

青海省湟水流域潜在地质灾害识别与易发性评价

高崇越, 赵健赞, 王志超, 温兰冲, 姜传礼

(青海大学 地质工程学院, 青海 西宁 810016)

摘要: [目的] 明确青海省湟水流域地质灾害空间分布特征与规律, 为该地区防灾减灾提供数据支撑与科学依据。[方法] 通过小基线子集干涉测量 (small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR) 技术识别地质灾害点, 结合地形因素、地质因素、环境因素、气象因素、人类活动因素进行灾害空间分布规律分析, 建立逻辑回归 (logistic regression, LR) — 频率比 (frequency response, FR) 模型并检验, 利用返回概率值进行易发性评价。[结果] ① 湟水流域所分布的潜在地质灾害以滑坡、崩塌为主, 多种类型潜在地质灾害共生。滑坡与不稳定斜坡通常发育于坡度较缓的山坡上, 通常伴有大量张拉与剪切裂缝, 尤其在雨季发育明显, 对山体下方交通、居民安全构成威胁。发育于河谷两岸的滑坡与不稳定斜坡还可能阻塞河流, 形成堰塞湖, 进一步加剧灾害风险。崩塌多发育在岩石结构较为疏松或风化严重的陡峭山壁, 因地质脆弱, 加之降雨等自然因素刺激, 易使山体土块、岩石块下落, 对下方的居民区和交通线路构成威胁。② 研究区 2 425—3 650 m 高程区间的地质灾害分布较多, 东北向为地质灾害易发坡向; 地质灾害易发性随归一化植被指数 (normalized digital vegetation index, NDVI) 增加而降低, 随坡度、地形起伏度、日降水量增加而升高, 随距断层距离增加而减少。③ 湟水流域高易发区及较高易发区, 面积约 5 937.60 km², 占研究区总面积约 38.78%, 主要集中在湟水流域南、北边缘地区, 湟中、大通、海晏交界处, 以及建筑区周边边坡上。④ 对评价结果进行检验, 模型预测性能受试者特征曲线 (receiver operating characteristic curve, ROC 曲线) 线下面积 (area under curve, AUC) 为 0.787, 易发区由高至低 FR 逐级减小, 与实际灾害点的分布具有良好的 consistency。⑤ 断层核密度为湟水流域地质灾害发育的主控因子, 坡向、地形起伏度、道路核密度次之, 剖面曲率对地质灾害发育影响最小。[结论] ① 利用 SBAS-InSAR 技术能有效识别湟水流域潜在地质灾害, LR-FR 模型获得的易发性评价结果可靠。② 湟水流域地质灾害易发区的分布具有明显的空间差异性, 主要分布在海拔较高、植被覆盖率较低、降雨量较大、距离断层近的地区, 断层核密度为地质灾害易发性的主控因子。③ 湟水流域的地质灾害具有多发性、突发性和高风险性的特点, 给当地居民生活、区域经济发展及生态环境带来了严重的影响。因此, 对其进行监测、预警和防治工作显得尤为重要。

关键词: 湟水流域; SBAS-InSAR; 逻辑回归—频率比; 空间分布; 易发性评价; 地质灾害

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)02-0245-13

中图分类号: P642.2

文献参数: 高崇越, 赵健赞, 王志超, 等. 青海省湟水流域潜在地质灾害识别与易发性评价[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 245-257. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.026; Gao Chongyue, Zhao Jianyun, Wang Zhichao, et al. Identification and susceptibility evaluation of potential geological hazards in Huangshui River basin of Qinghai Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 245-257.

Identification and Susceptibility Evaluation of Potential Geological Hazards in Huangshui River Basin of Qinghai Province

Gao Chongyue, Zhao Jianyun, Wang Zhichao, Wen Lanchong, Jiang Chuanli

(School of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: [Objective] The spatial distribution characteristics and laws of geological disasters were determined at the Huangshui River basin in Qinghai Province, in order to provide data support and a scientific basis for disaster prevention and reduction. [Methods] Geological hazard sites were identified by small baseline subset

收稿日期: 2023-10-12

修回日期: 2024-02-04

资助项目: 青海省重点研发与转化计划项目“青海省湟水流域潜在地质灾害风险识别与监测预警关键技术研究与应用”(2023-SF-122)

第一作者: 高崇越(1999—), 男(汉族), 天津市人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害监测。Email: chongyuegao@foxmail.com。

通信作者: 赵健赞(1981—), 男(汉族), 甘肃省张掖市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事对地观测技术与资源环境评价方面的研究。Email: zjyuh@163.com。

interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR). By combining topographic factors, geological factors, environmental factors, meteorological factors, and human activities, the spatial distribution law of disasters was analyzed, and a logistic regression (LR)-frequency response (FR) model was established and tested. The return probability value was used to evaluate susceptibility. [Results] ① The potential geological disasters distributed in the Huangshui River basin were mainly landslide and collapse, and many kinds of potential geological disasters occurred simultaneously. Landslides and unstable slopes usually developed on slopes with low slope and were accompanied by a large number of tension and shear cracks that were especially obvious in the rainy season, posing a threat to the safety of traffic and residents below the mountain. Landslides and unstable slopes on both sides of river valleys may also block rivers and form barrier lakes, further aggravating disaster risks. Slope collapses mostly developed in the steep mountain walls with relatively loose rock structure or severe weathering. Due to geological fragility coupled with stimulation by natural factors such as rainfall, situations easily develop and result in falling mountain soil and rocks that pose a threat to residential areas and traffic lines below. ② Geological disasters were primarily located in the 2 425—3 650 m elevation area of the study area, and the northeast direction was the slope direction of geological disasters. Normalized difference vegetation index (NDVI) decreased with the increase in geological hazards, increased with the increase of slope, relief, and daily precipitation, and decreased with the increase of distance from the fault. ③ The high-risk and relatively high-risk areas in the Huangshui River basin, covering an area of about 5 937.60 km², accounting for about 38.78% of the total area of the study area, and were mainly concentrated in the south and north border areas of Huangshui River basin, Huangzhong-Datong-Haiyan Junction, and the surrounding slopes of the construction area. ④ The evaluation results were tested. The area under curve (AUC) of the receiver operating characteristic curve (ROC curve) of model prediction performance was 0.787. The FR in the prone area decreased step by step from high to low, and this result was in good agreement with the distribution of actual disaster points. ⑤ Fault core density was the main control factor of geological hazard development in the Huangshui River basin, followed by slope direction, relief degree, and road core density. Section curvature had the least influence on geological hazard development. [Conclusion] ① SBAS-InSAR technology effectively identified potential geological hazards in the Huangshui River basin, and the susceptibility evaluation results obtained by the LR-FR model were reliable. ② The distribution of geological disaster prone areas in the Huangshui Basin had obvious spatial differences, mainly located in the areas with higher elevation, lower vegetation coverage rate, greater rainfall, and close to the fault. Fault core density was the main control factor of geological disaster susceptibility. ③ The geological disasters in the Huangshui Basin were characterized by frequent, sudden, and high risk occurrences that seriously impacted local people's lives, regional economic development, and the ecological environment. Therefore, the monitoring, early warning, and prevention of these disasters are particularly important.

Keywords: Huangshui River basin; SBAS-InSAR; logistic regression-frequency ratio; spatial distribution; susceptibility evaluation; geological hazard

潜在地质灾害是指未发生但可能发生,已经发生但仍可能进一步发展,可能会使人类生命财产造成损失、对环境产生破坏的地质作用或地质现象,包括崩塌、滑坡、泥石流等^[1-2]。湟水流域是青海省主要粮食供给区与人口聚集区,但流域内自然地理条件和地质环境复杂,以滑坡为主的地质灾害频发,严重影响着流域内人民的正常生产生活,湟水流域地质灾害防治

工作面临严峻考验^[3]。针对湟水流域地质灾害问题,研究人员开展了大量调查、研究工作,如安炳琪等^[4]综合全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)和多源遥感数据对西宁市进行滑坡识别与三维地形表变监测,得到部分灾害点的定量监测数据;张志军等^[5]利用GF-1,LANSAT8 OLI和数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据进

行青海省大通县地质灾害解译,共解译出地质灾害影像体 399 处;杨伟卫等^[6]利用坡度、汇水面积、植被、人类活动 4 种影响因子通过不同权重赋值的办法对湟水流域进行了滑坡灾害危险性评价;赵东亮等^[7]采用信息量模型对河湟谷地进行了地质灾害易发性评价,将研究区地质灾害易发性划分为极高、高、中、低、极低五级易发区。地质工作者的共同努力为湟水流域地质灾害识别与监测以及易发性评价作出了重要贡献,但以往对于湟水流域地区地质灾害识别与易发性评价研究略有不足。在地质灾害识别方面,或识别性能不佳,识别出的地质灾害点数量较少;或研究区较小,不足以支撑全流域大尺度地质灾害研究。在易发性评价方面,或影响因子种类选择较少,不足以支撑多影响因子对地质灾害发育影响的耦合关系分析;或通过经验模型确定权重,具有一定的主观性;或仅使用隐患库内的地质灾害信息,灾害点信息收集不全面。且随时间推移,地质灾害将发生演变,以及“天—空—地”一体化监测体系等新理念提出,需进一步开展地质灾害研究工作,完善湟水流域地质灾害治理体系。

易发性是在多种因素的耦合影响下,预估地质灾害发生位置,或某一点地质灾害发生的可能性^[8]。根据底层数据类型、分析流程和评估标准,可将评价模型分类为 3 大类:知识驱动模型、数据驱动模型和确定性方法^[9]。在数据驱动模型中,逻辑回归(logistic regression, LR)^[10]、频率比(frequency response, FR)^[11]、支持向量机(support vector machine, SVM)^[12]和随机森林(random Forest, RF)^[13]等算法皆表现良好。不同影响因子对地质灾害发生的贡献程度可由逻辑回归模型得出,同种影响因子各分级地质灾害发生风险可由频率比模型得出。因此,可结合逻辑回归与频率比模型,构建逻辑回归—频率比(LR-FR)模型,求得某一地点地质灾害发生概率。时序 InSAR 技术常用于地质灾害识别中,为地质灾害易发性评价提供可靠数据。学者们利用 InSAR 技术有效识别地质灾害点且进行地质灾害易发性评价,并取得良好效果。金必晶等^[14]基于 SBAS-InSAR 技术开展研究区地面变形遥感解译获取地表形变信息,通过插值计算出地质灾害点所在位置,并进行易发性评价;盖侨侨等^[15]将时序 InSAR 监测得到的形变点代替现有地质灾害记录点,对白银市进行地质灾害易发性评价及分区;陈博等^[16]联合震前高分辨率光学遥感影像解译和 GACOS 辅助下的 InSAR Stacking 技术探测灾区震前滑坡,并利用机器学习算法获得震中附近滑坡的空间易发性图。

SBAS-InSAR 技术能够高精度、大范围地监测地表形变,发现潜在地质灾害点,为潜在地质灾害易发性评价提供最新的基础信息,为灾害风险评估提供科学依据。本研究综合利用 SBAS-InSAR 技术进行青海湟水流域潜在地质灾害点识别和易发性评价,旨在早发现潜在风险,提前预警,为灾害防范和减灾工作提供有效支持。

1 研究区概况

湟水流域位于青藏高原与黄土高原的过渡地带(100°40′—103°03′E, 36°02′—37°25′N),是由西南部的日月山断裂、拉脊山断裂和北部的达坂山南缘断裂围限的新生代盆地,岩层产状复杂,堆积了大量新生代河湖相沉积物^[3]。湟水河源于青海省祁连山脉东段,流经海北藏族自治州、西宁市、海东市,最终汇入黄河,流域内除干流外,还包含湟中、湟源和大通三条湟水河的主要支流。该流域季节性流量变化显著,夏季雨水充沛、高山冰雪融化,水量较大,冬季水量较少。岩石类型多样,包括沉积岩、变质岩和火成岩等。地质时期跨度广泛,拥有多个地层群,包括达肯达板群、第三系西宁群、花石山群、化隆岩群等;降水量较大,多年平均降雨量超 400 mm,且集中在 6—8 月^[7],导致地质灾害频发(如南山滑坡群、海子沟阴岸崩塌等),并有明显的季节性和区域性规律,在多雨季节和地质脆弱区域十分常见,影响因素包括降雨、植被覆盖度、地形特征和人类活动等,对当地人民生活及经济发展产生不利影响。

2 研究方法及数据

2.1 数据来源与技术路线

选取哨兵 1A 卫星宽幅干涉模式影像进行研究,包括升轨影像数据 166 景(128 号轨道),降轨影像数据 338 景(33 号轨道 174 景,135 号轨道 164 景)。所用数据时间跨度为 2020 年 1 月至 2022 年 12 月,极化方式为 VV+VH,影像平均入射角为 44.5°,地面分辨率最高为 5 m×20 m。采用了两种数字高程模型,分别为 90 m 分辨率 SRTM 数字高程模型和 12.5 m 分辨率 ALOS 数字高程模型。通过 SBAS-InSAR 技术获取地表变形信息,利用实地调查、无人机倾斜摄影测量与遥感影像目视解译等方法验证潜在地质灾害点并进行编录,从地形因素、地质因素、环境因素、气象因素、人类活动因素中选取代表性影响因子,结合频率比模型,分析地质灾害的空间分布规律。同时,利用筛查出的地质灾害点和随机生成的非灾害点数据,以 7:3 比例生成训练集与测试集,通过计算皮

尔逊相关系数剔除冗余因子,建立 LR-FR 模型,检验模型精度,并进行预测;提取湟水流域各环境因子,进

行易发性评价与主控因子分析,总体技术路线如图 1 所示。

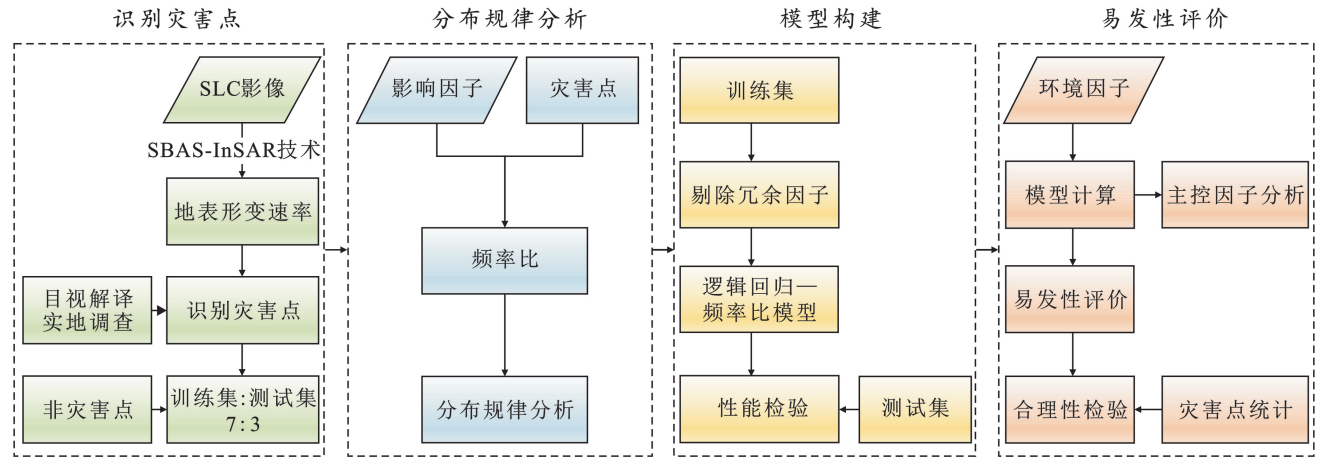


图 1 湟水流域潜在地质灾害研究技术路线图

Fig.1 Technology roadmap of research on geological hazards in Huangshui River basin

2.2 SBAS-InSAR 技术原理

微波遥感卫星飞行获取 N 幅合成孔径雷达图像,选择基线变化较小部分,构建小基线子集,对影像进行匹配分组,生成 M 幅差分干涉图,其中关系满足:

$$\frac{N}{2} \leq M \leq \frac{N(N-1)}{2} \quad (1)$$

式中: N 为微波遥感卫星飞行获取合成孔径雷达图像数量; M 为生成差分干涉图数量。

利用差分干涉处理方法获取解缠相位,结合 DEM 将相位信息中的平地相位与地形相位去除,并进行自适应滤波。将形变相位、地形相位和大气延迟相位表示为矩阵形式,利用线性方程组求解,结合奇异值分解(singular value decomposition, SVD),获得形变速率最小范数意义的最小二乘解,得到模型形变相位,并对残差相位进行时间域和空间域滤波,以获得大气延迟相位和非线性形变值。但此过程获取结果是视线(line of sight, LOS)向一维方向的形变信息,斜坡面的变形反映不充分。因此通过除以雷达入射角度(θ)的余弦值($\cos\theta$)的方法将 LOS 方向的形变信号转换为垂直方向的形变信息^[17-18]。

2.3 LR-FR 法

频率比(FR)可呈现地质灾害与环境因子间的线性关系与非线性关系,能表示因子各属性区间对地质灾害易发性联动性的定量统计^[19-20]。FR 可以较好反映环境因子各个区间的地质灾害发育风险程度。FR > 1 表明该地区中特定影响因子处于此区间内时地质灾害发生风险较高;FR < 1 表明该地区中特定影响因子处于此区间内时地质灾害发生风险较低;当 FR ≈ 1 时,表明该地区中特定影响因子处于此区间内时地质灾害发生风险一般。FR 计算公式为:

$$FR = \frac{N_j / N}{S_i / S} \quad (2)$$

式中: N 为研究区地质灾害发育的个数; N_j 为在该环境因子分级下地质灾害发育的个数; S 为评价单元总面积; S_i 为环境因子分级下评价单元面积。因数据栅格数量与面积具有同比例关系,因此可利用总栅格数量替代 S ,该环境因子分级下评价单元栅格数量代替 S_i 。

逻辑回归(LR)可揭示一个因变量与多个互不相关自变量之间的多元回归关系。记地质灾害发生概率为 P , 值域为 $[0, 1]$, 将 P 引入 Sigmoid 函数中,计算公式为:

$$Y = \text{Logit}(P) = \ln \frac{P}{1-P} = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n + b \quad (3)$$

式中: Y 为地质灾害发生的有效函数; $\frac{P}{1-P}$ 为似然比; b 为常数; $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 为逻辑回归系数; x_1, x_2, \dots, x_n 为影响因子指标值。

LR 可以反映不同环境因子对地质灾害发生的贡献,FR 可以反映影响因子不同分级地质灾害风险等级,因此可将 FR 结果作为 LR 的输入,构建出 LR-FR 法。

3 结果与分析

3.1 湟水流域潜在地质灾害隐患点识别与验证

利用 ArcGIS Pro 软件计算每平方 km 竖直向地表形变速率标准差,根据三倍标准差原则,通过设立阈值(坡度 $> 10^\circ$, 竖直向形变速率 < -10 mm/a)办法,结合高分影像目视解译,得出灾害点具体分布

位置。利用升、降轨数据分别识别出流域内灾害点 885 处和 932 处,共计 1 817 处,经过实地调研等方式进行验证,识别准确率在 85%左右,可为研究区提供较为全面且可靠的易发性评价数据支撑^[15]。识别结果如图 2 所示,部分野外实际调查影像如图 3 所示。

夜光遥感强度通常可以反映人口的密集程度以及经济发展情况,本研究结合夜光遥感数据,有 321 处位于人口密集区域内,地表形变速率最大处超 -60 mm/a ,威胁当地居民生命财产安全;结合 OSM 地图 2023 年 11 月路网数据,有 587 处识别灾害点位于距道路 1 km 范围内,可能对交通道路产生破坏,威胁交通运输安全。

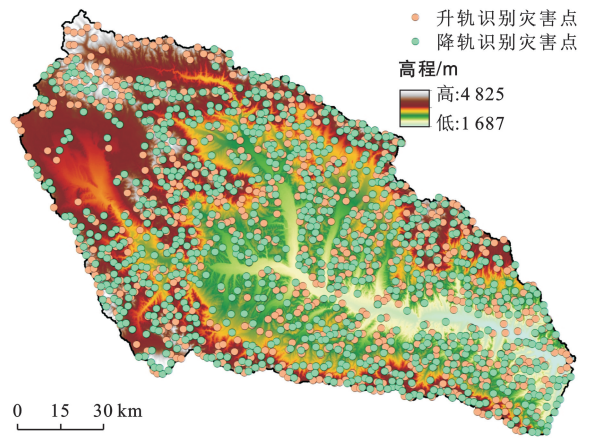


图 2 湟水流域潜在地质灾害点识别结果
Fig.2 Identification result of potential geological hazard spots in Huangshui River basin



图 3 湟水流域地质灾害倾斜摄影测量影像

Fig.3 Tilt photogrammetric images of geological hazards in Huangshui River basin

3.2 易发性评价

结合流域特征,从地形因素(高程、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、地形起伏度)、地质因素(断层核密度、距断层距离)、环境因素(NDVI、水系核密度、距水系距离)、气象因素(日均降水量)、人类活动因素(道路核密度、距道路距离)对灾害点进行分布规律分析,各影响因子空间分布如图 4 所示。

3.2.1 地形因素 对地形因素的影响因子各分级的栅格占比与其所在区域内包含的灾害点数量占比进行统计,并计算频率比,结果如图 5 所示。当高程在 2 425—3 650 m 时,FR 大于 1,表明此区间内地质灾害发生风险较高;在 1 687—2 425 m 和 3 650—4 825 m 时,FR 小于 1,地质灾害发育较弱。经调查,1 687—

2 425 m 高程区间内主要与人类活动因素有关,不稳定斜坡治理程度高,因此频率比较小;3 650—4 825 m 高程区间内主要与地质因素有关,高海拔区域常见的岩石类型通常为硬质岩层,如花岗岩、片麻岩等,其具有较高的强度和稳定性,能够抵御较大的地质力量,减少地质灾害发生的可能性。FR 与坡度、剖面曲率、地形起伏度呈现出正相关关系,与平面曲率呈现出负相关关系,表明流域内地质灾害发生风险随着坡度、剖面曲率、地形起伏度增加而上升,随着平面曲率减小而下降。坡度和地形起伏度往往代表着坡体的陡峭程度,陡峭的坡体更容易受到物理剥蚀和水力剥蚀的影响,导致地质结构的不稳定,土壤、岩石或松散物质更容易在重力作用下发生下滑,导致地质灾害的发生。

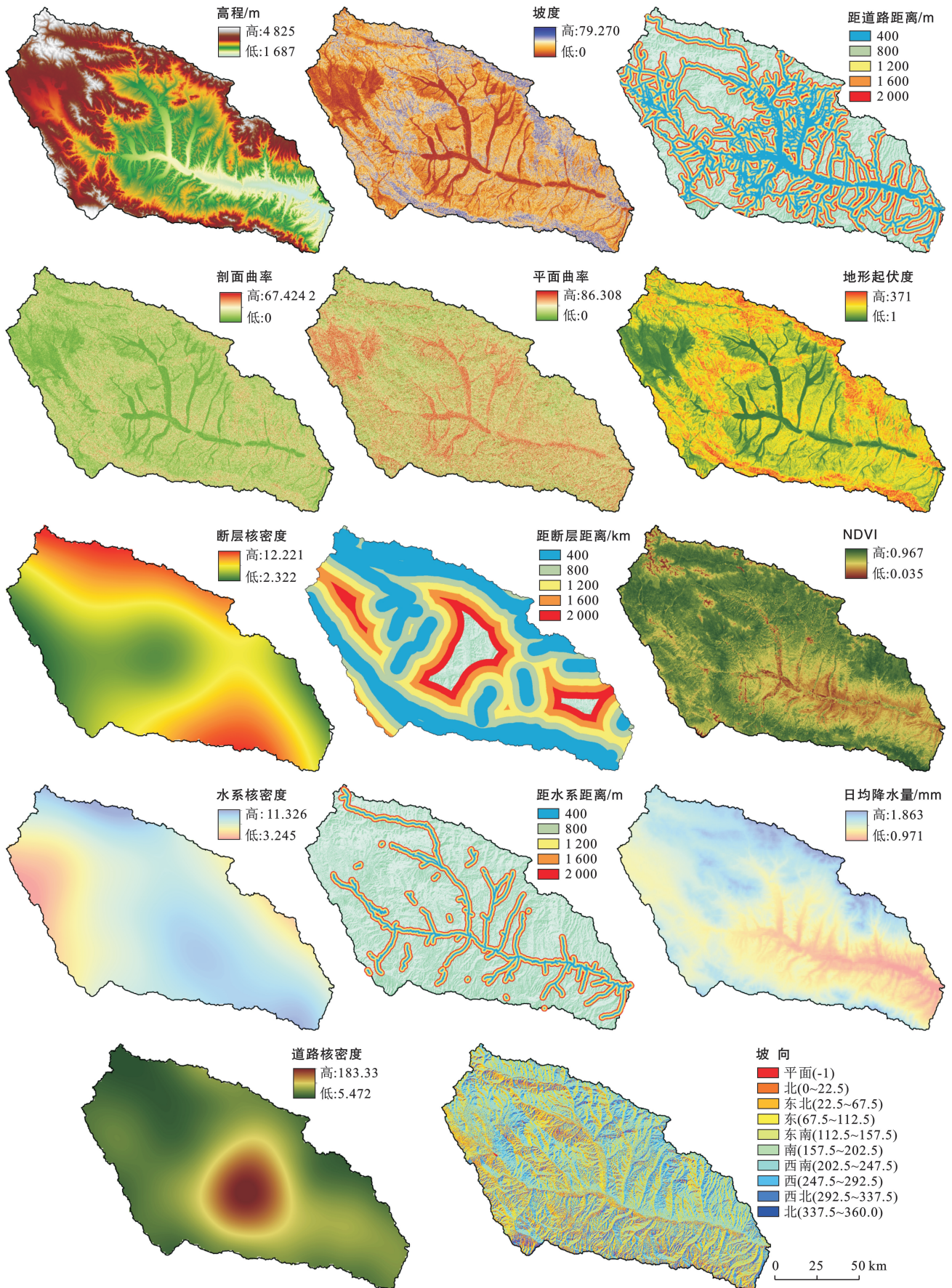


图 4 湟水流域地质灾害影响因子图集

Fig.4 Atlas of influencing factors on geological hazards in Huangshui River basin

坡体的平面曲率越大,雨水和地表水流更易于向四周扩散,减少水流的冲刷和侵蚀作用,并有助于水分快速排出,减少土壤含水量,使地质灾害在平面曲率较大的地区分布较少。湟水流域地质灾害集中发育在西、西北、北、东北、东坡向上 FR 均大于 1,FR 于坡向为东北时达到最大。表明东北坡向为湟水流域地质灾害易发坡向,其余坡向 FR 均小于 1。坡向控制了接收太阳辐射的强弱,影响植被覆盖、蒸发量、坡面侵蚀,进而影响斜坡稳定性。北和偏北坡向坡体接

收阳光辐射较少,会导致坡面温度较低,冻融作用频繁,尤其在春秋两季,引起岩石的破裂和土体的松动,增加了地质灾害的风险;其次会导致植被生长稀疏,在防止土壤侵蚀方面的作用较小,地表裸露更易引发地质灾害;同时,会使地表水分蒸发量相对较少,土壤湿度较高,增加坡面的不稳定性;在降雨过程中,由于植被覆盖度较低以及土壤湿度高,东北坡向更容易发生水土流失,导致坡面侵蚀,削弱坡面稳定性,造成地质灾害分布较多。

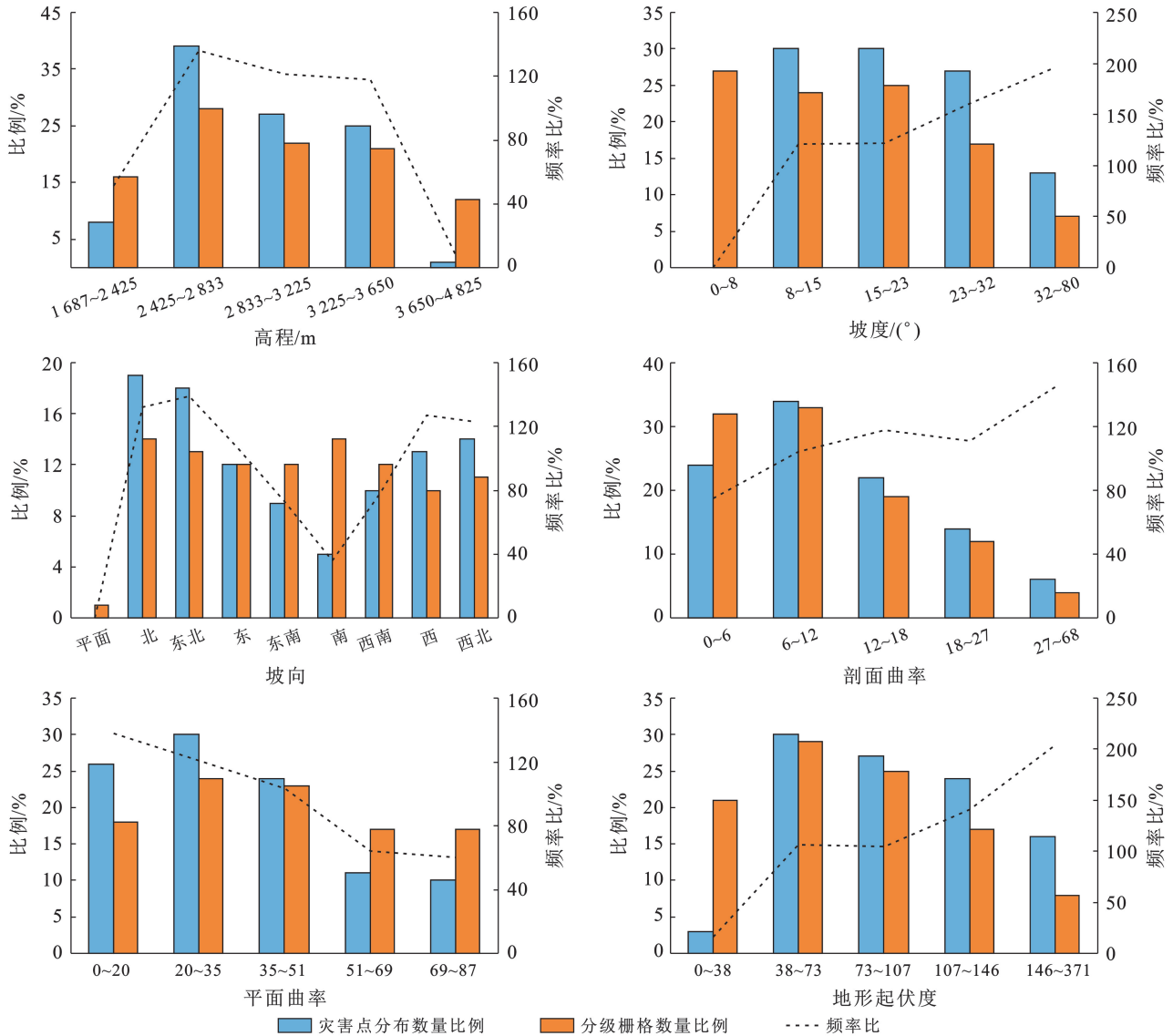


图 5 湟水流域地形因素影响因子频率比

Fig.5 Frequency ratio of topographic factors in Huangshui River basin

3.2.2 地质因素 对地质因素的影响因子各分级的栅格占比与其所在区域内包含灾害点的数量占比进行统计,并计算频率比,结果如图 6 所示。当断层核密度在 5.418~6.655 时,FR 最小,为 0.68,其余区间断层核密度区间 FR 皆在 1±0.17 内,从而推断断层

核密度对地质灾害发育有一定的影响作用,但未见明显线性关系;距断层距离与频率比呈强负相关关系,距断层距离 0~4 km 时 FR 最高,为 1.62,有着较强的地质灾害发育风险;达到 8~12 km 时,FR 开始小于 1,随着距离的增加逐渐减小。相较于断层核密

度,距断层距离对地质灾害发育的影响更为明显,且随着距断层距离的增加,地质灾害发育风险降低。当

距离断层增加,地壳的应力分布逐渐稳定,地质灾害的发生风险相应降低。

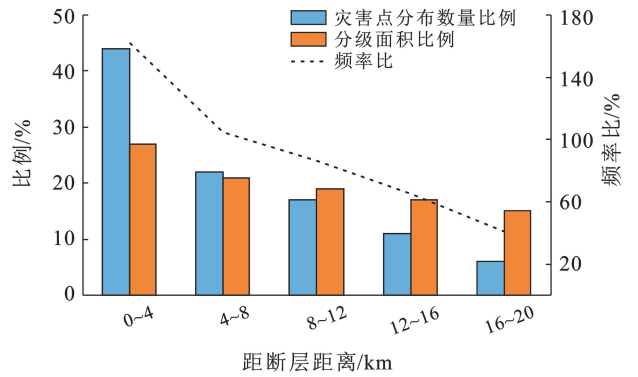
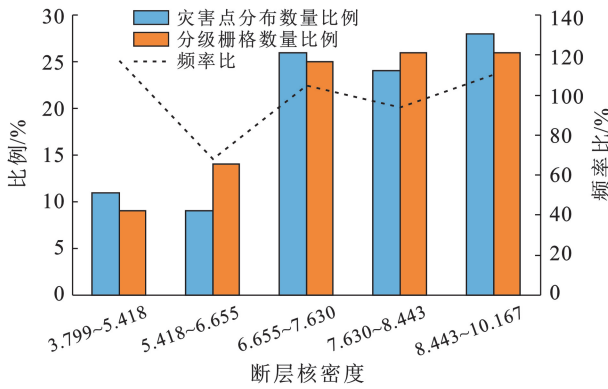


图 6 湟水流域地质因素影响因子频率比

Fig.6 Frequency ratio of geological factors in Huangshui River basin

3.2.3 环境因素 对环境因素的影响因子各分级的栅格占比与其所在区域内包含灾害点的数量占比进行统计,并计算频率比,结果如图 7 所示。当 NDVI 为 0.035~0.319 时,FR 最高,为 1.71,地质灾害发育风险较高;为 0.319~0.710 时,FR 为 1.05,地质灾害发育风险有一定减弱;为 0.710~0.967 时,FR 达到最低,为 0.78,地质灾害发育风险较低。健康的植被可以为土壤提供保护,减少雨水直击地表,降低径流速率,增大土壤入渗能力,从而降低地表水流对土壤的冲刷,减少土壤侵蚀可能性,进而降低地质灾害的发生风险。当水系核密度为 3.228~5.333 时,FR 最低,为 0.51,为 5.333~6.750,6.750~7.911,7.911~9.032,9.032~11.318 时,FR 分别为 1.07,1.11,1.01,1.01,有一定的地质灾害发育风险。当距水系 0~400 m,400~800 m,800~1 200 m,1 200~1 600 m,1 600~2 000 m 时,FR 分别为 0.55,0.57,1.26,1.48,1.23。较低的水系核密度地区土壤稳定性较强,不利于地质灾害发生,当增长到一定数值时,抑制作用消退;由距水系距离与地质灾害 FR 可见,在湟水流域距水系距离不占据地质灾害发生的影响因子的主导地位。

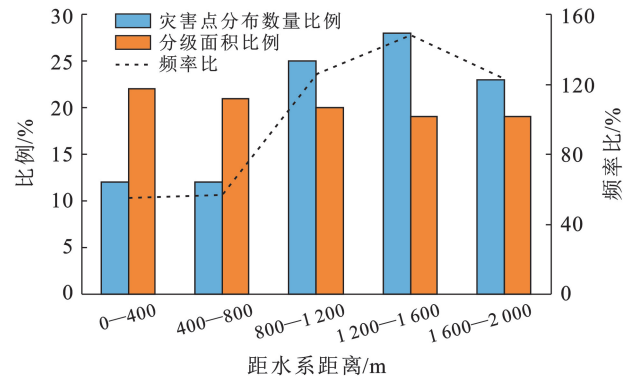
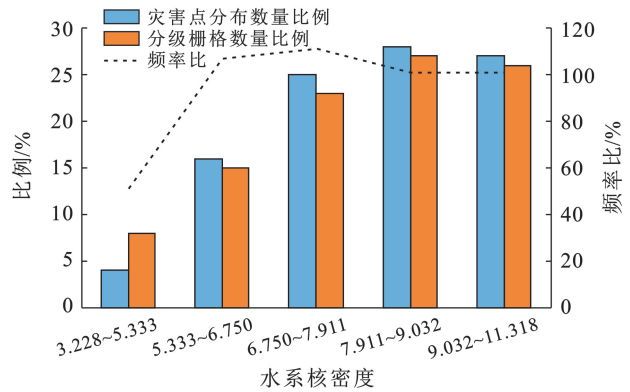
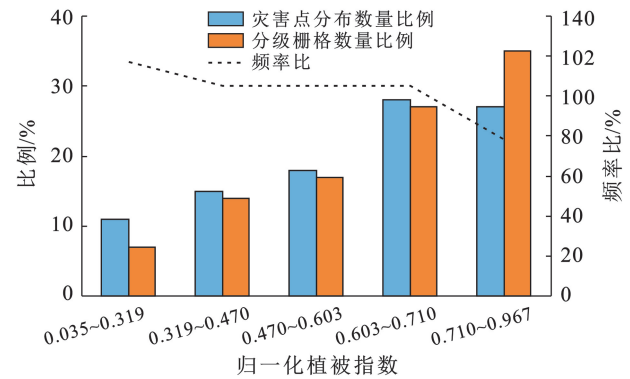


图 7 湟水流域环境因素影响因子频率比

Fig.7 Frequency ratio of environmental factors in Huangshui River basin

3.2.4 气象因素 对气象因素的影响因子各分级的栅格占比与其所在区域内包含灾害点的数量占比进行统计,并计算频率比,结果如图 8 所示。当日降水量为 0.971~1.195 mm/d,1.195~1.323 1 mm/d,1.323~1.443 mm/d 时,FR 分别为 0.88,0.84,0.95,均小于 1,不利于地质灾害发育;当日降水量达到 1.443~1.570 mm/d 时,FR 大于 1,继续增加到 1.570~1.863 mm/d 时,FR 陡增至 1.4。结果表明,地质灾害风险随日降水量的增加而增加。大量降水会增加土壤的饱和度,导致地面失去稳定性,特别在山区更为明显。

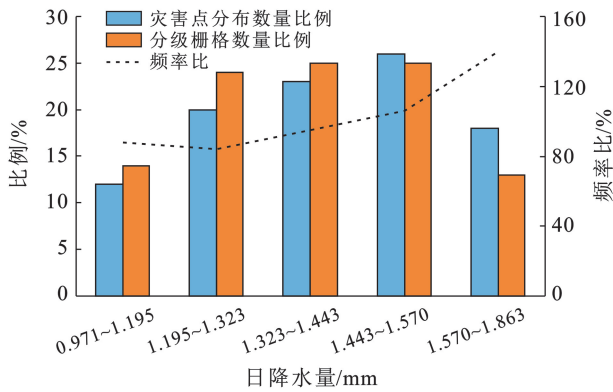
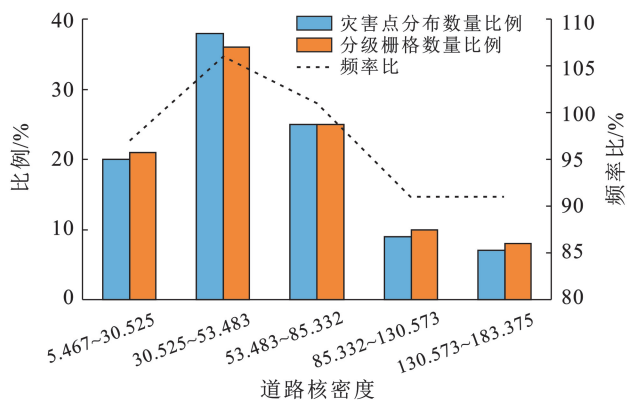


图 8 湟水流域气象因素(日降水量)影响因子频率比
Fig.8 Frequency ratio of meteorological factors (daily precipitation) in Huangshui River basin



3.2.5 人类活动因素 对人类活动因素的影响因子各分级的栅格比例与其所在区域内包含灾害点的数量占比进行统计,并计算频率比,结果如图 9 所示。道路核密度与距道路距离可代表人类活动因素对地质灾害发育数量的影响^[9,21-24]。当道路核密度为 30.525~85.332 时,FR 大于 1,为 5.472~30.525,85.332~183.333 时,FR 小于 1,地质灾害发育风险较低。当距道路 0~400 m 时,FR 小于 1,地质灾害发育风险较低;距道路 400~800 m,800~1 200 m,1 200~1 600 m 时,FR 大于 1,分别为 1.05,1.23,1.22,地质灾害发育风险较高。当人类建设活动达到一定程度时,将通过防灾减灾工程抑制地质灾害发育,而在少量的人类活动的地区,不设防灾减灾工程,会促进地质灾害发育。

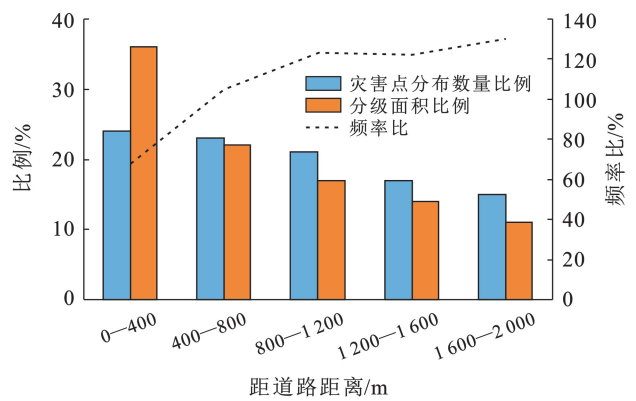


图 9 湟水流域人类活动因素影响因子频率比

Fig.9 Frequency ratio of human activity factors in Huangshui River basin

3.2.6 相关性检验与冗余影响因子剔除 通过选取断层核密度、坡向、坡度、地形起伏度、道路核密度、水系核密度、平面曲率、日降水量、NDVI、高程、剖面曲率为代表影响因子进行易发性评价。较高影响因子将造成因子冗余,影响建模精度。将 1 817 个灾害点作为样本点,FR 作为样本点因子属性输入,计算皮尔逊相关系数,结果如图 10 所示。若相关系数小于等于 0.5,则认为因子相关性较低^[9]。由皮尔逊相关性系数矩阵图(图 10)可知,坡度与地形起伏度相关性系数大于 0.5,需剔除坡度或地形起伏度。设置两种因子组合方式(LR-FR1, LR-FR2)构建模型,LR-FR1 指剔除坡度的因子组合,LR-FR2 指剔除地形起伏度的因子组合。

通常可采用受试者特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC 曲线)评估模型的预测性能,线下面积(area under curve, AUC)越大代表模型性能越好。曲线下面积 AUC 的取值区间为[0.5, 1]。当 $AUC \leq 0.5$ 时,模型无效; $0.5 < AUC \leq 0.7$ 时,模型准确性较低; $0.7 < AUC \leq 0.9$ 时,模型准确性较高;

AUC>0.9 时模型准确性特别高^[25]。结果表明,在预测性能方面,LR-FR1(AUC=0.787)相比于 LR-FR2(AUC=0.783) AUC 值较大,预测性能优于 LR-FR2,因此剔除坡度因子的模型预测性能更好;在拟合性能方面,LR-FR1 所构建模型的 AUC 为 0.798。综上分析,利用 LR-FR1 因子组合方式构建的模型预测性能与拟合性能均较好,可客观为湟水流域地质灾害易发性进行分区评价。

3.2.7 评价结果 自然间断点法能有效识别和分隔数据集中的自然分组,从而提供更准确和有意义的分类,常用于地质灾害易发性评价分级中^[9,15,21]。本研究基于模型返回的概率值,按照自然间断点法将研究划分为高易发区、较高易发区、中易发区、较低易发区、低易发区,结果如图 11 所示。

研究区高易发区与较高易发区主要分布在湟水流域南北边缘地区以及大通县与海晏县交界地区,该地区山地、高原、低洼地形同时存在,易于地质灾害发育。高易发区面积约 2 409.75 km², 占总面积约 15.74%, 是研究区面积比例最小的分区;较高易发区

面积约 3 527.85 km², 占总面积约 23.04%, 是研究区面积占比最大的分区, 同时是占全区域灾害点数量比例最多的分区, 占全区灾害点分布数量的 30.82%; 低易发区面积约 3063.14 km², 占总面积约 19.67%, 仅占全区灾害点分布数量的 7.10%, 是占全区域灾害点数量比例最少的分区。低易发区、较低易发区、中易发区、较高易发区、高易发区 FR 分别为 1.42, 1.33, 1.12, 0.77, 0.36。各分区的 FR 值变化较为明显, 低易发区与较低易发区 FR 小于 1, 其余分区 FR 大于 1, 中易发区 FR 在 1 附近, 表明较高易发区和高易发区地质灾害发育概率较大, 中易发区有概率发育地质灾害, 较低易发区与低易发区地质灾害发育概率较小。易发等级随着 FR 的升高而升高, 与实际地质灾害的分布具有良好的 consistency, 表明易发性评价结果良好。

形起伏度、道路核密度、水系核密度、平面曲率、日降水量、NDVI、高程、剖面曲率逻辑回归系数依次为 10.133, 5.91, 5.877, 5.755, 4.857, 3.021, 2.639, 1.501, 1.236 和 0.869。断层核密度为研究区地质灾害发育主控因子, 坡向、地形起伏度、道路核密度次之, 重要性较高, 剖面曲率于研究区地质灾害发育控制性最弱, 重要性最低。

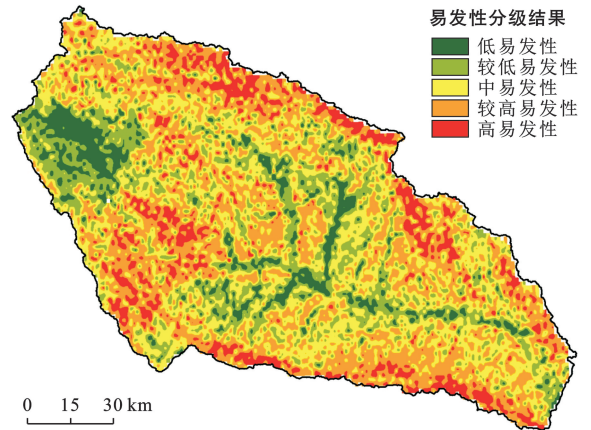
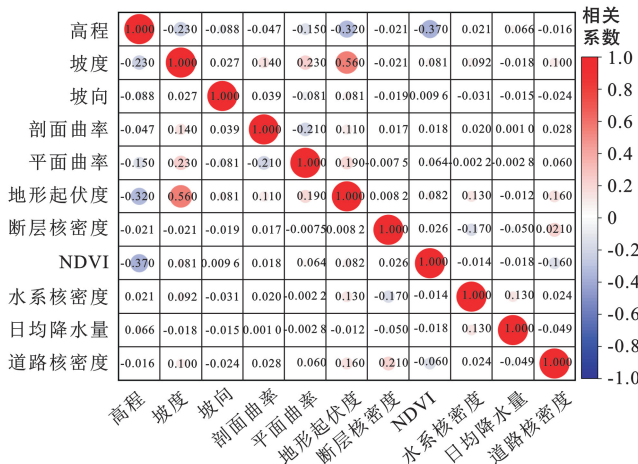


图 11 湟水流域地质灾害易发性评价
Fig.11 Susceptibility assessment of geological hazards in Huangshui River basin

图 10 湟水流域地质灾害各影响因子皮尔逊相关系数矩阵
Fig.10 Pearson correlation coefficient matrix of each influence factor geological hazards in Huangshui River basin

4 讨论

目前, 大多数研究以研究区历史地质灾害点及重大地质灾害隐患点为基础, 而潜在地质灾害点往往地处高位, 隐蔽性强, 传统人工地面调查手段难以到达现场开展有效识别, 近年发生地质灾害约 80% 都不在隐患库内^[25-26]。

3.3 主控因子分析

通过生成模型各影响因子系数分析各影响因子的影响程度, 按从大到小排列, 断层核密度、坡向、地

因此, 仅利用隐患库内地质灾害点进行易发性评价不够充分。不同平台监测手段具有不同优势(表 1), 综合应用多种监测手段对湟水流域全面进行潜在地质灾害点识别可改善隐患库内潜在地质灾害点储量不充分的问题。

表 1 不同地形表变监测手段的优势与劣势

Table 1 Advantages and disadvantages of different surface deformation monitoring methods

监测手段	优势	劣势	获取数据类型
InSAR 技术	全天时, 全天候, 大尺度, 较高精度, 使用成本低等	对地势陡峭的区域探测能力较差, 仅能获取 LOS 向地表形变信息	LOS 向地表形变信息
光学遥感影像	大尺度, 使用成本低等	受到云层、昼夜等影响, 对变形特征不明显处识别能力较弱	大尺度光学影像
倾斜摄影测量	高精度, 高分辨率, 具有可视性	无法穿透植被, 作业尺度较小	高精度光学影像, DSM 等
机载激光雷达	高精度, 高分辨率, 可穿透植被	不可视, 作业尺度较小	三维激光点云, DEM 等
GNSS 监测站	高精度, 实时	布设成本高, 空间分辨率很低	单点地表形变信息

本研究与其他学者所作易发性评价结果略显不同。赵东亮等^[7]、张晓博等^[27]、王毅等^[28]易发性评价

结果中的极高易发区、高易发区集中于建筑区内, 本研究易发性评价结果高易发区、较高易发区集中于湟

中县的北部、西南部山区及县城边坡上。这可能是因为隐患库主要收录了建筑区周边的灾害点,对远离建筑区的灾害点记录较为有限,而负样本相对均匀地分布在整个研究区,而本研究所使用正、负样本在研究区内记录较为均匀。

本研究尚存在一定的局限性。辛荣芳等统计地质灾害点共 3 188 处^[3],而本研究识别出地质灾害点 1 817 处,识别结果不够全面;同时,滑坡与崩塌在高分影像呈现出的纹理相近,难以全部明确识别灾害点中的具体潜在地质灾害类型。

5 结论

(1) 湟水流域所分布的潜在地质灾害以滑坡、崩塌为主,多种类型潜在地质灾害共生。滑坡与不稳定斜坡通常发育于坡度较缓的山坡上,通常伴有大量张拉与剪切裂缝,尤其在雨季发育明显,对山体下方交通、居民安全构成威胁,发育于河谷两岸的滑坡与不稳定斜坡还可能阻塞河流,形成堰塞湖,进一步加剧灾害风险;崩塌多发育在岩石结构较为疏松或风化严重的陡峭山壁,因地质脆弱,加之降雨等自然因素刺激,易使山体土块、岩石块下落,对下方的居民区和交通线路构成威胁。

(2) 研究区 2 425—3 650 m 高程区间的地质灾害分布较多,东北向为地质灾害易发坡向;地质灾害易发性随 NDVI 升高而降低,随坡度、地形起伏度、日降水量增加而升高,随距断层距离增加而减少。

(3) 湟水流域高易发区及较高易发区,面积约 5 937.60 km²,占研究区总面积约 38.78%,主要集中在湟水流域南、北边缘地区,湟中、大通、海晏交界处,以及建筑区周边边坡上。

(4) 对评价结果进行检验,模型预测性能 ROC 曲线 AUC 为 0.787,易发区由高至低 FR 逐级减小,与实际灾害点的分布具有良好的一致性。

(5) 断层核密度为湟水流域地质灾害发育的主控因子,坡向、地形起伏度、道路核密度次之,剖面曲率对地质灾害发育影响最小。

参考文献 (References)

[1] 许强,董秀军,李为乐.基于天一空一地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):957-966.
Xu Qiang, Dong Xiujun, Li Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966.

[2] 许泰,鄂崇毅,蒋兴波,等.永登县苦水镇潜在地质灾害时空分布特征及易发性与危险性分区评价[J].科学技术与工程,2021,21(33):14081-14092.
Xu Tai, E Chongyi, Jiang Xingbo, et al. Temporal and spatial distribution and divisional evaluation of susceptibility and risk of the potential geological hazards in Kushui Town, Yongdeng County [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(33): 14081-14092.

[3] 辛荣芳,李宗仁,张焜,等.青海省湟水流域地质灾害动态变化遥感监测[J].自然资源遥感,2022,34(4):254-261.
Xin Rongfang, Li Zongren, Zhang Kun, et al. Remote sensing monitoring of the dynamic changes in geologic hazards in the Huangshui River basin of Qinghai Province [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 254-261.

[4] 安炳琪,罗海滨,丁海勇,等.基于 SBAS-InSAR 技术的西宁地表形变监测[J].遥感技术与应用,2021,36(4):838-846.
An Bingqi, Luo Haibin, Ding Haiyong, et al. Monitoring of surface deformation in Xining based on SBAS-InSAR [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 838-846.

[5] 张志军,庄永成.基于 GF-1 数据的地质灾害遥感调查:以青海省大通县为例[J].科学技术与工程,2017,17(18):9-17.
Zhang Zhijun, Zhuang Yongcheng. The survey of geological hazards based on GF-1 data: Taking example for Datong County, Qinghai Province [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18): 9-17.

[6] 杨伟卫,张帆,葛梦春,等.基于 GIS 的湟水流域滑坡灾害危险性快速评价方法研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2009,37(5):97-99.
Yang Weiwei, Zhang Fan, Ge Mengchun, et al. Study on the quick method of landslide risk assessment in Huangshui Valley based on GIS [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2009, 37(5): 97-99.

[7] 赵东亮,兰措卓玛,侯光良,等.青海省河湟谷地地质灾害易发性评价[J].地质力学学报,2021,27(1):83-95.
Zhao Dongliang, Lancuo Zhuoma, Hou Guangliang, et al. Assessment of geological disaster susceptibility in the Hehuang Valley of Qinghai Province [J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(1): 83-95.

[8] Guzzetti F, Reichenbach P, Cardinali M, et al. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale [J]. Geomorphology, 2005, 72(1): 272-299.

[9] 麻晟,陈剑,吴赛儿.陕西省安康市瀛湖镇滑坡灾害分布特征与易发性分析[J/OL].现代地质,1-17[2024-03-16].https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2023.067.

- Ma Sheng, Chen Jian, Wu Saier. Distribution characteristics and susceptibility assessment of landslide hazard in Yinghu Town, Ankang City, Shaanxi Province [J/OL]. *Geoscience*, 1-17 [2024-03-16]. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2023.067>.
- [10] 余淙蔚,柳侃,殷杰,等.一种适用于逻辑回归模型评价浅层滑坡易发性的网格尺度划分方法:以 2019 年福建省三明市群发浅层滑坡为例[J].*山地学报*,2022,40(1):106-119.
- Yu Congwei, Liu Kan, Yin Jie, et al. A grid-scale division method applicable to logistic regression models for evaluating the susceptibility of shallow landslides: Taking the 2019 cluster of shallow landslides in Sanming, Fujian as example [J]. *Mountain Research*, 2022, 40(1):106-119.
- [11] 李文彦,王喜乐.频率比与信息量模型在黄土沟壑区滑坡易发性评价中的应用与比较[J].*自然灾害学报*,2020,29(4):213-220.
- Li Wenyan, Wang Xile. Application and comparison of frequency ratio and information value model for evaluating landslide susceptibility of loess gully region [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, 29(4):213-220.
- [12] 刘纪平,梁恩婕,徐胜华,等.顾及样本优化选择的多核支持向量机滑坡灾害易发性分析评价[J].*测绘学报*,2022,51(10):2034-2045.
- Liu Jiping, Liang Enjie, Xu Shenghua, et al. Multi-kernel support vector machine considering sample optimization selection for analysis and evaluation of landslide disaster susceptibility [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10):2034-2045.
- [13] 郭衍昊,窦杰,向子林,等.基于优化负样本采样策略的梯度提升决策树与随机森林的汶川同震滑坡易发性评价[J/OL].*地质科技通报*,1-20[2024-03-16].<https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkb.tb20230037>.
- Guo Yanhao, Dou Jie, Xiang Zilin, et al. Optimized negative sampling strategies of gradient boosting decision tree and random forest for evaluating Wenchuan coseismic landslides susceptibility mapping [J/OL]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 1-20 [2024-03-16]. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkb.tb20230037>.
- [14] 金必晶,殷坤龙,桂蕾,等.基于遥感解译的盐湖地区输电线路杆塔地面沉降易发性评价[J].*地球科学*,2024,49(2):538-549.
- Jin Bijing, Yin Kunlong, Gui Lei, et al. Susceptibility assessment of land subsidence of transmission line towers in the Salt Lake area based on remote sensing interpretation [J]. *Earth Science*, 2024, 49(2):538-549.
- [15] 盖侨侨,孙倩,张宁,等.融合时序 InSAR 形变的白银市地质灾害易发性评价[J/OL].*武汉大学学报(信息科学版)*,1-15[2024-03-16].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20230403.1759.004.html>.
- Gai Qiaoqiao, Sun Qian, Zhang Ning, et al. Evaluation of geological hazard susceptibility of Baiyin City based on MT-InSAR deformation measurements [J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-15. [2024-03-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1676.TN.20230403.1759.004.html>.
- [16] 陈博,李振洪,黄武彪,等.2022 年四川泸定 Mw6.6 级地震诱发地质灾害空间分布及影响因素[J].*地球科学与环境学报*,2022,44(6):971-985.
- Chen Bo, Li Zhenhong, Huang Wubiao, et al. Spatial distribution and influencing factors of geohazards induced by the 2022 Mw6.6 Luding (Sichuan, China) earthquake [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(6):971-985.
- [17] 葛杰,张鑫.青海湟水流域气温与降水时空变化特征[J].*灌溉排水学报*,2017,36(11):94-100.
- Ge Jie, Zhang Xin. Spatio-temporal variations of temperature and precipitation in Huangshui River basin within Qinghai Province [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(11):94-100.
- [18] 石固林,陈强,刘先文,等.联合升降轨 Sentinel-1A 数据监测桃坪乡古滑坡沿坡向的形变速度场[J].*工程地质学报*,2022,30(4):1350-1361.
- Shi Gulin, Chen Qiang, Liu Xianwen, et al. Deformation velocity field along aspect direction of an ancient landslide at taoping village derived from ascending and descending sentinel-1 A data [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(4):1350-1361.
- [19] Chen Wei, Chen Xi, Peng Jianbing, et al. Landslide susceptibility modeling based on ANFIS with teaching-learning-based optimization and Satin bowerbird optimizer [J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(1):93-107.
- [20] Wu Yizhen, Shi Kaifang, Chen Zuoqi, et al. Developing Improved Time-Series DMSP-OLS-Like Data (1992—2019) in China by Integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60:1-14.
- [21] 杨创奇,陶攀,杨正.基于逻辑回归树耦合熵指数模型的滑坡易发性分区:以陕西省延安市吴起县滑坡为例[J].*人民长江*,2022,53(5):128-134.
- Yang Chuangqi, Tao Pan, Yang Zheng. Landslide susceptibility zoning based on logistic regression tree coupled entropy index model: Case of landslide in Wuqi County, Yan'an City, Shaanxi Province [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(5):128-134.
- [22] 吴常润,角媛梅,王金亮,等.基于频率比—逻辑回归耦

- 合模型的双柏县滑坡易发性评价[J].自然灾害学报, 2021,30(4):213-224.
- Wu Changrun, Jiao Yuanmei, Wang Jinliang, et al. Frequency ratio and logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of landslide in Shuangbai County [J]. Journal of Natural Disasters, 2021,30(4):213-224.
- [23] 邓念东,崔阳阳,郭有金.基于频率比—随机森林模型的滑坡易发性评价[J].科学技术与工程,2020,20(34):13990-13996.
- Deng Niandong, Cui Yangyang, Guo Youjin. Frequency ratio-random forest-model-based landslide susceptibility assessment [J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(34):13990-13996.
- [24] 刘瑞,李露瑶,杨鑫,等.基于因子强关联分析方法的滑坡易发性评价[J].地球与环境,2021,49(2):198-206.
- Liu Rui, Li Luyao, Yang Xin, et al. Landslide susceptibility mapping based on factor strong correlation analysis method [J]. Earth and Environment, 2021,49(2):198-206.
- [25] 秦红富,谈树成,施旖奇,等.基于CF-LR组合模型的地质灾害易发性评价:以云南省宁洱哈尼族彝族自治县为例[J].人民长江,2022,53(7):119-127.
- Qin Hongfu, Tan Shucheng, Shi Yiqi, et al. Geological hazard susceptibility assessment based on CF-LR combined model: Case of Ning'er Hani and Yi Autonomous County, Yunnan Province [J]. Yangtze River, 2022,53(7):119-127.
- [26] 付豪,李为乐,陆会燕,等.基于“三查”体系的丹巴县滑坡隐患早期识别与监测[J/OL].武汉大学学报(信息科学版),1-17[2024-03-16].<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220418>.
- Fu Hao, Li Weile, Lu Huiyan, et al. Early detection and monitoring of potential landslides in Danba County based on the “space-air-ground investigation system” [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1-17 [2024-03-16]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220418>.
- [27] 张晓博,周萍,张焜,等.基于GIS和CF-Logistic回归模型地质灾害易发性评价:以青海湟中县为例[J].沉积与特提斯地质,2023,43(4):797-807.
- Zhang Xiaobo, Zhou Ping, Zhang Kun, et al. Evaluation method of geological hazard susceptibility: A case study on GIS and CF-Logistic regression model in Huangzhong, Qinghai [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023,43(4):797-807.
- [28] 王毅,李升甫,马洪生,等.山区公路脆弱地质环境灾害多方法早期识别及路线优化[J/OL].武汉大学学报(信息科学版),1-15[2024-03-16].<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230214>.
- Wang Yi, Li Shengfu, Ma Hongsheng, et al. Multi-method early identification and route optimization of vulnerable geological environment hazards on mountainous highways [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1-15 [2024-03-16]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230214>.
- ~~~~~
- (上接第 244 页)
- [30] 王晓晨.基于 InVEST 模型的陕西秦岭(渭河流域)生态系统服务评估[D].陕西 西安:西北大学,2022.
- Wang Xiaochen. Ecosystem service assessment of Qinling Mountains in Shaanxi Province based on InVEST model [D]. Xi'an, Shaanxi: Northwestern University, 2022.
- [31] 陈田田,彭立,王强.基于生态系统服务权衡的生态安全多情景决策[J].中国环境科学,2021,41(8):3956-3968.
- Chen Tiantian, Peng Li, Wang Qiang. Scenario decision of ecological security based on the trade-off among ecosystem services [J]. China Environmental Science, 2021,41(8):3956-3968.
- [32] 王蓓,赵军,胡秀芳.石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J].生态学报,2018,38(21):7582-7595.
- Wang Bei, Zhao Jun, Hu Xiufang. Analysis on trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in the Shiyang River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(21):7582-7595.
- [33] 王洪宽.河北太行山区生态安全评价与安全格局构建[D].河北 石家庄:河北地质大学,2022.
- Wang Hongkuan. Eco-logical security assessment and security pattern construction in the Taihang Mountains of Hebei Province [D]. Shijiazhuang, Hebei: Hebei University of Geosciences, 2022.
- [34] 康园园,于淑会,尚国珩,等.基于LUCC的太行山区生态系统服务价值时空特征分析[J].河北地质大学学报,2022,45(4):96-103.
- Kang Yuanyuan, Yu Shuhui, Shang Guoyi, et al. Analysis of the spatiotemporal characteristics of ecosystem service value in the Taihang Mountains based on LUCC [J]. Journal of Hebei University of Geosciences, 2022,45(4):96-103.