

# 四川省地形起伏度与斜坡地质灾害空间分布关系研究

李强<sup>1,2,3</sup>, 伍剑波<sup>1,2,3\*</sup>, 孙东<sup>1,2,3</sup>, 杨涛<sup>1,2,3</sup>, 罗小惠<sup>1,2,3</sup>

(1. 四川省地质环境调查研究中心, 四川成都 610081; 2. 四川省华地建设工程有限责任公司, 四川成都 610081;  
3. 四川省地质灾害防治工程技术研究中心, 四川成都 610081)

**摘要:**地形起伏度与斜坡地质灾害的空间分布密切相关,但同时考虑地形起伏度最佳统计单元、灾害类型、灾害规模的研究偏少。以地貌单元跨度巨大的四川省为例,运用均值变点分析法确定地形起伏度最佳统计单元,采用频率比法、信息量法、确定性系数法等3种数据统计模型,研究地形起伏度对斜坡地质灾害空间分布的影响。研究表明:平均地形起伏度与统计窗口大小存在显著正相关关系,最佳统计单元的窗口数量为 $20\times 20$ 、面积大小为 $3.24\times 10^6\text{ m}^2$ ;斜坡地质灾害主要分布于丘陵和小起伏度山地,数量总占比为68.9%,其中滑坡易发优势区间为50~350 m,崩塌易发优势区间为50~200 m;小起伏区域利于发育小型灾害,大起伏度区域更利于发育中型和大型灾害。

**关键词:**崩塌;滑坡;地形起伏度;最佳统计单元;空间分布;四川省

**中图分类号:**P642.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)04-0125-10

## Study on the relationship between the topographic relief amplitude and the spatial distribution of slope geological hazards in Sichuan Province

LI Qiang<sup>1,2,3</sup>, WU Jianbo<sup>1,2,3\*</sup>, SUN Dong<sup>1,2,3</sup>, YANG Tao<sup>1,2,3</sup>, LUO Xiaohui<sup>1,2,3</sup>

(1. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu Sichuan 610081, China;

2. Sichuan Huadi Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610081, China;

3. Sichuan Province Engineering Technology Research Center of Geohazard Prevention, Chengdu Sichuan 610081, China)

**Abstract:** The degree of topographic relief is closely related to the spatial distribution of slope geohazards, however, there are few studies that consider the optimal statistical unit, the types of geohazards and the scale of geohazards at the same time. In this paper, the Sichuan Province which has a huge span of geomorphologic units is taken as an example, the mean change-point analysis information method was applied to determine the optimal statistical unit, and the data statistical models, such as the frequency ratio model (FR), the information value model (IV), and the certainty factor method (CF) were used to study the impact of topographic relief on the spatial distribution of slope geohazards. The results showed that there was a significant positive correlation between the average topographic relief and the size of the statistical window. The window size of the optimal statistical unit is  $20\times 20$ , covering an area of  $3.24\times 10^6\text{ m}^2$ . The slope geological hazards were mainly distributed in the hills and small undulating mountains, which accounts for 68.9% of the total number. Among them, the susceptible range for landslides was 50~350 m, and for collapses was 50~200 m. The small undulating areas were more favorable for the development of small-scale geohazards, while the large

收稿日期:2024-03-07; 修回日期:2024-04-15 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.04.016

基金项目:四川省地质调查研究院科技创新项目“西南复杂山区斜坡地质灾害风险智能评估及自适应评价系统研发”(编号:SCIGS-CZDXM-2024008)

第一作者:李强,男,汉族,1980年生,高级工程师,地质工程专业,主要从事地质灾害防治技术研究工作,四川省成都市一环路北二段3号,53507997@qq.com。

通信作者:伍剑波,男,汉族,1987年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,主要从事地质灾害成灾机理、评价研究工作,四川省成都市一环路北二段3号,jianbo.wu@hotmail.com。

引用格式:李强,伍剑波,孙东,等.四川省地形起伏度与斜坡地质灾害空间分布关系研究[J].钻探工程,2024,51(4):125-134.

LI Qiang, WU Jianbo, SUN Dong, et al. Study on the relationship between the topographic relief amplitude and the spatial distribution of slope geological hazards in Sichuan Province[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 125-134.

undulating areas were more favorable for the development of medium and large-scale geohazards.

**Key words:** collapse; landslide; topographic relief amplitude; optimal statistical unit; spatial distribution; Sichuan Province

## 0 引言

崩塌、滑坡是我国山区斜坡地质灾害的两种主要类型,可导致重大人员伤亡和财产损失<sup>[1]</sup>。斜坡地质灾害发育分布与地形地貌条件密切相关,尤其地形复杂山区地形作为重要的地质环境因子,直接影响斜坡表层的物质流动与能量转化<sup>[2]</sup>,深刻影响着区域斜坡物质结构、空间格局,从而控制了崩塌、滑坡的空间分布。

地形起伏度作为反映区域地形高差变化<sup>[3]</sup>、地表切割程度<sup>[4]</sup>和地貌特征的重要指标<sup>[5]</sup>,已被学者广泛应用于地质灾害的规律认识和评价研究,主要体现在孕灾条件分析<sup>[6-12]</sup>、敏感性分析<sup>[13-17]</sup>、易发性评价<sup>[18-20]</sup>等三个方面。苗朝等<sup>[6]</sup>、艾国栋等<sup>[7]</sup>、李乾坤等<sup>[8]</sup>、聂智强等<sup>[9]</sup>、徐志文<sup>[11]</sup>等学者考虑了地形起伏度对地质灾害孕灾条件和成灾机制进行研究;郭芳芳等<sup>[13]</sup>分析了鄂尔多斯及其周缘地区地形起伏度与滑坡灾害发育分布的相关性;宿星等<sup>[14]</sup>研究了黄土地区地形起伏度对滑坡的影响;张明媚等<sup>[16]</sup>以太原市西山地质块体为研究区,分析了斜坡地质灾害敏感性评价中地势起伏度提取最佳尺度。而在易发性评价领域,如黄发明等<sup>[18]</sup>、叶振南等<sup>[19]</sup>、田乃满等<sup>[20]</sup>大量学者把地形起伏度作为区域地质灾害易发性评价的主要指标之一,并以此分析地质灾害发育分布与地形的关系。

地形起伏度是一定统计单元内的地形高差,其值会随着统计单元面积大小改变而改变,直接影响研究区域地形起伏度的提取精度<sup>[21]</sup>。因此,确定最佳统计单元大小是探讨起伏度与地质灾害相关性研究的重要前提<sup>[22]</sup>,并可提升区域地形特征分析的科学准确性。上述大部分研究仅将地形起伏度作为一个指标参与地质灾害评价,而对如何选取最佳统计单元的探讨较少。有鉴于此,本文以四川省为研究区,采用均值变点分析法<sup>[22-24]</sup>确定地形起伏度的最佳统计单元,基于频率比、信息量、确定性系数等3种统计模型,探讨地形起伏度对不同类型、不同规模斜坡地质灾害空间分布的影响,为区域易发性评价中地形起伏度的应用提供更合理的技术思路,具有重要的实际应用意义。

## 1 研究区概况

四川省位于中国西南部,地处长江上游,范围介于北纬 $26^{\circ}03'58''\sim 34^{\circ}19'13''$ ,东经 $97^{\circ}21'58''\sim 108^{\circ}31'58''$ 之间,面积约48.6万 $\text{km}^2$ ,辖21个市(州)、183个县(市、区)。四川省自西向东地跨青藏高原、横断山脉、四川盆地等三个大地貌单元,地势整体呈西北高东南低的态势,地形起伏非常之大,地貌以山地为主,山区面积占2/3以上<sup>[25]</sup>。川西主要为高原地貌和高山峡谷区,西南主要为次高山和中山峡谷区,川东为四川盆地和盆缘山地,川中四川盆地以平原、丘陵地貌为主,盆缘山地以中低山为主<sup>[26]</sup>。由于地形地貌类型的控制,导致研究区气候具有显著地域性差异、气候垂直变化大。四川盆地及东部周围山地属中亚热带湿润气候区。西南山地属亚热带半湿润气候区,其河谷地区受焚风影响形成典型的干热河谷气候,山地形成显著的立体气候。川西北高山高原高寒气候区,该区海拔高差大,气候立体变化明显。

四川省大地构造单元格局以龙门山—盐源一线为界,西为松潘—甘孜地槽褶皱系,西南为三江褶皱系,北为秦岭褶皱系,东为相对稳定的扬子准地台区<sup>[11]</sup>。研究区活动断裂发育,地质构造运动活跃,影响最大的断裂为龙门山断裂、鲜水河断裂和安宁河断裂,形成四川著名的“Y”字型构造<sup>[26]</sup>(图1)。四川省内地层岩性差异明显,东部地台区以红层陆相碎屑岩沉积岩类为主,西部地槽区以海相碎屑岩沉积为主,间夹碳酸盐岩和火山岩、凝灰岩等<sup>[27]</sup>。

## 2 地形起伏度的最佳统计单元计算

### 2.1 数据来源与处理

本研究采用的DEM数据为SRTMDEM 90M,栅格单元大小为 $90\text{ m}\times 90\text{ m}$ ,来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>)。通过ArcGIS进行拼接投影等前期处理,并将原始数据坐标系调整为CGCS2000,高斯投影,6度带中央经线 $105^{\circ}$ ,利用最新的四川省行政区划矢量图对DEM数据进行裁剪,获得研究区相应的DEM数据。

研究区有记录以来的历史崩塌和滑坡地质灾

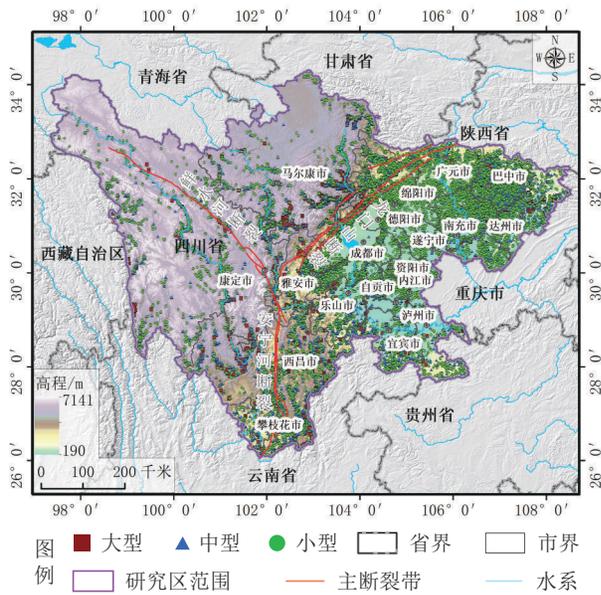


图1 研究区地理位置与斜坡地质灾害空间分布

Fig.1 Geographic location and the spatial distribution of slope geohazards in Sichuan Province

害数据来源于地勘单位、网络文献、野外调查和遥感解译等多种途径,通过对数据进行清洗剔除数据重复、坐标异常、信息缺失严重等无效点,最终得到有效数据共74844个,其中滑坡56093个、崩塌18751个。

2.2 计算原理:均值变点分析法

2.2.1 地形起伏度计算

地形起伏度(Relief Amplitude)是一定范围内最大高程与最小高程的差值,用于描述地貌形态、划分地貌类型的重要定量指标,其计算表达式如下<sup>[23]</sup>:

$$RA = H_{\max} - H_{\min} \quad (1)$$

式中:RA——地形起伏度,m; $H_{\max}$ 、 $H_{\min}$ ——分别为单位面积内最大、最小高程值,m。

地形起伏度采用ArcGIS软件的领域分析工具进行计算,鉴于DEM栅格为方形,本次计算采用矩形统计范围。单位窗格大小为DEM原始栅格大小90 m×90 m,依次对窗格数量为2×2、3×3、4×4、...55×55时的统计单元进行地形起伏度计算,建立起起伏度数据表。

2.2.2 均值变点分析法

地形起伏度与统计窗口面积大小呈logarithmic曲线形态特征,依据地形起伏度的定义和地貌发育理论,该曲线上必定存在唯一的一个由陡变缓的拐

点,该点对应的统计窗格值即为最佳统计单元<sup>[10]</sup>,而均值变点分析法能精准识别出该拐点。因此,本文采用均值变点分析法计算四川省地形起伏度的最佳统计单元,具体计算过程如下<sup>[14,22]</sup>:

(1)计算各窗格下单位地势度T:

$$T_i = \frac{t_i}{s_i} \quad (i = 2, 3, 4, \dots, 55) \quad (2)$$

式中: $T_i$ ——各分析窗格下的单位起伏度,m; $t_i$ ——各分析窗格的平均起伏度,m; $s_i$ ——各分析窗格的面积,m<sup>2</sup>; $i$ ——矩形邻域的窗格大小。

(2)对单位地势度T取对数lnT,得序列X, $X = \{X_i, i = 2, 3, 4, \dots, 55\}$ 。

(3)计算序列X的算数平均值 $\bar{X}$ 和离差平方和S:

$$\bar{X} = \sum_{i=2}^n \frac{X_i}{n-1} \quad (n = 55) \quad (3)$$

$$S = \sum_{i=2}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (n = 55) \quad (4)$$

(4)令*i*=2,3,4,...,55,依次对每个*i*将上述X<sub>i</sub>样本分为两段: $X_2, X_3, \dots, X_i$ 和 $X_{i+1}, X_{i+2}, \dots, X_{55}$ ,分别计算每段样本的算术平均值 $\bar{X}_{i1}$ 、 $\bar{X}_{i2}$ 及两段样本的离差平方和之和S<sub>i</sub>:

$$S_i = \sum_{t=1}^{i-1} (X_t - \bar{X}_{i1})^2 + \sum_{t=i}^n (X_t - \bar{X}_{i2})^2 \quad (n = 55) \quad (5)$$

(5)计算S与S<sub>i</sub>的差值ΔS:

$$\Delta S = S - S_i \quad (i = 2, 3, 4, \dots, 54) \quad (6)$$

2.3 最佳统计单元分析

按照前文均值变点分析法计算公式,各统计单元对应的参数如表1所示。表1显示平均地形起伏度与窗格大小存在明显的正相关,统计窗格数量越多平均地形起伏度越大,为此对统计单元面积大小和平均起伏度进行了拟合(图2)。指数方程与对数方程两种拟合方式显示,相关系数分别是0.9792和0.9696。从曲线形态可以明显看出,平均起伏度随着统计单元面积增长趋势由陡变缓,明显存在一个变化趋势转折拐点。均值变点分析法就是从统计学的角度定量判断出该拐点,根据分析原理其对应的窗格大小即为地形起伏度最佳统计单元。

通过对统计单元大小、离差平方和之和S<sub>i</sub>、差值ΔS进行分析,结果如表1和图3所示,S与S<sub>i</sub>的差值ΔS变化曲线形态呈抛物线:窗格数量2~20段,ΔS

表1 统计窗格数量与地形起伏度关系统计

Table 1 Topographic relief amplitude changing with statistical window number

窗格数量	平均地形起伏度/m	统计单元面积/m <sup>2</sup>	S <sub>i</sub> /m <sup>2</sup>	ΔS/m <sup>2</sup>	窗格数量	平均地形起伏度/m	统计单元面积/m <sup>2</sup>	S <sub>i</sub> /m <sup>2</sup>	ΔS/m <sup>2</sup>
2×2	41.57	3.24×10 <sup>4</sup>	50.17	1.18	29×29	606.35	6.81×10 <sup>6</sup>	15.85	35.50
3×3	80.90	7.29×10 <sup>4</sup>	44.43	6.92	30×30	618.34	7.29×10 <sup>6</sup>	16.60	34.75
4×4	117.30	1.30×10 <sup>5</sup>	39.15	12.20	31×31	630.35	7.78×10 <sup>6</sup>	17.40	33.95
5×5	150.98	2.03×10 <sup>5</sup>	34.59	16.76	32×32	641.15	8.29×10 <sup>6</sup>	18.25	33.09
6×6	182.29	2.92×10 <sup>5</sup>	30.68	20.67	33×33	653.11	8.82×10 <sup>6</sup>	19.15	32.20
7×7	211.62	3.97×10 <sup>5</sup>	27.34	24.01	34×34	663.89	9.36×10 <sup>6</sup>	20.09	31.25
8×8	239.04	5.18×10 <sup>5</sup>	24.49	26.86	35×35	674.44	9.92×10 <sup>6</sup>	21.07	30.27
9×9	265.01	6.56×10 <sup>5</sup>	22.06	29.28	36×36	683.91	1.05×10 <sup>7</sup>	22.09	29.26
10×10	289.56	8.10×10 <sup>5</sup>	20.00	31.34	37×37	694.59	1.11×10 <sup>7</sup>	23.15	28.20
11×11	312.87	9.80×10 <sup>5</sup>	18.26	33.08	38×38	704.93	1.17×10 <sup>7</sup>	24.24	27.11
12×12	335.13	1.17×10 <sup>6</sup>	16.80	34.54	39×39	714.46	1.23×10 <sup>7</sup>	25.36	25.98
13×13	356.21	1.37×10 <sup>6</sup>	15.59	35.76	40×40	723.93	1.30×10 <sup>7</sup>	26.51	24.83
14×14	376.42	1.59×10 <sup>6</sup>	14.60	36.75	41×41	734.56	1.36×10 <sup>7</sup>	27.70	23.65
15×15	395.86	1.82×10 <sup>6</sup>	13.80	37.54	42×42	742.96	1.43×10 <sup>7</sup>	28.90	22.44
16×16	414.25	2.07×10 <sup>6</sup>	13.19	38.16	43×43	752.24	1.50×10 <sup>7</sup>	30.13	21.21
17×17	432.36	2.34×10 <sup>6</sup>	12.74	38.61	44×44	760.22	1.57×10 <sup>7</sup>	31.39	19.96
18×18	449.57	2.62×10 <sup>6</sup>	12.43	38.91	45×45	769.31	1.64×10 <sup>7</sup>	32.67	18.68
19×19	466.05	2.92×10 <sup>6</sup>	12.26	39.09	46×46	778.47	1.71×10 <sup>7</sup>	33.97	17.37
20×20	482.36	3.24×10 <sup>6</sup>	12.21	39.14	47×47	786.68	1.79×10 <sup>7</sup>	35.29	16.05
21×21	497.73	3.57×10 <sup>6</sup>	12.26	39.08	48×48	793.98	1.87×10 <sup>7</sup>	36.63	14.71
22×22	512.59	3.92×10 <sup>6</sup>	12.43	38.92	49×49	802.49	1.94×10 <sup>7</sup>	37.99	13.35
23×23	527.62	4.28×10 <sup>6</sup>	12.68	38.66	50×50	810.12	2.03×10 <sup>7</sup>	39.37	11.97
24×24	541.48	4.67×10 <sup>6</sup>	13.03	38.32	51×51	817.81	2.11×10 <sup>7</sup>	40.77	10.58
25×25	554.69	5.06×10 <sup>6</sup>	13.45	37.90	52×52	827.31	2.19×10 <sup>7</sup>	42.18	9.17
26×26	568.32	5.48×10 <sup>6</sup>	13.95	37.40	53×53	833.29	2.28×10 <sup>7</sup>	43.60	7.74
27×27	581.43	5.90×10 <sup>6</sup>	14.52	36.83	54×54	841.61	2.36×10 <sup>7</sup>	45.04	6.31
28×28	594.14	6.35×10 <sup>6</sup>	15.15	36.19	55×55	849.71	2.45×10 <sup>7</sup>	46.49	4.85

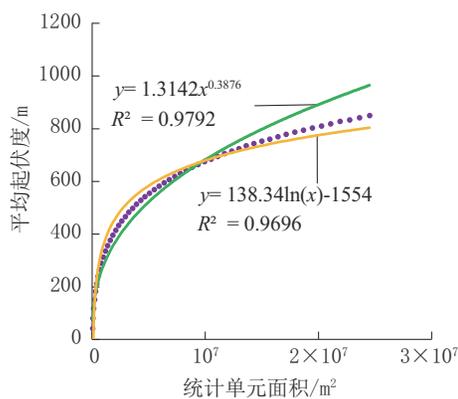


图2 统计单元面积与平均地形起伏度拟合曲线  
Fig.2 Fitting curve of statistical unit area and average topographic relief amplitude

随统计单元面积增大而增大;窗格数量20~55段, ΔS随统计单元面积增大而减小。窗格数量20×20对应的ΔS值为抛物线顶点,此点ΔS值最大(图3),即为 logarithmic 曲线的拐点,其对应的窗格大小即为研究区地形起伏度最佳统计单元。因此,本DEM数据源窗格数量20×20所对应的统计单元为研究区提取地形起伏度的最佳统计单元,即统计单元面积大小为3.24×10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>。

### 3 地形起伏度对斜坡地质灾害空间分布的影响分析

#### 3.1 研究方法

统计模型是研究影响因子与地质灾害空间分

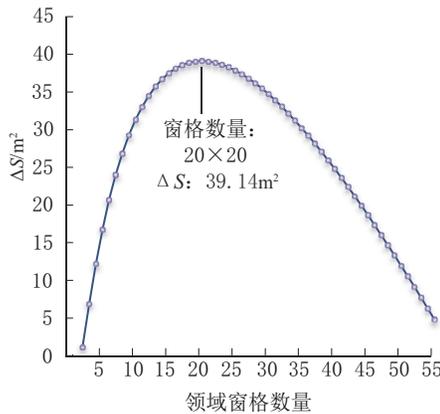


图3 ΔS值变化曲线

Fig.3 Change curve of ΔS

布相关性的常用手段<sup>[14]</sup>,各种模型和方法得到了很好的应用和推广。本文选取常用的频率比法、信息量法和确定性系数法综合对比分析地形起伏度与四川省斜坡地质灾害发育的相关性。

### 3.1.1 频率比法(FR)

频率比法是计算影响因子在不同分级区间内地质灾害发生的概率,本文采用此方法分析地形起伏度分级之间与斜坡地质灾害空间分布的相关性。本文频率比计算原理是地形起伏度在某一分级区间内地质灾害发育的数量和研究区总地质灾害数量的比值以及与该分级下的面积和研究区总面积的比值之比。其频率比公式及计算过程如下<sup>[18]</sup>:

$$FR_i = \frac{N_i/N}{A_i/A} \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (7)$$

式中:FR<sub>i</sub>——频率比值;N<sub>i</sub>——起伏度的第*i*个分级区间中发生的地质灾害数量;N——研究区的地质灾害总数量;A<sub>i</sub>——起伏度的第*i*个分级区间所占的面积;A——研究区总面积。

频率比值越大,表明发生灾害事件的可能性越大。

### 3.1.2 信息量法(IV)

信息量法一般认为地质灾害发生的可能性与预测过程中所获取信息的数量和质量有关,可以用信息量来衡量。本文采用单因子的信息量计算模型,具体函数表达为<sup>[19]</sup>:

$$I_i = \log_2 \frac{N_i/N}{A_i/A} \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (8)$$

式中:I<sub>i</sub>——信息量值;其余同上。

信息量越大,表明发生灾害事件的可能性

越大。

### 3.1.3 确定性系数法(CF)

确定性系数法是一个概率函数,属于一种二元统计方法,假设将来发生地质灾害的条件和过去发生地质灾害的条件相同。函数表达式为<sup>[17]</sup>:

$$CF_i = \begin{cases} \frac{PP_i - PP_s}{PP_i(1 - PP_s)}, PP_i \geq PP_s \\ \frac{PP_i - PP_s}{PP_s(1 - PP_i)}, PP_i < PP_s \end{cases} \quad (i=1,2,3,\dots,m) \quad (9)$$

式中:PP<sub>i</sub>——地质灾害在地形起伏度分类*i*中发生的条件概率,即地形起伏度分类*i*中发育的地质灾害点数量与地形起伏度分类*i*面积的比值;PP<sub>s</sub>——地质灾害事件发生的先验概率,即整个研究区的地质灾害总数与研究区总面积的比值,是一个定值。

确定性系数CF的值域区间为[-1,1]。其中正值代表事件发生确定性的增长,即该地形起伏度区间易于发生地质灾害;负值代表事件发生的确定性降低,即该类地形起伏度不易于发生地质灾害。

## 3.2 地形起伏度空间分布

基于均值变点分析结果,以窗格数量20×20作为统计单元,计算出四川省地形起伏度范围为0~1966 m,平均值482.36 m,标准差316.37 m。采用等间距法以50 m为间隔将四川省地形起伏度分为25个等级(表2),其中50~100 m段分布面积最大,面积占比7.49%;其次是≤50 m,面积占比6.26%。四川省地形起伏,总体上呈西高东低形势,地质构造是其重要影响因素,如构造复杂的龙门山断裂带西部山地、鲜水河断裂南段区域起伏度最大,构造相对简单的成都平原起伏度最小(图4)。

### 3.3 地形起伏度对斜坡地质灾害空间分布的影响

鉴于每个地形起伏度分级区间面积大小不同,其灾害发育数量不能准确衡量地形起伏度对斜坡地质灾害空间分布的影响。本研究基于GIS平台,分别采用频率比法(FR)、信息量法(IV)、确定性系数法(CF)3种统计模型,分析斜坡地质灾害对地形起伏度的影响。

#### 3.3.1 地貌类型与灾害空间分布特征

基于GIS软件空间分析功能,提取地形起伏度各等级中斜坡灾害数量、类型、规模等统计数据。参考文献[7]结合研究区地形起伏度空间分布特

表2 起伏度分级情况统计

Table 2 The statistics of the classification of topographic relief amplitude

起伏度分级代号	起伏度值/m	分级面积/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	灾点数 量	分级点密度/ (个·km <sup>-2</sup> )	起伏度分 级代号	起伏度值/m	分级面积/ (个·km <sup>-2</sup> )	灾点 数量	分级点密度/ (个·km <sup>-2</sup> )
R1	≤50	3.04	3269	0.11	R14	650~700	2.26	1575	0.07
R2	50~100	3.64	9992	0.27	R15	700~750	2.03	1348	0.07
R3	100~150	2.45	7258	0.30	R16	750~800	1.84	1148	0.06
R4	150~200	2.11	5502	0.26	R17	800~850	1.64	943	0.06
R5	200~250	2.22	5541	0.25	R18	850~900	1.43	712	0.05
R6	250~300	2.45	5256	0.21	R19	900~950	1.21	717	0.06
R7	300~350	2.61	4646	0.18	R20	950~1000	0.97	488	0.05
R8	350~400	2.71	3642	0.13	R21	1000~1050	0.81	420	0.05
R9	400~450	2.73	3205	0.12	R22	1050~1100	0.58	286	0.05
R10	450~500	2.72	2804	0.10	R23	1100~1150	0.47	208	0.04
R11	500~550	2.59	2539	0.10	R24	1150~1200	0.34	173	0.05
R12	550~600	2.46	2106	0.09	R25	>1200	0.86	330	0.04
R13	600~650	2.42	1916	0.08					

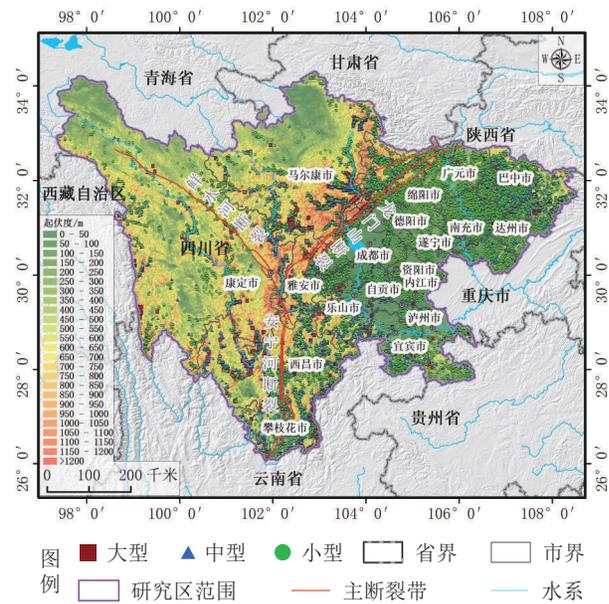


图4 地形起伏度与斜坡地质灾害空间分布关系  
 Fig.4 The spatial distribution map of topographic relief amplitude and slope geological hazards

点,将四川省划分为平原台地、丘陵、小起伏度山地、中起伏度山地、大起伏度山地等五种地貌类型。如图5所示,不同地貌类型发育的斜坡地质灾害在空间分布上呈现出明显差异性。平原台地,起伏度≤50 m,主要分布于成都平原及周边、川西高原地区,面积占比6.3%,斜坡地质灾害数量占比4.4%,点密度为0.11个/km<sup>2</sup>;丘陵,起伏度50~200 m,主

要分布于四川盆地腹地地区,面积占比16.9%,斜坡地质灾害数量占比31.5%,0.29个/km<sup>2</sup>;小起伏度山地,起伏度200~500 m,主要分布于川西、川南、川东北山地,面积占比37.1%,斜坡地质灾害数量占比37.4%,0.18个/km<sup>2</sup>;中起伏度山地,起伏度500~1000 m,主要分布于川东北大巴山、川西山支流域河谷地区,面积占比38.8%,斜坡地质灾害数量占比23.6%,0.09个/km<sup>2</sup>;大起伏度山地,起伏度1000~1966 m,主要分布于龙门山断裂带西北部、金沙江、雅砻江中下游段、大渡河、岷江上游段两岸及附近区域,面积占比6.3%,斜坡地质灾害数量占比3.0%,0.07个/km<sup>2</sup>。

3.3.2 地形起伏度与灾害类型的空间分布关系

据图6可以看出,50~100 m区间为转折区间,该区间的斜坡地质灾害、滑坡、崩塌发育数量均高于其他区间,其中滑坡占该类灾害的10.7%,崩塌占该类灾害的22.5%,崩塌滑坡占总斜坡地质灾害的13.6%。大部分灾害分布于起伏度500 m以内,其中滑坡的占比为73.6%,崩塌的占比为72.7%,斜坡地质灾害占比为73.4%。总体上,地形起伏度>100 m的区间,灾害发育数量与地形起伏度大小总体上呈负相关,即起伏度越大灾害发育数量越少,并且斜坡地质灾害、滑坡、崩塌三者的曲线形态基本一致。

灾害类型方面,FR值、I值和CF值(简称“三

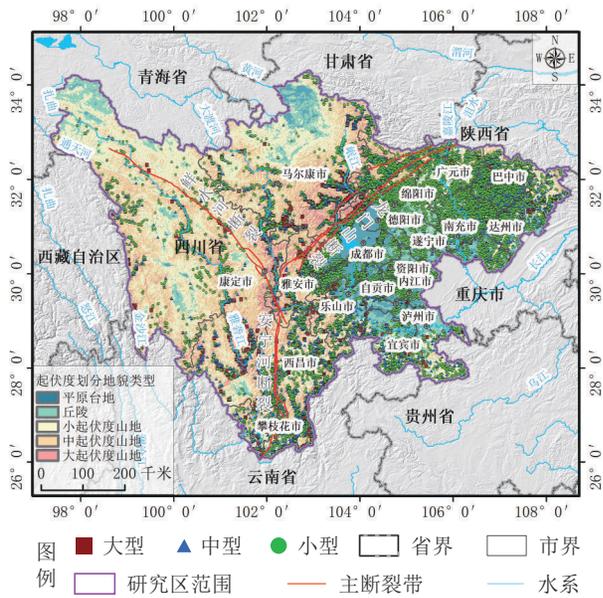


图 5 地貌类型与斜坡地质灾害空间分布关系

Fig.5 The spatial distribution map of geomorphic type and slope geological hazards

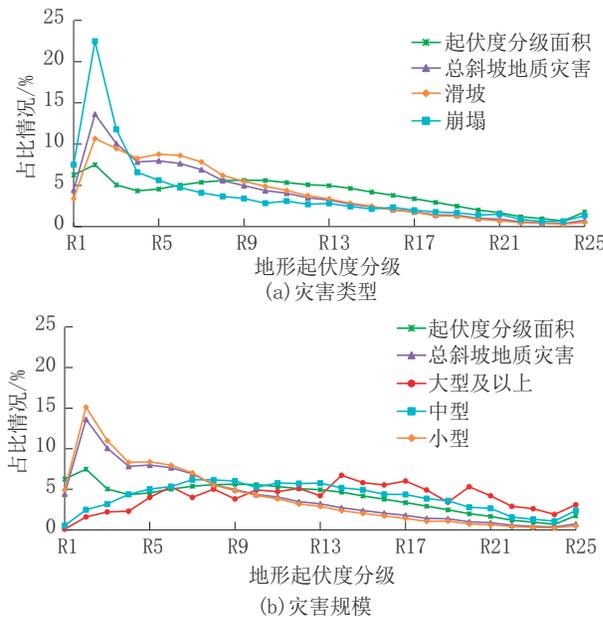


图 6 地形起伏度分区与斜坡地质灾害数量分布相关性统计

Fig.6 The statistical chart of the correlation between topographic relief amplitude zoning and the distribution of slope geological hazards

值”)的变化趋势几乎一致,峰值段均为小起伏段,不同的灾害类型有一定的差异性:斜坡地质灾害、滑坡的峰值段为 50~350 m 区间;崩塌为 50~200 m。斜坡地质灾害“三值”的最大值区间均为 100~

150 m。滑坡在区间 100~150、150~200、200~250 m 的“三值”基本相近,高于其余区间。崩塌区间 50~100 m 的“三值”明显高于其他区间,其次是区间 100~150 m。滑坡总体形态上为单峰,峰值后“三值”表现为地形起伏度越大值越小(图 7)。

3.3.3 地形起伏度与灾害规模的空间分布关系

对四川省崩塌滑坡灾害数据统计显示,灾害规模以小型为主,全区 74844 个斜坡地质灾害中小型、中型、大型及以上的数量分别为 66024 个、7825 个、995 个,占比分别为 88.2%、10.5%、1.3%。由于小型灾害的占比具有绝对优势,小型灾害与斜坡地质灾害数量分布曲线形态基本一致(参见图 6b),其中 50~100 m 区间分布数量最多。中型灾害的分布曲线近似圆弧形,两端的低、高起伏度区间分布的灾害数量少,200~800 m 等中间区段分布的灾害数量相对较多。大型及以上灾害分布曲线呈波动形,小起伏度 < 200 m 区间的分布数量较少,中起伏度 500~1000 区间分布的数量相对较多。因此,地形起伏度对不同规模斜坡地质灾害空间分布的影响程度不同。

灾害规模方面,三种统计模型中仅 FR 值的变化趋势具有明显的差异性。小型斜坡地质灾害 FR 值形态呈单峰,峰值段为 50~300 m,最大值区间为 100~150 m,150 m 以后区间表现为地形起伏度越大 FR 值越小。中型斜坡地质灾害 FR 值没有明显的峰值段,总体趋势变化较缓,>700 m 的区间属于相对高值段,最大值区间为 1000~1050 m 和 1150~1200 m;大型及以上斜坡地质灾害 FR 值与地形起伏度具明显正相关关系,呈现出随地形起伏度值增大 FR 值由低到高,区间 950~1200 m 属于峰值段,其中 1150~1200 m 为 FR 最大值区间。

3.4 结果讨论

研究区滑坡灾害的易发优势区间为 50~350 m,崩塌灾害易发优势区间为 50~200 m,小型灾害的易发优势区间为 50~300 m,中型灾害的易发优势区间为 700 m 以上区域,大型灾害的易发优势区间为 950~1200 m。小起伏区域更易发生小型斜坡地质灾害,大起伏度区域易发生中型、大型斜坡地质灾害。其主要原因为地形起伏度仅是影响斜坡地质灾害发育的主要因素之一,研究区内的其他地质环境条件对斜坡地质灾害空间分布也具有重要控制作用。

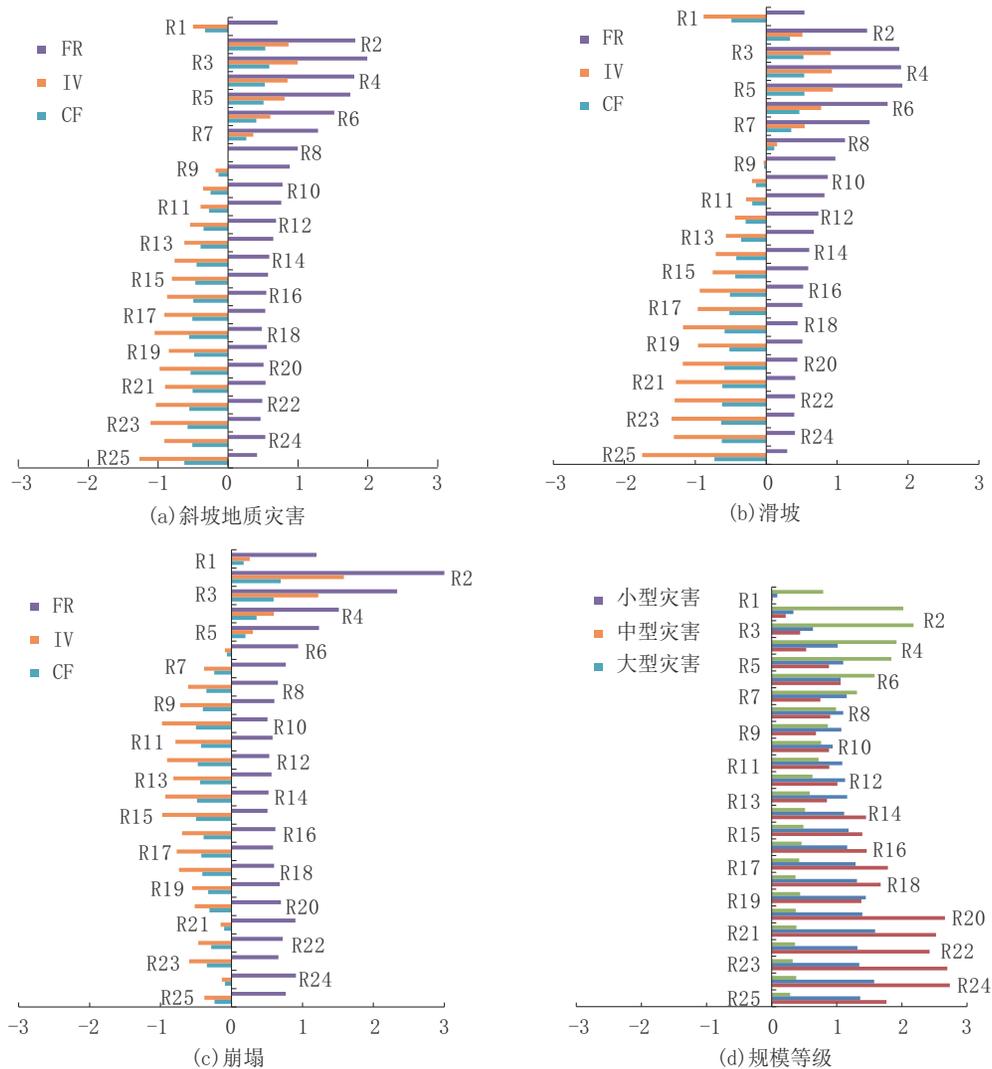


图7 地形起伏度分级的FR值、IV值、CF值对比

Fig.7 The comparison of FR, I and CF value for classification of topographic relief amplitude

不同规模崩滑灾害的地形起伏度易发优势区间的差异性,是由多种因素导致。四川省低地形起伏度主要分布于成都平原及周边和川东丘陵区,其大部分区域的地形起伏度 $<300\text{ m}$ (参见图4、图5),据统计地形起伏度平均值为 $136\text{ m}$ ,灾害数量占总数的 $54.9\%$ ,其中小型灾害约有 $39000$ 处,约占全省灾害总数的 $52.4\%$ ;该区域人类工程活动相对最为强烈、人口密度大,切坡修路建房、乡镇开发等工程活动可能导致边坡失稳,且该区域斜坡高差小,地形切割相对小,灾害体长、宽等几何参数也相对较小,据此灾害体点规模以小型为主。四川省中等起伏度及以上区域主要分布于川西、西南、西北山区,与三大断裂带构造格局空间上高度重叠,该地区多为中高山峡谷区,地形切割深度大,构造活动性强

烈,在内外动力因素叠加影响下,易发生规模相对较大的斜坡地质灾害。本研究结果与以往学者的相关研究成果基本一致<sup>[25,28]</sup>。

综上所述,斜坡地质灾害空间分布规律是多种因素耦合的结果,地形起伏度对斜坡地质灾害发育影响是内外地质作用、人工干扰因素综合作用的一个表征。

#### 4 结论

(1)平均地形起伏度与统计单元的窗格数量存在显著的正相关,其值随统计窗格数量的增加而增加;均值变点分析方法计算出四川省地形起伏度最佳统计单元的窗格数量为 $20\times 20$ ,该单元面积大小为 $3.24\times 10^6\text{ m}^2$ 。

(2)四川省依据地形起伏度划分出平原台地、丘陵、小起伏度山地、中起伏度山地、大起伏度山地等5种地貌类型,其面积占比分别为6.3%、16.9%、37.1%、38.8%、6.3%,即地貌类型以起伏度200~1000 m的山地为主;斜坡地质灾害主要分布于地形起伏度<500 m的区域,其中丘陵、小起伏山地灾害数量占比分别为37.4%、31.5%。

(3)四川省斜坡地质灾害规模以小型为主、类型以滑坡为主,地形起伏度对不同规模、不同规模斜坡地质灾害空间分布的影响具有明显差异性。滑坡、崩塌的易发优势区间分别为50~350 m、50~200 m;小型、中型、大型易发优势区间分别为50~300 m、>700 m、950~1200 m。小起伏度易于发生小型灾害,大起伏度更易于发生大型灾害,这与前人研究结果基本一致。

(4)斜坡地质灾害空间分布规律是人类工程活动与地质环境因素耦合影响的反映,地形起伏度可作为区域斜坡地质灾害敏感性分析的重要因子,其研究结果可为确定斜坡地质灾害易发靶区提供判断依据。

### 参考文献(References):

- [1] 李益敏,谢亚亚,蒋德明,等.怒江州斜坡地质灾害孕灾环境因素敏感性研究[J].水土保持研究,2018,25(5):300-305.  
LI Yimin, XIE Yaya, JIANG Deming, et al. Study on sensitivity in disaster-pregnant environmental factors of slope geological hazards in Nujiang prefecture [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 300-305.
- [2] 白希选,严翼.武陵山区地形起伏度特征及其与土地利用的变化关系[J].武汉工程大学学报,2020,42(1):73-78.  
BAI Xixuan, YAN Yi. Characteristics of topographic relief amplitude and its relationship with land use change in Wuling mountainous area [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2020, 42(1): 73-78.
- [3] Willett S D, Slingerland R, Hovius N. Uplift, shortening, and steady state topography in active mountain belts [J]. American Journal of Science, 2001, 301(4-5): 455-485.
- [4] 王志恒,胡卓玮,赵文吉,等.应用累积和分析算法的地形起伏度最佳统计单元定[J].测绘科学,2014,39(6):59-64.  
WANG Zhiheng, HU Zhuowei, ZHAO Wenji, et al. Extracting optimum statistical unit for relief degree of land surface with CUSUM algorithm [J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(6): 59-64.
- [5] 李炳元,潘保田,韩嘉福.中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J].第四纪研究,2008,(4):535-543.  
LI Bingyuan, PAN Baotian, HAN Jiafu. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions [J]. Quaternary Sciences, 2008(4): 535-543.
- [6] 苗朝,张勇,李乾坤,等.基于PFC2D的缓倾顺层滑移-溃曲型

- 岩质滑坡破坏机制分析[J].钻探工程,2023,50(5):11-17.  
MIAO Zhao, ZHANG Yong, LI Qiankun, et al. The deformation mechanism analysis of gently inclined and consequent sliding-buckling rock landslides based on PFC2D [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 11-17.
- [7] 艾国栋,李云青,资丽君,等.天然和暴雨条件下的物质点滑坡变形机制分析[J].钻探工程,2023,50(5):23-28.  
AI Guodong, LI Yunqing, ZI Lijun, et al. Analysis of deformation mechanism of landslide under natural and rainstorm conditions based on material point method [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 23-28.
- [8] 李乾坤,苗朝,程英建,等.川东巴中市恩阳区近水平土质滑坡破坏模式及专业监测预警[J].钻探工程,2023,50(5):43-51.  
LI Qiankun, MIAO Zhao, CHENG Yingjian, et al. Damage patterns of near-horizontal soil landslides and professional monitoring and warning in Enyang District, Bazhong City, East Sichuan [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 43-51.
- [9] 聂智强,崔杰,孔梁钰.江西省永新县地质灾害孕灾环境分析[J].钻探工程,2023,50(5):67-72.  
NIE Zhiqiang, CUI Jie, KONG Liangyu. Analysis of geological disaster-breeding environment in Yongxin County, Jiangxi Province [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 67-72.
- [10] 伍剑波,孙强,张泰丽,等.地形起伏度与滑坡发育的相关性——以丽水市滑坡为例[J].华东地质,2022,43(2):235-244.  
WU Jianbo, SUN Qiang, ZHANG Taili, et al. Research for the correlation between relief amplitude and landslides: a case study of Lishui City [J]. East China Geology, 2022, 43(2): 235-244.
- [11] 徐志文.四川省地质环境状况及地质灾害发育特征研究[J].地质与勘探,2006,42(4):97-102.  
XU Zhiwen. Proposing the frame and measures for prevention and cure system of geological disasters in Sichuan Province [J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(4): 97-102.
- [12] 龚诚,黄海,陈龙,等.藏东地区冻错曲流域崩塌发育特征与链式成灾模式研究[J].钻探工程,2023,50(5):1-10.  
GONG Cheng, HUANG Hai, CHEN Long, et al. Characteristics of collapse development and geohazard chain model in the Dongcuoqu Basin, eastern Tibet [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 1-10.
- [13] 郭芳芳,杨农,孟晖,等.地形起伏度和坡度在区域滑坡灾害评价中的应用[J].中国地质,2008,35(1):131-143.  
GUO Fangfang, YANG Nong, MENG Hui, et al. Application of the relief amplitude and slope analysis to regional landslide hazard assessments [J]. Geology in China, 2008, 35(1): 131-143.
- [14] 宿星,魏万鸿,郭万钦,等.基于SRTMDEM的地形起伏度对天水市黄土滑坡的影响分析[J].冰川冻土,2017,39(3):616-622.  
SU Xing, WEI Wanhong, GUO Wanqin, et al. Analyzing the impact of relief amplitude to loess landslides based on SRTM DEM in Tianshui prefecture [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 616-622.
- [15] 张峰,赵忠国,谢大伟,等.基于确定系数法和信息量模型对新疆特克斯县滑坡敏感性评价的对比研究[J].新疆地质,2019,37(4):575-579.  
ZHANG Feng, ZHAO Zhongguo, XIE Dawei, et al. Comparative study on landslide sensitivity assessment in Turks County of Xinjiang based on determined coefficient method and information quantity model [J]. Xinjiang Geology, 2019, 37(4): 575-579.
- [16] 张明娟,薛永安.斜坡地质灾害敏感性评价中地势起伏度提取

- 最佳尺度研究[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(6): 881-888.  
ZHANG Mingmei, XUE Yong'an. Optimal scale for extracting relief amplitude in slope geological hazard sensitivity evaluation[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(6): 881-888.
- [17] 薛永安, 王玉洁, 朱婧聪, 等. 县域国土空间斜坡地质灾害敏感性评价研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(4): 219-230.  
XUE Yong'an, WANG Yujie, ZHU Jingcong, et al. Study of slope geological hazard sensitivity evaluation in the county territory of territorial spatial[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(4): 219-230.
- [18] 黄发明, 曹昱, 范宣梅, 等. 不同滑坡边界及其空间形状对滑坡易发性预测不确定性的影响规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3227-3240.  
HUANG Faming, CAO Yu, FAN Xuanmei, et al. Effects of different landslide boundaries and their spatial shapes on the uncertainty of landslide susceptibility prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3227-3240.
- [19] 叶振南, 田运涛, 陈宗良, 等. 西藏芒康县斜坡地质灾害空间分布特征与易发性区划[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(3): 199-208.  
YE Zhennan, TIAN Yuntao, CHEN Zongliang, et al. Spatial distribution and susceptibility of geological disasters in Mangkang County[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(3): 199-208.
- [20] 田乃满, 兰恒星, 伍宇明, 等. 人工神经网络和决策树模型在滑坡易发性分析中的性能对比[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(12): 2304-2316.  
TIAN Naiman, LAN Hengxing, WU Yuming, et al. Performance comparison of BP artificial neural network and cart decision tree model in landslide susceptibility prediction[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(12): 2304-2316.
- [21] 钟静, 卢涛. 中国西南地区地形起伏度的最佳分析尺度确定[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 175-181, 186.  
ZHONG Jing, LU Tao. Optimal statistical unit for relief amplitude in southwestern China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(1): 175-181, 186.
- [22] 南希, 李爱农, 景金城. 中国山地起伏度计算中地形自适应滑动窗口获取与验证[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(4): 34-39, 2.  
NAN Xi, LI Ainong, JING Jincheng. Calculation and verification of topography adaptive slide windows for the relief amplitude solution in mountain areas of China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33(4): 34-39, 2.
- [23] 张学儒, 官冬杰, 牟凤云, 等. 基于ASTER/GDEM数据的青藏高原东部山区地形起伏度分析[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 11-14.  
ZHANG Xueru, GUAN Dongjie, MOU Fengyun, et al. Analysis on the relief amplitude based on ASTER GDEM data in mountain area of eastern Tibetan Plateau[J]. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(3): 11-14.
- [24] 封志明, 李文君, 李鹏, 等. 青藏高原地形起伏度及其地理意义[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1359-1372.  
FENG Zhiming, LI Wenjun, LI Peng, et al. Relief degree of land surface and its geographical meanings in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1359-1372.
- [25] 刘乾坤. 基于SPARK的四川省滑坡灾害成因分析与临界阈值研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
LIU Qiankun. Analysis of causes and critical threshold of landslide hazards in Sichuan Province based on SPARK[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [26] 杨红娟, 韦方强, 马振峰, 等. 四川省泥石流灾害的时空分布规律和降水特征[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 102-107.  
YANG Hongjuan, WEI Fangqiang, MA Zhenfeng, et al. Spatial-temporal distribution of debris flows in Sichuan Province in China and the corresponding rainfall characteristics[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 102-107.
- [27] 解征帆, 赵文华. 四川省泥石流滑坡类型分布与防治对策[J]. 四川地质学报, 1992, 12(1): 58-65.  
XIE Zhengfan, ZHAO Wenhua. Distribution and control measures of mud-rock flows and landslides in Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 1992, 12(1): 58-65.
- [28] 李云君, 刘志红, 吕远洋, 等. 四川省滑坡灾害气象预警模型建立与验证[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(7): 941-949.  
LI Yunjun, LIU Zhihong, LÜ Yuanyang, et al. Establishment and validation of a meteorological warning model for landslide hazards in Sichuan Province[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(7): 941-949.

(编辑 王文)