



# 中国西南岩溶山地 重大地质灾害成灾机理 与监测预警系统研究

朱立军 黄润秋 朱要强 等 著



科学出版社

# 中国西南岩溶山地重大地质灾害成灾 机理与监测预警系统研究

朱立军 黄润秋 朱要强 等 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书在贵州省十余年来地质灾害科研成果和重大项目的基礎上，系統總結貴州岩溶山地地質災害的成災機理和致災模式，研究了不同尺度和發育模式的地質災害風險評價方法，並對面上高風險區地質災害監測也進行了一定程度的實踐探索。針對不同發育模式的地質災害，研發相應的監測預警技術，基本形成了地質災害早期識別、風險評價、監測預警技術體系。本書成果對岩溶山區斜坡地質災害的評價和自動化監測預警能起到很好的支撐作用，對我國不同類型成因的地質災害監測預警技術方法研究也能起到較大的推動作用。

本書可作為地質災害防治領域的科研人員、工程技術人員、研究生和本科生、管理決策者參考使用。

### 圖書在版編目(CIP)數據

中國西南岩溶山地重大地質災害成災機理與監測預警系統研究 / 朱立軍等著. —北京：科學出版社，2018. 12

ISBN 978-7-03-060119-3

I. ①中… II. ①朱… III. ①岩溶區-地質災害-災害防治-研究-西南地區 IV. ①P694

中國版本圖書館 CIP 數據核字 (2018) 第 283535 號

責任編輯：韋 沁 韓 鵬 / 責任校對：張小霞

責任印制：肖 興 / 封面設計：北京東方人華科技有限公司

科學出版社 出版

北京東黃城根北街 16 號

郵政編碼：100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春園印刷有限公司 印刷

科學出版社發行 各地新華書店經銷

\*

2018 年 12 月第 一 版 開本：787×1092 1/16

2018 年 12 月第一次印刷 印張：28 1/2

字數：676 000

定價：398.00 元

(如有印裝質量問題，我社負責調換)

# 著者名单

朱立军 黄润秋 朱要强 巨能攀 林 锋

罗炳佳 向喜琼 周丕基 刘东烈 吕 刚

# 序

贵州发生地质灾害的次数、人员伤亡和直接经济损失在全国一直处于前几位，因地质灾害造成的人员伤亡和经济损失不可小视，地质灾害日渐成为影响和制约局部社会发展的重要因素之一。2004年12月3日凌晨3时许，贵州省纳雍县鬃岭镇左家营村岩脚组发生一起特大山体垮塌，44人死亡或失踪，受灾房屋25间，受灾群众108人。2010年6月28日，关岭县岗乌镇发生特大地质灾害，造成37户、99人被掩埋，其中57人失踪、42人死亡，教训非常惨痛。2014年8月27日，福泉市道坪镇突发山体滑坡，造成23人死亡。2016年7月1日，大方县理化乡金星村发生顺层山体滑坡，造成23人死亡。2017年8月28日，纳雍县张家湾镇普洒村突发高位山体崩塌，造成35人死亡。数次特大、大型地质灾害教训非常深刻。

党中央、国务院历来重视地质灾害防治工作，特别是党的十九大明确提出“加强地质灾害防治”。2016年12月发布的《中共中央 国务院关于推进防灾减灾救灾体制机制改革的意见》中提出“推进防灾减灾救灾体制改革，必须牢固树立灾害风险管理和综合减灾理念，坚持以防为主，抗防救相结合，坚持常态减灾和非常态救灾相统一，努力实现从注重灾后救助向注重灾前预防转变，从减少灾害损失向减轻灾害风险转变，从应对单一灾种向综合减灾转变”。朱立军教授及其团队，紧扣地质灾害防治政策脉搏和导向，在贵州省十余年来，特别是党的十八大以来的地质灾害防治成果基础上，系统研究贵州岩溶山地地质灾害的成灾机理和致灾模式，发现并提出不同尺度和发育模式的地质灾害风险评价方法，同时对建立高风险区地质灾害监测体系进行了积极探索。针对不同发育模式的地质灾害，研发相应的监测预警技术，基本形成了地质灾害早期识别、风险评价、监测预警技术体系。一系列研究成果为岩溶山地地质灾害自动化监测预警的普及推广奠定了坚实的技术基础。

该书理论与实践结合，不仅对岩溶山区斜坡地质灾害的评价和自动化监测预警起到了很好的支撑作用，相信也能对我国不同类型成因的地质灾害监测预警技术方法研究起到较大的推动作用。并且，该书的出版，也是贵州地质灾害防治树立“以防为主、防抗救相结合”理念之具体体现。我对贵州同行取得的研究成绩非常赞赏，欣然为序，希望立军教授及其团队持之以恒，取得更加丰硕的成果。

世界滑坡协会主席：



2018年11月

# 前 言

中国西南岩溶山地是全球连片分布面积最大的岩溶山地，位于东南亚岩溶分布区域中心地带。贵州省地处中国西南岩溶山地的核心区域，岩溶山地及丘陵面积占全省面积的92%，属于典型的内陆岩溶山地省份。贵州省是中国地质灾害最为严重的省份之一，地形切割强烈，生态环境脆弱。地质灾害不仅灾种全、灾害重、隐患多、发生频繁，而且更具有隐蔽性强、突发性强、危害性强和动态变化大的特点。全省地质灾害高中易发区面积达13.6万余平方千米，占全省面积的77%，特别是易造成群死群伤的重大地质灾害时有发生，是岩溶山地地质灾害防治的首要任务和重中之重。

2010年6月28日，贵州省关岭县岗乌镇岩溶山地发生重大地质灾害，造成42人死亡、57人失踪，是贵州省有记录以来造成人员伤亡和经济损失最大的一起地质灾害，给我们以沉痛的教训和深刻的警示。“关岭岗乌6·28重大地质灾害”警示我们，地质灾害防治首先必须要解决岩溶山地重大地质灾害形成、分布和成灾机理等关键科学问题以及岩溶山地地质灾害监测预警体系的关键技术。为此，贵州省在全国率先提出并完成地质灾害防治“三大举措”：一是完成全省88个县（市、区、特区）重要地区、重大地质灾害详细调查，基本查明了地质灾害隐患，掌握了全省地质灾害分布特点；二是建立了地质灾害防治专业队伍与88个县（市、区、特区）的对口协作机制，解决了基层专业技术力量缺失的问题；三是完成了地质灾害监测预警与决策支持平台建设和应用，实现了“国土资源一张图”、防地灾和远程决策指挥。确立了“生命为天、预防为主、科技先行、专业保障、群测群防、综合治理”的地质灾害防治“24字方针”。

在完成三大举措并取得初步成果的基础上，2015年全省集中人力、物力和财力，实施全省地质灾害综合治理三年行动计划，大力推进地质灾害隐患整治、农村危房改造、生态移民搬迁、学校地质灾害治理等，消除重大地质灾害隐患点1133余处，全省地质灾害综合治理三年计划中取得明显成效。2018年初，针对贵州省岩溶山地高位隐蔽性地质灾害成灾机理的复杂性和危害性特点及岩溶山地重大地质灾害监测预警科技能力不强的突出问题，经贵州省委、省政府研究同意实施《贵州省高位隐蔽性地质灾害隐患专业排查方案》和《贵州省提升地质灾害监测预警科技能力行动方案》。

本书是十余年来贵州岩溶山地重大地质灾害调查、研究、防治实践和理论的总结，全书共分为绪论和10章。第1章，介绍贵州自然地理、地质环境特征和主要的人类工程活动及其分布特征。第2章，总结贵州主要地质灾害类型及其空间分布，分析地质灾害发育、分布与自然、人为因素的相互关系，研究总结地质灾害发育规律。第3章，从地球内动力作用分析贵州区域地壳稳定性，阐述贵州地质灾害发育的岩土物质基础，并进行了工程地质分区，研究总结并提出贵州自然斜坡工程地质分类。第4章，通过大量的地质灾害详细调查数据统计，建立起岩溶山地地质灾害早期识别指标体系和方法体系，并创建相应的早期识别图谱。第5章，研究不同破坏模式的危岩体和采空区控制型滑坡风险评价技术

方法,并对单点、小流域、县域、省域等不同尺度地质灾害隐患开展风险评价。第6章,系统介绍岩溶山地重大地质灾害发育模式,研究了近年来贵州造成群死群伤的典型重大地质灾害发生机理,总结并提出重大地质灾害主要成灾模式。第7章,在大量崩滑灾害统计调查的基础上,提出并创建贵州地区降雨型崩滑灾害预警模型与判据、岩溶山地基于变形的滑坡预警模型和单体崩滑灾害临滑预警模型和判据以及贵州典型崩滑灾害隐患预警模型和判据。第8章,总结近年来我省率先采用的北斗实时监测系统技术、星载雷达监测系统技术以及地质灾害面上监测示范。第9章,介绍了基于地质灾害发育模式的监测预警技术方法,提供了采空区控制型滑坡、弱面控制型滑坡、关键块体型滑坡、复合型滑坡、软弱基座型崩塌、采空区结构控制型崩塌的监测预警的技术路线和途径,并对监测示范成果进行分析。第10章,主要介绍贵州省近十年来在地质灾害调查评价、地质灾害监测预警、地质灾害综合治理、地质灾害应急响应等地质灾害综合防治体系方面的建设成就,并提出下一步的主要研究方向。

本专著是贵州省十余年来地质灾害防治研究课题和调查项目的系统总结,由朱立军、黄润秋、杨胜元、巨能攀、罗炳佳、陈筠、许强、林锋、周丕基、张建江、朱要强、汪家林、唐川、何政伟、向喜琼、刘秀伟、余斌、赵建军、刘东烈、吕刚等研究人员和全省地质灾害防治战线上的同事们共同完成。全书由朱立军、黄润秋、朱要强、巨能攀、林锋负责统稿、审定。在成书的过程中,中国地质环境监测院应急技术指导中心总工程师殷跃平给予了指导,并作序。全书图件由李金锁、郑子钰两位硕士研究生负责清绘,贵州省地质环境监测院的邹银先、张景国、张鸿晶、张洪等同志也为本书资料收集、整理做了大量工作。

由于作者水平所限,书中难免有疏漏和不足之处,请同行专家和读者给予批评指正,以期更好推进贵州省岩溶山地地质灾害防治工作。

# 目 录

序

前言

绪论 .....	1
第一节 研究背景 .....	1
第二节 研究思路及主要成果简述 .....	8
<b>第 1 章 研究区自然和地质环境条件 .....</b>	<b>9</b>
第一节 研究区自然地理条件 .....	9
第二节 贵州矿产资源概况 .....	10
第三节 地质环境条件 .....	10
一、地形地貌 .....	11
二、地层岩性 .....	12
三、地质构造 .....	13
四、水文地质条件 .....	15
第四节 人类工程活动概况 .....	18
一、水利水电开发 .....	19
二、矿产开发 .....	19
三、交通建设 .....	19
四、城镇建设及农村民房改建 .....	20
<b>第 2 章 贵州地质灾害发育分布规律 .....</b>	<b>21</b>
第一节 地质灾害类型及其发育现状 .....	21
一、滑坡地质灾害 .....	21
二、崩塌地质灾害类型 .....	30
三、泥石流地质灾害 .....	33
四、其他地质灾害 .....	34
第二节 地质灾害发育的主要影响因素 .....	37
一、岩石地层与地质灾害 .....	38
二、地形地貌与地质灾害 .....	41
三、地质构造与地质灾害 .....	57
四、地震诱发次生地质灾害 .....	58
五、岩土体结构特性与地质灾害 .....	59
六、水文地质与地质灾害 .....	64
七、气象条件与地质灾害 .....	70
八、人类工程活动与地质灾害 .....	73

第三节	地质灾害发育规律	76
<b>第3章</b>	<b>岩溶山地典型斜坡工程地质分类</b>	<b>77</b>
第一节	贵州地貌特征及地质灾害发育内动力作用	77
一、	贵州地貌特征	77
二、	贵州地质灾害发育的内动力作用	78
第二节	区域地壳稳定性	80
一、	稳定地区	80
二、	相对稳定地区	81
三、	次稳定地区	81
四、	次不稳定地区	81
五、	不稳定地区	81
第三节	地质灾害发育的岩土物质基础	82
一、	岩土体性质与结构	82
二、	构造-岩土体分区	83
第四节	研究区工程地质分区	86
一、	工程地质区及亚区的划分	86
二、	各工程地质区的特征	87
第五节	研究区斜坡工程地质分类	98
一、	工程地质岩组	98
二、	斜坡工程地质类型	99
<b>第4章</b>	<b>岩溶山地重大地质灾害早期识别体系</b>	<b>103</b>
第一节	基于变形破坏模式的地质体结构分类研究	103
一、	斜坡演化过程和规律	103
二、	贵州典型斜坡结构类型及变形破坏模式	104
第二节	典型崩滑地质灾害案例调研及其共性特征分析	104
一、	典型崩塌灾害早期识别图谱及关键致灾因子	104
二、	典型滑坡灾害早期识别图谱及关键致灾因子	105
第三节	潜在地质灾害体识别指标体系研究	107
一、	崩塌识别指标	108
二、	滑坡识别指标	108
第四节	潜在地质灾害体识别方法体系研究	109
一、	崩塌现场评判	109
二、	滑坡现场评判	111
三、	不稳定斜坡现场评判	116
四、	泥石流现场评判	118
<b>第5章</b>	<b>多尺度岩溶山地地质灾害风险评价示范</b>	<b>121</b>
第一节	典型破坏模式的危岩单体风险评价示范	121
一、	滑塌式危岩	121

二、倾倒式危岩 .....	137
三、坠落式危岩 .....	147
第二节 采空区控制型滑坡风险评价示范 .....	154
一、马达岭煤矿区地质环境背景 .....	156
二、马达岭滑坡运动特征分析 .....	161
三、马达岭滑坡灾害风险评价 .....	169
第三节 小流域地质灾害风险评价示范（羊水河） .....	178
一、龙洞沟 .....	179
二、姚孔沟 .....	181
三、平安磷矿支沟 .....	184
四、其他沟次生泥石流风险评价 .....	186
第四节 县域地质灾害风险评价示范（开阳县） .....	189
一、开阳概况 .....	189
二、开阳县地质灾害发育分布规律 .....	190
三、评价专题数据 .....	190
四、评价基本单元选择 .....	191
五、滑坡灾害危险性评价 .....	194
六、易损性分析 .....	197
七、风险分析 .....	197
第五节 省域地质灾害风险评价示范 .....	199
一、地质环境背景 .....	199
二、贵州省地质灾害空间分布规律 .....	200
三、地质灾害危险性评价方法 .....	211
四、地质灾害危险性区划及评价 .....	222
五、易损性分析 .....	224
六、风险分析制图 .....	226
<b>第6章 岩溶山地重大地质灾害成灾模式研究 .....</b>	<b>231</b>
第一节 重大崩滑地质灾害发育模式 .....	231
一、边坡破坏基本类型 .....	231
二、贵州省崩滑主要发育模式 .....	232
第二节 典型重大地质灾害机理研究 .....	250
一、贵州关岭滑坡全程动力特性分析 .....	250
二、福泉小坝滑坡数值模拟研究 .....	260
三、贵州纳雍“8·28”崩塌成因分析 .....	272
第三节 重大崩滑地质灾害成灾模式 .....	290
一、变形体-潜在威胁模式 .....	290
二、滑坡-随动破坏模式 .....	291
三、滑坡-高速碎屑流模式 .....	291

四、滑坡-堰塞坝堵江模式 .....	291
五、滑坡-高涌浪模式 .....	292
第四节 突发性地质灾害发育规律 .....	292
一、弱面控制型滑坡 .....	292
二、关键块体型滑坡 .....	293
三、采空区控制型崩塌和滑坡 .....	294
<b>第7章 岩溶山地地质灾害监测预警技术研究 .....</b>	<b>296</b>
第一节 贵州地区降雨型崩滑灾害预警模型与判据 .....	296
第二节 基于变形的滑坡预警模型研究 .....	298
一、滑坡的四级预警级别 .....	298
二、滑坡切线角预警判据 .....	299
三、斜坡变形的加速度特征和预警判据 .....	300
四、斜坡各变形阶段的稳定性及其预警判据 .....	301
第三节 单体崩滑灾害临滑预警模型和判据研究 .....	302
一、降雨诱发单体滑坡的预警模型 .....	302
二、崩塌预警模型和预警判据 .....	316
第四节 贵州省崩滑灾害的综合预警预报 .....	322
第五节 贵州省典型崩滑灾害预警模型和判据 .....	324
<b>第8章 基于全国卫星导航定位基准服务系统及星载雷达系统的地质灾害监测技术 .....</b>	<b>326</b>
第一节 北斗实时监测系统概述 .....	326
一、系统平台架构 .....	326
二、系统网络拓扑结构 .....	327
三、系统软件架构 .....	328
第二节 北斗实时监测系统关键技术 .....	329
一、基于北斗基准站网的动态形变监测技术 .....	330
二、多源传感器集成的地质灾害在线数据采集技术 .....	330
三、监测目标变形自动探测技术 .....	331
四、灾害监测数据存储及可视化技术 .....	337
第三节 星载雷达监测系统关键技术 .....	338
一、基本原理 .....	338
二、D-InSAR 两轨差分技术 .....	340
三、时间序列 InSAR .....	342
四、offset-tracking 技术 .....	344
五、多时相 SAR 影像变化监测 .....	347
<b>第9章 基于发育模式的重大地质灾害监测示范 .....</b>	<b>350</b>
第一节 典型发育模式的滑坡监测示范 .....	350
一、采空区控制型滑坡监测示范 .....	350

---

二、弱面控制型滑坡监测示范·····	360
三、关键块体型滑坡监测示范·····	369
四、复合型滑坡监测示范·····	375
第二节 崩塌监测示范·····	379
一、“软弱基座”型崩塌监测示范·····	379
二、“采空区”结构控制型崩塌监测示范·····	383
第三节 监测示范成果·····	390
一、贵州省开阳县监测示范区·····	390
二、贵州省都匀市监测示范区·····	399
三、其他监测示范区·····	407
第四节 地质灾害监测预警方案设计·····	421
一、监测指标及监测设备选型研究·····	421
二、地质灾害监测系统设计·····	422
<b>第10章 岩溶山地质灾害防治体系建设成效·····</b>	<b>428</b>
第一节 地质灾害调查评价技术体系建设成效·····	428
一、基本查明了全省地质灾害隐患的数量及类型·····	429
二、基本查明了全省地质灾害隐患的孕灾背景和成灾条件·····	429
第二节 地质灾害监测预警预报体系建设成效·····	430
一、建立地质灾害区域性降雨预警模型·····	430
二、地质灾害监测预警决策平台建设·····	430
三、大力提高地质灾害监测预警专业化水平·····	431
第三节 地质灾害综合防治体系建设成效·····	431
一、开展威胁学校的地质灾害隐患治理·····	431
二、开展地质灾害综合防治三年行动计划·····	432
三、推进治理技术标准化·····	432
第四节 地质灾害应急响应体系建设成效·····	432
第五节 地质灾害防治工作制度建设渐趋完善·····	433
一、法规政策体系逐步完善·····	433
二、地质灾害管理机制和制度逐步完备·····	435
三、专业技术支撑更加有力·····	436
<b>参考文献·····</b>	<b>437</b>

# 绪 论

## 第一节 研究背景

贵州省地处云贵高原向东部低山丘陵过渡的高原斜坡地带，是突起于四川盆地和广西丘陵之间的一个强烈岩溶化高原山地。地势由西分别向北、东、南三面倾斜，受河流的侵蚀切割，地形相当破碎，残留有中高山、中山、低山、丘陵、山间盆地、深谷等地貌类型。贵州省在大地构造单元上处于环青藏高原东南侧周边地带，在青藏高原隆升这一大的地质背景下，贵州省的构造应力场、地下水运移场、地质体的风化与卸荷等地质作用均表现出较为强烈的地域特色，各种褶皱和断裂构造发育且常成为岩溶及崩滑流地质灾害易发部位。贵州具有独特的岩溶地质环境条件，岩溶作用强烈，各种岩溶地貌形态广泛分布，存在众多复杂的岩溶工程地质问题和地质灾害问题。

贵州地处西部，经济不发达，且大多为山区，亟须摆脱贫困面貌，为此需要大力开发各种山区资源、开展各种山区经济建设活动，然而在地质灾害易发区，这些活动必然受到地质灾害的制约和阻碍。随着经济工程建设活动的加速发展，与工程建设活动有关而发生人员死亡的地质灾害有加剧的趋势。同时，由于地质环境条件复杂，在开发建设过程中，人地矛盾突出，近年来人为工程活动导致防灾压力剧增，造成贵州省地质灾害表现出“点多面广、突发性强、灾害损失大”等特点。由地质灾害造成的损失约占全省自然灾害损失的50%以上，大量地质灾害隐患点威胁着许多城镇、建筑、交通、重要工程设施，涉及面积60%以上。贵州铜仁地区大部、黔东南苗族侗族自治州（黔东南州）大部、黔南布依族苗族自治州（黔南州）东部、六盘水市、黔西南布依族苗族自治州（黔西南州）西北部及南部、毕节地区南部局部等地是贵州省地质灾害的主要多发区。

贵州每年发生地质灾害的次数、人员伤亡数和直接经济损失在全国一直处于前几位，因地质灾害造成的人员伤亡和经济损失不可小视，地质灾害日渐成为影响和制约贵州社会发展经济的重要因素之一。贵州省地质灾害以中小规模为主，占比90%以上，但几乎每年都有重大级以上的地质灾害发生。1993年以来全省共发生重大级以上的地质灾害超过50起，其中死亡30人以上或经济损失1000万元以上的特大地质灾害近20起。2004年12月3日凌晨3时许，贵州省纳雍县鬃岭镇左家营村岩脚组发生一起特大山体垮塌，44人死亡或失踪，受灾房屋25间，受灾群众108人。2010年6月28日，关岭县岗乌镇发生特大地质灾害，造成37户、99人被掩埋，其中57人失踪、42人死亡，教训非常惨痛。2014年8月27日，福泉市道坪镇突发山体滑坡，造成23人死亡。2016年7月1日，大方县理化乡金星村发生顺层山体滑坡，造成23人死亡。2017年8月28日，纳雍县张家湾镇普洒村突发高位山体崩塌，造成35人死亡。

近年来，国家和贵州省各级地方政府对地质灾害防治工作均给予了高度重视，特别是

党的十九大报告中明确提出“加强地质灾害防治”，省直机关各部门团结一致，以高度负责的态度，坚持以人为本的理念，在地质灾害防治工作方面取得了显著成效。贵州省国土资源厅提出“生命为天，预防为主，科技先行，专业保障，群测群防，综合治理”的地质灾害防治方针。按照该地质灾害防治总体工作思路，作为地质灾害防治基础工作的群测群防体系建设常抓不懈，已经成为主动防灾的重点环节，也是最大限度减少人民群众生命财产损失的现实可靠选择。同时，国家和地方逐年投入大量地质灾害防治专项资金，在地质灾害防灾避险搬迁安置、重大地质灾害工程治理方面也取得了显著成绩。然而毋庸讳言，由于地质环境条件的复杂性，地质灾害的分散性、突发性、复杂性，加之贵州省地质灾害防治基础相对薄弱，类似关岭“6·28”、纳雍县张家湾“8·28”的特大地质灾害时有发生，也暴露出现有地质灾害防灾体系尚不十分健全、防灾手段还显单一、监测预警有效性尚待提高、防灾意识有待进一步加强。具体到地质灾害技术支撑方面，近年来，贵州省地质灾害防灾减灾战线广大科技工作者在地质灾害防治领域开展了卓有成效的工作，取得了一定的可喜成绩，但在综合防治技术方法方面仍存在一定的不足。第一，对地质灾害发育规律性的系统总结尚有待进一步深入，贵州省地质灾害数量多、分布广，以往对全省地质灾害的发育分布规律和主要影响因素的系统总结不够，造成地质灾害监督管理方面缺乏适合贵州省情的理论指导。第二，地质灾害隐患点防治紧迫程度区分困难，由于贵州省地质灾害隐患点多面广，不可能对所有地质灾害进行监测和治理，因此必须筛选出危险性大的地质灾害隐患点进行重点监测和治理。第三，针对潜在地质灾害的不断威胁，对地质灾害隐患进行早期识别并研究潜在地质灾害体识别技术方法就显得相当具有必要性。第四，地质灾害预测预报仍然是世界级难题，但是通过对大量典型实例进行深入的机理研究后建立适宜的预报模型及判据，能够取得较合理的地质灾害预测预报效果。第五，区域性地质灾害风险性关系到城镇规划设计，目前还没有较为系统的研究成果。第六，尚缺乏一个统一而有效的地质灾害信息管理和决策支持平台，一个好的集地质灾害图形显示、信息查询、数据分析、实时监测、预警预报、应急指挥决策为一体的地质灾害信息管理和决策支持平台，对政府部门开展地质灾害预警预报管理和应急指挥是不可或缺的。

鉴于此，紧密结合贵州省地质灾害防治现实需求，2010~2013年，贵州省国土资源厅组织开展了“贵州省重点地区重大地质灾害隐患详细调查”项目和“贵州省地质灾害监测预警与决策支持平台研究”项目，开展了基于北斗卫星导航、遥感的地质灾害隐患排查工作，目的是通过全面细致的基础调查工作，一方面全面掌握全省地质灾害特别是易造成“群死群伤”的崩塌、滑坡、泥石流重大地质灾害隐患的类型、规模、危险性和发育规律、时空分布特征；另一方面以详查成果为基础开展重点地质灾害隐患点的自动化专业监测，开发地质灾害监测预警信息系统，构建一个以地质灾害灾情信息采集系统为基础、通信系统为保障、计算机网络系统为依托、国土部门为中心的地质灾害信息管理系统和决策支持平台，为贵州省地质灾害监测预警和信息化建设提供示范，为贵州省各级国土部门地质灾害防治管理和决策提供强有力的技术支撑。

### （一）地质灾害风险评估研究现状

风险，简而言之就是指发生对人类生命、健康、财产或环境造成有害影响事件的概率

和严重程度。20 世纪 60 年代之前,人们还处在对边坡灾害的认识阶段,对边坡灾害的形成条件和活动过程分析是认识的重点,同时归纳灾害种类及危害状况从而进行分析。到 20 世纪 70 年代,仍主要是定性评价边坡灾害。70 年代后,由于边坡灾害发生的次数越来越多,人们对自然灾害的研究也逐渐深入,研究方向也从灾害机理和预测的研究不断拓宽到对边坡工程的灾害评价,并成为研究热点。20 世纪 50 年代左右,美国、英国、日本、苏联、法国、意大利等国深入研究了区域边坡失稳规律,得出国土开发规划需要考虑规避滑坡等地质灾害的结论,并提出了有一定成效的研究对策。

### 1. 国外研究现状

Casagrande (1965) 提出评估工程实践的有力武器,即风险分析和管理。由于岩土体本身的离散型和复杂性使得大量不确定的因素存在于岩土工程中,此时分析计算工程实践中存在的风险和损失就显得十分重要。Casagrande 的思想构建了后来的工程风险评估研究的理论框架,且确立了基本出发点。之后他的思想被很多学者研究后应用在工程风险的评估和管理的实践中去,如 Morgan (1992)、Whiteman (1984)、Fell (1992)。自 20 世纪 80 年代后,越来越多的学者开始研究边坡工程的风险。其中 Brand (1988) 利用简化的分类系统研究了边坡工程的风险。90 年代, Berggren 等 (1992) 对瑞典的边坡工程风险评估系统进行了介绍; Fell (1992) 在滑坡地质灾害中运用了风险评价的改进方法,且对灾害可接受风险准则进行了讨论; Anlalagan R. 和 Singh B. (1996) 对山区滑坡灾害评价方法进行的研究后,提出了风险评价的制图方法和评价矩阵; Lee C. F. (1997) 对滑坡地质灾害的危险性进行了分析研究,得出了滑坡体积与频率和降雨之间的关系公式; Finlay P. J. 与 Robin Fell (1997) 则统计分析了香港 1984 ~ 1993 年间 3000 多个的滑坡相关数据,提出并建立了多元回归模型——用于预测滑体的水平运动距离。21 世纪左右,对边坡灾害风险的研究进入了与 GIS 技术相结合的时代。John R. 等 (1999) 运用 GIS 对边坡失稳破坏的分布情况及失稳概率进行了研究,并建立风险评估模型; Rautela 和 Lakhera (2000) 将 GIS 技术与遥感技术相结合研究了风险评价; Temesgen B. 和 Mohammed M. U. (2001) 也同样运用结合遥感技术的 GIS 技术深入分析了风险因子与边坡灾变的关系,得出用在范围  $[0, 1]$  的风险系数值来评判其风险。

同时,国际上部分国家和地区的学术机构对滑坡灾害风险评估出版了一系列研究计划、技术指南和法规条例。

澳大利亚岩土力学学会 (Australian Geomechanics Society, AGS), 作为第一届国际滑坡与工程边坡联合技术委员会 (JTC-1) 的发起者,于 2000 年发布了《滑坡风险管理理念与指南》(*Landslide Risk Management Concepts and Guidelines*)。该指南定义了滑坡风险评价的基本术语,强调了滑坡风险管理理念,特别是在土地利用规划管理方面的实效性,同时提出了滑坡风险分析方法准则和滑坡灾害可接受和可容忍的风险水平。随后,AGS 于 2007 年又出版了一系列针对滑坡风险管理、斜坡管理和维护的指南和附录 (AGS, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2007e) 对 2000 年版指南进行了补充和完善。2005 年, JTC-1 在加拿大温哥华召开了以“滑坡风险管理”为主题的国际学术会议。该会议出版了论文集《滑坡风险管理》(*Landslide Risk Management*), 收集的论文对滑坡风险管理的基本理论、方法、经验和实例进行了研究。在该会议上由 Fell 等提出的滑坡风险管理理论框架成为目

前国际上主流和应用最为广泛的风险管理技术方法体系。该会议后,国际著名期刊 *Landslide* 专门针对滑坡风险研究出版了十余篇国际学者相关学术论文,主要探讨了国家和地区层面的风险管理框架体系,提出了滑坡风险定量评化的方法和技术细节。同年,Glade 等 (2005) 出版了 *Landslide Hazard and Risk*, 该书全面系统地阐述了滑坡风险的学术观点、概念模型以及风险处理方法和管控措施等内容。

2008 年,在滑坡灾害风险研究飞速发展并取得大量实践应用成果的背景下,JTC-1 召集了全球 40 名知名滑坡研究专家共同探讨和草拟了国际通用的滑坡风险管理指南,并在 *Engineering Geology* 上发表了《土地利用规划中滑坡易发性、危险性和风险分区指南》(*Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard, and Risk Zoning for Land use Planning*)。该指南风险管理的核心架构与之前出版的各类指南大体相似,都是沿用了 AGS 2000 年和 2007 年版指南的基本框架,代表了滑坡风险评估与管理技术体系的发展水平。该指南对滑坡风险管理的结构进行了高度的概括,但是对滑坡风险评估的技术细节描述过于简单,具体操作流程不清楚。鉴于此,JTC-1 又邀学者在 *Engineering Geology* 上发表了多篇学术论文对指南进行了补充和完善,包括 Westen C. J. V.、Cascini (2008)、Corominasetal 和 Moya (2008)、Uziellietal 等 (2008)。至此,国际上滑坡灾害风险管理的理论框架和技术路线已初步建立,各国学者针对滑坡灾害风险管理的各层次内容相继展开了更为深入的理论和应用研究。

美国滑坡灾害风险控制主要通过美国地质调查局 (United States Geological Survey, USGS) 在全国范围内开展地质灾害防灾减灾和风险评价相关科学研究并总体协调各个联办机构、州和地方政府进行滑坡灾害防灾减灾、风险识别和控制。美国国会委托 USGS 通过滑坡灾害计划 (Landslide Hazard Program, LHP) 开展滑坡灾害风险识别与减缓研究。2005 年,USGS 与美国规划协会 (American Planning Association, APA) 合作出版了《滑坡灾害管理与土地规划指南》(*Landslide Hazard Program*) 以用来指导各级地方政府处理土地开发利用中的滑坡灾害问题。2004 年,加拿大不列颠哥伦比亚省林业部出版了《土地利用手册 56》(*Land Management Handbook 56, LMH 56*), 提出了滑坡风险管理的基本框架、技术术语和滑坡风险分析方法,并提供了八个研究实例,是加拿大较为系统的滑坡风险评估指导手册。

## 2. 国内研究现状

我国研究边坡工程风险的起步比较晚。20 世纪 80 年代之前,我国在边坡工程风险的研究领域里仅局限于滑坡分布、边坡灾变机理以及预测预报等方面;80 年代以后,边坡工程才开始运用其他技术手段和风险分析理论。

张业成 (1993) 等建立了以综合灾度为指标的地质灾害综合评价的系统层次结构模型以及计算模型;赵阿兴等探索研究了关于灾害损失的评估准则,指标及方法体系,提出一个新概念即灾损率,同时建立其等级划分标准 (赵阿兴、马宗晋, 1993);李向全等 (1999) 第一次在地质灾害减灾决策中结合了计算机技术,建立了地质灾害预测评价模型库系统。21 世纪以后,边坡工程风险研究开始进入质的飞跃。黄润秋等 (2000) 深入研究了香港边坡安全管理体系,将研究推进到边坡风险管理和政策制定;彭满华等 (2001) 从风险识别、评估等方面研究了滑坡灾害风险的分析方法;朱良峰等 (2002) 研发出了基于 GIS 技术的用来分析区域滑坡灾害风险的系统;马寅生等 (2004) 系统阐述了地质灾害

风险研究的现状、地质灾害风险的定义及其主要特征、地质灾害风险构成与基本要素,在此基础上进行了地质灾害风险评价类型划分,建立了地质灾害风险评价系统、地质灾害风险评价的指标体系以及地质灾害风险评价的步骤与方法;赵海卿等(2004)为了评价地质灾害的危害程度,提出了地质灾害危害性概念,选择历史灾害危险性、潜在灾害危险性、社会经济水平、承灾体类型4个基本要素和相应的17个评价因子作为评价因素,利用二级模糊综合评价方法,对吉林省东部山区地质灾害危害新进行分区评价。李典庆和吴帅兵(2006)对香港地区近20年来的16000个边坡剖面的观测资料进行了分析,并考虑时间效应,建立了滑坡风险评估及管理方法,该方法能更真实地反映滑坡随时间的变化;2011年,王雁林等(2011)在借鉴自然灾害风险的基础上,提出了省域地质灾害风险区划研究思路方法。在地质灾害危险性评价与区划和地质灾害经济社会易损性区划的基础上,采用GIS平台,进行了陕西省地质灾害风险区划初步研究,得到了陕西省地质灾害风险区划初步结果。2011年,张海燕(2011)根据吉林省近10年的地质灾害监测数据,采用统计方法讨论吉林省地质灾害风险评价问题,对地质灾害易发区进行划分,首先,对系统聚类分析方法进行了改进,根据各种要素对地质灾害影响的程度引入了权重系数;分类后应用判别分析的方法检验出其精确度达到94.87%;其次,为了进一步了解各种因素引致灾害的形式,掌握其在不同规模数值下形成灾害的特点及差异性,运用阈回归模型进行了数据拟合,因素的解釋程度达到99.9962%。加权聚类和阈回归方法对数据拟合程度的高精度,说明其在地质灾害风险评价问题中的适用性及灾害易发区划分的准确性。

何海鹰等(2012)在进行了对多条高速公路的300多处岩质高边坡的养护管理情况的调查后,结合已有成果,提出了基于AHP的岩质高边坡风险评估指标体系,该体系更适用于高速公路边坡养护管理。

田东升等(2014)通过对河南省山地丘陵区66个县(市)地质灾害调查与区划、地质灾害危险性评估、应急调查、巡查、监测、勘察和治理等工作中积累的地质灾害资料分析,河南省地质灾害种类有滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降6种,并探讨了6种灾害的分布规律。首次采用地质灾害“发育度”的概念来量化显示河南省地质灾害发育程度,将河南省地质灾害空间分布划分为7个区,为防灾减灾提供科学决策。

## (二) 地质灾害预警监测研究现状

### 1. 国外研究现状

早在20世纪50~60年代,国外就已经针对斜坡的监测技术展开了研究,如苏联叶米里扬诺娃(1956)通过对滑坡位移观测的原理与方法进行系统的总结,编写了《滑坡观测技术指南》;John K. W. (1977)对岩质边坡的监测技术进行了深入的研究。Baum和Godt(2009)在对研究区历史数据统计分析的基础上,将滑坡预警划分为四级,综合运用累积雨量、降雨强度与持续时间以及土体含水率指标建立浅层滑坡预警综合模型,并通过2004年12月至2005年1月期间在美国西雅图地区的运用中获得了不少滑坡成功预警的经验。

中国大陆外通过对已发生滑坡的调查,发现滑坡灾害在过程降雨量与降雨强度这两个参数中,存在一个临界值,即当一次降雨过程的降雨量或降雨强度达到或超过此临界值