

李圣, 卿元华, 庄儒新, 等. 考虑历史地震烈度的楚雄州滑坡发育特征分析[J]. 华南地震, 2024, 44(2): 52-60. [LI Sheng, QING Yuanhua, ZHUANG Ruxin, et al. Analysis of Landslide Development Characteristics in Chuxiong Yi Autonomous Prefecture Considering Historical Earthquake Intensity[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(2): 52-60]

考虑历史地震烈度的楚雄州滑坡发育特征分析

李圣¹, 卿元华², 庄儒新¹, 罗嘉铮¹, 段炜¹, 徐雨帆¹, 文雯¹

(1. 云南省地震局, 昆明 650224; 2. 成都师范学院史地与旅游学院, 成都 611130)

摘要: 楚雄州滑坡发育, 影响因素复杂, 处置困难。此研究以地质灾害调查数据为研究对象, 选取岩层、构造、高程、坡度、坡向、历史地震烈度作为6个环境因子, 采用频率比法揭示各环境因子优势区, 并计算灾害易发性值, 生成易发性等级图, 指出楚雄州滑坡易发性高、中等级区域。基于地理探测器研究滑坡空间分布, 量化各环境因子贡献度, 讨论滑坡主导环境因子。最后, 结合楚雄州降雨量分布探讨了滑坡诱发动力, 并依据研究成果提出了针对性的防灾减灾建议。

关键词: 滑坡; 频率比; 地理探测器; 易发性

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)02-0052-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.02.07

Analysis of Landslide Development Characteristics in Chuxiong Yi Autonomous Prefecture Considering Historical Earthquake Intensity

LI Sheng¹, QING Yuanhua², ZHUANG Ruxin¹, LUO Jiazheng¹,
DUAN Wei¹, XU Yufan¹, WEN Wen¹

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China; 2. School of History Geography and Tourism,
Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Landslides are well developed in Chuxiong Yi Autonomous Prefecture, with complex influencing factors and difficult disposal. In this study, the geological hazard survey data were taken as the research object, and the rock stratum, structure, elevation, slope, aspect, and historical earthquake intensity were selected as the six environmental factors. The frequency ratio method was used to identify the dominant areas of each environmental factor, and the hazard susceptibility values were calculated to generate hazard susceptibility grade maps, indicating the areas with high and medium landslide susceptibility in Chuxiong Yi Autonomous Prefecture.

收稿日期: 2024-02-10

基金项目: 四川省区域和国别重点研究基地东南亚经济与文化研究中心2023年度项目(DNY2304); 云南省地震局青年地震科学基金项目(2022ZLK03); 云南省重点研发计划(社会发展专项)(202203AC100003)联合资助。

作者简介: 李圣(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事构造地貌、地震地质灾害评估研究工作。

E-mail: 969667112@qq.com

通信作者: 卿元华(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事自然地理教学及石油地质、资源环境研究工作。

E-mail: 182455466@qq.com

The spatial distribution of landslides was studied by using a geographic detector to quantify the contribution of each environmental factor, and the dominant environmental factor of the landslide was pointed out. Finally, the landslide-induced dynamics is discussed in the light of the rainfall distribution in the study area, and corresponding suggestions for hazard prevention and reduction are put forward based on the research results.

Keywords: Landslide; Frequency ratio; Geographic detector; Susceptibility

0 引言

楚雄州近30年来,地震活动频繁,地质灾害发育,是云南省地质灾害严重地区之一^[1-2]。故而,前人在研究区开展了相关方面的研究,张加桂等、朱俊杰探讨了岩层与滑坡发育之间的关系,指出岩石力学强度低,抗风化弱的砂、泥岩易发生滑坡^[3-4];吕建中研究武定县地质灾害时积极肯定了内外地质动力对滑坡发育的作用^[5];王学良等基于数字高程(DEM)进行了滑坡灾害小区划研究^[6];卢海峰依据元谋断裂带活动性研究认为断裂展布控制着滑坡的空间分布^[7]。整体来看,楚雄州滑坡研究主要限于县域空间尺度的岩层、构造、区划方面,还缺少历史地震烈度等地震角度的考虑,且频繁发生的滑坡已经造成大量生命财产损失,亟需系统性厘清楚雄州滑坡的分布特征和发育规律。本文在楚雄州地震灾害风险普查和地质灾害调查之上,基于ArcGIS空间分析平台,利用频率比和地理探测器等统计归纳方法,分析滑坡发育特征,揭示构造、岩层、历史地震烈度、地形地貌对滑坡的作用特点,进一步结合降雨量探讨了滑坡灾害的诱因,对楚雄州防灾减灾具有一定现实意义。

1 研究区概况

楚雄州位于云贵高原西部、滇中高原的主体部位,山区约占总面积的95%,构造复杂、岩层破碎、地质环境脆弱。该州受到川滇菱形块体向东南方滑动的构造力、保山—普洱块体内部次级断块旋转产生的北北西向的推挤力以及印度洋板块向欧亚板块挤压的侧向挤压力(图1),致使区内活动断裂发育,有NW向的红河断裂、南华—楚雄断裂、石羊镇—大古岩断裂以及NS向的元谋—绿汁江断裂、汤郎—易门断裂(图2)。楚雄州主体处于大姚—楚雄上叠拗褶区和武定—易门隆褶区,是一个北宽南窄的中生代构造沉积盆地^[8],主要出露侏罗系、白垩系、古近系,岩性主要为红色砂、

泥岩(图2)。州内地震活动频繁,截止2022年底发生 $M_s \geq 5.0$ 地震37次(含四川会理6.1级地震),其中5~5.9级地震28次,6~6.9级地震8次,尤其21世纪以来6级以上地震已发生5次,为云南省州(市)之最。

楚雄州海拔介于550~3657 m,最高点为大姚县百草岭主峰帽台山,最低点是双柏县的三江口^[8]。地势由西北向东南倾斜,具有中部高、南低、北部比南部稍高的特点以及东西稍高、中部低缓的特征。境内沟谷纵横,河流落差大,水流急,水量变幅大,为典型山区性河流^[9]。截止2022年底,楚雄州境内滑坡灾害共发育685处。

2 数据与方法

2.1 数据来源

DEM数据来自于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为30 m;断裂和岩层来自于云南省地震灾害风险普查活动断裂数据库建设专题;地质灾害数据主要来源于楚雄州自然资源和城乡规划局;地震资料主要来源于云南省地震局、中国地震台网中心及相关文献;降水数据源于云南省地震局楚雄地震监测中心站。

2.2 研究方法

2.2.1 频率比法

为研究构造、岩层、高程、坡度、坡向、历史地震烈度对滑坡的影响,利用ArcGIS软件“以表格显示分区统计”等工具,将研究区的断裂距离、岩层、高程、坡度、坡向、历史地震烈度信息进行归纳分析^[10]。其中,将高程按500 m间隔,划分为6个等级;将坡度按10°间隔,划分为8个等级;依据自然断点法,将坡向划分为0~45°、45°~90°、90°~135°、135°~180°、180°~225°、225°~270°、270°~315°、315°~360°,共8个类别;将断裂按照3 km间隔,划分为<3 km、3~6 km、6~9 km、9~12 km、12~15 km、15~18 km,共6个

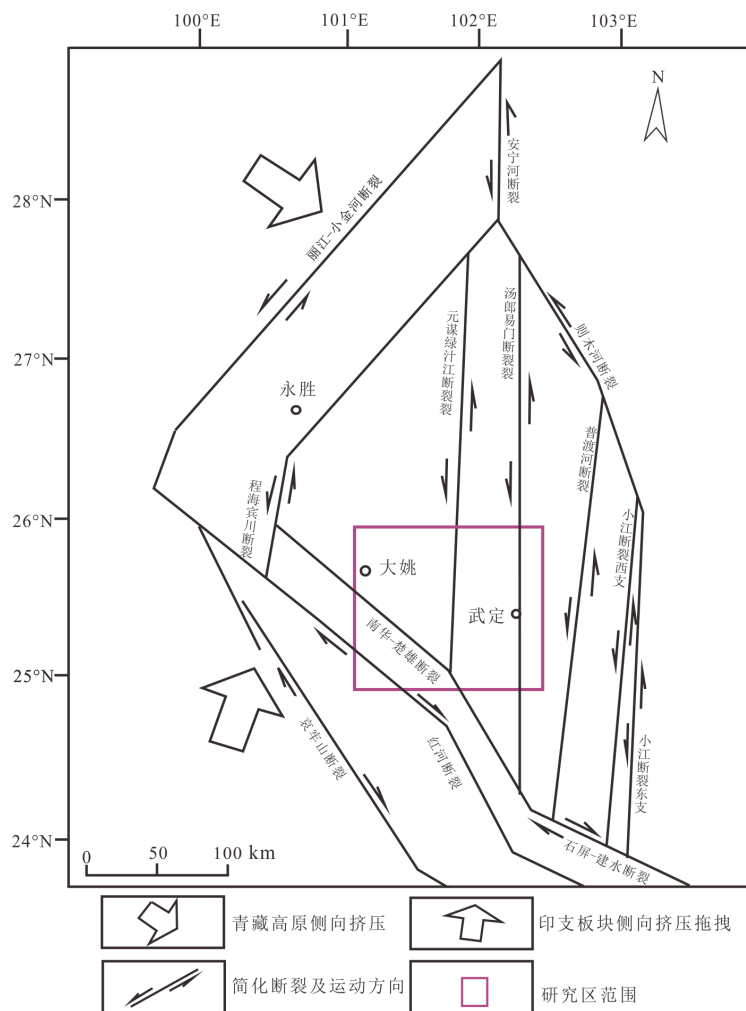


图1 研究区地质构造示意图

Fig.1 Geological structure of the study area

等级；依据中国地震综合等震线图^[11]，楚雄州受历史地震影响程度可分为< V、VI、VII、VIII、IX度区，共5个等级；研究区出露侏罗系、古近系、白垩系等14套岩层，划分为14个区域。

基于以上各类数据划分，统计出各划分类别的面积及其滑坡的数量，计算出各环境因子的频率比(Frequency ratio, FR)^[12]，其值详见表1：

$$FR_i = \left(\frac{H_i}{H} \right) / \left(\frac{A_i}{A} \right) \quad (1)$$

式(1)中， H_i 为研究区内该因子第 i 类的滑坡数量； A_i 为研究区内该因子第 i 类的面积； H 为研究区内滑坡的总数量； A 为研究区总面积。如果 $FR_i > 1$ ，灾害易发生，反之 $FR_i < 1$ ，则灾害不易发生^[13]。

此外考虑不同环境因子 $F^{(j)}$ ，对研究区中某特定空间，假设其所属的类型或分级为 $F_{i(j)}$ ，那么根据 $F_{i(j)}$ ，将该空间关于该因子的频率比 $FR^{(j)}$ 赋值为 $FR_{i(j)}$ 。最后，将该空间位置的不同环境因子频率比相加，即可以得到该空间位置滑坡的易发性 S

(Susceptibility)^[13]：

$$S = \sum_j FR^{(j)} \quad (2)$$

2.2.2 地理探测器

地理探测器(Geographical detector)是探究空间分异性并揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法，包括因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测4部分，其中因子探测可用于探测某因子 X 对属性 Y 的空间分异的解释力度^[14]。该解释力度用 q 值($0 \leq q \leq 1$)来度量， q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强，变量 X 对属性 Y 控制作用也越强^[14]。其计算公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式(3)中： $h = 1, \dots, L$ ； L 为变量 Y 或因子 X 的分层，即分类或分区； N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。将高程、坡度、坡向、断裂距离、岩层、历史地

震烈度分别作为自变量 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 ； Y 。最后，利用地理探测器工具分别计算出滑坡的各环境因子 q 值(表2)。

表1 不同影响因素的FR值计算结果
Table 1 The FR values of different influencing factors

影响因子	分类	个数	FR	影响因子	分类	个数	FR	影响因子	分类	个数	FR
地层	第四系	3	0.53	坡向	1°~45°	91	1.02	断层距离	<3 km	65	0.75
	古近系	135	1.41		45°~90°	106	1.45		3~6 km	73	0.78
	白垩系	243	1.21		90°~135°	104	1.26		6~9 km	78	0.79
	侏罗系	132	0.58		135°~180°	91	0.96		9~12 km	85	0.82
	三叠系	86	1.68		180°~225°	84	0.91		12~15 km	55	0.52
	二叠系	10	2.97		225°~270°	68	0.83		15~18 km	59	0.58
	泥盆系	3	1.65	高程	270°~315°	62	0.75	坡度	0°~10°	93	0.78
	奥陶系	15	1.50		315°~360°	79	0.89		10°~20°	277	1.18
	寒武系	21	1.14		<1000 m	1	0.11		20°~30°	234	1.05
	上震旦统	1	0.46		1000~1500 m	58	0.71		30°~40°	72	0.79
	下震旦统	2	0.43		1500~2000 m	345	1.15		40°~50°	9	0.56
	中元古界	11	0.41		2000~2500 m	242	0.96	历史烈度	<VI	7	0.44
	下元古界	18	0.52		2500~3000 m	38	1.01		VI	223	0.86
	火成岩	5	0.91		>3000 m	1	0.34		VII	346	1.10
									VIII	101	1.22
									IX	9	0.73

表2 不同影响因素q值计算结果
Table 2 The q values of different influencing factors

灾害类型	高程/km	坡度	坡向	断裂距离	岩层	历史烈度
滑坡	0.151	0.072	0.116	0.233	0.411	0.078

3 结果与分析

3.1 灾害分布

如表1所示，滑坡主要集中于白垩系、古近系、侏罗系、三叠系发育，累计达584处，约占滑坡总数的85%，以上岩层以砂、泥岩为主(图2)，表明楚雄州砂、泥岩易发生滑坡。FR值最高值为二叠系的2.97，三叠系、泥盆系、奥陶系的FR值均高于古近系、白垩系的FR值，这是因为砂、泥岩遇水易软化或在地震动作用下场地放大效应大更易发生滑坡，故砂、泥岩地层FR值高，至于各砂、泥岩地层的FR值存在差异推测还与微地貌、断裂控制有关。地貌方面，FR高值主要出现在1500~2000 m(1.15)、2500~3000 m(1.01)高程段，

10°~20°(1.18)、20°~30°(1.05)坡度，45°~90°(1.45)坡向，这是因为滑坡作为斜坡型灾害，需要一定高程、坡度作为发育条件，相较于低角度缓坡而言，10°~30°坡面更易岩层破碎，而至于东坡向FR值最高则与东坡向为阳坡，日照强烈昼夜温差大，岩层风化作用强烈，更易形成残坡积物有关。

通常情况，断裂面会成为控制滑坡发育的边界，断裂附近是滑坡发育的区域^[12]。图2所示，滑坡在元谋—绿汁江与石羊镇—大古岩断裂交汇区域、汤郎—易门与元谋—绿汁江断裂的夹持地带密度高，表明断裂展布对滑坡分布有影响。就单条断裂来看，距离断裂15 km之内，石羊镇—大古岩断裂的上盘发育滑坡50处，下盘发育滑坡27处；元谋—绿汁江断裂东盘发育45处滑坡，西盘发育滑坡27处；南华—楚雄断裂、红河断裂左右

盘的滑坡数量差异不大,且主要在北西段发育。推测,石羊镇一大古岩断裂上盘滑坡易发与石羊镇一大古岩断裂上盘构造强度相对较强有关,元谋—绿汁江断裂东盘滑坡发育与东盘地貌高程较高有关(图3),南华—楚雄断裂、红河断裂北西段

发育与西北段的中高山峡谷地貌相关(图3)。表1所示,在距离断裂18 km之内,滑坡灾害便没有随着断裂距离递增而递减,且 FR 多靠近1,证明滑坡分布除了受断裂影响以外还受其他环境因子控制。

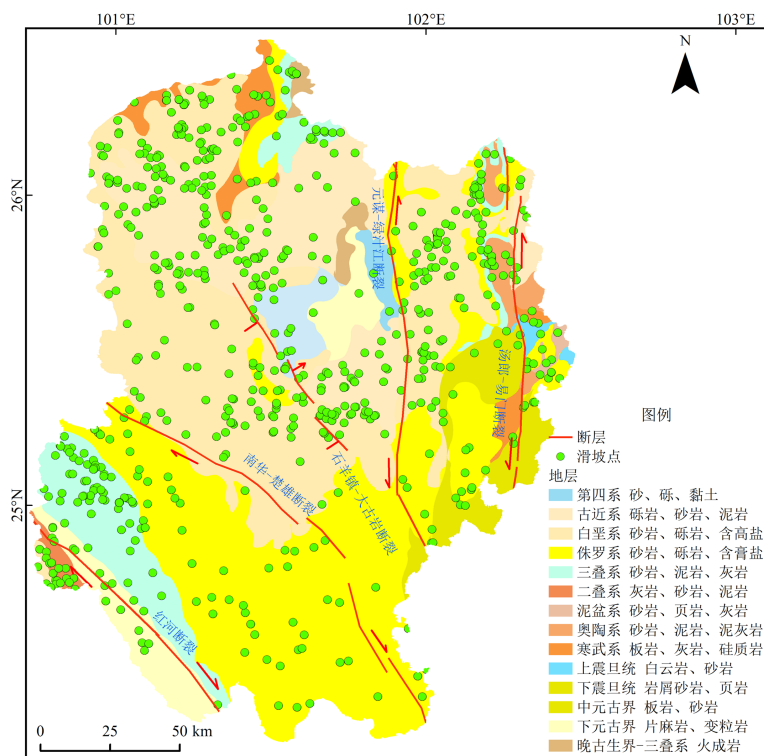


图2 地质构造与灾害分布图

Fig.2 The distribution map of geological structures and landslides

FR 值随着地震烈度增加呈先大幅度增加后小幅度降低趋势(表1),且Ⅷ度区最高,远超<Ⅵ区,说明历史地震烈度对滑坡分布有影响。高烈度区更易发生滑坡,故而致使滑坡数量集中于Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ度发育,至于Ⅸ度区灾害数量较少,则与Ⅸ度区分布面积较小统计意义不太明显有关。据历史资料与云南省地震灾害损失评估报告显示,1995年武定6.5级地震在Ⅶ度区开始有滑坡发育^[15],2000年武定5.1级地震震中为Ⅵ度区却很少发育滑坡(表3),加之,大姚2003年两次6级以上地震,地震诱发的滑坡也主要集中Ⅶ、Ⅷ区,在Ⅵ度区内几乎不发育(表3),表明Ⅶ度可以作为楚雄州内地震诱导滑坡发育的一个临界烈度值,高于其他地区的Ⅵ度^[16]。之所以出现综合等震线Ⅵ度区发育滑坡,而单次地震Ⅵ度区不发育灾害的缘故,是因为前者是多次地震烈度综合绘图的结果,是区域内地震活动的综合反应。比如2000年武定

5.1级地震,其震中为Ⅵ度不发育滑坡(表3),但在综合等震线图中武定县主体烈度大于Ⅵ度(图4),且滑坡发育(图3)。

虽然地理探测器分析显示(表2),岩层、断裂距离的 q 值最高,代表岩层是影响滑坡分布的主要环境因素,其次是断裂距离和地貌,烈度不是影响滑坡灾害易发的直接因素,但结合 FR 值在高烈度区相对较高的缘故,也间接说明历史地震对于滑坡依旧有间接影响。这在地震活跃区的研究已经得以证明^[22-23],即地震后一定时间尺度内地质灾害活动强度会增强,称为震后效应。笔者在收集武定县地质灾害数据的基础上,分析了1995年武定6.5级地震前后长达53年的地质灾害活动情况,初步得出该次地震对于武定县境内的地质灾害活动强度影响长达23年^[24],同样说明楚雄州内中强地震活动对于滑坡灾害即便不能起直接作用也能起到间接影响。

表3 地震触发地质灾害类型统计表^[17-21]

Table 3 The statistical table of types of geological hazards triggered by earthquakes^[17-21]

震例	震级/(<i>M</i>)	烈度(度)	裂缝	崩塌	滑坡	地面塌陷	数据来源
1995年武定	6.5	IX、Ⅷ、Ⅶ	发育	发育	发育	发育	文献[15]
2000年姚安	6.5	Ⅷ、Ⅶ	发育	发育	发育	—	云南省地震局
2000年武定	5.1	Ⅵ	—	—	—	—	云南省地震局
2003年大姚	6.2	Ⅷ、Ⅶ	—	发育	发育	—	云南省地震局
2003年大姚	6.1	Ⅷ、Ⅶ	发育	发育	发育	—	云南省地震局
2004年双柏	5.0	Ⅵ	—	—	—	—	云南省地震局

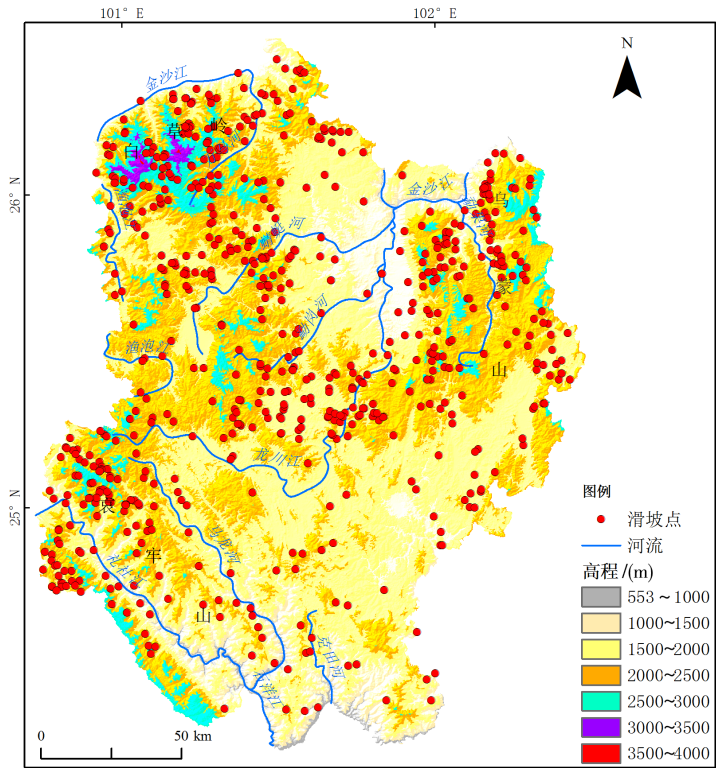


图3 楚雄州地形地貌图
Fig.3 The topographic map of Chuxiong Yi Autonomous Prefecture

3.2 易发性

根据公式(2)，将每一个滑坡点的高程、坡度、坡向、历史地震烈度、断裂距离、岩层的 FR_{ij} 值进行累加，算出该空间位置的易发性值 S 。然后利用ArcGIS空间分析平台进行易发性值的插值分析，按照自然间段点分级法将滑坡易发性分为高、中、低3个等级，最终形成滑坡易发性图(图5)。

(1)高易发区。滑坡高易发区主要集中于南华县南部和北部、楚雄市南部和北部、牟定县与禄丰市交汇区域、大姚和姚安的结合部、武定县的东部和西部及北部金沙江流域发育，围绕着断裂

石羊镇一大古岩、汤郎—易门、元谋—绿汁江断裂分布。灾害点密度高(图3、图5)，该区约占研究区总面积的38%，滑坡数量占总量的49%。区内岩层以白垩系、侏罗系的红色碎屑岩为主，构造强度活跃，1990年以来中强地震(5级以上地震)发生4次。

(2)中易发区。滑坡中易发区主要集中于大姚县北部、永仁县西部、元谋县的大部、禄丰市、双柏县的东部、以及楚雄市、南华县的中部。灾害点密度适中，约占全州总面积的48%，滑坡数量占总量的42%。区内主要以中高山及峡谷地貌为主，海拔整体较高，楚雄州最高点百草岭就位于此。除了大姚县距离活动断裂较远以外，区内

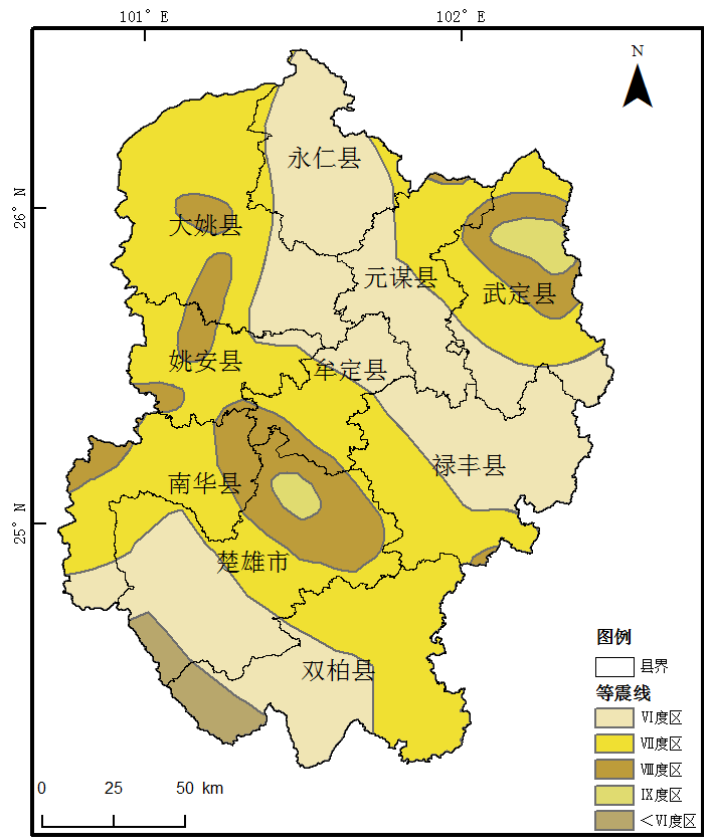


图 4 楚雄州等震线分布图

Fig.4 Isoseismal distribution in Chuxiong Yi Autonomous Prefecture

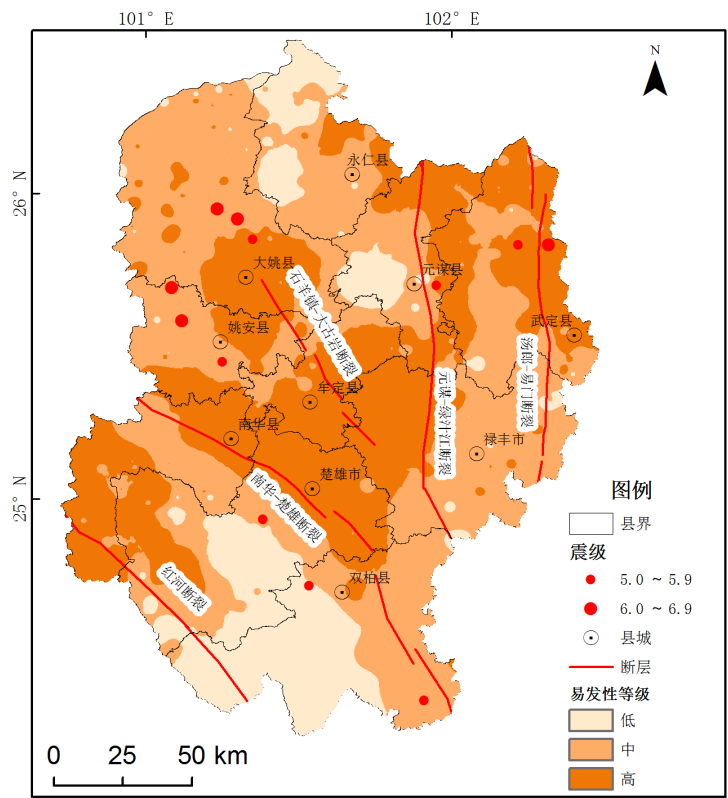


图 5 滑坡易发性与中强震分布图(1990 以来)

Fig.5 Landslide susceptibility and distribution of moderate and strong earthquakes since 1990

都有活动构造分布,且强度活跃,1990年以来5级以上中强震已累计发生7次。

(3)低易发区。滑坡低易发区主要分布于双柏县西部、楚雄市中部、元谋县中部、永仁县北部及西南部。灾害点密度低,面积约占全州总面积

的14%,滑坡数量占总量的9%。该区域断裂发育少,地质构造简单,1990年以来5级以上中强地震不活跃,仅发生2004年双柏5.0级地震,该次地震未诱发大型滑坡(表3)。

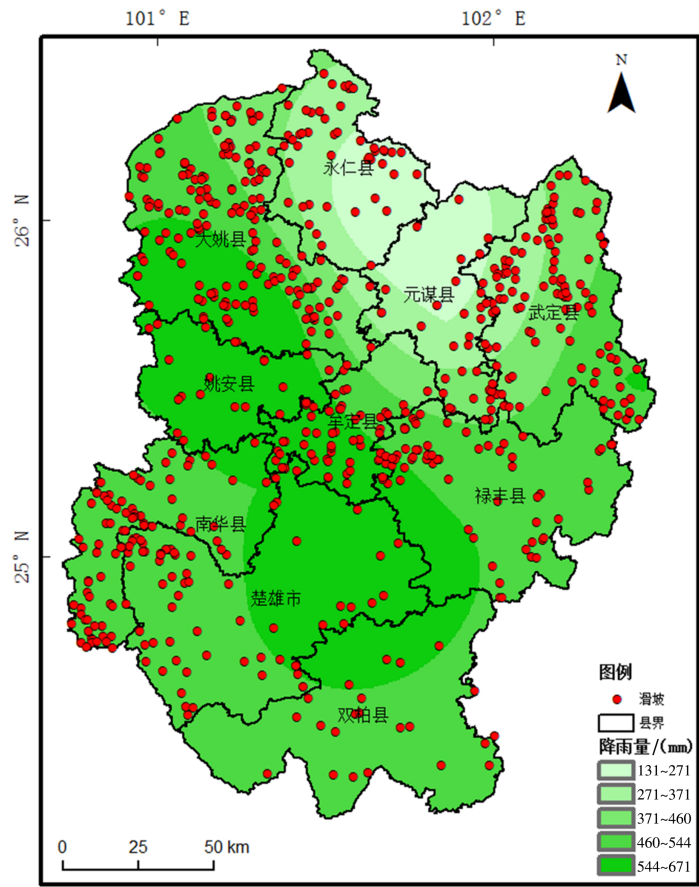


图6 降雨量年均值分布图

Fig.6 The annual mean distribution of rainfall

4 讨论

楚雄州滑坡分布主要受岩层和构造主导,并且在地形地貌、岩层基础上滑坡易发区主要分布于地震活动强、断裂带穿过或夹持地带,表明研究区滑坡可能多与构造活动(地震)有关系。从滑坡和降水量分布(图6)可见,降水量丰富的中部、南部地区,其灾害数量便不是最多的区域,尤其南部的双柏县,虽然其降雨量整体较武定和大姚县高,但其灾害数量则是最少的。降水量低的永仁县、武定县乃至降雨量最少的元谋县,其灾害数量、密度也高于双柏县。整体来看,滑坡数量与降雨量便不呈现出同增同减的空间分布关系,但在牟定县境内的石羊镇一大古岩断裂附近(图5、

图6),其降水量丰富,灾害也较为发育。

综合上述分析,笔者认为楚雄州滑坡发育得力于构造活动(地震)的单独作用或与降雨之间的耦合作用,两种作用共同诱发了楚雄州的滑坡发育。

5 结论

通过楚雄州滑坡发育特征分析,主要得到以下认识:

(1)滑坡主要优势于中高海拔、中低坡度、靠东方向的砂、泥岩地层发育,且在综合等震线的Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ区数量最多,断裂的夹持地带滑坡密度最高。岩层是影响滑坡分布的主要环境因素,其次是断裂和地貌,历史地震烈度对于滑坡有间

接影响。

(2)楚雄州滑坡高易发区主要围绕着断裂两侧发育,中易发区主要集中于大姚县北部、永仁县西部、元谋县的大部、禄丰市与双柏县的东部,历史地震活动强。

(3)楚雄州滑坡发育得力于构造活动(地震)的单独作用或与降雨之间的耦合作用,两种作用共同诱发了滑坡。未来在地震活动区应加强地质灾害调查、地震活动监测,避免滑坡复发、地震次生灾害造成人身伤亡和财产损失。

参考文献

- [1] 郑世华,王学良,彭炜.楚雄州地质灾害避险移民对策研究[J].地质灾害与环境保护,2013,24(4):106-110.
- [2] 余峙丹,张辉,盛永昆,等.楚雄州地质灾害降水特征及气象预警指标研究[J].云南大学学报:自然科学版,2011(S1):183-187.
- [3] 张加桂,何宝夫,张永双.云南姚安2009年7月9日 $M_s6.0$ 级地震震源过程和灾害特点[J].地质通报,2011,30(1):151-158.
- [4] 朱俊杰.滇中引水工程红层软岩力学特性研究及其隧道围岩分级[D].成都:成都理工大学,2013.
- [5] 吕建中.云南省武定县地质灾害特征分析[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
- [6] 王学良,盖艾鸿,刘静.基于DEM的云南楚雄市地质灾害区划研究[J].楚雄师范学院学报,2020,35(3):138-143.
- [7] 卢海峰.元谋断裂带晚第四纪活动性与地震地质灾害的关系[J].大地构造与成矿学,2021,45(3):478-491.
- [8] 桑议惠.楚雄州中小校园滑坡泥石流灾害风险评估[D].南京:南京信息工程大学,2016.
- [9] 郭孟贤.楚雄州地方志.楚雄州年鉴(2011年)[M].昆明:云南科技出版社,2011.
- [10] 沙海军,吕悦军,谢卓娟.新版中国地震综合等震线图的编制和特点[J].地壳构造与地壳应力文集,2018(00):1-5.
- [11] 王瑞琪,王学良,刘海洋,等.基于精细DEM的崩塌滑坡灾害识别及主控因素分析——以雅鲁藏布江缝合带加查—朗县段为例[J].工程地质学报,2019,27(5):1146-1152.
- [12] 梁世川,乔华,吕东,等.伊犁谷地地质灾害分布特征及主控因素分析[J].干旱区地理,2023,46(06):880-888.
- [13] 李郎平,兰恒星,郭长宝,等.基于改进频率比法的川藏铁路沿线及邻区地质灾害易发性分区评价[J].现代地质,2017,31(5):911-929.
- [14] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [15] 程政宁,李维俊,饶富春,等.再生之地.云南“10.24”武定地震救灾重建纪实[M].昆明:云南人民出版社,2000.
- [16] 丁彦慧,王余庆,孙进忠.地震崩滑与地震参数的关系及其在边坡震害预测中的应用[J].地球物理学报,1999,42(S1):101-107.
- [17] 云南省地震局.2000年01月15日姚安6.5级地震灾害损失评估报告[R].昆明:云南省地震局,2000.
- [18] 云南省地震局.2000年08月21日武定5.1级地震灾害损失评估报告[R].昆明:云南省地震局,2000.
- [19] 云南省地震局.2003年07月21日大姚6.2级地震灾害损失评估报告[R].昆明:云南省地震局,2003.
- [20] 云南省地震局.2003年10月16日大姚6.1级地震灾害损失评估报告[R].昆明:云南省地震局,2003.
- [21] 云南省地震局.2004年12月26日双柏5.0级地震灾害损失评估报告[R].昆明:云南省地震局,2004.
- [22] 杨志华,兰恒星,张永双,等.强震区震后地质灾害长期活动性研究综述[J].地质力学学报,2017,23(5):743-753.
- [23] 文广超,苏林雪,谢洪波,等.“5.12”汶川地震前后四川省主要地质灾害时空发育规律[J].地质科技通报,2021,40(4):143-152.
- [24] 李圣,卿元华,庄儒新,等.云南楚雄州地震活动与地质灾害发育的关系[J].华北地震科学,2023,41(3):15-21.