

杨迎冬, 晏祥省, 王宇, 等. 云南省地质灾害特征及形成规律研究[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 131–139. [YANG Yingdong, YAN Xiangsheng, WANG Yu, et al. The Characteristics and Formation of Geological Hazards in Yunnan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 131–139. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.023.]

云南省地质灾害特征及形成规律研究^{*}

杨迎冬¹, 晏祥省¹, 王宇², 汤沛¹, 魏蕾¹, 赵鹏¹, 黄成¹

(1. 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216, 2. 云南省地质调查局, 云南昆明 650051)

摘要: 云南省地质灾害类型主要为崩塌、滑坡、泥石流及地面塌陷。1: 50 000 地质灾害详细调查发现地质灾害及隐患点 34 408 处, 其中滑坡 24 044 处, 崩塌 4 054 处, 泥石流 4 784 处。在高原山区复杂而脆弱的地质环境条件下, 局地暴雨、地震和河流侵蚀是地质灾害的主要自然诱发因素, 但人类工程对地质灾害的影响越来越大, 新增地质灾害隐患点常与人类工程活动相关联。经过多因素综合分析, 进行了地质灾害易发性分区评价。受地质环境条件及内外动力地质作用和人类活动特征及规律的控制, 地质灾害的形成规律主要为: 沿特定的地形地貌呈带状发育、受散裂及易滑岩土体和构造控制形成高发区带、动态起伏与降雨同步、与地震烈度成正比的放射状衰减规律等。指出依据地质灾害发育规律, 加强风险分级管控和隐患排查治理、规范人类工程活动是防灾减灾的有效途径。

关键词: 地质灾害; 形成条件; 发育规律; 易发性; 风险; 高原山区; 云南

中图分类号: X43; P694; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)03-0131-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.023

云南高原处于印度板块与欧亚板块碰撞带上, 地质条件复杂多变。受喜马拉雅造山运动的影响程度强烈, 中新世以来高原大幅隆升, 断裂活动剧烈, 地壳差异升降, 地形切割强烈, 岩石破碎, 覆土广布, 加之降水时空分布不均, 局地暴雨多发, 地震频繁, 形成了地质灾害易发高发区。现代地貌及物质组成经过长期的地质历史演化过程, 总体上趋于平衡或极限平衡的状态, 自然进程中地质灾害远没有如今这样频繁。然而, 日益增强的气候变化、人为扰动加剧了地壳表层岩土体的失稳和运动, 故高原山区地质灾害类型主要是在脆弱的地质环境条件下由不合理的人类活动引发的崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等地质灾害^[1-5]。1950 年代起, 随着经济社会加速发展, 地质灾害逐渐增多, 引起了各级政府的高度重视, 不断加大地质灾害的防治力度。在国家的大力支持下, 2013 年云南率先启动了地质灾害综合防治体系建设^[6], 地质灾害应急处置、调查识别、监测预警、治理和避让等, 无论从规模、管理和技术上都达到了史无前例的水平。本文以地球系统科

学理论为指导, 基于丰富的调查研究和实践经验, 尤其是近期完成的全省性 1: 50 000 地质灾害详细调查资料, 通过多学科的综合分析研究, 采用 GIS、信息量和统计等方法系统分析了云南地质灾害的类型特征、形成条件及诱发因素, 进行了地质灾害易发性分区评价, 总结了地质灾害发育规律, 大幅提升了云南高原地质灾害的基础研究水平。

1 主要地质灾害类型及特征

2005 年起, 在中国地质调查局的指导和参与下, 以中国地质调查局和云南省相关技术要求^[7-8]为标准, 云南省以县(市、区)为单元全面完成了地质灾害详细调查, 建立了地质灾害空间数据库, 系统查明了地质灾害的类型及特征^[9]。

1.1 地质灾害类型

2016 年底完成了云南省的 1: 50 000 地质灾害详细调查, 进一步查清了各县(市、区)地质灾害基

^{*} 收稿日期: 2021-01-19 修回日期: 2021-05-10

基金项目: 云南省地质灾害综合防治体系建设(2013-2020)(云财资环[2020]68号); 云南省地质灾害气象风险预警业务能力建设(云财资环[2020]113号); 云南省科技厅—云南大学“双一流”建设联合基金项目“天空地协同的高山峡谷区重大地质灾害隐患识别监测预警研究”

第一作者简介: 杨迎冬(1978-), 男, 苗族, 湖南城步人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害综合防治体系建设、地质环境信息化建设等工作。E-mail: yyd304@126.com

通讯作者: 王宇(1960-), 男, 汉族, 云南个旧人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水工环及灾害地质研究。E-mail: ynddywy@163.com

本情况。截至 2016 年底，全省共有地质灾害及隐患点 34 408 处，其中滑坡 24 044 处，崩塌 4 054 处，泥石流 4 784 处，地面塌陷 475 处，地裂缝 121 处，地面沉降 26 处，不稳定斜坡 904 处(图 1)。

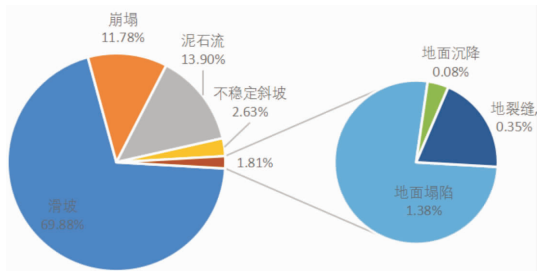


图 1 地质灾害类型及所占比例

1.2 地质灾害险情

云南省共分布 26 199 处具有固定威胁对象的地质灾害隐患点，按险情等级：特大型 235 处，大型 877 处，中型 6 258 处，小型 18 829 处。共威胁人口约 264 万，威胁财产约 760 亿元。

16 个州(市)中，威胁人数数量处于前三位的为大理州、昭通市和红河州，威胁人数最少的为西双版纳州，最大威胁人数约 37 万人，中等水平的约 13.5 万人，最少的约 1.6 万人。威胁财产数量处于前三位的为大理州、昭通市和昆明市，最大威胁财产约 131 亿元，中等水平的约 5.3 亿元，最少的约 4.8 亿元。

险情特大型、大型地质灾害隐患点主要分布于昭通、大理、红河、迪庆、丽江、保山、临沧、曲靖等州(市)，这 8 个州(市)数量均超过 60 处，其中昭通市数量最多为 230 处。

1.3 地质灾害规模

按照灾害及隐患点物理规模划分，全省巨型

地质灾害及隐患点 91 处，大型地质灾害及隐患点 957 处，中型地质灾害及隐患点 6 465 处，小型地质灾害及隐患点 26 895 处(表 1)。

地质灾害规模以小型为主，云南高原山区无大型及以上的地面塌陷和地面沉降。巨型滑坡主要分布于昆明、昭通、丽江、楚雄、红河、曲靖、怒江、普洱、保山等 9 个州(市)，其中昆明市最多为 9 处。巨型崩塌主要分布于昭通、昆明、迪庆、红河、丽江、楚雄、临沧、怒江、曲靖等 9 个州(市)，其中昭通市最多为 9 处。巨型泥石流主要分布于迪庆、昆明、曲靖、大理、怒江、楚雄、昭通等 7 个州(市)，其中迪庆州最多为 6 处。

1.4 地质灾害分布

云南地理地貌以元阳河谷和云岭山脉南段的河谷为界，东部为滇东红层高原和滇东喀斯特高原，西部为滇西横断山地，地质灾害分布随地貌类型变化明显(表 2)。

全省地质灾害点密度为 8.73 处/100 km²。滇东北中山峡谷区地质灾害点密度最大，横断山南段中山峡谷区、滇西南中山宽谷区点密度次之，大部分地貌类型分区点密度则接近全省平均值，滇东南岩溶丘峰区点密度最小。

滑坡主要分布于横断山南段中山峡谷区、滇西南中山宽谷区和滇中红层高原。泥石流主要分布在横断山北段高山峡谷区的“三江”上游、滇中红层高原的金沙江支流、滇西中山宽谷盆地地区的大盈江中上游以及滇东北中山峡谷区的江河沿线。崩塌主要分布在滇东北中山峡谷区、横断山北段高山峡谷区的“三江”上游、滇东岩溶高原湖盆地。地面塌陷分布于滇东岩溶高原盆地、槽谷区^[10-11]。

表 1 地质灾害及隐患点规模等级表

规模等级	滑坡/处	崩塌/处	泥石流/处	不稳定斜坡/处	地面塌陷/处	地裂缝/处	地面沉降/处	合计/处	占比/%
巨型	40	27	24	0	0	0	0	91	0.26
大型	517	277	160	0	0	3	0	957	2.78
中型	4 412	1 165	882	0	0	6	0	6 465	18.79
小型	19 075	2 585	3 718	904	475	112	26	26 895	78.17
合计	24 044	4 054	4 784	904	475	121	26	34 408	100.00

表 2 地质灾害分布统计表

地貌单元	地质灾害/处	占比/%	灾害点密度 /(处/100km ²)	滑坡/处	崩塌/处	泥石流/处	地面塌陷/处
横断山北段高山峡谷亚区	3 714	10.79	7.74	1 762	750	1 190	9
滇西中山宽谷盆地亚区	2 237	6.50	13.12	1 531	208	490	6
滇西南中山宽谷亚区	5 175	15.04	7.89	4 413	221	494	37
横断山南段中山峡谷亚区	6 101	17.73	9.66	4 906	185	550	12
滇中红层高原	5 667	16.47	8.65	3 960	416	1 051	56
滇东北中山峡谷亚区	5 048	14.67	17.41	3 009	1 280	469	51
滇东岩溶高原湖盆亚区	4 984	14.49	6.91	3 410	714	463	244
滇东南岩溶丘峰亚区	1 482	4.31	4.39	1 053	280	77	60

2 地质灾害形成条件及诱发因素

地质灾害是在脆弱的地质环境条件下,由内外动力地质作用和不合理的人类活动共同或单独作用所诱发的^[12],因此其规律性是两者特征及活动规律的综合表现。

2.1 地质灾害形成条件

2.1.1 地形地貌

云南由喀斯特地貌、侵蚀地貌、构造地貌等多种复杂地貌构成,全省94%为山区高原,地形起伏度大,为地质灾害的发育提供了最基本的能量与空间条件,导致泥石流、滑坡、崩塌等地质灾害频发(图2)。

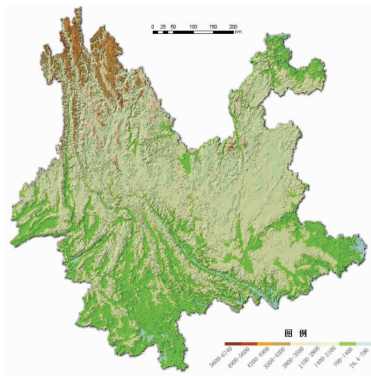


图2 云南省地势图(审图号:云S(2021)27号)

(1)海拔高程。滑坡、崩塌、泥石流和地面塌陷在海拔高程的分布均表现为:灾害数量以1500~2000 m高程段为最大值,1000~1500 m高程段其次、2000~2500 m高程段再次之,最少的为>3500 m高程段。1500~2000 m区域为云南居民主要聚居和生产区,地质灾害受人类经济活动影响强烈,围绕人口聚集区和工程活动区呈密集分布状态(图3)。

(2)坡度。滑坡主要分布于8°~45°坡度范围内,8°~25°范围内滑坡数量最多且点密度最大,大于45°范围内滑坡灾害点发育数量最少且点密度最小。坡度>45°范围内崩塌数量最多且灾害点密度最大,远远大于其余几个坡度区间的崩塌密度(表3)。

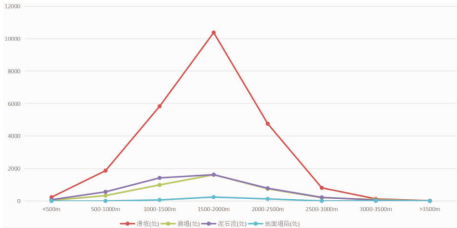


图3 地质灾害高程分布

表3 地质灾害坡度统计表

坡度/°	滑坡/处	崩塌/处	滑坡密度 /(处/100 km ²)	崩塌密度 /(处/100 km ²)
0~8	2 775	0	4.12	0.00
8~25	17 193	27	7.64	0.01
25~45	4 026	261	4.23	0.27
>45	50	3 766	0.76	57.04

(3)地貌。地貌是地壳表层岩土体及其内、外力地质作用影响的综合表现形态,云南地貌分为三个大区8个地貌亚区^[13](图4)。全省滑坡灾害点密度为6.10处/100 km²,崩塌灾害点密度为1.03处/100 km²,泥石流灾害点密度为1.21处/100 km²,地面塌陷灾害点密度为0.12处/100 km²。云南高原山区不同类型地质灾害在各地貌区表现发育特征明显,滇东北中山峡谷亚区滑坡和崩塌密度均最大,分别约为全省滑坡点密度的1.7倍和4.3倍,滇西中山宽谷盆地亚区泥石流密度最大,约为全省泥石流点密度值的2.4倍,滇东岩溶高原湖盆亚区地面塌陷密度最大,约为全省地面塌陷点密度值的2.8倍(表4)。

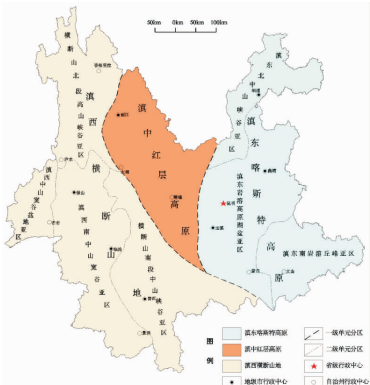


图4 云南地貌分区图(审图号:云S(2021)27号)

表4 地质灾害分布统计表

地貌单元	滑坡密度 /(处/100 km ²)	崩塌密度 /(处/100 km ²)	泥石流密度 /(处/100 km ²)	地面塌陷密度 /(处/100 km ²)
横断山北段高山峡谷亚区	3.67	1.56	2.48	0.02
滇西中山宽谷盆地亚区	8.98	1.22	2.87	0.04
滇西南中山宽谷亚区	6.73	0.34	0.75	0.06
横断山南段中山峡谷亚区	7.77	0.29	0.87	0.02
滇中红层高原	6.04	0.63	1.60	0.09
滇东北中山峡谷亚区	10.38	4.41	1.62	0.18
滇东岩溶高原湖盆亚区	4.73	0.99	0.64	0.34
滇东南岩溶丘峰亚区	3.12	0.83	0.23	0.18

通过基于 GIS 的信息量法分析,滇东北中山峡谷亚区、滇西中山宽谷盆地亚区和横断山南段中山峡谷亚区易发生滑坡。滇东北中山峡谷区和横断山北段高山峡谷区易发生崩塌。滇西中山宽谷盆地区和横断山北段高山峡谷区易发生泥石流。滇东岩溶高原湖盆区、滇东南岩溶丘峰区和滇东北中山峡谷区易发生地面塌陷。

2.1.2 岩土体类型

岩土体作为地质灾害的活动主体,是地质灾害产生的物质基础,岩土体类型、性质、结构及构造特征对地质灾害的形成发育产生重要影响;地质灾害的孕育、发生和成灾等,都是岩土体的不同运动变化形式。根据云南省岩石建造类型,将岩体分为火成岩、变质岩、碎屑岩、碳酸盐岩 4 个岩体类型和 1 个松散土体类型(图 5)。

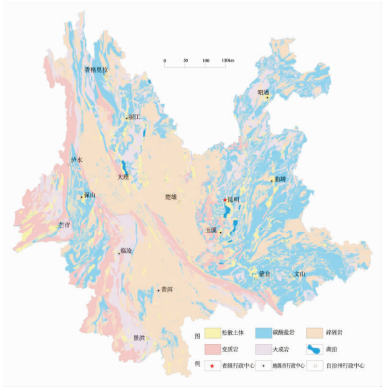


图 5 云南高原岩体类型及分布图(审图号:云 S(2021)27 号)

滑坡在碎屑岩类分布数量最多,在变质岩类点密度最大(表 5),在薄—中层状极软—较硬含煤砂岩、泥岩岩组、层状软—较硬含石膏、盐岩岩组、层状极软—软粘土岩岩组、层状软的页岩、泥岩夹硬的砂岩岩组易发生滑坡;在块状坚硬片麻岩、混合岩、变粒岩岩组由于风化层厚,也易发生滑坡^[14-15]。

崩塌在碳酸盐岩分布数量最多,点密度也最大;在薄—中层状极软—较硬含煤砂岩、泥岩岩组、中—厚层状强岩溶化较硬—坚硬灰岩、白云岩岩组、层状软硬相间碎屑岩夹碳酸盐岩岩组、层状中—强岩溶化软硬相间的碳酸盐岩、碎屑岩岩组、层状中—强岩溶化软硬相间的碳酸盐岩夹碎屑岩岩组易发生崩塌。

地面塌陷在碳酸盐岩分布数量最多,点密度也最大;薄—中层状极软—较硬含煤砂岩、泥岩岩组、层状极软—软粘土岩岩组、层状中—强岩溶化软硬相间的碳酸盐岩夹碎屑岩岩组、中—厚层状强岩溶化较硬—坚硬灰岩、白云岩岩组、层状软硬相间碎屑岩夹碳酸盐岩岩组、层状、块状较硬—坚硬喷出岩岩组,为主要的含矿岩组及碳酸盐岩岩组,易产生采空区塌陷和岩溶塌陷。

2.1.3 地质构造与新构造运动

云南高原地质构造复杂,新构造运动剧烈,地壳差异性隆升强烈,地形侵蚀切割深度大。此外,构造运动造成了褶皱断裂发育,岩体破碎,结合外动力地质作用,形成松散岩土体,为地质灾害发育提供能量及物质条件^[16-20]。

云南 38.39% 的滑坡位于活动性断裂宽约 5 km 影响范围内,61.60% 的滑坡位于活动性断裂约 10 km 影响范围内,77.18% 的滑坡位于活动性断裂约 15 km 影响范围内。活动性断裂对滑坡发育具有较强的影响,越靠近活动断裂,灾害点数量越多;远离活动断裂,灾害点数量减少,活动断裂之间的夹持地带滑坡较为发育。

活动性断裂对崩塌影响不明显。在 0~10 km 区内,2~3 km 范围内崩塌数量最多,5~6 km 范围内崩塌数量最少。崩塌主要发育于活动断裂交汇地带,怒江断裂和澜沧江断裂交汇处、金沙江断裂与龙陵—瑞丽断裂交汇处、大关—水城断裂与五莲峰断裂交汇等地带崩塌相对发育。

活动性断裂对泥石流具有较强的影响,46.64% 的泥石流位于活动性断裂约 5 km 影响范围内,越靠近活动断裂,灾害点数量越多;远离活动断裂,灾害点数量减少。沿大盈江断裂、怒江断裂、澜沧江断裂、中甸—剑川断裂、程海断裂、小江断裂北段、红河断裂泥石流发育。龙陵—瑞丽断裂和澜沧江断裂及金沙江断裂交汇处的大理州泥石流发育。

2.1.4 植被

植被对斜坡变形、演化和地质灾害的影响主要体现在:①水文地质效应,植被不同程度地阻滞了地面径流,降低了表土面蚀、沟蚀能力;但同时其滞留效应和根孔形成也增大了降水对坡体的

表 5 地质灾害岩土体类型统计表

岩土体	滑坡/处	崩塌/处	地面塌陷/处	滑坡密度/ (处/100 km ²)	崩塌密度/ (处/100 km ²)	地面塌陷密度/ (处/100 km ²)
松散土体	624	128	20	4.69	0.96	0.15
碳酸盐岩	4 546	1 561	211	4.59	1.58	0.21
碎屑岩	12 246	1 438	174	7.02	0.82	0.10
变质岩	3 729	378	36	7.28	0.74	0.07
火成岩	2 899	549	34	5.26	1.00	0.06

表6 云南各州市森林覆盖率统计表

州市	昭通	曲靖	昆明	红河	文山	玉溪	大理	临沧
森林覆盖率/%	44.2	44.3	51.42	53.08	46.4	60.74	61.22	68.48
州市	楚雄	保山	丽江	普洱	德宏	迪庆	怒江	西双版纳
森林覆盖率/%	68.01	66.32	68.48	71.18	69.65	76.58	75.64	80.79

备注:森林覆盖率来源于各州市国民经济和社会发展统计公报及官方网站

入渗补给量,在一定程度上使得表土含水饱和。
②力学效应,植被根系具有加固浅表层土体,提高土体抗剪强度的作用;但同时坡体上植被的自重也增加了坡体的荷载,并向坡体传递风的动力荷载。
③护坡效应,植被发育的地区不易产生水土流失,地形受侵蚀切割较缓慢,斜坡变形破坏较弱^[21-22]。

从资料可以发现,滇西横断山区森林覆盖率高,滇中红层高原次之,滇东喀斯特高原覆盖率相对较低。云南区域上森林覆盖率总体表现为西高东低的特点(表6)。结合表2初步分析不同区域植被对地质灾害的影响:滇东北中山峡谷区,人口密度大,人类工程活动强烈,森林覆盖率低,水土流失较为严重,地质灾害强发育。滇东岩溶高原湖盆区和滇东南岩溶丘峰区主要为碳酸盐类岩石,表土层薄,地形起伏度较小,森林覆盖率相对较低,地质灾害密度低。滇中红层高原森林覆盖率中等,地质点灾害密度近全省平均值。横断山北段高山峡谷区虽然地形起伏大,坡度陡,但由于人口密度较小,人类工程活动相对较弱,植被发育,地质灾害点密度较小。滇西中山宽谷盆地降雨充沛,植被发育,但由于风化层厚,植被稳坡功效弱,其灾害点密度大。滇西南中山宽谷区地形较为平缓,切割浅,气候湿热,森林覆盖率高,灾害密度较低。横断山南段中山峡谷亚区虽然森林覆盖率高,但地形起伏较大,人口密度大,人类对地质环境扰动较大,灾害点密度较大。

总体上,植被对防护坡面、水土保持发挥着积极的作用,但在高原山区,于地质灾害的发育影响有限。

2.2 地质灾害诱发因素

2.2.1 降雨和冻融

云南属于低纬高原季风气候,由于海陆位置及复杂的特殊地形影响,降水时空分布极不均匀,多年平均年降水量为1 258.7 mm。一般雨季为每年5-10月,降雨量占全年总降雨量的85%;区域间变化范围在300~4 000 mm之间,总体呈南多北少,西多东少的趋势。

经过长期观测研究,暴雨是诱发泥石流的最主要的因素。在全省4 784条泥石流中,暴雨诱发的有4 636条,占总数的96.91%。经统计分析,滑坡、崩塌和泥石流灾害发生当天、前3 d及前8

d的降雨累计情况:在有明确发灾日期的937起滑坡、崩塌和泥石流灾害点中,在灾害发生当天有降雨的为761起,占总数的81.22%;在灾害发生前3 d有降雨发生的有872起,占总数的93.06%;灾害发生前8 d有降雨发生的灾害点数达913起,占总数的97.44%。这些灾害点中,灾害发生当天的最大降雨量达到133.8 mm,平均降雨量17.2 mm;灾害发生前3 d累计降雨量的最大值为206.3 mm,灾害发生前3 d累计降雨量的平均值为30.6 mm;灾害发生前8 d累计降雨量的最大值为321.3 mm,灾害发生前8 d累计降雨量的平均值为71.8 mm。历年来滑坡发生主要集中于6月、7月、8月和9月,崩塌发生主要集中于6月、7月和8月,泥石流发生主要集中于7月和8月。滑坡、崩塌和泥石流具有很强的季节性发育特征,地质灾害的发生与云南降雨季节具有耦合性。此外怒江中上游的2-4月为桃花汛,发生的地质灾害也较多,4月份发生灾害数量占同期全省百分比达54%,死亡失踪人数占同期全省百分比达60%。滇东北和滇西北地区在冻融期间也常发生滑坡和泥石流^[23]。可见地质灾害的发生与降雨密切相关,降雨是地质灾害的主要诱发因素。

2.2.2 河川径流

云南属长江、珠江、红河、湄公河、萨尔温江和伊洛瓦底江六大水系的中上游的金沙江、南盘江、元江、澜沧江、怒江和大盈江等流域,高原山区河流侵蚀切割强烈,除了少量盆地、宽谷平坝区,山区谷坡陡峻,多处于极限平衡状态,致使地质灾害与水系关系比较密切。地质灾害沿河流两侧呈带状分布,主干河流及其一级支流多受深大断裂控制,造成岩体破碎;此外山区河流两侧一般为交通要道,人类工程及经济活动对岩土体产生扰动,加剧了斜坡的不稳定。总体上切割深度和密度越大的河流,地质灾害也越发育(表7)。

云南六大流域主干河流中,滑坡沿怒江、元江、金沙江主干河流两侧发育;崩塌沿怒江、金沙江主干河流两侧发育;泥石流沿大盈江、怒江主干河流两侧发育。主干河流对泥石流控制性最明显^[24]。

2.2.3 地震作用

云南地震活动频繁,地震发生时,常常诱发滑坡、崩塌和地裂缝等次生地质灾害,同时导致岩土体松动,斜坡失稳,为泥石流提供大量物质来源^[25-26]。

表 7 云南六大流域地质灾害分布

流域名称	滑坡/处	滑坡密度 /(处/100 km ²)	崩塌/处	崩塌密度 /(处/100 km ²)	泥石流/处	泥石流密度 /(处/100 km ²)
怒江	2 448	7. 18	308	0. 90	550	1. 61
澜沧江	4 802	5. 26	444	0. 49	872	0. 95
金沙江	7 102	6. 32	2 063	1. 84	1 728	1. 54
珠江	2 115	3. 58	536	0. 91	224	0. 38
伊洛瓦底江	1 668	8. 53	249	1. 27	534	2. 73
红河	5 909	7. 61	454	0. 58	876	1. 13

表 8 地震次生地质灾害点密度

地震烈度	地质灾害点密度/(处/100km ²)				
	鲁甸 6. 5 级地震	彝良 5. 7 级地震	施甸 5. 9 级地震	宁蒗 6. 2 级地震	丽江 7. 0 级地震
IX	134	—	—	—	4. 13
VIII	89	68	8. 77	10. 14	3. 88
VII	26	40	2. 32	0. 73	0. 67
VI	14	14	0. 46	0. 16	0. 30

根据云南 1996 年丽江 7. 0 级地震、1998 年宁蒗 6. 2 级地震、2001 年施甸 5. 9 级地震、2012 年彝良 5. 7 级地震、2014 年鲁甸 6. 5 级地震等地震诱发次生地质灾害资料分析, 地质灾害密度与地震烈度正相关, 地震烈度最大的区域灾害点越密集(表 8): IX、VIII 烈度区灾害对地震的响应强烈, 这些区域的灾害点密度明显高于其它烈度区灾害点密度; VII 烈度区灾害对地震的响应明显; VI 烈度区灾害对地震响应较微弱, 该烈度区灾害点密度剧减。

地震与地质灾害的关系还表现为滑坡、崩塌活动具有继承性。新产生的滑坡崩塌主要位于最大烈度区内, 同时越靠近最大烈度区, 地裂缝越发育密集。大部分滑坡崩塌表现为由稳定或活动不明显转为不稳定并产生新的变形破坏, 有的活动性明显加剧并导致人员伤亡和财产损失。

据 2007 年宁洱 6. 4 级地震分析, 地震产生的垂直加速度和水平加速度都能引发地质灾害; 地震引发的地质灾害分布与地震所产生的加速度主要作用方向正相关; 崩塌、滑坡的主滑方向与最大水平加速度方向基本一致^[27]。

云南高原山区地震次生地质灾害沿发震断裂密集分布, 顺峡谷带状延展, 近场地质灾害严重, 散裂岩土体地质灾害高发, 工程边坡崩滑多。形成这些特征的原因主要有以下几点: 高原斜坡地带, 活动断裂密集发育, 地震能量沿断裂释放顺走向延伸远, 垂直影响窄; 峡谷纵横, 谷坡陡峻, 散裂岩体厚大, 地质灾害易发, 崩滑规模巨大; 近场地震地面运动加速度大, 震害强烈, 向外延伸加速度值衰减较快, 远场震害轻微; 人类工程切坡、毁坏森林对地震次生地质灾害的产生有明显的影响^[28-29]。

2. 2. 4 人类工程活动

云南山地为主, 平地缓丘少, 人类工程经济活动多涉及对山体斜坡和沟谷的强烈改造, 由此打破了地壳浅表层斜坡、沟谷岩土体经过地质历史演化形成的极限平衡状态, 在自然因素和人为动力作用触发下, 加速了地质灾害的发育和发生^[30-31]。

人为活动诱发地质灾害的主要形式有:

(1) 山体斜坡的不合理挖填, 如陡坡上部填方建房, 建筑物加载或填方边坡失稳诱发滑坡; 陡坡中间或坡脚切坡建房诱发滑坡毁房伤人; 村村通道路缺少护坡和排水设施诱发山体滑坡, 危害坡上或坡下的村寨; 公路铁路建设边坡未及时支护、工程排水诱发山坡场地滑动; 露采矿山采坑边坡过陡诱发崩塌、滑坡掩埋现场人员等。

(2) 选址不当或超限建筑, 如向河道要地、挤占河道、过水桥涵断面不足, 遭受泥石流危害; 泥石流沟谷内开矿、采石挖沙造成滑坡泥石流灾害; 城市外围山体沟谷或斜坡弃土、垃圾消纳场产生滑坡泥石流灾害等。

(3) 防范措施不力或缺失, 如引水渠、道路排水沟(无管控, 长期漏失、散漫排水浸泡山坡土体)诱发山坡场地滑动; 水库水电站库区蓄水、泄洪库水位变化剧烈诱发滑坡; 地下采空区垮落牵引地上陡崖崩塌、滑坡和采空区塌陷; 城市深基坑降水、边坡未有效支护引发基坑侧壁滑移; 城市地下管线及轨道交通空间开凿诱发地面塌陷; 城市地下水超采诱发地面沉降等。

3 地质灾害易发性分区评价

以国家相关技术要求为参考^[32], 根据云南地

质灾害现状、地质灾害形成条件、影响因素、人类工程活动等因子,采用基于 GIS 的信息量法,先进行滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷等单灾类型的易发程度分区,再进行综合叠加分析,将云南区域地质灾害易发程度划分为地质灾害高易发区、中易发区、低易发区三类^[33-35]。在此基础上,根据地质灾害类型及成因、地形地貌、河流分布、岩土体类型、地质构造等组合分布的区间差异进行了具体分区,全面反映出地质环境的脆弱性和地质灾害发育的空间规律性(图 6)。

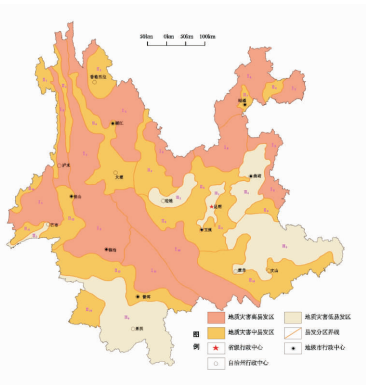


图 6 云南区域地质灾害易发程度图(审图号:云 S(2021)27 号)

(1) 地质灾害高易发区

主要分布于三江并流区的高山峡谷区、大盈江支流盈江盆地边缘区、滇东北高原峡谷区、哀牢山和无量山等地区,面积 181 240 km², 占全省总面积的 46%。以高山峡谷地貌和构造侵蚀中山地貌为主,地形坡度较陡,断裂及褶皱发育,地质构造复杂。区内人类工程活动强烈,地质环境脆弱,地质灾害密集发育。发育灾害点 23 669 处,其中滑坡 16 228 处,崩塌 2 671 处,泥石流 3 664 处,地面塌陷 228 处,地面沉降 11 处,地裂缝 11 处,不稳定斜坡 796 处,灾害点密度 13.06 处/100 km²。

(2) 地质灾害中易发区

主要分布于滇中高原以西及以南地区、怒江下游等地区,面积 142 864.40 km², 占全省总面积的 36.26%。以构造侵蚀中低山地貌为主,地形坡度较陡,断裂及褶皱发育,地质构造复杂。人类工程活动强烈,主要表现为矿产资源开发、公路铁路等基础设施建设、削坡建房等。发育灾害点 8 861 处,其中滑坡 6 448 处,崩塌 1 097 处,泥石流 996 处,地面塌陷 168 处,地面沉降 14 处,地裂缝 14 处,不稳定斜坡 108 处,灾害点密度 6.2 处/100 km²。

(3) 地质灾害低易发区

主要分布于滇中高原的盆地区、滇东及滇东南的低山丘陵岩溶区和滇南宽谷盆地区,面积

69 895.60 km², 占全省总面积的 17.74%。以宽谷盆地地貌和低山丘陵岩溶地貌为主,地形坡度较缓,断裂及褶皱发育较少,地质构造较复杂。发育灾害点 1 878 处,其中滑坡 1 368 处,崩塌 286 处,泥石流 124 处,地面塌陷 79 处,地面沉降 6 处,地裂缝 15 处,灾害点密度 2.69 处/100 km²。

4 地质灾害发育规律总结

通过以上分析评价,云南省山区地质灾害的发育和成灾规律可归纳总结为以下几个方面:

(1) 滑坡、崩塌、泥石流主要分布于 1 500 ~ 2 000 m 高程段,上下两侧随高程变化而渐减;地形坡度 8°~45°地段有利于滑坡的发育;地形坡度在 >45°地段有利于崩塌的发育。滇东北中山峡谷区、滇西中山宽谷盆地区和横断山南段中山峡谷区易发生滑坡。滇东北和滇西北的高中山峡谷区易发生崩塌。滇西中山宽谷盆地区和横断山北段高山峡谷区易发生泥石流。滇东喀斯特高原三个亚区易发生地面塌陷。

(2) 风化程度高及散裂岩体、软硬互层岩体、松散土体地质灾害高发。含泥岩、煤层、石膏、盐岩、粘土、页岩的岩组和风化强烈的片麻岩、混合岩、变粒岩岩组易发生滑坡。这些岩组常沿破碎结构面、强弱风化界面、土岩界面和软弱界面发生滑动。泥岩、砂岩岩组以及含碳酸盐岩相关的岩组易发生崩塌:泥岩、砂岩由于风化程度差异易形成陡坡而发生崩塌;而碳酸盐岩节理裂隙发育,尤其受断裂构造的影响,岩性呈碎裂结构,易发生崩塌。主要的松散土层、含矿岩组及含碳酸盐岩岩组易发生地面塌陷。

(3) 构造对滑坡、崩塌、泥石流起着控制性作用,活动性断裂构造密集的区域,崩滑流发育且斜坡不稳定。离活动性断裂越近,灾害点越发育,活动性断裂对泥石流的控制作用强于对滑坡的控制。活动性断裂带应力集中、岩石破碎,加之其沿线新构造活动强烈,山体抬升、河流下切,降低了斜坡稳定性,形成了大量的物源,加剧了地质灾害的发生。

(4) 降雨是诱发滑坡、崩塌和泥石流的最主要因素。云南滑坡、崩塌和泥石流具有很强的季节性发育特征,其中 7 月和 8 月为崩塌、滑坡、泥石流发生的高峰时段,地质灾害的发生与云南降雨季节具有耦合性。大暴雨,暴雨和长时间的连续降雨,使岩土体力学强度降低、增加孔隙水压力,改变斜坡的力学平衡状态,同时使固体物源快速汇集,常诱发群发性的地质灾害。

(5) 切割深度和密度越大的河流,地质灾害也

越发育。云南绝大多数河流为较典型山区性河流,切割和抬升幅度较大,周边常发育区域活动性断裂,斜坡陡峻、岩石破碎,此外山区河流两侧一般为交通要道,人类工程活动对岩土体产生扰动,加剧了斜坡的不稳定,地质灾害沿河流两侧呈带状分布。

(6)地质灾害密度与地震烈度正相关,地震烈度越大的区域灾害点越密集、规模越大,地质灾害多沿发震断裂密集分布、近场地质灾害点高度集中。地震能量沿断裂释放顺走向延伸远,近场地震地面运动加速度大,导致地震次生地质灾害强发育。

(7)新增地质灾害隐患点常与人类工程活动有关,人类工程对地质灾害的影响越来越大。

云南独特的地质环境背景条件决定了地质灾害多发易发。近年来云南天气气候极端异常,降水时空分布不均,局地异常暴雨多发:如2019年9月29日零时许,滇东北盐津县中和镇的单点性强降雨,3 h 累计降雨量达186.7 mm,诱发大量的滑坡泥石流,泥石流灾害造成8人死亡;2020年5月滇西北贡山县长达26 d的持续降雨,引发的地质灾害导致全县9 000多人受灾,3人死亡、5人失踪,直接经济损失约9.16亿元。此外云南地震活跃,中强地震频发。加之“一带一路”的建设,云南省城镇化、工业化和现代化同步加快,公路、铁路、水电站、水库等重大工程建设活动强度仍然较大。在自然因素和人为动力作用触发下,今后一段时间内云南地质灾害仍然保持着动态起伏波动的趋势,地质灾害防治形势依然严峻,需始终保持高度的警惕。

5 结论

(1)云南高原地质灾害类型以滑坡、泥石流和崩塌为主,大型及特大型地质灾害点根治困难,小型地质灾害点多面广,总体威胁人口多,威胁财产巨大,地质灾害危险性高,动态起伏变化大,发展趋势不稳定。

(2)地质灾害形成条件与地形地貌、岩土体类型、地质构造及新构造运动等密切相关;地质灾害主要由降雨和冻融、河川径流、地震和人类工程活动单因素或多因素诱发。

(3)根据地质灾害现状、地质灾害形成条件、影响因素、人类工程活动等因子,采用基于GIS的信息量法,评价了地质灾害易发程度,划分了地质灾害高、中、低易发区,高易发区约占国土面积的一半。

(4)地质灾害发育规律主要有:沿特定的地形

地貌区间发育强烈;软弱、散裂、层状结构岩土体易发;构造控制作用明显,活动性断裂尤为显著;高发期与雨季丰水期吻合;地震烈度与次生地质灾害强度成正比,沿发震断裂和近场分布集中;人类活动是新增隐患和旧有隐患复活或加剧的主要诱因。

(5)依据地质灾害发育规律,加强风险分级管控和隐患排查治理,规范人类工程活动是防灾减灾的有效途径。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 论中国西南地区水电开发工程地质问题及其研究对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(1): 1-5.
- [2] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444.
- [3] 李爱农, 南希, 张正健, 等. 特大地质灾害遥感应急响应调查方法与案例[J]. 中国减灾, 2018(19): 42-45.
- [4] 王宇. 云南省崩塌滑坡泥石流灾害及防治[J]. 地质灾害与环境保护, 1998, 9(4): 38-47.
- [5] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1981.
- [6] 王宇. 云南省地质灾害防治与研究历史评述[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 134-139.
- [7] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0261-2014 滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1:50 000)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [8] 云南省国土资源厅. 云南省地质灾害详细调查技术要求[Z]. 昆明: 云南省国土资源厅, 2014.
- [9] 王宇, 祝传兵, 张杰, 等. 云南高原山区地质灾害与应急地质工作方法[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2020: 37-45.
- [10] 杨迎冬, 晏祥省, 张红兵, 等. 县(市)地质灾害调查综合研究与信息系统建设成果报告[R]. 昆明: 云南省地质环境监测院, 2010.
- [11] 唐川. 云南省地理研究所滑坡泥石流研究10年[J]. 云南地理环境研究, 1998, 10(S1): 33-40.
- [12] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 858-868.
- [13] 袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 3-14.
- [14] 陈林, 汪德果, 田开明, 等. 膨胀土研究报告[R]. 昆明: 云南省设计院, 1986.
- [15] 云南省城乡建设委员会. 云南膨胀土地区建筑技术规定(草案)[R]. 昆明: 云南省设计院, 1986.
- [16] 周平根. 滑坡监测的指标体系与技术方法[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 19-26.
- [17] 张小趁, 陈红旗. 突发地质灾害应急技术过程模式[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 149-155.
- [18] 张红兵, 金德山. 影响云南省滑坡泥石流活动的几个自然因素[J]. 水文地质工程地质, 2004(5): 38-41.
- [19] 何瑞翔, 林齐根, 王瑛, 等. 云南省地质灾害影响因素及高危险区分析[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 208-213.
- [20] 龚红胜, 朱杰勇, 陈刚. 昆明市活动断裂与地质灾害关系的探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 161-164.

- [21] 张家明, 徐则民, 李峰. 植被发育斜坡土体大孔隙分布特征的染色示踪法研究[J]. 山地学报, 2016, 34(5): 513–517.
- [22] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 78–90.
- [23] 刘传正. 关注冰雪冻融引发的崩塌滑坡灾害[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 3–3.
- [24] 杨迎冬, 汤沛, 肖华宗, 等. 云南省地质灾害与水系关系初步分析[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 36–39.
- [25] 乔建平, 蒲晓虹, 王萌, 等. 汶川地震滑坡的分布特点及最大震中距分析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 10–15.
- [26] 刘传正, 温铭生, 刘艳辉, 等. 汶川地震区地质灾害生成规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 1–16.
- [27] 张红兵, 崔建文, 张能, 等. 云南宁洱地震引发地质灾害效应初步分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 46–48.
- [28] 王宇, 杨迎冬, 晏祥省, 等. 云南鲁甸 6.5 级地质次生特大地质灾害的特征及原因[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 83–86.
- [29] 刘传正, 葛永刚, 江兴元, 等. 鲁甸地震红石岩崩塌触发机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(4): 601–608.
- [30] 刘广润, 吕贵芳, 江丕光, 等. 山区铁路工程地质[M]. 北京: 地质出版社, 1977: 197–293.
- [31] 金德山. 山区城镇选址规划与地质环境[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007(2): 154–156.
- [32] 中国地质灾害防治工程行业协会. T/ CAGHP 017–2018 县(市)地质灾害调查与区划规范(试行)[S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
- [33] 徐继维, 张茂省. 泥石流风险评估综述[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 157–161.
- [34] 陈志超, 张智超, 罗旋, 等. 基于隐患点详查及非线性叠加算法的地质灾害风险区划[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 94–98.
- [35] 刘传正, 刘艳辉, 温铭生, 等. 中国地质灾害区域预警方法与应用[M]. 北京地质出版社, 2009: 148–171.

The Characteristics and Formation of Geological Hazards in Yunnan Province

YANG Yingdong¹, YAN Xiangsheng¹, WANG Yu², TANG Pei¹,
WEI Lei¹, ZHAO Peng¹ and HUANG Cheng¹

(1. *Yunnan Institute of Geoenvironment Monitoring, Kunming 650216, China;*

2. *Yunnan Geological Survey, Kunming 650051, China)*

Abstract: The main types of geological disaster are collapse, landslide, debris flow and land collapse in Yunnan Province, China. According to the 1: 50000 Scale detailed investigation of geological disaster, 34 408 geological disasters and hidden danger points had been identified, including 24044 landslides, 4054 collapses and 4784 debris flows. In the complex and fragile geological environment conditions of mountainous plateau, local rainstorm, earthquake and stream erosion are the main natural inducing factors of geological disasters, however, the impact of human engineering activities on geological disasters is more and more serious, and the new hidden danger points of geological disasters are often associated with human engineering activities. Based on the comprehensive analysis of multiple factors, we carry out the assessment of geological disaster prone area. Controlled by the geological environment conditions, internal and external dynamic geological processes, and the characteristics of human activities, the formation laws of geological disasters are mainly as follows: the banded development along the zone of specific topography and landform, the high susceptible belt area controlled by spalling and slippery rock and soil and the tectonics, the synchronization of dynamic fluctuation with rainfall, and the radial attenuation law proportional to earthquake intensity, etc. It is pointed out that according to the development law of geological disasters, strengthening risk hierarchical control and hidden danger investigation and treatment, and standardizing human engineering activities are effective ways of disaster prevention and reduction.

Key words: geological disasters; conditions; development; susceptibility; risk; plateau area; Yunnan