

doi: 10.12097/gbc.2023.10.024

# 基于改进信息量模型的地质灾害易发性评价 ——以西藏察隅县 G219 国道沿线为例

曹苏傲<sup>1,2</sup>, 郭振<sup>1,2\*</sup>, 陈佳乐<sup>3</sup>  
CAO Suao<sup>1,2</sup>, GUO Zhen<sup>1,2\*</sup>, CHEN Jiale<sup>3</sup>

1. 河南省地质研究院, 河南 郑州 450001;  
2. 河南省城市地质工程技术研究中心, 河南 郑州 450001;  
3. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074

1. Henan Institute of Geology, Zhengzhou 450001, Henan, China;  
2. Henan Province Urban Geological and Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450001, Henan, China;  
3. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

**摘要:** 【研究目的】公路建设引起道路沿线地质灾害频发。道路沿线地质灾害易发性评价是地质灾害应急救援中的关键问题,其评价结果可为灾害防范和应急决策提供科学依据,有助于减少灾害带来的潜在损失。【研究方法】察隅县 G219 国道沿线共发育地质灾害 85 处(其中滑坡 9 处、崩塌 31 处、泥石流 45 处)。根据地质灾害的发育特征,选取水系线密度、道路线密度、地震峰值加速度、地震反应谱特征、岩组、地貌、DEM、平面曲率、剖面曲率、坡向和坡度 11 个影响因素作为评价因子,将地质灾害点核密度分析与信息量法相结合,改进信息量法模型,并运用 GIS 技术对研究区域的地质灾害易发性进行评价。【研究结果】研究表明,基于改进的信息量法模型的易发性评价结果与实际灾害分布情况高度吻合。模型评价精度较高,AUC 值达到 0.836,表明模型对地质灾害易发性的预测能力显著。【结论】改进的信息量法模型在评价地质灾害易发性方面表现出更优的精度,可为察隅县及其附近区域的城镇规划建设和地质灾害风险管理提供可靠的科学依据。

**关键词:** 改进信息量模型; 地质灾害; 易发性评价; 西藏察隅县; 指标因子; ROC 曲线

**创新点:** 核密度分析与信息量法结合用于察隅县 G219 国道沿线地质灾害易发性评价。

**中图分类号:** P694; P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2025)01-0185-16

Cao S A, Guo Z, Chen J L. Geological hazard susceptibility evaluation based on improved information model: A case study of the G219 National Highway in Zayu County, Xizang. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(1): 185-200

**Abstract:** 【Objective】Due to the impact of highway construction, geological hazards along roadways occur frequently. The susceptibility evaluation of geological hazards along roadways is a key issue in emergency response and rescue. The evaluation results can provide a scientific basis for disaster prevention and emergency decision-making, helping to mitigate potential losses caused by such hazards. 【Methods】Along the G219 Highway in Zayu County, 85 geological disaster sites were identified (including 9 landslides, 31 collapses, and 45 debris flows). Based on the developmental characteristics of geological disasters, 11 influencing factors were selected as evaluation indicators: drainage density, road density, peak ground acceleration, seismic response spectrum characteristics, rock groups, geomorphology, DEM, plan curvature, profile curvature, aspect, and slope. A modified information value model combining geological disaster kernel density analysis with the information value method was developed. GIS technology was applied to evaluate the susceptibility of geological disasters in the study area. 【Results】The results show that the susceptibility evaluation based

收稿日期: 2023-10-19; 修订日期: 2024-03-10

资助项目: 西藏自治区自然资源厅项目《西藏自治区地质灾害防治体系 2021 年度(第二批)建设项目四标段: 林芝市波密县、察隅县、墨脱县地质灾害风险调查评价》(编号: 54000021210200001372)

作者简介: 曹苏傲(1969-), 男, 高级工程师, 从事地质灾害调查评价研究。E-mail: 438846095@qq.com

\* 通信作者: 郭振(1986-), 男, 硕士, 工程师, 从事工程地质研究。E-mail: 392494222@qq.com

on the modified information value model aligns closely with the actual distribution of geological disasters. The model demonstrated high predictive accuracy, with an AUC value of 0.836, indicating its significant capability in assessing geological disaster susceptibility.

**[Conclusions]** The modified information value model provides superior evaluation accuracy and offers reliable scientific support for urban planning, construction, and geological disaster risk management in Zayu County and surrounding areas.

**Key words:** improved information model; geological hazard; susceptibility evaluation; Zayu County, Xizang; evaluation index factor; ROC curve

**Highlights:** Nuclear density analysis combined with information information method was used to evaluate the vulnerability of geological hazards along G219 National Road in Zayu County, Xizang.

随着全球气候变化和人类活动加剧,地质灾害成为一个日益严峻且普遍存在的问题(Dias et al., 2021)。地质灾害作为危害性最显著的自然灾害,给人类社会和生态环境带来了巨大威胁(Fleuchaus et al., 2021)。在中国西南地区,泥石流和崩塌是频发的地质灾害类型,其具有突发性和难以预测性,给社会和经济造成了巨大挑战(周粤等, 2022)。在社会发展和经济繁荣的过程中,公路建设、隧道爆破开挖破坏边坡原有稳定性,并在降雨、地震等诱发因素下,加剧了泥石流和崩塌地质灾害发生的可能性(Wu et al., 2023)。在此情况下,道路沿线的地质灾害易发性评价就显得尤为重要(陈建国等, 2023)。

地质灾害易发性评价是地质灾害评估的关键内容,是一项复杂工作,评估的准确性受到多种因素影响(兰中孝等, 2023)。泥石流和崩塌地质灾害是各种环境因素与诱发因素共同作用的结果(冯卫等, 2021)。目前,用于泥石流和崩塌地质灾害易发性研究的方法主要有层次分析法(曾斌等, 2018)、信息量法(孙滨等, 2022)、机器学习法(朱木雷等, 2023)等。郝骥等(2023)以山东新泰市为例,选择主沟纵坡降、主沟长度、斜坡面积、平均坡度、工程地质岩组和年平均降雨量 6 个评价指标,利用层次分析法开展了泥石流地质灾害易发性评价,划分出新泰市泥石流地质灾害高、中、低易发区,并针对性地提出风险管控措施。杨锐等(2023)基于 GIS 和加权信息量评价模型对山西榆社县地质灾害进行易发性评价,为国土空间规划提供了科学依据。侯儒宁等(2023)基于流域单元,采用 4 种机器学习算法,对天山地区泥石流易发性进行评估建模,选择该区域流域面积、高差、坡度、曲率、径流强度指数、地形湿度指数、输沙指数、归一植被指数、积雪覆盖度、雨季降雨、干旱指数、陡度指数、突出地貌和断层密度 14 个影响因素。其中堆叠算法取得最好的性能,其 AUC 值为 0.87。黄肖萍等(2023)在考虑岩体优势

结构面与斜坡临空面的基础上,构建区域崩塌灾害易发性分析评价指标体系,采用岩性组合、地形坡度、植被指数、岩体优势结构面与斜坡坡向组合、地表水汇流影响和切坡建筑 6 个评价指标,模型精度为 87.1%。

在地质灾害评价中,道路沿线评价尤为重要(孟祥瑞等, 2016)。国道长度跨越数百至数千千米,沿线地貌类型多样,地层岩性与地质构造复杂,在建设和运营过程中地质灾害频发,易造成巨大经济损失(徐志浩, 2020)。张婷(2015)利用 BP 神经网络方法对新疆天山公路沿线进行地质灾害易发性分区段研究;李坤等(2020)选取地形、地震、地层岩性、断层、降水、温差等因子对喀喇昆仑公路国内段进行地质灾害易发性研究,认为新构造运动、地形地貌、地质条件及人类活动是导致中巴公路沿线多类型地质灾害频发的主要原因(李坤等, 2020)。魏雨(2020)以攀枝花至盐源高速为例,开展西南山区高速公路沿线地质灾害易发性评价。利用地形地貌、气象水文、地质构造和人类活动 4 类影响因子,开展信息量模型、信息量-逻辑回归耦合模型与信息量-支持向量机耦合模型对比,其中信息量-支持向量机耦合模型取得最高精度为 84.01%,研究结果可为攀盐高速规划建设及沿线地质灾害防治工作提供参考。

截至 2021 年,西藏察隅县 G219 国道沿线已经查明地质灾害 85 处,其中灾害类型以泥石流、崩塌灾害为主,次为滑坡,泥石流 45 处,崩塌 31 处,滑坡 9 处(表 1)。其中,大型灾害点 1 处,中型灾害点 28 处,小型灾害点 56 处。

地质灾害现状条件及发展趋势如表 2 所示。45 处泥石流灾害点中,现状条件较稳定的 7 处、稳定的 38 处,发展趋势属较稳定的 27 处、稳定的 18 处。31 处崩塌地质灾害隐患点中,现状条件下不稳定的 26 处,较稳定的 5 处,发展趋势不稳定的 27 处,较稳定的 4 处。9 处滑坡地质灾害隐患点

表 1 察隅县 G219 国道沿线地质灾害规模等级

灾害类型	大型	中型	小型	合计
滑坡	0	2	7	9
崩塌	0	18	13	31
泥石流	1	8	36	45
合计	1	28	56	85

表 2 察隅县 G219 国道沿线地质灾害现状稳定性与发展趋势

状态	稳定性	滑坡	崩塌	泥石流	合计
现状稳定性	不稳定	1	26	\	27
	较稳定	3	5	7	15
	稳定	5	\	38	43
发展趋势	不稳定	1	27	\	28
	较稳定	8	4	18	30
	稳定	\	\	27	27

中, 现状条件下稳定性为较稳定的 5 处, 稳定的 3 处, 不稳定 1 处; 发展趋势为不稳定的 1 处, 较稳定的 8 处。

察隅县 G219 国道沿线地质灾害形势严峻, 因此对该沿线开展地质灾害易发性评价对线路选址与地质灾害防治具有重要意义。本次选取西藏察隅县坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、水系线密度、道路线密度、地貌、DEM、地震峰值加速度、地震反应谱特征、工程地质岩组和降雨量 12 个评价因子信息。将传统信息量法与核密度估计进行耦合得到改进信息量法, 核密度估计可以对地质灾害进行空间聚集度的定量化分析。基于核密度估计改进信息量计算公式, 开展研究区地质灾害易发性评价。研究结果可为该区域规划建设和防灾减灾管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

察隅县地处西藏自治区东南部, 东经 97°27'、北纬 28°24', 东西长约 250 km, 南北宽约 180 km。东邻云南省迪庆藏族自治州德钦县、怒江傈僳族自治州贡山独龙族怒族自治县和西藏自治区昌都市左贡县, 西邻墨脱县, 南接缅甸和印度, 北连波密县和昌

都市八宿县, 全县总面积  $3.153 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地势总体西北高、东南低, 相对高差 3600 m, 垂直高差悬殊, 是典型的高山峡谷和山地河谷地貌。谷地海拔南部边缘只有 1400 m, 而 5000 m 以上的山峰有 10 多座, 最高峰为 6740 m 的梅里雪山。察隅县境内含 2 条主要交通干线, 分别为 G559 和 G219。全县平均海拔 2300 m。G219 在察隅县境内全长 505 km, 海拔最高 4706 m, 位于益秀拉垭口, 海拔最低 1433 m, 位于察隅河和桑曲汇流处。察隅县境内国道 G219 沿线地质灾害以泥石流、崩塌为主, 次为滑坡, 主要集中在上察隅镇、下察隅镇、竹瓦根镇和察瓦龙乡(图 1)。

国道 G219 在察隅县境内全长 505 km, 海拔最高 4706 m, 位于益秀拉垭口, 海拔最低 1433 m, 位于察隅河和桑曲汇流处。国道 G219 察隅县段沿线地貌形态多样, 既有雄壮浑厚冰川雪山, 又有高险陡峻高山峡谷, 还有多彩茂密热带雨林; 气候条件多变, 除了受印度洋西南季风和孟加拉湾暖湿气流的影响, 还受青藏高原高压系统的影响, 横跨察隅河和怒江水系; 沿线断裂、构造及其发育。研究区出露地层包括第四系、白垩系、三叠系、石炭系、侏罗系、泥盆系、奥陶系, 其中第四系主要分布于生态保护区, 岩性为二云石英片岩夹钙质云母片岩、千枚岩夹石英岩、绢白云母片岩、绿帘阳起片岩、黑云阳起片岩、铁铝榴阳起片岩、阳起滑石片岩、云母大理岩、石英岩等。

研究区地质灾害发育情况如图 2 所示。察隅县 G219 国道沿线发育地质灾害 85 处, 其中滑坡 9 处(7 处小型, 1 处中型, 1 处大型), 崩塌 31 处(14 处小型, 17 处中型), 泥石流 45 处(7 处小型, 1 处中型, 1 处大型)。察隅县分布低山地貌、中山地貌、高山地貌、高山冰川地貌、高山峡谷地貌 5 种地貌类型, 国道 G219 沿线上地质灾害主要分布在高山峡谷地貌与中山地貌, 共有 59 处地质灾害点分布在高山峡谷地貌, 占比 69.41%, 另外 26 处地质灾害点分布在中山地貌, 占比 30.59%。

据统计, 研究区 95% 以上的地质灾害发育于每年 6—9 月, 区降雨具有强度大、时间短、地域差异大的特点, 因怒江、察隅河两侧斜坡高陡, 河床纵坡降大, 水流湍急, 在长时间降雨或暴雨作用下, 河流水位急骤变化, 为泥石流的发生提供了水动力条件。降雨对滑坡的影响同样显著, 研究区斜坡岩土体地下水主要接受大气降水补给, 降水进入土体孔隙或

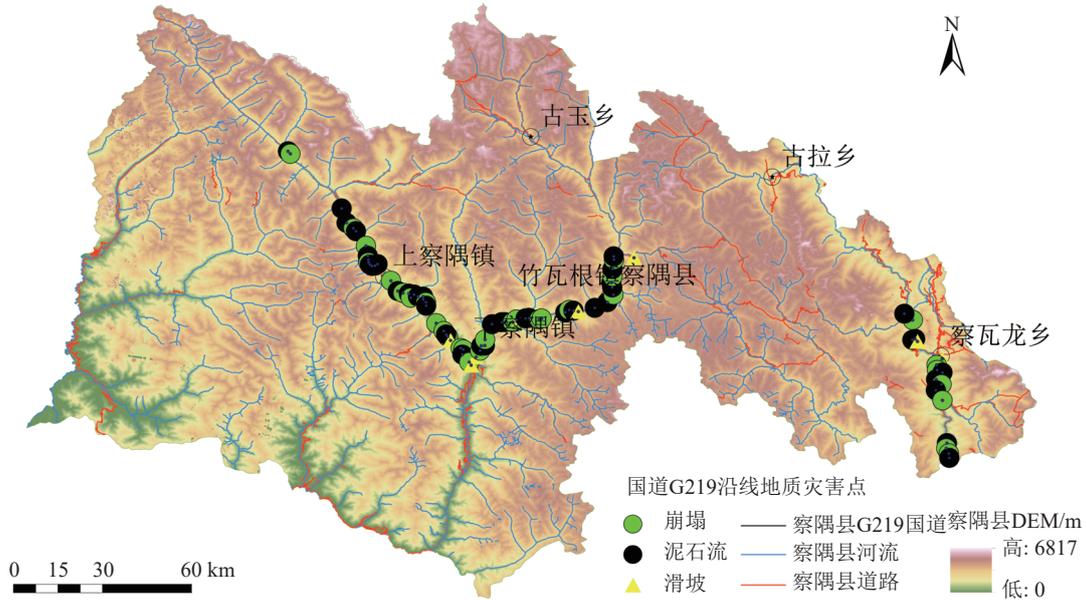


图1 研究区地质灾害分布图

Fig. 1 Distribution of geological hazards in the study area

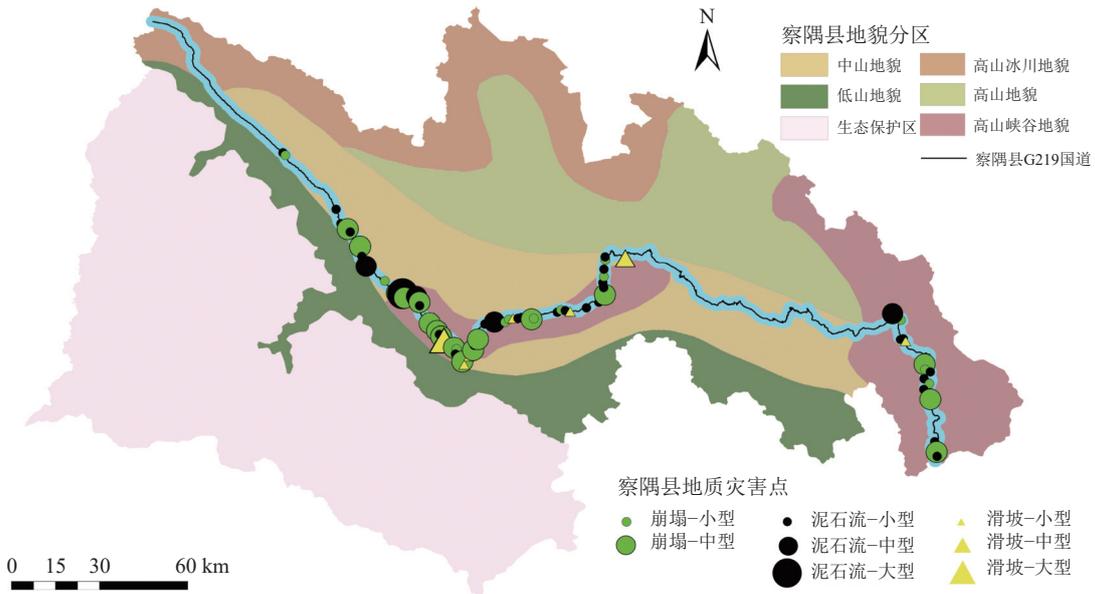


图2 研究区地质灾害发育情况

Fig. 2 The development of geological hazards in the study area

岩石裂缝中,岩石浅部裂隙中的地下水在强烈反复的冻融作用下,裂隙不断扩大,导致岩土体抗剪强度降低;同时,降水对坡体的入渗使堆积物饱水软化,加之地下水位抬高产生的动水和静水压力,导致抗剪强度的降低,使斜坡稳定性受到破坏。研究区滑坡基本都发生在夏季丰水期,可见降水是诱发该区滑坡灾害的重要因素。降水对崩塌的诱发作用似乎不明显,国道 G219 沿线陡坎地段常年有崩塌发生,

并不局限于雨季,但不能排除降水的诱发作用。崩塌软弱结构面的形成,离不开降水长期、反复的侵蚀、冲刷及静水压力对岩体完整性和强度降低的作用,强度较大的降水可缩短这一作用的进程。

## 2 地质灾害易发性评价因子及相关性分析

### 2.1 评价单元

评价单元划分是开展地质灾害易发性评价的首

要工作。现阶段对评价单元的划分主要包括栅格单元、行政区划单元、格网单元、斜坡单元、地貌单元划分等。研究区为察隅县 G219 国道沿线, 综合考虑沿线地质灾害发育特征, 以及计算机性能与评价结果准确性, 基于 GIS 采用栅格单元划分, 采取的栅格单元尺寸为  $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ , 在此基础上开展察隅县 G219 国道沿线地质灾害易发性评价。察隅县全县面积  $3.153\times 10^4\text{ km}^2$ , 察隅县栅格单元行数为 10220, 列数为 7065, 共划分出 5493 763 个栅格单元, 查明的 85 处地质灾害距离 G219 国道均在 1000 m 以内, 所有地质灾害跨度均在 1000 m 以内, 因此本文以察隅县 G219 国道沿线为中心, 2000 m 为缓冲半径, 得到的 G219 国道沿线的栅格单元数量为 1858 577 个。

## 2.2 评价指标因子

地质灾害的发生具有很大的不确定性, 受多种因素的控制。因而必须全面考虑易发性本身及构成易发性各因素的相似性与差异性, 进而选择一些相互联系的指标作为综合分析的依据。合理规范的评价指标体系是保证易发性分区合理、客观的前提,

选取合理的评价指标因子是评价过程中至关重要的前提条件。通过综合分析察隅县地质灾害发育特征与影像因素, 本次选取坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、水系线密度、道路线密度、地貌、DEM、地震峰值加速度、地震反应谱特征、工程地质岩组、降雨量 12 个评价因子开展初步地质灾害易发性评价。评价因子分布如图 3 所示。

(1) 坡度: 坡度作为地形地貌的主要指标, 显著影响了研究区灾害的发育。岩土体沿斜坡面的自重应力分量与坡度成正比, 当斜坡坡度大于表层松散堆积体天然休止角, 松散物质则在自身重力作用下顺斜坡表层滑动, 直至坡度小于休止角而达到再稳定。研究区坡度分布范围为  $0^\circ\sim 90^\circ$ , 在 ArcGIS 中将其分为 6 个级别, 分别为  $[0\sim 10)$ ,  $[10\sim 20)$ ,  $[20\sim 30)$ ,  $[30\sim 40)$ ,  $[40\sim 50)$ ,  $[50\sim 90)$ 。

(2) 坡向: 坡向的差异可直接导致地表光照、降水、温度等的不同, 而这些因素又影响植物的生长, 因此坡向可间接导致生态环境的差异。研究区坡向分为范围为  $0\sim 360$ , 以  $90^\circ$  为界限在 ArcGIS 中将其分为 4 个级别, 分别为  $[0\sim 90)$ ,  $[90\sim 180)$ ,  $[180\sim 270)$ ,  $[270\sim 360)$ 。

(3) 剖面曲率: 剖面曲率影响单元内坡面流的流

速, 进而影响侵蚀、沉积情况, 也反映了斜坡的应力分布状态及演变历史。当侵蚀基准面长期稳定, 应力集中程度弱时, 易形成凹型坡和平型坡; 当侵蚀基准面较稳定, 且地壳抬升较强烈时, 易形成阶梯型坡; 当地壳抬升作用强烈时, 则易形成凸型坡, 稳定性较差。研究区剖面曲率范围为  $0\sim 58$ , 在 ArcGIS 中将其分为 6 个级别, 分为  $[0\sim 5)$ ,  $[5\sim 10)$ ,  $[10\sim 15)$ ,  $[15\sim 20)$ ,  $[20\sim 30)$ ,  $[30\sim 58]$ 。

(4) 平面曲率: 平面曲率指地形在水平方向上的曲率特征。在 DEM 中, 通常将地形表面在平面切线方向上的曲率作为平面曲率。平面曲率越大, 地形表面在水平方向上的曲率变化越强, 地形形态越陡峭。在 ArcGIS 中将其分为 7 个级别, 分为  $[0\sim 10)$ ,  $[10\sim 20)$ ,  $[20\sim 30)$ ,  $[30\sim 40)$ ,  $[40\sim 50)$ ,  $[50\sim 60)$ ,  $[60\sim 80]$ 。

(5) 水系线密度: 察隅县降水充沛、植被良好、气候温热湿润、冰川雪被分布广泛, 境内河流纵横密布, 长年径流不断的河流有 1300 多条, 其中主要河流 28 条。境内河流均属印度洋水系, 以阿扎贡拉雪山和伯舒拉岭为分水岭, 西北为雅鲁藏布江支流帕龙藏布的源头比玛曲; 东南为恩梅开江的源头桑久曲、卡打曲和勒孔曲; 东为怒江及其支流昂曲; 西及西南为雅鲁藏布江支流察隅河上游的桑曲和贡日嘎布曲。境内河流主要分为怒江、独龙江、丹巴河、察隅河四大水系。利用 ArcGIS 对察隅县水系进行线密度分析, 水系线密度的范围为  $[0\sim 1.39]$ 。

(6) 道路线密度: 开挖边坡修建道路、引水渠道等工程活动, 也是本区地质灾害频繁发生的诱发因素。受地形条件限制, 公路一般沿河岸边坡修建, 大量开挖边坡和坡脚, 形成了许多高陡边坡与危岩体, 未进行任何护坡处理, 加之常使用爆破手段, 使斜坡稳定性受到严重破坏。切坡修建的引水渠道大多采用干砌石筑成, 未进行防渗处理, 渗水造成斜坡地下水位上升, 饱水空间增大, 浮托力增加, 降低了岩土体的抗剪强度, 加剧了斜坡的变形。利用 ArcGIS 对察隅县道路进行线密度分析, 道路线密度的范围为  $[0\sim 7.21]$ 。

(7) 地震峰值加速度: 峰值加速度是描述地震动力学特征的指标, 表示地震波在地表上引起的最大加速度。对于地震易发性评价而言, PGA 通常用于衡量地震活动的强度, 即地震活动的强烈程度。地震活动的峰值加速度较大, 可能导致土体发生破裂、

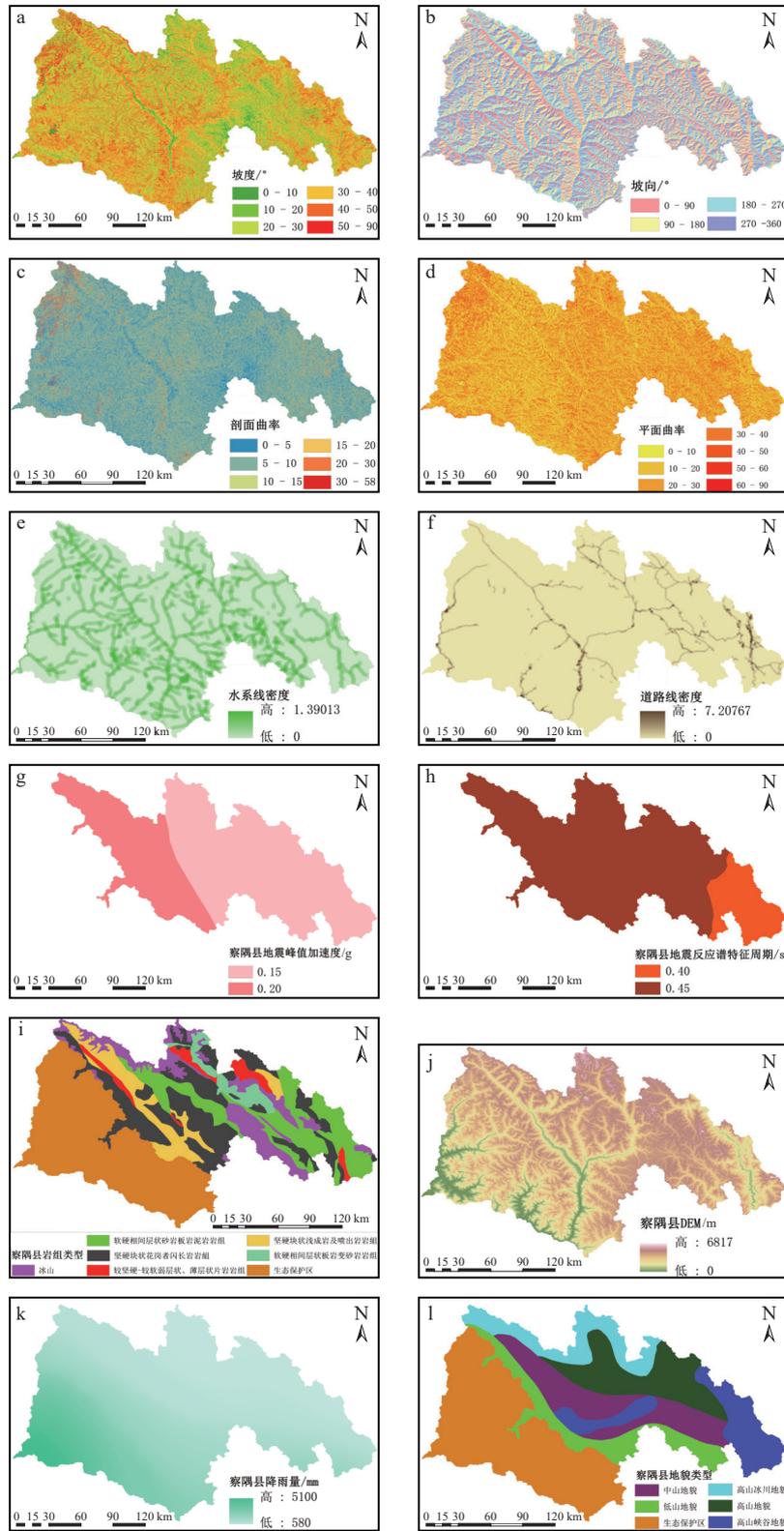


图3 评价因子分布图

Fig. 3 Evaluation factor

a—坡度; b—坡向; c—剖面曲率; d—平面曲率; e—水系线密度; f—道路线密度; g—地震峰值加速度; h—地震反应谱特征; i—岩组; j—DEM; k—降雨量; l—地貌

滑动等地质灾害,因此PGA对地质灾害易发性具有直接影响。较高的PGA值通常与较严重的地质灾害发生有关。察隅县大部分地震活动峰值加速度为0.15g,仅西部边缘部分区域为0.20g。

(8) 地震反应谱特征:地震反应谱是一种图形表示,用于描述结构在地震作用下的动态响应。它以结构的振动周期为横轴,相应振动周期下的加速度响应为纵轴。地震反应谱能够提供不同振动周期下结构的反应特性,主要关注结构物在地震中的响应情况,因此其与地质灾害易发性的关联相对间接。察隅县大部分地震动反应谱特征周期多为0.45s,东南部边缘紧邻云南部分区域为0.40s。

(9) 工程地质岩组:不同类型的工程地质岩组对地质灾害形成的影响程度有明显差异,因此根据其对应地质灾害的影响程度将察隅县内工程地质岩组归并为5个岩组,分别为松坚硬块状花岗岩闪长岩岩组、软硬相间层状砂岩板岩泥岩岩组、较坚硬-较软弱层状、薄层状片岩岩组、坚硬块状浅成岩及喷出岩岩组软硬相间层状板岩变砂岩岩组。

(10) DEM:境内地形总体趋势是西北高、东南低,高差悬殊大,平均海拔2800m,最高点是南迦巴瓦峰的东部山体的一部分,海拔约6817m。

(11) 降雨量:降雨一般为诱发地质灾害的主要外部因素,察隅县绝大多数地质灾害的发生与降雨有关,尤其与暴雨、大暴雨和连续降雨的关系密切。在局部易形成大到暴雨,这种长历时、高强度的降雨过程常成为引发泥石流、滑坡、崩塌等地质灾害最直接的因素。降雨入渗形成的浅层循环水增加了土体容重和坡体自重,并软化岩体,降低岩土体的物理力学性质,引起斜坡土体变形,加上局部不合理的人类工程活动,在暴雨作用下引起滑坡。降雨沿岩体的节理裂隙面入渗,增大了岩体内部的静、动水压力,降低了岩体的力学强度值,使岩体沿结构面崩落。因此,降雨为引发地质灾害的重要因素之一。

(12) 地貌:地貌是地表地形的特征,其空间分布直接影响地质灾害的发生概率。通过分析地貌特征,可以识别不同地区的灾害易发性差异,有助于针对性地进行防灾规划和资源配置。另外,地貌与地质灾害的形成机理密切相关。通过深入研究不同地貌类型下地质灾害的发生机理,可以更好地理解灾害的成因,为防灾工作提供科学依据。不同地貌类型的坡度和坡向会影响地表的水土流动特性。陡峭

的坡度可能增加土体滑动和崩塌的风险,而坡向会影响日照、降水等因素,进而影响地表的稳定性。地貌的高低起伏直接关系到地表的坡度和坡向。起伏的地形可能形成坡度变化,使某些地段的土体更容易发生滑动或崩塌。不同地貌特征的地区,河谷和山脊的分布会影响水流的集聚和分散。河谷通常是泥石流易发区,而山脊可能成为崩塌的多发区域。地貌形成时可能伴随着不同的土层分布。不同土层的稳定性和抗剪强度差异,直接关系到地质灾害的发生概率。依据地形的绝对海拔高度、相对高差、地面形态、坡度、植被等要素,把察隅县的地貌类型划分为高山冰川地貌、高山峡谷地貌、高山宽谷地貌、中山地貌、低山地貌等。国道G219在察隅县境内途径的地形地貌有高山宽谷地貌、高山峡谷地貌、中山地貌、低山地貌。

### 2.3 评价指标因子相关性分析

采用相关性分析方法可以对选取的多个因素进行区别,检验选取因子的独立性,从而筛选相关性小的因子用于评价,减少分析过程中的错误。根据相关性理论表明,极强相关的相关系数 $R$ 在0.8~1.0之间,强相关 $R$ 在0.6~0.8之间,弱相关 $R$ 在0.2~0.4之间,极弱相关或无相关 $R$ 在0.0~0.2之间。本次认定相对系数 $>0.6$ 时就需剔除某一类已选的因子,表明其因子之间具有较强的相关性,因此需综合考虑剔除某因子。察隅县12个评价因子的相关矩阵见表3,相关性分析过程中降雨量与DEM相关系数为-0.6120,工程地质岩组与降雨量相关系数为0.6667,两者相关性较高,综合表中数据和已有的结果,将降雨量剔除,选用剩余11类因子进行主成分分析,主成分分析结果见表4。从表4可以看出,水系线密度、道路线密度、坡度、岩组、地震峰值加速度、地貌、DEM共7个因子累计贡献率为99.10%,说明这7个因子能充分体现察隅县地质灾害环境信息。

## 3 基于改进信息量模型的地质灾害易发性评价

基于改进信息量模型的地质灾害易发性评价框架流程图如图4所示,主要由三部分组成,分别为评价因子提取、评价方法对比与评价结果。

### 3.1 地质灾害信息量模型

对于研究区 $S$ ,共有 $M$ 个因子,对应评价指标 $m$ ,

利用 ArcGIS 分级将其分为  $N$  个间隔, 用  $S_{mn}$  表示每个区间。该区间的信息量用  $I_{mn}$  表示。  $I_{mn}$  计算公式如下:

$$I_{mn} = \ln \left( \frac{A_{mn}/A}{B_{mn}/B} \right) \quad (1)$$

式中,  $I_{mn}$  表示评价指标  $m$  中, 区间  $n$  的信息量;  $A_{mn}$  表示在评价指标  $m$  中, 区间  $n$  中崩塌和滑坡地质灾害点的数量,  $A$  为工作区已知崩塌和滑坡地质灾害点的总数;  $B_{mn}$  表示在评价指标  $m$  中, 区间  $n$  中分布的栅格单元数量。  $B$  为工作区所有栅格单元总数。

### 3.2 地质灾害核密度估计

核密度估计法 (kernel density estimation, KDE) 是由 Emanuel Parzen 于 1962 年提出的 (康雨豪等, 2018)。他认为地理事件可以发生在空间的任何位置上, 但是在不同的位置上事件发生的概率不一样。点密集的区域事件发生的概率高, 点稀疏的地方事件发生的概率低。通过核密度估计可以得到区域中每一点的事件密度, 产生了光滑的核密度图, 并考虑了研究单元内的地质灾害之间的关系, 因此采用核密度估计法在研究区对地质灾害进行空间聚集度的定量化分析。

核密度估计法是通过核函数对区域中的点分布进行概率密度估计, 最后得到一幅连续的栅格密度图, 图中任意一点的栅格值为核密度值, 也可理解为点的空间聚集程度, 公式为:

$$f_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K \left( \frac{x-X_i}{h} \right) \quad (2)$$

式中,  $h$  为带宽;  $K \left( \frac{x-X_i}{h} \right)$  为核函数, 通常为径向对称的单峰概率密度函数, 可理解为点  $i$  处的权重;  $X_i$  表示带宽内各点,  $n$  为落在带宽内点的个数, 每个输出栅格像元的密度均为叠加在栅格像元中心的所有核表面的值之和。影响 KDE 的主要因素是  $K \left( \frac{x-X_i}{h} \right)$  函数的数学形式和带宽  $h$ 。其中, 核函数的选择相对带宽对核密度估计的影响不大, 而带宽  $h$  决定密度曲面的平滑程度和地质灾害点的影响范围, 因此核密度估计的结果对带宽较敏感, 带宽的选择十分关键, 根据研究尺度的大小和点的实际分布确定每个带宽为 300 m。

### 3.3 改进信息量模型

地质灾害核密度估计能利用已经发生的地质灾害点得到地质灾害发生的空间聚集程度。将其与信息量模型进行耦合, 得到改进的信息量模型, 其公式如下:

$$I'_{mn} = \ln \left( \frac{A_{mn}/A}{B_{mn}/B} \times \frac{1}{Ah} \sum_{i=1}^A K \left( \frac{x^{mn} - X_i^{mn}}{h} \right) \right) \quad (3)$$

式中,  $I'_{mn}$  为改进信息量, 对于某一栅格  $x^{mn}$ , 其改进信息量为原始信息量与该点的核密度值乘积的对数,  $A$  为在带宽  $h$  内的灾害点数量,  $X_i^{mn}$  表示带宽  $h$  内

表 3 相关性分析矩阵

Table 3 Correlation analysis matrix

因子	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
a	1	0.2790	0.0150	0.0800	0.0345	-0.0002	-0.0081	-0.326	-0.0310	-0.0175	-0.0001	0.0346
b	0.2790	1	-0.0507	-0.1151	-0.0413	-0.1001	-0.0538	-0.2844	-0.0126	-0.0301	-0.0088	-0.0586
c	0.0150	-0.0507	1	0.2991	0.0531	0.1175	0.1022	-0.1320	-0.0276	0.0321	0.0079	0.0862
d	0.0800	-0.1151	0.2991	1	0.0746	0.2185	-0.0210	0.1465	0.0019	-0.0131	-0.0146	-0.0684
e	0.0345	-0.0413	0.0531	0.0746	1	0.2798	0.6667	-0.4106	-0.0264	0.0331	0.0395	0.1196
f	-0.0002	-0.1001	0.1175	0.2185	0.2798	1	0.2403	0.0445	-0.0051	0.0109	-0.0042	0.0090
g	-0.0081	-0.0538	0.1022	-0.0210	0.6667	0.2403	1	-0.6120	-0.0342	0.0044	0.0269	0.1160
h	-0.3266	-0.2844	-0.1320	0.1465	-0.4106	0.0445	-0.6120	1	0.0534	0.0100	-0.0184	-0.1416
i	-0.0310	-0.0126	-0.0276	0.0019	-0.0264	-0.0051	-0.0342	0.0534	1	0.2679	-0.0206	-0.2962
j	-0.0175	-0.0301	0.0321	-0.0131	0.0331	0.0109	0.0044	0.0100	0.26790	1	-0.0344	0.1158
k	-0.0001	-0.0088	0.0079	-0.0146	0.0395	-0.0042	0.0269	-0.0184	-0.0206	-0.0344	1	0.0289
l	0.0346	-0.0586	0.0862	-0.0684	0.1196	0.0090	0.1160	-0.1416	-0.2962	0.1158	0.0289	1

注: a—水系线密度; b—道路线密度; c—地震峰值加速度; d—地震反应谱特征; e—岩组; f—地貌; g—降雨量; h—DEM; i—平面曲率; j—剖面曲率; k—坡向; l—坡度

表 4 主成分分析结果

Table 4 Results of principal component analysis

因子	特征值	特征值占比	特征值累计占比
水系线密度	439.846	46.38%	46.38%
道路线密度	367.880	38.79%	85.18%
坡度	75.437	7.96%	93.13%
岩组	18.325	1.93%	95.07%
地震峰值加速度	14.236	1.50%	96.57%
地貌	13.091	1.38%	97.95%
DEM	10.895	1.15%	99.10%
平面曲率	6.383	0.67%	99.77%
剖面曲率	1.323	0.14%	99.91%
坡向	0.606	0.06%	99.97%
地震反应谱特征	0.250	0.03%	100.00%

的所有栅格。

为了验证地质灾害易发性评价模型的有效性。本次采取受试者工作特征曲线(ROC)进行定量检

验,其曲线下面积(AUC)被用来评价模型的精度,近年在地质灾害易发性评价结果检验中得到了广泛应用。ROC 曲线是一条从原点到右上角的对角线,即线段(0,0)~(1,1),这条线称为机会对角线,如果获得的 ROC 曲线落在这条机会对角线上,其 AUC=0.5。一般认为,在 AUC>0.5 的情况下,AUC 越接近 1,说明模型的精度越好,AUC 为 0.5~0.7 时准确性较差,AUC 为 0.7~0.9 时具有较好的准确性,AUC 为 0.9 以上准确性极好。

### 4 评价结果与分析

#### 4.1 实验设置

为保证所有评价因子在空间位置上的统一,在考虑研究区范围及计算机处理能力的基础上,将所有评价因子的栅格单元尺寸约束为 30 m 的正方形栅格。为了验证改进信息量模型的有效性,本次选取传统信息量法作为对比方法。以已知的 85 个地

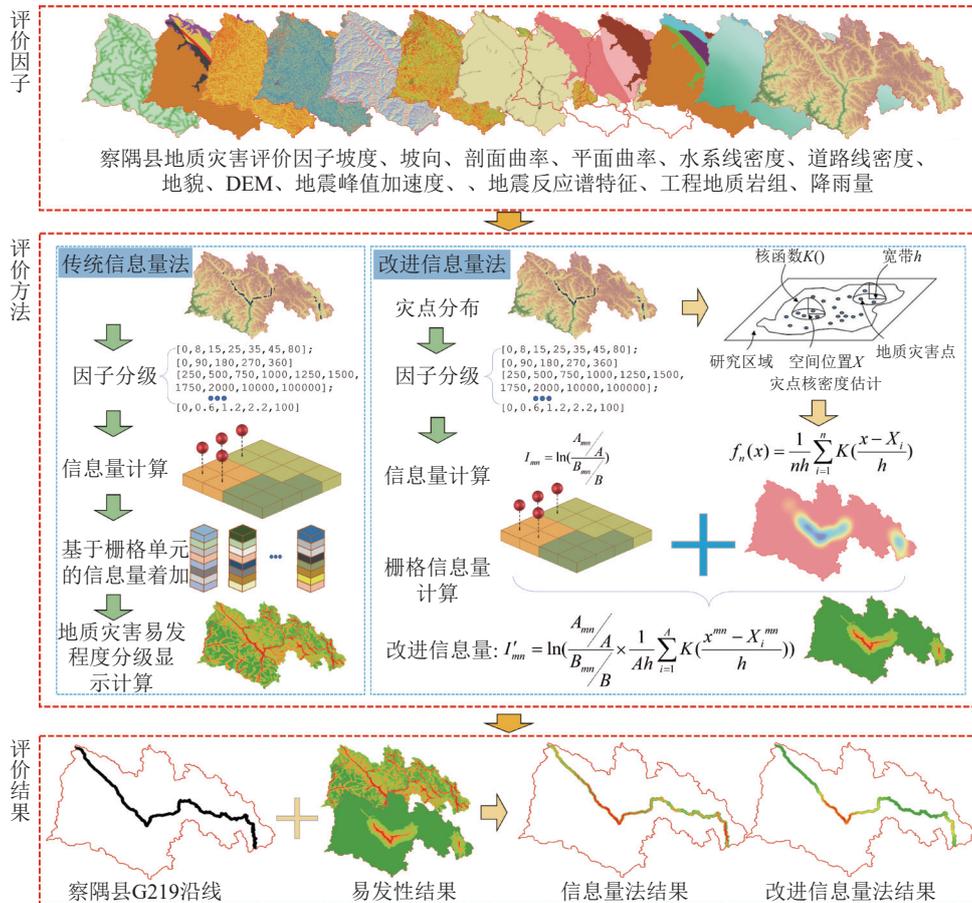


图 4 基于改进信息量模型的地质灾害易发性评价框架流程图

Fig. 4 Flow chart of geological hazard susceptibility assessment framework based on improved information model

质灾害点 100 m 缓冲区范围作为地质灾害概率为 1 的样本选择区域, 其他区域为概率为 0 样本选择区域, 各随机选择 200 个样本点作为 ROC 精度检验样本。

#### 4.2 信息量法结果

利用已知灾害点信息与各因子分级区间, 可计算各评价因子各分区区间信息量, 如表 5 所示。在 DEM 因子中信息量最高的分区区间为 1600~2300 m, 信息量值为 2.3956; 在剖面曲率因子中信息量最高的区间为 0~5, 信息量值为 0.2742; 在地貌因子中信息量最高的类别为低山地貌, 信息量值为 1.7254, 在地震反应谱特征周期因子中, 信息量最高的类别为 0.4 s, 信息量值为 0.4844, 在地震峰值加速度因子中信息量值最高的类别为 0.20 g, 信息量值为 1.0226; 在坡向因子中, 信息量值最高的区间为 0~90°, 信息量值为 0.5252; 在坡度因子中, 信息量值最高的区间为 0~10°, 信息量值为 1.3547; 在工程地质岩组因子中, 信息量值最高的类别为较坚硬—较软弱层状、薄层状片岩岩组, 信息量值为 1.2453; 在平面曲率因子中信息量值最高的区间为 60~90, 信息量值为 0.5718; 在水系线密度因子中信息量值最高的区间为 0.42~0.62, 信息量值为 1.6218; 在道路线密度因子中信息量值最高的区间为 2.85~7.3, 信息量值为 2.8018。

基于传统信息量法得到研究区所有栅格单元的信息量值, 进行累加后得到最终地质灾害信息量, 其范围为-13.0013~15.3661, 在 ArcGIS 中对其进行自然间断点分级, 得到基于信息量法的察隅县地质灾害易发性分区(图 5)。从图 5 可以看出, 地质灾害高易发区主要沿道路、河流分布, 其中 G219 沿线均被划分为地质灾害高易发区, 从表 3 可以看出, 道路线密度在 2.85~7.3 区间的信息量为 2.8018。另外, 察隅县部分道路沿河流分布, 导致了道路沿线区域的信息量值过高, 但道路沿线区域内部区分性不强。使大部分地质灾害高易发区、中易发区都沿道路、河流分布。其中, 地质灾害高易发区的信息量范围为 2.1280~15.3661, 面积占比为 9.19%, 地质灾害点数量为 83 个; 地质灾害中易发区的信息量范围为 -2.6555~2.1280, 面积占比为 24.45%, 地质灾害点数量为 2 个; 地质灾害低易发区的信息量范围为 -5.9929~-2.6555, 面积占比为 37.84%, 无地质

表 5 评价因子各分区区间信息量

Table 5 Information value of each zone of evaluation factor

因子	分区区间	信息量
DEM	0~1600	0.3102
	1600~2300	2.3956
	2300~2900	0.5967
	2900~3500	-2.4469
	3500~6900	0
剖面曲率	0~5	0.2742
	5~10	-0.1723
	10~15	-0.2335
	15~20	0.0451
	20~30	-0.94
	30~58	0
地貌	中山地貌	0.7517
	低山地貌	1.7254
	其他	0
地震反应谱特征周期	0.4	0.4844
	0.45	0.4842
地震峰值加速度	0.15	0.0297
	0.20	1.0226
坡向	0~90	0.5252
	90~180	-0.5728
	180~270	-0.3118
	270~360	0.032
坡度	0~10	1.3547
	10~20	0.6354
	20~30	-0.123
	30~40	-0.8226
	40~50	-0.4084
	50~90	-0.6364
工程地质岩组	坚硬块状花岗岩者闪长岩岩组	0.563
	软硬相间层状砂岩板岩泥岩岩组	0.0301
	冰山	0.3581
	较坚硬-较软弱层状、薄层状片岩岩组	1.2453
	其他	0
平面曲率	0~10	-0.0391
	10~20	-0.0279
	20~30	-0.3062
	30~40	-0.5248
	40~50	0.1163
	50~60	0.4755
	60~90	0.5718
水系线密度	0~0.08	-3.7177
	0.08~0.24	-2.4331
	0.24~0.42	0.6696
	0.42~0.62	1.6218
	0.62~1.4	0.7205
道路线密度	0~0.28	-2.8886
	0.28~0.87	1.8923
	0.87~1.64	2.4519
	1.64~2.85	2.1497
	2.85~7.3	2.8018

灾害分布; 地质灾害非易发区的信息量范围为-13.0013~-5.9929, 面积占比为 29.52%, 无地质灾害分布(表 6)。

以察隅县 G219 国道沿线为中心, 2000 m 为缓冲半径得到道路缓冲, 以此对信息量法地质灾害易发性结果进行掩膜处理, 得到察隅县 G219 国道沿线地质灾害易发性结果(图 6)。G219 国道沿线信息量范围为-10.2920~15.3661。

其中, 地质灾害高易发区的信息量范围为 7.3162~15.3661, 面积占比为 20.32%, 地质灾害点数量为 63 个; 地质灾害中易发区的信息量范围为-2.6555~7.3162, 面积占比为 30.52%, 地质灾害点数量为 20 个; 地质灾害低易发区的信息量范围为-5.9929~-2.6555, 面积占比为 28.87%, 地质灾害点数量为 2 个; 地质灾害非易发区的信息量范围为-10.2920~-5.9929, 面积占比为 20.29%, 无地质灾害分布(表 7)。

#### 4.3 改进信息量法结果与分析

为了得到改进信息量法的结果, 首先利用地质灾害点进行核密度估计, 以 300 m 为带宽, 察隅县地质灾害点核密度估计结果如图 7 所示, 该区域核密度范围为 0~340.977。

在核密度估计的基础上, 利用公式(3)计算每个栅格单元的改进信息量值, 得到的结果如图 8 所示。改进信息量范围为 0~320.3714, 利用自然间断点法对其进行分级, 得到察隅县地质灾害高易发性区、中易发区、低易发区和非易发区。基于改进信息量法的地质灾害高易发区集中在地质灾害点处, 对于其他非 G219 国道沿线区域不重点关注, 这样使评价结果能对道路沿线进行区分, 且能区分沿线区域各路段的地质灾害易发性。基于改进信息量法的地质灾害易发性制图, 其分区面积占比及各区地质灾害点数量如表 8 所示。

同样对该结果进行缓冲区掩膜。得到基于改进信息量法的察隅县 G219 国道沿线地质灾害易发性分区图(图 9)。其范围为 0.11~320.371, 其中地质灾害高易发区的信息量范围为 201.0584~320.371, 面积占比为 11.56%, 地质灾害点数量为 36 个; 地质灾害中易发区的信息量范围为 115.6555~201.0584, 面积占比为 19.20%, 地质灾害点数量为 36 个; 地质灾害低易发区的信息量范围为-41.5559~115.6555, 面积占比为 20.59%, 地质灾害点数量为 11 个; 地质灾害非易发区的信息量范围为 0.11~-41.5559, 面积占比为 20.59%, 地质灾害点数量为 2 个(表 9)。

表 6 基于信息量法的分区占比

Table 6 Partition ratio based on information method

易发分区	信息量范围	面积占比	灾害点数量/个
高易发区	2.1280~15.3661	9.19%	83
中易发区	-2.6555~2.1280	24.45%	2
低易发区	-5.9929~-2.6555	37.84%	0
非易发区	-13.0013~-5.9929	29.52%	0

表 7 基于信息量法的分区占比 (国道 G219 沿线)

Table 7 Partition ratio based on information method (along National Highway G219)

易发分区	信息量范围	面积占比	灾害点数量/个
高易发区	7.3162~15.3661	20.32%	63
中易发区	-2.6555~7.3162	30.52%	20
低易发区	-5.9929~-2.6555	28.87%	2
非易发区	-10.2920~-5.9929	20.29%	0

表 8 基于改进信息量法的分区占比

Table 8 Partition ratio based on improved information method

易发分区	改进信息量范围	面积占比	灾害点数量/个
高易发区	160.8139~320.371	1.15%	55
中易发区	75.3815~160.8139	3.65%	23
低易发区	22.6144~75.3815	10.25%	7
非易发区	0~22.6144	84.95%	0

表 9 基于改进信息量法的分区占比 (国道 G219 沿线)

Table 9 Partition ratio based on improved information method (along National Highway G219)

易发分区	改进信息量范围	面积占比	灾害点数量/个
高易发区	201.0584~320.371	11.56%	36
中易发区	115.6555~201.0584	19.20%	36
低易发区	41.5559~115.6555	20.59%	11
非易发区	0.11~-41.5559	48.65%	2

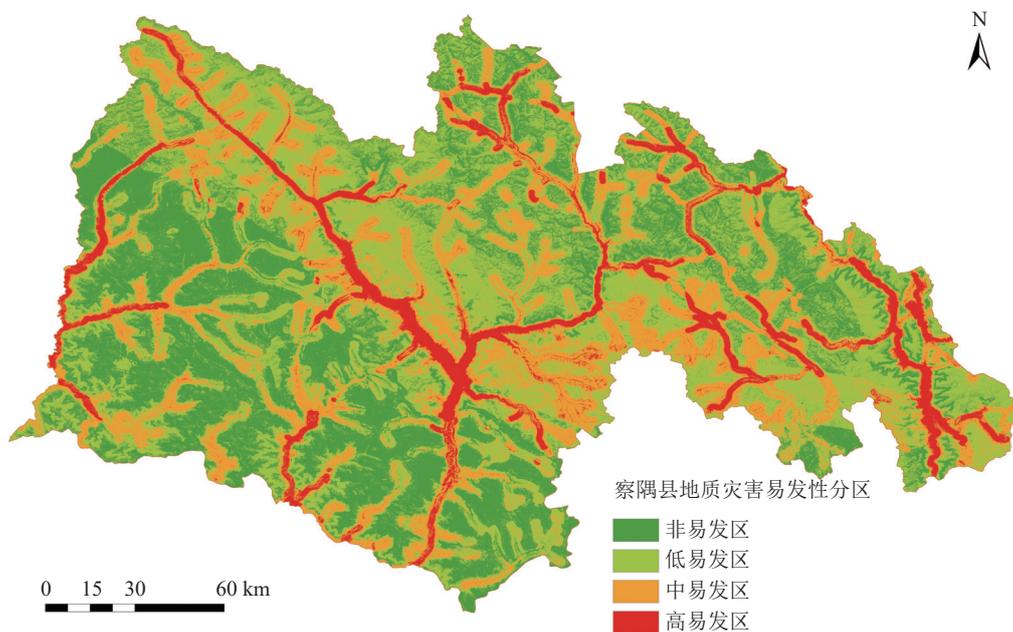


图 5 基于信息量法地质灾害易发性分区图

Fig. 5 Geological hazard susceptibility zoning map based on information method

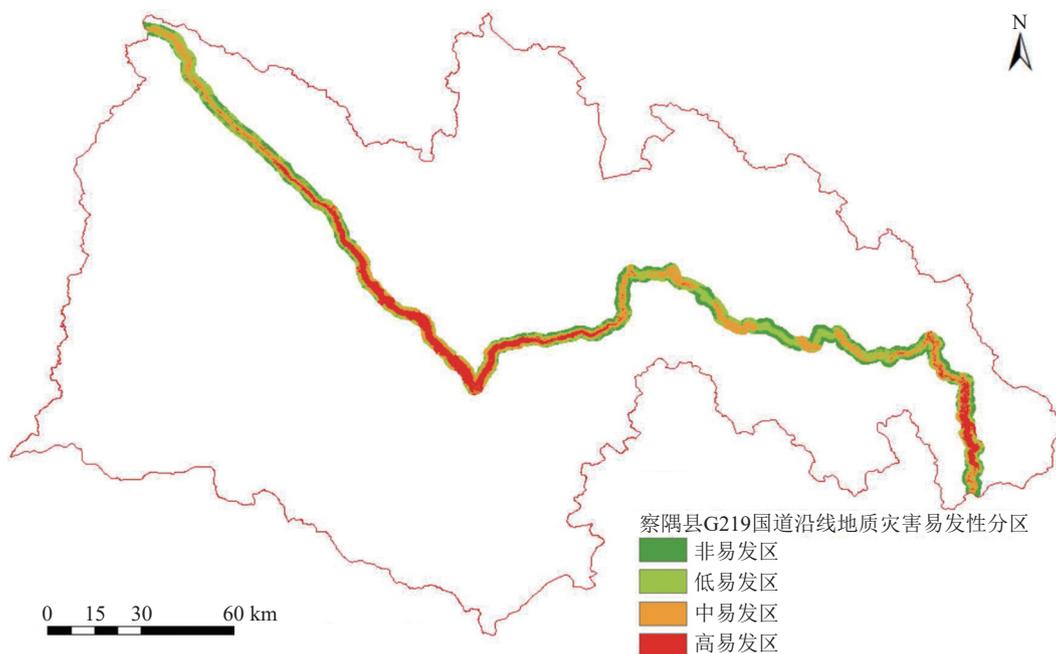


图 6 基于信息量法地质灾害易发性评价

Fig. 6 Geological hazard susceptibility evaluation based on information method

#### 4.4 精度评价

为了进一步对比评价模型精度,采取 ROC 曲线对模型精度进行检验,本次实验仅对 2 种方法的察隅县 G219 国道沿线地质灾害易发性进行精度评价。首先多次随机选择 200 个样本点作为

ROC 精度检验样本。其中 1 次的样本分布如图 10 所示。

由信息量法和改进信息量法的 ROC 曲线(图 11)可知,改进信息量法的精度比原始信息量法评价精度高,基于改进信息量法的评价模型 AUC 值为

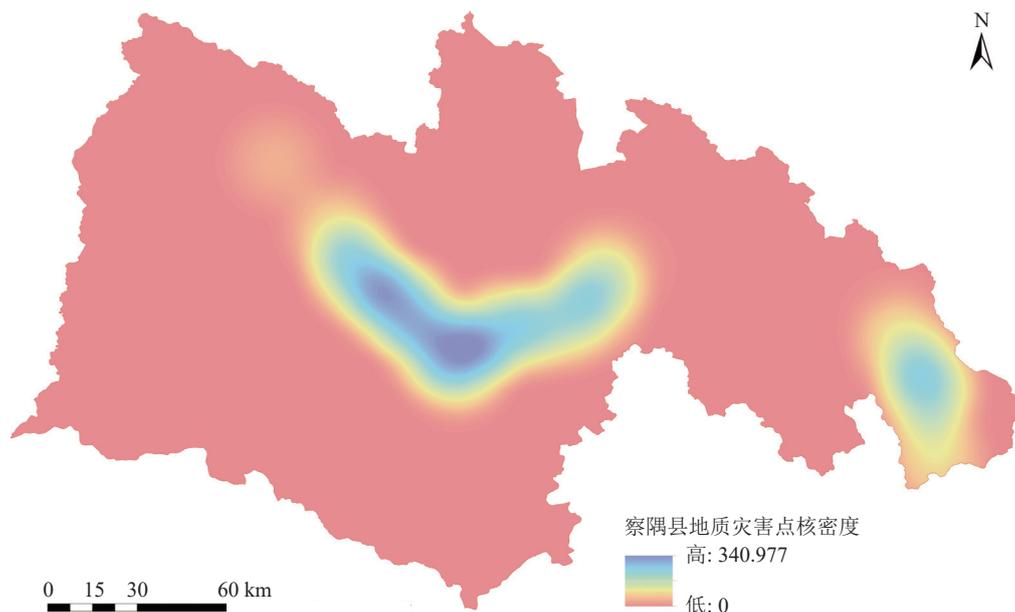


图 7 察隅县地质灾害点核密度估计

Fig. 7 Nuclear density estimation of geological disaster sites in Zayu County

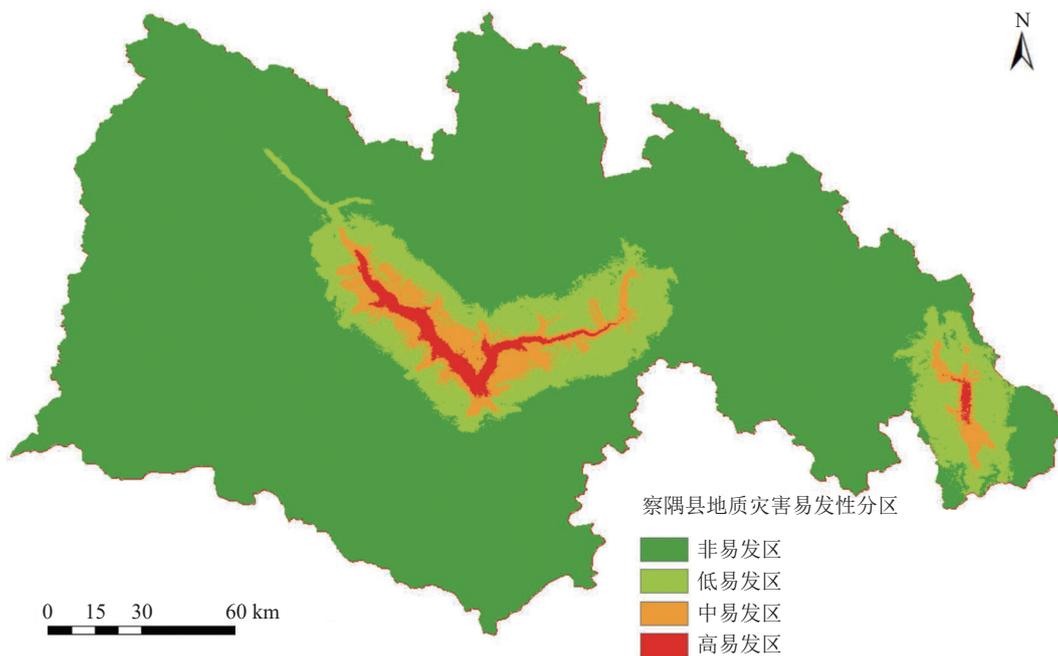


图 8 基于改进信息量法的地质灾害易发性分区图

Fig. 8 Geological hazard susceptibility zoning map based on improved information method

0.836, 基于信息量法的评价模型 AUC 值为 0.789, 说明利用核密度估计法对传统信息量法改进可以提升地质灾害易发性评价精度。

### 5 结 论

本文以西藏察隅县 G219 国道沿线为研究区, 在

传统信息量法的基础上, 利用核密度估计对其进行优化, 提出改进信息量法的地质灾害易发性评价模型, 主要结论如下。

(1) 选取察隅县坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、水系线密度、道路线密度、地貌、DEM、地震峰值加速度、地震反应谱特征、工程地质岩组

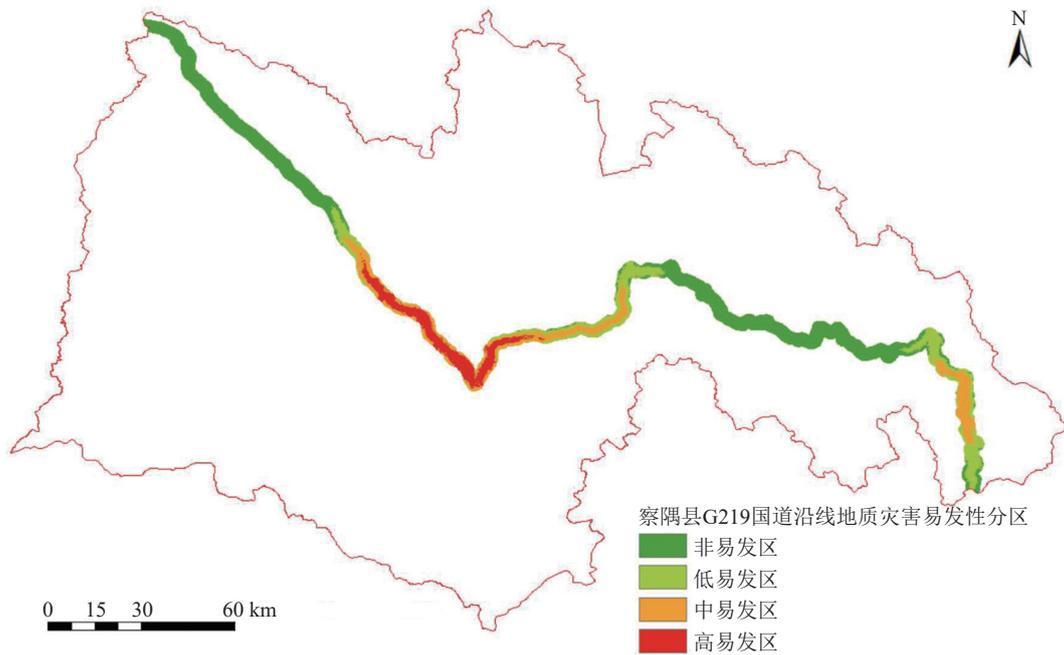


图9 基于改进信息量法的察隅县 G219 国道沿线地质灾害易发性分区图

Fig. 9 Geological hazard susceptibility zoning map along G219 National Highway in Zayu County based on improved information method

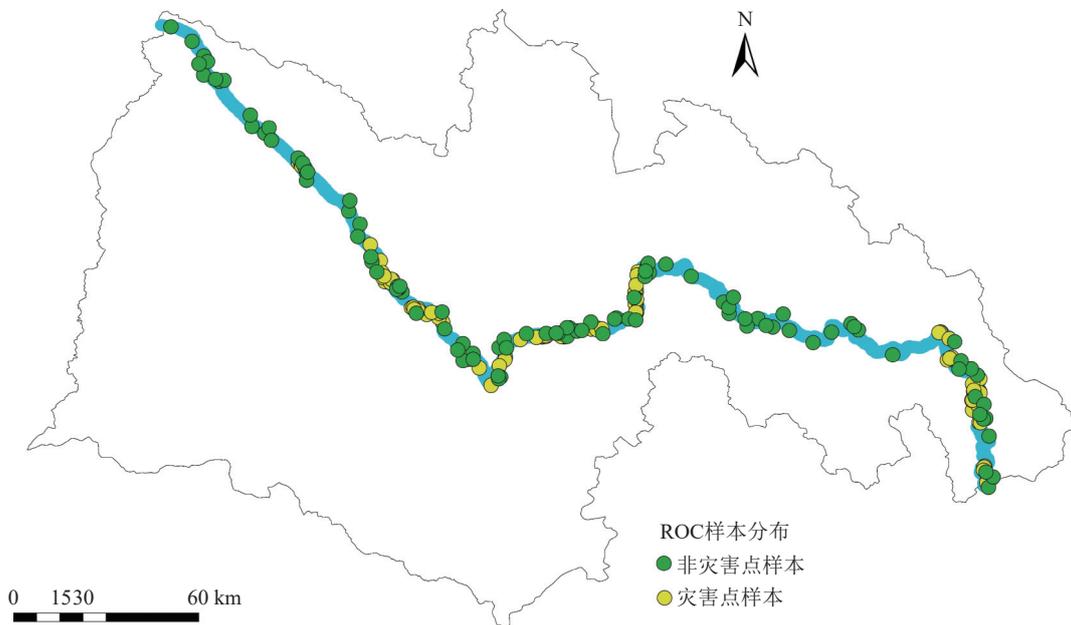


图10 随机检验样本分布

Fig. 10 Distribution of random test samples

和降雨量 12 个评价因子信息,分析因子相关性,剔除降雨量因子,确定该区域的地质灾害评价体系。

(2)为了将地质灾害空间分布规律耦合到信息量法模型,本文构建了基于地质灾害点核密度估计

的改进模型,以  $30\text{ m}\times 30\text{ m}$  的栅格单元作为基础评价单元,对比了信息量法与改进信息量法的评价精度,在 ROC 中,改进信息量法的 AUC 值为 0.836,模型评价效果更好。为该区域规划建设和防灾减灾管理提供科学依据。

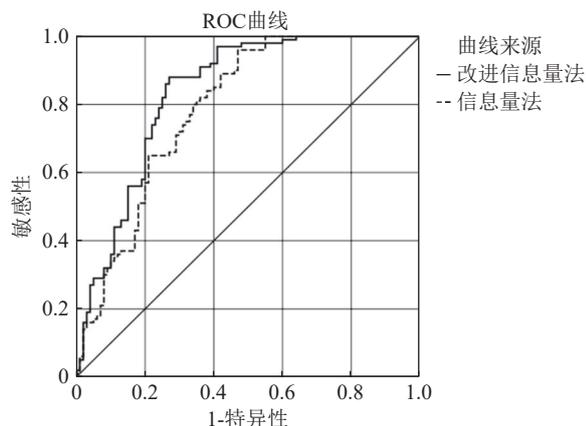


图 11 信息量法和改进信息量法 ROC 曲线

Fig. 11 ROC curves of information method and improved information method

## References

- Chen J G, Zhong L X. 2023. Assessment of rockfall susceptibility along the expressway based on the CF-AHP coupling model: A case study of the Tucheng-Wanglong section of the Rongzun expressway[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 34(6): 105-115 (in Chinese with English abstract).
- Dias H C, Hölbling D, Grohmann C H. 2021. Landslide susceptibility mapping in Brazil: A review[J]. *Geosciences*, 11(10): 425.
- Feng W, Tang Y M, Ma H N. 2021. Comprehensive risk assessment of multi-hazard natural disasters in Xianyang City based on AHP[J]. *Northwestern Geology*, 54(2): 282-288(in Chinese with English abstract).
- Fleuchaus P, Blum P, Wilde M, et al. 2021. Retrospective evaluation of landslide susceptibility maps and review of validation practice[J]. *Environmental Earth Sciences*, 80: 1-15.
- Hao Q, Wei K, Zhao Z W, et al. 2023. Evaluation of geological hazard susceptibility of debris flow based on slope unit: A case study of Xintai City, Shandong Province[J]. *Huabei Natural Resources*, (2): 106-111(in Chinese with English abstract).
- Hou R N, Li Z, Chen N S, et al. 2023. Modeling of debris flow susceptibility assessment in Tianshan based on watershed unit and stacking ensemble algorithm[J]. *Earth Science*, 48(5): 1892-1907 (in Chinese with English abstract).
- Huang X P, Zheng L, Du J, et al. 2023. Regional rockfall hazard susceptibility assessment considering combination modes of rock mass discontinuities[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 30(1): 163-172(in Chinese with English abstract).
- Kang Y H, Wang Y Y, Xia Z J, et al. 2018. Identification and classification of Wuhan urban districts based on POI[J]. *Journal of Geomatics*, (1): 81-85 (in Chinese with English abstract).
- Lan Z X, Zheng B, Liao D W, et al. 2023. Risk assessment of geological disasters in Dayu town, Sandu county, Guizhou province based on information quantity method and slope unit[J]. *Ground Water*, 45(5): 160-163 (in Chinese with English abstract).
- Li S, Shang Y J, Wei, S Y, et al. 2020. Study on the susceptibility and causes of geohazards of Karakoram highway[J]. *Xinjiang Geology*, 38(4): 532-538(in Chinese with English abstract).
- Meng X R, Pei X J, Liu Q H, et al. 2016. GIS-Based susceptibility assessment of geological hazards along the road from Dujiangyan to Wenchuan by factor analysis[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 27(3): 106-115(in Chinese with English abstract).
- Sun B, Zhu C B, Kang X B, et al. 2022. Susceptibility assessment of debris flows based on information model in Dongchuan, Yunnan Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 33(5): 119-127(in Chinese with English abstract).
- Wei Y. 2020. Geological Disaster Susceptibility assessment along expressway in Southwest Mountain area: A case study of Panzhihua-Yanyuan expressway[D]. Master's Thesis of Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Wu X, Song Y, Chen W, et al. 2023. Analysis of geological hazard susceptibility of landslides in Muli County based on random forest algorithm[J]. *Sustainability*, 15(5): 4328.
- Xu Z H. 2020. Susceptibility Evaluation of geological hazards in Zhen'an section of 345 national highway[D]. Master's Thesis of Xi'an University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Yang R, Yu C Y, Wang Y. 2023. Susceptibility evaluation of geological disaster based on weighted information and GIS method: A case study of Yushe County[J]. *Mining Research and Development*, 43(2): 163-170(in Chinese with English abstract).
- Zeng B, Yang M Y, Shao C J, et al. 2018. Susceptibility assessment of karst collapse of Hangchang Expressway Projects based on analytic hierarchy process[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 25(1): 29-38 (in Chinese with English abstract).
- Zhang T. 2015. Research on risk evolution of geological disasters in Tianshan Highway in Xinjiang[D]. Master's Thesis of Chongqing Jiaotong University (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y, Wang Y S, Zhao X, et al. 2022. Susceptibility assessment of debris flow in Dimaluo River, branch of Nujiang River[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(4): 702-712 (in Chinese with English abstract).
- Zhu M L, Tang X L, Yang W L, et al. 2023. Application of optimised SVM model to mudslide susceptibility[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 42(6): 163-170 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈建国, 钟连祥. 2023. 基于 CF-AHP 耦合模型的高速公路沿线崩塌地质灾害易发性评价——以蓉遵高速公路土城-旺隆段为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 34(6): 105-115.
- 冯卫, 唐亚明, 马红娜, 等. 2021. 基于层次分析法的咸阳市多灾种自然灾害综合风险评价[J]. *西北地质*, 54(2): 282-288.
- 郝琪, 魏凯, 赵志伟, 等. 2023. 基于斜坡单元的泥石流地质灾害易发性评价——以山东新泰市为例[J]. *华北自然资源*, (2): 106-111.
- 侯儒宁, 李志, 陈宁生, 等. 2023. 基于流域单元和堆叠集成模型的天山地区泥石流易发性评估建模[J]. *地球科学*, 48(5): 1892-1907.
- 黄肖萍, 郑莉, 杜娟, 等. 2023. 考虑岩体结构面组合的区域崩塌灾害易发性评价[J]. *安全与环境工程*, 30(1): 163-172.

- 康雨豪, 王玥瑶, 夏竹君, 等. 2018. 利用 POI 数据的武汉城市功能区划分与识别[J]. 测绘地理信息, (1): 81-85.
- 兰中孝, 郑冰, 廖德武, 等. 2023. 基于信息量法与斜坡单元的贵州省三都县打鱼镇地质灾害风险评价[J]. 地下水, 45(5): 160-163.
- 李坤, 尚彦军, 魏思宇, 等. 2020. 喀喇昆仑公路国内段地质灾害易发性评价及成因分析[J]. 新疆地质, 38(4): 532-538.
- 孟祥瑞, 裴向军, 刘清华, 等. 2016. GIS 支持下基于因子分析法的都汶路沿线地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 27(3): 106-115.
- 孙滨, 祝传兵, 康晓波, 等. 2022. 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, 33(5): 119-127.
- 魏雨. 2020. 西南山区高速公路沿线地质灾害易发性评价——以攀枝花至盐源高速为例[D]. 成都理工大学硕士学位论文.
- 徐志浩. 2020. 345 国道镇安段公路地质灾害易发性评价[D]. 西安科技大学硕士学位论文.
- 杨锐, 于春勇, 汪洋. 2023. 基于加权信息量和 GIS 方法的地质灾害易发性评价——以榆社县为例[J]. 矿业研究与开发, 43(2): 163-170.
- 曾斌, 杨木易, 邵长杰, 等. 2018. 基于层次分析法的杭长高速岩溶塌陷易发性评价[J]. 安全与环境工程, 25(1): 29-38.
- 张婷. 2015. 新疆天山公路地质灾害危险性评价研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文.
- 周粤, 王运生, 赵逊, 等. 2022. 怒江支流迪麻洛河流域泥石流易发性评价[J]. 地质通报, 41(4): 702-712.
- 朱木雷, 谭晓玲, 杨伟良, 等. 2023. 优化 SVM 模型在泥石流易发性中的应用[J]. 国外电子测量技术, 42(6): 163-170.

### 《地质通报》第 44 卷第 2~3 期要目预告

- 砂卡岩矿床模型研究进展 ..... 谢桂青等
- 琼东南盆地松西凹陷始新统油页岩地化特征及生烃潜力 ..... 汪紫菱等
- 塔里木盆地富满油田断控缝洞型储层现今地应力特征及应用 ..... 徐珂等
- 中国锂资源供需现状与资源保障程度研究 ..... 文佳豪等
- 黄铁矿微量元素对广西大瑶山金竹洲金矿床成矿作用的约束 ..... 杨晨雨等
- 北山造山带双尖山—狼娃山地区金矿床硫化物硫同位素及微量元素对成矿机制的指示 ..... 张晨晓等
- 湘东北矿集区黄金洞金矿床成矿机制——来自毒砂和黄铁矿微量元素约束 ..... 吴俊等
- 基于成像光谱的砂岩铀矿岩性分类深度学习方法 ..... 潘蔚等
- 中国南方岩溶石漠化的时空变化及其原因分析 ..... 涂纯等
- 西藏庞村古滑坡发育特征与危险性评价 ..... 齐畅等
- 黄河流域生态系统服务价值时空变化特征分析 ..... 高萌萌等
- 北京王四营地区地面沉降演化规律及潜力预测模型评价 ..... 刘贺等
- 金沙江流域泥石流危险性评价 ..... 孙聿卿等
- 基于深部位移的滑坡预警预报方法：以云南某水电站库区特大型滑坡为例 ..... 郭延辉等
- 云南云龙县石城咸温泉水化学特征及演化分析 ..... 师妍祥等
- 中晚更新世松嫩平原轨道尺度上的气候变化 ..... 任柄璋等
- 大兴安岭南段内蒙古小大川铅锌铜矿黑云母—二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成矿背景 ..... 刘永强等
- 南天山造山带东段变流纹岩岩体的喷发时代与构造背景：来自锆石 U-Pb 年龄和微量元素的约束 ..... 黄少英等
- 拉萨地块扎扛地区晚寒武世—早奥陶世流纹岩锆石 U-Pb 定年、岩石成因及其对原特提斯洋俯冲的启示 ..... 陈红灿等
- 阿拉善地块北缘干中酸性火山岩 LA-ICP-MS 年龄、地球化学特征及其对区域构造演化的制约 ..... 雷聪聪等
- 扬子地块西缘乌蒙山地区早白垩世橄榄玄武岩的发现及其对陆缘碰撞造山事件陆内响应的启示 ..... 张宏辉等
- 南祁连山大道尔吉蛇绿岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其对南祁连山早古生代构造演化的约束 ..... 冯鹏宇等