

汶川地震山地灾害

形成机理与风险控制

崔鹏 何思明 姚令侃 王兆印 陈晓清 等 著



科学出版社

Part 9

20124

汶川地震山地灾害形成机理 与风险控制

崔 鹏 何思明 姚令侃 王兆印 陈晓清 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以汶川地震震后山地灾害研究为重点,较为系统地论述了汶川地震不同烈度地震区孕灾环境的变化和在孕灾环境变化下山地灾害的形成条件、运动过程、演化规律、危害范围、潜在灾害判识等基础理论。在此基础上,提出了灾害风险评估、监测预警、防治工程以及堰塞湖应急处置等方法和技术。

本书可供防灾减灾、国土资源、水利水电、交通、地质、地理等相关领域的科研、工程技术人员和高等院校相关专业师生参考,也希望对参与灾后重建工作的科技人员和政府减灾管理专家有所裨益。

图书在版编目(CIP)数据

汶川地震山地灾害形成机理与风险控制 / 崔鹏等著. —北京: 科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-030703-3

I. ①汶… II. ①崔… III. ①地震灾害: 山地灾害-灾害防治-研究
IV. ①P315.9 ②P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 053990 号

责任编辑: 韦 沁 朱海燕 马云川 / 责任校对: 李 影 钟 洋
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年11月第一版 开本: 787×1092 1/16

2011年11月第一次印刷 印张: 43 1/4 插页: 6

字数: 1 098 000

定价: 158.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

2008年5月12日14时28分,我国四川省汶川县映秀镇附近(103.4°E, 31.0°N)发生Ms 8.0地震(“5·12”汶川大地震),地震持续时间为80~120s,震源深度14km,沿映秀-北川断裂长度约300km,最大错动位移达7m左右,释放能量是1976年唐山地震的三倍且主要集中于前80s。此次地震为典型的线性宏观和主震-余震型地震,余震活动频繁、强度大。据统计,截至2008年12月18日12时,共发生余震40170次,余震主要沿龙门山断裂带分布,4.0级以上余震达285次,其中4.0~4.9级243次,5.0~5.9级34次,6.0~6.9级8次,最大余震6.4级。

滑坡、崩塌(滚石)是汶川地震直接触发的主要山地灾害类型。据估算,地震直接触发的滑坡、崩塌等总数达4万~5万处。其中,对人员安全和临时安置构成直接威胁的灾害隐患点就达12600余处(据四川省39个重灾县统计),规模大于1000万m³的巨型滑坡有30余处。2008年,国土资源部对极震灾区十个县(市)的灾害隐患进行初步排查表明,震后新发现的灾害隐患点达4970处,其中滑坡1701处、崩塌1844处、泥石流304处、不稳定斜坡1093处。此外,“5·12”汶川大地震触发的崩塌、滑坡在多条河流形成256处堰塞湖,北川县、安县、青川县的串珠状“堰塞湖”危及100万人生命和财产安全。总体上看,汶川大地震同震触发的灾害在数量上以滑坡、崩塌为主。

“5·12”汶川大地震引发的大量同震滑坡、崩塌,大大加剧了震灾,而震后长期持续的山地灾害,成为制约灾后重建的关键因素。震后三年来,震区灾害较震前明显增多,其中泥石流成为震后最为活跃的灾害。据调查,地震重灾区新增泥石流967条,主要沿着发震断裂——映秀-北川断裂带两侧分布。其中主要的群发性泥石流事件包括2008年北川“9·24”泥石流,2009年都江堰、汶川“7·17”泥石流,2010年四川地震灾区“8·13”、“8·19”特大山洪泥石流灾害。泥石流毁坏公路、切断通信、堵断河道形成堰塞湖、淹没村庄和安置房、严重威胁灾区人民的生活,给灾后重建工程造成了极大损失。仅在2010年8月13日暴雨作用下,四川省绵竹市清平乡突发的泥石流,掩埋村镇、切断通信和交通,使清平乡成为一座孤岛,造成14人死亡和失踪,379户房屋严重受损。在同一降雨过程中,映秀镇红椿沟暴发泥石流,淤埋都汶公路,中断交通;堵塞岷江,形成的巨大堰塞体迫使岷江改道,洪水冲过映秀新城,威胁到映秀镇的安全。泥石流已成为震后对地震灾区影响和威胁最严重的灾害类型。

震后三年泥石流极为发育的灾害情势表明,震后山地灾害已危及灾后重建成果的保障,成为制约重建工作顺利推进的关键问题。了解震区孕灾环境的变化特点,揭示变化孕灾环境下山地灾害形成条件、运动过程、演化规律,提出潜在灾害判别与风险分析方法,针对震后山地灾害活动与成灾特点研发防治工程新技术,为汶川震区灾后重建中城镇和重

大基础设施建设的减灾防灾提供科技支撑,是撰写本书的目的。

以往国内外地震地质与地震震害研究表明,破坏性大地震震后,地震作用破坏了山体地质结构,使得岩石土体破碎,降低了斜坡的稳定性,致使震后崩塌、滑坡、泥石流等灾害非常活跃,其灾害活动时间可能持续十年以上。由于大地震在同一地点发生的概率较低,地震造成地表灾害的样本较少,缺乏对现象的全面认识,震后山地灾害形成机理仍然是世界性的难题。汶川大地震是有现代观测仪器以来人类所记录到的地震触发山地灾害最严重的大地震。基于汶川大地震触发大量山地灾害的现象,力求从案例分析上升到理性认识,逐步揭示震后山地灾害的形成与演化规律,服务山区地震及其引发的山地灾害的减灾实践,是本书撰写的基本动力。

2008年震后仅两个月,根据国家地震灾区灾后重建的紧迫需求,科学技术部立项开展国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“汶川地震次生山地灾害形成机理与风险控制”(2008CB425800)的研究,由中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所、成都理工大学、清华大学、中国地质科学院地质力学研究所、西南交通大学等单位组成团队联合攻关,崔鹏研究员牵头负责该项研究。本书即为该项目部分成果的总结和提炼。因汶川地震同震触发的山地灾害已另行安排专著论述,本书的重点是震后山地灾害研究。“5·12”汶川大地震发生后,国家自然科学基金委员会地球科学部立即启动应急科学研究项目(40841011),支持震后山地灾害调查工作,为本书地震区山地灾害区域规律研究提供了研究基础和部分数据。本书由五篇共21章构成,内容涵盖汶川地震区山地灾害分布规律、活动特点、形成机理、监测预警技术、应急处置技术、灾害治理技术、风险评估方法等,总体思路和框架结构如下。

第一篇 “5·12”汶川地震山地灾害分布规律与活动特点

本篇由第1~5章组成,在全面掌握同震山地灾害信息的基础上,归纳总结了“5·12”汶川地震山地灾害的类型及其成灾特点;分析了山地灾害的活动特征,揭示了山地灾害的分布规律;进而通过对地震触发崩塌、滑坡自组织临界性和地震造成坡体位移量的研究,建立了不同地震烈度区定量反映岩土体损伤效应的表征体系;最后,研究通过汶川震区典型流域与1950年西藏察隅地震、1976年松潘-平武地震等邻近区域震后灾势的类比分析,对震后山地灾害发展趋势进行了探讨。该篇是关于震后山地灾害成灾环境演变普遍规律和山地灾害全局态势的总体认识,是以下各篇的基础。

第二篇 震后泥石流形成机理与防治技术

本篇包含第6~10章。汶川地震震后三年山地灾害活动实例表明,泥石流是震后危害最大的山地灾害,也很可能是震后活跃期最长的灾种。本篇着重分析了震后泥石流的形成机理,通过泥石流运动模拟手段建立了潜在危险区确定方法,提出了地震灾区泥石流灾害防治原则和监测预警技术,开发了一批针对震后泥石流成灾特点的灾害治理新技术。震后泥石流灾害的系统研究是本书的重点,也是特色之一。

第三篇 斜坡变形破坏机理与动力过程

本篇由第11~16章组成。“5·12”汶川地震的剧烈震动使山体表层松动,岩土体破

碎,斜坡稳定性降低,在降雨和余震的作用下,震后滑坡、崩塌、落石灾害频发,对灾后重建特别是公路建设造成严重危害。本篇首先分析了震后孕灾环境条件下滑坡、崩塌、滚石的形成机理和条件;然后,基于对不连续介质体力学行为的数值模拟和统计分析,提出了滑坡崩塌危害范围的预测方法;分析了同震边坡防治结构的失效机理,提出了相应的减震措施和技术;分析了滚石冲击下棚洞、路面等道路设施的动力响应,研发了基于耗能减震原理的滚石灾害防治技术。这些工作为地震区斜坡灾害防治工程设计和灾后恢复重建提供了技术支持。

第四篇 堰塞湖演化与应急处置技术

本篇由第17~19章组成。汶川大地震期间形成了256处堰塞湖,在抗震救灾阶段,堰塞湖应急处置受到极大关注。同时暴露出我们对堰塞湖的认识、堰塞坝稳定性评估和排险工程技术储备相对匮乏的问题。针对堰塞湖应急处置需求,本篇通过基于参数模型的溃决洪水实时预测方法,分析溃决洪水演进过程,确定下游潜在危险区,提出了堰塞湖人工可控排泄方法,可望预防排泄初期溢流效率偏低、后期水流强烈侵蚀导致排泄流量增长过快的问题,此方法也作为堰塞湖排险技术的一点补充。针对堰塞坝的保留问题,本篇阐述了堰塞坝引起的河床演变与尼克点发育的地貌效应,提出了基于泄洪道阶梯-深潭发育程度和基于坝体颗粒粒度的堰塞坝稳定性判定指标,探讨了保留堰塞坝的资源环境效应等。

第五篇 汶川地震区山地灾害风险分析与制图

本篇由第20~21章组成。汶川大地震后活跃的山地灾害是灾后重建必须应对的隐患。本篇系统研究了地震区山地灾害危险性评估及危险性区划,具体的技术流程依次包括震后山地灾害的调查、灾害编录及空间数据库建设、山地灾害易发性评估、考虑震后降雨及潜在地震引发的山地灾害危险性评估等,分滑坡(含崩塌)风险分析和泥石流风险分析两章具体介绍评价方法和结果。编制的山地灾害及其风险评估系列图件,可望为震区灾后重建工程规划和减灾防灾工程布设提供依据。

本书是项目组共同研究的成果。全书由崔鹏统稿,姚令侃、庄建琦协助,钟敦伦审阅全书,苏凤环帮助整理书稿。各章主要撰写人如下。

第1章:崔鹏、庄建琦、王成华、葛永刚;第2章:崔鹏、张建强、苏凤环;第3章:崔鹏、葛永刚、陈兴长;第4章:姚令侃;第5章:姚令侃、陈晓清、陆阳;第6章:崔鹏、鲁晓兵、庄建琦;第7章:胡凯衡、庄建琦、崔鹏;第8章:陈晓清、崔鹏;第9章:游勇、陈兴长、胡凯衡、陈晓清、柳金峰;第10章:陈晓清、王兆印、游勇、柳金峰、陈兴长;第11章:何思明、李新坡、吴永;第12章:何思明、李新坡;第13章:何思明、吴永;第14章:何思明、姚令侃、李新坡、罗渝;第15章:何思明、沈均、欧阳朝军、吴永;第16章:何思明、王全才、丁瑜、王浩;第17章:王兆印、余国安、张康;第18章:傅旭东、马宏博、刘帆;第19章:陈晓清、崔鹏、赵万玉;第20章:吴树仁、石菊松、王涛;第21章:崔鹏、张建强、向灵芝、邹强。

“5·12”汶川大地震仅过去三年,其山地灾害活跃期还未结束,本书中的一些理论还

有待实践的检验，地震区孕灾环境巨变条件下山地灾害的发育特征、形成机理、成灾机制、风险分析与减灾技术等一系列科学技术问题还有待进一步深化，本书仅反映汶川地震山地灾害研究的初步成果。鉴于震区震后山地灾害极为发育，量大、面广，暴发频繁，灾情严重，减灾防灾任务艰巨，并出于为灾后重建服务的时效性考虑，仍将阶段性成果勉力成稿，希望能为灾区山地灾害防治工作者提供参考和借鉴，为后续研究提供基础。作者衷心希望得到相关专业的专家学者、工程技术人员、灾害管理人员和广大读者的批评、指教，并将和大家一起继续深化地震区山地灾害形成机理与风险调控方面的研究，为地震区减灾防灾厉行我们的科技职责。

“汶川地震次生山地灾害形成机理与风险控制”（2008CB425800）项目研究得到了科学技术部 973 计划资源环境领域顾问组孙鸿烈院士、吴国雄院士、苏纪兰院士和陈毓川院士的悉心指教，得到了 973 计划项目咨询专家陈运泰院士、王铁冠院士、马福臣研究员、尚金城研究员、蔡运龙教授的热情指导，得到了项目专家组李焯芬院士、黄鼎成研究员、杨志法研究员、葛文彬研究员的大力支持，同时也是项目组全体成员的通力合作的成果。

本书是项目部分研究成果的汇集，凝聚了全体作者和指导专家的共同心血，在即将付梓之际，特向他们致以衷心的感谢。

崔 鹏

2010 年 12 月 21 日

目 录

前言

第一篇 “5·12”汶川地震山地灾害分布规律与活动特点

第 1 章 地震区山地灾害的类型与危害	3
1.1 汶川地震概况	3
1.2 地震区山地灾害的类型	5
1.3 地震区山地灾害的危害	17
1.4 总结	35
参考文献	35
第 2 章 地震区山地灾害分布规律	37
2.1 数据源与数据处理	37
2.2 崩塌滑坡分布规律	39
2.3 堰塞湖分布规律	48
2.4 泥石流分布规律	58
2.5 总结	61
参考文献	62
第 3 章 地震区山地灾害活动特征	63
3.1 震后滑坡活动特征	63
3.2 震后堰塞湖活动特征	69
3.3 震后泥石流活动特征	73
3.4 总结	84
参考文献	84
第 4 章 岩土体损伤效应及对震后山地灾害的影响	87
4.1 地震作用下边坡永久位移分析的能量方法	87
4.2 汶川地震坡体损伤位移计算模型的建立	96
4.3 汶川地震不同烈度区坡体损伤效应及对山地灾害的影响	104
4.4 总结	107
参考文献	108
第 5 章 震后山地灾害发展趋势	110
5.1 汶川地震松散固体物源量的估算	110
5.2 汶川地震重灾区山地灾害发展趋势	114

5.3	北川干溪沟山地灾害发展趋势	118
5.4	IX 度区斜坡系统自组织临界性研究	125
5.5	地震作用下土体变形破坏模式及机理研究	151
5.6	VIII 度区震后斜坡堆积体时效变形研究	158
5.7	总结	173
	参考文献	174

第二篇 震后泥石流形成机理与防治技术

第 6 章	水土耦合效应与泥石流形成机理	179
6.1	汶川地震极重灾区典型泥石流形成调查	179
6.2	震后泥石流形成机理模拟试验	182
6.3	泥石流形成机理分析与模拟	198
6.4	总结	228
	参考文献	228
第 7 章	地震区泥石流运动数值模拟与危险性分区方法	232
7.1	泥石流运动数值模拟概述	232
7.2	流团模型和 MAC 方法	234
7.3	危险区计算实例	238
7.4	危险性定量分区	241
7.5	总结	242
	参考文献	243
第 8 章	地震区山地灾害防治原则与技术体系	245
8.1	地震区泥石流灾害防治原则	245
8.2	汶川地震灾区泥石流防治时机	246
8.3	震区泥石流灾害工程防治标准初步分析	248
8.4	总结	252
	参考文献	252
第 9 章	震后潜在泥石流判识与监测预警技术	253
9.1	震后成灾环境变化条件下潜在泥石流判识	253
9.2	震后泥石流监测预警技术	278
9.3	震后泥石流临界警戒雨量	282
9.4	总结	288
	参考文献	288
第 10 章	震后活跃期泥石流治理新技术	290
10.1	交错齿槛型泥石流排导槽	290
10.2	软基消能型泥石流排导槽的肋槛基础埋深计算	294
10.3	泥石流排导槽最佳断面优化设计	300
10.4	泥石流直墙 V 形排导槽横断面优化设计	305

10.5	人工阶梯-深潭系统治理泥石流初探	308
10.6	震后泥石流防治案例——金川沙耳沟泥石流治理	317
10.7	总结	325
	参考文献	325

第三篇 斜坡变形破坏机理与动力过程

第 11 章	震后滑坡崩塌形成条件与机理	329
11.1	震后(浅层)降雨滑坡机理及临界雨量条件	329
11.2	震后暴雨型岩质滑坡起动机理	337
11.3	余震荷载下典型边坡的失稳滑移机理	340
11.4	震后裂缝危岩体的失稳机理与诊断方法	342
11.5	总结	348
	参考文献	348
第 12 章	滑坡崩塌运动模拟与潜在危险区确定	350
12.1	地震滑坡危害区域预测统计模型	350
12.2	典型地震滑坡危害区预测的数值分析	355
12.3	总结	359
	参考文献	360
第 13 章	滚石形成机理、运动模拟与潜在破坏能力评价	361
13.1	地震诱发岩体崩塌的力学机理	361
13.2	滚石冲击荷载作用下土体屈服特性	367
13.3	滚石冲击损伤特性	372
13.4	滚石坡面法向冲击动力响应特性	374
13.5	滚石冲击碰撞恢复系数	381
13.6	滚石坡面冲击回弹规律	385
13.7	滚石冲击荷载下垫层材料的动力响应	390
13.8	滚石对防护结构的冲击压力计算	395
13.9	总结	401
	参考文献	403
第 14 章	边(滑)坡加固工程抗震原理与强震带边坡支护结构设计	405
14.1	边(滑)坡加固工程抗震能力及震害模式分析	405
14.2	地震及余震荷载作用下抗滑桩加固边坡失稳机理	408
14.3	重力式挡墙加固边坡的动力稳定与永久位移预测	412
14.4	地震及余震荷载下预应力锚索加固边坡的动力响应	415
14.5	土钉加固边坡的动力稳定与永久位移预测	422
14.6	组合抗滑结构加固边坡的动力稳定与永久位移预测	432
14.7	边(滑)坡加固工程抗震优化设计初探	440
14.8	总结	451

参考文献	453
第 15 章 崩塌滚石灾害防治理论与关键技术	456
15.1 滚石冲击荷载下棚洞结构动力响应	456
15.2 混凝土路面在滚石冲击下的动力响应	463
15.3 新型耗能减震滚石棚洞作用机理	473
15.4 轻钢结构棚洞动力仿真及其优化设计	480
15.5 总结	493
参考文献	493
第 16 章 震后崩塌及边(滑)坡防治工程案例	495
16.1 彻底关大桥桥墩防滚石冲击工程	495
16.2 映秀、卧龙公路南华隧道入口段崩塌滚石灾害防治工程	500
16.3 国道 G318 线老虎嘴滑坡治理工程	502
16.4 都汶公路豆芽坪崩塌治理工程	509
16.5 总结	513
参考文献	513

第四篇 堰塞湖演化与应急处置技术

第 17 章 堰塞湖引发的地貌演变及环境效应	517
17.1 关于堰塞湖是保留(含自溃)还是拆除的讨论	517
17.2 堰塞湖的稳定性分析	518
17.3 稳定堰塞湖存留的环境效应	527
17.4 总结	538
参考文献	539
第 18 章 堰塞湖溃决洪水演进模拟与潜在危险区确定方法	542
18.1 溃决洪水分析的阶段性	542
18.2 溃决洪水模拟方法	543
18.3 溃决洪水实时预测方法	550
18.4 潜在危险区的确定	555
18.5 唐家山堰塞湖实例分析	556
18.6 总结	567
参考文献	567
第 19 章 堰塞湖人工可控排泄技术	571
19.1 唐家山堰塞湖应急处置措施的讨论	571
19.2 堰塞湖人工可控排泄方案设计	575
19.3 一种用于堰塞坝和泥石流防冲刷的人工结构体	579
19.4 堰塞湖人工排泄断面优化初探	583
19.5 不同横断面泄流槽的堰塞湖溃决试验	585
19.6 人工结构体调控堰塞湖溃决洪峰试验	593

19.7 唐家山堰塞湖应急排险工程案例	598
19.8 总结	604
参考文献	604
第五篇 汶川地震区山地灾害风险分析与制图	
第 20 章 地震区崩塌滑坡危险性区划与风险制图	609
20.1 地震区崩塌滑坡编录数据库建设	609
20.2 崩塌滑坡灾害易发性评估	612
20.3 区域崩塌滑坡综合危险性评估	618
20.4 绵远河流域崩塌滑坡综合危险性评估	631
20.5 地震山地灾害风险分析与风险制图	635
20.6 总结	639
参考文献	640
第 21 章 泥石流风险评价	642
21.1 “8·13” 泥石流	642
21.2 重灾区泥石流风险评价	646
21.3 道路泥石流风险评价	654
21.4 单沟泥石流风险评价	671
21.5 总结	679
参考文献	679

附图

第一篇 “5·12”汶川地震山地灾害 分布规律与活动特点

本篇在全面掌握汶川地震同震激发山地灾害和震后山地灾害信息的基础上,系统归纳了地震区山地灾害的类型;分析了地震区山地灾害对山区城镇、乡村、水电工程、道路、河流、土地资源和灾区生态环境的危害及成灾特点;进而探讨了地震区山地灾害的活动特征和形成过程,揭示了汶川地震区的崩塌、滑坡、堰塞湖和泥石流等山地灾害的分布规律。本篇基于汶川地震实测坡体位移,建立了强震区坡体损伤位移计算模型;根据不同烈度区坡体的平均永久位移将地震对山地灾害孕灾环境影响的严重程度划分为轻度损伤区、严重损伤区和极度损伤区三类。参考邻近区域震后山地灾害的活动记录进行类比分析,探讨了震后次生山地灾害发展趋势;同时发现在IX度及以下的地震烈度区,地震扰动下的山地系统仍呈现自组织临界性,为汶川地震95%以上面积的灾区(VII区及以下)提供地震对山地灾害孕灾环境影响的定性认识。本篇是关于震后山地灾害孕灾环境演变特征和山地灾害活动态势的总体认识,是以下各篇的基础。

第1章 地震区山地灾害的类型与危害

1.1 汶川地震概况

2008年5月12日14时28分,我国四川省汶川县映秀镇附近(103.4°E, 31.0°N)发生8.0级地震(简称“汶川大地震”),地震持续时间为80~120s,震源深度为14km。此次地震为典型的主震-余震型,余震活动频繁、强度大(图1.1)。据统计,截至2008年12月18日12时,共发生余震40170次。这些余震主要沿龙门山断裂带分布,其中4.0~4.9级243次,5.0~5.9级34次,6.0~6.9级8次,最大余震6.4级^①。

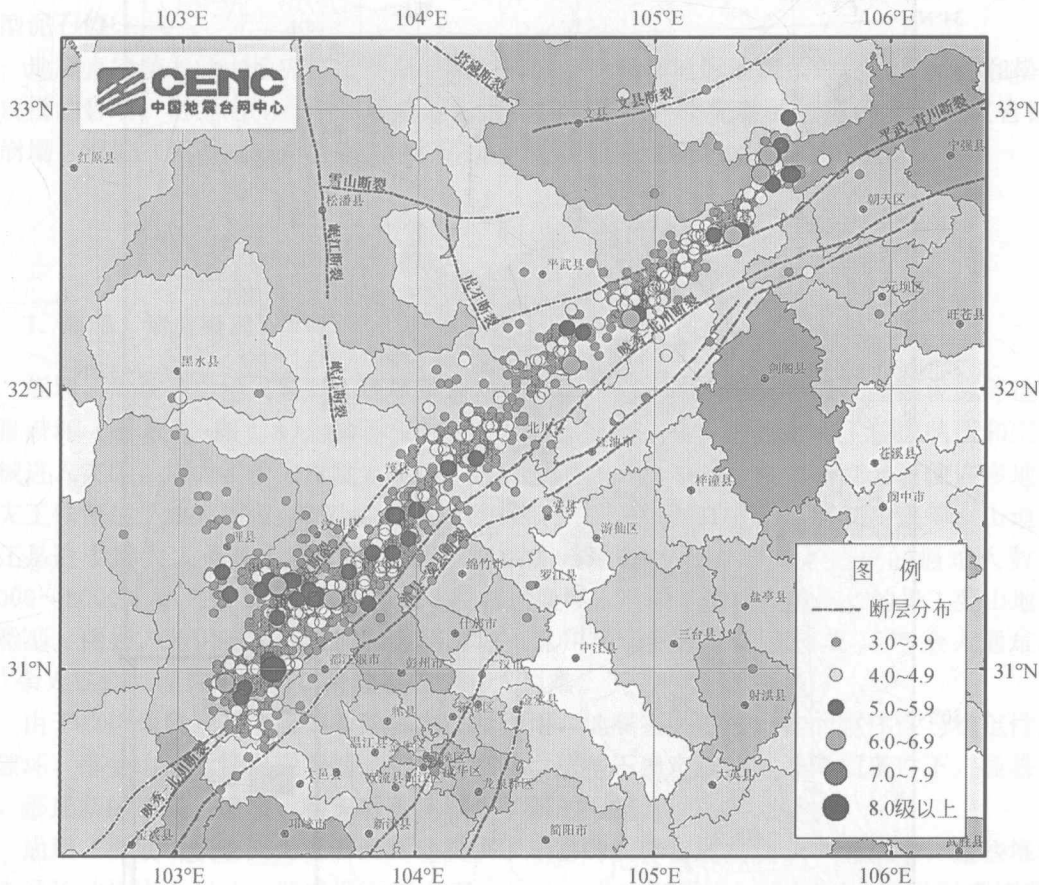


图 1.1 汶川地震余震分布图 (<http://ceic.ac.cn/contents/product/product16.jsp>)

① 据中国地震台网中心 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震 4 级以上余震目录。

汶川地震主要是沿映秀-北川逆冲断裂带发生的一次逆冲兼右旋走滑破裂事件（王卫民等，2008；徐锡伟等，2008；张培震等，2008），最大破裂长度达 240km（徐锡伟等，2008）。此次地震波及我国大部分地区，除黑龙江、新疆、吉林三省（区）外，其余省（区、市）都有震感报道。地震造成四川、甘肃和陕西部分地区受灾严重，受灾面积 44 万 km²，受灾人口达 4624 万人，其中需要重新安置 1511 万人（刘传正，2008）。国务院确定汶川县、北川县、绵竹市、什邡市、青川县、茂县、安县、都江堰市、平武县、彭州市 10 个县（市）为极重灾区，41 个县（区、市）为重灾区；186 个县（区、市）为一般受灾区；重灾区和极重灾区面积达 13.26 万 km²（国家汶川地震灾后重建规划组，2008）。汶川地震灾区的分布详见图 1.2。此次地震共造成 69227 人遇难，17923 人失踪，374643 人受伤，直接经济损失达 8451 亿元人民币（国务院新闻办公室，

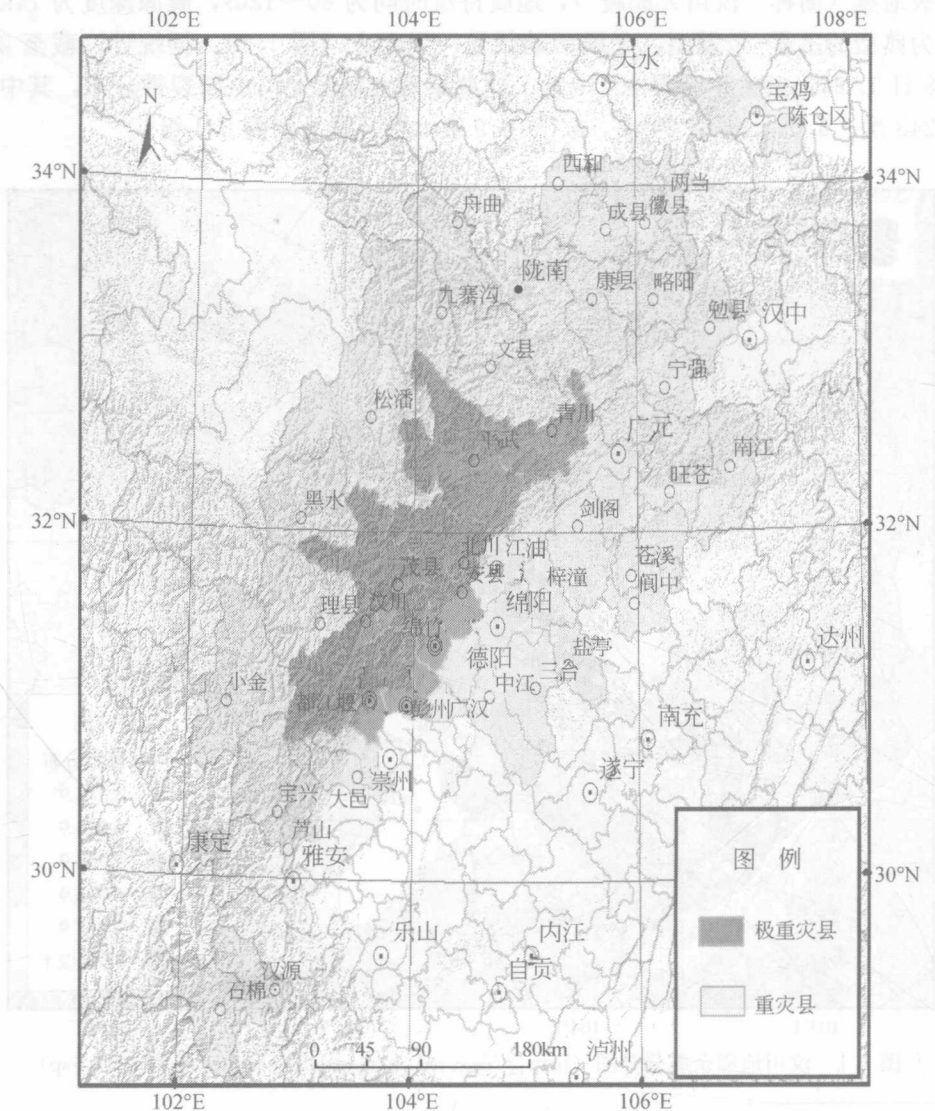


图 1.2 汶川地震灾区分布示意图

2008)。汶川地震震级之高、破裂带之长、危害与影响范围之广、山地灾害之严重，实属罕见。

1.2 地震区山地灾害的类型

汶川地震的高烈度区位于我国四川省西部青藏高原东缘与成都平原结合部，区内山高谷深坡陡，地质构造复杂、断裂发育，地质环境脆弱、斜坡岩土体破碎，为山地灾害的发育提供了有利条件。在地震往复荷载作用下，斜坡岩土体结构进一步遭到破坏，其抗剪强度明显降低，直接诱发大量崩塌（含滚石）和滑坡等山地灾害。

崩塌和滑坡形成的松散物质堆积在坡面和沟谷中，为震后泥石流的发育提供了充足的固体物源，加上区内地形陡峭、降雨集中，极易形成泥石流。

大中型崩塌、滑坡体如果堆积于狭窄的河谷中，极易形成堰塞坝，阻断河流，形成堰塞湖。汶川地震后，泥石流规模较震前显著增大，大规模泥石流进入并堵塞主河后，往往也会形成泥石流型堰塞坝和堰塞湖。这些堰塞湖发生溃决后，又会形成溃决洪水，甚至溃决型泥石流。

地震直接诱发的山地灾害主要是崩塌和滑坡，受局部地形地貌条件、水文条件和松散体规模的影响，衍生出泥石流和堰塞湖灾害，从而形成一个完整的地震诱发山地灾害链，即崩塌、滑坡（泥石流）→堰塞湖→溃决洪水或泥石流（Cui et al., 2010）。

1.2.1 崩塌、滑坡

1. 崩塌、滑坡概况

崩塌、滑坡等山地灾害对山区城镇、村庄、道路和水利水电工程以及通信设施等造成严重破坏（图 1.3、图 1.4）。这不仅进一步加重了灾害损失，而且阻碍了救援队伍和工程机械进入灾区，加大了救灾难度，延缓了救灾进度，因崩塌、滑坡中断交通而使许多地方救灾工作错过了救灾的黄金 72h，如震中映秀镇、都江堰虹口镇和什邡红白镇等。山地灾害还是造成重大人员伤亡的重要原因。据估算，地震诱发山地灾害造成的遇难人数为 25000~30000 人，占总遇难人数的 1/3 左右。崩塌、滑坡是造成人员伤亡的最主要山地灾害类型。例如，北川王家岩滑坡和毛坝滑坡（北川中学新区）分别造成 1600 余人遇难和 700 余人伤亡，而青川东河口滑坡造成 780 人遇难。

由于汶川地震及其余震荷载的多次往复作用，地震灾区许多山体的整体性与稳定性遭到破坏，部分山体后缘出现裂缝。雨季来临时，这些不稳定坡体在强降雨条件下，极易失稳，形成新的崩塌、滑坡，给灾后重建增添了新的困难。

崩塌、滑坡堆积物又为泥石流活动提供了丰富的固体松散物质，一到雨季，这些堆积物在径流的作用下起动，形成泥石流灾害。另外，大中型崩塌、滑坡还会造成河道堵塞，形成堰塞湖（Cui et al., 2010）。