

云南省贡山县“5·25”暴雨诱发 地质灾害的特征与形成机制

铁永波¹, 阮崇飞², 杨顺³, 曾波⁴, 张红兵⁵, 李富强⁶, 孙金峰³, 何振强²

(1.中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2.云南地质工程勘察设计院, 云南 昆明 650041; 3.中国地质科学院 探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 4.中国气象局 成都高原气象研究所, 四川 成都 610072; 5.云南省地质环境监测院, 云南 昆明 650200; 6.甘肃地质灾害防治工程勘察设计院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: [目的] 查明2020年5月25日云南省贡山县“5·25”强降雨诱发地质灾害的发育分布特征、形成机制及发展趋势, 为该县地质灾害防灾减灾规划提供科学依据。[方法] 基于灾后应急排查一手资料, 在系统收集区域地质及降雨资料的基础上, 对其灾害过程开展了深入分析与研究。[结果] 贡山县“5·25”群发性地质灾害以滑坡和泥石流为主, 规模多为小型, 主要沿怒江两岸公路沿线分布, 滑坡多以浅表层为主, 泥石流多以土力类泥石流启动模式为主, 地质灾害表现出典型的高位远程及链式灾害特征, 滑坡或崩塌发生后进入沟道转化为泥石流的现象极为普遍。[结论] 贡山县地质灾害调查评价中需充分考虑高位地质灾害的排查, 同时科学评估地质灾害引发的链式效应及其影响区范围; 由于境内植被覆盖率较高, 泥石流发生后携带大量的漂木冲出, 在沟道狭窄处或沟口桥涵处易形成堵塞, 对泥石流的瞬时流量会起到放大作用而翻越沟道造成灾害。泥石流防治工程设计中要充分考虑堵塞系数取值的合理性。建议对贡山县城开展大比例尺地质灾害风险调查与评价, 将评价结果与国土空间规划有机融合, 从源头上对地质灾害风险进行管控, 同时提高县城后山已有泥石流防治工程设防等级和标准。

关键词: “5·25”暴雨; 群发性地质灾害; 发育分布规律; 形成机制; 云南省贡山县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)02-0010-06

中图分类号: P642, P694

文献参数: 铁永波, 阮崇飞, 杨顺, 等. 云南省贡山县“5·25”暴雨诱发地质灾害的特征与形成机制[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 10-15. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.002; Tie Yongbo, Ruan Chongfei, Yang Shun, et al. Characteristics and mechanism of geological disasters induced by “5·25” rainstorm in Gongshan County of Yunnan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 10-15.

Characteristics and Mechanism of Geological Disasters Induced by “5·25” Rainstorm in Gongshan County of Yunnan Province

Tie Yongbo¹, Ruan Chongfei², Yang Shun³, Zeng Bo⁴,

Zhang Hongbing⁵, Li Fuqiang⁶, Sun Jinfeng³, He Zhenqiang²

(1.Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081,

China; 2.Yunnan Geological Engineering Survey and Design Institute, Kunming,

Yunnan 650041, China; 3.Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu, Sichuan

611734, China; 4.Chengdu Institute of Plateau Meteorological, China Meteorology Administration,

Chengdu, Sichuan 610072, China; 5.Yunnan Institute of Geological Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216,

China; 6.Gansu Geological Hazard Prevention Engineering Survey and Design Institute, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: [Objective] The development and distribution characteristics, formation mechanism and development trend of geological hazards induced by “5·25” heavy rainfall on May 25, 2020 in Gongshan County, Yunnan Province were studied, in order to provide scientific basis for geological hazards prevention and mitigation planning in this area. [Methods] Based on the first-hand data of the post-disaster emergency survey and the systematic collection of regional geological and rainfall data, the hazard process was analyzed and studied. [Results] The concurrence geological hazards in Gongshan County were mainly small landslides and debris

收稿日期: 2020-08-03

修回日期: 2020-08-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“循环冻融作用下冰融土的碎化效应及其对泥石流启动的影响试验研究”(41772324); 中国地质调查局项目“川西山区城镇灾害地质调查”(DD20190640)

第一作者: 铁永波(1979—), 男(汉族), 云南省大关县人, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 中国地质调查局工程首席专家, 主要从事地质灾害形成机理与风险评价方面的研究。Email: tyb2009@qq.com。

flows, which were mainly distributed along the road and on both sides of Nujiang River. Most of the landslides were shallow surface, and debris flows were mainly initiated by landslide. The geological hazards showed typical characteristics of high-location, long-range and chain type disasters. It was very common for landslide or collapse to enter the channel and turn into debris flow. [Conclusion] In the investigation and assessment of geological hazards in Gongshan County, it is necessary to fully consider the investigation of high-location geological hazards, and scientifically evaluate the chain effect caused by geological hazards and the scope of the affected areas; due to the high vegetation coverage in the territory, debris flow will carry a large number of driftwood to rush out, which is easy to form blockage in narrow gully or at the bridge and culvert at the mouth of the gully, which will enlarge the instantaneous volume of debris flow. It is suggested to carry out large-scale geological hazard risk investigation and evaluation in Gongshan County, and organically integrate the evaluation results with the land spatial planning, so as to control the geological hazard risk from the source, and improve the protection standard of debris flow control engineering in the back mountain of the town.

Keywords: “5·25” rainstorm; group geo-hazards; development and distribution; formation mechanism; Gongshan County of Yunnan Province

暴雨引起的群发性地质灾害具有发生时间集中、空间分布面广、危害大等特点,在全球山区均有发育^[1-5]。近年来,受全球气候变化影响、局地极端强降雨频发及人类工程活动加剧的影响,全球范围内群发性地质灾害日益增多^[6-8]。通常情况下,局地强降雨过程是引起群发性地质灾害的主要原因,如 1999 年委内瑞拉北海岸 Vargas 地区强降雨诱发的群发性泥石流灾害造成 15 000 余人死亡,直接经济损失约 1 亿美元^[1];2013 年甘肃省天水市“7·25”暴雨诱发地质灾害 700 余处。其他一些极端因素也会引起群发性地质灾害,如强震除了导致群发性同震地质灾害外,其形成的大量松散岩土体为群发性地质灾害的形成提供必要条件,2008 年汶川地震发生后至今的 10 余年间,强震区因暴雨诱发的群发性地质灾害仍然在持续活跃^[3];如我国东南沿海地区台风过境带来的强降雨天全也能诱发群发性地质灾害^[4]。

怒江流域是云南省地质灾害高发地区之一,历史上地质灾害频发^[9-12]。研究^[13-19]表明,受地形地貌及印度洋暖湿气流的影响,该地区大型堵江泥石流灾害极具代表性,历史上发生过多起泥石流堵断怒江引发链式灾害的事件,其中以贡山县境内泥石流最为典型。2020 年 5 月 24 日至 27 日连续 4 d 降雨 348.2 mm,是贡山县境内有气象记录以来最大的持续强降雨天气过程,5 月 25 日和 26 日的集中强降雨导致贡山县域内新增地质灾害 208 处(截止到 2020 年 6 月 15 日统计数据),其中新发生滑坡 121 个,崩塌 22 个,泥石流 65 条。全县原有的 305 处地质灾害隐患点中,也有 120 处在此次暴雨影响下有不同程度的活动迹象。据统计,此次贡山县“5·25”强降雨引发地质灾害导致全县 9 000 余人受灾,造成直接经济损失约 90 000 万元、3 人死亡及 5 人失踪的灾情。

1 研究区概况

贡山独龙族怒族自治县(贡山县)在行政区划上属云南省怒江傈僳族自治州,地处滇西北怒江大峡谷北段,位于东经 98°08′—98°56′,北纬 27°29′—28°23′,东与云南省德钦、维西两县相连,南与怒江州福贡县相邻,北与西藏自治区察隅县接壤,西与缅甸联邦毗邻,国土总面积 4 379.24 km²,总人口 35 498 人主要分布有独龙族、怒族、傈僳族及藏族等少数民族。贡山县地处横断山系北部高山峡谷区,属青藏高原的东南延伸部分,地形崎岖险峻,山高坡陡,谷深沟窄,沟谷纵横切割,担当力卡山、高黎贡山、碧罗雪山三大山系与独龙江、怒江两大水系从北向南相间纵列,形成了“三山夹两江”的高山峡谷地貌,境内最高海拔 5 128 m,最低海拔 1 170 m,海拔高差达 3 958 m。由于地处印度洋暖湿气流和西藏高原冷空气的结合部,受地形地貌、大气环流等因素的影响,贡山境内降水充沛并且时空分布不均,主体气候类型属高原温带湿润型山地季风气候,且受高程控制垂直分带十分明显,据贡山县气象观测资料,茨开镇气象站(海拔 1 500 m)多年平均降水量 1 726.5 mm,而独龙江气象站(海拔 1 489 m)多年平均降水量则高达 4 743.5 mm。研究区雨季可长达 9 个月,降雨从每年 2 月中旬起就开始明显增多,3 月下旬左右迎来最大值,此后逐渐减少。据历史气象资料表明,贡山县境内 2 月至 4 月的平均降水量可达 600 mm,形成了滇西地区特有的“桃花汛”,受独特的气候背景影响,贡山县境内“桃花汛”期间的平均降水量约占全年平均降雨量 40%。每年的 5 月中下旬开始,贡山县就进入第 2 个雨季,与南亚和东南亚地区的大范围季风雨季同步,直至 10 月才结束。受青藏、滇缅、印度巨型“歹”字型构造

体系影响,贡山县地质构造复杂,岩石出露相对完整,地层以中生界最为发育,其次是新生界和古生界,主要地层和岩浆岩、变质岩分布均与独龙江断裂、怒江断裂和澜沧江断裂三大深大断裂活动密切相关,它控制区域内地貌发育和地壳的稳定性,上新世以来,区域内地壳强烈隆升,导致河流深切,发育多级河流阶地,高山与峡谷并行,地震活动较频繁,是云南西部地质灾害高发和频发地区。

2 地质灾害分布规律与成灾特征

2.1 地质灾害沿河谷集中分布,高位远程及链式灾害特征明显

根据地质灾害排查结果,此次贡山县“5·25”暴

雨共诱发新增地质灾害隐患点 208 处(图 1)。从空间分布特征看,泥石流主要沿怒江及其主要支流分布,滑坡和崩塌则主要集中分布在 G219 公路沿线。从地质灾害成灾的空间分布特征看,此次群发性地质灾害成灾最严重的区域是 G219 公路沿线,其中造成人员伤亡的地质灾害主要由分布在 G219 公路沿线,因滑坡和崩塌掩埋过往车辆而导致。在此次暴雨诱发地质灾害中,高位远程滑坡和崩塌现象极为普遍,且具有高速运动的特征,这与怒江两岸坡体上陡下缓的地形地貌有密切关联。此外,流域内滑坡或崩塌发生后在沟道形成的“堵—溃”链式灾害特征也极为常见,在此次暴雨诱发的泥石流灾害中,多数都具有链式灾害的特点。

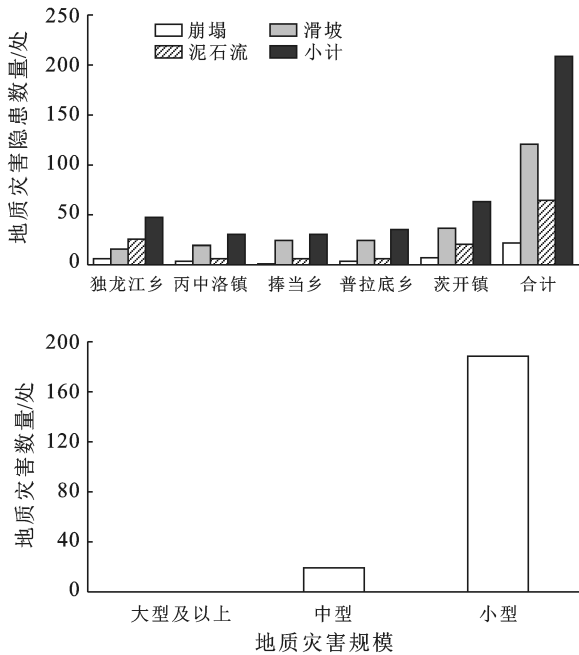
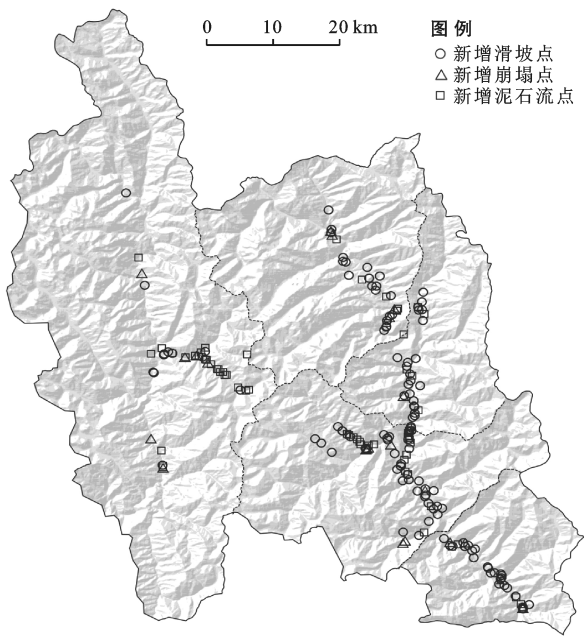


图 1 贡山县地质灾害发育分布特征

2.2 地质灾害群发,以小规模为主

贡山县“5·25”暴雨共诱发的新增地质灾害隐患点中,滑坡有 121 处,占总数的 58.2%,崩塌 22 处,占总数的 10.6%,泥石流 65 条,占总数的 31.2%,灾害类型较为集中,主要以滑坡和泥石流为主。此次暴雨诱发的地质灾害具有典型的群发性,以行政单元为例,此次暴雨过程中贡山县 5 个乡镇境内均同时发生多起地质灾害,且以县城所在地茨开镇的地质灾害数量最多。从地质灾害规模看,中型及以上规模地质灾害仅有 19 处,小型占 189 处,主要以小型为主。

2.3 威胁对象类型多,分散性强

根据对贡山县境内目前现有的 512 处地质灾害隐患点(原有地质灾害隐患点 305 处,此次新增 208 处)的排查结果,县境内地质灾害直接威胁村庄的有

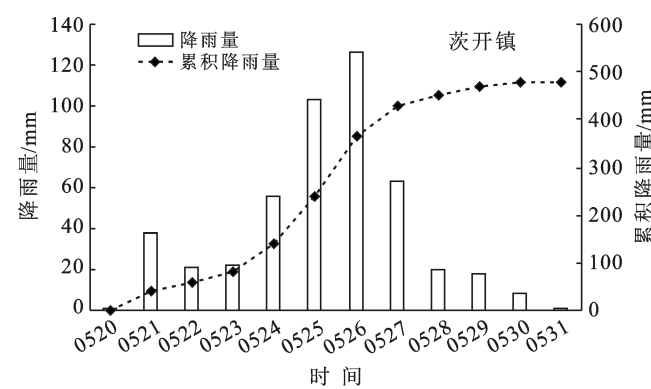
150 余处,直接威胁道路交通的有 165 处,威胁厂矿企业 4 处,受威胁人口 9 000 余人。同时,这些受威胁的村庄、道路、厂矿、居民区、加油站等对象分散在全县的 5 个乡镇,26 个村委会。

3 成因机制分析

3.1 持续长时间强降雨过程为地质灾害的发生提供动力条件

从区域气象条件看,5 月 20 日在印度西孟加拉邦沿海登陆的气旋风暴“安攀”(AMPHAN)受高原槽波动影响,22 日在登录孟加拉后减弱云系往北移动与高原上的冷空气配合东移至滇西地区,并带来强降水天气,为此次贡山县“5·25”降雨过程奠定了基础。从贡山县两处气象站降雨量观测数据看,5 月 26 日贡

山县城所在地茨开镇附近降雨量为 85.4 mm，而贡山县北部的独龙江乡 5 月 25 日降雨量为 102.9 mm，26 日降雨量为 126.3 mm(图 2)。两个乡镇为此次贡山县强降雨过程的两处强降水中心，但降雨量差异极为显著，



主要受贡山县地形、海拔等因素的影响。根据此次地质灾害应急排查结果，茨开镇和独龙江乡也是此次群发性地质灾害分布数量最多、危害最为严重的乡镇，表明强降雨与贡山县地质灾害之间的高度对应关系。

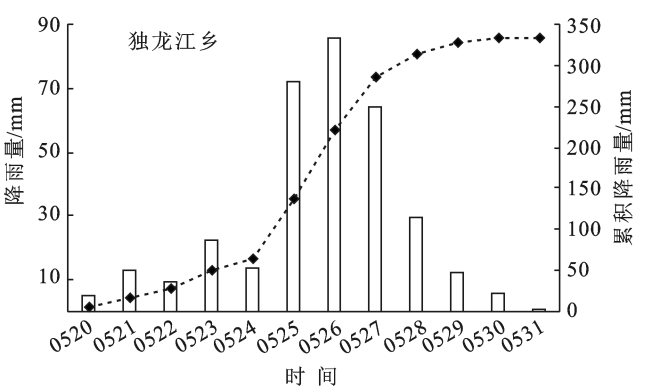


图 2 贡山县降雨量特征

但就“5·25”强降雨过程而言，明显的降雨强度增加是从 5 月 21 日开始，5 月 26 日，两个气象站所观测到的雨量均达最大值。以独龙江乡观测数据为例，从小时降雨量分布特征上看，在 5 月 25—26 日地质灾害群发时段内，降雨量最为集中，48 h 累计降雨 229.2 mm，占此次 4 d 持续降雨总量的 65.8%，但逐

小时降雨量变化却相对平稳(图 3)。与西南其他地区小时降雨几十毫米诱发地质灾害的短时暴雨相比^[20,21]，贡山县境内地质灾害发生的临界雨量值具有其独特性。5 月 21—25 日独龙江乡累计降雨量 240.3 mm，茨开镇累计降雨量 130.9 mm，前期累积降雨量非常大。

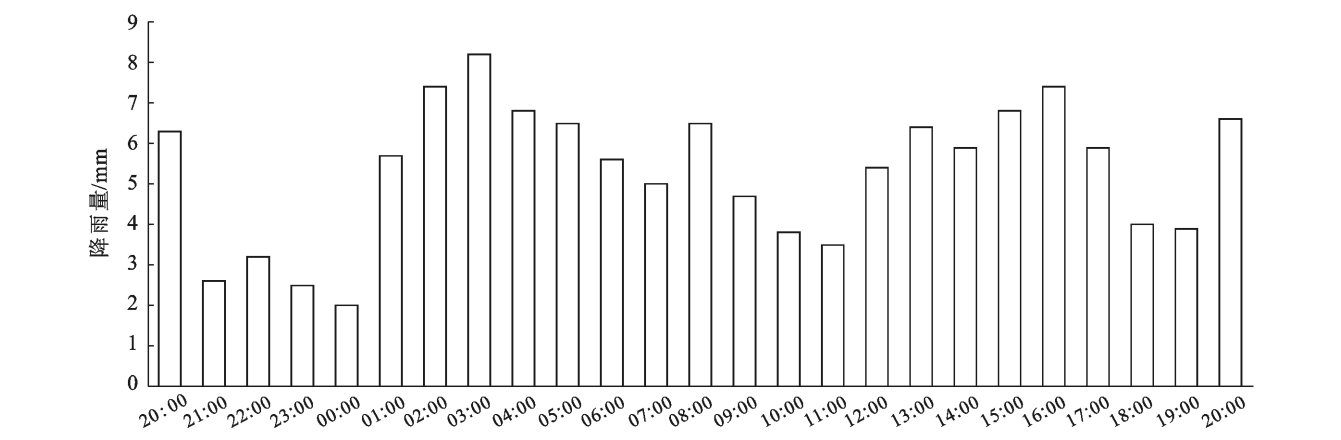


图 3 贡山县独龙江乡 2020 年 5 月 25 日 20:00 至 26 日 20:00 逐小时降雨量分布与特征

从降雨的时间分布特征上看，2020 年 2 月中下旬就开始的“桃花汛”及从 5 月 20 日开始的前期降雨为此次贡山县“5·25”群发性地质灾害的发生提供了重要条件。尤其是长达 6 d 的持续降雨为地表岩土体含水率的持续增加直至土体含水率饱和起到了关键作用，在 26 日降雨强度增大的条件下，最终导致表层强风化岩体和地表松散土体在含水率饱和后沿基伏界面滑动而形成灾害，在此次的排查中也发现，暴雨诱发的滑坡滑动面主要发育在上覆残坡积粉质黏土与全强风化下伏基岩分界面。

3.2 深切河谷地形为地质灾害孕灾提供基础

贡山县地处怒江大峡谷深切河谷区，受河流下切的影响，县境内山高、坡陡、谷深，整个县境内 98% 以上面积为山地，根据全县地形坡度统计分析结果，县境内坡度介于 20°~40°之间的地形占比约 70%，陡峭的地形坡度不利于地表松散土体的稳定性，尤其是在暴雨作用下土体含水率饱和后的稳定性更差。此次地质灾害排查结果显示，贡山县境内滑坡多发生在坡度 25°~60°之间的斜坡地带，尤其地形表现为凸型坡的微地貌与滑坡和崩塌的对应关系极为密切(图 4)。

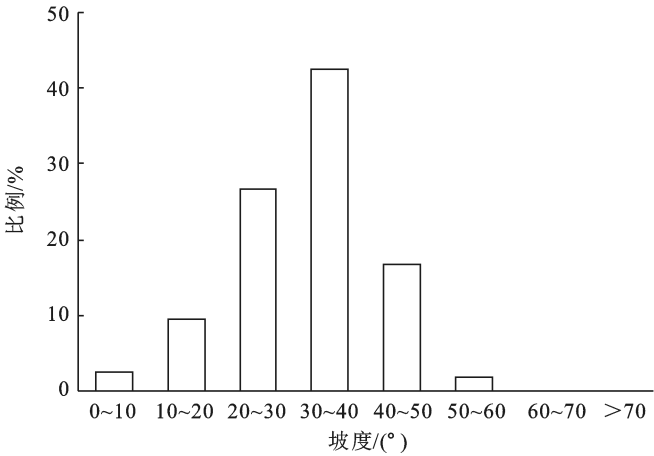
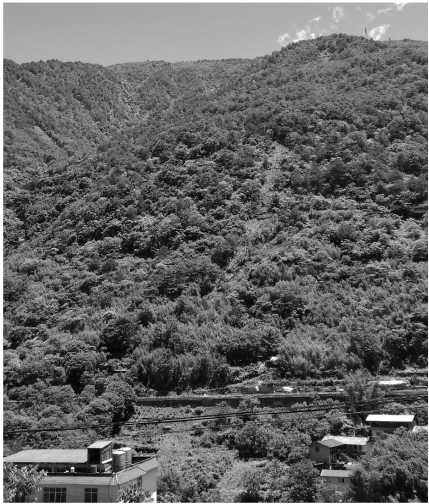


图 4 贡山县境内地形坡度特征



3.3 高植被覆盖率增大了地质灾害早期识别的难度

根据对贡山县植被和土地利用分类分析结果,贡山县境内植被覆盖率可高达 80% 以上,高植被覆盖率在很大程度上掩盖了该地区地表早期发生的变形破坏迹象,难以通过群测群防或定期的巡查进行早期识别(图 5)。

虽然此次暴雨诱发的滑坡多为浅表层滑坡,但因陡坡密林区难以到达,给地质灾害早期识别带来极大的难度,增强了地质灾害的隐蔽性。同样,光学遥感、InSAR, LiDAR 等新技术手段也会因乔木、灌木和草本形成的垂直结构层阻挡而导致识别的精度极大降低,难以达到有效的早期识别效果。

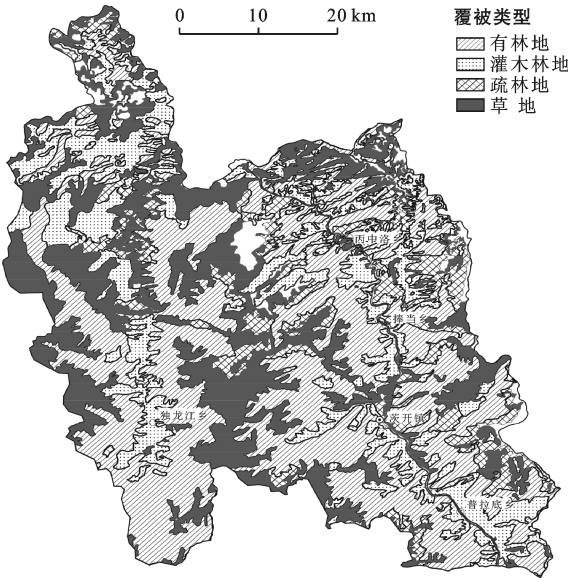
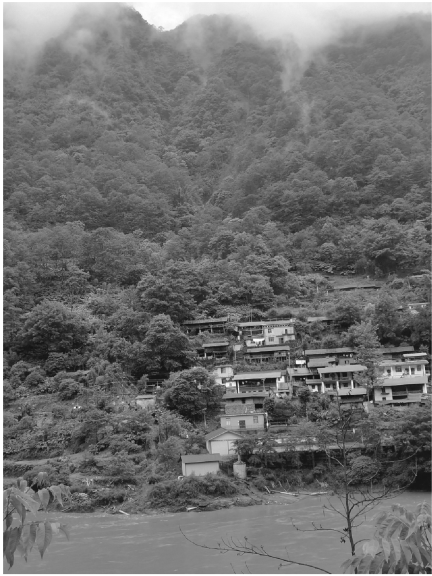


图 5 贡山县植被覆盖特征



3.4 人类工程建设活动增大了地质灾害发生的风险

近年来,随着云南省大滇西旅游环线规划实施及贡山县经济和旅游业的发展,境内美丽公路、德贡公路及各乡镇通村公路的建设对地质环境的扰动明显。一方面,贡山县境内公路坡脚开挖后形成沿公路一侧的临空面,为滑坡和崩塌的形成提供了有利条件;另一方面,一些边坡开挖后未进行有效防护等因素也在一定程度上对地质灾害的发生起到了催化作用。根

据对此次群发性地质灾害的调查结果表明,约 36.5% 的地质灾害主要集中分布在公路沿线,说明公路建设在一定程度上对地质灾害的发育数量有着积极的影响。除公路切坡失稳引发的地质灾害外,许多居民区的房屋建设对地质灾害发生的影响其实并不明显,造成灾害的原因主要是受地质环境条件制约,贡山县村寨多位于泥石流堆积扇和崩滑堆积体上,居民点与地质灾害隐患点之间缺乏足够安全距离,在本次降雨过

程中,120 处已知隐患点复活并造成灾害的许多都是泥石流对临近沟口房屋或建筑造成损毁。

4 结论

(1) 此次贡山县群发性地质灾害以滑坡和泥石流为主,规模多为小型。崩塌和滑坡主要沿怒江两岸公路沿线分布,以浅表层崩滑为主;泥石流主要分布在怒江两岸及支流内,多以土力类泥石流启动模式为主。

(2) 此次暴雨诱发地质灾害表现出典型的高位远程及链式灾害特征,滑坡或崩塌发生后进入沟道转化为泥石流的现象极为普遍,地质灾害风险防控中应充分考虑高位地质灾害的排查,同时充分评估地质灾害引发的链式效应及其影响区范围。

(3) 贡山县境内植被覆盖率较高,泥石流发生后携带大量的漂木冲出,在沟道狭窄处或沟口桥涵处易形成堵塞,对泥石流的瞬时流量会起到放大作用而翻越沟道造成灾害,在贡山县泥石流防治工程设计中要充分考虑堵塞系数取值的合理性,校核泥石流峰值流量计算结果,保证泥石流有足够的过流断面,从根本上避免灾害的发生。

(4) 鉴于贡山县城后山泥石流现状及发展趋势分析,建议对贡山县城开展大比例尺地质灾害风险调查与评价,将评价结果与国土空间规划有机融合,从源头上对地质灾害风险进行管控。县城后山已有泥石流防治工程设防等级急需提升,在对已有治理工程开展修复和维护的同时,加强工程治理力度,提升泥石流设防标准和等级。

5 讨论

(1) 持续型降雨诱发区域性地质灾害的临界雨量值问题探讨。从此次贡山县“5·25”群发性地质灾害的诱发雨量特征看,具有长历时前期降雨和持续强降雨的特点,从前 3 日累计降雨量和持续降雨强度及历时等关键参数入手,探索贡山县甚至怒江州境内地质灾害发生的临界雨量值,对地质灾害的监测预警阈值的确定具有参考意义,但各个参数值还需要对贡山县境内更多已发生的历史地质灾害降雨数据进行统计分析确定。

(2) 对于贡山县这类植被覆盖密度较高、地质灾害发生频发的区域而言,如何提前发现地表坡体变形或识别流域内泥石流潜在物源难度极大,需要从地质本身角度对地质灾害的成因机制进行分析,通过揭示地形坡度与地表土体厚度的关系入手,统计分析历史地质灾害多发的坡度区间值,结合地质灾害易发区的

微地貌(凸形坡、凹形坡等)特征等参数进行综合研判。同时,深入开展地质灾害高发区与植被类型、覆盖密度等参数的关联性研究,揭示地质灾害与植被间的相互影响和作用关系,形成基于“地质+植被”为基础的高植被覆盖区多指标地质灾害早期识别方法与体系。

(3) 从贡山县“5·25”群发性地质灾害发生的时间上看,降雨量剧增的时间为 5 月 25 日,但地质灾害大规模暴发的时间是在 5 月 26 日,表明贡山县境内地质灾害的发生相对降雨而言具有一定的滞后性,这可能与该地区植被覆盖率高及合理的植被群落结构特征有关。当雨水从最顶层的乔木到地面土体需要经过多层的树冠拦截,这在很大程度上延缓了降雨入渗土体或转化为地表径流的速度,在一定程度上延缓了土体含水率的饱和及失稳速度,从而导致地质灾害发生相对降雨滞后的特点。

致谢:在本文的完成中得到了云南省怒江州自然资源局、贡山县自然资源局的大力支持,云南省地质环境监测院、云南地质工程勘察设计院、甘肃地质灾害防治工程勘察设计院单位其他技术人员在此次地质灾害应急排查过程中获得的一手调查数据支撑了论文的研究,在此一并感谢!

[参 考 文 献]

- [1] Lopez J L, Perez D, Garcia R. Hydrologic and geomorphologic evaluation of the 1999 debris flow event in Venezuela [C]//3 rd International Conference on Debris flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Davos, Switzerland, 2003:13-15.
- [2] 郭富赞,孟兴民,黎志恒,等.天水市“7·25”群发性地质灾害特征及成因[J].山地学报,2015,33(1):100-107.
- [3] 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[J].岩石力学与工程学报,2009,27(12):2585-2592.
- [4] 阮锡章,洪维群,陈延云,郑文君,等.一次群发性地质灾害气象成因分析[C]//第 34 届中国气象学会年会. 2017:694-698.
- [5] 简涛.云南省昌宁县“9·16”群发性地质灾害成因分析与防治对策[J].工程技术(引文版),2016,7(1):69-71.
- [6] 铁永波,徐勇,张勇,等.南方山地丘陵区地质灾害调查工程主要进展与成果[J].中国地质调查,2020,7(2):1-12.
- [7] Ni Huayong, Zheng Wanmo, Li Zongliang, et al. Recent catastrophic debris flows in Luding county, SW China: Geological hazards, rainfall analysis and dynamic characteristics [J]. Natural Hazards, 2010,55(4):523-542.

(下转第 24 页)

- [21] 魏东慧,张江汀,魏学智.4 种水生植物对富营养化水体氮磷去除效果的研究[J].中国野生植物资源,2012,31(5):12-17.
- [22] 段婧婧,薛利红,冯彦房,等.碳氮比对水芹浮床系统去除低污染水氮磷效果的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(3):384-391.
- [23] 司圆圆,卢王梯,陈兴汉,等.菱角对农村富营养化水体营养盐吸收的初步研究[J].水生态学杂志,2018,39(1):32-36.
- [24] Jin Entao, Cao Leipeng, Xiang Shuyu, et al. Feasibility of using pretreated swine wastewater for production of water spinach(*Ipomoea aquatic* Forsk.) in a hydroponic system [J]. Agricultural Water Management, 2020, 228:105856.
- [25] Yao Lixiao, Li Guoliang, Dang Zhi, et al. Uptake and transport of roxarsone and its metabolites in water spinach as affected by phosphate supply [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2010,29(4):947-951.
- [26] 张村侠,朱世东.浮床栽培绿叶蔬菜对富营养化水体的净化效果[J].安徽农业科学,2007,35(14):4193-4194, 4196.
- [27] 赵鸿哲.浮床栽培蔬菜的适应性选择及其对富营养化水体净化效果的研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古大学, 2013.
- [28] 方焰星,何池全,梁霞,等.水生植物对污染水体氮磷的净化效果研究[J].水生态学杂志,2010,3(6):36-40.
- [29] Fennessy M S, Cronk J K, Mitsch W J. MacropHyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions [J]. Ecological Engineering, 1994, 3(4): 469-484.
- [30] 王盼,马牧源,刘春光,等.不同氮源对黄花鸢尾净化富营养化水体的影响[J].水资源与水工程学报,2014,25(1):13-17.
- [31] 杨晓玲,郭金耀.水蕹菜对富营养化养殖水的净化作用研究[J].作物杂志,2012(1):49-52.
- [32] 胡绵好,奥岩松,朱建坤,等. pH 和曝气对水生植物去除富营养化水体中氮磷等物质的影响[J].水土保持学报,2008,22(4):168-173.
- [33] 丁炜,朱亮,徐京,等.好氧反硝化菌及其在生物处理与修复中的应用研究进展[J].应用与环境生物学报, 2011,17(6):923-929.
- [34] 梁书诚,赵敏,卢磊,等.好氧反硝化菌脱氮特性研究进展[J].应用生态学报,2010,21(6):1581-1588.
- [35] Gao Jingqing, Xiong Zhiting, Zhang Jingdong, et al. Phosphorus removal from water of eutrophic Lake Donghu by five submerged macrophytes [J]. Desalination, 2009,242(1):193-204.
- [36] 刘晓丹,李军,龚一富,等.5 种水培植物对富营养化水体的净化能力[J].环境工程学报,2013,7(7):211-216.

(上接第 15 页)

- [8] 铁永波,唐川,倪化勇.群发性泥石流的危害效应及防范探讨[J].山地学报,2010,28(6):753-757.
- [9] 孔艳,王保云,杨昆,等.云南省泥石流灾害时空分布规律及典型区域孕灾特点分析[J].云南师范大学学报(自然科学版),2018,38(6):55-63.
- [10] 唐川.云南怒江流域泥石流敏感性空间分析[J].地理研究,2005,24(2):178-185.
- [11] 孔艳,王保云,王乃强,等.滇西高山峡谷区泥石流危险性评价:以怒江傈僳族自治州为例[J].云南师范大学学报(自然科学版),2019,39(3):63-70.
- [12] 徐慧娟.怒江流域高山峡谷区泥石流活动规律及成灾驱动力研究[D].云南 昆明:云南大学,2016.
- [13] 郑师谊,张绪教,杨艳,等.层次分析法在滇西怒江河谷潞江盆地崩塌与滑坡地质灾害危险性评价中的应用[J].地质通报,2012,31(Z1):356-365.
- [14] 李益敏,杨蕾,魏苏杭.基于小流域单元的怒江州泥石流易发性评价[J].长江流域资源与环境,2019,28(10): 2419-2428.
- [15] 吕立群,王兆印,徐梦珍,等.怒江泥石流扇地貌特征与扇体堵江机理研究[J].水利学报,2016,47(10): 1245-1252.
- [16] 周东平.云南怒江贡山流域泥石流预警模型研究[D].河北 石家庄:石家庄经济学院,2015.
- [17] 苏鹏程,韦方强,谢涛.云南贡山 8·18 特大泥石流成因及其对矿产资源开发的危害[J].资源科学,2012,34(7):1248-1256.
- [18] 张杰,李世凯,甘云兰,等.云南贡山 8·18 特大泥石流灾害调查分析与启示[J].工程地质学报,2015,23(3): 373-382.
- [19] 程德方.怒江六库—贡山河段泥石流初探[J].水土保持通报,1985,5(1):55-56.
- [20] Tie Yongbo Xu Ruge, Ba Renji. The formation of run-off-generated debris flow in Southwestern of China: Take Gangou as an example [J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(5):1479-1490.
- [21] 铁永波,徐如阁,刘洪,等.西昌市泸山地区典型火后泥石流特征及成因机制研究:以响水沟左岸 3[#]支沟为例[J].中国地质调查,2020,7(3):82-88.