

云南省地质灾害综合防治体系建设系列专项研究进展

康晓波, 杨迎冬, 王宇, 祝传兵, 黄成, 张杰, 周翠琼, 柴金龙, 张文

Progress of the special-subjects study on the construction of comprehensive geological disaster prevention and control system in Yunnan Province

KANG Xiaobo, YANG Yingdong, WANG Yu, ZHU Chuanbing, HUANG Cheng, ZHANG Jie, ZHOU Cuiqiong, CHAI Jinlong, and ZHANG Wenyun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202211044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状

Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China

张凯翔 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 1-11

基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province

张以晨, 郎秋玲, 陈亚南, 张继权, 田书文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 104-110

青海省地质灾害防治资金投入与成效分析

Analysis of funding used for geological disaster prevention in Qinghai Province and its effects

魏赛拉加, 严慧, 张俊才, 魏正发, 吴靓 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 112-116

青海省滑坡崩塌泥石流灾害时空分布特征

Temporal and spatial characteristics of landslide, rockfall and debris flow disasters in Qinghai Province during the period

魏正发, 曹小岩, 张俊才, 应忠敏, 严慧, 魏赛拉加 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 134-142

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115

基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202211044

康晓波, 杨迎冬, 王宇, 等. 云南省地质灾害综合防治体系建设系列专项研究进展[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(6): 146-157.

KANG Xiaobo, YANG Yingdong, WANG Yu, et al. Progress of the special-subjects study on the construction of comprehensive geological disaster prevention and control system in Yunnan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 146-157.

云南省地质灾害综合防治体系建设系列专项研究进展

康晓波^{1,2,3}, 杨迎冬^{1,2,3}, 王宇^{1,2,4}, 祝传兵^{1,2,3}, 黄成^{1,2,3}, 张杰^{1,2,3}, 周翠琼^{1,2,3}, 柴金龙^{1,2,4}, 张文馨^{1,2,3}

- (1. 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;
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, 云南昆明 650216;
3. 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216; 4. 云南省地质调查局, 云南昆明 650051)

摘要: 云南省地质灾害综合防治体系建设是国内规模最大、最广泛的地质灾害防治专项, 其实施使全省地质灾害发生数量大幅减少, 因灾死亡及失踪人数明显递减, 防灾减灾成效显著。文章依据 12 项系列专题研究成果, 综述了体系建设实施概况及防灾减灾成效, 归纳评述了取得的主要科技成果, 重点对高原地质灾害成因、规律认识、特殊岩土控灾机制、易发性分区评价、隐患综合遥感识别、自动化监测预警及信息标准体系建设进展进行了总结, 成果可为云南省地质灾害综合防治提供经验借鉴。

关键词: 地质灾害; 滑坡; 泥石流; 崩塌; 防治体系; 科技进步; 云南省

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)06-0146-12

Progress of the special-subjects study on the construction of comprehensive geological disaster prevention and control system in Yunnan Province

KANG Xiaobo^{1,2,3}, YANG Yingdong^{1,2,3}, WANG Yu^{1,2,4}, ZHU Chuanbing^{1,2,3}, HUANG Cheng^{1,2,3},
ZHANG Jie^{1,2,3}, ZHOU Cuiqiong^{1,2,3}, CHAI Jinlong^{1,2,4}, ZHANG Wenyun^{1,2,3}

- (1. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China; 3. Yunnan Institute of Geological Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 4. Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract: The establishment of the comprehensive geological disaster prevention and control system in Yunnan province stands as China's most extensive and grand-scale endeavor in safeguarding the prevention and control of geological disasters in China. Its implementation has led to a significant reduction in the occurrence of geological disasters, resulting in a substantial decrease in both casualties and missing persons affected by such disasters. This accomplishment has yielded remarkable outcomes in

收稿日期: 2022-11-23; 修订日期: 2023-03-25

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 云南省地质灾害综合防治体系建设专项计划项目(2013—2020)

第一作者: 康晓波(1982-), 男, 四川汉源人, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害综合防治体系建设和水工环地质调查研究。

E-mail: kangxiaobo1121@163.com

通讯作者: 王宇(1960-), 男, 云南个旧人, 博士, 正高级工程师(二级), 主要从事水工环及灾害地质研究。E-mail: ynddywy@163.com

disaster prevention and mitigation. Based on the results of 12 series monographic studies, this paper provides an overview of the implementation of the system and its disaster prevention and mitigation effects. It summarizes the main scientific and technological achievements, with a particular focus on the causes and patterns of plateau geological disasters, understanding of special rock and soil disaster control mechanisms, susceptibility zoning evaluation, comprehensive remote sensing identification of geological hazards, progress in automated monitoring and early warning, and the development of geological environment information standard system. These achievements can provide valuable insights for the comprehensive geological disaster prevention and control in Yunnan Province.

Keywords: geological disaster; landslide; debris flow; collapse; prevention and control system; science and technology progress; Yunnan Province

0 引言

为了提升地质灾害和防治技术研究水平,总结经验、凝练成果,形成系统化、理论化的系列科学技术研究成果,更有力地促进防灾减灾事业发展、支撑和服务地质灾害防治管理,云南省财政计划安排了“云南省地质灾害综合防治体系建设系列专题研究”专项,由云南省自然资源厅主持、云南省地质调查局组织实施。该专项共设置 12 个研究专题、1 项科技论文选辑任务,分别由长期参加云南省地质灾害防治与研究的资质单位

和科研院校牵头开展研究(表 1)。云南省地质灾害综合防治体系建设是前所未有的重大专项行动,防灾减灾成效显著^[1-2],在区域地质灾害发育分布规律认识、综合防治水平提升等方面取得了较大进步^[3-6]。在研究成果总结的基础上^[7-8],云南省地质调查局组织完成了系列专题研究成果的综合集成,对云南省地质灾害防灾减灾的支撑起到了重要作用^[9]。本文即是对该系列专题研究取得的主要科技进步与创新点的梳理和评述,希望能为地质灾害防治实践与研究提供参考和借鉴。

表 1 研究专题设置情况
Table 1 The research topic setting fact sheet

编号	专题名称	牵头单位/协作单位
1	云南高原地质环境特征与地质灾害发育规律研究	云南省地质环境监测院/昆明理工大学
2	云南高原山区地质灾害应急技术支撑体系研究	云南省地质环境监测院
3	云南高原山区崩滑流地质灾害自动化监测预警技术方法研究	云南省地质环境监测院
4	云南高原山区地质灾害隐患综合遥感识别技术研究	云南省地质环境监测院/中国自然资源航空物探遥感中心、中南大学
5	面向降雨型滑坡时空信息服务关键技术应用研究	云南省自然资源厅国土资源信息中心/云南省地质环境监测院、中国地质大学(武汉)
6	高原山区复杂环境条件地质灾害综合防治新型工程技术体系研究	云南地质工程勘察设计院
7	高原环境特殊岩土体地质灾害成因机制及防治工程技术研究	云南地质工程第二勘察院
8	高原岩溶场地塌陷隐患勘测识别及防治技术研究	中国有色金属工业昆明勘察设计院
9	云南高原深切峡谷区水利水电工程地质灾害问题及防治措施研究	云南华昆国电工程勘察有限公司/中国电建集团昆明勘测设计研究院、昆明理工大学
10	云南高原公路工程重大地质灾害成因机制及防治技术研究	云南省交通规划设计研究院
11	云南高原采矿沉陷区次生地质灾害隐患识别及防治对策研究	昆明煤炭设计研究院/昆明理工大学
12	云南高原地质灾害发育规律及防治技术序列研究	云南省地质调查局/云南省地质环境监测院、云南地质工程勘察设计院
13	《云南省地质灾害防治与地质环境保护研究论文集》选辑	云南省地质灾害研究会

1 综合防治体系建设概况

1.1 建设实施概况

2012 年彝良“9·7”地震后,国务院将云南省列为全国第一个地质灾害防治重点省份。2013 年云南省政府第八次常务会议批准了《云南省地质灾害综合防治体系建设实施方案(2013—2020 年)》。2013—2020 年实施期间,每年投入 20 亿元专项资金,其中:中央补助 10 亿

元,省级自筹 7 亿元,州(市)级自筹 3 亿元,开展地质灾害调查评价、监测预警、避让搬迁与工程治理、应急能力提升“四大体系”建设。

调查评价:分批次完成了全省 129 个县(市、区)的 1 : 50 000 地质灾害详细调查,共调查、排查出地质灾害及隐患点 34 148 处。完成了受地质灾害威胁严重的德钦、红河等 28 个县城和东川因民、元阳新街等 40 个

乡镇共 68 个重点城镇地质灾害防治效果评价与风险评估。2020 年在地质灾害中高易发区部署开展 15 个重点县(市、区)的地质灾害精细化调查与风险评价。

监测预警: 对 25 234 处地质灾害隐患点落实群测群防制度, 落实监测措施及监测员 3.6 万余人。完成第二代地质灾害气象风险预警系统, 通过电视台、互联网、报刊、电台、传真、短信、APP、微信公众号、显示屏、气象大喇叭等方式, 向社会免费提供预警信息。建成省监测预警平台, 布设监测预警设备 19 233 台, 实现对 3 663 处地质灾害隐患的专业和普适型实时监测。

搬迁避让与治理工程: 共下达 16 个州(市)99 929 户搬迁避让指标, 由地方人民政府统筹实施。共实施 4 500 余处地质灾害治理工程项目(大型以上治理工程 763 处, 中小型治理工程约 3 800 处)。

应急能力: 组建了由省级专家组和 7 个片区专家组、73 个应急调查组、230 多名专业技术人员组成的专业化地质灾害应急队伍。建成了省、州(市)级应急会商系统, 以及地质环境信息平台。构建了省、州(市)、县(市、区)三级地质灾害防治技术指导中心(站), 安排 530 多名驻州(市)包县和驻县联乡专业技术人员为地质灾害防治提供技术支持。组建省地质灾害隐患识别中心, 利用卫星光学影像数据、SAR 数据, 采用天—

空—地一体化技术进行地质灾害隐患识别。

此外, 编发《云南省地质灾害处置规定》《云南省地质灾害治理工程项目管理办法》《云南省地质灾害防治资金管理办法》等省级和地方规范性文件 300 多份。

1.2 建设成效评述

通过地质灾害群测群防宣传培训, 增强了广大干部群众的防灾避险意识, 提高了监测员及基层干部和群众的认知水平和应急避险能力。2013~2020 年, 云南省通过地质灾害气象风险预警和群测群防成功预警 329 起地质灾害, 避免人员伤亡 16 306 人, 避免财产损失约 3.48 亿元。

地质灾害治理工程有效保护约 93 万人、435 亿元生命财产安全, 搬迁避让消除受地质灾害威胁人口约 10 万户 40 万人。遏制或消除了一大批地质灾害隐患, 并修复了地质环境、拓展了城镇发展和生态建设空间。

综合防治体系建设实施使全省地质灾害发生数量呈下降趋势。2001—2020 年, 地质灾害发生数量从 2001 年的 962 起下降到 2020 年的 375 起, 下降了 61%。2001—2012 年(综合防治体系实施之前)与 2013—2020 年(综合防治体系实施之后)比较, 年均地质灾害发生次数由 1 461 起降为 388 起, 下降了 73%(图 1)。

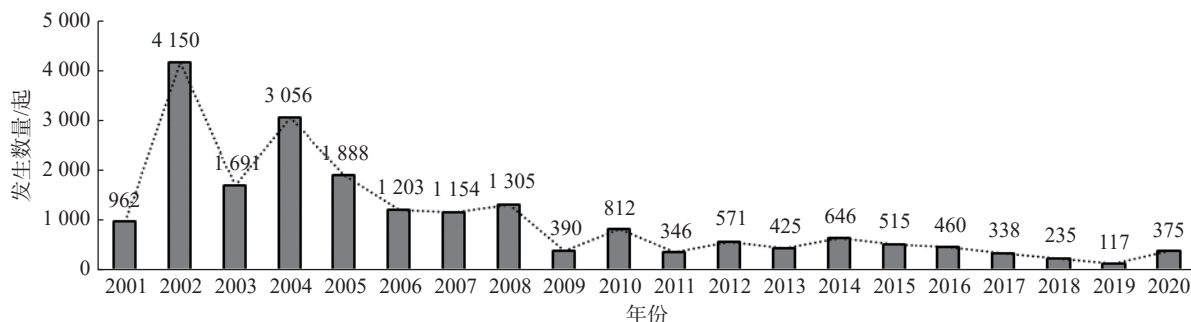


图 1 2001—2020 年云南省地质灾害发生数量统计图

Fig. 1 Statistical chart of the number of geological disasters occurred in Yunnan Province from 2001 to 2020

地质灾害造成死亡及失踪人数明显减少。2001—2020 年, 全省地质灾害共造成 1 740 人死亡和失踪, 年度死亡和失踪人数从 2001 年的 193 人下降到 2020 年的 23 人, 下降了 88%。2001—2012 年与 2013—2020 年比较, 年均因地质灾害死亡失踪人数由 116 人下降到 43 人, 下降了 63%, 总体呈下降趋势并趋于平稳(图 2)。

2 地质灾害规律研究进展

依据 1:50 000 地质灾害详细调查、重点城镇防灾

效果调查等翔实的资料, 通过多学科综合研究, 系统分析了云南高原地质灾害特征、形成条件及发育规律, 进行了地质环境条件和地质灾害易发性分区评价, 提升了云南灾害地质的基础研究水平, 取得了以下新进展和新认识。

2.1 地质灾害形成条件

(1) 细化了高原地质环境条件分区和评价

通过对云南高原地质环境特征的深入研究, 将云南省地质环境条件细化成地质环境条件差、较差、中等、

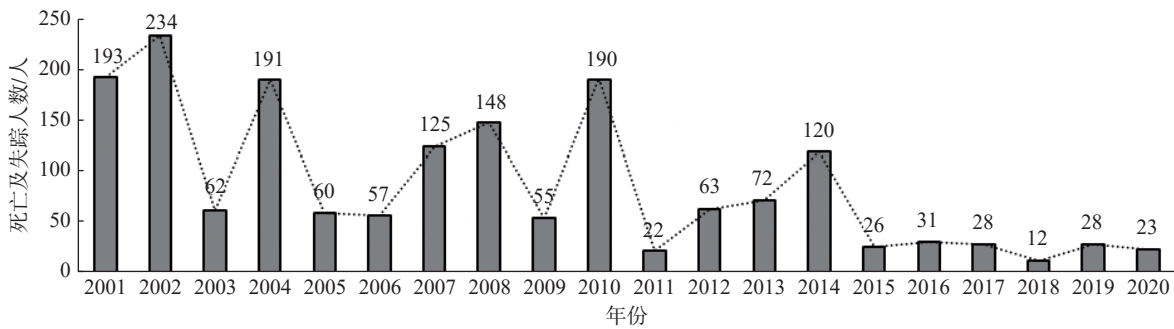


图 2 2001—2020 年云南省地质灾害死亡及失踪人数统计图

Fig. 2 Statistical chart of the number of deaths and missing persons from geological disasters in Yunnan Province from 2001 to 2020

较好、好 5 个等级 23 个亚区(表 2), 编绘了新的云南省地质环境分区图, 为地质灾害易发性和防治分区打牢了基础。地质环境条件差区 $11.66 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省面积的 29.59%; 较差区 $8.37 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 21.24%; 中等区 $10.21 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 25.91%; 较好区 $9.17 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占 23.26%。通过地质灾害主控和诱发因素、发育特征和成灾模式分区研究, 为地质灾害监测预警阈值设定、隐患排查、风险评价、国土空间规划等提供了地质环境依据。

表 2 云南省地质环境条件分区表

Table 2 Zoning of geological environmental conditions in Yunnan Province

地质环境条件等级	分区代号	分区名称	面积/km ²	占全省面积/%
差	I ₁	金沙江上游碎屑岩高山峡谷区	20 263.08	5.14
	I ₂	怒江流域中上游花岗岩变质岩高山峡谷区	18 525.07	4.70
	I ₃	金沙江北段碎屑岩玄武岩中山峡谷区	21 715.10	5.51
	I ₄	金沙江中段碎屑岩红层区	12 019.53	3.05
	I ₅	金沙江下游玄武岩碎屑岩深切切割中山峡谷区	15 523.85	3.94
	I ₆	哀牢山变质岩中山峡谷区	28 561.80	7.25
较差	II ₁	兰坪漾濞碎屑岩变质岩高山峡谷区	13 288.97	3.37
	II ₂	怒江流域中下游碎屑岩花岗岩宽谷区	31 892.84	8.09
	II ₃	景东镇沅变质岩深切山区	16 379.76	4.16
	II ₄	澜沧江中下游花岗岩中山宽谷区	22 130.89	5.61
中等	III ₁	滇西花岗岩宽谷盆地	16 133.86	4.09
	III ₂	丽江大理碎屑岩高原湖盆区	13 610.39	3.45
	III ₃	滇中碎屑岩红层高原区	25 383.59	6.44
	III ₄	威信镇雄碎屑岩碳酸盐岩褶皱山区	6 260.75	1.59
	III ₅	滇东碳酸盐岩碎屑岩山区	6 376.07	1.62
	III ₆	红河小江流域碳酸盐岩山区	5 474.41	1.39
	III ₇	富宁麻栗坡碎屑岩裂隙山区	7 404.82	1.88
	III ₈	澜沧江下游花岗岩变质岩宽谷区	21 476.98	5.45
较好	IV ₁	香格里拉松散层高原剥夷面	2 237.94	0.57
	IV ₂	昭通鲁甸碎屑岩高原盆地	2 544.78	0.65
	IV ₃	滇东碳酸盐岩高原湖盆区	45 164.68	11.46
	IV ₄	滇东南碳酸盐岩岩溶丘陵区	24 247.46	6.15
	IV ₅	滇南碎屑岩低中山区	17 522.38	4.45
好	区域分布面积小且比较分散, 不单独划区			

(2)系统分析认识了高原复杂环境特征 局地暴雨多发、宜建土地狭小、人口密集、工程活动强烈等不利因素相叠加, 形成一系列复杂环境区带, 这些由于山高坡陡、构造发育、土石松散、地震频繁、

表 3 怒江流域北段高山峡谷区地质灾害激发雨强预警判据

Table 3 Criteria for early warning of geological disasters in the alpine valley area of the northern section of the Nujiang River Basin

预警等级	预警时效/h	预警判据/mm		
		崩塌	滑坡	泥石流
一级	1		9	20
二级		6	6	8
三级			4.5	5
一级	24	80	110	120
二级		60	70	90
三级		35	45	60

量+含水率+泥水位、崩塌采用雨量+裂缝+倾角加速度综合预警模型。

2.3 特殊岩土地质灾害特征

云南地质灾害发育的特殊岩土体主要包括红层、花岗岩、膨胀土、冻融岩土、岩溶和山区填土六类。其中,红层、岩溶分布最广,占全省面积的 25.04%、28.14%,山区填土非常普遍。特殊岩土工程地质特性复杂,工程地质属性较差^[12],形成了不同的地质灾害特征。

(1)红层为典型的易滑岩土层。在砂泥岩互层层面处,层间剪切带(泥化夹层)、构造结构面、土石界面处,遇水后易形成软弱结构面或发展为滑动面,导致边坡失稳发生滑动。滑坡特征主要为顺层滑动、沿泥化夹层滑动、软岩蠕变。

(2)滇西花岗岩地质灾害易形成灾害链。滑坡以坡面浅表层滑动为主,滑动过程中具有“滚雪球”特征,沿坡面带动大量松散物滑动至沟道内,堵塞沟床,为泥石流的爆发提供固体松散物,最终发展形成流域地质灾害链。

(3)膨胀土滑坡具有浅层性、牵引性、平缓性、季节性、方向性的特点。据统计,滑带深度在 0.5~3.0 m 的滑坡占 65%,多为牵引式滑动,大都发生于 1:4~1:5 的缓坡上。在季节性的干湿循环下,滑坡发生概率增大。向阳边坡温度变化较大,滑坡发生的可能性增大。

(4)滇西北冻融区地质灾害具明显的地带特征。地质灾害发育呈现突发性、群发性、多因素影响、多因素叠加的规律,链式灾害特征明显,冻融作用孕育高位崩塌、高位滑坡、堵江滑坡灾害链。

(5)岩溶塌陷区域上分布零星,地段上呈现“点状”特征。在岩溶断陷盆地、岩溶槽谷(洼)地、岩溶台地或古高原面等地貌单元,存在松散土覆盖层和岩溶化地层浅表岩土双层结构,易于产生岩溶塌陷^[13]。

(6)填土滑坡特征表现为成分复杂、固结度低、结构和变形复杂性高,未及时有效治理是主要成因。受填

土成分、密实度、堆填过程、堆积形态等影响,形成及运动机制差异很大。

3 地质灾害防治支撑技术研究进展

地质灾害防治支撑技术主要是基础性、公益性的地质灾害调查、监测预警、信息系统建设及服务、应急处置等技术系列。在地质灾害综合防治体系建设中,开展了大量的研究工作,取得了以下技术创新与进步。

3.1 地质灾害隐患识别评价技术

(1)地质灾害隐患综合遥感识别技术研究进展

通过多源雷达数据 SAR 地表形变分析,结合光学影像进行地质灾害综合遥感识别,选取不同波长(RADARSAT—2、Sentinel—1)、不同波段(ALOS—2、Sentinel—1、COSMO—SkyMed)雷达数据开展效果分析评价,结合坡度、坡向、地形起伏、植被覆盖等条件,提出适用于云南省地质灾害隐患识别的有效数据源,划分四级 12 个地质灾害 InSAR 监测适宜性分区,形成有效地质灾害形变监测分区适用性研究成果。

复杂环境地形陡峭、起伏大,通行困难,地面调查难度大。根据工程应用研究,采用无人机低空倾斜摄影获取数字高程模型 DEM、正射影像图 DOM、数字线划图 DLG,完成实景三维建模的新型技术方法(图 4),得到翔实的地质环境现状形态,减少测量工作量,提高作业效率,安全高效完成地质灾害分析评价,满足高原山区地质灾害精细化调查及评价需要^[14]。

(2)岩溶塌陷隐患勘查识别与评价技术研究进展

根据多年的高原岩溶场地塌陷隐患识别及防治技术研究,提出了适用于不同工程特点、不同地质条件的岩溶精准综合探测技术方法,进一步提高了岩溶探测的精准度,为工程建设设计提供了更准确的依据。同时,建立了基于物探和钻探的岩溶地区三维可视化地质模型,为确定岩溶发育的范围,精细描述岩溶的三维形态特征,预测岩溶塌陷等提供了更为精确的技术方法^[15]。

(3)采矿沉陷区地质灾害隐患识别技术研究进展

云南高原采矿沉陷区下沉盆地不明显,地裂缝和地表沉陷局限在采空区周边,与平原地区差异明显。在总结识别及防治经验的基础上,构建了采空区次生地质灾害识别技术研究理论模型和灾害治理理论模型。归纳总结了采空区次生地质灾害隐患识别和灾害防治的模式及防治技术优化建议^[16]。

3.2 地质灾害自动化监测预警技术

群测群防体系引入自动化监测预警技术加以提升已成趋势^[17-19]。云南省自 2012 年在怒江流域开展地质

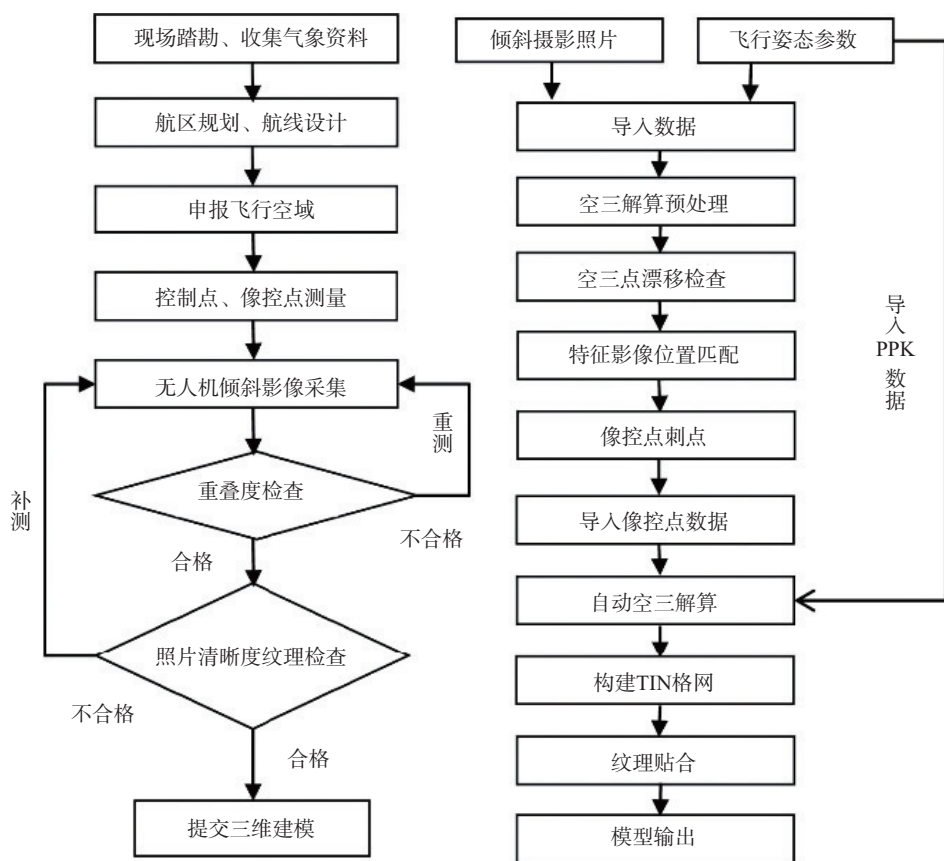


图 4 倾斜摄影及三维实景建模技术流程图

Fig. 4 Technical flow chart of aerial photography and 3D realistic modeling technology

灾害自动化监测试点以来,监测预警模式已从“人防”单一模式逐步发展成“人防+技防”的综合模式。

(1)吸收国内外地质灾害自动化监测预警适用技术,结合云南经验和特点,从自动化监测预警网络体系建立,到自动化监测、预警模型与判据确定、数据分析及预警信息发布、应急技术支撑等方面建立了云南省滑坡、崩塌、泥石流灾害监测技术体系。

(2)通过对崩塌、滑坡、泥石流自动化监测预警成灾因子及诱发因素分析,建立了崩塌、滑坡、泥石流单参数及多参数联合的预警模型及分区阈值,提高了自动化监测预警的准确性。

(3)在监测点选择、监测数据采集与传输、数据交换、预警信息处置等关键节点制定了地方标准或管理办法,规范了全省地质灾害监测预警建设、信息发布及处置的流程。

(4)构建了地质灾害监测从数据采集、传输、计算、存储、展现到分析为一体的信息化、可视化、智能化服务平台。

3.3 地质环境信息平台建设

云南是全国首批 7 个地质环境信息化建设试点省

份,通过信息化建设,实现了部、省、州(市)、县(市、区)、乡(镇)五级信息互联互通,增强了云南省地质环境管理系统化、标准化、科学化、数字化、信息化与智能化能力,登记了多项软件著作权^[20-26]。

(1)建设了云南省地质环境信息标准体系、地质环境数据中心和地质环境信息平台,整合了各类地质环境信息资源(图 5)。

(2)运用大数据、云计算、微服务等技术,根据系统一体化、数据集成化、信息综合化和大数据可视化的建设原则,实现了自然资源云、时空信息云和地质环境云“三云”融合,多用户使用、多并发访问。

(3)实现了以地质灾害隐患为主线,从时间(过去、现在和未来)、空间、措施(隐患识别、调查评价、监测预警、避灾搬迁、工程治理、核销隐患等)、资金四个维度对地质灾害隐患实行全生命周期闭环管理。

(4)采用时空大数据驱动的多维信息联动可视化技术,打通数据壁垒,联通业务流程,建立了资金动态管理系统,实现了地质灾害防治资金全流程实时动态管理。

3.4 地质灾害应急技术

在建设以省、州(市)、县三级地质灾害防治技术指

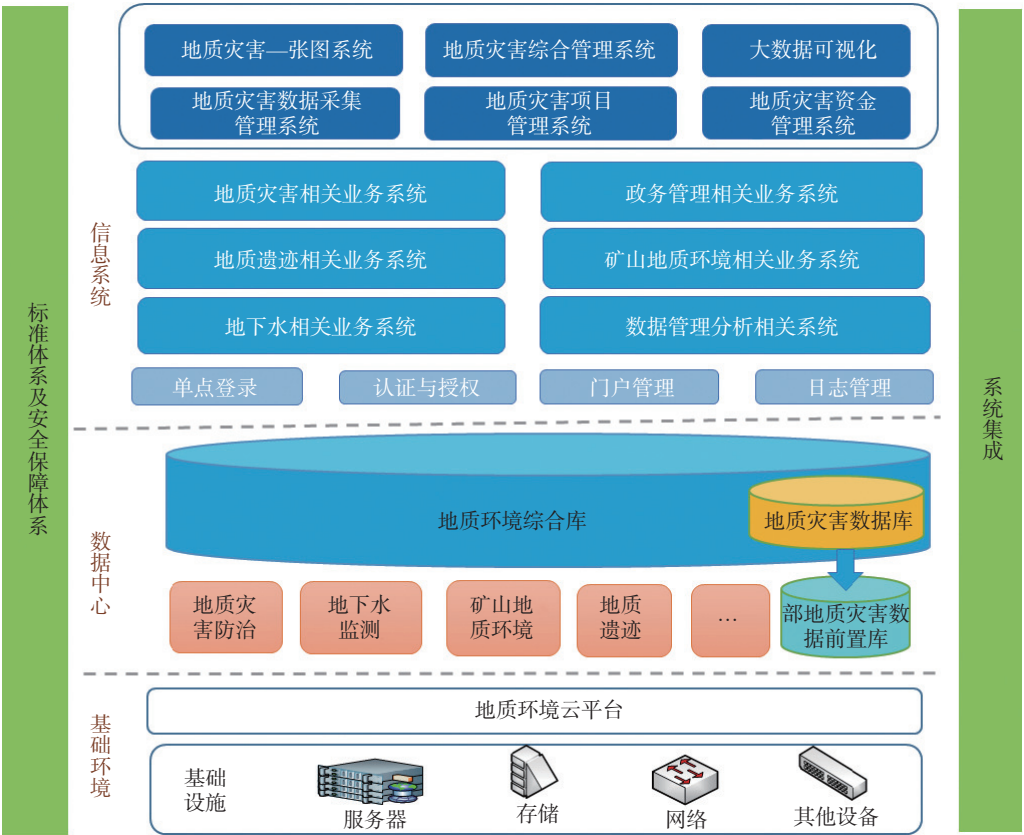


图 5 云南省地质环境信息平台框架图

Fig. 5 Framework of the geological environment information platform in Yunnan Province

导中心(站)为节点的应急技术支撑体系过程中,取得了以下技术进步。

(1)研究总结了地质灾害成灾模式及表征,建立了地质灾害应急监测因子及运动特征指标体系,确定了地质灾害危险性及险情等级标准,为地质灾害应急监测预警及处置提供了科学依据。

(2)系统分析了省内外地质灾害应急技术工作的经验及问题,在已有适用技术及成功经验的基础上,结合新的理论和技术研究成果,研究集成了地质灾害应急支撑技术方法系列,尤其是应急调查、监测预警及重大隐患处置技术方法和实施流程。

4 地质灾害防治工程研究进展

在地质灾害综合防治体系建设中,工程治理作为最根本的地质灾害隐患消减措施,投资占比最高,勘察设计研究的深度和广度最大,取得了以下技术创新与进步。

4.1 特殊岩土地质灾害防治工程技术

研究不同地质条件下特殊岩土地质灾害防治工程经验及教训,提出因地制宜、分类施策的地质灾害防治措施和建议。

(1)红层滑坡防治对策以防为主、因害设防,通过治水、支挡、锚固等措施系统防治。泥石流防治应防治结合,开展流域综合治理,稳、拦、排工程措施打基础。

(2)花岗岩地质灾害链注重全流域综合防治。充分利用泥石流沟中上游的水土保持工程、沿途护岸工程和泥石流停淤场所的调节作用,降低泥石流蓄能速度,实现泥、沙、石、水的沿途有效分离,削减泥石流动能,达到减灾目的。

(3)膨胀岩土滑坡防治优先治水。遵循“防水、防风化、防反复膨胀循环、防强度衰减”的原则,采用挡、排、截、支、护相结合的综合整治方案。值得重视的是,一般滑坡整治中常用的大清方减载法不适宜膨胀土滑坡防治,易造成更大规模滑坡危害。

(4)冻融岩土高位滑坡、泥石流防治宜采取“监测为先、重视排水、优化结构”的思路。冻融岩土区高位滑坡勘查治理困难,需根据监测数据科学判断滑坡稳定性、论证治理方案。泥石流因物源丰富,防治方案应重视库区资源利用、大库容拦蓄、集中控制物源,并重视生物工程及堵江监测预警等措施。

(5)岩溶塌陷防治重在地基处理。研究提出了地表

防渗、地下加固、控制地下水开采、结构物跨越等综合措施。研发的“一种溶洞覆盖层表面极限均布荷载的计算方法”“一种岩溶地基稳定性计算方法”“一种岩溶桩基础地基溶洞顶板最小厚度的计算方法”获得国家发明专利^[27-29]。

(6)填土滑坡防治应强调因地制宜。基于填土滑坡人为控制性强、软弱结构面不确定性高等特点,应以预防为主,已形成滑坡的宜采取截排水、回填反压、清坡减载、抗滑支挡等措施。

4.2 重大工程地质灾害防治工程技术

结合典型案例和工程特点,总结分析云南水电、公路、采矿等 3 类重大工程区的地质灾害发育规律、成因机制,研究提出地质灾害防治对策、措施及方法。

(1)研究总结了高原深切峡谷区水利水电工程地质灾害勘查和防治技术措施,完善了工程实施全过程地质要求,强调岩土体稳定性超前预测预报,对安全隐患、变形开裂或局部失稳破坏岩土体及时进行处理、做好应急预案,高边坡、库区重特大地质灾害防治技术研究取得新认识^[30]。

(2)高原山区公路路线绕避、隧道穿越及大跨径桥梁跨越重大地质灾害体 3 种工程措施,能有效保障公路建设和运营安全。研究提出的高轻型分离式预应力锚索桩板墙、高轻型整体现浇式预应力锚索桩板墙、加筋土挡墙、锚定板挡墙 4 种高于 12 m 的轻型支挡工程方案,应用于云南水(富)麻(柳湾)、广州梅(州)河(源)等省内外多条高速公路的高路堤支挡结构工程中,节约投资上亿元,经济效益突出。提出的竖向钢花管、斜向钢锚管多次分段控制注浆加固支挡技术,已在云南、广东等超过 20 条高速公路中得到推广应用,成为公路边坡灾害抢险的常态化技术^[31]。

(3)总结分析云南采矿沉陷区次生地质灾害防治技术经验和存在问题,结合实际案例研究,构建了煤矿采空区次生灾害治理的理论模型,优化完善了采空区次生灾害治理的思路和防治措施,归纳了工程防治、生物治理、采煤沉陷区综合治理方法系列。

4.3 复杂环境地质灾害综合防治工程技术体系

针对复杂环境地质灾害特征,探索从调查评价、防治规划、灾害治理、监测预警到治理后评价的地质灾害防治工程技术,形成了高原复杂环境地质灾害综合防治工程技术体系。

(1)通过资源与环境条件精细调查,准确评价国土空间承载力及地质灾害风险,统筹国土空间规划,综合施治,依法管理,保证人类活动与地质环境相适应,提高

治理工程设防标准,以期取得长治久安的成效^[32]。

(2)创新和引进生物谷坊、微型桩、复式排导槽、桩林坝、圆形抗滑桩、抗滑挡土板、抗滑桩+挡土墙等新型有效工程技术进行地质灾害防治,提高地质灾害防治效益和可持续性。

(3)因地制宜采取削峰填谷、河溪改道等地质环境改造工程,能长久消除地质灾害隐患。如有“山顶一线天”之称的绿春县城,位于 1.23 km² 的山梁上,长期受地质灾害危害。虽进行了大量工程治理和片区综合整治,但“防治效果显著,灾情动态发展”趋势仍未改变。2009 年开展削峰填谷工程改造地质环境,有效遏制了地质灾害的发展趋势,形成建设用地 1.56 km²(图 6)。德钦县城水磨房河与直溪河改道并流稀释黏性泥石流以利排导,也取得了良好成效。

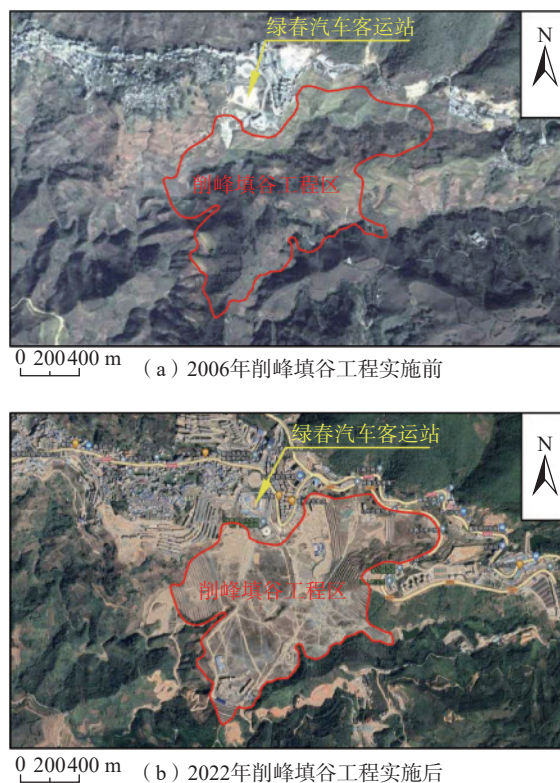


图 6 绿春县城削峰填谷前后对比图

Fig. 6 Before and after comparison of peak cutting and valley filling in Lvchun County Town

(4)建立健全监测网络是必不可少的地质灾害防治前提和保障,动态监测应贯穿于复杂环境地质灾害防治始终,监测预警、应急转移避险是长期的保障措施。

5 结语

云南省地质灾害综合防治体系建设防灾减灾成效

显著。系列专项研究了云南高原地质环境条件、地质灾害成因、发育分布规律、易发性分区评价,总结了地质灾害隐患综合遥感识别、岩溶塌陷隐患勘查识别、采矿沉陷区地质灾害隐患调查识别、地质灾害自动化监测预警、信息技术运用、应急支撑技术及特殊岩土、重大工程、复杂环境的地质灾害综合防治工程技术,归纳评述了系列专项研究取得的主要科技成果,为下一步云南省地质灾害综合防治体系的高质量建设和运行提供保障。

面对地质灾害防治的新形势^[33-35],尚需加强地球探测与信息技术研究,提高快速探测评价地质灾害隐患的精度;改进“三查”方法,及早发现新增隐患及成灾风险;研究国土空间规划的防灾减灾机制,增强可行性及长效防灾减灾功能等^[36-38]。

参考文献(References):

- [1] 王宇,杨迎冬,晏祥省,等.云南鲁甸6.5级地震次生特大地质灾害的特征及原因[J].灾害学,2016,31(1): 83-86. [WANG Yu, YANG Yingdong, YAN Xiangsheng, et al. Characteristics and causes of super-huge secondary geological hazards induced by M6.5 Ludian earthquake in Yunnan [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 83-86. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 韩俊,王保云.基于原型网络的云南怒江州泥石流灾害易发性评价与区划[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(5): 117-129. [HAN Jun, WANG Baoyun. A case study on the susceptibility assessment of debris flows disasters based on prototype network in Nujiang Prefecture, Yunnan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 34(5): 117-129. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 杨得虎,朱杰勇,刘帅,等.基于信息量、加权信息量与逻辑回归耦合模型的云南罗平县崩滑灾害易发性评价对比分析[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(5): 43-53. [YANG Dehu, ZHU Jieyong, LIU Shuai, et al. Comparative analyses of susceptibility assessment for landslide disasters based on information value, weighted information value and logistic regression coupled model in Luoping County, Yunnan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(5): 43-53. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 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. [YANG Yingdong, TANG Pei, XIAO Huazong, et al. Preliminary analysis on relationships between geo-hazards and river systems of Yunnan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 36-39. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 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. [WANG Yu. Historical review of geological disaster prevention and research in Yunnan Province, China [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 134-139. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王宇,祝传兵,张杰,等.云南省地质灾害应急监测预警及处置措施研究[R].昆明:云南省地质调查局,2020. [WANG Yu, ZHU Chuanbing, ZHANG Jie, et al. Research on emergency monitoring and warning and disposal measures of geological disasters in Yunnan Province [R]. Kunming: Yunnan Geological Survey, 2020. (in Chinese)]
- [7] 王宇,黄成,周翠琼,等.山区地质灾害应急调查的内涵及方法分析评述[J].中国岩溶,2020,39(4): 492-499. [WANG Yu, HUANG Cheng, ZHOU Cuiqiong, et al. Review on the connotation and methods of emergency investigations to geological hazards in mountainous area [J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 492-499. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 宋昭富,张勇,余涛,等.基于易发性分区的区域滑坡降雨预警阈值确定——以云南龙陵县为例[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(4): 22-29. [SONG Zhaofu, ZHANG Yong, SHE Tao, et al. Determination of regional landslide rainfall warning threshold based on susceptibility zoning: A case study in Longling County of Yunnan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 22-29. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王宇,康晓波,柴金龙,等.云南高原地质灾害发育规律及防治技术序列研究报告[R].昆明:云南省地质调查局,2022. [WANG Yu, KANG Xiaobo, CHAI Jinlong, et al. Research report on the development law and control technology sequence of geological hazards in Yunnan Plateau [R]. Kunming: Yunnan Geological Survey, 2022. (in Chinese)]
- [10] 张奇林,赫念学,黄兴章,等.高原山区复杂环境条件地质灾害综合防治新型工程技术体系研究专题研究报告[R].昆明:云南地质工程勘察设计院有限公司,2021. [ZHANG Qilin, HE Nianxue, HUANG Xingzhang, et al. Research report on new engineering technology system of comprehensive prevention and control of geological disasters under complex environmental conditions in Plateau mountainous areas [R]. Kunming: Yunnan Geological Engineering Survey and Design Research Institute Limited Company, 2021. (in Chinese)]
- [11] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李强, 刘珍, 尹博, 等. 高原环境特殊岩土体地质灾害成因机制及防治工程技术专题研究报告 [R]. 昆明: 云南地质工程第二勘察院有限公司. 2021. [LI Qiang, LIU Zhen, YIN Bo, et al. Research report on the cause mechanism and control engineering technology of geological disasters of special rock and soil mass in plateau environment [R]. Kunming: Yunnan Geological Engineering the Second Investigation Institute Limited Company, 2021. (in Chinese)]
- [13] 康晓波, 王宇, 张华, 等. 云南高原岩溶塌陷发育特征及成因机制 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(5): 50–58. [KANG Xiaobo, WANG Yu, ZHANG Hua, et al. Characteristics and formation mechanism of karst collapse in Yunnan Plateau [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(5): 50–58. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李星宇, 赫念学, 魏英波, 等. 复杂环境倾斜摄影与实景三维建模技术应用 [J]. *测绘通报*, 2021(增刊 1): 20–24. [LI Xingyu, HE Nianxue, WEI Yingbo, et al. Application of tilt photography and real 3D modeling technology in complex environment [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(Sup 1): 20–24. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘文连, 徐鹏飞, 眭素刚, 等. 高原岩溶场地塌陷隐患勘测识别及防治技术研究专题研究报告 [R]. 昆明: 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司. 2021. [LIU Wenlian, XU Pengfei, SUI Sugang, et al. Research report on the investigation, identification and prevention technology of plateau karst site collapse hazards [R]. Kunming: China Nonferrous Metal Industry Kunming Survey Design Institute Limited Company, 2021. (in Chinese)]
- [16] 张黎明, 曹国献, 许万忠, 等. 云南高原采矿沉陷区次生地质灾害隐患识别及防治对策专题研究报告 [R]. 昆明: 昆明煤炭设计研究院有限公司. 2021. [ZHANG Liming, CAO Guoxian, XU Wanzhong, et al. Research report on the identification and prevention of secondary geological hazards in mining subsidence area of Yunnan Plateau [R]. Kunming: Kunming Coal Design & Research Institute Limited Company, 2021. (in Chinese)]
- [17] 王文, 张志, 张岩, 等. 自然灾害综合监测预警系统建设研究 [J]. *灾害学*, 2022, 37(2): 229–234. [WANG Wen, ZHANG Zhi, ZHANG Yan, et al. Research on the construction of comprehensive monitoring and early warning system for natural disasters [J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(2): 229–234. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李傲雯, 李永红, 姚超伟, 等. 几种地质灾害监测预警和成功预报的模式 [J]. *灾害学*, 2020, 35(1): 222–229. [LI Aowen, LI Yonghong, YAO Chaowei, et al. Several modes of geological disasters monitoring, early warning and successful predicting [J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(1): 222–229. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 杨江涛, 李波, 李伯宣, 等. 自贡市地质灾害专群结合监测预警模式升级与实践 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(6): 130–134. [YANG Jiangtao, LI Bo, LI Boxuan, et al. Upgrading and practice of early warning mode of geological disaster special group combination in Zigong City [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(6): 130–134. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 黄成, 赵鹏, 朱广毅, 等. 云南省地质环境信息发布系统: 中国, 2021SR0986009 [P]. 2018-03-05. [HUANG Cheng, ZHAO Peng, ZHU Guangyi, et al. Yunnan Province geological environment information release system: China, 2021SR0986009 [P]. 2018-03-05. (in Chinese)]
- [21] 黄成, 杨迎冬, 晏祥省, 等. 云南省地质环境一张图系统: 中国, 2021SR0794747 [P]. 2018-04-16. [HUANG Cheng, YANG Yingdong, YAN Xiangsheng, et al. A map system of geological environment in Yunnan Province: China, 2021SR0794747 [P]. 2018-04-16. (in Chinese)]
- [22] 黄成, 杨迎冬, 晏祥省, 等. 云南省地质灾害综合管理系统: 中国, 2021SR0803964 [P]. 2021-04-25. [HUANG Cheng, YANG Yingdong, YAN Xiangsheng, et al. Integrated geological hazard management system of Yunnan Province: China, 2021SR0803964 [P]. 2021-04-25. (in Chinese)]
- [23] 黄成, 杨迎冬, 晏祥省, 等. 云南省地质灾害风险调查野外实时采集系统: 中国, 2021SR0944823 [P]. 2021-05-13. [HUANG Cheng, YANG Yingdong, YAN Xiangsheng, et al. Field real-time acquisition system for geological disaster risk investigation in Yunnan Province: China, 2021SR0944823 [P]. 2021-05-13. (in Chinese)]
- [24] 黄成, 杨迎冬, 赵鹏, 等. 云南省地质灾害精细化调查野外实时采集系统: 中国, 2021SR0944822 [P]. 2021-05-25. [HUANG Cheng, YANG Yingdong, ZHAO Peng, et al. A real-time field collection system for geological hazard investigation in Yunnan Province: China, 2021SR0944822 [P]. 2021-05-25. (in Chinese)]
- [25] 黄成, 赵鹏, 晏祥省, 等. 云南省小型无人机航测数据管理系统: 中国, 2022SR0334223 [P]. 2021-10-22. [HUANG Cheng, ZHAO Peng, YAN Xiangsheng, et al. Yunnan Province small UAV aerial survey data management system: China, 2022SR0334223 [P]. 2021-10-22. (in Chinese)]
- [26] 黄成, 魏蕾, 杨迎冬, 等. 云南省地质灾害风险区划计算系统: 中国, 2022SR0334222 [P]. 2021-11-09. [HUANG Cheng, WEI Lei, YANG Yingdong, et al. Geological disaster risk regionalization calculation system of Yunnan Province:

- China, 2022SR0334222 [P]. 2021-11-09. (in Chinese)]
- [27] 刘文连, 李泽, 眭素刚, 等. 一种溶洞覆盖层表面极限均布荷载的计算方法: CN112541216B [P]. 2023-02-03. [LIU Wenlian, LI Ze, SUI Sugang, et al. Method for calculating ultimate uniform load on surface of karst cave covering layer: CN112541216B [P]. 2023-02-03.(in Chinese)]
- [28] 刘文连, 李泽, 眭素刚, 等. 一种岩溶地基稳定性计算方法: CN202011422482.1 [P]. 2021-03-16. [LIU Wenlian, LI Ze, SUI Sugang, et al. A method for calculating the stability of karst foundation: CN202011422482.1 [P]. 2021-03-16. (in Chinese)]
- [29] 刘文连, 李泽, 眭素刚, 等. 一种岩溶桩基础地基溶洞顶板最小厚度的计算方法: CN112507435B [P]. 2022-12-06. [LIU Wenlian, LI Ze, SUI Sugang, et al. Method for calculating minimum thickness of karst cave top plate of karst pile foundation: CN112507435B [P]. 2022-12-06. (in Chinese)]
- [30] 王自高, 钟延江, 王昆, 等. 云南高原深切峡谷区水利水电工程地质灾害问题及防治措施研究报告 [R]. 昆明: 云南华昆国电工程勘察有限公司. 2021. [WANG Zigao, ZHONG Yanjiang, WANG Kun, et al. Research report on geological hazards and prevention measures of water conservancy and hydropower engineering in Deep Gorge area of Yunnan Plateau [R]. Kunming: Yunnan Huakun Guodian Engineering Survey Limited Company, 2021. (in Chinese)]
- [31] 李果, 陈贺, 尹浩, 等. 云南高原公路工程重大地质灾害成因机制及防治技术研究专题研究报告 [R]. 昆明: 云南省交通规划设计研究院有限公司. 2021. [LI Guo, CHEN He, YIN Hao, et al. Research report on the cause mechanism and prevention Technology of major geological disasters in highway engineering of Yunnan Plateau [R]. Kunming: Yunnan Institute of Transportation Planning and Design Limited Company, 2021. (in Chinese)]
- [32] 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): 38-41. [WANG Yu. Hazards collapse landslide and debris flow in Yunnan and their control [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1998, 9(4): 38-41. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 姚超伟, 王念秦, 李永红, 等. 地质灾害防治行业信用体系建设探讨 [J]. 灾害学, 2021, 36(2): 24-29. [YAO Chaowei, WANG Nianqin, LI Yonghong, et al. Discussion on the construction of credit system in the industry of geological disaster prevention [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 24-29. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 陈洪凯. 生态文明视角下地质灾害防治新常态 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 51-56. [CHEN Hongkai. The new normalcy of geological disasters control under the vision of ecological civilization [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2020, 37(4): 51-56. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 刘传正, 陈春利. 中国地质灾害防治成效与问题对策 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 375-383. [LIU Chuanzheng, CHEN Chunli. Achievements and countermeasures in risk reduction of geological disasters in China [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 375-383. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 殷跃平. 地质灾害风险调查评价方法与应用实践 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 5-6. [YIN Yueping. Geological hazard risk investigation and evaluation method and its application practice [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 5-6. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 刘传正, 刘秋强, 吕杰堂. 地质灾害防治规划编制研究 [J]. 灾害学, 2020, 35(1): 1-5. [LIU Chuanzheng, LIU Qiuqiang, LYU Jietang. Research on compiling methods of mitigation planning in geological hazards [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 1-5.(in Chinese with English abstract)]
- [38] 王兆丰, 肖建兵, 段君君, 等. 新形势下加强地质灾害防治资质管理的思考与建议 [J]. 中国矿业, 2019, 28(4): 31-33. [WANG Zhaofeng, XIAO Jianbing, DUAN Junjun, et al. Thoughts and suggestions on strengthening the qualification management of geological disasters prevention and control under the new situation [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(4): 31-33.(in Chinese with English abstract)]