

金沙江流域泥石流危险性评价

孙聿卿^{1,2}, 葛永刚¹, 陈兴长³, 曾璐¹, 梁馨月^{1,2}, 冯鑫³

Yuqing Sun^{1,2}, Yonggang Ge¹, Xingzhang Chen³, Lu Zeng¹, Xinyue Liang^{1,2}, Xin Feng³

1 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610299

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621000

1Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences (CAS), Chengdu, 610299, Sichuan, China.

2University of Chinese Academy Sciences, Beijing, 100049, China.

3School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China

摘要: 开展危险性评价是灾害多发区预警预报和防灾减灾的重要措施之一。金沙江流域主要位于金沙江-哀牢山结合带, 构造背景复杂, 山地灾害多发, 近年来因水电工程开发建设而逐渐引起学者关注。因此, 本文以金沙江流域的泥石流为对象, 结合野外调查和 GIS 技术, 获得了金沙江流域干流及主要支流中的 2551 条泥石流流域, 并基于泥石流活动特征开展泥石流危险性评价, 通过 ROC 检验以及空间聚类分析, 完成了金沙江流域泥石流危险性区划。研究结果显示: (1) 金沙江流域上游段泥石流并不活跃, 以低中频为主, 高频泥石流主要分布在下游段, 尤以涛源镇至巧家段发育最为集中; (2) 最有利于泥石流灾害形成的因素为: 15~35°坡度、地震分布最密集、软硬相间的碎屑岩组中; (3) 金沙江流域内中高危险泥石流占比 47.48%, 接近一半; (4) 其中东川-巧家段的高危险区存在高聚集度, 与活跃断层高度重合, 物源丰富, 基本受活跃断层控制。研究获得的危险性区划图可为水力水电、交通廊道等工程开发建设中规避泥石流风险、制定防灾减灾措施提供参考依据。

关键词: 泥石流; 危险性; 活动特征; 金沙江流域

Hazard Assessment of Debris Flow in Jinsha River.

Abstract: Hazard assessment is a crucial measure for early warning and forecasting, disaster prevention and mitigation in disaster-prone areas. The Jinsha River flows through the Jinsha River-Ailao Mountain suture zone, with complex tectonic background and frequent mountain disasters. Recently, it has gradually attracted scholars' attention due to the development and construction of hydropower projects. Hence, this paper takes the debris flow of the Jinsha River as the object, combined with field investigation and GIS technology, 2551 debris flow of the main stream and tributaries in Jinsha River were obtained, and the debris flow hazard assessment was carried out based on the characteristics of debris flow activity. The zoning map was examined by the ROC test and spatial clustering analysis. The results show that: (1) the debris flow in upper reaches of Jinsha River is not active, with low and medium frequency, while high-frequency debris flow is concentrated in the lower reaches, especially in the section from Taoyuan Town to Qiaojia; (2) the slope of 15 ~ 35, the most intensive earthquake distribution, and the soft and hard clastic rocks are the most favorable factors for the formation of debris flow disasters; (3) The medium and high hazard debris flow in Jinsha River accounts for 47.48%, which is close to half; (4) Among them, the high-hazard area in Dongchuan-Qiaojia section has a high degree of aggregation, which is strongly coincident with active faults and rich in provenance, basically controlled by active faults. The hazard zoning map obtained by the study can provide a reference for avoiding debris flow risk and formulating disaster prevention and mitigation measures in the planning and construction of projects such as hydropower and traffic corridors.

Key words: Debris flow; hazard; activity characteristics; Jinsha River

随着大型水力水电工程和交通线性工程开发建设的逐步推进, 金沙江流域的大型泥石流灾害引起学者们的关注与重视(Bi et al., 2023; Hu et al., 2020)。金沙江长约 3364 km, 流域面积 $47.32 \times 10^4 \text{ km}^2$, 位于藏东南的横断山区, 地跨多个强烈挤压的地质构造单元, 地壳稳定性差, 地震活跃, 地壳抬升快, 河流深切, 形成相对高差很大的纵向岭谷地貌(骆银辉等,

¹资助项目: 国家自然科学基金(42001012)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902)

作者简介: 孙聿卿 (1996-), 女, 在读博士生, 从事泥石流灾害风险评估研究。E-mail: sunyuqing@imde.ac.cn

*通信作者: 葛永刚 (1974-), 男, 博士, 研究员, 从事山地灾害形成机理及预警技术研究。E-mail: gyg@imde.ac.cn

2007; 明庆忠和潘玉君, 2002), 致使该区地质环境脆弱, 崩滑泥普遍发育, 泥石流堆积扇、崩滑坡堆积体随处可见(Bao et al., 2020; Li et al., 2020b; 曹鹏等, 2021; 张彦锋等, 2023), 这些频发的泥石流灾害对流域内人民生命财产和工程建设安全、重要基础设施的正常建设与运营构成了严重威胁, 因此补充完善金沙江流域泥石流数据, 研究区域内泥石流灾害的孕灾背景并开展危险性区划显得十分必要。

当前, 信息技术的发展使得泥石流危险性评价方法不断地改进, 从最初的定性、半定性逐渐发展为定量评价(Akbar and Ha, 2011; Liu et al., 2018)。目前应用较为广泛的数理统计方法有信息量法(Xue and Zheng, 2013)、灰色关联法(Wang and Pu, 2018)、熵权法(Chen et al., 2007; Li et al., 2020a)、证据权法(Chen et al., 2016)等。信息量法直接根据每个子类指标的贡献程度即可获得泥石流危险性的预测结果, 避免了主观判定(Xue and Zheng, 2013), 但是没有考虑到各个指标间相互影响, 主观认为各致灾因子间的关系是一一对应的, 较为单一; 而灰色关联法的关联度分析反应了发展过程中各因素间的关联程度, 适用于动态过程分析, 但也存在一定弊端, 若指标选取过多, 参考序列和比较序列具有不确定性且数值处理工作量大, 关联度计算繁琐复杂(Kuo et al., 2008); 证据权法则在信息量法的基础上进一步精确化, 同时获得的正、负权重值直接指示不同评价指标与泥石流危险度的相关性, 因此本文选取综合信息量法和灰色关联法两种模型优势的证据权法作为评价模型, 既考虑了各评价因子的相关性又反应了各因子内部分级的影响。

在泥石流危险评价的方法更加模型化、定量化的基础上, 泥石流的评价内容也逐渐完善, 越来越多的应用于实际工程。按空间尺度大小, 泥石流的危险性评价主要包括两个方面: 一是针对单沟泥石流, 一般采用野外调查和数值模拟的方法对泥石流淤积范围进行界定(Chang et al., 2017; Li et al., 2021); 二是针对区域泥石流, 一般是基于 GIS 技术, 结合区域背景和遥感影像的指标统计数据展开的(Berenguer et al., 2014; Yin and Zhang, 2018)。因此, 泥石流评价的关键在于根据评估尺度大小, 选择合理可行的方法和有针对性的评价指标。当前机器学习的发展和遥感技术的应用使得高精度数据的获取利用成为可能, 若将数值模拟和深度学习相结合(Bojer et al., 2023; Bregoli et al., 2015; Cabral et al., 2023), 既能量化泥石流形成的物理过程, 又能反应大量泥石流样本的非线性关系, 实现泥石流评价的尺度转换, 但目前该评价体系还处于初始阶段, 仍需不断探索研究。

针对金沙江流域, 学者们运用上述各种方法已经开展了一些泥石流危险性评价工作(陈剑等, 2016; 吴赛儿等, 2018; 张晨等, 2011), 但是这些研究仅限于金沙江流域的某一区段, 且泥石流样本数量较少。因此, 为了进一步提高评价结果的准确性, 本文结合泥石流样本数据的实际情况, 在考虑泥石流活动特征的基础上, 采用层次分析-证据权模型开展金沙江流域泥石流危险性评价, 以期研究区内交通路线、水电工程规划建设和防灾减灾提供参考。

1. 金沙江流域概况

金沙江流域整体位于藏东南横断山系“三江地区”的中段, 地势起伏非常大(高差达 6000 余米), 由西北向东南倾斜, 地形切割破碎, 在青藏高原、云贵高原和四川盆地间形成一个地势陡变带。流域内气候时空变化十分显著(图 1-a), 西北部的大气环流受到青藏高原南支西风带气流的影响, 常为大陆性的晴朗干燥天气, 东北部受到西南气流的影响阴湿多雨(骆银辉, 2009; 明庆忠, 2006)。降雨呈现由北向南, 由西向东递增的趋势, 上游白玉、巴塘一带的降水相对比较少; 下游寻甸、雷波湿度相对较大, 降水量可达 1100 mm; 温度由西北向东南逐渐升温, 年均温在-14~22℃, 河谷区为典型的干热河谷气候。

大地构造上, 金沙江流域位于特提斯-喜马拉雅构造域东南部弧形构造转折处, 是扬子地块与滇西褶皱带交接区, 地跨多个地质构造单元, 构造复杂(图 1-b)(王保弟等, 2021)。在这些构造单元间, 大型活动断裂发育, 分布有金沙江断裂、巴塘断裂、鲜水河-则木河-小江断裂、程海-宾川断裂等; 以金沙江断裂为界将该区地质构造分为四个一级构造单元(羌塘-三江褶皱系(V)等)、十一个二级构造单元(甘孜-理塘弧盆系(V₂)等)(骆银辉, 2009; Pan et al., 2012), 区内地层的岩性、厚度以及岩浆活动等受金沙江断裂的控制尤其明显(明庆忠, 2006)。主要出露元古界、古生界和中生界地层, 发育有泥盆系、二叠系、三叠系的板岩、片岩、片麻岩, 大理岩等, 多呈陡倾产状, 走向与构造线平行, 岩浆岩分布与构造线一致; 其中沉积岩以三叠系地层分布最为广泛, 主要为一套浅海-滨海相的

砂泥质沉积，间夹少量碳酸盐类及海底火山喷出岩(骆银辉, 2009; 明庆忠, 2006)。第四系地层则以冲洪积、冰碛砂、卵、砾石层为主，零散分布于河谷两岸，高山平缓台地、凹地间厚度较小。

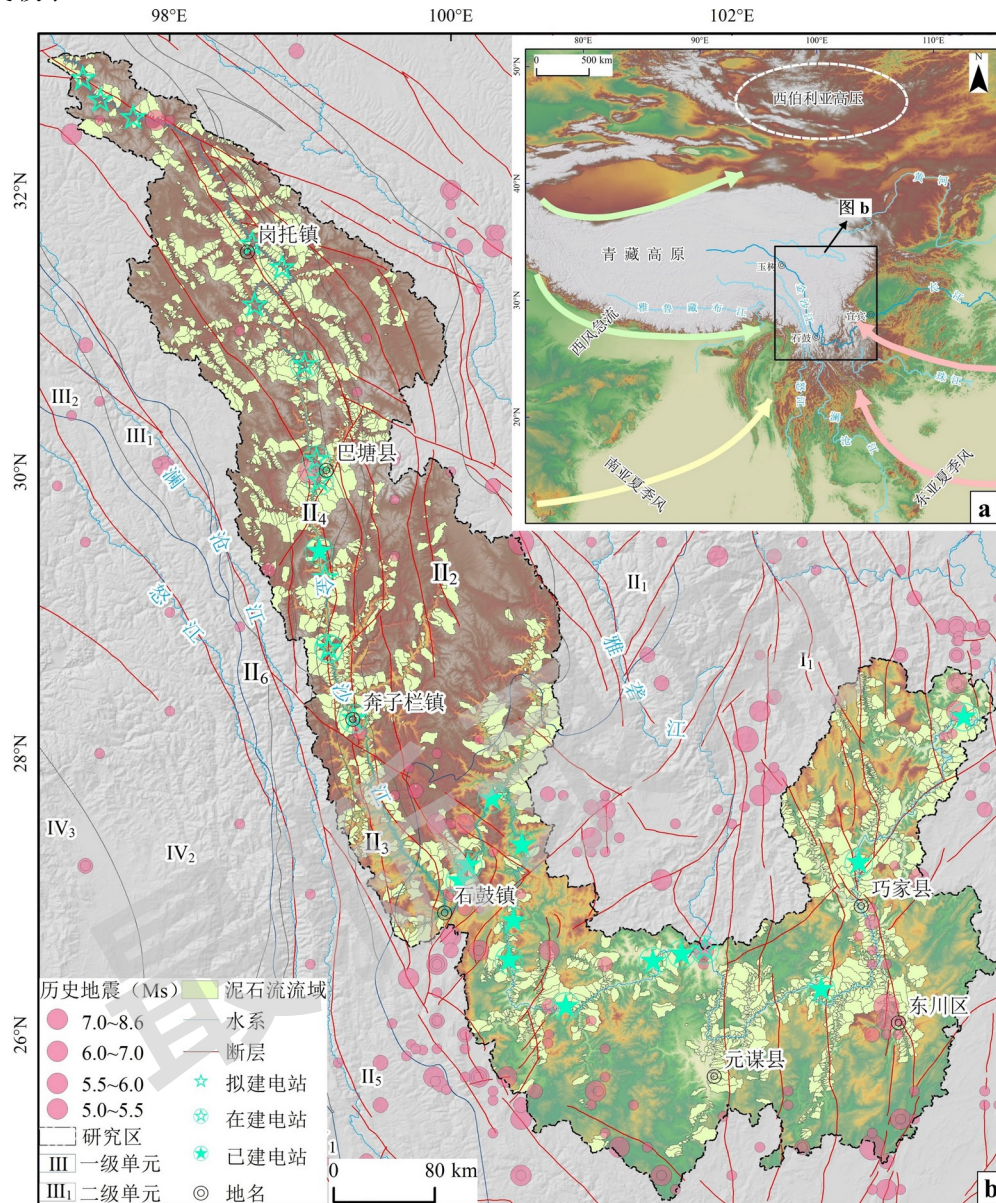


图 1 金沙江流域所在地区区域背景图 (I 扬子陆块区: I₁ 上扬子陆块; II 羌塘-三江造山系: II₁ 玉龙塔格-巴颜喀拉前陆盆地, II₂ 甘孜-理塘弧盆系, II₃ 中咱-中甸地块, II₄ 金沙江-哀牢山结合带, II₅ 昌都-兰坪地块, II₆ 崇山-临沧地块; III 班公湖-双湖-怒江-昌宁-孟连对接带; III₁ 班公湖-怒江结合带, III₂ 南羌塘增生弧盆系; IV 冈底斯-喜马拉雅造山系; IV₁ 保山地块, IV₂ 达拉克-冈底斯-察隅弧盆系, IV₃ 缅甸弧盆系)

Fig.1 Regional background map of Jinsha River

2. 泥石流分布及发育特征

2.1 泥石流解译与调查

本文基于 Google Earth 影像对研究区进行初步解译。利用 ArcGIS (10.4 版本) 工具对 ASTER GDEM 30 m 分辨率高程数据进行“水文分析”，提取流域边界，并结合 BING 卫星图和 MapBox 影像修正分水岭和堆积扇。泥石流的判识主要从物源区、流通区、堆积区的形态、色调、纹理以及植被发育状况等方面进行解译(曾超等, 2022; 刘小莎等, 2021; 刘星洪等, 2020)，主要解译标志如下：

(1) 若沟口有明显的堆积扇可判断为泥石流 (图 2-a)，扇体边界清晰，色质细腻，

泥石流堆积扇是判断泥石流的性质和评估其危害程度的关键标志，因此泥石流沟的影像解译和野外判识，通常以泥石流是否到达沟口为依据（图 2-c, d）；

（2）流通区的主沟道中可见明显的冲刷痕迹，底部有分选较差的碎块和砾砂石土等早期堆积于沟道中的松散物质；

（3）物源区有明显的灰白色条带状或片状分布的沟蚀、面蚀等物源（图 2-b），或有崩塌、滑坡、工程弃渣等集中物源，区别于周围植被，高亮度显示，呈现圈椅状或舌形等形态；

（4）修建有排导槽、拦砂坝等治理工程的其他证据。



图 2 典型泥石流遥感影像和野外照片

Fig.2 Remote sensing images and field photos of typical debris flows

2.2 泥石流类型及分布

在遥感解译的基础上开展野外考察复核，调查流域沟道、扇体的泥石流活动痕迹（图 2-c, d）、访问灾害历史等，最终获得研究区泥石流流域 2551 条（图 3）。按激发水源来看，区域内以降雨型泥石流为主，仅部分冰雪覆盖区（哈巴雪山和玉龙雪山以及海拔 4000 m 以上）有少量冰雪融水型和冰雪混合型。根据调查规范对泥石流暴发频率的分类（DZ/T 0261-2014）把泥石流活动性划分为高频泥石流（近 5 年内暴发过）、中频泥石流（5~50 年间）和低频泥石流（近 50 年间未暴发过），研究区以低中频泥石流为主（2110 条，占比超过 80%），集中分布在上游段；而高频泥石流（384 条）主要分布在下游段，尤其是涛源镇至巧家段高频泥石流集中发育，也就是我国四大泥石流活跃区之一的小江流域（图 3-a）。结合流域内沟道和扇体上泥石流堆积样砂石和粘粒含量含量以及密实程度等划分泥石流的流体性质，区内粘性泥石流主要分布在永胜-宾川、红格-元谋、巧家-东川以及金沙江主河两岸等地段，与活跃断层高度重合，物源丰富，基本受活跃断层控制（图 3-b）。

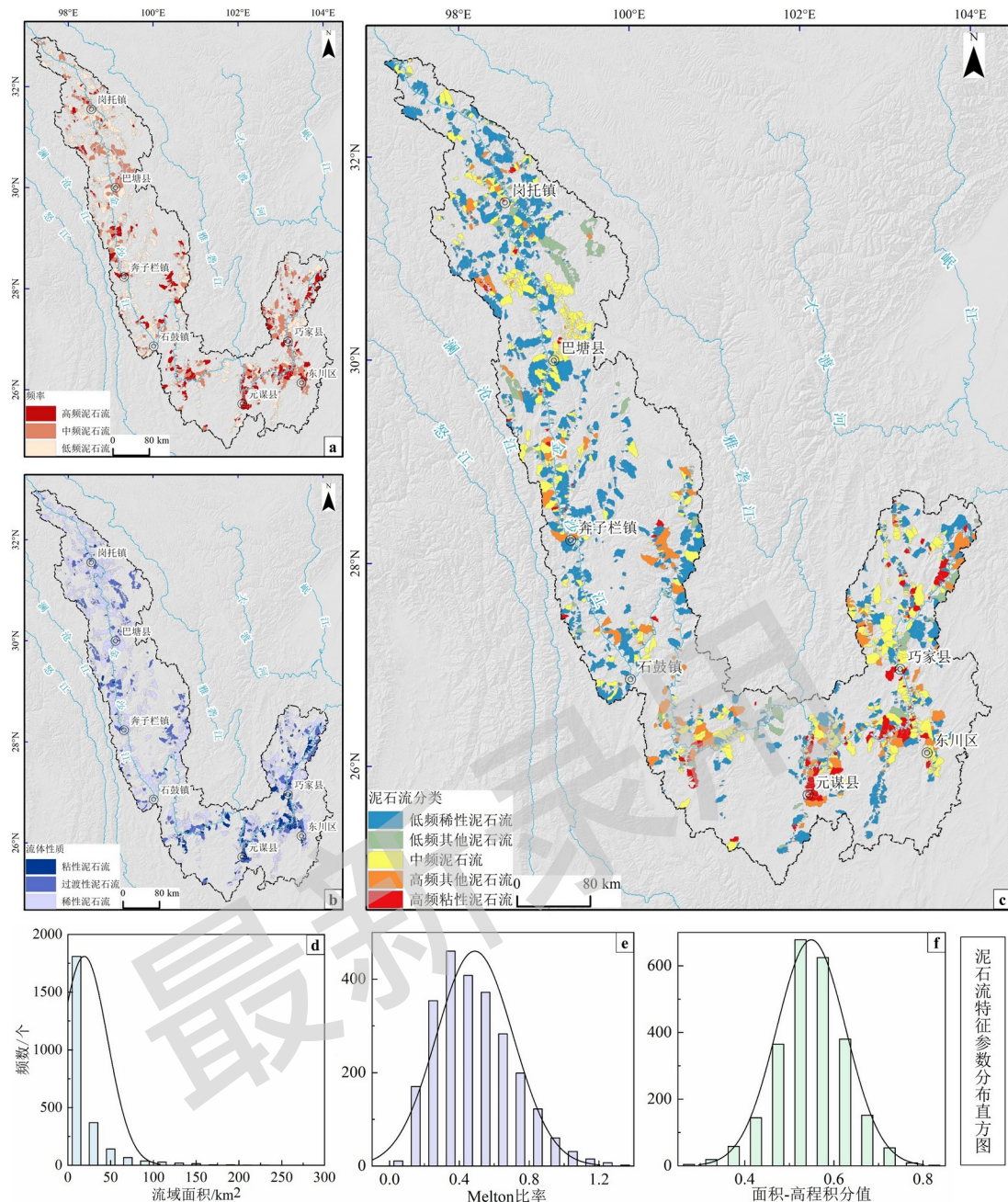


图 3 金沙江流域不同类型泥石流分布
Fig.3 Distribution of Different Types of Debris Flow in Jinsha River Basin

2.3 泥石流发育特征

(1) 流域面积

研究区泥石流流域面积分布在 1.79~327.60 km², 平均值 19.11 km², 中值 8.83 km², 标准差 27.22 km²。统计显示, 区内泥石流流域面积呈递减形势 (图 3-d), 以中小流域为主, 集中在小于 20 km² 的范围内。通常, 较小的集水区更易于泥石流的形成和汇集。

(2) Melton 比率

Melton 比率反应了流域地势的陡峭程度 ($M = H / \sqrt{A}$, H 表示流域相对高差, A 表示流域面积), 流域内地势越陡峭越有利于泥沙输移, 搬运物质能力越强 (Esper Angillieri, 2020; Morel et al., 2023)。研究区泥石流的 Melton 比率分布在 0.07~1.33, 平均值 0.49, 中值 0.46 km², 标准差 0.22。统计显示, 研究区泥石流 Melton 比率均值与中值接近, 流域频数变化趋势呈现正态分布 (图 3-e), 在 0.2~0.5 间分布最多。

(3) 面积-高程积分值 (HI)

泥石流活动属于一种地貌演化过程，其发育阶段自可通过面积-高程积分值来量化(向灵芝等., 2015; 张静等., 2021)。本文采用起伏比法进行计算 ($HI = (H_{mean} - H_{min}) / (H_{max} - H_{min})$)， H_{mean} 表示流域内平均高程， H_{min} 表示流域内最小高程， H_{max} 表示流域内最大高程)。研究区泥石流的面积-高程积分值分布在 0.19~0.81；平均值 0.55，中值 0.55，标准差 0.08。统计显示，区内泥石流面积-高程积分均值等于中值，流域频数变化趋势呈现正态分布，超过 70%的泥石流流域高程-面积积分值在 0.35~0.6 间，发育阶段为壮年期（图 3-f）。

3. 泥石流危险性评价模型

泥石流危险性评价已经发展为综合考虑泥石流特征与孕灾环境的定量分析过程，关键是选取适宜的评价指标和评价方法，合理反应泥石流危险性状况。本文在考虑泥石流活动特性的基础上将证据权模型和层次分析法相结合开展危险性评价。首先基于证据权模型计算不同评价指标的权重值，再针对不同类型泥石流，采用层次分析法对不同权重值进行赋权，进而构建综合考虑泥石流活动性的危险性评价模型。

(1) 定量分析

证据权法是加拿大地质学家 Agterberg 以贝叶斯条件概率为理论基础提出的，原理是将已知的离散事件作为训练样点（如泥石流灾害点），与事件有关的各种因素作为证据因子（即评价指标），基于证据因子与训练样点的空间关系，计算各证据因子对事件发生的贡献值（权重）；在证据因子相互独立情况下，用后验概率表达评价单元内目标事件发生的可能性，后验概率越大，事件发生的可能性越大(Agterberg, 2011)。具体应用步骤如下：

① 先验概率

$$O_{先验} = \frac{P(D)}{1 - P(D)} \quad (式 1)$$

② 因子权重

$$P_1(B_j / D) = \frac{B_j \cap D}{D} = \frac{S_{B_j D}}{S_D} \quad (式 2)$$

$$P_2(B_j / \bar{D}) = \frac{B_j \cap \bar{D}}{\bar{D}} = \frac{S_{B_j} - S_{B_j D}}{S_L - S_D} \quad (式 3)$$

$$P_3(\bar{B}_j / D) = \frac{\bar{B}_j \cap D}{D} = \frac{S_D - S_{B_j D}}{S_D} = 1 - P_1 \quad (式 4)$$

$$P_4(\bar{B}_j / \bar{D}) = \frac{\bar{B}_j \cap \bar{D}}{\bar{D}} = \frac{S_L - S_D - S_{B_j} + S_{B_j D}}{S_L - S_D} = 1 - P_3 \quad (式 5)$$

$$W_j^+ = \ln \frac{P(B_j / D)}{P(\bar{B}_j / D)} \quad (式 6)$$

$$W_j^- = \ln \frac{P(\bar{B}_j / D)}{P(B_j / D)} \quad (式 7)$$

$$C = W_j^+ - W_j^- \quad (式 8)$$

③ 后验概率

$$O_{后验} = \exp[\ln(O_{先验}) + \sum_{j=1}^n W_j^k] \quad (式 9)$$

$$P_{后验} = \frac{O_{后验}}{1 + O_{后验}} \quad (式 10)$$

式中， S_D -公路沿线泥石流流域面积， S_L -本文评价研究区的面积， $S_{B_j D}$ - j 指标层与泥石流流域相交的面积， S_{B_j} - j 指标层的面积； W_j^+ 、 W_j^- 分别为证据因子存在和不存在的权重值，若原始数据缺失，则权重值为 0， C 表示各证据因子（评价指标）与证据层（泥石流）的相关程度。最后，将计算的 W_j^+ 赋值于该证据因子， W_j^- 赋值于该因子剩余的其他分类级别。

(2) 定性分析

层次分析法(AHP)通过两两元素的对比来确定各因素的重要性,最终确定各评价指标的权重系数。其计算过程主要包括以下五个步骤:①建立层次结构,②构造各层次的判断矩阵,③求解权重值,④一致性检验,⑤层次总排序(Saaty T, 1990)。

4 危险性评价

4.1 评价因子

基于前述金沙江流域孕灾背景和泥石流分布规律分析,区内自西北向东南,地形急变,降水逐渐增加;泥石流激发类型以降雨型为主,中高频泥石流集中在中下游。因此,本研究从泥石流形成条件出发,初步选取表征地形条件的地形坡度、地形粗糙度、地形起伏度汇流动力指数(SPI)和地形湿度指数(TWI),表征物源条件的超额地形、地震核密度、工程地质岩组以及表征水源条件的夏季(7、8、9月)多年月平均降雨量等评价指标,开展泥石流危险性评价。

(一) 数据来源

构建泥石流危险性评价指标的数据包括:(1)数字高程模型(DEM):分辨率为 30×30 m的ASTER GDEM,来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/home>);

(2)工程地质岩组来源于中国地质调查局(<https://geocloud.cgs.gov.cn/>)四川、云南、西藏1:25万区域地质图;(3)历史地震数据来源于美国地质调查局(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>);(4)降雨数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>),空间分辨率为1 km(Peng et al., 2019);(5)水系和地理数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/main.do?method=index/>),比例尺为1:100万。

(二) 评价因子分析

(1) 坡度

坡度是决定坡体内部应力条件并控制斜坡稳定性的重要因素之一,它影响了松散物源的分布和聚集,是泥石流形成的重要条件之一。坡体稳定性随着坡度增大而逐渐降低,利于松散固体物质形成,但达到一定坡度上限,松散物质反而不易积聚。野外调查发现,平缓地带(坡度 $<15^\circ$)往往成为泥石流堆积区的扇缘;而泥石流形成和流通地段坡度在 $15\sim 35^\circ$ 范围。因此,基于研究区30 m分辨率的DEM数据,采用ArcGIS的空间分析技术提取坡度,其分布在 $0\sim 80^\circ$,将其分为五级: $<15^\circ$, $15\sim 25^\circ$, $25\sim 35^\circ$, $35\sim 45^\circ$, $>45^\circ$,空间分布见图4,统计结果见图5。

(2) 地形粗糙度

地形粗糙度是某区域内地球表面积与其投影面积的比值,比值越大,意味着表面越粗糙,是反映地表形态的一个宏观指标。随着粗糙度的变化,坡体的应力分布情况亦会发生改变,形成不同的变形破坏方式。基于30 m分辨率的DEM数据,利用栅格计算器提取地表粗糙度,其分布在 $1.0000\sim 5.4356$,按照自然间断法划分为5级,分布结果见图4,统计结果见图5。

(3) 地形起伏度

地形起伏度是指在一定面积范围(3×3)内最高低点海拔高度的差值,也是反映区域地形特征的宏观指标。基于30 m分辨率的DEM数据,利用栅格计算器提取地形起伏度,其分布在 $0\sim 1067$,按照自然间断法划分为5级,分布结果见图4,统计结果见图5。

(4) 地形湿度指数

地形湿度指数是对潜在土壤含水量和径流产生潜在能力的量化,能够准确反映地形的地势变化及其对地表径流的影响。基于30 m分辨率的DEM数据提取地形湿度指数。区内地形湿度指数分布在 $-1.5471\sim 21.1213$,按照自然间断法划分为5级,分布结果见图4,统计结果见图5。

(5) 汇流动力指数

汇流动力指数是描述水流侵蚀地表能力的指标,反映坡面侵蚀力和径流强度。基于30 m分辨率的DEM数据提取汇流动力指数。区内汇流动力指数分布在 $-4.6052\sim 16.8514$,按照自然间断法划分为5级,分布结果见图4,统计结果见图5。

(6) 超额地形

超额地形是用来计算地形表面 z 和理想地形 z' 之间的岩石高度。 Z_e 越大,表示发生潜在失稳的概率越大,潜在物源越多(Blothe et al., 2015; Lyu et al., 2022)。基于30 m分辨率的

DEM 数据提取超额地形。区内超额地形分布在 0~1266.87，按照自然间断法划分为 5 级，分布结果见图 4，统计结果见图 5。

(7) 地震核密度

地震通过增加崩滑物源从而改变泥石流的形成条件。因此，可通过分析研究区多年地震历史来反映泥石流形成物源条件的分布差异。基于 GIS 的密度分析功能对历史地震数据进行核密度分析，通过地震点位的密集程度反应其空间分布的差异，区内的地震核密度分布在 0~0.011405632，按照自然间断法划分为 5 级，分布结果见图 4，统计结果见图 5。

(8) 工程地质岩组

岩土体的性质是影响泥石流发育的重要因素，尤其易滑的软弱土层更容易为泥石流形成提供物质基础。本文基于 1:25 万的地质图获取区内岩性分布，根据《工程岩体分级标准》（GB/T 502018-2014）以及岩土体的物理力学性质和结构类型等，量化岩性指标分类。区内工程地质岩组可分为十类：坚硬的基性岩组-以辉长岩-玄武岩类为主；坚硬的酸性岩岩组-以花岗岩-流纹岩类为主；坚硬的中性岩岩组-以闪长岩、正长岩为主；较坚硬的混杂岩；较坚硬的变质岩组-以大理岩、变砂岩、板岩为主；较坚硬的碳酸盐岩组-以灰岩、白云岩为主；软硬相间的碎屑岩组-以砾岩、砂岩、泥质岩为主；较软的变质岩组-以片岩、千枚岩、麻粒岩为主；较软的火山碎屑岩组-以火山角砾岩、凝灰岩为主；第四系松散堆积物-以阶地砾石、砂土、粘土层，冰川、湖河沉积等为主。空间分布见图 4，各岩组分级统计结果见图 5。

(9) 夏季（7、8、9 月）多年月平均降雨量

降雨形成的坡面径流会冲刷表层不稳定土体，加速坡体侵蚀过程。由于泥石流在夏季多发，因此本研究利用夏季（7、8、9 月）多年月平均降雨量来量化水源指标。基于区内 1901~2020 年月度降水数据，利用 GIS 的空间分析技术提取 7、8、9 月多年平均降雨量，区内夏季月平均降雨量分布在 89.8~205.4 mm，将其分为五级：<120 mm，120~140 mm，140~160 mm，160~180 mm，>180 mm，空间分布见图 4，统计结果见图 5。

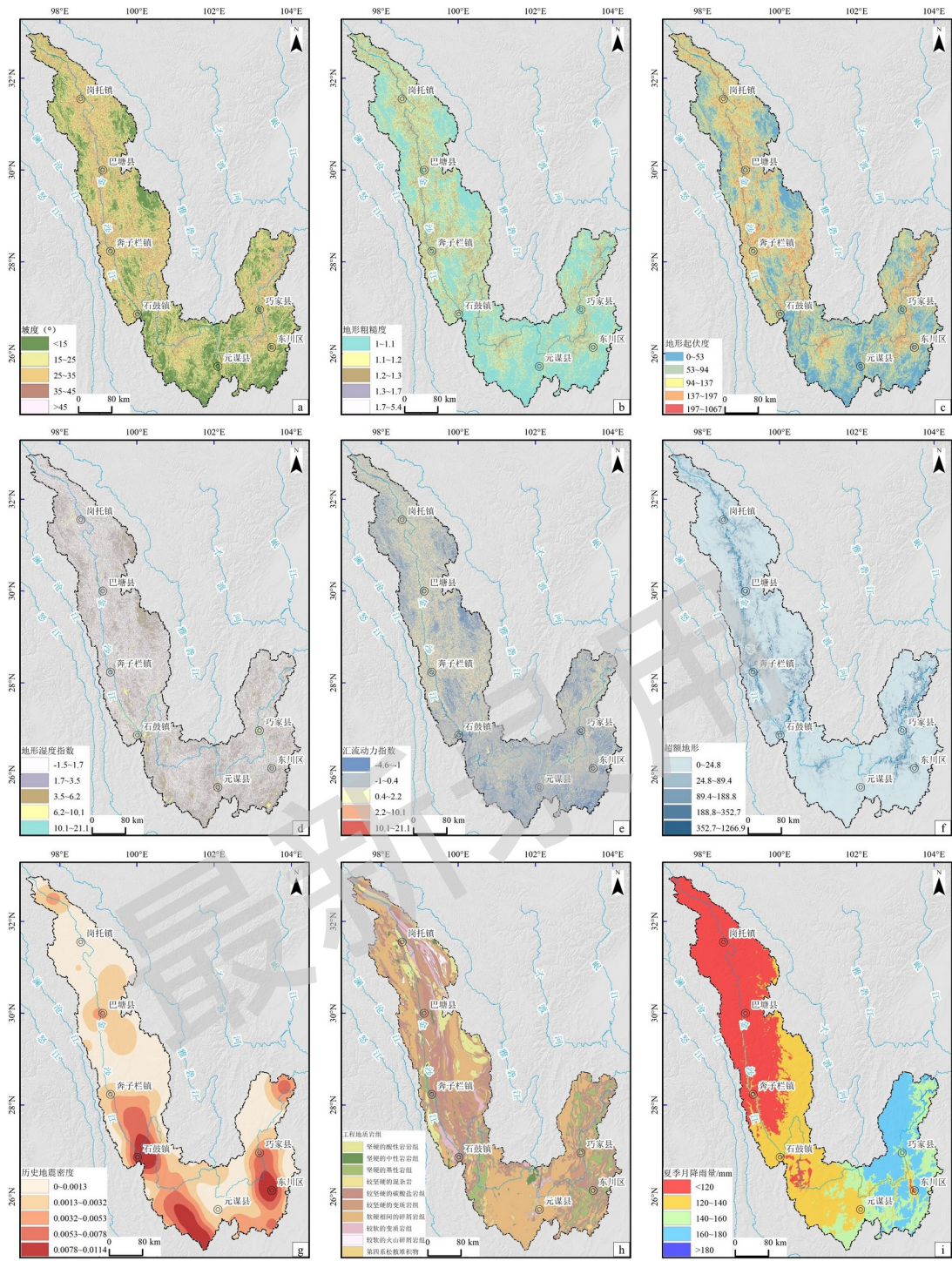


图 4 金沙江流域泥石流危险性评价指标分布
 Fig.4 Distribution of debris flow hazard assessment indicators in Jinsha River

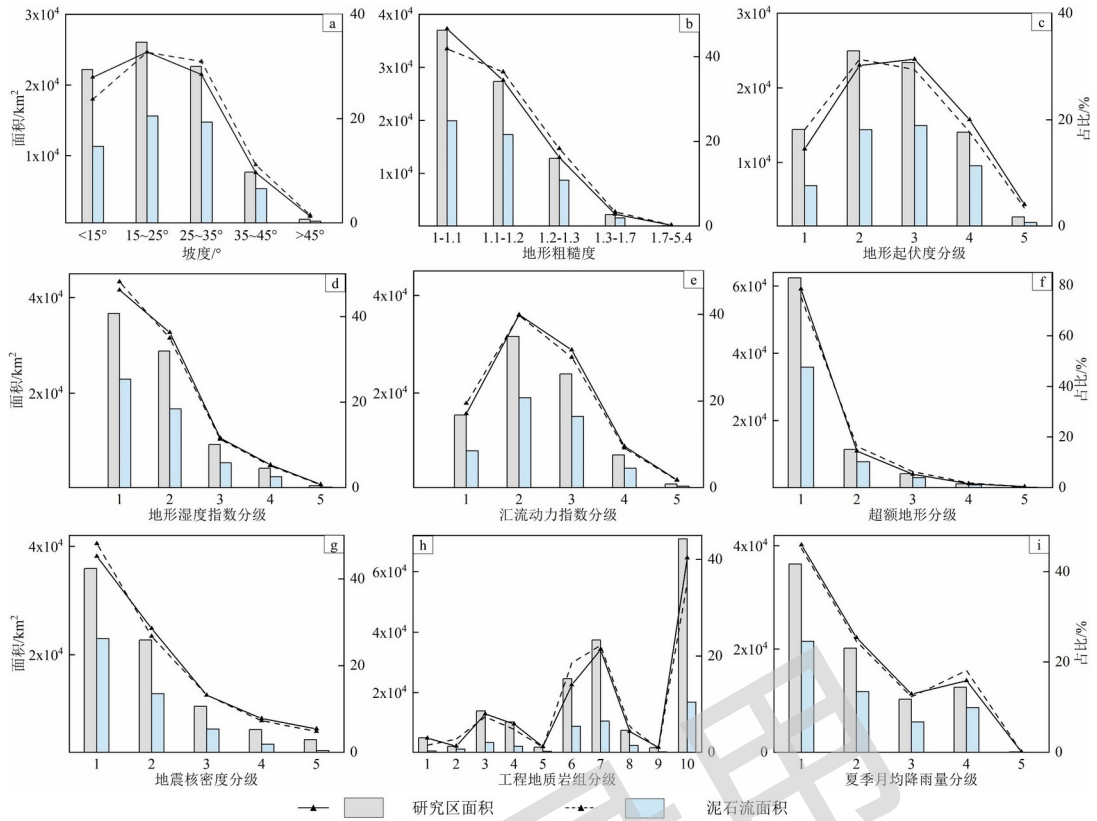


图 5 金沙江流域泥石流指标分级统计图 (c 地形起伏度分级-1: 0~53, 2: 53~94, 3: 94~137, 4: 137~197, 5: 197~1067; d 地形湿度指数分级-1: -1.5~1.7, 2: 1.7~3.5, 3: 3.5~6.2, 4: 6.2~10.1, 5: 10.1~21.1; e 汇流动力指数分级-1: -4.6~-1, 2: -1~0.4, 3: 0.4~2.2, 4: 2.2~5.1, 5: 5.1~16.8; f 超额地形分级-1: 0~24.8, 2: 24.8~89.4, 3: 89.4~188.8, 4: 188.8~352.7, 5: 352.7~1266.9; g 地震核密度分级-1: 0~0.0013, 2: 0.0013~0.0032, 3: 0.0032~0.0053, 4: 0.0053~0.0078, 5: 0.0078~0.0114; h 工程地质岩组分级-1: 第四系松散堆积物, 2: 较坚硬的混杂岩, 3: 坚硬的基性岩组, 坚硬的酸性岩组, 5: 坚硬的中性岩组, 6: 较坚硬的变质岩组, 7: 较坚硬的碳酸盐岩组, 8: 较软的变质岩组, 9: 较软的火山碎屑岩组, 10: 软硬相间的碎屑岩组; i 夏季月均降雨量分级-1: <120 mm, 2: 120~140 mm, 3: 140~160 mm, 4: 160~180 mm, 5: 180~200 mm)

Fig. 5 Statistical diagram of debris flow index classification in Jinsha River

为保证评价因子之间的相互独立和准确性，需要对指标相关性进行检验。采用 AcrGIS 对指标层进行栅格数据预处理，保证其范围和分辨率一致，随机选取均匀分布的点位进行皮尔逊相关性分析，分析结果见图 6。

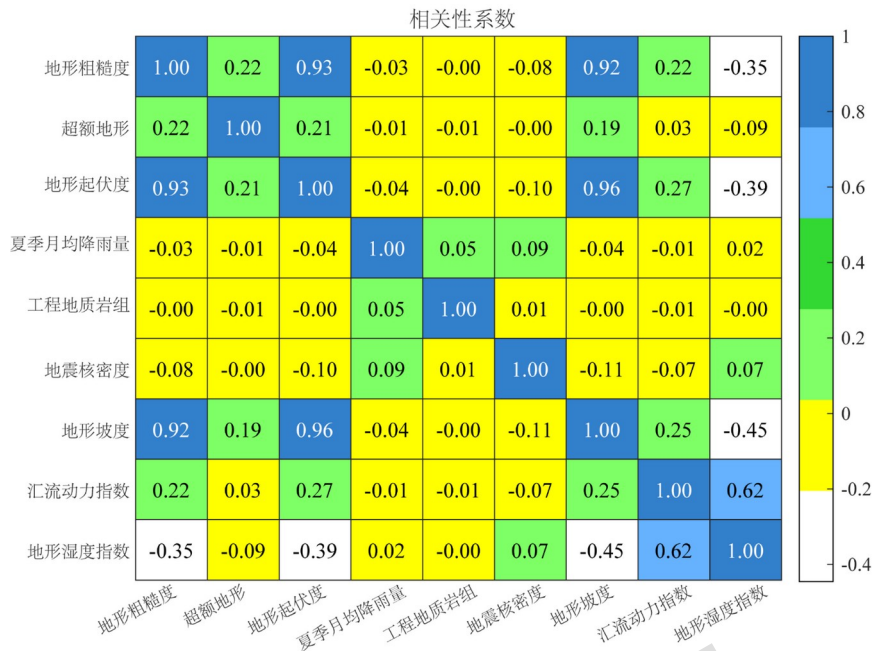


图 6 金沙江流域泥石流危险性评价指标相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of debris flow hazard assessment indicators in Jinsha River

由图 6 可知，表征地形条件的地形坡度和地形粗糙度（0.92）、地形坡度和地形起伏度（0.96）、地形起伏度和地形粗糙度（0.93）、汇流动力指数和地形湿度指数（0.62）相似性较高，为保证评价指标的独立性和低冗余度，在本次评价中剔除地形起伏度、地形粗糙度、汇流动力指数，利用地形坡度、地形湿度指数；超额地形、地震核密度、工程地质岩组、夏季（7、8、9 月）月均降雨量建立金沙江流域泥石流危险性评价指标体系。

4.2 评价结果

本次评价区域面积约 175709 km²（4548 个集水区），发育泥石流流域 2551 个，非泥石流流域 1997 个，随机选取 70% 的样本作为训练集，30% 的流域作为测试集。根据 DEM 的精度，本研究采用 30×30 m 的栅格评价单元。本文将泥石流活动频率和流体性质结合划分五类泥石流：高频粘性、高频其他类型（过渡性和稀性）、中频、低频稀性、低频其他类型（粘性和过渡性）。首先基于 ArcGIS 对评价指标的栅格数据进行预处理，获取不同类型泥石流与各指标的面积参数值，带入证据权法的相关公式（式 1-式 10）进行计算；并采用层次分析法对五类泥石流的计算结果进行赋权，构建的判断矩阵如表 1。计算结果 CR=0.04<0.1，满足一致性检验。五类泥石流的计算结果的赋权如表 2：

表 1 不同类型泥石流判断矩阵

Tab.1 Judgment matrix of different types of debris flow

类型	高频粘性	高频其他	中频	低频其他	低频稀性
高频粘性	1	1/2	1/3	1/4	1/5
高频其他	2	1	1/2	1/3	1/4
中频	3	2	1	1/2	1/3
低频其他	4	3	2	1	1/2
低频稀性	5	4	3	2	1

表 2 不同类型泥石流赋权

Tab.2 Weighting of different types of debris flow

类型	高频粘性	高频其他	中频	低频其他	低频稀性
权重	0.4147	0.2617	0.1592	0.1112	0.0532

综上，本研究综合证据权法和层次分析法，考虑不同类型泥石流活动性，获得指标权重的计算结果汇总如表 3：

表 3 金沙江流域危险性评价指标权重计算结果

Tab.3 Calculation results of hazard assessment index weight in Jinsha River

指标类型	指标分级	W ⁺	W ⁻
坡度	<15	-0.2584	0.1111

	15~25	0.0267	-0.0127
(°)	25~35	0.1361	-0.0498
	35~45	0.2931	-0.0314
	>45	0.2957	-0.0041
	-1.5~1.7	0.0906	-0.0732
地形湿度指数	1.7~3.5	-0.0492	0.0276
	3.5~6.2	-0.0589	0.0081
	6.2~10.1	-0.1495	0.0092
	10.1~21.1	-0.7136	0.0070
	0~24.8	-0.0763	0.2835
超额地形	24.8~89.4	0.2293	-0.0361
	89.4~188.8	0.3742	-0.0221
	188.8~352.7	0.3962	-0.0074
	352.7~1266.9	0.2313	-0.0008
	0~0.001297111	0.0293	-0.0294
地震核密度	0.001297111~0.003175686	-0.3275	0.0805
	0.003175686~0.005322628	0.0358	-0.0164
	0.005322628~0.007782666	0.1065	-0.0173
	0.007782666~0.011405632	0.1712	-0.0238
	第四系松散堆积物-以阶地砾石、砂土、粘土层, 冰川、湖河沉积等为主	-0.1340	0.0073
	较坚硬的混杂岩	-0.4497	0.0006
	坚硬的基性岩组-以辉长岩-玄武岩类为主	0.0775	-0.0092
	坚硬的酸性岩组-以花岗岩-流纹岩类为主	-0.7802	0.0299
工程地质岩组	坚硬的中性岩组-以闪长岩、正长岩为主	-1.5029	0.0066
	较坚硬的变质岩组-以大理岩、变砂岩、板岩为主	0.1633	-0.0318
	较坚硬的碳酸盐岩组-以厚层至块状灰岩、白云岩为主	0.0303	-0.0124
	较软的变质岩组-以片岩、千枚岩、麻粒岩为主	0.2320	-0.0129
	较软的火山碎屑岩组-以火山角砾岩、凝灰岩为主	-0.1125	0.0026
	软硬相间的碎屑岩组-以砾岩、砂岩、粉砂岩、泥质岩为主	-0.0693	0.0433
	<120	-0.6345	0.1710
夏季平均降雨量 (mm)	120~140	0.0247	-0.0084
	140~160	0.2603	-0.0747
	160~180	0.3329	-0.0943
	180~200	-1.8302	0.0005

利用 ArcGIS 栅格计算获得指标证据层的后验概率即为研究区泥石流危险度, 范围是 0.0068~0.5030。分析发现后验概率的数值较离散, 适宜采用自然断点法对研究区危险度进行区划(丁册册, 2018)。将其划分为五个等级: 低危险区、较低危险区、中危险区、较高危险区、高危险区, 区划图见图 7, 统计结果见表 4。低危险区主要分布在金沙江上游奔子栏以上, 约 40670.51 km², 占比 23%; 其内部发育泥石流 10829.46 km², 占比 23%。较低危险区分布在低危险区周边, 较分散; 约 46269.74 km², 占比 26%; 发育泥石流 11464.50 km², 占比 24%。上游段夏季多年平均降雨量最少, 水动力条件相对较差, 且流域内植被覆盖高, 集中物源较少, 主要发育低频泥石流和稀性泥石流, 泥石流不活跃。中危险区全流域均有分布, 较分散, 中下游稍多。总面积约 46013.32 km², 占比 26%; 发育泥石流 11098.34 km², 占比 23%。较高危险区主要分布在流域下游支流, 约 31226.54 km², 占比 18%; 发育泥石流 9430.22 km², 占比 20%。高危险区约 11528.89 km², 占比 7%, 共发育泥石流 4849.47 km², 占比 10%, 集中分布在金沙江中下游。在攀枝花至巧家段, 分布有磨盘山-绿汁江、安宁河断裂、小江断裂等断裂(图 7), 第四纪以来活动性较强, 岩体破碎, 崩滑灾害发育, 松散物源极为丰富, 下游相对降雨量较上游更多, 主要发育高频泥石流和粘性泥石流, 泥石流可能暴发的规模大、频率高, 危险性高。

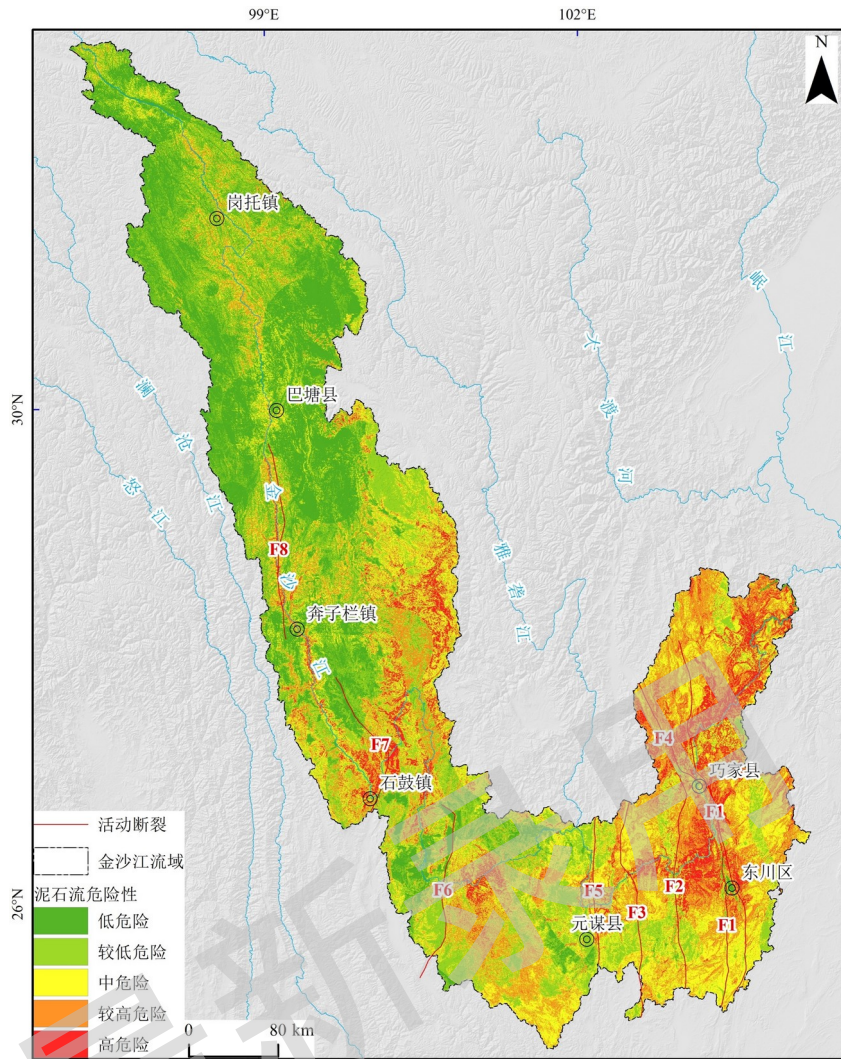


图 7 金沙江流域泥石流危险性评价区划图

Fig. 7 Debris flow hazard assessment zoning map of Jinsha River

F1-小江断裂; F2-普渡河断裂; F3-安宁河断裂; F4-则木河断裂; F5-磨盘山-绿汁江断裂; F6-程海断裂; F7-龙蟠-乔后断裂; F8-雄松-苏哇龙断裂

表 4 金沙江流域泥石流危险性评价结果统计

Tab.4 Statistics of debris flow hazard assessment results in Jinsha River

危险区划	研究区面积 (km ²)	占比 (%)	泥石流面积 (km ²)	占比 (%)
低危险区	46013.32	26.19	11098.34	23.28
较低危险区	46269.74	26.33	11464.50	24.05
中危险区	40670.51	23.15	10829.46	22.72
较高危险区	31226.54	17.77	9430.22	19.78
高危险区	11528.89	6.56	4849.47	10.17

4.3 验证与分析

本文选择在模型验证和性能评估方面广泛应用的受试者工作特征曲线 (Receiver Operating Characteristic Curve, ROC) 检验评价效果 (Fawcett, 2006)。ROC 曲线是通过改变连续变量的阈值以获得敏感度 (真阳性率) 为纵坐标, 特异性 (假阳性率) 为横坐标的曲线。为直观反映模型方法的优劣, 采用 AUC 值即 ROC 曲线与坐标轴围成的面积表达, 其取值范围在 0~1 之间, 越接近 1, 模型方法的真实性越高。基于 ArcGIS 提取剩余 30% 测试集样本的属性值 (危险值) 至点, 导出属性值至 EXCEL, 其中泥石流流域标记为 “1”, 非泥石流流域标记为 “0”, 最终将属性表导入 Origin 软件进行 ROC 曲线分析, 获得 ROC 曲线结果如图 8 所示。AUC 值为 0.796, 表明本文评价结果具有较高的精度, 能够较好的预测研究区泥石流灾害的危险性。

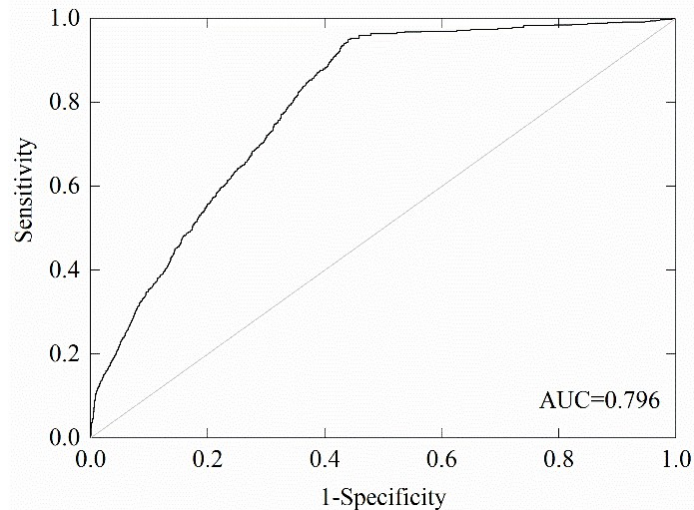


图 8 金沙江流域泥石流危险性评价 ROC 检验结果

Fig.8 ROC test results of debris flow hazard assessment in Jinsha River

Moran's I 指数可以反映地理空间上邻近单元属性值的相似程度，根据要素位置和要素值来度量空间自相关性，进而获得聚类程度，是量化空间相关性的一个重要指标。首先计算研究区危险性值的全局莫兰指数 (Global Moran's I)， I 为 $0.93 > 0$ ， z 值为 83， p 值为 $0 < 0.01$ ，全局莫兰指数显著，我们认为研究区泥石流危险度存在空间相关性，危险性值出现了聚集，可以进一步做局部莫兰指数 (Local Moran's I) 和热点分析，结果如图 9 所示。聚类分析结果显示研究区泥石流危险性趋于两极化，在上游巴塘附近危险性为低值聚集，以低频泥石流为主；而下游东川-巧家段危险性存在高值聚集，高频泥石流集中，表明该段属研究区内泥石流致灾性最严重，值得关注。

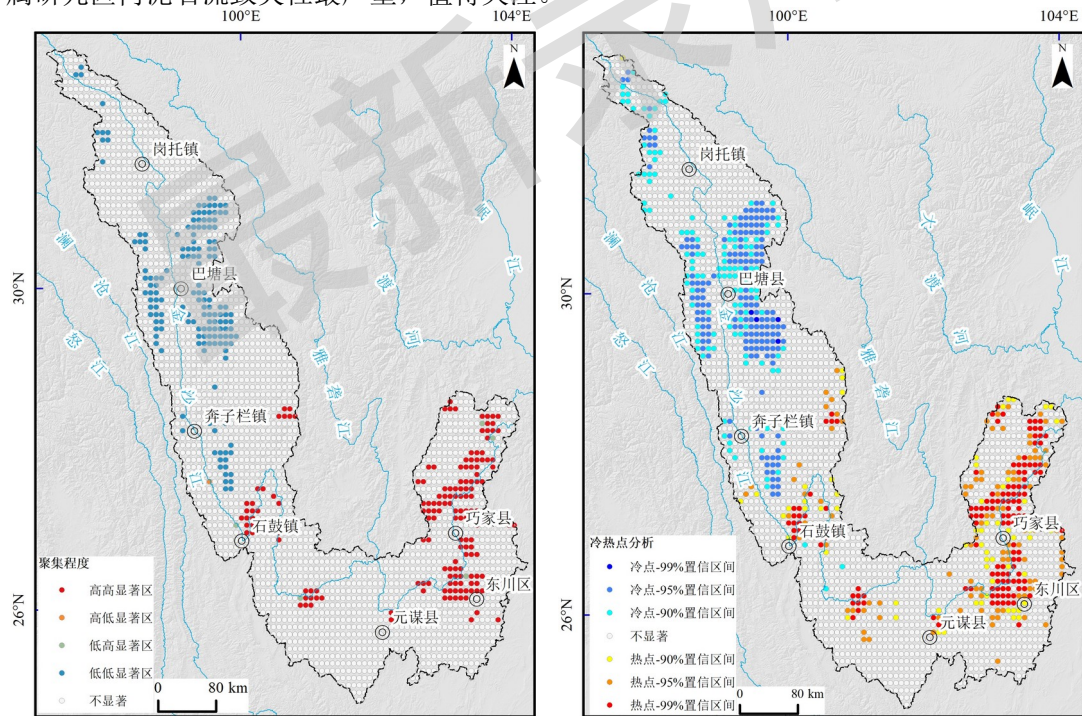


图 9 金沙江流域泥石流危险性评价结果聚类分析

Fig.9 Cluster analysis of debris flow hazard assessment results in Jinsha River

5 结论

本文结合遥感解译和野外调查，建立了金沙江流域干流及主要支流泥石流灾害数据集，基于泥石流活动特征，从泥石流形成条件出发，利用地形坡度、地形湿度指数（地形条件）；超额地形、地震核密度、工程地质岩组（物源条件）；夏季（7、8、9月）月均降

雨量（水源条件）等6个指标建立金沙江流域泥石流危险性评价指标体系；结合层次分析法-证据权法耦合模型对研究区泥石流灾害进行危险性评价，采用ROC曲线对结果进行验证，并通过莫兰指数（Moran's I）和热点分析（Getis-Ord G_i^* ）聚类分析危险性值，得出以下结论：

金沙江流域干流及主要支流发育泥石流流域2551条，总体上，流域上游泥石流不活跃，以低频为主，高频泥石流主要分布在下游段，尤以涛源镇至巧家段集中发育；粘性泥石流主要分布在永胜-宾川、红格-元谋、巧家-东川段，与活跃断层高度重合，物源丰富，基本受活跃断层控制。影响泥石流分布的各因素中，最有利于泥石流灾害形成的范围是：坡度在15~35°之间，地震分布最密集，软硬相间的碎屑岩组中。

综合层次分析-证据权模型的泥石流危险性评价结果表明，金沙江流域泥石流低危险区主要分布在奔子栏以上的上游段，约40670.51 km²，占比23%；高危险区集中在攀枝花至巧家的下游段，约11528.89 km²，占比7%。全局和局部莫兰指数分析反映危险性区划结果存在聚集性，基于此的热点分析表明东川-巧家段为泥石流高危险区，致灾性最严重，需引起高度重视。

本文以金沙江水系完整边界为评价范围，泥石流灾害样本数量足够，并将泥石流活动特征考虑到危险性评价中，反映了灾害事实。区划结果可以为金沙江流域水电工程和交通线路的规划、建设、运营中泥石流灾害排查与防治提供参考依据。

参考文献

- Agterberg F A. Modified Weights-of-Evidence Method for Regional Mineral Resource Estimation[J]. *Natural Resources Research*, 2011, 20(2), 95-101.
- Akbar T A, Ha S R. Landslide hazard zoning along Himalayan Kaghan Valley of Pakistan-by integration of GPS, GIS, and remote sensing technology[J]. *Landslides*, 2011, 8(4), 527-540.
- Bao Y, Zhai S, Chen J, et al. The evolution of the Samaoding paleo-landslide river blocking event at the upstream reaches of the Jinsha River, Tibetan Plateau[J]. *Geomorphology*, 2020, 351, 106970.
- Berenguer M, Sempere-Torres D, Hürlimann M. Debris-flow hazard assessment at regional scale by combining susceptibility mapping and radar rainfall[J]. *Nat. Hazards Earth Syst*, 2014, 2(10), 6295-6338.
- Bi X, Fan Q, He L, et al. Analysis and Evaluation of Extreme Rainfall Trends and Geological Hazards Risk in the Lower Jinshajiang River[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(6), 4021.
- Blothe J H, Korup O, Schwanghart W. Large landslides lie low: Excess topography in the Himalaya-Karakoram ranges[J]. *Geology*, 2015, 43(6), 523-526.
- Bojer A K, Ahmed M E, Bekalo D J, et al. Analysis of land use/land cover change (LULCC) and debris flow risks in Adama district, Ethiopia, aided by numerical simulation and deep learning-based remote sensing[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2023.
- Bregoli F, Medina V, Chevalier G. et al. Debris-flow susceptibility assessment at regional scale: Validation on an alpine environment[J]. *Landslides*, 2015, 12(3), 437-454.
- Cabral V, Reis F, Veloso V, et al. A multi-step hazard assessment for debris-flow prone areas influenced by hydroclimatic events[J]. *Engineering Geology*, 2023, 313, 106961.
- Chang M, Tang C, Van Asch T W J, et al. Hazard assessment of debris flows in the Wenchuan earthquake-stricken area, South West China[J]. *Landslides*, 2017, 14(5), 1783-1792.
- Chen C, Tseng C, Dong J. New entropy-based method for variables selection and its application to the debris-flow hazard assessment[J]. *Engineering Geology*, 2007, 94(1-2), 19-26.
- Chen X, Chen H, You Y, et al. Weights-of-evidence method based on GIS for assessing susceptibility to debris flows in Kangding County, Sichuan Province, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(1), 70.
- Esper Angillieri, M Y. Debris flow susceptibility mapping using frequency ratio and seed cells, in a portion of a mountain international route, Dry Central Andes of Argentina[J]. *CATENA*, 2020, 189, 104504.
- Fawcett T. An introduction to ROC analysis[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(8), 861-874.
- Hu G, Tian S, Chen N, et al. An effectiveness evaluation method for debris flow control engineering for cascading hydropower stations along the Jinsha River, China[J]. *Engineering Geology*, 2020, 266, 105472.
- Kuo Y, Yang T, Huang G. The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2008, 55(1), 80-93.
- Li Y, Su L, Zou Q, et al. Risk assessment of glacial debris flow on alpine highway under climate change: A case study of Aierkuran Gully along Karakoram Highway[J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(6), 1458-1475.
- Li Y, Chen J, Zhang Y, et al. Debris Flow Susceptibility Assessment and Runout Prediction: A Case Study in Shiyang Gully, Beijing, China[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2020, 14(3), 365-383.
- Li Y, Chen J, Zhou F, et al. Identification of ancient river-blocking events and analysis of the mechanisms for the formation of landslide dams in the Suwalong section of the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau[J]. *Geomorphology*, 2020, 368, 107351.
- Liu Z, Xu L, Jiang H. Study on the review of the risk assessment of debris flow, 2nd International Workshop on Renewable Energy and Development (IWRED)[J]. *IOP Conference Series-Earth and Environmental Science*, 2018.

- Lyu L, Xu M, Wang Z, et al. A field investigation on debris flows in the incised Tongde sedimentary basin on the northeastern edge of the Tibetan Plateau[J]. CATENA, 2022, 208, 105727.
- Morel M, Piton G, Kuss D, et al. Statistical modeling of sediment supply in torrent catchments of the northern French Alps[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2023, 23(5), 1769-1787.
- Pan G, Wang L, Li R, et al. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 53, 3-14.
- Peng S, Ding D, Liu W, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11, 1931-1946.
- Saaty T. Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process[J]. Springer Netherlands, 1990.
- Wang N, Pu K. Grey Relational Analysis of Geological Hazards and Urbanization Construction in China[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 381(1), 012012.
- Xue X, Zheng L. GIS-information method based risk evaluation for debris flow in Chencang District, International Conference on Advances in Energy and Environmental Science[J]. Advanced Materials Research, 2013, 1928-1933.
- Yin C, Zhang J. Hazard regionalization of debris-flow disasters along highways in China[J]. Natural Hazards, 2018, 91(S1), 129-147
- 曹鹏, 黎应书, 李宗亮, 等. 西藏昌都白格滑坡斜坡地质结构特征及成因机制[J]. 地球科学, 2021, 46(9), 3397-3409.
- 陈剑, 黎艳, 许冲. 金沙江干热河谷区泥石流易发性评价模型及应用[J]. 山地学报, 2016, 34(04), 460-467.
- 丁朋朋. 重大线性工程滑坡灾害风险分析-以川藏铁路为例[D]. 中国科学院大学, 2018.
- 骆银辉. 三江并流区地质环境问题研究[D]. 中国地质大学(北京), 2009.
- 骆银辉, 徐世光, 吴香根. 云南“三江”并流区地质灾害发育机制及其防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 04, 1-6.
- 刘小莎, 董秀军, 钱济人, 等. 高植被山区泥石流物源 LiDAR 遥感精细识别方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 1-16.
- 刘星洪, 姚鑫, 於开炳, 等. 川藏高速巴塘-芒康段地质灾害遥感综合早期识别研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(06), 49-60.
- 明庆忠. 纵向岭谷北部三江并流区河谷地貌发育及其环境效应研究[D]. 兰州大学, 2006.
- 明庆忠, 潘玉君. 对云南高原环境演化研究的重要性及环境演变的初步认知[J]. 地质力学学报, 2002, 8(4), 361-368.
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等. 西南三江金沙江弧盆系时空结构及构造演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41(02), 246-264.
- 吴赛儿, 陈剑, Wendy Z, 等. 基于逻辑回归模型的泥石流易发性评价与检验:以金沙江上游奔子栏-昌波河段为例[J]. 现代地质, 2018, 32(03), 611-622.
- 向灵芝, 李泳, 陈洪凯, 等. 基于流域演化的泥石流敏感性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11), 1984-1992.
- 曾超, 曹振宇, 苏凤环, 等. 四川及周边滑坡泥石流灾害高精度航空影像及解译数据集(2008-2020年)[J]. 中国科学数据, 2022, 7(02), 195-205.
- 张晨, 王清, 陈剑平, 等. 金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J]. 岩土力学, 2011, 32(03), 831-836.
- 张静, 田述军, 侯鹏鹏. 基于面积-高程和面积-坡度积分的泥石流物质供给能力分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(04), 9-16.
- 张彦锋, 高杨, 李滨, 等. 青藏高原混杂岩带及其地质灾害发育特征分析[J]. 工程地质学报, 2023, 31(03), 981-998.