopark is located in the northeast margin of the Qinghai-Tibet Plateau, small and medium-sized rockslide-debris flows densely distributed in the part of the geopark of complex geological environment. Based on the field investigation, 11 influencing factors were selected to assess rockslide-debris flow hazard risk by adopting ArcGIS and maxEnt. The results showed that the rockslide-debris flows mainly developed in the Carboniferous and Permian strata with exposed and broken bedrock surface, the main source of rockslide-debris flow was type of rock; the extremely high-risk area and high-risk area were located in the northwest and south of the study area, accounting for 8.71% of the total area; the AUC values of maxEnt training data set and testing data set were 0.982 and 0.964, respectively, the density of hazard points increased with the ascent of risk grade, which was consistent with the principle of risk grade. The results reflect that rockslide-debris flow was not directly caused by the extremely low surface temperature and the frost heaving force of repeated freezing in the alpine climate environment of the study area, however, the temperature difference between day and night with seasonal temperature difference may accelerate the disintegrating deformation and cracking expansion of rock mass.

收稿日期:2020-02-03

修回日期:2020-05-13

资助项目:国家自然科学基金项目(41262001);甘肃省地矿局地质遗迹调查研究科研专题(SKY-2018)

第一作者:施紫越(1993—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,研究方向为山地灾害风险评价。E-mail:Guy1105_szy@163.com

通信作者:辛存林(1967—),男,甘肃秦安人,教授,博士生导师,研究方向为第四纪地质灾害与环境。E-mail:xcunlin@nwnu.edu.cn

Meanwhile, high-precision evaluation of maxEnt can objectively provide reference for hazard management and evaluation in similar geoparks.

Keywords: Yeliguan; rockslide-debris flow; alpine region; risk assessment; maxEnt

“崩滑—碎屑流”是我国典型的链式地质灾害,作为一种特殊的地表过程,其形成条件受到区域地质环境、多相介质融合等复杂因素的影响,通常具有速度快、滑程远、常转向等特征,在其运动过程中若遇到江、河、湖,极有可能出现水体被堵塞形成堰塞湖的情况,对下游地区的生命财产安全往往构成溃决威胁^[1]。在高陡的坡度条件下,崩滑体的重力势能转化为动能,不仅使其解体碰撞碎屑化,还形成了碎屑流运动的初始速度,在后续的滑动过程中,碎屑流可历经多级地形陡坎,再次将部分势能迅速转化为动能,极具冲击性与摧毁性^[2]。

目前,国内外关于崩滑—碎屑流的研究主要集中于遥感解译、室内试验、滑动距离分析等方面:夏式伟分析了西藏易贡高速远程滑坡特征,建立了堰塞坝溃决的三维数值模拟模型^[3]; Keith Delaney 等利用 DEM 数据、Landsat 影像和动态滑坡建模方法对西藏易贡大型滑坡—碎屑流事件进行了回顾,对易贡堰塞湖的体积进行确认^[4]; 郑鸿超等对崩滑—碎屑流的堵江模式及相关数值模拟方法进行了总结与探讨^[5]; Jeffrey Kargel 等对 2015 年尼泊尔戈尔喀 7.8 级地震进行分析,认为区域地貌、地质构造和岩性对地震引起的崩滑—碎屑流灾害链起到了控制作用^[6]; 夏式伟等对芦山地震诱发的汤家沟碎屑流事件进行了滑坡全过程的动态模拟^[7]; 李从容等对在汶川地震后记录了 2008—2016 年降雨期间发生的滑坡—碎屑流事件,提出了在强降雨条件下高海拔地区更易发生新的滑坡和岩土体膨胀过程,为碎屑流提供了松散物源^[8]。尤其是在 2000 年西藏易贡藏布滑坡—碎屑流和 2008 年汶川地震发生后,我国山区崩滑—碎屑流形成模式及其环境效应逐渐成为地质灾害链的研究热点^[9-11],基于数值模拟的动力学特征分析也有所侧重,但针对崩滑—碎屑流的危险性评价内容仍相对缺乏。

治力关国家地质公园的崩滑—碎屑流发育史在我国西部十分罕见,虽尚未对园区建设与旅游安全产生影响,但相关危险性研究还未见具体报道,评价工作迫切需要进行。maxEnt 模型是基于机器学习和数理统计方法的预测物种地理分布的生态位模型^[12],即探寻与物种“已知分布位置点”环境变量特征相同的评价单元^[13],现已逐步应用于农业生产预测^[14]、物种生境分析^[15]、滑坡易发性评价等^[16]方面。鉴于此,本文利用 ArcGIS 与 maxEnt 进行园区的崩滑—碎屑流危险性评价,探讨

不同因素对崩滑—碎屑流的影响,以期为同类型地质公园的防灾减灾提供新的认识。

1 研究区概况

公园位于甘南藏族自治州临潭县东北部,地处青藏高原与黄土高原的过渡地带,海拔 2 110~3 900 m,地势南北高、中部低。区内属高寒湿润型气候,多年平均气温 3.2℃,平均无霜期仅 65 d,降水主要集中于 5—9 月,多年平均降水量约 518 mm^[17]。公园位于西秦岭北缘构造带西端,西北部、东南部发育有北西向断裂,主要出露地层为第四系、新近系、二叠系和石炭系,岩浆活动程度极低,仅有燕山期侵入岩零星分布。新构造运动造就了区内间歇性隆升、多期夷平面与深切峡谷、侵蚀—堆积阶地等主要地貌特征。园区属于中强震扰动区和潜在强震区,其周边分布有临潭—岷县—宕昌活动断裂和光盖山—迭山活动断裂,历史上发生 $M_s \geq 5.0$ 的破坏性地震 3 次,一定程度上降低了区内山体临空面的稳定性。

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究区内共查明中小规模的崩滑—碎屑流灾害点 65 处,初步确定地形因素、地质条件、地震活动和气候条件是崩滑—碎屑流的孕灾环境,并提取高程、坡度、地表粗糙度、地层岩性、距断裂距离、地震动峰值加速度、距水系距离、5—9 月平均降水量、植被覆盖度、地表温度、季节性冻土冻结深度为影响因素(表 1)。

2.2 研究方法

maxEnt 模型的特征函数 $f(x, y)$ 可描述 x, y 的某种定性关系,当 x, y 满足特定条件时,特征函数赋值为 1;不满足特定条件时,特征函数赋值为 0。给定一个约束条件,将训练数据视为随机变量 (X, Y) 产生,用 $Ep(f)$ 表示特征函数 $f(x, y)$ 关于经验分布 $P(X, Y)$ 的期望,如下式:

$$Ep(f) = \frac{1}{N} \sum_{x,y} f(x, y) \quad (1)$$

若满足约束条件,则 $P(Y|X)$ 关于函数 f 的期望,与经验分布关于 $f(x, y)$ 的期望相等:

$$Ep(f) = \sum_{x,y} P(x, y) f(x, y) \approx \sum_{x,y} P(x) P(y|x) f(x, y) \quad (2)$$

再转化为求解附带约束条件的最优化问题,引入

拉格朗日算子 x 、归一化指数 $\exp(1-w)$,令 $Zw(x)$ 表示 $\exp(1-w)^{[18]}$,有:

$$P\tau w(y|x)=\frac{1}{Zw(x)}\exp[\sum_{i=1}^nw_if_i(x,y)] \quad (3)$$

表 1 影响因素数据来源

影响因素	数据类型	数据源
高程	连续变量/栅格	中国科学院资源环境数据云平台 ASTER GDEM
坡度	连续变量/栅格	中国科学院资源环境数据云平台 ASTER GDEM
地表粗糙度	连续变量/栅格	中国科学院资源环境数据云平台 ASTER GDEM
地层岩性	连续变量/矢量	甘肃省 1:25 万地质图
距断裂距离	连续变量/矢量	甘肃省 1:25 万地质图
地震动峰值加速度	连续变量/g	中国地震动参数区划图
距水系距离	连续变量/矢量	甘肃省水系分布图
植被覆盖度	连续变量/栅格	美国国家航空航天局 EOS/MODIS
5—9 月平均降水量	连续变量/mm	中国地面气候资料月值数据集
地表温度	连续变量/℃	中国地面气温月值格点数据集
季节性冻土冻结深度	连续变量/m	国家冰川冻土沙漠科学数据中心

3 崩滑—碎屑流危险性评价

3.1 影响因素相关特征

3.1.1 高 程 将研究区的高程划分为 2 110~2 400 m, 2 400~2 600 m,2 600~2 800 m,2 800~3 000 m, 3 000~3 900 m 共 5 个级别,由图 1A 可知,崩滑—碎屑流发生最多的高程位于 2 400~2 800 m,灾害点密度达 37 个/km²。

3.1.2 坡 度 坡度反映了地表单元的陡缓程度,是分析崩滑—碎屑流形成条件、危险性的重要基础数据。将研究区的坡度划分为 0°~15°,15°~30°,30°~45°,45°~74°,由图 1B 可知,崩滑—碎屑流发生最多的坡度位于 15°~30°,灾害点密度达 19 个/km²。

3.1.3 地表粗糙度 地表粗糙度是地球表面粗糙程度的示量,在一定程度上体现了地形起伏的特征,是构成崩滑—碎屑流微地貌的重要条件之一。计算公式如下:

$$F_{sr}=\frac{1}{\cos(F_{Slope}\times3.14/180)} \quad (4)$$

式中: F_{sr} 为某一点的地表粗糙度; F_{Slope} 为某一点的坡度。将研究区的地表粗糙度划分为 1~1.08,1.08~1.21,1.21~1.46,1.46~2.06,2.06~3.9,由图 1C 可知,地表粗糙度为 1~1.08 时,崩滑—碎屑流分布密度最高,灾害点密度达 25 个/km²。

3.1.4 地层岩性 在一个区域内,可供崩塌、滑坡等形成的固体物质量首先取决于地质因素,软弱或软硬均有分布的岩层易遭到破坏与侵蚀^[19],是影响崩滑—碎屑流暴发的重要地质因素。研究区石炭纪、二叠纪地层的岩体节理裂隙发育、岩体较为破碎,其中崩滑—碎屑流发育于石炭纪地层的比例最高,灾害点

密度达 41 个/100/km²,其次为二叠纪地层,灾害点密度达 3 个/km²(图 1D)。

3.1.5 距断裂距离 研究区内发育北西向断裂,其延伸方向是地表岩体的破碎集中带,断裂活动及其对地下水的控制作用往往影响着山体危岩区域的稳定程度。将研究区的距断裂距离划分为<1 km,1~2 km,2~3 km,3~5 km,>5 km,65 处灾害点全部分布于距断裂距离 2 km 之内,而距断裂 1 km 之内发生了 41.5%以上的崩滑—碎屑流,灾害点密度达 18 个/km²(图 1E)。

3.1.6 地震动峰值加速度 研究区属西秦岭北缘构造区,频繁的地震活动通常使得岩体的破碎程度加剧。65 处灾害点全部分布于地震动峰值加速度为 0.2 g 的区域内,地震引起崩滑—碎屑流的危险性极高(图 1F)。

3.1.7 距水系距离 现代河流的侵蚀切割作用与地质灾害的发生密切相关,主要水系通常沿河谷分布,河谷下切时剥蚀形成临空面,因此水系两岸多成为地质灾害的形成部位^[20]。研究区的崩滑—碎屑流点多分布于石门河、后山河附近,将距水系距离划分为<250 m,250~500 m,500~800 m,800~1 000 m,>1 000 m 共 5 个级别。从总体上看,距水系 500 m 之内发育的灾害点最多,密度达 8 个/km²(图 1G)。

3.1.8 5—9 月平均降水量 降水可使得边坡潜在滑动面上的有效应力与抗剪强度下降,是诱发崩滑—碎屑流的水动力因素。将研究区 5—9 月平均降水量划分为 62~72 mm,72~82 mm 两个级别,灾害点密度分别为 15 个/100/km²,28 个/km²(图 1H)。

3.1.9 植被覆盖度 植被覆盖度与 NDVI 之间存在极为显著的线性相关关系,通常根据两者之间的转换

关系可提取植被覆盖信息^[21-22], NDVI 值的高或低都可能对崩滑—碎屑流产生不同的影响。NDVI 的计算公式为:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (5)$$

式中:IR 为红外波段的像素值;R 为红光波段的像素值。以寒生植物为优势种的草原植被、以粗叶云杉为优势种的森林植被是研究区的两大植被类型。将研究区的 NDVI 划分为 0.68~0.81, 0.81~0.88 两个级别, 由图 1I 可知, 植被覆盖度为 0.68~0.81 时, 崩滑—碎屑流的分布密度最高, 灾害点密度达 28 个/km²。

3.1.10 地表温度 研究区位于青藏高原东北缘的高寒区, 年均气温约 3℃, 年均地表温度不超过 11℃, 在此气候条件下物理风化作用较为强烈, 加速了岩体的风化剥蚀。将研究区的地表温度划分为 4.74~6.83℃, 6.83~7.96℃, 7.96~8.84℃, 8.84~9.67℃, 9.67~11℃ 共 5 个级别, 由图 1J 可知, 地表温度在 7.96~8.84℃ 时, 崩滑—碎屑流的分布密度最高, 灾害点密度达 21 个/km²。

3.1.11 季节性冻土冻结深度 研究区冻土类型属浅季节性冻土, 最大季节冻结深度不超过 1 m, 是高寒区气候作用下反复冻融的显著特征之一。由图 1K 可知, 65 处灾害点均分布于浅季节性冻土区域之中, 引起崩滑—碎屑流的危险性可能较高。

3.2 影响因素多重共线性分析

多重共线性是一个模型中预测变量与其他预测变量相关时所发生的条件, 为检验所选取影响因素的独立性, 需要对因素的关联性进行多重共线性分析, 避免出现因素的高度相关性而使模型结果失真^[23]。从崩滑—碎屑流灾害点中随机选取 80% 的样本点作为 maxEnt 模型的测试数据, 并提取每个样本所对应的 11 类影响因素分级值。方差膨胀系数(VIF)可用于预测变量的相关性时, 度量回归系数方差增加的幅度, 通常以 10 作为其判断边界, 若 VIF<10, 不存在多重共线性; 若 10≤VIF<100, 存在较强的多重共线性; 若 VIF≥100, 则存在严重的多重共线性。在 SPSS 软件中进行多重共线性诊断, 统计其方差膨胀系数与容忍度, 根据分析结果, 所有影响因素的方差膨胀系数均小于 5, 容差均小于 1, 说明因素间出现多重共线性的可能性极低(表 2)。

3.3 评价结果与分析

根据 maxEnt 对栅格图层变量与坐标数据的读取要求, 11 类影响因素的栅格数据通过 ArcGIS 转换为 ASCII 格式文件, 将经纬度属性的崩滑—碎屑流点转换为 CSV 格式文件。同时为了消除运算随机性所带来的

影响, 将 maxEnt 运行次数设置为 50 次, 将输出的 ASCII 格式数据在 ArcGIS 中转换为标准的 GRID 格式数据, 输出类型为 FLOAT。研究区崩滑—碎屑流的危险性值为 [0, 1], 利用自然断点法对结果进行重分类(图 2), 将其分为极高危险区(0.6~1)、高危险区(0.32~0.6)、中危险区(0.1~0.32)和极低危险区(0~0.1)。

同时, 在 maxEnt 中以“JACKKNIFE”方式输出 11 类影响因素对崩滑—碎屑流危险性的相对贡献率, 其中白色柱代表某影响因素单独作用下崩滑—碎屑流发生的概率, 白色柱越长, 该因素对崩滑—碎屑流的影响越显著; 网状柱表示该因素之外的其他变量相对贡献率的总和; 单斜状柱表示所有影响因素的相对贡献率总和。由图 3 可知, 在地震动峰值加速度、地层岩性、距断裂距离的单独影响下, 崩滑—碎屑流的发生概率均超过 0.75; 在高程、距水系距离和坡度的单独影响下, 崩滑—碎屑流的发生概率均超过 0.65。而在 11 类影响因素的综合作用下, 崩滑—碎屑流的发生概率超过 0.95。

极高危险区和高危险区集中分布于天池治海景区、赤壁幽谷景区、冶木峡景区和亲昵沟景区, 区内岩层风化程度较高, 高程在 2 500 m 以上, 坡度在 30°~45°, 受地震活动影响强烈。极低危险区占研究区面积的 83.98%, 无灾害点分布, 而极高危险区占比 3.75%, 分布有 42 处灾害点, 表明随着崩滑—碎屑流危险性的升高, 灾害点数量与点密度随之增大, 二者呈显著的正相关关系(表 3), 与危险性划分等级相一致。

通过生成影响因素的响应曲线, 可获得研究区崩滑—碎屑流的发生概率与影响因素之间的规律(图 4), 其中横坐标表示各影响因素的属性, 纵坐标表示崩滑—碎屑流的发生概率。在 11 类影响因素中, 高程、地表温度与植被覆盖度的响应曲线呈“抛物线”状, 整体为先增大后减小的趋势, 在曲线达到峰值前, 崩滑—碎屑流的发生概率随高程、地表温度与植被覆盖度的增加而上升; 坡度、地层岩性、距断裂距离、5—9 月平均降水量与崩滑—碎屑流的发生概率呈负相关关系, 表现为坡度在 0°~30°、地层岩性为石炭系灰岩、距断裂距离 2 km 之内、5—9 月平均降水量为 72 mm 时, 崩滑—碎屑流的发生概率较高; 由于地震动峰值加速度和季节性冻土冻结深度为单一值, 故其响应曲线为一条水平线, 地震动峰值加速度对崩滑—碎屑流的影响最高, 而季节性冻土冻结深度对崩滑—碎屑流的影响相对较低, 但在高寒区气候条件下, 不可忽略反复冻融时的冻土冻胀力改变表层岩土体的结构或促使岩体裂隙扩大的影响。

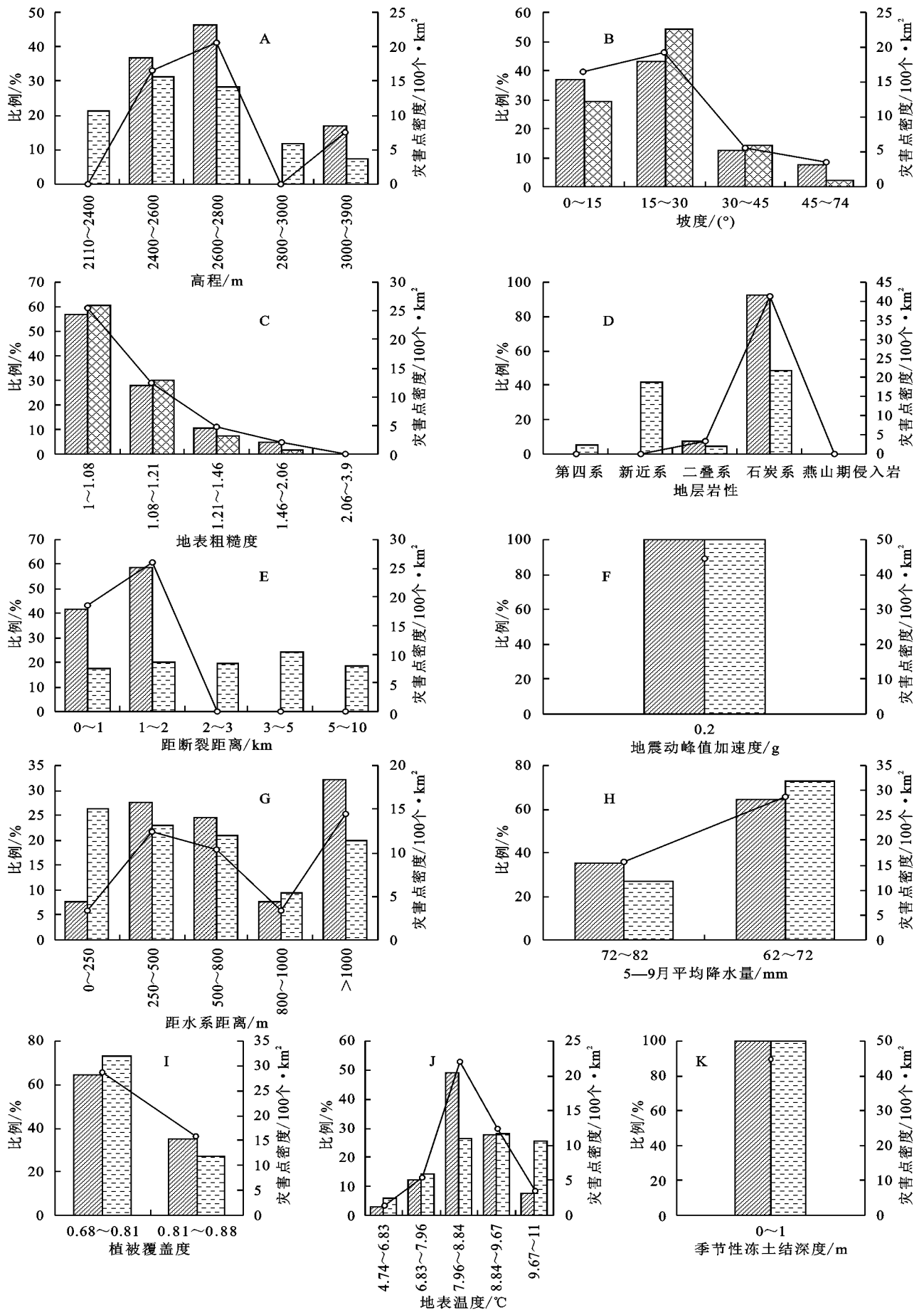


图1 影响因素分级及灾害点密度

表 2 影响因素方差膨胀系数及容忍度值

影响因素	多重共线性诊断	
	方差膨胀系数	容忍度
高程	3.84	0.24
坡度	2.67	0.37
地表粗糙度	1.56	0.64
地层岩性	1.32	0.76
距断裂距离	1.73	0.58
地震动峰值加速度	4.11	0.24
距水系距离	2.57	0.39
5—9 月平均降水量	1.05	0.95
植被覆盖度	1.72	0.58
地表温度	2.766	0.36
季节性冻土冻结深度	1.89	0.53

表 3 基于 maxEnt 的崩滑—碎屑流危险区统计

危险性 分区	灾害点 数量/处	灾害点 百分比/%	面积/ km ²	面积 百分比/%	灾害点密度/ (100 个·km ⁻²)
极低危险区	0	0	118.12	83.98	0
中危险区	8	12.3	10.29	7.32	5
高危险区	15	23.1	6.97	4.96	10
极高危险区	42	64.6	5.27	3.75	29

3.4 评价结果检验

评价结果的精度可通过 ROC 曲线进行检验,可反映 maxEnt 在不同阈值时的敏感性和精确性的趋势走向,目前已广泛、成熟地运用于地质灾害分级评价中^[24-26]。随机选取崩滑—碎屑流点中的 80%为训练数据,20%为测试数据,用以评价 maxEnt 运行的准确度。根据 ROC 检验结果,训练数据集的 AUC 值为 0.982,测试数据集的 AUC 值为 0.964(图 5),表明 maxEnt 运行结果具有很高的精度,适用于研究区崩滑—碎屑流的危险性评价。

4 结论

本文初步确定了冶力关国家地质公园的崩滑—碎屑流孕灾环境,梳理了典型崩滑—碎屑流的发育特征,基于 ArcGIS 与 maxEnt 探讨了崩滑—碎屑流的危险性分布,得到如下结论及认识:

(1) 崩滑—碎屑流共发育 65 处,集中分布于天池冶海景区和亲昵沟景区,崩滑物源类型以岩质为主,发育地层为石炭系与二叠系,基岩表面多裸露、破碎。部分崩源区可见零星掉块与崩塌落石,危岩区周围岩体未发现明显的变形迹象。

(2) 通过量化 11 类影响因素对崩滑—碎屑流的相对贡献率,认为地震动峰值加速度、地层岩性、距断裂距离是主导因素,高程、距水系距离、坡度和植被覆盖度对崩滑—碎屑流也产生较大影响。在高寒区气候条件下,极低的地表温度与反复冻融的冻胀力不直接诱发崩滑—碎屑流,但昼夜温差与季节性温差可能加速了岩土体的崩解变形与裂隙的扩大。

(3) 极高危险区和高危险区占研究区面积的 8.71%,灾害点占比 87.69%,灾害点密度随危险性等级的升高而增加,与危险性等级的划分原则相符、与实际情况吻合。根据 ROC 检验结果,训练数据集的 AUC 值为 0.982,测试数据集的 AUC 值为 0.964,表明 maxEnt 适用于研究区的崩滑—碎屑流危险性评价。

(4) 鉴于园区地质环境条件的复杂性,地质公园管理部门应详细评估崩滑—碎屑流对旅游线路规划及工程建设的潜在影响,建议以逐点、逐段的方式来排查相关隐患,使得评价结果更具有可操作性。

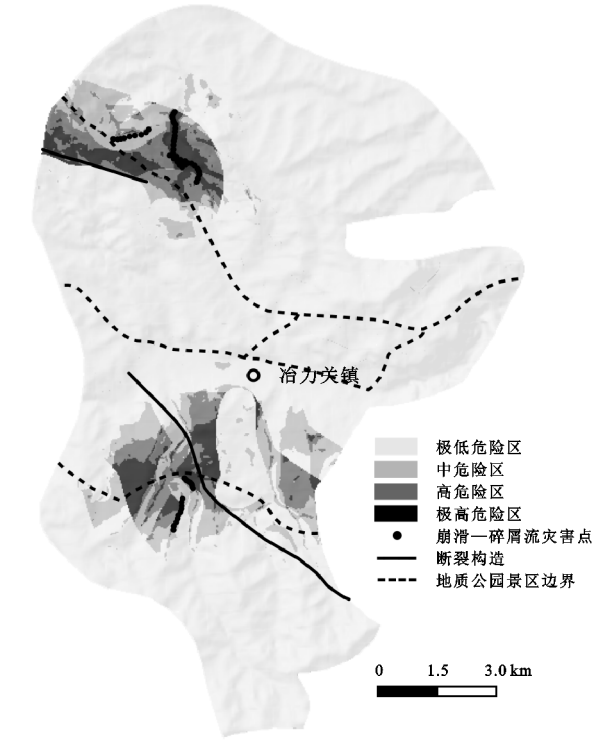


图 2 基于 maxEnt 的崩滑—碎屑流危险性分区

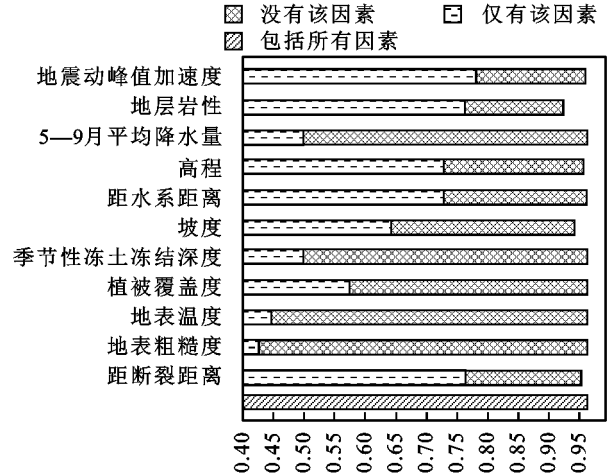


图 3 影响因素的相对贡献率

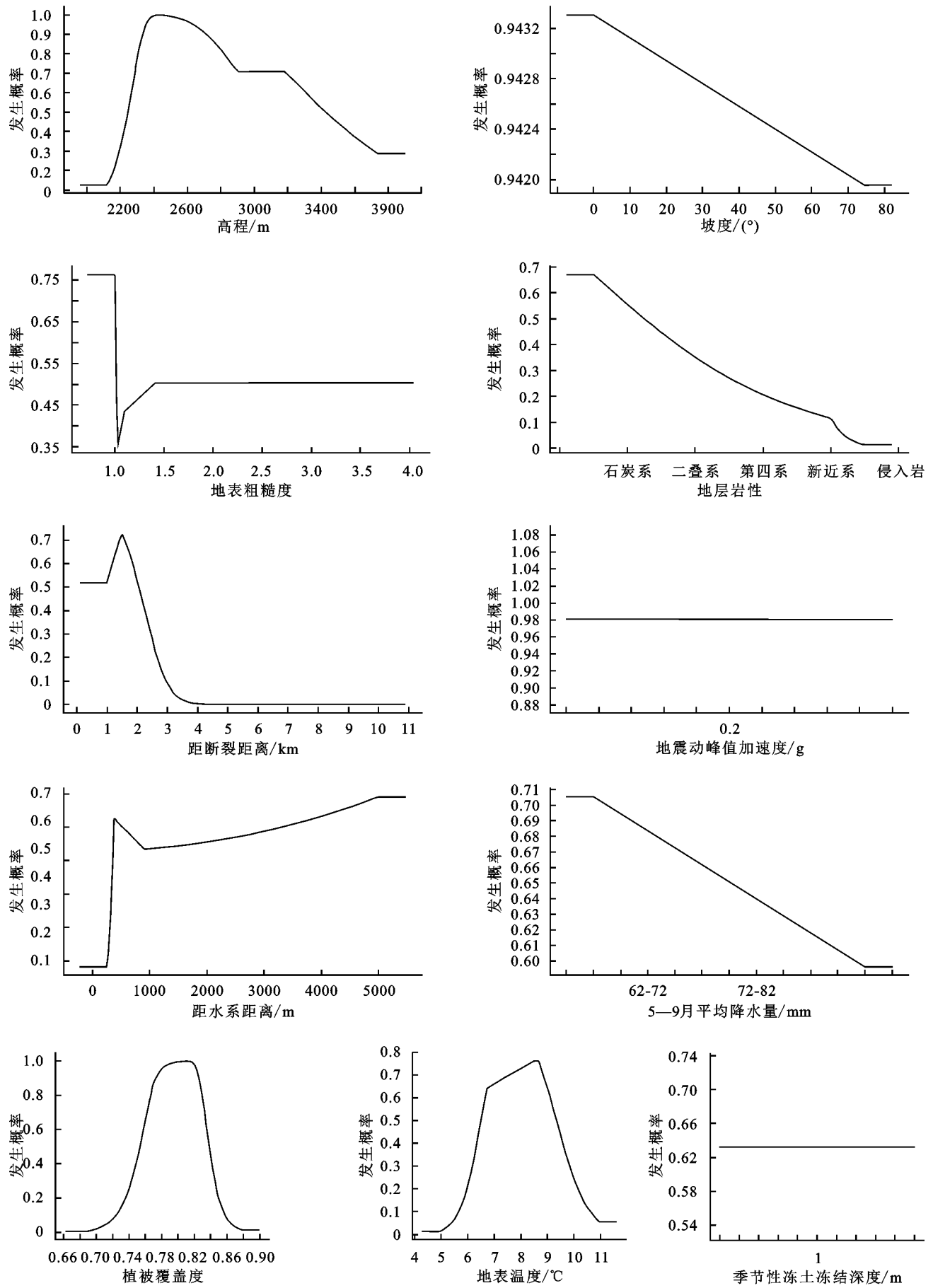


图 4 崩滑—碎屑流发生概率与各影响因素的关系曲线

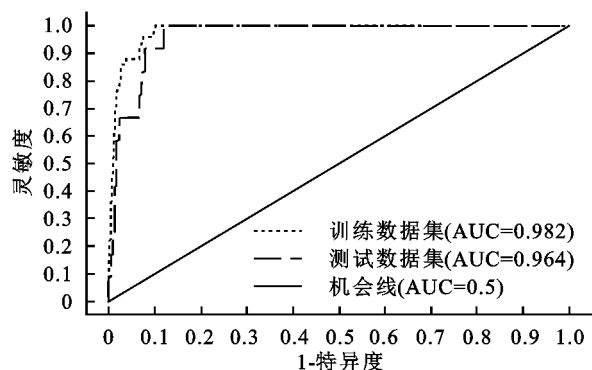


图5 基于 maxEnt 的 ROC 曲线

致谢:感谢甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院段凯工程师、郭林业工程师在野外调查时提供的协助;感谢北京师范大学地理科学学部博士生王浩在数据处理时给予的指导。

参考文献:

- [1] 戴兴建,殷跃平,邢爱国.易贡滑坡—碎屑流—堰塞坝溃坝链生灾害全过程模拟与动态特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(5):1-8.
- [2] 刘传正.论崩塌滑坡—碎屑流高速远程问题[J].地质论评,2017,63(6):1563-1575.
- [3] 夏式伟.易贡滑坡—碎屑流—堰塞坝溃决三维数值模拟研究[D].上海:上海交通大学,2018.
- [4] Delaney K B, Evans S G. The 2000 Yigong landslide (Tibetan Plateau), rockslide-dammed lake and outburst flood: Review, remote sensing analysis, and process modelling[J]. Geomorphology, 2015,246:377-393.
- [5] 郑鸿超,石振明,彭铭,等.崩滑碎屑体堵江成坝研究综述与展望[J].工程科学与技术,2020,52(2):19-28.
- [6] Kargel J S, Leonard G J, Shugar D H, et al. Geomorphic and geologic controls of geohazards induced by Nepal's 2015 Gorkha earthquake[J]. Science, 2016,351(6269):aac8353.
- [7] 夏式伟,郑昭场,袁小一,等.芦山地震汤家沟滑坡—碎屑流过程模拟[J].山地学报,2017,35(4):527-534.
- [8] Li C R, Wang M, Liu K. A decadal evolution of landslides and debris flows after the Wenchuan earthquake[J]. Geomorphology, 2018,323:1-12.
- [9] 张志东,樊晓一,姜元俊.岩土体颗粒级配对接坡碎屑流冲击力链特征的影响[J].山地学报,2020,38(3):402-415.
- [10] 吴凤元,樊赟赟,陈剑平,等.基于不同侵蚀模型的高速崩滑碎屑流动力过程模拟分析[J].岩土力学,2019,40(8):3236-3246.
- [11] Fan X M, Scaringi G, Korup G, et al. Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms, and impacts[J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(2):421-503.
- [12] Phillips S J, Dudik M. Modeling of species distributions with maxENT: new extensions and a comprehensive evaluation[J]. Ecography, 2008,31(2):161-175.
- [13] 刘振生,高惠,滕丽微,等.基于 maxENT 模型的贺兰山岩羊生境适宜性评价[J].生态学报,2013,33(22):7243-7249.
- [14] 李宏群,刘晓莉,汪建华,等.基于 maxEnt 模型荔枝在中国的潜在种植区预测[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):394-400.
- [15] 迟翔文,江峰,高红梅,等.三江源国家公园雪豹和岩羊生境适宜性分析[J].兽类学报,2019,39(4):397-409.
- [16] Aiding K, Majid O, Abdolreza B. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods [J]. Catena, 2017,152:144-162.
- [17] 金文斌,刘海博,辛存林,等.甘肃临潭冶力关国家地质公园地质遗迹资源及旅游地学意义[J].甘肃地质,2019,28(1):91-97.
- [18] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006,190(3/4):231-259.
- [19] 崔鹏,邓宏艳,王成华,等.山地灾害[M].北京:高等教育出版社,2018.
- [20] 郭长宝,唐杰,吴瑞安,等.基于证据权模型的川藏铁路加查:朗县段滑坡易发性评价[J].山地学报,2019,37(2):240-251.
- [21] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19:1533-1543.
- [22] 王伟军,赵雪雁,万文玉,等.2000—2014 年甘南高原植被覆盖度变化及其对气候变化的响应[J].生态学杂志,2016,35(9):2494-2504.
- [23] Zhang T, Zhou X P, Liu X F. Reliability analysis of slopes using the improved stochastic response surface methods with multicollinearity[J]. Engineering Geology, 2020,271:105617.
- [24] 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.
- [25] 熊俊楠,朱吉龙,苏鹏程,等.基于 GIS 与信息量模型的溪洛渡库区滑坡危险性评价[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):700-711.
- [26] 杜晓晨,陈莉,陈廷芳.基于 GIS 的凉山州德昌县滑坡危险性评价[J].长江流域资源与环境,2020,29(5):1206-1215.