

甘肃积石山 M_s 6.2级地震区滑坡危险性评价与区划

王秀琴, 牛全福, 王浩, 程西安, 李克恭, 牛虎林

Risk assessment of landslides induced by the M_s 6.2 earthquake in Jishishan, Gansu Province

WANG Xiuqin, NIU Quanfu, WANG Hao, CHENG Xi'an, LI Kegong, and NIU Hulin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202405010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

甘肃积石山 M_s 6.2级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议

Basic characteristics of co-seismic geological hazards induced by Jishishan M_s 6.2 earthquake and suggestions for their risk control

王立朝, 侯圣山, 董英, 铁永波, 张鸣之, 杨旭东, 肖锐铎, 刘明学, 冯振, 张永军, 王仲复 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(3): 108–118

基于I-CF模型的四川德格县滑坡危险性评价与区划

Landslide geological hazard assessment based on the I-CF model of Dege County in Sichuan Province

赵伯驹, 李宁, 幸夫诚, 向晗 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(5): 32–42

基于改进突变理论的滑坡危险性评价

Landslide hazard assessment based on improved catastrophe theory

张蕊, 郭荣昌, 贺攀, 余岭燕 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(1): 121–128

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

基于人工神经网络模型的福建南平市滑坡危险性评价

Landslide risk assessment in Nanping City based on artificial neural networks model

陈水满, 赵辉龙, 许震, 谢伟, 刘亮, 李全悦 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(2): 133–140

基于机器学习的区域滑坡危险性评价方法综述

A review of the methods of regional landslide hazard assessment based on machine learning

方然可, 刘艳辉, 黄志全 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 1–8



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202405010

王秀琴, 牛全福, 王浩, 等. 甘肃积石山 $M_s6.2$ 级地震区滑坡危险性评价与区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(1): 169-181.
WANG Xiuqin, NIU Quanfu, WANG Hao, et al. Risk assessment of landslides induced by the $M_s6.2$ earthquake in Jishishan, Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(1): 169-181.

甘肃积石山 $M_s6.2$ 级地震区滑坡危险性评价与区划

王秀琴^{1,2}, 牛全福², 王浩², 程西安², 李克恭³, 牛虎林⁴

(1. 甘肃省地图院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;
3. 甘肃省测绘工程院, 甘肃 兰州 730000; 4. 甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产
勘查院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分, 甘肃省积石山县发生 $M_s6.2$ 级地震, 造成大量人员伤亡及崩塌和滑坡等地震次生灾害。基于震前震后高分辨率卫星影像, 利用目视解译的灾害点和影响因子特征集构建 MaxEnt 模型进行地震后滑坡灾害危险性评价, 研究认为: (1) 地震诱发滑坡灾害点主要分布在 1 700 ~ 2 250 m 高程带、坡度 $20^\circ \sim 25^\circ$ 的阳坡范围内, 在距道路距离 1.5 km、距断裂带距离 1.7 km、距地震中心距离 5 km 区间广布; (2) 由影响因子的贡献率和置换重要性、测试效益值、AUC 值和正则化训练增益值综合得到地震诱发滑坡的主要影响因子为距断裂带的距离、海拔和人口分布; (3) 基于构建的 MaxEnt 模型, 得出极高和高危险区主要分布于地震烈度为 VIII 度区, 其面积为 5.368 km², 占极高和高危险区总面积的 77.82%, 而低和极低危险区主要分布于 VI 和 VII 度区, 面积百分比分别为 75.33% 和 97.55%。文章在影响因子重要性分析基础上构建 MaxEnt 模型进行震区滑坡灾害危险性评价, 研究结果将为震区灾后重建提供参考。

关键词: 积石山 6.2 级地震; 滑坡; 因子; 重要性分析; MaxEnt 模型; 危险性评价

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)01-0169-13

Risk assessment of landslides induced by the $M_s6.2$ earthquake in Jishishan, Gansu Province

WANG Xiuqin^{1,2}, NIU Quanfu², WANG Hao², CHENG Xi'an², LI Kegong³, NIU Hulin⁴

(1. The Map Institute of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. Gansu Provincial Institute of Surveying and Mapping, Lanzhou, Gansu 730000, China; 4. The Third Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Provincial Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: On December 18, 2023, at 23:59, a magnitude $M_s6.2$ earthquake occurred in Jishishan County, Gansu Province, resulting in significant casualties and triggering numerous secondary geological disasters such as landslides and collapses. Utilizing high-resolution satellite imagery from before and after the earthquake, this study employs a MaxEnt model, constructed with visually interpreted disaster points and a set of impact factor characteristics, to assess the post-earthquake landslide hazard post-earthquake landslide hazard. The research conclusions are as follows: 1) Earthquake-induced landslide disasters are predominantly distributed within sunny slopes at elevations of 1 800 to 2 300 m and slope gradient of 20° to 25° ,

收稿日期: 2024-05-08; 修订日期: 2024-09-05

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42261069); 甘肃省科技厅重点研发计划项目(22YF7FA074)

第一作者: 王秀琴(1974—), 甘肃甘谷人, 地图学与地理信息系统专业, 硕士, 研究方向为灾害遥感。E-mail: 330398304@qq.com

通讯作者: 牛全福(1973—), 甘肃甘谷人, 地图学与地理信息系统专业, 博士, 教授, 研究方向为环境遥感。E-mail: Niuqf@lut.edu.cn

extensively across areas 1.5 km from roads, 1.7 km from fault zones, and within 5 km of the earthquake's epicenter. The majority of the disasters occurred in cropland and loam areas with higher population density in the earthquake region. 2) The main influencing factors for earthquake-induced landslides determined by factor contribution rates, permutation importance, test benefit values, *AUC* values, and regularization training gain value were comprehensively determined as follows: Distance from the fault zone, Elevation, and Population density; 3) Based on the constructed MaxEnt model, it is found that there is a good consistency between the extremely high and high-risk areas of landslide disasters in the earthquake zone and the seismic intensity. Among them, the extremely high and high-risk areas are mainly distributed in the intensity VIII zone, with an area of 5.368 km², accounting for 77.82% of the total area of the extremely high and high-risk zones. The low and very low-risk areas are mainly distributed in the intensity VI and VII zones, accounting for 92.80% of the total area of the study region. This study constructs the MaxEnt model based on the importance analysis of impact factors to evaluate the landslide hazard in the earthquake area, providing references for post-disaster reconstruction in the earthquake zone.

Keywords: Jishishan $M_s6.2$ earthquake; landslide; factor; importance analysis; MaxEnt model; risk assessment

0 引言

2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分, 甘肃省临夏州积石山县柳沟乡发生 6.2 级地震, 震源深度为 10 km^[1]。地震造成甘肃 117 人遇难, 781 人受伤, 青海 34 人遇难, 198 人受伤。此次地震属于逆冲型, 最大烈度为Ⅷ度^[2], 地震发生后造成大量山体滑坡失稳, 震后多次余震更增加了滑坡发生的风险, 给当地居民的影响深远。

地震发生往往会诱发大量的崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害, 严重威胁当地人民的生命以及财产安全^[3]。由于我国位于欧亚板块东南部, 受印度板块和太平洋板块的挤压碰撞与俯冲作用的影响, 地壳变形强烈, 是全球陆内地震最为活跃的地区^[4]。特别是青藏高原东缘, 地质构造复杂, 地形地貌多样, 断裂带密集分布, 地质灾害频发, 造成当地众多人员伤亡和大量财产损失^[5-6], 例如: 1933 年四川茂县叠溪地震^[7]、2008 年 5 月 12 日汶川地震^[8-9]、2010 年 4 月 14 日玉树地震^[10-11]; 2014 年 8 月 13 日云南鲁甸地震^[12]、2017 年 8 月 8 日四川九寨沟地震^[13]以及 2022 年泸定地震^[14]等。受活动构造带强震影响, 上述地震导致的地面运动强度超过国家设计规范最高标准(9 度罕遇)的水平, 导致了严重的基础设施破坏、滑坡灾害和人员伤亡。甘肃积石山地震也造成较大的损失^[15], 同时该区域历史上地质灾害频发^[16-17], 因此, 进行积石山震后地质灾害危险性评价, 对防灾减灾和保证人民生命财产安全具有现实意义。近年来, 国内外学者对地质灾害危险性评价进行了大量的研究, 其中, 利用 GIS 技术和统计学方法相融合已成为最有效、最主要的评价方法。这些方法常见的有: 层次分析法^[18]、信息量法^[19]、逻辑回归模型^[20]、灰色模型^[21]等。由于单一方法的评价结果并不高以及缺乏足够的说服力^[18], 因此, 一些学者也采用多种方法结合应用于地质灾害风险

评价^[22], 取得较好的评价效果。可见, 多种评价方法交叉融合可综合多方法优势、科学准确地表达灾害风险评价结果。

然而, 上述研究多致力于影响因子与滑坡等灾害的特征分析和风险评价, 在影响因子对滑坡的响应分析, 特别是影响因子对灾害发生风险的贡献率和重要性分析等方面鲜有研究。为此, 本文以甘肃积石山 $M_s6.2$ 地震区为研究区, 基于多源遥感数据, 在深入探讨滑坡灾害与影响因子间的特征分布, 以及影响因子对滑坡的响应分析基础上, 快速进行震区地质灾害危险性评价和分析, 以期对灾后救援和重建工作提供参考。

1 研究区概况

甘肃积石山 $M_s6.2$ 级地震位于甘肃和青海两省交界地带, 地震中心位置为北纬 35.70°、东经 102.79°, 震源深度为 10 km, 最高震中烈度达Ⅷ度。此次地震涉及甘肃省 3 个市(州)9 个县(市、区), 涉及青海省 2 个市(州)4 个县(市), 强烈的地震造成大量人员伤亡、房屋、道路等基础设施损毁(图 1)。震区地势上属青藏高原一级阶梯向黄土高原二级阶梯的过渡带, 高差起伏较大, 最大高差为 3 000 余米, 区内断裂带活动强烈, 有拉脊山南、北断裂带, 倒淌河-临夏断裂带, 西秦岭北缘断裂带等, 为地震等自然灾害的频发区^[23]。其中拉脊山断裂带是穿过震区的主要断裂, 受印度板块俯冲挤压的动力驱动, 青藏高原东北缘和东缘持续扩张, 导致该区域新构造活跃、地震频发, 为我国同震地质灾害发育最频繁的地区^[24]。

本次同震地质灾害主要分布于拉脊山断裂两侧, 就地形地貌来看, 海拔西高东低, 西侧主要为基岩高山区, 该区域主要分布有古生界砂岩、粉砂岩和泥岩等; 右侧区域主要为黄土低山丘陵, 由于黄河的下切和强烈的构

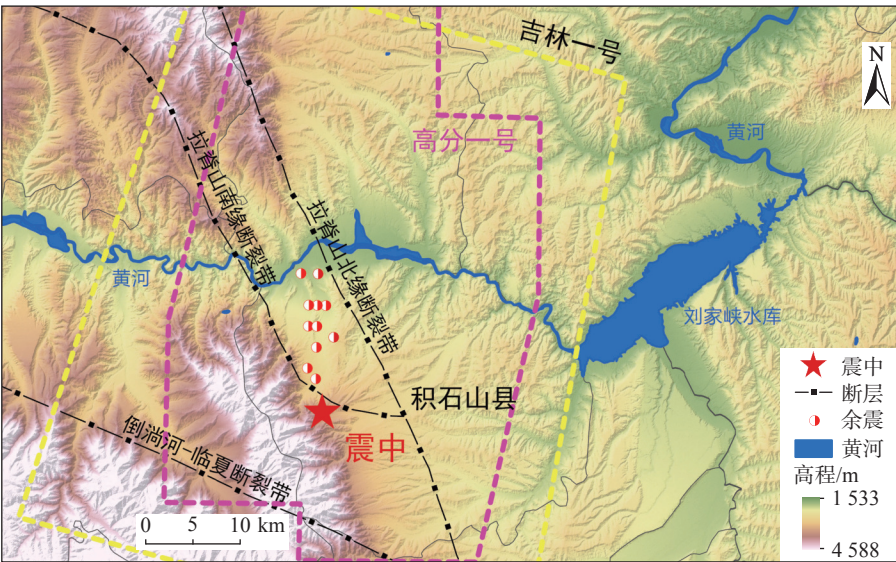


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

造抬升,形成广泛分布的黄河阶地和大量高陡边坡存在,为地震同震灾害发育创造了条件。震区的气候类型属于典型的大陆季风性气候,年均降水量 650 mm/a,年均蒸发量 1 110 mm/a^[24]。

2 数据与方法

2.1 数据

(1)卫星影像数据

本次所用光学遥感影像为高分一号和吉林一号,其空间分辨率分别为 2 m 和 0.75 m,震前影像为 12 月 18

日,震后影像分别为 12 月 20 日和 12 月 19 日。影像预处理主要包括辐射定标、大气校正、几何纠正和图像融合等处理,最后得到真彩色高分辨率影像,主要用于滑坡灾害点的目视解译^[25]。

(2)地震点数据

本次所用地震和余震点发生的地理位置数据来自国家地震科学数据中心(<https://search.asf.alaska.edu/#/>)。该数据为截至 2023 年 12 月 20 日、震级 3.0 以上的资料(表 1)。

表 1 甘肃积石山 $M_s6.2$ 级地震及余震数据

Table 1 $M_s6.2$ Jishishan earthquake and its aftershocks in Gansu Province

序号	发震时刻	纬度	经度	深度/km	震级/ M_s	地名	备注
1	2023-12-18T23:59:30.0	35°42′	102°47′	10	6.2	积石山县	震中
2	2023-12-19T00:24:49.9	35°44′	102°47′	10	3.9	积石山县	余震
3	2023-12-19T00:36:18.3	35°47′	102°47′	10	4.0	积石山县	余震
4	2023-12-19T00:43:12.9	35°47′	102°46′	10	3.4	积石山县	余震
5	2023-12-19T00:56:51.3	35°42′	102°47′	10	3.4	积石山县	余震
6	2023-12-19T00:59:11.3	35°44′	102°46′	10	3.1	积石山县	余震
7	2023-12-19T00:59:39.0	35°50′	102°47′	10	4.1	积石山县	余震
8	2023-12-19T01:10:31.4	35°48′	102°47′	10	3.2	积石山县	余震
9	2023-12-19T01:20:12.6	35°48′	102°46′	10	3.2	积石山县	余震
10	2023-12-19T02:10:06.4	35°50′	102°46′	10	3.2	积石山县	余震
11	2023-12-19T00:32:52.9	35°46′	102°47′	9	3.4	积石山县	余震

(3)环境变量数据

本文所使用的环境变量数据,主要包括:地形、断裂带、道路、土地利用、植被、人口、土壤质地,并通过数据处理得到 14 个影响因子(表 2)。其中:地形数据

为 ALOS 的数字高程模型(DEM),空间分辨率为 12.5 m,主要用于获取坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、曲率、距河流的距离和地形湿度指数(TWI);断裂带,下载自国家地震科学数据中心,经处理得到距断裂带距离;道

表 2 甘肃积石山 M_s6.2 级地震诱发滑坡灾害影响因子数据

Table 2 Disaster-causing factors of landslides induced by the M_s6.2 Jishishan earthquake in Gansu Province

环境变量	影响因子	数据来源
地形因子	高程、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、曲率、距河流距离、TWI	高程数据为数字高程模型(DEM), 下载自ASF官网(https://search.asf.alaska.edu/#/), 其它因子数据为DEM的派生数据
断裂带	距断裂带的距离	断裂带数据下载自国家地震科学数据中心(https://search.asf.alaska.edu/#/)
土壤质地	土壤质地数据	下载自世界土壤数据库(https://www.fao.org/)
道路	距道路的距离	OSM官网(https://www.openstreetmap.org/)
人口	人口分布密度	OSM官网(https://www.openstreetmap.org/)
土地利用	地表覆盖	武汉大学CLCD数据集(https://zenodo.org/)
植被	归一化植被指数	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpda.ac.cn/home)

路数据, 来自 OSG(Open Street Map)官网, 用于计算距道路的距离; 土地利用为武汉大学的 CLCD(China land cover dataset)数据集, 其空间分辨率为 30m, 主要包括: 耕地、林地、灌木、草地、水域、雪/冰、裸地、不透水面和湿地; 归一化植被指数来自国家青藏高原科学数据中心, 其数据源为 MODIS, 空间分辨率为 250 m; 6) 人口分布, 来自 WorldPop 全球人口数据, 空间分辨率为 100 m, 下载自 GEE(Google Earth Engine)平台; 土壤质地数据, 来自世界土壤数据库, 其空间分辨率为 1 km。

2.2 研究方法

2.2.1 MaxEnt 模型原理

最大熵(MaxEnt)模型是基于最大熵原理来预测随机事件概率分布的方法, 该模型在灾害危险性评价、预测物种分布等领域都得到了广泛应用^[26-27]。利用 MaxEnt 模型进行地质灾害预测的原理, 主要以地质灾害发生点和环境变量之间的关系为基础, 建立地质灾害危险性的概率模型, 从而对整个区域的地质灾害危险性进行预测。本文是以 14 个影响因子为约束条件, 以灾害点为事件, 寻求地质灾害危险性在 14 个约束条件下的最大熵, 进而估算地质灾害的危险性。

2.2.2 数据预处理

对目视解译的 1 205 个滑坡灾害点数据进行预处理, 包括: 1) 剔除滑坡目视解译得到的重复和错误点; 2) 通过建立渔网去除自相关点; 3) 数据转换, 主要是将最终得到的 980 个滑坡灾害点数据转成 csv 格式用于模型构建。

对影响因子的预处理, 包括将致灾因子重采样为统一像元尺度、裁剪使所有影响因子有相同的行列号, 然后将其转换为 ASCII 格式用于构建 MaxEnt 模型^[28]。

2.2.3 模型参数设置

模型参数调整是构建 MaxEnt 模型的重要环节。具体流程包括, 输出格式设置为 logistic, 将滑坡灾害点分

为测试集和训练集, 其中, 随机测试集设置比例为 25%, 75% 用于模型训练^[29]。精度评定采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC), 将正则化参数(regularization multiplier)设置为 1, 重复建模次数设置为 10, 以防止欠拟合和过拟合现象的发生, 并且使模型构建达到最佳效果^[30]。

2.2.4 危险评价

对滑坡危险性评价结果等级的划分, 参考前人研究成果^[31-32], 并结合高分影像目视解译得到的滑坡灾害点空间分布, 将危险区等级划分为五个等级: 极低危险区, 低危险区, 中危险区, 高危险区和极高危险区。

2.2.5 精度评价

模型精度评价采用 ROC 曲线与坐标轴围成的曲线下面积(area under curve, AUC)值来表示, AUC 值大小表示预测成功率, 其值越大, 则准确率越高, 说明模型的预测效果就越好^[32]。AUC 值的具体评价标准如表 3。

表 3 AUC 评价标准
Table 3 AUC evaluation criteria

AUC值	精度评价
[0, 0.6)	很差
[0.6, 0.7)	较差
[0.7, 0.8)	一般
[0.8, 0.9)	好
[0.9, 1]	极好

3 结果

3.1 滑坡点的影响因子分布特征

本文通过对比积石山 M_s6.2 级地震前后的高分一号和吉林一号卫星影像, 对滑坡进行目视解译。由于地震前, 该区域发生大面积降雪, 在地震发生后, 发生滑坡的区域裸露出新的土壤, 因此有利于滑坡灾害点的卫星影像目视解译。此次目视解译原则为: 首选区域内空间

分辨率高的影像,若存在云层遮挡或地形阴影,将按照空间分辨率从高到低的顺序,选择时相相近的影像,最终达到覆盖整个震区。在滑坡点目视解译中,主要采取震前震后影像对比的方式,本次解译共编目滑坡和潜在

灾害点 1 205 处(图 2),大多以小型崩塌和滑坡为主,主要集中于震区黄河两岸黄土丘陵区、道路与沟谷附近,多发育于建房和公路内边坡陡坎部位^[30],其威胁的主要承灾体为公路和农田等。

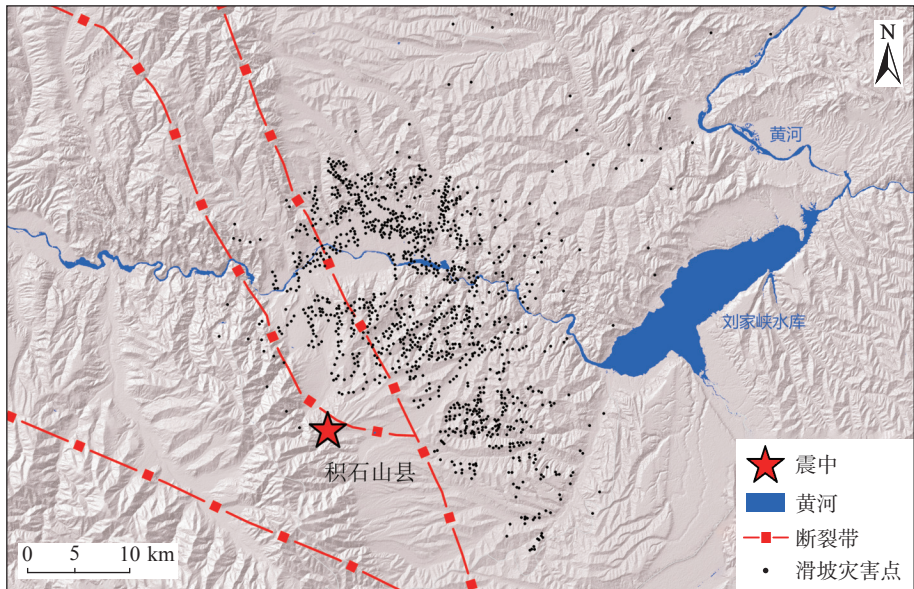


图 2 积石山地震诱发滑坡灾害点空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of landslides induced by the Jishishan earthquake

为进一步分析灾害点在各影响因子上的分布特征,研究中将灾害点与各因子进行叠加,分别作直方图进行统计分析,其中横坐标为各因子分级,纵坐标为密度。

对于各地形因子(图 3),分析中将高程因子按 100 m 间隔分为九级,叠加统计分析发现,地震诱发滑坡灾害点在高程因子上基本呈抛物线分布($R^2 = 0.739 4$),主要

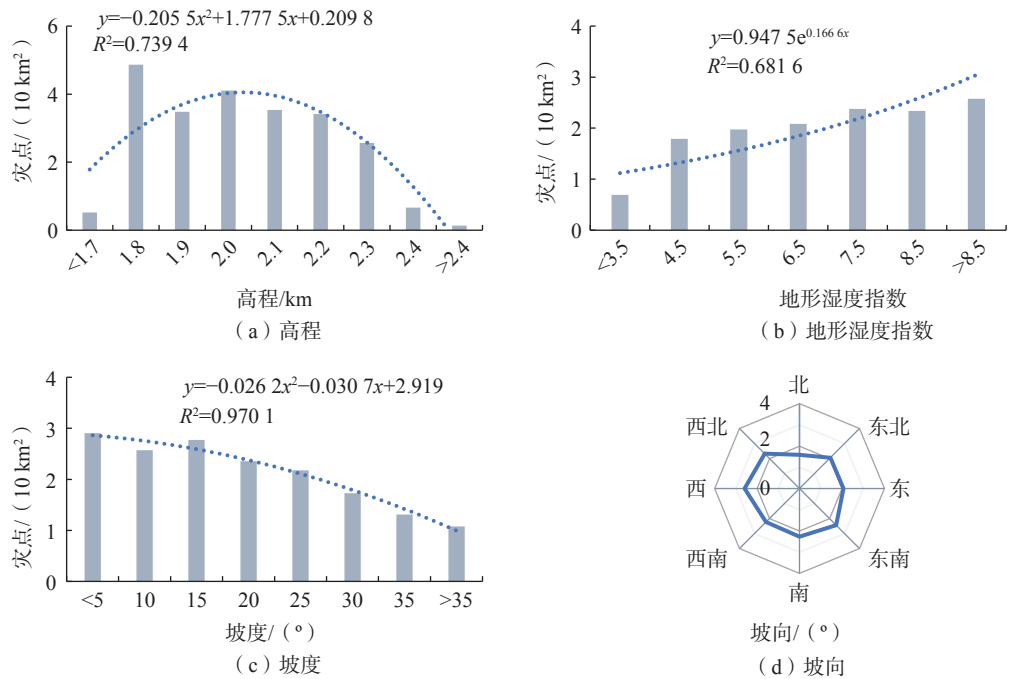


图 3 滑坡灾害点的地形因子分布

Fig. 3 Distributions of terrain factors at landslide locations

分布在 1 700 ~ 2 250 m 高程带;就灾害点在坡度上的分布,将坡度按 5° 间隔等间距分级,统计发现灾害点主要发生在小于 25° 区间内,大于 30° 坡度范围零星分布;在地形湿度指数 (*TWI*) 上,灾害点发生基本呈现指数分布 ($R^2 = 0.681\ 6$);就坡向分布来看,地震诱发地质灾害点大多数发生于东、东南和南向范围内。

对于各类距离因子(图 4),研究中将距道路距离因子按间隔 0.5 km 等间距作缓冲区分级,分析发现地震诱发的绝大多数灾害点发生于距道路 1.5 km 范围内;对于距断裂带距离,第一级按 1 km、第二级以后按 2 km

进行分级统计,分析发现地震诱发地质灾害点在距断裂带距离上基本呈现指数型分布 ($R^2 = 0.201$),主要分布于小于 1 km、3 ~ 4 km 和 8 ~ 12 km 范围内,其中 3 ~ 4 km 和 8 ~ 12 km 区间为黄河两岸;就距河流距离来看,地震诱发地质灾害点分布呈指数型分布 ($R^2 = 0.772\ 7$),主要分布在河流两岸及附近;对于距地震中心距离因子,研究中第一级按 1 km 统计,第二级按 5 km 统计,后面各级按 10 km 统计,分析发现灾害点呈指数型分布 ($R^2 = 0.870\ 6$)。

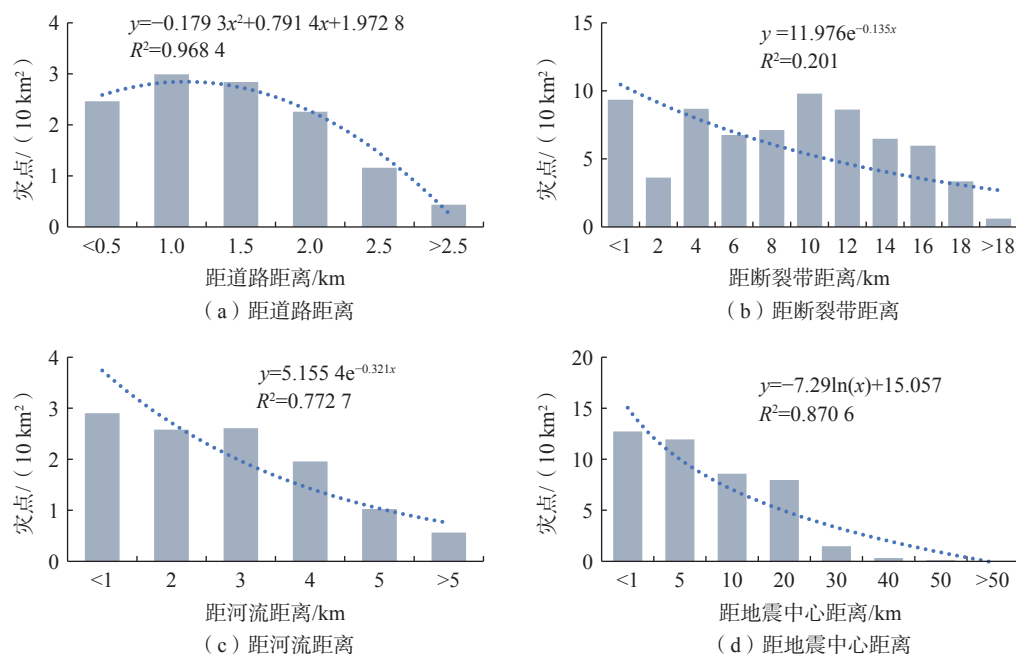


图 4 滑坡灾害点的各距离因子分布

Fig. 4 Distributions of distance factors at landslide locations

同时,也对土地利用、土壤质地、归一化植被指数和人口分布因子进行地质灾害点分布统计(图 5)。就土地利用来看,地震诱发地质灾害点主要发生于耕地、部分草地和水域附近也有一些地质灾害发生;就土壤质地来看,地震诱发地质灾害点主要分布在壤土、有少量分布于黏土和壤砂土层;就 NDVI 来看,地震诱发地质灾害主要分布在 0.08 ~ 0.16;就震区人口分布来看,人口密度大的地方人类活动也较强烈,因而地震诱发地质灾害点的分布也相应多一些。

3.2 影响因子对滑坡的响应分析

1) 模型评价精度

将滑坡灾害点数据和选取的 14 个影响因子数据输入 MaxEnt 模型,通过 10 次的迭代计算,最后得到

AUC 值为 0.854(图 6),模型可靠性达到“好”的水平。因此,本次研究利用解译的地质灾害点和各影响因子,通过 10 次迭代计算构建 MaxEnt 模型进行积石山 $M_6.2$ 级地震诱发滑坡危险性评价,其结果具有较好的可靠性。

2) 影响因子重要性分析

置换重要性是反映模型对该变量的依赖程度的指标^[33]。表 4 为各影响因子对滑坡灾害影响程度的贡献率和置换重要性。可见,排名前五的影响因子为距断裂带的距离、高程、人口分布、土壤质地和距河流的距离,其贡献率分别为 39.0%、38.1%、17.8%、1.3% 和 1.2%,其累计贡献率占比高达 97.4%。同时可以看出,置换重要性排名前五的影响因子为距断裂带的距离、

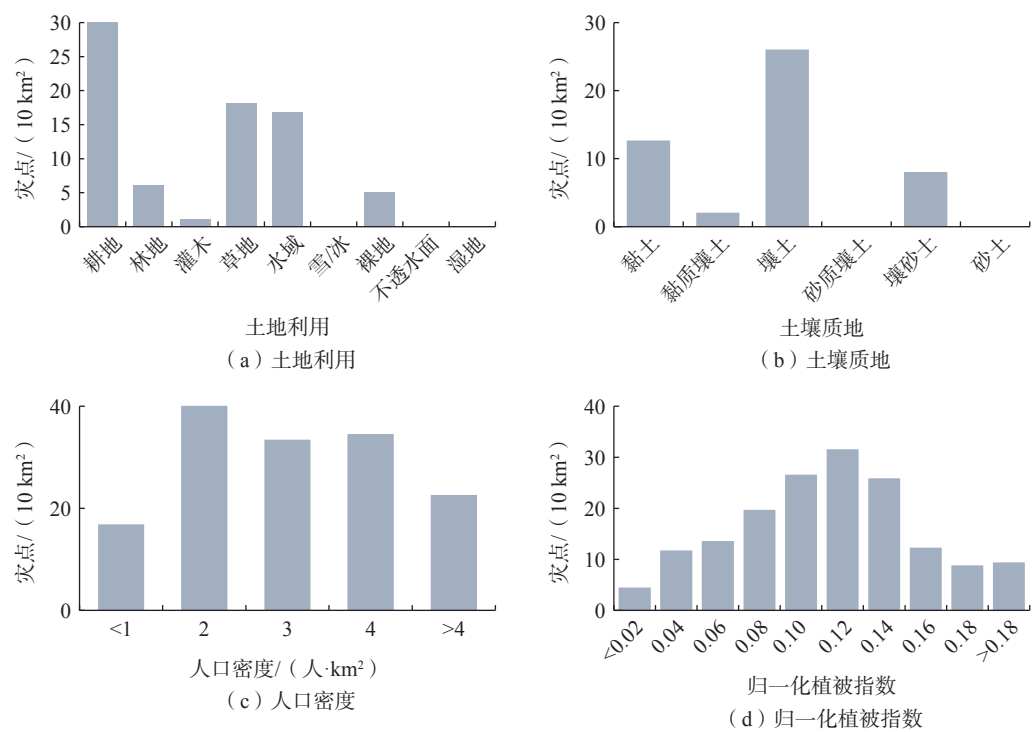


图 5 滑坡灾害点的其他因子分布

Fig. 5 Distribution of landslides based on LULC, soil texture, population density, and NDVI

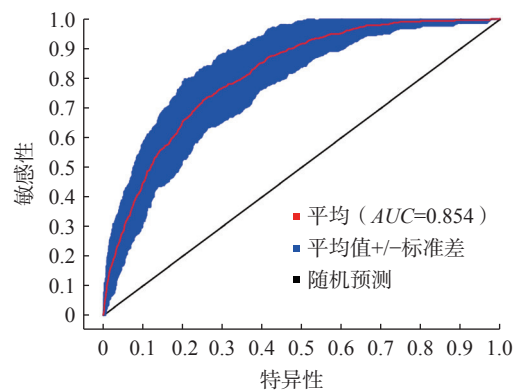


图 6 ROC 评价结果

Fig. 6 Results of ROC evaluation

高程、距河流的距离、人口分布以及土壤质地, 其置换重要性分别为 48.3%、45.1%、2.4%、1.4% 和 1.3%, 累计值达 98.5%。

图 7 为通过刀切法检验对各影响因子重要性的检验结果。由测试增益值^[34], 见图 7(a), 重要性位列前五的影响因子为距断裂带的距离、高程、人口分布、土壤质地和归一化植被指数, 其值分别为: 0.35、0.32、0.22、0.12 和 0.1。由 AUC 值, 见图 7(b), 排位前五的影响因子为高程、距断裂带的距离、人口分布、归一化植被指数和距河流的距离, 其值分别为 0.74、0.73、0.67、0.65 和 0.59。由正则化训练增益, 见图 7(c), 位列前五的影

表 4 滑坡灾害主要影响因子贡献率和置换重要性

Table 4 Contribution rates and permutation importance of main disaster-causing factors of landslides

序号	因子	贡献率/%	置换重要性/%
1	距断裂带距离	39	48.3
2	高程	38.1	45.1
3	人口分布	17.8	1.4
4	土壤质地	1.3	1.3
5	距河流距离	1.2	2.4
6	归一化植被指数	0.8	0.6
7	坡度	0.8	0.1
8	距道路距离	0.6	0.5
9	坡向	0.3	0.2
10	地形湿度指数	0.1	0
11	土地利用	0	0
12	平面曲率	0	0
13	剖面曲率	0	0
14	曲率	0	0

响因子为高程、距断裂带距离、人口分布、距道路距离和距河流距离, 其值分别为 0.3、0.29、0.22、0.1 和 0.08。

3)影响因子对滑坡危险性响应分析

图 8 和图 9 分别为各影响因子对滑坡发生的响应曲线, 其中, 纵轴代表滑坡发生的概率, 横轴代表各因子的取值范围。设定参考概率阈值为 0.5^[35], 当大于 0.5 时, 认为该因子取值范围有利于灾害的发生。图 8 可

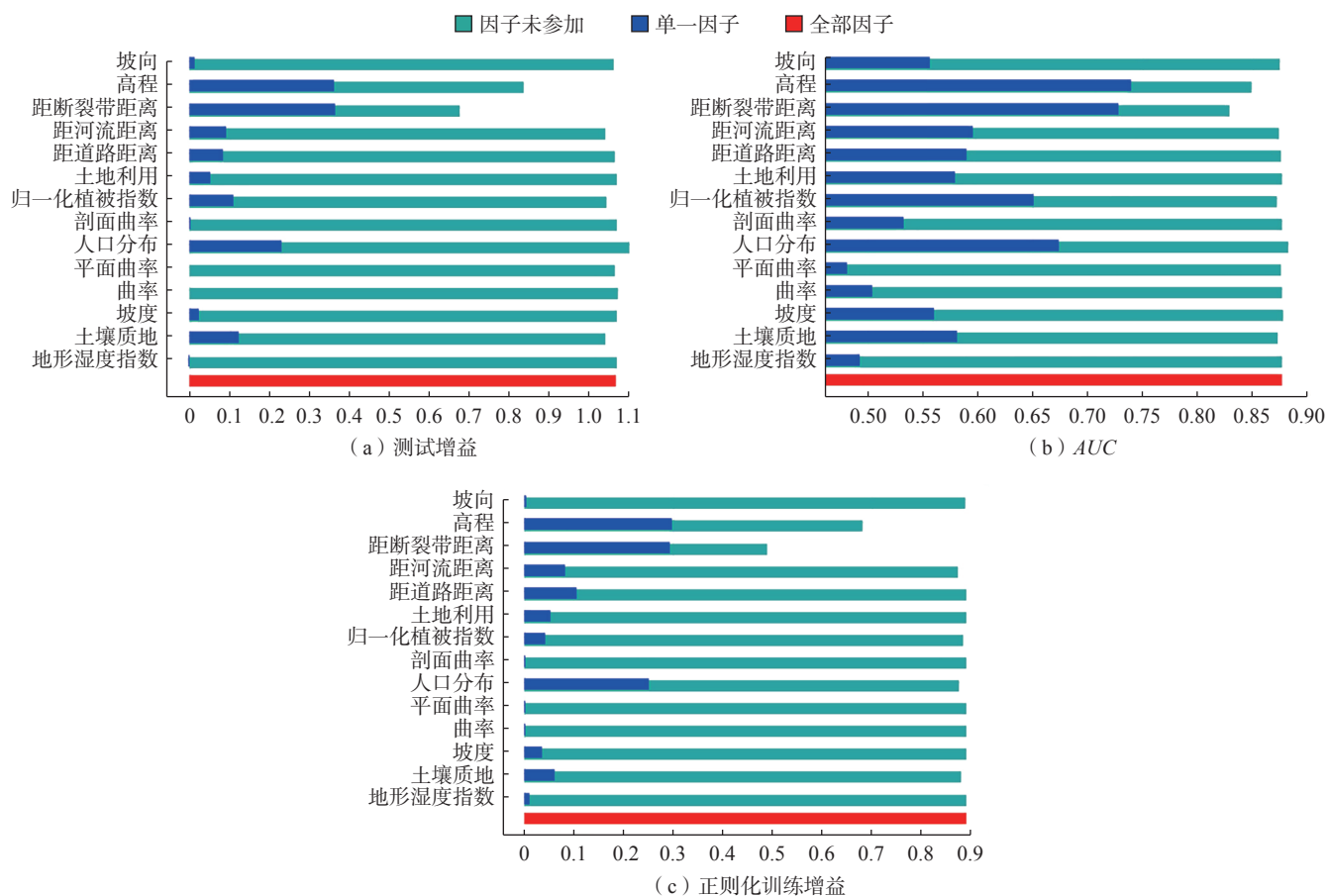


图 7 影响因子刀切法检验结果

Fig. 7 Results of the knife-cut test for disaster-causing factors

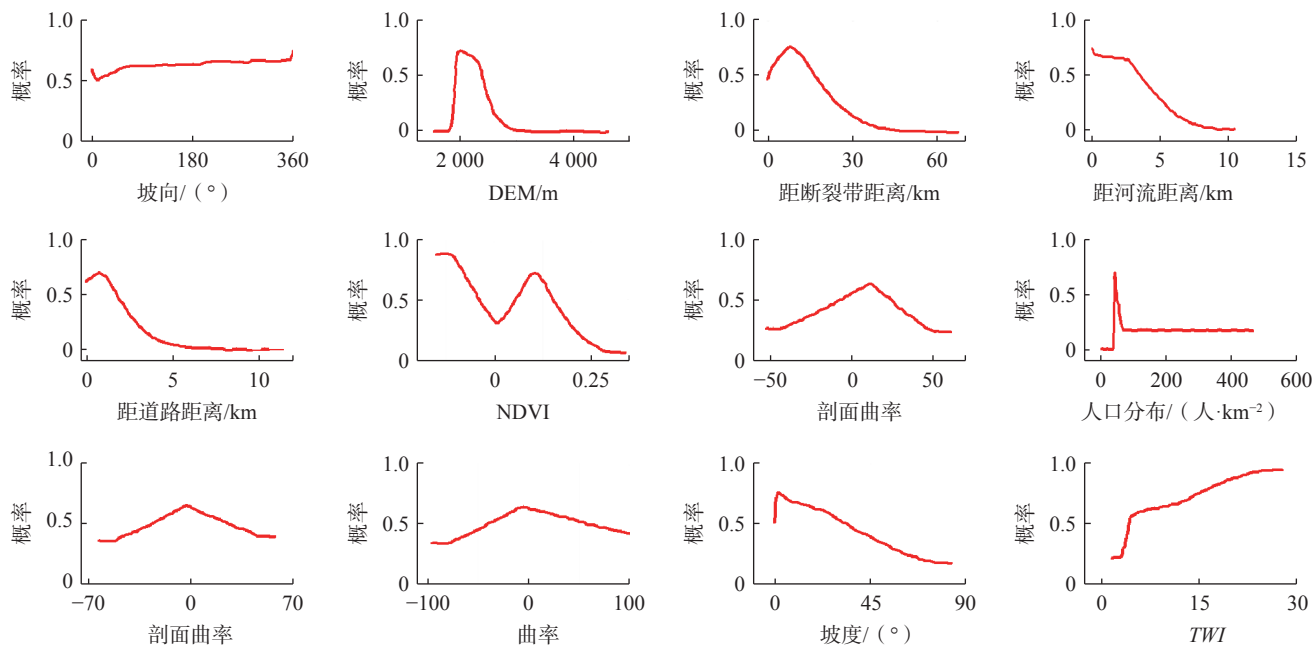


图 8 影响因子响应曲线

Fig. 8 Response curves of disaster-causing factors

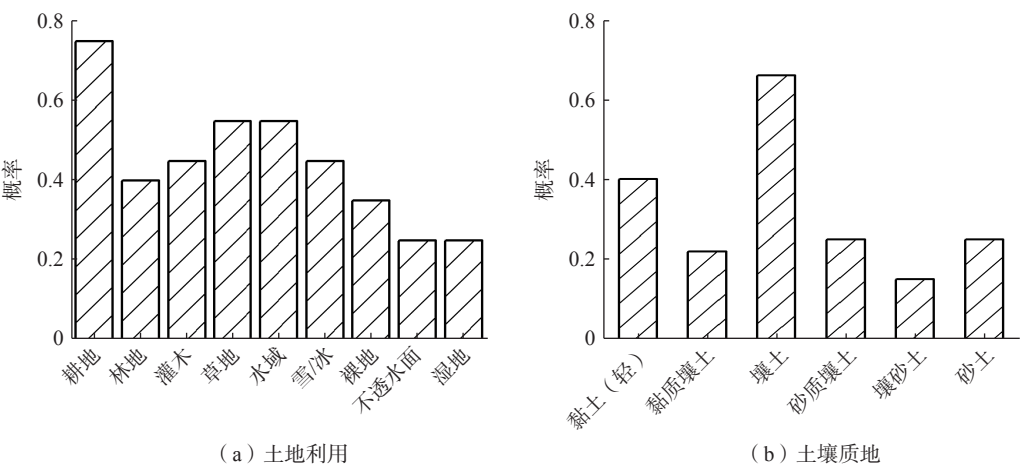


图 9 土地利用与土壤质地的滑坡响应直方图

Fig. 9 Histogram of landslide responses to LULC and soil texture

知,坡向因子对滑坡发生的响应最高。其他因子的某一取值范围对滑坡发生的响应也较敏感。例如,当地形湿度指数大于 4 m 时,其概率均大于 0.5,极易引起滑坡的发生;同理,当高程带在 1 700 ~ 2 250 m、剖面曲率为 -4.2 ~ 3、平面曲率为 -3.9 ~ 4.1、综合曲率为 -6 ~ 11 时,该范围对滑坡发生强响应;当距断裂带距离小于 1.7 km、距河流距离小于 3.8 km、距道路距离小于 2 km、坡度小于 30°、人口分布密度大于 20 人/km² 时,其概率均大于 0.5,极易引起滑坡的发生。同时也可以看出,当归一化植被指数小于 -0.04 和 0.06 ~ 0.15 时,其概率均大于 0.5,该区段滑坡灾害发生的响应较好;就土地利用因子来看(图 9),耕地、草地和水域的概率均大于 0.5,

极易发生滑坡灾害;对于土壤质地,砂质壤土和壤土的概率大于 0.5,极易发生滑坡灾害。

3.3 滑坡危险性评价

本文采用影响因子重要性和相关系数法,剔除贡献率较低(即土地利用、平面曲率、泡面曲率和曲率)和相关性高(即高程)的因子,然后将其余因子构建模型,计算最大熵结果,并按自然断点法分五级^[36],图 10 为本研究获取的积石山 $M_s6.2$ 级地震诱发滑坡危险性评价结果。经统计得出,极高危险区面积为 49.38 km²,占研究区总面积的 0.84%;高危险区面积为 157.79 km²,占研究区总面积的 2.69%;中危险区面积为 430.03 km²,占研究区总面积的 7.33%;低危险区面积为 526.07 km²,占研究

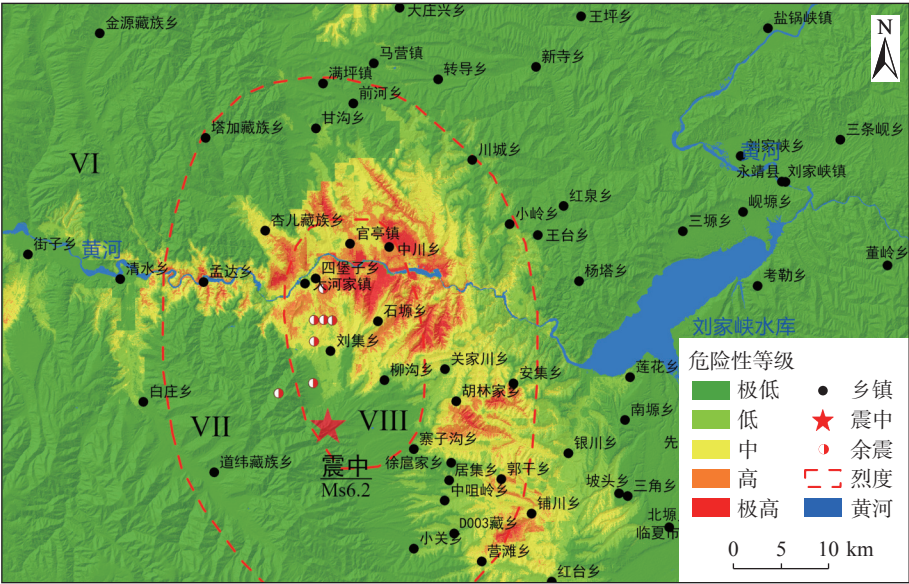


图 10 积石山 $M_s6.2$ 级地震诱发的滑坡危险性评价结果

Fig. 10 Landslide hazard assessment results induced by the $M_s6.2$ Jishishan earthquake

区总面积的 8.96%; 极低危险区面积为 4 699.02 km², 占研究区总面积的 80.18%。可见, 由于本次地震发生在冬季, 大多数地方为季节性冻土, 因而本次地震诱发滑坡大多为小型, 其极高和高危险性分布相对较少, 主要位于黄河两岸的部分地区, 与文献[25]结果一致。

为进一步分析危险区与地震烈度之间的关系, 将危险性评价结果与地震烈度图^[37]进行叠加, 统计得出(表 5), 极高和高危险区密度主要位于地震烈度为Ⅷ区, 其面积为 21.2 km², 占Ⅷ区的百分比为 26.38%; 中危险区密度主要分布于Ⅶ和Ⅷ区, 面积为 341.22 km², 占Ⅶ和Ⅷ区面积百分比分别为 16.92% 和 28.82%; 低和极低危险区主要分布于Ⅶ和Ⅵ区, 面积占比分别为 75.33% 和 97.55%, 该区域远离发震区, 地震诱发地质灾害危险性也较低。

表 5 不同地震烈度区的危险性等级面积百分比统计
Table 5 Area percentage of different risk grades in various seismic intensity zones

地震烈度	极高危险/%	高危险/%	中危险/%	低危险/%	极低危险/%
Ⅷ区	6.91	19.47	28.82	11.76	33.05
Ⅶ区	1.80	5.95	16.92	16.12	59.21
Ⅵ区	0.03	0.23	2.19	6.15	91.40

4 讨论

影响因子的选择是地震诱发滑坡危险性评价可靠性的主要环节^[38]。与前人研究不同, 本研究从地形因子、断裂带、土壤质地、道路、人口、土地利用以及植被等环境变量出发, 选取影响因子, 在分析影响因子对滑坡危险性响应的基础上, 通过获取贡献率和置换重要性、采用刀切法对影响因子进行重要性评估, 来优选主要影响因子。研究发现, 距断裂带距离、高程、人口分布、土壤质地和距河流距离的贡献率和置换重要性均大于 1, 其中, 距断裂带距离最大, 分别为 39.0% 和 48.3%。

为进一步分析本研究的可靠性, 采用刀切法对各影响因子重要性进行检验, 由测试增益值、AUC 值以及正则化训练增益三个指标进行计算, 得出对本次地震诱发滑坡危险性的主要响应因子为距断裂带距离、高程和人口分布。可见, 除属于孕灾环境条件的高程因子外, 距断裂带距离和人口分布是本次地震诱发滑坡危险性的主要驱动因子。由于震区相对高差约 3 000 m, 地形起伏较大, 高海拔地区因地形坡度陡峭, 土壤和岩石的稳定性相对较差, 特别是在 1 700 ~ 2 300 m 区间, 人类活动(例如: 修路、建房、耕作等)也较强烈, 遥感解译发

现, 大多发生在距离道路较近的地区, 道路建设往往会破坏原有地形和土壤结构, 为滑坡崩塌发育创造了条件。断裂带区因地壳应力集中以及地质结构脆弱, 在地震等外部因素的驱动下, 极易引发滑坡灾害; 同时, 由于河流的侵蚀作用往往会破坏斜坡的稳定性, 导致滑坡灾害的发生。

实地调查发现, 由于本次地震主要发生在冬季, 其诱发地质灾害主要以小型崩塌和滑坡为主。从灾害分布区域、规模和密集程度来看, 与本研究计算确定的主要影响因素吻合性较好。例如: 图 11 为实地地质灾害调查中, 获得的典型性滑坡, 其中, 图 11a 和图 11b 为砂/泥岩滑坡类, 大多分布于公路等的内边坡区; 图 11c 和图 11d 为黄土滑坡类, 大多发生于建房和公路等的切坡区; 图 11e 为裂缝, 发育于震区黄河两岸阶地居民区。

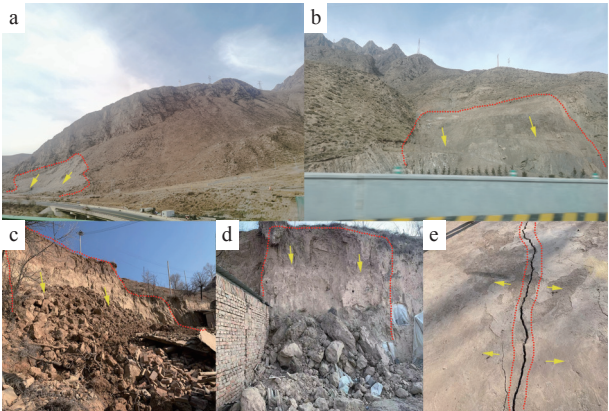


图 11 积石山震区典型滑坡
Fig. 11 Typical landslides in the M_s6.2 Jishishan earthquake
注: a—b 为砂/泥岩滑坡; c—d 为黄土滑坡; e 为裂缝。

5 结论

(1) 从地形因子来看, 本次地震诱发滑坡灾害点主要分布在 1 700 ~ 2 250 m 高程带、20° ~ 25° 的坡度区间, 且大多数群发于坡向为东、东南和南向的阳坡范围内, 在 TWI 上基本呈现指数分布, 同时在距道路距离 1.5 km、距地震中心距离 5 km 范围内广布。从 LULC 来看, 地震诱发地质灾害点主要发生于耕地, 且土壤质地多为壤土区域; 在植被覆盖上, 主要集中发生于 NDVI 为 0.2 ~ 0.4 区间、震区人口分布密度大的地方。

(2) 由影响因子的贡献率和置换重要性、刀切法计算的测试效益值、AUC 值和正则化训练增益值, 得到本次地震诱发地质灾害危险性的主要影响因子为: 距断裂带的距离、高程和人口分布。当距断裂带距离小于 1.7 km、人口分布密度达 20 人/km² 时, 其概率均大于 0.5, 对滑

坡危险性发生的响应较明显。

(3)基于构建的 MaxEnt 模型得出,震区滑坡高危区主要分布于黄河两岸及附近区域。其中,极高和高危区密度主要位于地震烈度为Ⅷ区,其面积为 21.2 km^2 ,占Ⅷ区的面积百分比为 26.38%;中危险区密度主要分布于Ⅶ和Ⅷ区,面积百分比分别为 16.92% 和 28.82%;低和极低危险区主要分布于Ⅶ和Ⅵ区,面积百分比分别为 75.33% 和 97.55%。

参考文献(References):

- [1] 中国地震台网中心. 12月18日23时59分在甘肃省临夏州积石山县发生6.2级地震 [EB/OL]. [2023-12-27]. <https://www.cenc.ac.cn/cenc/dzxx/409064/index.html>. [China Earthquake Networks Center. A magnitude 6.2 earthquake struck Jishishan County, Linxia Prefecture, Gansu Province at 23:59 on December 18 [EB/OL]. [2023-12-27]. <https://www.cenc.ac.cn/cenc/dzxx/409064/index.html>.]
- [2] 王勤彩, 罗钧, 陈翰林, 等. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源机制解 [J]. 地震, 2024, 44(1): 185–188. [WANG Qincai, LUO Jun, CHEN Hanlin, et al. Focal mechanism for the December 18, 2023, Jishishan $M_s6.2$ earthquake in Gansu Province [J]. Earthquake, 2024, 44(1): 185–188. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 许强, 黄润秋. “5·12”汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探 [C] //中国岩石力学与工程学会. 汶川大地震工程震害调查分析与研究, 北京: 科学出版社, 2009: 8. [XU Qiang, HUANG Runqiu. A preliminary study of the dynamic characteristics of large-scale landslide disasters induced by the “5·12” Wenchuan earthquake [C] //China Society of Rock Mechanics and Engineering. The Wenchuan earthquake engineering seismic damage investigation and research, Beijing: Science Press, 2009: 8. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 刘俊来, 张进江, 张培震. 中国构造地质学发展: 百年回顾与展望 [J]. 地质学报, 2022, 96(10): 3283–3296. [LIU Junlai, ZHANG Jinjiang, ZHANG Peizhen. Structural geology development in China: One hundred years [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(10): 3283–3296. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 影像大地测量学发展现状与趋势 [J]. 测绘学报, 2023, 52(11): 1805–1834. [LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Development status and trends of imaging geodesy [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(11): 1805–1834. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 黄润秋. 汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239–1249. [HUANG Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239–1249. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 中国滑坡堵江事件目录 [J]. 地质灾害与环境保护, 1995, 6(4): 1–9. [CHAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan. The catalog of Chinese landslide dam events [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1995, 6(4): 1–9. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 许冲, 戴福初, 肖建章. “5·12”汶川地震诱发滑坡特征参数统计分析 [J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 147–153. [XU Chong, DAI Fuchu, XIAO Jianzhang. Statistical analysis of characteristic parameters of landslides triggered by May 12, 2008 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(4): 147–153. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陶和平, 刘斌涛, 刘淑珍, 等. 遥感在重大自然灾害监测中的应用前景——以5·12汶川地震为例 [J]. 山地学报, 2008, 26(3): 276–279. [TAO Heping, LIU Bintao, LIU Shuzhen, et al. Natural hazards monitoring using remote sensing: A case study of 5·12 Wenchuan earthquake [J]. Mountain Research, 2008, 26(3): 276–279. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 许冲, 徐锡伟, 戴福初, 等. 2010年4月14日玉树地震滑坡空间分布与控制变量分析 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 505–510. [XU Chong, XU Xiwei, DAI Fuchu, et al. Analysis of spatial distribution and controlling parameters of landslides triggered by the April 14, 2010 Yushu earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 505–510. (in Chinese with English abstract)]
- [11] NIU Quanfu, CHENG Weiming, LIU Yong, et al. Risk assessment of secondary geological disasters induced by the Yushu earthquake [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(2): 232–242.
- [12] 和海霞, 李素菊, 刘明, 等. 云南鲁甸6.5级地震灾区滑坡分布特征研判分析 [J]. 灾害学, 2016, 31(1): 92–95. [HE Haixia, LI Suju, LIU Ming, et al. Research on landslide spatial distribution in Ludian earthquake disaster area [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 92–95. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 梁昌健. 四川九寨沟 $M_s7.0$ 级地震的发震构造及成因机制分析 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [LIANG Changjian. Analysis of seismogenic structure and genetic mechanism of Jiuzhaigou earthquake with $M_s7.0$ in Sichuan Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 徐浪, 陈强, 吴远昆, 等. 2022年泸定 $M_w6.7$ 地震滑动模型及地震风险性评估 [J]. 大地测量与地球动力学,

- 2024, 44(5): 473 – 478. [XU Lang, CHEN Qiang, WU Yuankun, et al. Coseismic slip model of the 2022 Luding M_w 6.7 earthquake and seismic risk assessment [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2024, 44(5): 473 – 478. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 铁永波, 张宪政, 曹佳文, 等. 积石山 M_s 6.2 级和泸定 M_s 6.8 级地震地质灾害发育规律对比 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(1): 9 – 21. [TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, CAO Jiawen, et al. Comparative research of the characteristics of geological hazards induced by the Jishishan(M_s 6.2) and Luding(M_s 6.8) earthquakes [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2024, 51(1): 9 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 杜源, 王纯, 张勤, 等. 顾及黄土滑坡灾害状态特征的实时 GNSS 滤波算法 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(7): 1216 – 1222. [DU Yuan, WANG Chun, ZHANG Qin, et al. Real-time GNSS filtering algorithm considering state characteristics of loess landslide hazards [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1216 – 1222. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 黄观文, 景策, 李东旭, 等. 甘肃积石山 6.2 级地震对滑坡易发区的变形影响分析 [J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)* [2024-01-09] (2024-05-08). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230490>. [HUANG Guanwen, JING Ce, LI Dongxu, et al. Analysis of deformation impacts on landslide-prone areas by the magnitude 6.2 earthquake in Jishishan, Gansu [J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. [2024-01-09] (2024-05-08). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230490>. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 于开宁, 吴涛, 魏爱华, 等. 基于 AHP-突变理论组合模型的地质灾害危险性评价——以河北平山县为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(2): 146 – 155. [YU Kaining, WU Tao, WEI Aihua, et al. Geological hazard assessment based on the models of AHP, catastrophe theory and their combination: A case study in Pingshan County of Hebei Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(2): 146 – 155. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 牛全福, 冯尊斌, 张映雪, 等. 基于 GIS 的兰州地区滑坡灾害孕灾环境敏感性评价 [J]. *灾害学*, 2017, 32(3): 29 – 35. [NIU Quanfu, FENG Zunbin, ZHANG Yingxue, et al. Susceptibility assessment of disaster environment for landslide hazard based on GIS in Lanzhou area [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(3): 29 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 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)]
- [21] 朱吉祥, 张礼中, 周小元, 等. 基于信息熵的灰色模型在地质灾害评价中的应用——以四川青川县为例 [J]. *灾害学*, 2012, 27(1): 78 – 82. [ZHU Jixiang, ZHANG Lizhong, ZHOU Xiaoyuan, et al. Application of entropy-based grey model in geological hazard assessment: A case study of Qingchuan County, Sichuan Province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(1): 78 – 82. (in Chinese with English abstract)]
- [22] SHAHINUZZAMAN M, HAQUE M N, SHAHID S. Delineation of groundwater potential zones using a parsimonious concept based on catastrophe theory and analytical hierarchy process [J]. *Hydrogeology Journal*, 2021, 29(3): 1091 – 1116.
- [23] 王立朝, 侯圣山, 董英, 等. 甘肃积石山 M_s 6.2 级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(3): 108 – 118. [WANG Lichao, HOU Shengshan, DONG Ying, et al. Basic characteristics of co-seismic geological hazards induced by Jishishan M_s 6.2 earthquake and suggestions for their risk control [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(3): 108 – 118. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 郭富赞, 张永军, 窦晓东, 等. 甘肃积石山 M_s 6.2 地震次生地质灾害分布规律与发育特征 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(1): 6 – 12. [GUO Fuzan, ZHANG Yongjun, DOU Xiaodong, et al. Distribution patterns and development characteristics of secondary geological hazards caused by the M_s 6.2 earthquake in Jishishan, Gansu [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2024, 60(1): 6 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 陈博, 宋闯, 陈毅, 等. 2023 年甘肃积石山 M_s 6.2 地震同震滑坡和建筑物损毁情况应急识别与影响因素研究 [J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)* [2024-01-09] (2024-05-08). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20>. [CHEN Bo, SONG Chuang, CHEN Yi, et al. Study on contingency identification and influencing factors for co-seismic landslides and building damage in the 2023 Gansu Jishishan M_s 6.2 earthquake [J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* [2024-01-09] (2024-05-08). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20>. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 王浩, 牛全福, 刘博, 等. 基于 MaxEnt 结合粒子群优化的陇南市山洪灾害空间分布预测研究 [J/OL]. *武汉大学*

- 学报(信息科学版), 2023. [2023-10-20](2024-05-08). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WHCH20231018002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. [WANG Hao, NIU Quanfu, LIU Bo, et al. Study on spatial distribution prediction of mountain torrents in Longnan city based on MaxEnt combined with particle swarm optimization [J/OL]. China Industrial Economics, 2023. [2023-10-20](2024-05-08) <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WHCH20231018002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 牛全福,熊超,雷姣姣,等.基于FFPI模型的甘肃陇南山区山洪灾害风险评价[J].自然灾害学报, 2023, 32(4): 36 - 47. [NIU Quanfu, XIONG Chao, LEI Jiaojiao, et al. Risk assessment of flash flood disasters in Longnan mountain area of Gansu Province based on FFPI model [J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(4): 36 - 47. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 欧阳泽怡,李志辉,欧阳硕龙,等.基于Maxent和ArcGIS的赤皮青冈在中国的潜在适生区预测[J].中南林业科技大学学报, 2023, 43(2): 19 - 26. [OUYANG Zeyi, LI Zhihui, OUYANG Shulong, et al. Prediction of the potential distribution of *Cyclobalanopsis gilva* in China based on the Maxent and ArcGIS model [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(2): 19 - 26. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 姚政宇,韩其飞,林彬.基于最大熵模型的新疆主要有毒杂草分布区预测[J].生态学报, 2023, 43(12): 5096 - 5109. [YAO Zhengyu, HAN Qifei, LIN Bin. Prediction of distribution area of main noxious and miscellaneous weeds in Xinjiang based on MaxEnt model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 5096 - 5109. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 刘明明,刘丹丹,芦星,等.基于MaxEnt模型的新疆地区钝缘蜱适生区分布研究[J].中国媒介生物学及控制杂志, 2023, 34(5): 671 - 678. [LIU Mingming, LIU Dandan, LU Xing, et al. MaxEnt model-based analysis of distribution of suitable habitats of *Ornithodoros* ticks in Xinjiang Uygur Autonomous Region, China [J]. Chinese Journal of Vector Biology and Control, 2023, 34(5): 671 - 678. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 牛全福,冯尊斌,党星海,等.黄土区滑坡研究中地形因子的选取与适宜性分析[J].地球信息科学学报, 2017, 19(12): 1584 - 1592. [NIU Quanfu, FENG Zunbin, DANG Xinghai, et al. Suitability analysis of topographic factors in loess landslide research [J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(12): 1584 - 1592. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 王晓帆,段雨萱,金露露,等.基于优化的最大熵模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化[J].生态学报, 2023, 43(16): 6590 - 6604. [WANG Xiaofan, DUAN Yuxuan, JIN Lulu, et al. Prediction of historical, present and future distribution of *Quercus* sect. *Heterobalanus* based on the optimized MaxEnt model in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6590 - 6604. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 何学高,刘欢,张婧,等.基于优化的MaxEnt模型预测青海省祁连圆柏潜在分布区[J].北京林业大学学报, 2023, 45(12): 19 - 31. [HE Xuegao, LIU Huan, ZHANG Jing, et al. Predicting potential suitable distribution areas for *Juniperus przewalskii* in Qinghai Province of northwestern China based on the optimized MaxEnt model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 19 - 31. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 刘怡彤,郭慧,裴顺祥,等.基于MaxEnt模型的天然元宝枫在我国的适生区区划及合理性分析[J].林业科学, 2023, 59(12): 13 - 24. [LIU Yitong, GUO Hui, PEI Shunxiang, et al. Regionalization and rationality analysis of natural acer truncatum in China based on MaxEnt model [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(12): 13 - 24. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 周安晟,成彦丽,陈鸿,等.基于MaxEnt模型预测含笑在中国的潜在适生区[J].安徽科技学院学报, 2023, 37(6): 19 - 27. [ZHOU Ansheng, CHENG Yanli, CHEN Hong, et al. Prediction of potential suitable areas of *Michelia figo* in China based on MaxEnt model [J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2023, 37(6): 19 - 27. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 黄煜,谢婉丽,刘琦琦,等.基于GIS与MaxEnt模型的滑坡易发性评价——以铜川市中部城区为例[J].西北地质, 2023, 56(1): 266 - 275. [HUANG Yu, XIE Wanli, LIU Qiqi, et al. Landslide susceptibility assessment based on GIS and MaxEnt model: Example from central districts in Tongchuan City [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 266 - 275. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 王兰民,许世阳,王平,等.2023年积石山6.2级地震诱发大规模黄土液化流滑的特征与启示[J].岩土工程学报, 2024, 46(2): 235 - 243. [WANG Lanmin, XU Shiyang, WANG Ping, et al. Characteristics and lessons of liquefaction-triggered large-scale flow slide in loess deposit during Jishishan $M_6.2$ earthquake in 2023 [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(2): 235 - 243. (in Chinese with English abstract)]
- [38] NIU Quanfu, DANG Xinghai, LI Yuefeng, et al. Suitability analysis for topographic factors in loess landslide research: A case study of Gangu County, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(7): 294.