

张杰, 张卫锋, 魏蕾, 等. 滇东岩溶高原山区地质灾害分布规律[J]. 中国岩溶, 2024, 43(6): 1350-1361.

DOI: 10.11932/karst20240612

滇东岩溶高原山区地质灾害分布规律

张杰^{1,2,3,4}, 张卫锋^{1,2,3}, 魏蕾^{1,2,3,4}, 代旭升^{1,2,3}, 张文鋈^{1,2,3}

(1. 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216; 2. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室(筹), 云南昆明 650216; 3. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 云南昆明 650216; 4. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093)

摘要: 文章是在1:5万地质灾害详细调查、精细化调查与风险评价的基础上, 针对滇东高原高山峡谷、岩溶石山区的特点, 通过开展数据统计与定性分析相结合的方法, 从地形地貌、斜坡结构类型、地质构造、工程地质岩组等方面, 详细阐述研究区地质灾害分布特征及规律。结果表明: (1) 研究区地质灾害分布特征呈由北向南逐渐递减的态势, 北部高山峡谷—河谷斜坡区地质灾害最发育, 是中部高原盆地地质灾害发育数量的2~3倍; (2) 研究区地质灾害主要分布在坡向90°~135°、225°~270°以及270°~315°地段, 总数4 249处, 占地质灾害总数的39.88%, 与北东—南西向、南北向的构造形迹具有一定相关性; (3) 在断裂带交汇处或主断裂走向发生变化地段地质灾害最发育, 且走滑型逆断裂上、下两盘地质灾害分布具有明显的“上盘效应”; (4) 研究区含泥岩、页岩软弱夹层的顺层斜坡体中灾害最为发育, 有2 995处, 占灾害总数的31.94%; 正交结构的斜坡体没有天然的介质分界面, 不易形成贯通性的结构滑动面, 地质灾害不发育, 仅901处, 占灾害总数的9.61%; (5) 含软弱夹层的碳酸盐岩组, 受地表(下)水影响强烈, 易形成“上硬下软、头重脚轻”的易灾结构体, 是研究区地质灾害最为发育的岩组。

关键词: 岩溶高原; 地质灾害; 分布规律; 上盘效应; 易灾结构体

创新点: 滇东岩溶高原山区地质灾害分布与构造形迹(包括断裂走向、斜坡坡向等)具有相关性, 主控断裂两侧地质灾害呈叠瓦状展布, 在断裂交汇处的钝角方向灾害数量明显优于锐角方向的灾害数量, 且走滑型逆断裂上、下两盘地质灾害分布具有明显的“上盘效应”。

中图分类号: P694; P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)06-1350-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

滇东高原面位于云南东部、贵州西部, 面积13.91万km², 属典型的岩溶高原山区^[1](图1)。在区域构造活动板块上属于青藏高原东南缘的川滇和华南板块交界部位^[2], 该部位是中国大陆晚第四纪构造

变形和强震活动最强烈的地区, 处在该部位的滇东高原地区, 经历了多次构造运动, 其形迹复杂, 地震高发、频发, 随着近年来人类社会经济的不断发展, 对地质环境的扰动不断加大, 滇东高原区地质灾害较为发育, 每年都有地质灾害发生导致人员伤亡, 典型案例有: 2024年1月22日, 滇东北镇雄县塘房镇

资助项目: 云南省地质灾害综合防治体系建设(2013-2020年); 云南省应急管理专家组课题研究——云南省地质灾害应急监测预警及处置措施研究(YNYJZJZ03-2017-01); 中国地质调查局县(市、区)地质灾害详细调查计划(2013-2016年)

第一作者简介: 张杰(1982—), 男, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查与评价工作。E-mail: ynsghszj@163.com。

通信作者: 张卫锋(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查评价工作。E-mail: zhangwf2006@163.com。

收稿日期: 2024-02-10

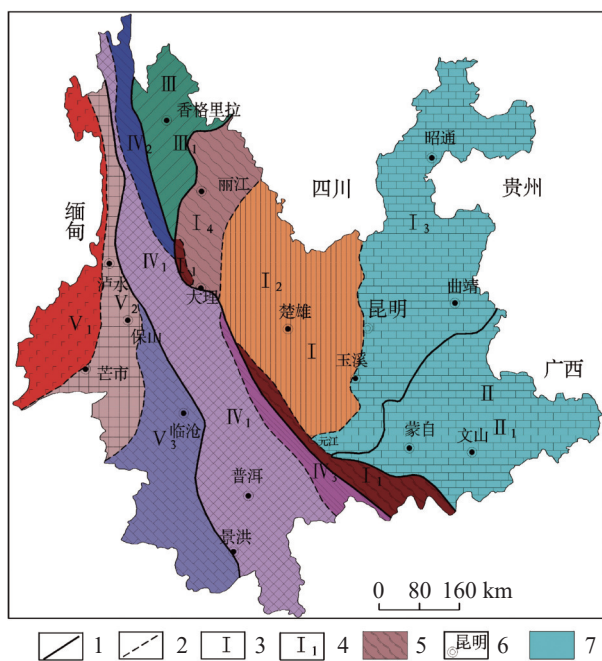


图1 云南省大地构造分区图

1.一级构造单元界线 2.二级构造单元界线 3.一级构造单元代号 4.二级构造单元代号 5.哀牢山变质带 6.州市政府驻地 7.研究区(I.扬子准地台构造单元; II.华南褶皱系构造单元; III.松潘—甘孜褶皱系构造单元; IV.唐古拉—昌都—兰坪—思茅褶皱系构造单元; V.冈底斯—念青唐古拉褶皱系构造单元)

Fig. 1 Geotectonic zoning of Yunnan Province

1. boundary of first-level tectonic unit 2. boundary of secondary tectonic unit 3. code of first-level tectonic unit 4. code of secondary tectonic unit 5. metamorphic belt of Ailao mountain 6. municipal governments of autonomous prefectures 7. the study area (I. tectonic unit of the Yangtze platform; II. tectonic unit of South China fold system; III. tectonic unit of Songpan-Ganzi fold system; IV. tectonic unit of Tanggula-Changdu-Lanping-Simao fold system; V. tectonic unit of Gangdisi-Nyainqentanglha fold system)

凉水村发生滑坡,造成18户村民房屋被掩埋,44人遇难;2015年8月22日,滇东区南部的富宁县发生山体滑坡,造成5人死亡、7人失踪;2012年10月4日,滇东区北部的彝良县油房小学发生滑坡,造成19人死亡;2013年1月11日,滇东北镇雄县发生特大型山体滑坡,造成46人死亡;2009年4月26日,昭通市威信县扎西镇小坝村羊梯岩发生山体滑坡,花家坝煤矿生活区的办公楼及新建职工宿舍被全部掩埋,共造成20人死亡、2人受伤;2012年彝良“9.07”地震、2014年鲁甸“8.03”地震所诱发诸多的次生地质灾害等。

早在20世纪,前人就在该研究区开展了水工环地质工作,并取得了一系列成果认识。在区域研究方面:1997—2013年,王宇等^[3-5]多次从该研究区的

岩溶发育特征、地下水资源勘查及有效开发利用等方面进行了深入研究,并对各类重大环境地质问题的防治提出了综合对策及专项措施建议;2000—2015年,该研究区陆续完成了1:10万地质灾害调查与区划工作和1:5万地质灾害详细调查工作,建立了地质灾害群测群防网络管理和巡查监测系统;2020—2023年,该研究区完成了1:5万地质灾害精细化调查与风险评价工作,为地质灾害防治和国土空间规划用途管制提供地质基础。在专项(单体)研究方面:张超等^[6]在研究区北部昭通地区开展了基于多元线性回归模型的地质灾害易发性评价工作,建立了地质灾害易发性评价模型;张杰等^[7]对彝良“9.07”地震次生地质灾害特征进行了分析,并深入剖析单个灾害体的破坏模式及运动特征,初步探讨该研究区典型地质灾害形成机制和成灾模式。

以上成果仅仅是对单个地质灾害体的认识,面上的分析总结也是局部性的,具有一定局限性,对滇东高原山区地质灾害分布规律和内在成因机制缺乏深入的专门研究和总结,面对严峻的防灾减灾形式,有必要对该研究区进行专题研究,以提高研究水平,满足现实需要。本文在该研究区完成1:5万地质灾害详细调查和1:5万地质灾害精细化调查与风险评价的基础上,结合近几年的排查、巡查、核查情况,从地形地貌、地质构造、岩土体类型等方面详细阐述了地质灾害分布规律,并剖析出分布原因,以期有效指导滇东高原山区地质灾害防治及国土空间规划用途管制工作提供科学依据及参考。

1 研究区概况

研究区属于典型的岩溶高原山区,最高点为马鬃岭,海拔4344m,最低点为河口县红河出境处水面,海拔76.4m,相对高差4267.6m,地势北高南低、西高东低,呈阶梯状递减。研究区中部及南部区内高原面保存比较完整,地势低缓,河谷开阔,盆地众多;北部及东部边缘地带分别受金沙江、南盘江等河流深切,高原面遭受侵蚀切割,相对高差达1000m,形成切割深度不同的高原面—高中山—峡谷地貌景观^[8](图2)。

区内地层发育齐全,自元古界至第四系均有出露,研究区地层岩性主要为三叠纪、二叠纪、石炭纪及泥盆纪的灰岩、白云岩,其岩组类型主要以碳酸盐

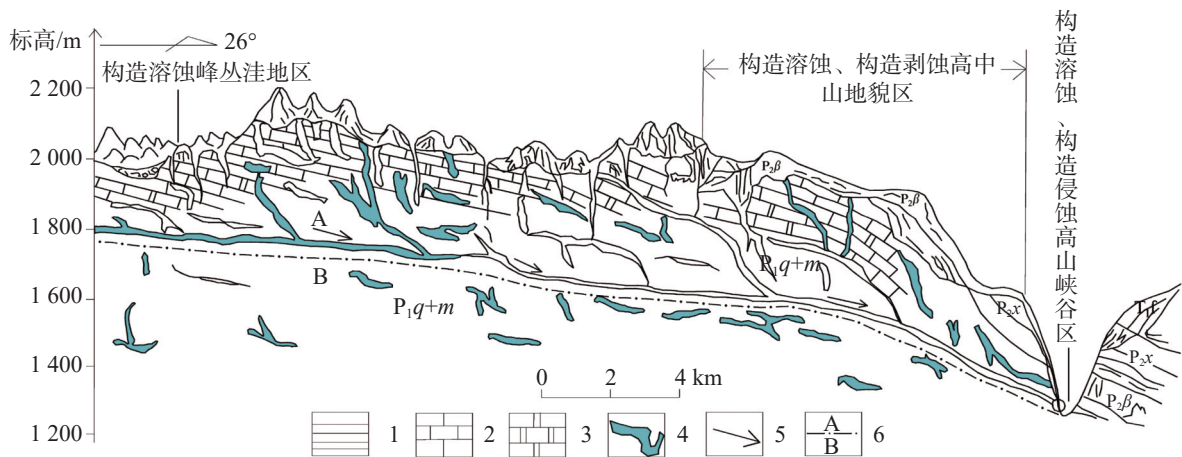


图2 滇东北高原面边缘(河谷斜坡)示意图^[5]

1.泥页岩 2.灰岩 3.白云岩 4.岩溶洞穴 5.地下水流向 6.岩溶分带界线(A.强岩溶发育带,B.弱岩溶发育带)

Fig. 2 Schematic diagram of the plateau edge (valley slope) in northeast Yunnan

1. mud shale 2. limestone 3. dolomite 4. karst cave 5. groundwater flow direction 6. karst zoning boundary (A. zone of strong karst development, B. zone of weak karst development)

岩组为主,占研究区总面积的87.4%。区内地质构造发育,构造形迹以褶皱和断裂为主,其中北部和东部以南北向、北东向构造为主,南部以弧形构造为主,规模较大的断裂主要有昭通鲁甸—龙头山断裂、小江断裂、红河断裂、弥勒—师宗断裂、元谋绿汁江断裂、普渡河断裂、南盘江断裂、文麻断裂、富宁断裂等。受构造影响,各岩层空间展布总体呈北东—南西向,局部揉皱、绕曲现象比较典型^[9],不同形态的构造形迹控制着研究区主体岩组展布及地质灾害分布情况。

2 地质灾害分布规律

2.1 地质灾害类型

研究区地质灾害主要有滑坡、崩塌、泥石流、岩溶塌陷4种,灾害总数10 655处,其中滑坡7 157处,占灾害总数的67.2%,崩塌2 219处,占灾害总数的20.8%,泥石流927处,占灾害总数的8.7%,岩溶塌陷352处,占灾害总数的3.3%(图3)。

2.2 总体分布特征

研究区地质灾害分布情况呈北多南少态势,平均密度8.55处·(100 km²)⁻¹。其中北部高山峡谷-河谷斜坡地区地质灾害最为发育,是中部高原面地区地质灾害发育数量的2~3倍。

研究区各类地质灾害分布差异明显,其中,滑坡

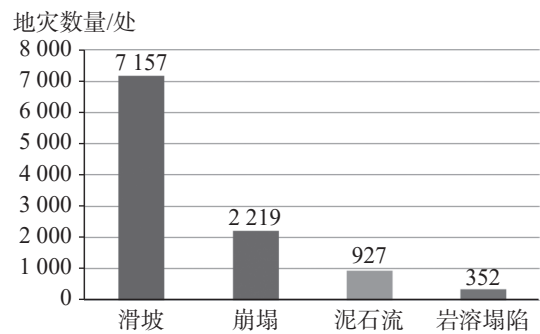


图3 地质灾害类型统计图

Fig. 3 Types of geological disasters

平均密度5.75处·(100 km²)⁻¹,主要分布在北部和南部高原面边缘、河谷斜坡地带以及昆明周边一带,东部高原面及其他地区零星分布(图4a);崩塌平均密度1.78处·(100 km²)⁻¹,主要分布在北部高原面边缘、深切河谷斜坡地带,其他地区零星分布(图4b);泥石流平均密度0.74处·(100 km²)⁻¹,主要分布在金沙江、牛栏江两岸,其他地区零星分布(图4c);岩溶塌陷平均密度0.28处·(100 km²)⁻¹,主要分布在东部的曲靖,石林与泸西交界的圭山一带以及南部的个旧周边,其他地区零星分布(图4d)。

研究区所涉及的各个县(市、区)均有地质灾害分布,从地质灾害分布来看,位于北部高原面边缘、河谷斜坡一带,特别是彝良—鲁甸地区,地形起伏较大,地质灾害最发育;位于东部高原面的曲靖、文山一带,地形相对平缓,灾害发育较少(图5)。从灾害发育密度来看,北部昭通一带地质灾害密度最大,尤

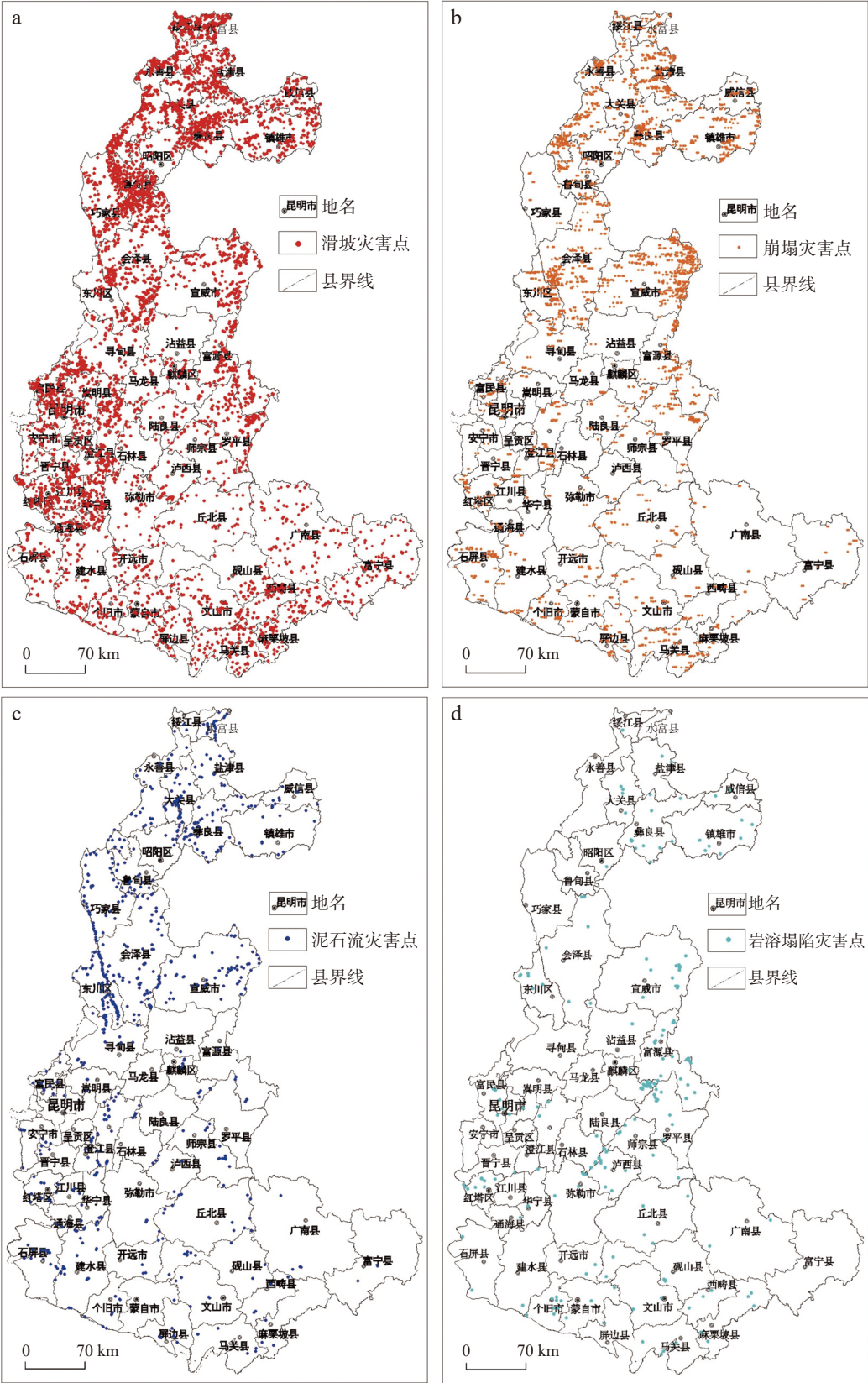


图 4 地质灾害分布图

a.滑坡地质灾害分布图 b.崩塌地质灾害分布图 c.泥石流地质灾害分布图 d.岩溶塌陷地质灾害分布图

Fig. 4 Distribution of geological disasters in the study area

a.distribution of landslides b.distribution of collapses c.distribution of debris flow d.distribution of karst collapses)

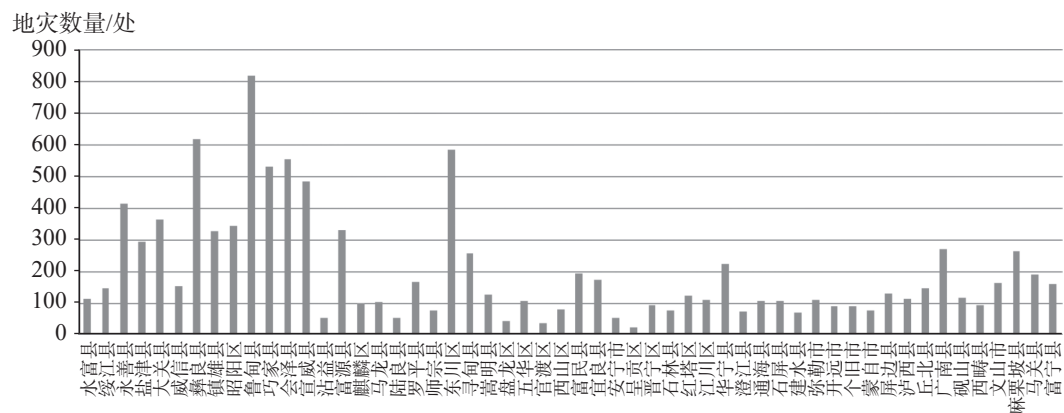


图5 研究区各县地质灾害数量发育对比图

Fig. 5 Comparison of the quantity of geological disaster development in counties of the study area

其是鲁甸县,灾害密度可达 $55.01 \text{ 处} \cdot (100 \text{ km}^2)^{-1}$;中部的昆明一带地质灾害密度中等;南部的文山一带地质灾害密度较小,建水县灾害密度仅为 $1.82 \text{ 处} \cdot (100 \text{ km}^2)^{-1}$ (图6)。研究区北部地质灾害明显多于东部及南部地区,其原因除了北部地形切割深,地质环境条件差之外,还与近几年鲁甸、彝良地震有关,频繁的地震使得北部地区“山剥皮”现象突出^[10-11],受降雨的影响,地质灾害多发、频发、易发,地质灾害链式效应较明显。

2.3 区间变化规律

(1)地形地貌与地质灾害

根据地形切割及地貌形态差异性,将研究区地形地貌分为构造溶蚀高山峡谷地貌区、构造侵蚀低中山地貌区、构造溶蚀高中山地貌区、构造剥蚀高中山地貌区、构造溶蚀低中山地貌区、构造溶蚀峰丛洼地地貌区、高原盆地地貌区七类。

滇东北及滇东南以构造溶蚀高山峡谷地貌区、

构造溶蚀高中山地貌区为主,而滇中及滇东以构造溶蚀低中山地貌区、构造溶蚀峰丛洼地地貌区为主。南北形态各异的地形地貌特征对地质灾害的分布控制明显。

以高原面边缘及河谷斜坡地带为主的滇东北地区,地形剧烈起伏,河谷深切,总体构成谷(盆)岭相间的地貌格局,地质灾害较为发育,其中构造溶蚀高中山地貌区地质灾害最为发育,有3161处,占灾害总数的29.67%。位于滇中及滇东的高原面地区,其高原面形态比较完整,地形起伏缓和,以高原盆地为特征,山体低矮,高差一般200~500 m,地质灾害不发育,仅87处,占灾害总数的0.82%。研究区各地貌区地质灾害分布情况及数量详见图7、表1。在地形坡度方面,研究区地质灾害主要分布在地形坡度为 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的区段,有7028处,占地质灾害总数的66.62%;大于 40° 的地形地质灾害发育最少,仅有797处,占地质灾害总数的7.55%(图8,图9)。在地

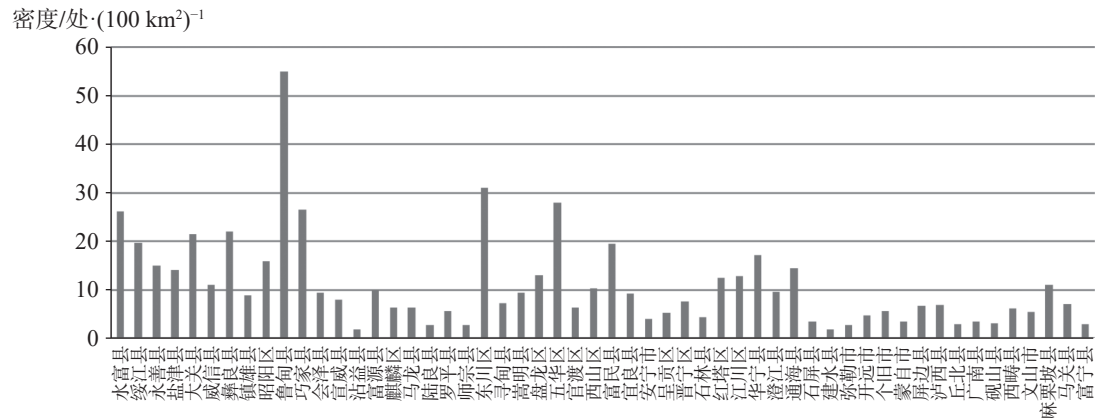


图6 研究区各县地质灾害发育密度统计图

Fig. 6 Statistics of the density of geological disaster development in counties of the study area

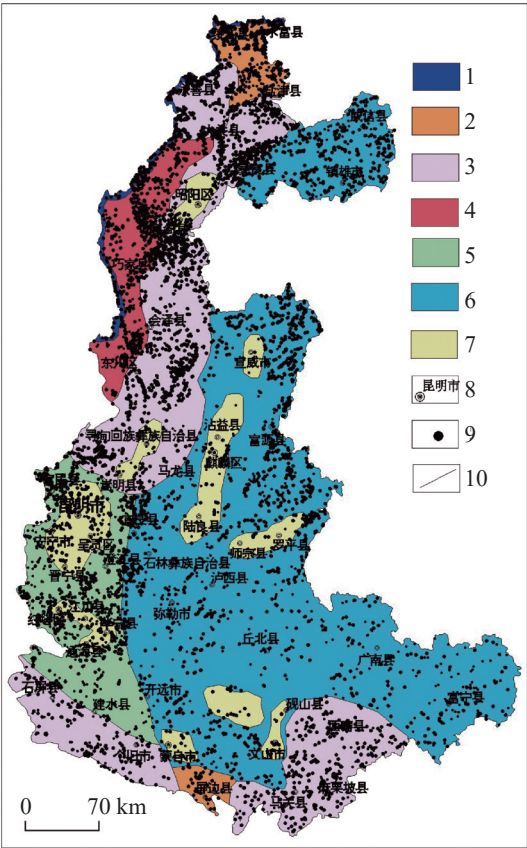


图 7 研究区各地貌区地质灾害分布图

1.构造溶蚀高山峡谷地貌区 2.构造侵蚀低中山地貌区 3.构造溶蚀高中山地貌区 4.构造剥蚀高中山地貌区 5.构造溶蚀低中山地貌区 6.构造溶蚀峰丛洼地地貌区 7.高原盆地地貌区 8.地名 9.灾害点 10.分区界线

Fig. 7 Distribution of geological disasters in various landforms of the study area

1.geomorphic area of tectonic erosion alpine canyon 2.geomorphic area of tectonic erosion low-medium mountain 3.geomorphic area of tectonic erosion high-medium mountain 4.geomorphic area of tectonic denudation high-medium mountain 5.geomorphic area of tectonic dissolution low-medium mountain 6.area of tectonic dissolution peak-cluster depression 7.geomorphic area of plateau basin 8.geographical names 9.disaster sites 10.zoning boundaries

表 1 研究区不同地貌区地质灾害分布特征统计表

Table 1 Statistics of distribution characteristics of geological disasters in different landforms of the study area

分区及代号	面积/km ²	灾害类型及数量/个					占灾害总数 /%	灾害密度 /个·km ⁻²
		滑坡	崩塌	泥石流	岩溶塌陷	小计		
构造溶蚀高山峡谷地貌区	3 581	356	214	237	0	807	7.57	0.23
构造侵蚀低中山地貌区	6 813	932	98	59	0	1 089	10.22	0.16
构造溶蚀高中山地貌区	15 937	1 894	841	287	139	3 161	29.67	0.2
构造剥蚀高中山地貌区	9 766	1 368	553	149	0	2 070	19.43	0.21
构造溶蚀低中山地貌区	9 275	984	379	54	98	1 515	14.22	0.16
构造溶蚀峰丛洼地地貌区	66 349	1 577	134	141	74	1 926	18.08	0.03
高原盆地地貌区	12 737	46	0	0	41	87	0.82	0.01
合计	124 458	7 157	2 219	927	352	10 655	100	0.09

形坡向方面,研究区地质灾害主要分布在坡向为 90°~135°、225°~270°以及 270°~315°地段(图 10,图 11) 总体呈北西—南东向和南西向展布,与北东—南西向、南北向的构造形迹具有一定相关性。

(2)斜坡结构与地质灾害

研究区地质灾害分布特征除了与宏观地形地貌类型有关外,还与微观斜坡的产出状态(即斜坡结构)相关。根据岩层倾向与地形斜坡坡向夹角的关系,可分为横向斜坡、顺向斜坡、正交斜坡、斜交斜坡以及逆向斜坡。经统计分析,在结构类型为顺向和斜交的斜坡体中地质灾害较发育,尤其是在具有软弱夹层的顺向斜坡体中灾害最为发育,有 2 995 处,占灾害总数的 31.94%;而在横向和正交结构的斜坡体,其内部没有天然的介质分界面,不易形成贯通性的结构滑动面,因此灾害不发育,在正交结构的斜坡中,有地质灾害 901 处,占灾害总数的 9.61%(表 2)。

(3)地质构造与地质灾害

研究区具有一定规模的断裂主要有十余处,但最为典型的为滇东北巧家—莲峰断裂、昭鲁断裂,滇中小江断裂以及滇东南的建水—蒙自断裂。研究区断裂多以张性断裂为主,具导水性,为地下水的径流提供了良好的地下通道^[12];受主控构造的影响,次一级构造节理、裂隙较为发育,呈不规则的网状发育,受岩体卸荷影响,在自身重力作用下易发生滑移式崩塌或岩质滑坡。

研究区地质构造对地质灾害分布具有重要影响,地质灾害基本上沿主要构造带集中分布,如滇东北巧家—莲峰断裂及昭鲁断裂两侧,地质灾害分布最为密集(图 12)。通过统计分析,研究区地质构造对地质灾害的控制效应主要表现在:①在断裂破碎带

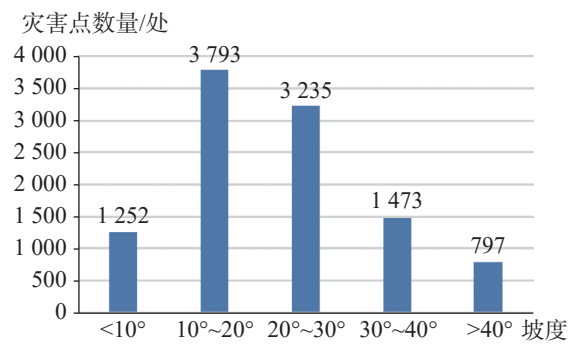


图 8 研究区各坡度段地质灾害发育统计图

Fig. 8 Statistics of geological disasters developed at different slope sections in the study area

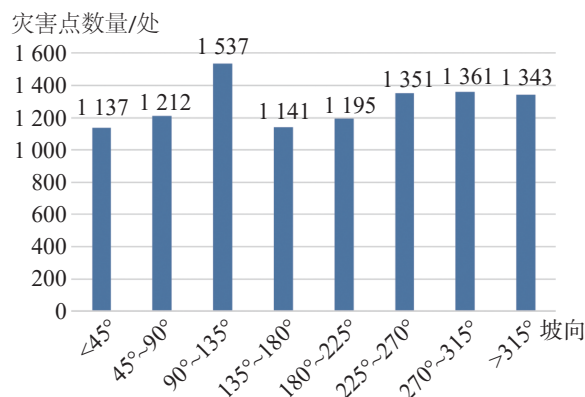


图 10 研究区各坡向地质灾害发育统计图

Fig. 10 Statistics of geological disaster development in each slope direction in the study area

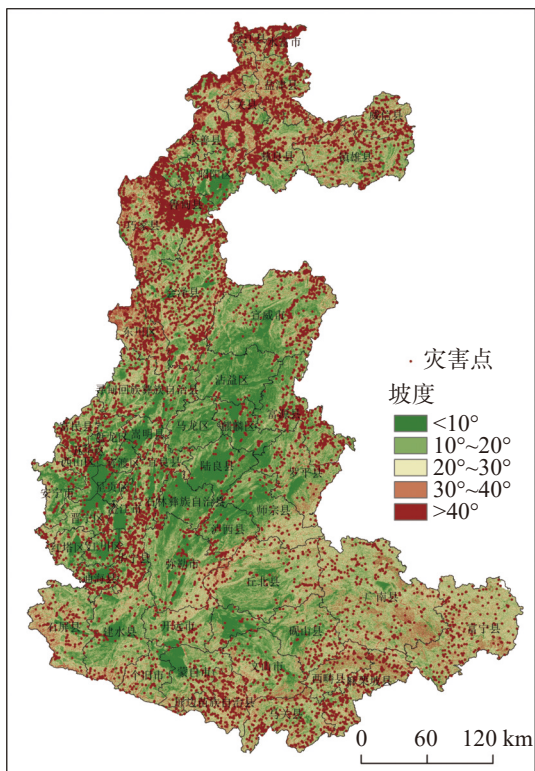


图 9 研究区地形坡度与地质灾害关系图

Fig. 9 Relationship between topographic gradients and geological disasters in the study area

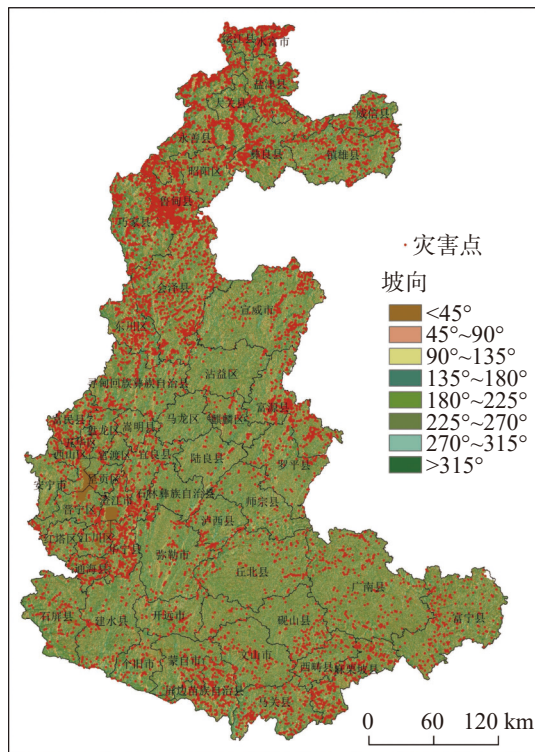


图 11 研究区地形坡向与地质灾害关系图

Fig. 11 Relationship between topographic slope directions and geological disasters in the study area

表 2 研究区不同斜坡结构类型地质灾害数量对比表

Table 2 Comparison of quantity of geological disasters in different types of slope structures in the study area

斜坡结构类型	滑坡		崩塌		合计	
	数量	百分比	数量	百分比	数量	百分比
横向斜坡	845	11.81	78	3.52	923	9.84
顺向斜坡	1 638	22.89	1 357	61.15	2 995	31.94
正交斜坡	847	11.83	54	2.43	901	9.61
斜交斜坡	2 264	31.63	689	31.05	2 953	31.50
逆向斜坡	1 563	21.84	41	1.85	1 604	17.11
合计	7 157	100.00	2 219	100.00	9 376	100.00

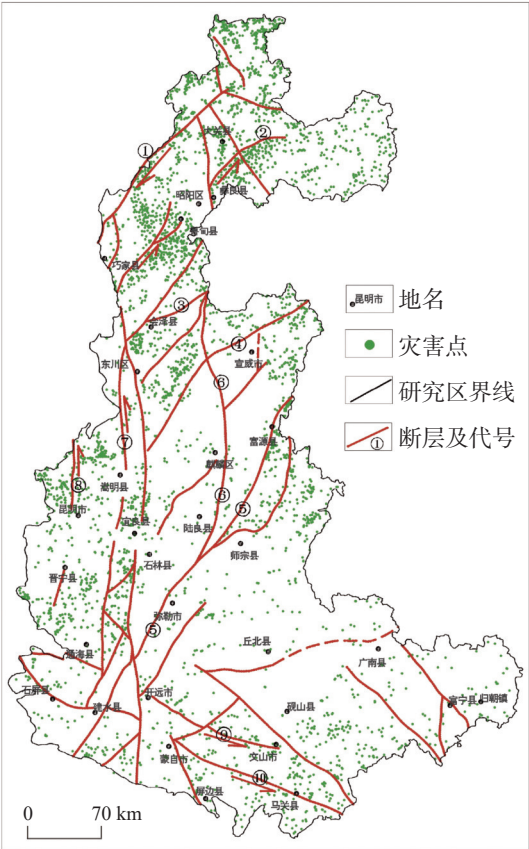


图 12 研究区地质灾害与地质构造关系分布图

①巧家—莲峰断裂 ②昭鲁断裂 ③会泽断裂 ④寻甸—来宾铺断裂 ⑤弥勒—富源断裂 ⑥曲靖—昭通断裂 ⑦小江断裂 ⑧普渡河断裂 ⑨文麻断裂 ⑩建水—蒙自断裂

Fig. 12 Distribution of geological disasters and geological structures in the study area

① Qiaojia-Lianfeng fracture ② Zhaolu fracture ③ Huize fracture ④ Xundian-Laibinpu fracture ⑤ Mile -Fuyuan fracture ⑥ Qujing -Zhaotong fracture ⑦ Xiaojiang fracture ⑧ Puduhe fracture ⑨ Wenma fracture ⑩ Jianshui-Mengzi fracture

附近,地质灾害呈线状或条带状集中分布,在断裂不断活动状态下,灾害多次活动迹象明显;②地质灾害分布与构造形迹(包括断裂走向、斜坡坡向等)具有一定的相关性,在主导断裂两侧地质灾害呈叠瓦状展布;③在断裂带交汇处或主导断裂走向发生变化地段(如会泽断裂与小江断裂、寻甸—来宾铺断裂与曲靖—昭通断裂交汇处等部位)地质灾害较为发育,且在断裂交汇处的钝角方向灾害数量明显多于锐角方向的灾害数量;④走滑型逆断裂上、下两盘地质灾害分布差异较大,具有明显的“上盘效应”^[13-17](图 13),例如,昭通—鲁甸断裂(彝良段),上盘与下盘的地质灾害分布数量有较大差别,上盘 107 处,下盘 46 处,上盘灾害密度是下盘灾害密度的 2.6~3.9 倍。

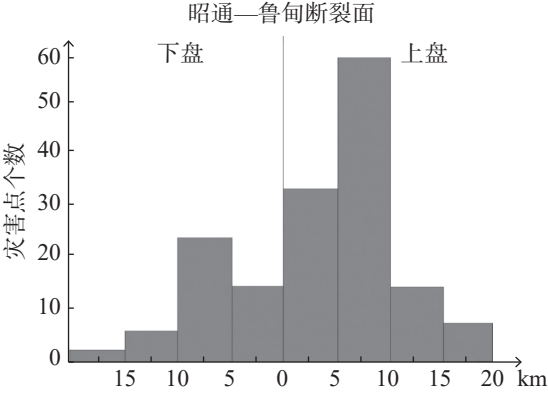


图 13 昭通—鲁甸断裂(彝良段)上、下盘灾害关系图

Fig. 13 Relationship between the geological disasters occurring in the upper plate and the lower plate in Zhaotong-Ludian fracture (Yiliang section)

(4)工程地质岩组与地质灾害

岩土体是地质灾害产生的物质基础,其类型、性质、结构、构造等对灾害分布有重要影响^[18]。根据岩体结构面特征,将研究区划分为 9 个工程地质岩组类型,每个工程地质岩组均有地质灾害分布(图 14)。

层状中等岩溶化碳酸盐岩夹碎屑岩岩组是研究区地质灾害最为发育的岩组,有 3 573 处,占灾害总数的 33.53%。主体岩组(碳酸盐岩岩组)在构造作用下节理裂隙较为发育,地表(下)水沿着岩体节理裂隙入渗到岩体底部,长期的浸润作用使得夹层发生软化,逐渐发展成为崩塌(滑坡)的滑移带,致使斜坡岩体处于“上硬下软、头重脚轻”的状态,加速软岩的蠕变、滑动,在水动力作用下,斜坡岩体抗剪强度逐渐降低,形成易灾结构体,最终在重力作用下沿着软弱夹层层理面形成滑移式崩塌或层间滑动的岩质滑坡等地质灾害。

从灾害数量来看,以层状中等岩溶化碳酸盐岩夹碎屑岩岩组、层状碎屑岩岩组、层状碎屑岩夹碳酸盐岩岩组中地质灾害最为发育,分别达 3 573 处、2 525 处和 1 541 处,分别占地质灾害总数的 33.53%、23.70% 和 14.46%;地质灾害发育最少的为层状坚硬中等风化变质岩岩组,仅 109 处,占地质灾害总数的 1.02%(图 15)。

研究区碳酸盐岩组分布区地表还分布厚度不均的红黏土,对地质灾害(滑坡)的发育有很大影响。根据《云南岩溶石山地区地下水资源勘查与生态环境地质调查报告》显示,研究区的红黏土具有含水量高、重度低、塑性高、膨胀性强等物理特征,在天然

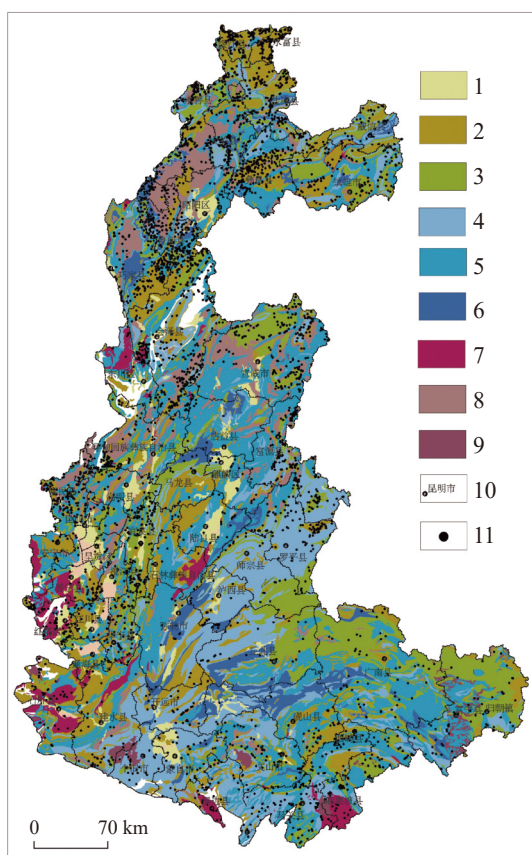


图 14 研究区地质灾害与工程地质岩组关系分布图

1.松散土体 2.层状碎屑岩岩组 3.层状碎屑岩夹碳酸盐岩岩组 4.层状中等岩溶化碳酸盐岩夹碎屑岩岩组 5.层状强岩溶化碳酸盐岩岩组 6.层状软硬相间的碳酸盐岩碎屑岩岩组 7.层状坚硬中等风化变质岩岩组 8.块状坚硬弱风化侵入岩岩组 9.碎裂状较坚硬中等风化喷出岩岩组 10.地名 11.地质灾害点

Fig. 14 Relationship between geological disasters and engineering geological rock groups in the study area

1.loose soil 2.stratified clastic rock group 3.stratified rock group of clastic rocks interbedded with carbonate rocks 4.stratified and moderately karstified rock group of carbonate rocks interbedded with clastic rocks 5.stratified and strongly karstified carbonate rock group 6.stratified carbonate clastic rock group with alternating hard and soft layers 7.stratified hard metamorphic rock group weathered moderately 8.massive hard intrusive rock group weathered weakly 9.hard and moderately weathered extrusive rock group in the form of fragmentation 10.place names 11.geological disaster sites

状态下比较稳定,但在边坡开挖暴露或裸露环境下,红黏土体积收缩变形强烈,内部结构碎裂化现象较突出;在雨季,随着含水量的增加,其土体强度会大大降低,常造成地表冲刷、水土流失、土壤侵蚀、石漠化以及一系列由红黏土引发的滑坡等工程地质问题^[19](图 16)。

从地质灾害发育密度来看,在层状碎屑岩岩组中地质灾害发育密度最大,其次为层状中等岩溶化

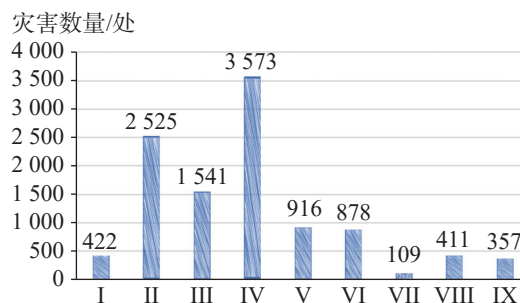


图 15 研究区各岩组灾害分布对比图

I. 松散土体 II. 层状碎屑岩岩组 III. 层状碎屑岩夹碳酸盐岩岩组 IV. 层状中等岩溶化碳酸盐岩夹碎屑岩岩组 V. 层状强岩溶化碳酸盐岩岩组 VI. 层状软硬相间的碳酸盐岩碎屑岩岩组 VII. 层状坚硬中等风化变质岩岩组 VIII. 块状坚硬弱风化侵入岩岩组 IX. 碎裂状较坚硬中等风化喷出岩岩组

Fig. 15 Comparison of geological disaster distribution of different rock groups in the study area

I. loose soil II. stratified clastic rock group III. stratified rock group of clastic rocks interbedded with carbonate rocks IV. stratified and moderately karstified rock group of carbonate rocks interbedded with clastic rocks V. stratified and strongly karstified carbonate rock group VI. stratified carbonate clastic rock group with alternating hard and soft layers VII. stratified hard metamorphic rock group weathered moderately VIII. massive hard intrusive rock group weathered weakly IX. hard and moderately weathered extrusive rock group in the form of fragmentation



图 16 石林境内治理后的红黏土滑坡再次滑动

Fig. 16 Reactivation of red clay landslides after treatment in Shilin

碳酸盐岩夹碎屑岩岩组,密度分别为 $0.24 \text{ 处} \cdot \text{km}^{-2}$ 、 $0.18 \text{ 处} \cdot \text{km}^{-2}$;层状坚硬中等风化变质岩岩组的地质灾害发育密度最小,仅为 $0.01 \text{ 处} \cdot \text{km}^{-2}$ (图 17)。

3 结 论

(1)以高原面边缘及河谷斜坡地带为主的滇东北地区,地形剧烈起伏,河谷深切,致使地质灾害分布情况总体呈现出由北向南逐渐递减的态势,平均密度 $8.55 \text{ 处} \cdot (100 \text{ km}^2)^{-1}$,北部高山峡谷—河谷斜坡区地质灾害最发育,是中部高原盆地地质灾害发育

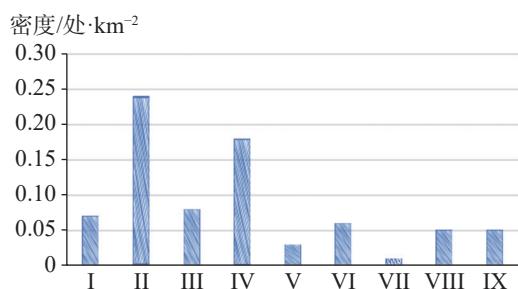


图 17 研究区各岩组灾害发育密度对比图

I. 松散土体 II. 层状碎屑岩岩组 III. 层状碎屑岩夹碳酸盐岩岩组 IV. 层状中等岩溶化碳酸盐岩夹碎屑岩岩组 V. 层状强岩溶化碳酸盐岩岩组 VI. 层状软硬相间的碳酸盐岩碎屑岩岩组 VII. 层状坚硬中等风化变质岩岩组 VIII. 块状坚硬弱风化侵入岩岩组 IX. 碎裂状较坚硬中等风化喷出岩岩组

Fig. 17 Comparison of density of geological disaster development of different rock groups in the study area

I. loose soil II. stratified clastic rock group III. stratified rock group of clastic rocks interbedded with carbonate rocks IV. stratified and moderately karstified rock group of carbonate rocks interbedded with clastic rocks V. stratified and strongly karstified carbonate rock group VI. stratified carbonate clastic rock group with alternating hard and soft layers VII. stratified hard metamorphic rock group weathered moderately VIII. massive hard intrusive rock group weathered weakly IX. hard and moderately weathered extrusive rock group in the form of fragmentation

数量的 2~3 倍。

(2) 研究区地质灾害主要分布在坡向 $90^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 、 $225^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 以及 $270^{\circ}\sim 315^{\circ}$ 地段, 总数 4 249 处, 占地质灾害总数的 39.88%, 总体呈北西—南东向和南西向展布, 与北东—南西向、南北向的构造形迹具有相关性。

(3) 在断裂带交汇处或主断裂走向发生变化地段地质灾害最发育, 且走滑型逆断裂上、下两盘地质灾害分布具有明显的“上盘效应”, 特别是在地震作用下, 上盘地质灾害发育数量明显高于下盘数量。

(4) 研究区含泥岩、页岩软弱夹层的顺向斜坡体中灾害最为发育, 有 2 995 处, 占灾害总数的 31.94%; 在正交结构的斜坡体中, 其内部没有天然的介质分界面, 不易形成贯通性的结构滑动面, 地质灾害不发育, 仅 901 处, 占灾害总数的 9.61%。

(5) 含软弱夹层的碳酸盐岩组, 在构造作用下节理裂隙较为发育, 地表(下)水易沿着岩体节理裂隙入渗, 夹层浸润软化, 逐渐发展成为崩塌(滑坡)的滑移带, 形成“上硬下软、头重脚轻”的易灾结构体, 是研究区地质灾害最为发育的岩组, 有 3 573 处, 占地质灾害总数的 33.53%。

参考文献

- [1] 段乔文, 俞富有, 张天柏, 何伟, 段春林. 滇东高原罗平湾子水库岩溶渗漏机理及库外补漏设想[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 287-297.
DUAN Qiaowen, YU Fuyou, ZHANG Tianbai, HE Wei, DUAN Chunlin. Karst leakage and its sealing at Wanzi reservoir in Luoping county on the plateau of eastern Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(2): 287-297.
- [2] 王虎, 冉勇康, 李彦宝, 陈立春. 川西地区安宁河断层古地震行为及其与则木河断层的比较[J]. 地震地质, 2014, 36(3): 706-717.
WANG Hu, RAN Yongkang, LI Yanbao, CHEN Lichun. Paleoseismic behavior of the Anninghe fault and its comparison with the Zemuhe fault in western Sichuan[J]. Seismology and Geology, 2014, 36(3): 706-717.
- [3] 王宇, 黄兴章, 谭继中. 云南省岩溶水有效开发利用规划建议报告[R]. 昆明: 云南省地质矿产厅、云南省计划委员会, 1997.
- [4] 王宇, 张贵, 柴金龙, 王波, 何晓生, 彭淑惠, 康晓波, 周翠琼. 云南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2013: 17-27.
WANG Yu, ZHANG Gui, CHAI Jinlong, WANG Bo, HE Raosheng, PENG Shuhui, KANG Xiaobo, ZHOU Cuiqiong. The serious environmental geological problems and countermeasures in karst area of Yunnan Province[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2013: 17-27.
- [5] 王宇, 张贵, 何晓生. 云南岩溶石山地区地下水资源勘查与生态环境地质调查报告[R]. 昆明: 云南省地质调查院, 2002.
- [6] 张超, 陈艳, 张宇飞, 孙秀娟. 基于多元线性回归模型的云南昭通地质灾害易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 159-163.
ZHANG Chao, CHEN Yan, ZHANG Yufei, SUN Xiujuan. Geohazard susceptibility evaluation in Zhaotong of Yunnan based on the multivariate linear regression model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 159-163.
- [7] 张杰, 黄成, 晏祥省, 王裕琴. 云南“9·07”地震彝良水泥厂危岩体破坏模式分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(Suppl.1): 129-132.
- [8] 张华, 康晓波, 王波, 柴金龙, 周翠琼, 蔡双乐, 侯旭涛, 黄晨晖, 潘晓东. 滇东南高原斜坡区某拟建铁路岩溶水文地质问题及对策建议[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 718-727.
ZHANG Hua, KANG Xiaobo, WANG Bo, CHAI Jinlong, ZHOU Cuiqiong, CAI Shuang, HOU Xutao, HUANG Chenhui, PAN Xiaodong. Karst hydrogeological problems and countermeasures of a proposed railway in plateau slope area of south-east Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(5): 718-727.
- [9] 邓国仕, 岑鑫雨, 唐业旗, 钟金先. 乌蒙山以礼河流域岩溶地下水富集特征及供水意义研究[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 685-698.
DENG Guoshi, CEN Xinyu, TANG Yeqi, ZHONG Jinxian. Study on the enrichment characteristics and water supply signifi-

- cance of karst groundwater in the Yili river basin, Wumeng mountain area[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(4): 685-698.
- [10] 裴向军, 黄润秋. “4·20”芦山地震地质灾害特征分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(3): 257-262.
- PEI Xiangjun, HUANG Runqiu. Analysis of characteristics of geological hazards by “4·20” Lushan earthquake in Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(3): 257-262.
- [11] 殷志强, 赵无忌, 褚宏亮, 孙伟. “4·20”芦山地震诱发地质灾害基本特征及与“5·12”汶川地震对比分析[J]. 地质学报, 2014, 88(6): 1145-1156.
- YIN Zhiqiang, ZHAO Wuji, CHU Hongliang, SUN Wei. Basic characteristics of geohazards induced by Lushan earthquake and compare to them of Wenchuan earthquake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(6): 1145-1156.
- [12] 罗一鸣, 成建梅, 徐文杰, 巴净慧, 黄盛财, 段天宇. 西南岩溶区深埋隧洞涌水条件分析及涌水量预测: 以滇中引水工程大坡子隧洞为例[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(6): 1224-1236.
- LUO Yiming, CHENG Jianmei, XU Wenjie, BA Jinghui, HUANG Shengcai, DUAN Tianyu. Analysis of water inflow conditions and prediction for water inflow of deep-buried tunnels in the karst area of Southwest China: Taking Dapozi tunnel of central Yunnan Water Diversion Project as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(6): 1224-1236.
- [13] 张杰, 王宇, 张红兵, 朱春林, 李俊东, 晏祥省. 云南彝良 9·07 地震次生地质灾害特征分析[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(2): 280-291.
- ZHANG Jie, WANG Yu, ZHANG Hongbing, ZHU Chunlin, LI Jundong, YAN Xiangsheng. Characteristics of secondary geological hazards induced by Yiliang 9·07 earthquakes in Yunnan Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(2): 280-291.
- [14] 黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(1): 19-28.
- HUANG Runqiu, LI Weile. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1): 19-28.
- [15] Abrahamson N A, Somerville P G. Effects of the hanging wall and footwall on ground motions recorded during the Northridge earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(1B): S93-S99.
- [16] 俞言祥, 高孟潭. 台湾集集地震长地震动的上盘效应[J]. 地震学报, 2001, 23(6): 615-621.
- YU Yanxiang, GAO Mengtan. Effects of the hanging wall and footwall on peak acceleration during the Chi-Chi earthquake, Taiwan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, 23(6): 615-621.
- [17] 黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[C]//汶川大地震工程震害调查分析与研究. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 2009: 159-167.
- [18] 刘春玲, 祁生文, 童立强, 安国英, 李小慧. 喜马拉雅山地区重大滑坡灾害及其与地层岩性的关系研究[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(5): 669-676.
- LIU Chunling, QI Shengwen, TONG Liqiang, AN Guoying, LI Xiaohui. Great landslides in Himalaya Mountain area and their occurrence with lithology[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(5): 669-676.
- [19] 李成芳, 王忠诚, 李振伟, 徐宪立. 西南喀斯特区土壤侵蚀研究进展[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(6): 962-974.
- LI Chengfang, WANG Zhongcheng, LI Zhenwei, XU Xianli. Research progress of soil erosion in karst areas of Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6): 962-974.

Study on distribution law of geological disasters in karst mountainous area of east Yunnan

ZHANG Jie^{1,2,3,4}, ZHANG Weifeng^{1,2,3}, WEI Lei^{1,2,3,4}, DAI Xusheng^{1,2,3}, ZHANG Wenjun^{1,2,3}

(1. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China; 3. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China; 4. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract Based on a comprehensive and detailed investigation, coupled with a risk assessment of geological disasters at a scale of 1 : 50,000 in the study area, this paper focuses on the unique characteristics of high mountain valleys and karst rock mountains prevalent within the region. Through a combination of data statistics and qualitative analysis, the distribution patterns and laws of geological disasters in the study area are meticulously elaborated in terms of landform, slope structure type, geological structure, geological engineering, and rock formation.

The findings are listed as followings: (1) The terrain in northeast Yunnan is characterized by significant relief, with deep river valleys predominantly located along the plateau edges and valley slopes. Consequently, the distribution of geological disasters gradually diminishes from north to south, with a mean density of 8.62 per 100 km². The

northern alpine valleys and valley slope areas exhibit the most developed geological disasters, which are approximately 2 to 3 times more numerous than those in the central plateau basin.

(2) Geological disasters are more prevalent in the geomorphic units dominated by the edges of plateaus and slopes of river valleys, with a total of 3,161 occurrences, which accounts for 29.67% of all recorded disasters. The geological disasters are not developed in the plateau areas of central and east Yunnan, where the plateau morphology is relatively intact and the terrain is gentle, with only 87 occurrences, accounting for 0.82% of the total disasters.

(3) The geological disasters in the study area are mainly distributed in sections with slopes of 10° – 30° , totaling of 7,028 occurrences, which account for 66.62% of all geological disasters. In contrast, the sections with slopes greater than 40° exhibit the fewest geological disasters, with only 797 occurrences, representing 7.55% of the total. Additionally, geological disasters in the study area are primarily concentrated in slope sections with orientations of 90° – 135° , 225° – 270° , and 270° – 315° , totaling 4,249 occurrences, which account for 39.88% of the overall. These disasters generally extend from north to south and west, demonstrating a correlation with the northeast-to-south and north structural patterns.

(4) Geological disasters predominantly occur at the intersections of fault zones or in regions where the orientation of the primary faults changes. These disasters tend to be distributed in a linear or belt-like patterns. When faults remain continuously active, signs of multiple disasters events become apparent. The distribution of geological disasters correlates with structural features, including the orientation of faults, and the dip direction of slopes. Geological disasters are arranged in an imbricated pattern on both sides of the main controlling faults. In the case of strike-slip reverse faults, the distribution of geological disasters exhibits a notable "upper plate effect". Particularly, under seismic activities, the frequency of geological disasters on the upper plate is significantly greater than that on the lower plate.

(5) In the study area, geological disasters are most prevalent in dip-slope formations that contain weak interlayers of mudstone and shale, with a total 2,995 occurrences, accounting for 31.94% of all recorded disasters. In contrast, slopes formations with orthogonal structures lack natural medium interfaces, which hinders the formation of continuous structural sliding surfaces. Consequently, geological disasters are less common in these areas, with only 901 occurrences, representing 9.61% of the total number of disasters.

(6) The carbonate group containing weak interlayers is more susceptible to the development of joint fissures under tectonic forces. Surface water and groundwater can easily infiltrate these joint fissures, leading to the hydration and softening of the interlayers. Over time, this process may evolve into a slip zone for rock falls or landslides, resulting in a disaster-prone structural formation characterized by being solid and heavy on top, and soft and light below. This rock group is where geological disasters are most prevalent in the study area. The findings from this study can provide a geological foundation for comprehensive prevention and control of geological disasters, as well as a foundation for land use planning and regulation in the study area.

Key words karst plateau, geological disaster, distribution law, upper plate effect, disaster-prone structure

(编辑 黄晨晖)