

工程地质与地质灾害

汶川地震

殷跃平 张永双 等 著



科学出版社

汶川地震工程地质与地质灾害

殷跃平 张永双 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对汶川 $M_s8.0$ 级地震区的地震工程地质和地质灾害进行了系统研究。全书共 4 篇 18 章, 涉及汶川地震区域地质构造、地震工程地质、斜坡地震动监测与试验方法、地震地质灾害等问题。第一篇介绍龙门山活动构造带现场调查、深部大地电磁测深、地震前后 GPS 长期观测、对比和构造应力场演化研究成果。第二篇介绍汶川 $M_s8.0$ 级地震的同震地表破裂分布、地震工程地质特征和地震滑坡的地震断裂控制效应。第三篇介绍汶川地震后获得的斜坡地震动和斜坡地脉动原位观测最新成果以及地震滑坡大型振动台试验和斜坡岩体地震稳定性评价新方法。第四篇介绍汶川地震触发滑坡机理、高速远程滑坡-碎屑流运动学和动力学效应以及已有滑坡抗滑桩防治工程的动力响应特征, 并介绍汶川地震触发的体积最大的滑坡——大光包巨型滑坡、震后高位泥石流和地震地质灾害快速评估与编图等研究成果。

本书是研究汶川地震工程地质与地质灾害较为系统的一本专著, 图文并茂, 理论与实践相结合, 可供从事地质灾害防治、地震地质、工程地质、岩土工程、城镇建设等领域的科研和工程技术人员参考, 也可供有关院校教师和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

汶川地震工程地质与地质灾害 / 殷跃平等著. —北京: 科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-037534-6

I. ①汶… II. ①殷… III. ①地震地质学-研究-汶川县 ②地质-自然灾害-灾害防治-汶川县 IV. ①P315.2②P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 106575 号

责任编辑: 韩 鹏 韦 沁 张井飞 / 责任校对: 包志虹 韩 扬

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013 年 5 月第一次印刷 印张: 35

字数: 836 000

定价: 260.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书其他主要作者名单

(以姓氏笔画顺序排列)

王文沛	王 军	王运生	王 涛	王 猛
王绪本	王营超	方 慧	石菊松	成余粮
伍法权	刘宇平	孙 萍	苏生瑞	吴树仁
李洪涛	李晓春	张 明	张 瑛	邢爱国
罗永红	杨国香	胡新丽	姚 鑫	唐文清
唐辉明	黄润秋	葛 华	熊探宇	

序

“5·12”汶川大地震五周年之际,《汶川地震工程地质与地质灾害》专著正式出版发行。殷跃平同志邀请我为该书作序,我感慨颇多。我很少为书作序,但是该书例外。

2008年5月12日,汶川地震发生后第一时间,国土资源部即迅速组织全国国土资源系统上千名专业技术人员奔赴灾区,积极配合当地开展地质灾害隐患排查、应急处置和科学考察。我受徐绍史部长之托,前往灾区参加国务院抗震救灾指挥部工作,并成立国土资源部抗震救灾前方协调组,指导灾区地震地质灾害应急处置。

汶川地震引发了数以万计的滑坡,直接造成了严重的生命和财产损失。例如,地震和滑坡摧毁了北川老县城数十栋楼房,导致2000多人死亡;地震发生时,正值旅游旺季,213国道都江堰至汶川段车水马龙,沿线难以计数的旅游车辆被崩塌、滑坡砸毁或掩埋,造成大量人员伤亡……

我和专家们多次深入汶川地震灾区,亲临惨烈的灾难现场,在救灾过程中,强烈感到一定要把各种地震地质和地质灾害现象真实地记录下来,并尽快开展科学研究,为灾后重建、地质灾害减灾防灾和后续的研究提供基础资料和科学支撑。因此,我向专家们布置了这一工作,并在2009年国土资源地质大调查部署中,专门设立“汶川地震地质灾害调查评价”计划项目,组织国内一流的科技力量联合攻关。

五年来,他们开展了汶川地震工程地质和地震地质灾害的现场调查,采用深部地球物理探测、GPS观测、地震动监测、地脉动测试、大型风洞试验、振动台试验、大型三轴环型剪切试验等先进技术方法,在理论、方法和技术方面取得了多项创新性的成果。该科研团队多次应邀在国际会议上作学术报告,所发表文章的引用次数在地球学科领域也名列前茅,有效地推动了工程地质学科与地质灾害减灾防灾理论与技术的发展。

汶川地震带来的科学技术问题远比想象的要复杂得多,特别是2008年5月以来,经历了5个汛期,震区多次遭遇极端暴雨,大量隐伏在峡谷山坡上的滑坡、崩塌堆积体又转化为高位泥石流,给灾后重建带来了致命威胁。这些地震地质灾害链还将会延续10年,甚至数十年,严重威胁着震区的地质环境安全。因此,必须长期扎实坚持开展研究,施行科学有效的防灾减灾,力避重蹈覆辙。

该专著不仅通过汶川地震灾后重建和防灾减灾工作实践,建立了新理论、新方法、新技术,深化了内外地球动力学耦合的研究思路,而且广泛吸收了国内外地震地质灾害研究的先进理论、方法和技术,具有很强的参考性。非常欣慰的是,该书作者并未闭门

搞研究，而是利用这一科研平台，指导和参与了汶川地震灾后重建地质灾害防治，取得了很好的社会反响，成效显著；所凝练而成的理论、方法和技术不仅在龙门山地区，而且在全国，甚至全世界都有推广价值。

我很高兴为该书作序，希望以此为新的起点，持之以恒，全面提升我国地质灾害减灾防灾的科技水平。

江民

2013 年 4 月

目 录

序

绪论	1
----------	---

第一篇 区域地质构造篇

第 1 章 区域地震地质背景	11
1.1 概述	11
1.2 Y 字形构造带主要活动断裂特征	16
1.3 龙门山构造带的地震地质特征	18
1.4 龙门山构造带地震活动性	41
1.5 地层岩性与工程地质岩组	45
1.6 小结	52
参考文献	53
第 2 章 龙门山构造带及邻区深部地球物理特征	58
2.1 概述	58
2.2 区域地球物理场特征	59
2.3 龙门山构造带马尔康-龙泉地球物理探测剖面	64
2.4 鲜水河构造带新都桥-小金地球物理探测剖面	69
2.5 安宁河构造带盐源-永善大地电磁测深剖面	73
2.6 小结	78
参考文献	80
第 3 章 龙门山构造带及邻区地壳运动特征	83
3.1 概述	83
3.2 汶川地震前地表位移的 GPS 监测结果	86
3.3 汶川地震后地表位移的 GPS 监测结果	91
3.4 地震前后青藏高原东缘动力学特征对比	100
3.5 小结	102
参考文献	103
第 4 章 龙门山构造带区域应力场特征研究	105
4.1 概述	105
4.2 基于断裂擦痕的构造应力场反演	110
4.3 基于形变的区域构造应力场数值模拟	117

4.4 汶川地震过程的地质力学分析	130
4.5 小结	136
参考文献	136

第二篇 汶川地震工程地质篇

第5章 汶川地震同震地表破裂特征	143
5.1 概述	143
5.2 中央断裂同震地表破裂特征	144
5.3 前山断裂同震地表破裂特征	162
5.4 小鱼洞断裂同震地表破裂特征	167
5.5 后山断裂同震地表破裂特征	170
5.6 小结	171
参考文献	171
第6章 汶川地震断裂工程安全性研究	173
6.1 概述	173
6.2 地震地表破裂带避让问题研究进展	175
6.3 汶川地震地表破裂影响带研究	188
6.4 工程选址安全避让距离讨论	191
6.5 小结	192
参考文献	192
第7章 汶川地震滑坡的基本特征	195
7.1 概述	195
7.2 汶川地震地质灾害概况	200
7.3 断裂活动与大型滑坡关系研究	204
7.4 汶川地震滑坡活动强度研究	216
7.5 小结	221
参考文献	222

第三篇 斜坡地震动监测与试验方法篇

第8章 汶川地震区斜坡地震动特征研究	231
8.1 概述	231
8.2 汶川地震区斜坡地震动监测台站建设	235
8.3 斜坡地震动响应特征分析	242
8.4 斜坡地震动响应规律研究	265
8.5 小结	279
参考文献	279
第9章 汶川地震区斜坡地脉动特征	282
9.1 概述	282

9.2 典型斜坡地脉动监测	284
9.3 斜坡地脉动卓越频率特征分析	292
9.4 小结	295
参考文献	295
第 10 章 斜坡动力响应大型振动台试验研究	297
10.1 概述	297
10.2 斜坡地震破坏的大型振动台模拟试验研究	298
10.3 斜坡动力响应特征及变形破坏机制	304
10.4 小结	329
参考文献	330
第 11 章 汶川地震区斜坡岩体稳定性评价方法研究	331
11.1 概述	331
11.2 斜坡稳定性分析赤平投影法	336
11.3 基于应力场的斜坡稳定性动力评价方法	340
11.4 基于动力放大系数的拟静力极限平衡修正方法	346
11.5 斜坡动力稳定的可靠性评价方法	348
11.6 典型斜坡变形破坏机理的数值模拟方法	355
11.7 小结	369
参考文献	370

第四篇 地震地质灾害专题篇

第 12 章 汶川地震强震加速度与滑坡响应特征	375
12.1 概述	375
12.2 汶川地震区地震加速度分布规律	376
12.3 竖向加速度对滑坡稳定性的影响	379
12.4 不同坡角滑坡地震动力响应模拟	384
12.5 小结	390
参考文献	390
第 13 章 大光包巨型滑坡地震动力响应特征研究	392
13.1 概述	392
13.2 地震前后滑坡遥感对比研究	394
13.3 滑坡地质结构模型建立	407
13.4 滑坡变形失稳的 FLAC ^{3D} 模拟	412
13.5 滑坡地震动力响应特征	419
13.6 小结	420
参考文献	421
第 14 章 地震高速远程滑坡空气动力学研究	423
14.1 概述	423

14.2	牛眠沟高速远程滑坡动力学过程分析	425
14.3	高速远程滑坡空气动力学效应数值模拟研究	434
14.4	高速远程滑坡飞行风洞模拟试验研究	440
14.5	小结	444
	参考文献	444
第 15 章	地震高速远程滑坡液化机理研究	446
15.1	概述	446
15.2	高速远程滑坡液化机理实验研究	447
15.3	液化作用下高速远程滑坡长程滑动机制分析	453
15.4	小结	457
	参考文献	457
第 16 章	滑坡防治工程的地震响应研究	459
16.1	概述	459
16.2	地震前滑坡防治工程	460
16.3	地震期间滑坡防治工程动力响应分析	463
16.4	余震滑坡防治工程动力响应分析	467
16.5	小结	469
	参考文献	469
第 17 章	地震滑坡快速评估及编图方法研究	470
17.1	概述	470
17.2	基于 Newmark 位移模型的地震滑坡编图方法	470
17.3	区域地震滑坡易发性快速评估与编图	474
17.4	区域地震滑坡危险性及损失快速评估与编图	479
17.5	地震地质灾害应急图件编制基本要求	486
17.6	小结	492
	参考文献	493
第 18 章	汶川地震区震后高位泥石流灾害研究	495
18.1	概述	495
18.2	高位泥石流的基本特征与判别标准	495
18.3	高位泥石流的分布及动态变化特征	499
18.4	高位泥石流成灾模式	511
18.5	高位泥石流灾害风险评估	527
18.6	高位泥石流防治对策	537
18.7	小结	544
	参考文献	545
	后记	546

绪 论

2008年5月12日,四川汶川发生 $M_{\text{s}}8.0$ 级地震,造成8.7万余人死亡,30余万人受伤,举国悲恸。汶川地震之后,减灾防灾成为我国最紧迫、最重大的战略需求之一,亟待加强地震及地质灾害的地质环境、触发机理、成灾模式、风险评估和防治工程等科学技术问题研究。国土资源部中国地质调查局于2009年启动“汶川地震地质灾害调查评价”计划项目,组织了国内相关科研院所、高等院校、地质勘查单位的专家、学者,针对汶川地震的工程地质与重大地质灾害关键科技问题,进行联合攻关研究,取得了一批原创性科研成果。本专著是在计划项目研究成果的基础上凝练而成的。

一、主要研究内容

本专著强调了地震地质灾害的内外动力耦合作用机理,旨在提高地震触发地质灾害早期识别、监测预警、风险评估理论和关键技术研究水平,为强烈活动构造区地质灾害防治和灾后重建规划与建设提供地质支撑。主要包括:

——运用现代地震学和地球物理学理论与方法,开展龙门山及邻近地区综合地球物理探测,建立岩石圈结构模型,研究活动构造带深部结构特征和物质状态,探讨构造运动及其对地震孕育规律。

——开展龙门山断裂带、鲜水河断裂带、安宁河断裂带及其相邻地区的高精度GPS测量,对比分析汶川地震前、地震期间和震后三个时期地壳形变、主要活动断裂运动速率和位移量以及各构造块体的运动速率和应变参数等,揭示青藏高原东缘主要活动断裂之间的相互作用关系及其机制。

——开展龙门山及邻近构造带活动断裂调查,了解汶川地震发震断裂带平剖面结构、地表破裂特征;揭示活动断裂的地质灾害效应和地质灾害链的形成机理,为汶川地震灾后重建提供地质依据。

——运用遥感、无人机航测和地面调查方法,开展汶川地震区特大型地质灾害的调查测绘,揭示地震加速度与触发滑坡规律;分析地震触发地质灾害,特别是巨型滑坡、高速远程滑坡-碎屑流发育特征和分布规律,探讨汶川地震触发的灾难滑坡成灾机理;开展典型地段岩体质量评价,提出龙门山及类似地区岩体稳定性研究的理论与方法,为地震灾区地质灾害防治和灾区重建提供技术支持。

——建立专门地震区斜坡地震动观测站,揭示地震作用下斜坡动力响应特征和变化规律;开展不同构造部位、不同地貌部位山体微震动卓越周期测试,了解山体斜坡微地震卓越周期时间、幅度等特征参数的规律,分析地震作用下斜坡失稳机理。

——开展大型振动台试验,揭示不同地震波作用下斜坡的动力响应规律,再现强震区地震滑坡的破坏过程,探索其形成机理;在大型振动台试验的基础上,结合弹塑性理论和损伤力学理论,探索斜坡地震动稳定性评价技术和方法。

——运用大型风洞试验和环剪试验,研究高速远程滑坡产生的气垫效应和液化效应,为强烈地震活动区地质灾害的危险性评估提供基础;结合典型实例,探索地震滑坡灾害快速制图技术方法体系。

——运用航天(空)遥感和现场无人机测绘,进行多时相遥感对比,研究典型高位泥石流形成的地质环境条件、空间分布特征、发展趋势及危害,并进行汶川地震极重灾区高位泥石流预测,为地质灾害防治规划、保障灾后恢复重建提供基础资料。

二、研究思路和技术路线

围绕地震工程地质和地质灾害研究目标,在汶川地震灾区野外调查、勘查、监测资料的基础上,开展多学科理论和多技术方法的集成和原始创新研究,力图在地震地质灾害机理和减灾防灾技术方面有所突破。采用的理论和技术方法主要包括:

——多学科理论综合集成与创新。地震地质灾害研究涉及众多学科领域,包括岩石圈动力学、深部地球物理、地震工程、工程地质、减灾防灾等领域,需采用系统科学理论,将各项研究内容贯通,促进交叉研究成果的升华。

——高新技术的应用。汶川地震地质灾害提出很多新的科学问题,必须引入现代科学技术方法加以研究。高新技术手段主要涉及高分辨率航天(空)影像的快速获取、深部构造地球物理勘查、大型滑坡机理振动台试验、高速远程滑坡风洞试验、大型环剪试验等方面。

——野外调查与观测。在前期调查的基础上,开展补充调查与观测,构建时间序列上完整的震前、震中和震后的数据体系。专门开展或补充完善区域地形变综合监测、地脉动测试及特征分析、河谷斜坡震动响应监测等。

——数值模拟分析。数值模拟是进行地震动力响应和成灾机理分析的有效手段,可以将多种调查、观测与监测数据协同处理,分析各因素的影响与作用。

——基于GIS平台综合分析。借助GIS的二维、三维数据表现力和空间分析功能编图是地质灾害调查成果综合集成的有效手段,是促进多源地质数据有机融合的重要步骤,可以为地震地质灾害指标的高精度、多种方式表达提供技术支撑。

研究思路和技术路线如图0.1所示。

三、主要进展和成果

(1) 通过跨越龙门山构造带、鲜水河构造带和安宁河构造带的三条剖面大地电磁测深,获得Y字形构造区岩石圈电性结构模型,并采用现代地震学和地球物理学方法,分析了活动带深部结构特征和物质状态、深浅层之间分层结构及耦合关系,认为川西高原中下地壳流变强度比正常地壳软弱,与邻近四川盆地和华南地块的地壳厚度差达20~

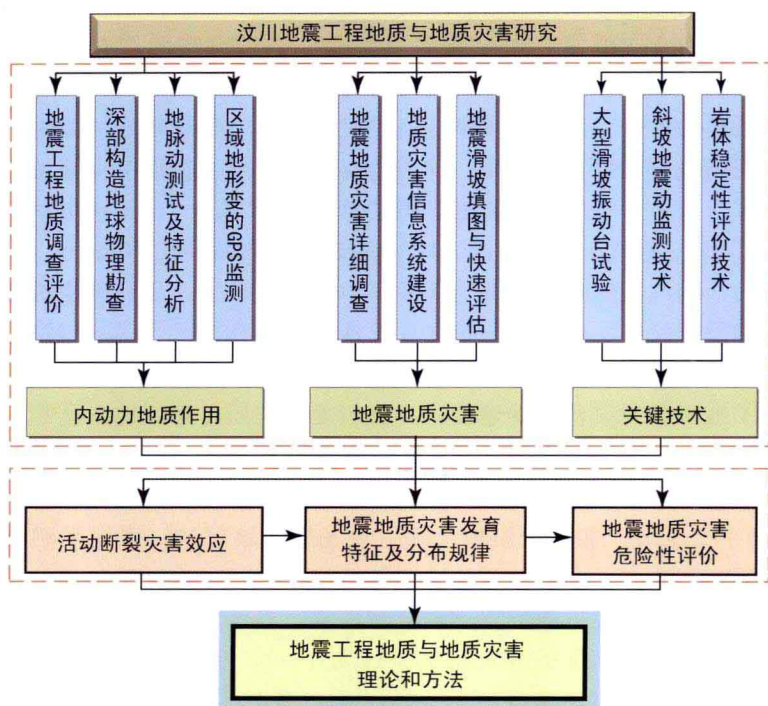


图 0.1 总体研究思路和技术路线框图

30km, 地貌高度差达 3~4km, 形成了能够驱动中下地壳软弱层发生流动的横向压力差。由于强硬的四川盆地阻挡, 中下地壳塑性物质在龙门山之下堆积, 并在高低阻接触带附近产生应力积累, 得以在中地壳隐伏断裂前端产生应力高度集中及能量快速释放破裂, 从而揭示了龙门山构造带现代构造运动的深部驱动机制及其对强震的控制作用。

(2) 通过近 20 年的 GPS 长期观测, 系统获得了汶川地震前后龙门山构造带及邻区地壳运动与形变特征。总体趋势是, 由西向东运动速率减小, 由北至南运动速率矢量方位角逐渐变大, 地壳运动围绕东喜马拉雅构造结作顺时针旋转, 呈现出涡旋结构特征。其中, 鲜水河断裂带、安宁河断裂带、则木河断裂带、小江断裂带的活动性质为左旋走滑, 龙门山断裂带、红河断裂带为右旋走滑, 运动速率以鲜水河断裂带最大, 汶川地震后以龙门山断裂带运动速率最大。

(3) 通过野外地质调查, 获得了龙门山构造带活动断裂的发育分布特征等基础资料, 显示龙门山后山断裂、中央断裂、前山断裂和山前隐伏断裂等均有活动表现, 其中以龙门山中央断裂的活动性最为强烈。根据汶川地震后地壳形变 GPS 观测数据, 龙门山断裂带性质为右旋挤压走滑, 断裂带西侧震后松弛为拉张区, 运动速率加大。龙门山断裂带及周围地区震后运动速率和方向变化大, 断裂带活动主要表现在中段, 北段和南段相对较小, 南段活动最弱; 北段以后山断裂活动为主, 中段以前山断裂活动为主, 南段各断裂相近。

(4) 基于断裂擦痕等构造行迹的构造应力场反演和基于形变的区域构造应力场数值

模拟结果表明, 龙门山地区在汶川地震震前、震时和震后的最大主应力和剪应力场发生了改变, 最大主应力方向整体上由 NEE 变为 SEE; 震前和震时均有局部区域 (特别是在映秀) 剪应力集中现象, 地震后应力相对均匀分布。与地震前相比, 龙门山前山断裂和龙门山中央断裂的剪应力值明显减小, 但是龙门山后山断裂附近的剪应力值增大。

(5) 大量现场地质调查资料表明, 汶川地震地表破裂主要沿中央断裂、前山断裂和小鱼洞断裂发育。其中, 沿中央断裂地表破裂总长约 275km, 沿前山断裂地表破裂长约 72km, 与之复合交汇的彭州市小鱼洞 NW 向断裂, 地表破裂长约 15km。后山断裂在汶川地震过程中的活动性较弱, 仅局部地区断续出现地表破裂。现场测绘的龙门山断裂带地表破裂水平和垂直位移、破裂带影响宽度及建筑物破坏状况, 揭示出汶川地震地表破裂的强烈影响带宽度为 16~60m, 影响带宽度与地表破裂垂直位移具有较好的线性关系。据此提出了地表破裂避让宽度建议, 为汶川地震灾后重建场地选址和合理避让提供了参考数据。

(6) 首次建立斜坡地震动响应观测台站, 开展了汶川地震区斜坡地震动特征观测。在青川东山-狮子梁斜坡、桅杆梁斜坡、绵竹九龙镇斜坡等地, 采用平硐或地表监测的方式, 按照不同高程布置了余震地震动响应监测仪, 取得了大量反映斜坡地震动峰值加速度、速度、位移和频谱等方面的原创性监测资料。显示斜坡地震动响应一般随高程增加而增大, 地震动峰值加速度的放大系数一般为 1~3。受斜坡不同高程处的微地貌和场地条件控制, 地震动峰值加速度呈非线性增大; 多面临空微地貌有利于斜坡体震动, 破碎岩体及地下水增大了场地阻尼, 削弱了斜坡地震动响应, 地震波具有选择性放大效应。

(7) 首次将地脉动测试参数引入山体斜坡稳定性分析, 开展了汶川地震区山体斜坡地脉动测试, 获得了斜坡地脉动卓越频率、加速度、位移分布特征。地脉动卓越频率水平分量与垂直分量差异是反映山体斜坡地层结构、岩性、覆盖层厚度的重要指标, 当地脉动卓越频率水平分量大于垂直分量时, 反映地层在一定深度范围内有软弱夹层, 在各种诱因下会导致山体斜坡失稳。

(8) 运用大型振动台试验研究了斜坡地震动力响应特征。分析表明, 顺层结构斜坡主要是岩层面滑动和与层面斜交的拉裂破坏; 反倾层状结构斜坡主要是坡肩岩体弯折倾倒、块体剪断以及顺坡向剪切裂缝的产生, 坡体表层岩体及坡肩附近岩体的松动破坏并最终可能发展成滑面形成切层滑动; 均质结构斜坡模型主要是震动作用下坡体拉张和剪切裂缝的产生, 将坡体中上部岩体切割成块体并发生突然的崩滑破坏, 滑面形状近似直线型; 含裂隙斜坡破坏模式类似于均质结构斜坡模型的破坏过程为“动力作用拉裂—坡面大块滑落—坡面坍塌—斜坡破坏”。

(9) 通过现场试验与室内试验测试、动力评价方法及数值模拟方法, 对地震区斜坡岩体稳定性进行了评价; 提出了基于运动学与块体理论的岩体破坏模式分析方法, 为结构面分析及斜坡岩体稳定性评价提供了新的方法; 运用基于应力场的动力评价方法的基本思路, 确定了斜坡稳定性动力破坏判识方法; 开展了斜坡稳定性数值模拟。

(10) 地震地质灾害地面调查和航空遥感调查表明, 汶川地震导致极重灾县 (市) 地质灾害隐患点明显增加, 主要沿龙门山主中央断裂带和后山断裂带展布, 滑坡面密度

大于 50% 以上。在极震区, 滑坡滑床往往不具连续平整的滑面, 剪出口滑坡特征不明显, 呈现明显的“尖点突起”或“边缘突出”特征, 反映出上部滑体被地震力振动解体, 甚至抛掷后与下部滑床边缘发生撞击。斜坡失稳以阶型滑坡、凸型滑坡、勺型崩滑、坐落型(振胀型)滑坡和巨大滚石五种类型最为典型。

(11) 阐述了区域滑坡活动强度分析评价基本原则、快速评估方法, 建立了简易实用的区域群发滑坡活动强度指标体系和分级标准, 初步提出, 把最大面密度的 1%、3%、5%、10%、30%、50% 作为地质灾害强度指数分级的依据, 将地质灾害活动强度指数分为 8 级。汶川地震诱发的极端滑坡事件主要沿龙门山中央断裂和 X—XI 烈度地段分布, 70% 以上的大型崩滑体密布于龙门山中央断裂带及其附近; 前 10 个规模最大的滑坡和前 10 个滑移距离最大的高速远程滑坡具有很好的重合性, 代表了汶川地震诱发的高能量滑坡事件。

(12) 强震地面运动记录分析表明, 极震区滑坡受地震竖向力的作用明显。母岩遭受长期构造动力作用, 呈碎裂岩体, 后期被强烈风化, 岩体极其破碎, 为高速远程滑坡-碎屑流提供了丰富物质。极震区滑坡-碎屑流具有如下主要特征: ①抛掷效应——位于汶川地震主断裂带或附近, 垂直加速度大于水平加速度, 强地面运动持时长, 岩体发生振胀和抛掷; ②碰撞效应——上部滑坡体发生高位剪出和高位撞击, 致使岩体碎屑化; ③铲刮效应——撞击作用导致下部山体被铲刮, 形成次级滑坡, 为碎屑流体提供了足够展翼和抛洒物源体积; ④气垫效应——碎屑化岩体快速抛掷导致下部沟谷空气迅速谷状圈闭和向下紊流, 形成气垫效应。

(13) 运用多期卫星影像、航空遥感影像、现场无人机调查、地面大比例尺测绘和动力分析法, 对汶川地震触发的最大滑坡——大光包滑坡进行了系统研究, 建立了滑坡三维地质模型, 包括下部层状滑体、上部崩滑体和中间滑崩过渡带三个变形失稳单元。数值模拟表明, 大光包滑坡地震动力响应较为复杂, 随高程、坡度放大的趋向性和节律性并不明显。在对水平加速度的响应方面, 滑坡前缘更为明显, 地震动频率更高、振幅更大, 利于前缘的顺层失稳滑动; 在竖向加速度响应方面, 后缘滑体的振幅更大, 更利于拉裂和振碎解体。同时, 竖向加速度(绝对值)数倍大于水平加速度, 更利于抛掷失稳。

(14) 首次运用空气动力学和流体力学理论, 研究了汶川地震高速远程滑坡-碎屑流的运动机理, 建立了滑坡高速运动的解析评估方法。将计算流体力学引入高速远程滑坡空气动力学研究领域, 对滑体失稳以后的飞行过程进行了空气动力学数值模拟, 结果表明: 高速远程滑坡滑体飞行过程中先后受到机翼效应和气垫效应作用, 两者之间没有明显的界线。空气动力作用与滑体飞行沟谷所圈闭的空间呈负相关, 沟谷越开阔, 滑体所受空气动力学作用越小; 而与滑体的初始水平速度及俯视截面积呈正相关关系。

(15) 首次采用大型风洞试验研究了高速远程滑坡的地形效应, 结果表明: 沟谷圈闭效果越好, 对滑坡飞行空气动力学效应的影响越明显。五种地形对滑坡空气动力学效应的影响由大到小依次是: 矩形沟谷、75°梯形沟谷、60°梯形沟谷、45°梯形沟谷及平坦地形。矩形沟谷地形滑坡模型升力系数最大, 可达 1.13。同时, 滑体距离地面的高度也是影响空气动力学效应的重要因素, 离地高度越小, 升力系数越大, 空气动力学效应

越明显。

(16) 运用环剪试验机对高速远程滑坡滑动阶段的地震液化机制进行了研究, 试验研究表明, 富水滑面两侧物质首先在地震作用下产生剪切位移, 发生局部滑面液化现象, 导致孔隙水压力增大, 为滑体进一步高速远程滑动提供了高含水量的润滑物质。

(17) 对比研究了汶川地震区滑坡在加固和未加固两种工况下的动力响应特征。滑坡抗滑桩防治工程的动力响应模拟结果表明, 其剪应变增量大约是震前的 3000 倍, 滑坡稳定性显著降低, 甚至可能发生变形失稳; 地震作用下抗滑桩地段位移明显降低, 但加速度响应明显陡增, 对阻止滑动起到了重要作用。

(18) 基于简化 Newmark 累积位移分析模型, 开展了汶川地震诱发滑坡易发性和危险性评估及地震地质灾害区域损失快速评估研究; 结合汶川地震地质灾害应急评估处置, 提出了地震地质灾害应急图件编制的阶段划分原则及相应的图件编制要求, 为地震地质灾害应急地质工作提供了快速决策的技术流程。

(19) 首次建立了基于无人机测绘的高位泥石流快速调查识别技术和危险性评估方法。泥石流成为地震灾区震后威胁最大的地质灾害类型, 而高位泥石流又因其物源量丰富、物源分布位置高、沟道纵比降大、隐蔽性强、破坏力极大等特点成为防范的重中之重。通过高位泥石流沟际识别标准、分布特征和动态变化趋势研究, 提出了汶川地震灾区高位泥石流的五种成灾模式; 以文家沟高位泥石流为例, 开展了单沟高位泥石流风险评估, 总结了高位泥石流的防治思路、基本方法及防治要点。

四、主要研究人员及分工

在研究过程中, 充分体现学科优势互补, 加强产学研的密切结合, 发挥集体智慧的作用。本专著撰写分工如下。

绪论由殷跃平、张永双撰写。介绍了本专著主要内容、研究思路及主要进展。

第 1 章由姚鑫、张永双、杨为民等撰写。介绍区域地质概况、新构造运动特征, 特别是龙门山构造带活动断裂特征; 阐述龙门山地区工程地质岩组和主要岩体结构类型。

第 2 章由方慧、王绪本、卢景奇、张刚等撰写。通过龙门山构造带、鲜水河断裂带和安宁河断裂带三条大地电磁测深剖面测量数据分析, 阐述青藏高原东部与扬子地块交汇地区的岩石圈电性结构模型, 分析强震孕育的深部动力学环境。

第 3 章由唐文清、刘宇平等撰写。阐述龙门山构造带及邻区 1992~2011 年现今地壳运动 GPS 变形观测结果。介绍汶川地震前后区域地壳、地块及主要活动断裂运动速度, 分析地震前后区域地壳几何学、运动学、动力学特征。

第 4 章由苏生瑞、张永双、刘健、周能娟等撰写。介绍龙门山地区基于断裂擦痕的构造应力场反演和基于形变的区域构造应力场数值模拟结果。探讨汶川地震同震断裂运动学特征与震源机制关系, 揭示了汶川地震孕震、发震和震后构造应力场演化规律。

第 5 章由张永双、熊探宇、张春山、刘永华等撰写。介绍汶川地震断裂带野外地质调查、山地工程揭露和浅层地球物理探测结果, 阐述汶川地震地表破裂发育特征及空间分布规律。

第6章由张永双、石菊松、郭长宝等撰写。结合国内外地震地表破裂带避让距离研究成果,探讨活动断裂的地震工程地质效应及地表破裂安全避让距离。基于汶川地震破裂调查资料,建立了汶川震区恢复重建中地震地表破裂的避让宽度经验公式。

第7章由吴树仁、张永双、李晓春、陈倩撰写。通过现场地质灾害调查和遥感解译,对汶川地震诱发的极端地质灾害发育特征进行总结,模拟分析断裂活动与大型滑坡之间的关系,提出了区域滑坡活动强度分析方法。

第8章由王运生、黄润秋、罗永红等撰写。介绍现场斜坡地震动响应观测台站分布与观测情况,分析汶川地震余震的斜坡地震动响应特征;提出了不同地形、地质条件下山体斜坡放大效应等地震动规律。

第9章由李洪涛、王营超、王新杰等撰写。介绍龙门山、鲜水河河谷、安宁河谷地区40余条山体斜坡地脉动测试数据分析,获得了强震区斜坡地脉动卓越频率、加速度和位移分布特征,以及地脉动卓越频率影响山体斜坡稳定性的主要参数,提出了不同斜坡、不同地层结构及多种震源组合的地脉动卓越频率分布规律。

第10章由伍法权、杨国香、董金玉撰写。采用室内试验、物理模拟试验、数值模拟试验等技术手段,对地震波作用下斜坡动力响应规律进行研究,模拟强震区地震滑坡的形成破坏过程。提出了地震作用下不同地质结构的斜坡失稳破坏规律。

第11章由胡新丽、唐辉明、刘晓等撰写。介绍龙门山地区斜坡岩体结构与岩体物理力学性质,开发了地震动条件下岩体边坡稳定评价数值算法和应用程序,基于典型地震滑坡实例,探讨地震滑坡机理及滑坡稳定性定量评价方法。

第12章由殷跃平、王文沛、李晓春等撰写。介绍特大抛掷型滑坡-碎屑流随地震断裂带的距离(震中距)增加而迅速减少的分布规律。根据汶川地震强地面运动记录,采用拟静力及动力响应分析方法,揭示发震断裂带10km范围内出现大量的“抛掷型”滑坡的原因,提出了竖向地震力的作用机理。

第13章由殷跃平、王猛、成余粮、王军等撰写。介绍汶川地震触发的目前全球最大的滑坡之一——大光包巨型滑坡的区域地质背景、形成机理及结构特征。采用震前和震后高分辨率遥感数据源、无人机航摄和现场调查,对大光包滑坡进行了4期图像的对比解译,建立了数字高程模型(DEM)和三维实体模型;采用FLAC^{3D}动力模拟方法,研究了大光包滑坡地震动力响应特征及其变形失稳过程。

第14章由邢爱国、张明、殷跃平等撰写。介绍汶川地震高速远程滑坡启程(高位剪出)阶段和近程(高位抛掷)阶段的特征,运用空气动力学理论和大型风洞试验方法,对气垫效应进行研究,提出了不同抛掷条件和地形条件的高速远程滑动特征。

第15章由孙萍、殷跃平、李晓春等撰写。介绍汶川地震高速远程滑坡中、远程滑覆(流动)阶段的特征,以青川东河口高速远程滑坡为例,运用动三轴环剪试验揭示了高速远程滑坡流动阶段的液化机制。

第16章由殷跃平、王文沛、钱江澎、李滨撰写。以北川县城王家岩东滑坡防治工程为例,研究滑坡抗滑桩在地震前、地震振动期间及震后余震动下的动力响应特征。

第17章由王涛、姚鑫、葛华等撰写。介绍地震滑坡灾害快速评估方法,基于简化Newmark位移分析模型,开展汶川地震诱发滑坡易发性和危险性评估及区域损失快速