

Theory and practice on prevention
of major landslide and debris flow hazards
in earthquake disturbed region

地震扰动区 重大滑坡泥石流灾害 防治理论与实践

张永双 姚 鑫
郭长宝 王 涛 等 著



科学出版社

“十二五”国家科技支撑计划课题（2011BAK12B09）资助

地震扰动区重大滑坡泥石流灾害 防治理论与实践

张永双 姚 鑫 郭长宝 王 涛 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是“十二五”国家科技支撑计划的课题研究成果。作者紧密围绕地震扰动区地质灾害防范关键科学问题和技术难点,以龙门山地区和白龙江流域为重点区,在遥感解译、地面调查、现场试验测试和综合研究的基础上,分析总结了地震扰动区地质灾害特征及演化规律,探索了重大滑坡泥石流灾害多尺度风险评估技术和监测预警技术,并探讨了传统地质灾害防治技术在地震扰动区重大滑坡泥石流灾害防治中的适用性,为地震扰动区滑坡泥石流防灾减灾和新城镇发展规划提供决策依据。

本书可供从事地震地质、工程地质、地质灾害防治、城镇规划等领域的科研人员和工程技术人员以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震扰动区重大滑坡泥石流灾害防治理论与实践 / 张永双等著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-050767-9

I. ①地… II. ①张… III. ①地震-扰动-滑坡地区-泥石流-灾害防治-研究 IV. ①P642.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 278646 号

责任编辑: 韦 沁 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 铭轩堂设计公司

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>

北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年11月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年11月第一次印刷 印张: 16 1/2

字数: 390 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

一、问题的提出

中国是世界上滑坡泥石流灾害最为严重的国家之一，每年都要发生数千起滑坡泥石流灾害，不仅给当地居民的生命财产造成极大损失，还严重影响铁路、公路、水运及水电站等基础设施的安全运营。2008 年 5 月 12 日汶川地震之后，人们已经意识到，山区地震引起的滑坡和泥石流灾害远远超过地震本身直接造成的危害。并且，灾区在相当长的时期内，降雨作用导致滑坡灾害连绵不断，泥石流活动转为旺盛。例如，1999 年台湾集集大地震后，2001 年的桃芝（Toraji）台风导致大范围强降雨过程，使脆弱的山地环境更加恶化，暴雨诱发的滑坡面积是 1996 年地震之前的贺伯（Herb）台风诱发滑坡面积的 5 倍，说明强震之后降雨将会诱发更大范围的滑坡灾害。在地震高烈度区，泥石流发生的降雨临界值仅为集集地震前的 1/3，使泥石流活动更加频繁。因此，地震扰动区的地质灾害防治成为社会各届关注的焦点。

关于地震扰动区的概念，目前尚无统一的认识。一般认为，广义的地震扰动区是指受到近场或远场强地震影响的地区，其中包括对特定地区有重大影响的历史地震或近期发生的地震。狭义的地震扰动区是指刚刚发生或在过去 50 年内，遭受强震（ $M_s \geq 6.0$ 级）作用，地震烈度大于 VII 度的地理区域（表 0.1）。为了体现研究的适用性以及便于相关问题的探索，我们倾向于广义的地震扰动区概念，但不作严格限定。

表 0.1 地震扰动区划分定义表

震级大小 (M_s)	地震扰动区的范围及时间			
	地震烈度 (SI)	震后时间/年	地震烈度 (SI)	震后时间/年
$6.0 \leq M_s < 7.0$	VII 度 $\leq SI <$ VIII 度	15	$SI \geq$ VIII 度	20
$7.0 \leq M_s < 8.0$	VII 度 $\leq SI <$ VIII 度	20	VIII 度 $\leq SI <$ X 度	25
	$SI \geq$ X 度	30		
$M_s \geq 8.0$	VII 度 $\leq SI <$ VIII 度	30	VIII 度 $\leq SI <$ X 度	40
	$SI \geq$ X 度	50		

2008 年 5 月 12 日汶川地震发生至今，震后的暴雨过程诱发了群发性滑坡、泥石流灾害发生，累计造成人员伤亡（含失踪）达 500 人之多，并给灾区的恢复重建带来了许多新的困难。2008 年 9 月 24 日北川县区域泥石流灾害事件，是震区暴雨引发的首场严重的滑坡、泥石流灾害，这场暴雨诱发了 72 条泥石流。地震后在映秀镇至汶川县城一带经历了 8

场大-暴雨过程,导致牛眠沟、麻柳湾沟、关山沟、磨子沟等 20 多条岷江支沟相继发生泥石流,并多次堵断岷江形成堰塞湖,仅牛眠沟发生的泥石流就阻断都汶路(国道 G213 线)10 次之多;岷江支流渔子溪映秀至卧龙段,已被降水诱发的泥石流堵断形成大小 10 多个堰塞湖。2010 年 8 月 13 日在绵竹市清平乡的文家沟暴发特大泥石流灾害,形成长达 3500m、宽 350~450m 的超大型泥石流堆积扇,其冲出泥砂石块达 $400 \times 10^4 \text{ m}^3$,这也是国内近 20 多年来有记录的规模最大的一次泥石流灾害。这场泥石流过程共造成 7 人死亡,7 人失踪,特别是冲下来的泥石流堆积体淤平了下游 3.5km 的绵远河河道,迫使主河道改道,由左岸向右岸推移 300m 左右,由此导致洪水大范围泛滥,淹没清平乡场镇,受灾人数 6000 多人。2010 年 8 月 13 日在汶川县映秀镇的红椿沟也暴发了特大规模的泥石流灾害,其冲出的堆积物堵断了岷江河道形成堰塞湖,由于泥石流堆积扇的强烈顶托,迫使岷江洪水冲向映秀镇,新建的映秀镇新区被淹,洪水泛滥造成 13 人死亡、59 人失踪,受灾群众 8000 余人被迫避险转移。2010 年 8 月 7 日,甘肃省舟曲县城后山三眼峪沟及罗家峪沟突发大规模泥石流,造成 1765 人死亡,约 20000 人无家可归。尽管舟曲县城处于汶川地震 VI 度烈度区,但是其地质环境遭受汶川地震的影响也非常明显,流域内产生了更多的固体物源,还形成了新的堆石坝,使泥石流流量和规模急剧增加。

汶川地震和舟曲特大山洪泥石流发生后,国家和当地政府对地震扰动区滑坡泥石流等地质灾害均给予了高度关注,并采取地质灾害评估、工程防治和监测预警等手段进行减灾防灾。然而,震后重大滑坡泥石流灾害频繁发生的关键原因是,强烈地震促使滑坡泥石流的孕灾环境和形成条件恶化,常规的减灾手段无法达到理想的效果,急需开展地震扰动区滑坡泥石流灾害防范相关技术攻关研究,研发和集成有效的减灾技术和方法。同时,随着我国经济社会发展和西部大开发战略的不断推进,国家重大工程规划和城镇化建设向地质条件复杂、构造活动强烈的西部山区推进。由于受空间限制,很多城镇规划和工程建设不得不在岩土体松散的高烈度区或历史地震地质灾害体附近选址。如果对地震扰动区地质灾害特征不明、对灾害风险认识不清、早期设防不当或不采取任何监测预警措施,往往会引起巨大的损失,给当地人民生命财产和生产建设带来巨大的危害和威胁。在“十二五”国家科技支撑计划的支持下,我们以龙门山地区和白龙江流域为重点区,在大量野外调查、试验测试和综合研究的基础上,开展了地震扰动区滑坡泥石流灾害风险评估技术、监测预警技术、防治技术的综合研究,探索地震扰动区滑坡泥石流灾害的防灾减灾途径,为恢复重建工程和新城镇发展规划提供决策依据,有力地支撑地质灾害防治“四大体系”。

二、主要研究内容

(1) 开展地震扰动区滑坡泥石流灾害的演变过程及成灾机理研究,结合现场地质灾害监测和试验,剖析地震扰动区岩土体变形破坏机理,为地质灾害监测预警、风险评估和防治技术研究提供相关理论支撑。

(2) 结合汶川地震灾区震后地质灾害特征,剖析代表性重大滑坡泥石流发育规律;结合重大工程规划,开展地震扰动区重大工程场地滑坡泥石流灾害风险控制技术研究;分析总结国内外地质灾害风险的社会化管理现状和主要进展,探索适合我国国情的地质灾害风

险社会化管理模式。

(3) 结合白龙江流域地质灾害发育特征,分析总结新构造活动与重大地质灾害之间的关系,深入剖析活动断裂的地质灾害效应;结合近年来白龙江流域重大地质灾害监测预警和工程防治技术实例,提出复杂地质背景下白龙江流域滑坡泥石流灾害防范对策。

(4) 通过西南山区地质灾害监测预警示范站运行效果调研,剖析相关监测预警方法在地震扰动区的适宜性。分析总结和集成国内外已有的监测预警技术,提出适合地震扰动区重大地质灾害监测预警的技术和方法。

(5) 根据地震扰动区重大滑坡泥石流灾害特点,通过西南山区重大地质灾害防治工程运行效果调查以及存在问题分析,剖析相关防治技术的适宜性;分析总结和集成适合地震扰动区的地质灾害防治技术。

三、取得的主要进展

通过大量野外地质灾害调查、试验测试和数值模拟计算等研究工作,分别在地震扰动区地质灾害特征及演化规律、地震地质灾害风险评估及风险控制技术、地质灾害监测预警技术、重大滑坡泥石流防治关键技术等方面取得了较重要的进展和成果。

(1) 通过野外地质调查和综合分析,进一步总结了地震扰动区地质灾害特点和演化规律,研究提出了地震扰动区致灾最严重的高位泥石流的判别指标、发育分布特点及其临界降雨量。结果表明,由于汶川地震造成大量的松散堆积物,震后泥石流的临界雨量比震前有明显的降低。

(2) 结合龙门山地区汶川地震、芦山地震地质灾害特点及白龙江流域活动断裂带滑坡发育特征,较系统地总结了活动断裂地质灾害效应的主要表现形式及成灾模式,为开展地震扰动区地质灾害监测预警、防治技术研究等提供了基础依据。

(3) 在分析国内外滑坡灾害风险评估与控制技术研究进展的基础上,总结探讨了地震扰动区地质灾害风险研究涉及的关键科技问题。分别以成都-兰州铁路龙门山段和甘肃舟曲“8·8”泥石流为例,开展了重大工程和重要城镇区滑坡泥石流灾害风险评估,为地震扰动区地质灾害风险评估研究和防灾减灾工作提供了科技支撑和决策依据。

(4) 基于汶川地震扰动区泥石流形成的地质背景、地形地貌、极端降雨量和居民密度的空间分析,初步提出了地震扰动区泥石流早期预警指标体系,并应用于汶川震后区域性泥石流灾害监测预警研究,为汶川地震扰动区泥石流灾害气象预警、防治工程部署等提供了技术支撑。

(5) 结合汶川地震灾区多个滑坡泥石流监测数据,对比分析了传统的地质灾害监测技术在地震扰动区的适用性。采用自动-半自动化监测、全自动化远程传输设备和技术,建设了汶川漩口滑坡监测示范站。

(6) 通过西南山区重大滑坡泥石流灾害防治工程运行状况调查和对比分析,初步建立了工程防治效果评价指标体系,并结合汶川地震扰动区典型滑坡泥石流实例进行了试评价,初步提出地震扰动区滑坡泥石流灾害防治技术要点。

四、参加人员及分工

本书是在“十二五”国家科技支撑计划课题研究报告的基础上编撰而成的,具体分工如下:

前言——张永双撰写。主要介绍研究意义、研究内容及取得的主要研究进展等。

第一章——张永双、姚鑫、杨志华、李凌婧撰写。主要阐述研究区的地震地质背景、汶川震区地质灾害特征及演化规律、白龙江流域地质灾害特征及其与活动断裂的关系,在此基础上对青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应的主要表现形式进行了总结。

第二章——王涛、田为厚、富元斋、杨为民撰写。在国内外滑坡灾害风险评估技术研究进展综述的基础上,探讨了地震扰动区地质灾害风险研究中涉及的关键科技问题;结合典型实例,分别开展了重大工程和重要城镇区滑坡泥石流风险评估与控制技术研究。

第三章——姚鑫、王立朝、张永双、陈宁生撰写。在总结地质灾害监测预警研究进展的基础上,结合汶川地震灾区震后地质灾害新特点及其监测难点,探讨了滑坡泥石流灾害区域预警、单体灾害监测预警、活动断裂带地质灾害早期识别的途径和主要技术手段。

第四章——郭长宝、张永双、杨为民、何思明撰写。在国内外地质灾害防治技术进展总结的基础上,开展了汶川地震灾区、白龙江流域地质灾害防治工程现状调查和分析,结合地质灾害防治效果,探讨了地震扰动区地质灾害防治关键技术的发展方向。

第五章——张永双撰写,对主要结论和存在问题进行总结,并简要分析了值得进一步研究的关键科学问题。

本书分章编写完成后,由张永双进行统稿。除了上述标注的撰写人员外,参加研究工作的人员还有:杨旭东、辛鹏、余凯、杜国梁、凌盛、王珂、黄晓、张瑞端等,他们不同程度地参与了野外调查、相关资料整理和分析研究工作。

致谢: 本项成果的顺利完成得到了科技部、国土资源部、中国 21 世纪议程管理中心、四川省科技厅、甘肃省科技厅以及项目牵头单位中国科学院成都山地灾害与环境研究所、兰州大学和中国地质科学院地质力学研究所领导的大力支持,综合研究和集成离不开科技支撑项目各课题负责人的大力配合及不同形式的帮助,一并深表谢意!在研究过程中,始终得到中国水利科学研究院陈祖煜院士、中国科学院地质与地球物理研究所王思敬院士、国土资源部地质灾害应急技术指导中心总工程师殷跃平研究员、中国地质调查局西安地质调查中心张茂省研究员、甘肃省地质环境监测院黎志恒教授级高工、成都理工大学黄润秋教授和许强教授、中国地质大学(武汉)项伟教授、西南交通大学姚令侃教授、中国科学院成都山地灾害与环境研究所韦方强研究员的指导,中国地质调查局成都地质调查中心郑万模教授级高工和倪化勇副研究员、四川省地质调查院成余粮教授级高工和王军教授级高工、四川省地质环境监测总站胥良教授级高工、中国地震局地质研究所许冲副研究员、中国地质科学院地质力学研究所吴树仁研究员和张春山研究员等给予了多方面的帮助,众多兄弟单位的领导和技术人员在野外调查和资料共享方面给予了大力支持。借此机会,特向对本项研究提供帮助、支持和指导的所有领导、专家和同行表示衷心的感谢!

目 录

第一章 地震扰动区滑坡泥石流灾害特征与演化规律	1
第一节 地震地质背景	1
一、自然地理	1
二、区域地质构造	4
三、地层岩性与工程地质岩组	5
四、历史强震斜坡地质灾害研究的简要回顾	6
第二节 汶川地震地质灾害及其震后演化特征	10
一、汶川地震地质灾害主要特征	11
二、汶川地震灾区震后地质灾害主要特征	15
三、汶川地震灾区高位泥石流特征及其分布规律	17
四、震后地质灾害效应持续时间的植被恢复响应	25
第三节 白龙江流域地质灾害特征及其演化规律	31
一、白龙江流域地质灾害总体特征	32
二、断裂带滑坡发育特征	35
三、断裂带滑坡变形破坏机制	37
第四节 活动断裂的地质灾害效应	41
一、活动断裂对地形地貌的控制作用	42
二、断裂剧烈活动诱发大型滑坡的主要特征	45
三、断裂蠕滑作用对斜坡稳定性的影响	51
四、活动断裂带为地质灾害提供丰富的物源	56
第五节 小结	58
第二章 地震扰动区滑坡泥石流风险控制技术研究	60
第一节 概述	60
一、国外研究进展	60
二、国内研究进展	66
三、存在问题与发展趋势	67
第二节 地震地质灾害风险管理技术流程与关键问题	68
一、地震地质灾害风险评估与管理技术流程	68
二、地震滑坡危险性基本概念辨析	75
三、基于力学模型的地震滑坡危险性评估方法	78
第三节 重大工程区多尺度滑坡风险评估研究——以成兰铁路龙门山段为例	82

一、工程地质概况	82
二、区域滑坡灾害风险评估	84
三、局地崩塌 Run-out 模拟和风险评估	92
第四节 重要城镇泥石流风险评估与控制研究——以舟曲“8·8”泥石流为例	96
一、舟曲泥石流发育特征	96
二、地貌演化特征分析	104
三、泥石流危险性评估	106
四、承灾体易损性分析	111
五、风险评估与控制措施	114
第五节 小结	120
第三章 地震扰动区滑坡泥石流监测预警关键技术研究	121
第一节 概述	121
一、地质灾害监测预警技术研究进展	121
二、地震扰动区滑坡泥石流监测预警工作现状	132
第二节 汶川地震灾区泥石流灾害区域预警研究	136
一、区域预警的关键问题	136
二、震后泥石流发育特征	137
三、激发泥石流的降雨阈值和预警指标体系	139
四、泥石流区域易发性分析	143
五、泥石流动态危险性预测评价及区域预警	146
第三节 地震扰动区典型滑坡监测研究	148
一、漩口滑坡监测	148
二、塔子坪滑坡监测	159
三、主要认识	163
第四节 地震扰动区典型泥石流监测研究	163
一、碱坪沟泥石流监测	163
二、红椿沟泥石流监测预警	167
第五节 地震扰动区斜坡地质灾害 InSAR 早期监测	171
一、鲜水河断裂的活动性及其对地质灾害的影响	171
二、InSAR 数据处理过程及结果	174
三、主要认识	181
第六节 小结	182
第四章 地震扰动区滑坡泥石流灾害工程治理技术	184
第一节 概述	184
一、滑坡工程防治技术研究进展	184
二、泥石流工程防治技术现状	187
三、汶川震区地质灾害防治情况	188
第二节 典型滑坡灾害防治案例分析	191

一、典型地震滑坡治理工程案例	191
二、典型崩塌滚石治理工程案例	194
三、白龙江流域断裂带滑坡防治技术	200
第三节 典型泥石流灾害防治案例分析	204
一、坡面泥石流防治	204
二、沟谷泥石流防治	206
第四节 汶川地震灾区滑坡泥石流灾害防治工程效果分析	217
一、地质灾害防治效果评价方法及指标体系	218
二、平武县魏坝滑坡防治工程防治效果评价	220
三、文家沟泥石流防治工程防治效果评价	230
四、主要认识	230
第五节 小结	232
第五章 结论与建议	234
一、主要结论	234
二、问题和建议	236
参考文献	238

第一章 地震扰动区滑坡泥石流灾害特征与演化规律

第一节 地震地质背景

研究区位于青藏高原东缘的龙门山地区和白龙江流域。众所周知,青藏高原东缘是中国东西部地质地貌过渡带,现今构造活动强烈,地震频发且强度大。该区历史上发生的强震数量约占我国大陆强震总数的三分之一,地质灾害的形成条件复杂,滑坡泥石流频发,防灾减灾形势严峻。

一、自然地理

1. 地形地貌

龙门山和白龙江流域分别位于四川省和甘肃省境内,是青藏高原东缘典型的高山峡谷地区,崇山峻岭、峡谷纵横,地形起伏度在 $1000\text{m}/\text{km}^2$ 以上,最大地形起伏度达 $1600\text{m}/\text{km}^2$ 。其中,龙门山是四川盆地西北边缘一条呈北东-南西走向的带状山脉,地处青藏高原和成都平原两大地理区域的交汇处(图 1.1),在地貌上从海拔不到 500m 的成都平原,向西北穿过龙门山在不到 100km 的距离内上升到海拔达到 4000m 以上的青藏高原东部边缘,形成一个巨大的地形陡变带。这些强烈起伏的地形表明青藏高原东缘遭受快速的隆升和强烈的河流深切,成为内外动力地质作用都非常强烈的地区,地质环境十分脆弱。

2. 气象与水文

1) 主要气象特征

研究区主要属湿润温暖的东南季风气候,冬暖、春早、夏热、秋凉,多云雾,年均气温在 $14\sim 19^\circ\text{C}$ 。受区域地形高差悬殊的影响,气候垂直分带较为完整,区域降雨量分布差异比较明显(图 1.2)。地形陡变带迎风坡降雨量相对充沛,绵竹、北川、安县及都江堰地区多年平均降水量可达 1400mm 以上,龙门山东部的四川盆地内降水量一般在 1000mm 以下,西部、北部区域多年平均降水量一般在 800mm 以下。

2) 主要水系

研究区主要属长江水系,自西向东依次包括岷江、沱江及嘉陵江流域。

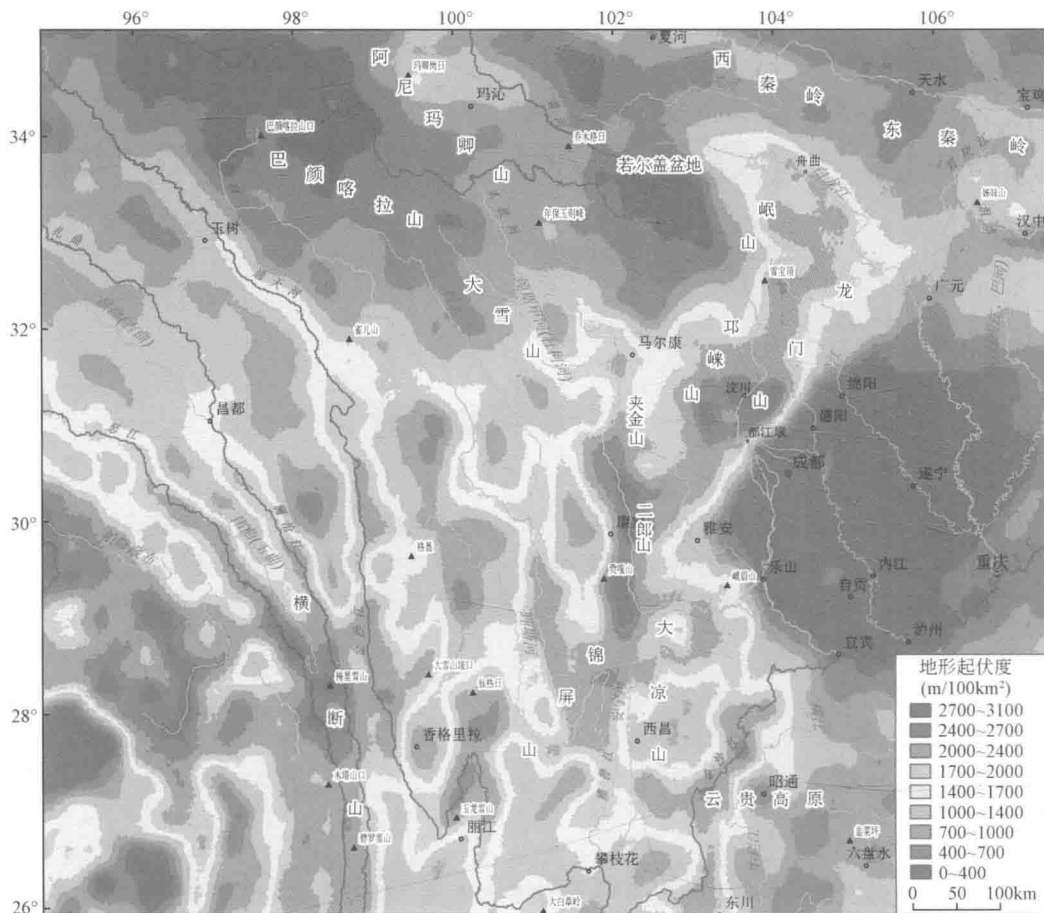


图 1.1 研究区及周边地形起伏度图

岷江又称都江,属长江的一级支流,发源于四川松潘岷山南麓,由北向南流经茂县、汶川、都江堰市等 12 个县(市、区),自都江堰市以上河段纵比降为 8.2‰,流速最大可达 6~7m/s,在宜宾汇入长江,干流全长约 700km。其中,流域面积 100km²以上的支流 320 条,总流域面积 5.9×10⁴km²。流域径流主要由降水形成,少部分来自高原融雪。径流年内分配极不均匀,降雨量集中在 5~10 月,占全年的 75%,干流高场站多年平均流量 2850m³/s,径流量 900×10⁸m³,多年平均输沙量 0.52×10⁸t。大渡河为岷江最大支流,位于岷江西侧,是长江的二级支流,多年平均径流总量 456×10⁸m³,河口处多年平均流量 1490m³/s。

沱江也称中江,属长江左岸一级支流,发源于海拔 4984m 的龙门山主峰九顶山,自北西向南东流经成都平原,流域面积 2.78×10⁴km²,其中,四川省境内 2.56×10⁴km²。沱江干流全长 629km,金堂县赵镇以上为上游,长约 127km,平均比降 19.1‰,主流为绵远河;赵镇至内江为中游,长 300km,平均比降 0.49‰;内江至河口为下游,长 202km,平均比降 0.33‰。沱江水势整体比较平稳。

嘉陵江发源于秦岭和岷山,属长江的一级支流。自昭化以上河段为上游,分为东西两条支流,其中西支称为白龙江,白龙江河道全长 576km,流域面积 3.18×10⁴km²。河道穿行于山区峡谷,平均比降 4.83‰,天然落差 2783m,年平均流量 389m³/s。

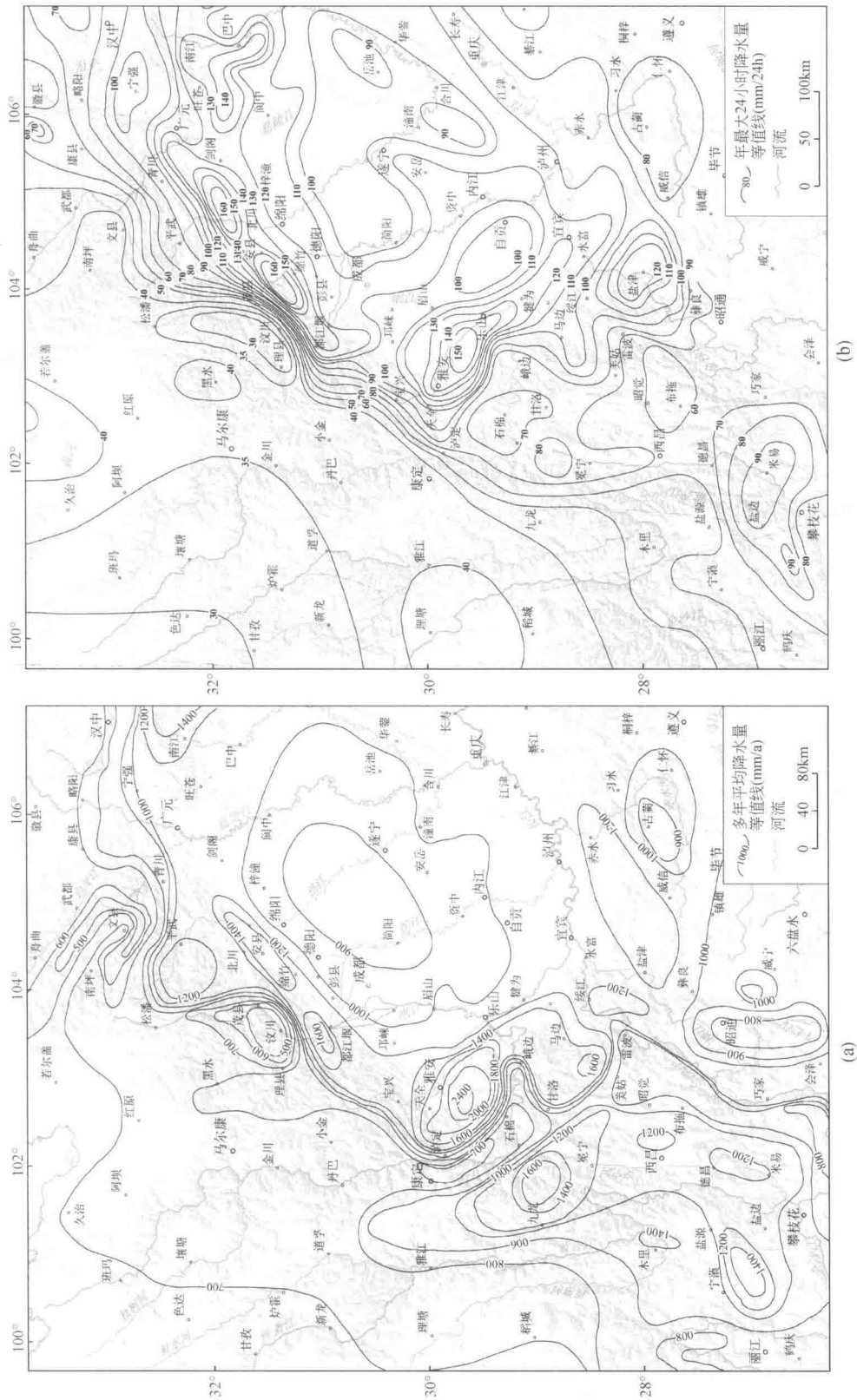


图1.2 研究区降水量分布图
(a)多年平均降水量等值线图；(b)多年24小时极端降水量等值线图

二、区域地质构造

大量地震地质资料表明, 青藏高原及其周边的地震分布与活动构造密切相关, 其大致可以划分为 4 种不同性质的地震构造带: 近东西向的缝合带、近南北向的断陷裂谷带、北西-南东向的走滑断裂带和高原东部逆冲-走滑构造带。它们互相交叉, 形成了错综复杂的构造格局, 控制着区域强震的分布, 如 1654 年天水南 $M_s 8.0$ 级地震、1786 年康定发生 $M_s 7.6$ 级地震、1920 年宁夏海原 $M_s 8.5$ 级地震、2001 年昆仑山口 $M_s 8.1$ 级地震、2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级地震、2010 年玉树 $M_s 7.1$ 级地震、2013 年芦山 $M_s 7.0$ 级地震和岷县-漳县 $M_s 6.6$ 级地震、2014 年鲁甸 $M_s 6.5$ 级地震等。上述地震造成了巨大人员伤亡与财产损失, 并同时诱发大量地震崩塌、滑坡等地质灾害。青藏高原东缘通常被称为“南北地震带”, 带内的条-块结构清楚, 南北分段性明显, 被大型的近东西向至北西向走滑断裂带分割为 5 个活动构造区, 由北至南分别为: 陕甘宁活动构造区、青藏高原东北隅活动构造区、川西活动构造区、川滇菱形块体活动构造区、滇西南活动构造区。本书相关研究主要涉及青藏高原东北隅活动构造区和川西活动构造区 (图 1.3)。

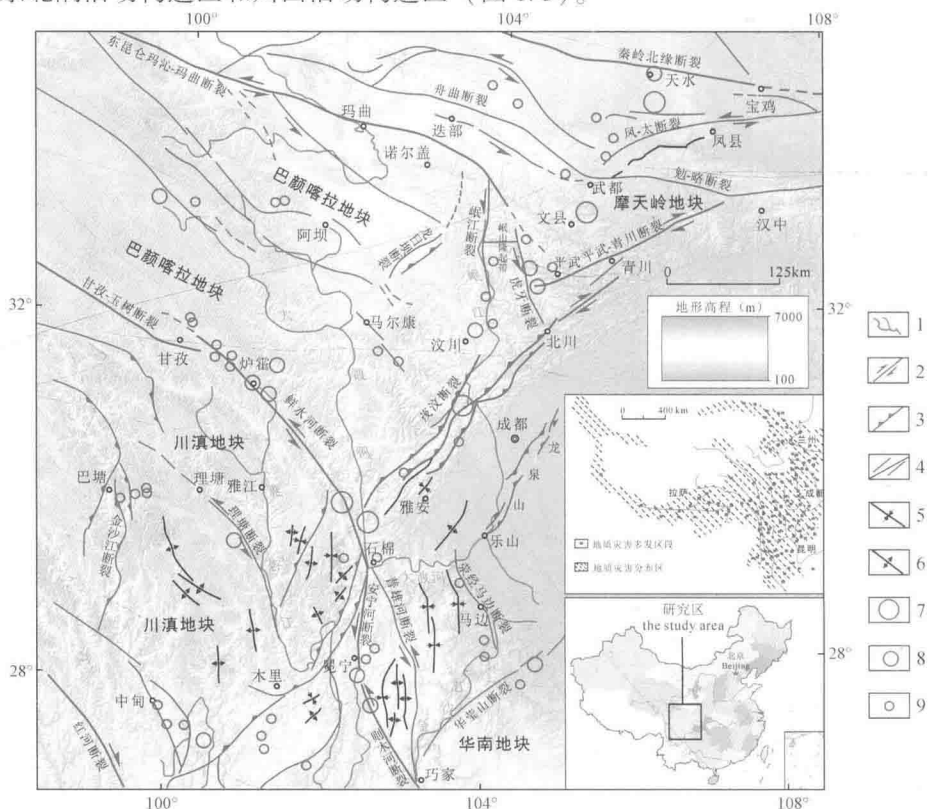


图 1.3 青藏高原东部活动构造特征图

(据徐锡伟等, 2005; 张岳桥等, 2008; 张培震, 2008; 张永双等, 2013)

1. 水系; 2. 走滑断裂; 3. 逆冲断裂; 4. 晚更新世以来活动断裂和早中更新世活动断裂; 5. 背斜; 6. 向斜;
7. $M_s \geq 8.0$ 级地震; 8. $8.0 \geq M_s > 7.0$ 级地震; 9. $7.0 \geq M_s > 6.0$ 级地震

1. 青藏高原东北隅活动构造区

该区主体由西秦岭构造带、陇西地块和海原-六盘山断裂带组成, 南侧以东昆仑断裂为界。区内发育多条大型活动断裂, 包括: 海原断裂、宁南弧形断裂束、六盘山断裂、马衔山断裂、西秦岭北缘断裂、临潭-宕昌断裂、白龙江断裂等。这些断裂活动性强, 历史上记录了3次 $M_s \geq 8.0$ 级强震(1654年天水南地震、1920年海原地震和1927年古浪地震), 多次 $M_s \geq 7.0$ 级强震。地形地貌上, 南部西秦岭以高山、峡谷地貌为特征, 北部则以黄土谷地和丘陵为特征。

2. 川西活动构造区

该区夹于北缘东昆仑断裂和南缘鲜水河断裂之间, 地形地貌上以高山、峡谷地貌为特征, 主体为巴颜喀拉块体东部(松潘-甘孜造山带的组成部分), 东缘为著名的龙门山-岷山断裂构造带, 构成了中国东西部地貌边界带。该活动区内主要活动断裂有: 北东向龙门山断裂带、南北向岷江断裂和虎牙断裂、北东东向青川断裂、北西向抚边河断裂、阿坝断裂等。该区历史上发生多次强震, 如: 1879年武都南 $M_s 8.0$ 级地震、1933年叠溪 $M_s 7.5$ 级地震、1976年平武 $M_s 7.2$ 级地震、2008年汶川 $M_s 8.0$ 级地震、2013年芦山 $M_s 7.0$ 级地震。

三、地层岩性与工程地质岩组

研究区地层复杂, 南北纵跨多个地层分区, 地层岩性的分布受地质构造控制作用比较明显。受区域构造的控制, 地层走向与区域控制性断裂走向基本一致。根据地层岩性及岩层组合的主要工程地质性质, 可划分出4类工程地质岩组: 坚硬岩组、较硬岩组、软弱岩组和松散岩组, 其主要特征见表1.1。

表 1.1 研究区岩石坚硬程度和工程地质岩组分类表

岩组	饱和单轴抗压 强度/MPa	典型岩石	研究区代表性地层岩性
坚硬岩组 I	$R_{sk} > 60$	花岗岩、正长岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩、片麻岩、石英片岩、硅质板岩、石英岩、硅质胶结的砾岩、石英砂岩、硅质石灰岩等	1. 晚太古界—早元古界: 斜长角闪岩混合片麻岩、变粒岩夹大理岩。 2. 早元古代石英闪长岩, 花岗闪长岩、英云闪长岩等。 3. 中元古代花岗岩。 4. 三叠纪似斑状二长花岗岩, 含少量黑云母花岗岩、钾长花岗岩、花岗闪长岩等。 5. 灰红色中细-中粗粒二长花岗岩及似斑状二长花岗岩

续表

岩组	饱和单轴抗压强度/MPa	典型岩石	研究区代表性地层岩性
较硬岩组 II	$60 \geq R_w > 30$	1. 弱风化的坚硬岩。 2. 未风化-微风化的熔结凝灰岩、大理岩、板岩、白云岩、石灰岩、钙质胶结的砂岩、碳酸盐岩等	1. 泥盆-石炭系：灰岩、页岩夹硅质岩、角砾状灰岩、鲕状灰岩。 2. 中三叠统：嘉陵江组顶部及关岭组白云岩、灰岩，底部夹盐溶角砾岩，下部夹杂色泥岩，上三叠统：变砂岩板岩厚度巨大，变砂岩板岩夹灰岩。 3. 中上二叠统：砂岩夹泥岩、煤层，灰岩及玄武岩。 4. 中上寒武统：白云岩，中部夹泥质白云岩，上部含燧石团块。 5. 由灰色变砂岩、变砾岩、千枚岩、变粉砂岩组成的深海-次深海相浊积岩，偏下部偶夹基性火山岩透镜体；灰色、灰黑色变砂岩、变长石石英砂岩，分布于巴颜喀拉区
软弱岩组 III	$30 \geq R_w > 5$	1. 中风化-强风化的坚硬岩或较硬岩。 2. 凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩、泥质砂岩、粉砂岩、页岩等。 3. 未风化-微风化的泥岩、页岩、泥质砂岩等	1. 奥陶-志留系：砂岩、页岩、泥质条带灰岩、白云岩，九顶山小区，千枚岩板岩夹变砂岩泥灰岩大理岩。 2. 上侏罗统：紫红色砾岩砂岩粉砂岩泥岩；上三叠统一下侏罗统：长石砂岩粉砂岩泥岩夹煤，紫色、黄绿色砂砾岩粉砂岩及泥岩；舍资组-张河组并层：下部灰色砂岩、泥岩夹碳质页岩；上部紫红色泥岩、砂岩夹泥灰岩。 3. 白垩系-古近系：紫红色砂岩粉砂岩夹泥岩泥灰岩。 4. 下白垩统：灰黄色砂岩、紫红色夹灰绿色泥岩、砂质泥岩，夹钙质泥岩及紫红色砂岩。 5. 上三叠统：砂岩、粉砂岩、泥岩夹碳质页岩
松散岩组 IV	$R_w < 5$	1. 全风化的岩石。 2. 各种半成岩。 3. 第四系冲洪积物	1. 全新统：主要为冲洪积砾、砂砾、砂质黏土。 2. 更新统：主要为冰水堆积砂、砾、砂砾质黏土、黏土。 3. 第四系：主要为冲洪积冰水复合堆积砂、砾、黏土等

四、历史强震斜坡地质灾害研究的简要回顾

2008 年“5·12”汶川地震是中国地震地质灾害研究的一个标志性事件与分水岭（许冲，2014）。在汶川地震之前，受到认识水平和技术条件的限制，地震地质灾害的研究成果比较分散（段光贤等，1988；冯学才等，1989；徐金明、段光贤，1990；谭儒蛟等，2006）。汶川地震之后，地震地质灾害受到广泛关注，研究技术手段也逐渐成熟。为了便于全面理解地震诱发斜坡地质灾害的特点，许冲（2014）对汶川地震之前的历史地震地质灾害研究成果进行了系统总结。

1. 地震地质灾害总体特征

地震地质灾害与构造活动关系密切。孙崇绍和蔡红卫（1997）分析了我国从公元 1500 年到 1949 年 9 月 30 日约 450 年间的 134 次具有地震滑坡记载的事件，发现在我国历史上地震引起的崩塌滑坡等地质灾害主要集中分布在强震多发、地形复杂的地带，其中青

藏高原东缘最为集中。柴贺军等(1995, 2000)对我国地震或降雨等因素导致的160多处滑坡堵江事件进行了分析,表明这些堵江事件具有区域不平衡、流域集中分布性与局部多发性的特点。严容(2006)将堵江滑坡样本补充为388处,并进行了堵江滑坡环境效应研究。聂高众等(2004)对我国自1856年以来的141个地震堰塞湖进行了总结归类,将其分为高危型堰塞湖、稳态型堰塞湖和即生即消型堰塞湖三类。这些堵江事件的分析与总结为更详细地研究历史地震滑坡奠定了基础。

众所周知,单次地震事件对应的地震滑坡的发育程度不仅受地震震级的影响,而且受震源深度、发震构造性质、地震区地质地貌和地形条件等因素的影响。一般来说,地震震级越大,释放的能量越大,在其他条件一致的情况下,震级越高,地震触发滑坡的数量、规模、分布面积、密度等越大。基于这些认识,一些研究者建立了简单的地震震级与滑坡分布面积或者滑坡的最大震中距的对应关系,或者建立了地震参数与地震滑坡的简单二元对应关系。如辛鸿博和王余庆(1999)对我国过去近800年间125次历史地震造成的285例典型滑坡进行分析,提出了预测天然岩土边坡地震崩滑的初判标准和以场地烈度、震级、震中距为指标的三种参数边坡地震崩滑初判准则。李忠生(2003)论述了地震滑坡的面积范围、密度、滑坡体积等与地震震级、地震烈度、震中距等参数之间的关系。王克鲁等(1983)对公元前1177年到公元1969年之间的2000多次 $M_s 5.0$ 级以上地震诱发的滑坡灾害进行了总结,研究了最大灾害距离与震级的关系。杨涛等(2002)通过四川地区地震崩塌滑坡的基本特征及危险性分区研究,建立了地震崩滑分布面积、震中距与地震震级的关系。才树华等(1998)根据陕甘宁晋地区80个黄土地震滑坡资料,建立了地震震级与地震滑坡最大致灾距的定量关系。姚清林(2007)将中国西北黄土地区按照震害进行了分区,其中六盘山西侧、会宁以东的一个分区的地震滑坡最为发育,并给出了最大震中距、滑坡分布最大面积与震级的对应关系。丁彦慧等(1999)以西部地区71例地震引发的194例崩塌滑坡为基础,建立了地震崩塌滑坡与地震参数间的关系,提出了触发地震崩滑的最小震级、最小烈度和最大震中距,以及预测地震崩滑的3个初判准则。

2. 西南地区的历史地震滑坡

中国西南地区地形陡峻、地震多发,地震常诱发滑坡等地质灾害,尤其是大地震往往造成分布面积广、密度大、规模大的地震滑坡。周本刚和张裕明(1994)总结了云南、川西地区1970年以来的11次 $M_s \geq 6.7$ 级强震触发滑坡的特征,按照运动方式将这些地震滑坡分为推移式、牵引式、溜滑式、崩塌式4种类型。这些地震滑坡以小型浅层滑坡为主,多发生于第四系堆积层中,滑坡发育的主要坡度为 $30^\circ \sim 50^\circ$ 。地震滑坡的空间分布受地震断裂的控制,空间分布主要方向与地震断裂方向大体一致。Chen等(2012)总结了我国西南地区震级 $M_s \geq 7.0$ 级的38次地震事件,这些地震事件最早为公元814年4月6日的四川西昌 $M_s 7.0$ 级地震,最近为2008年汶川地震,对这些地震事件对应的滑坡信息进行了搜集与整理,重点介绍了1973年炉霍地震、1974年昭通地震、1976年龙陵地震触发滑坡的情况,分析了滑坡影响区面积与震级的关系。乔建平和蒲晓虹(1987, 1992)搜集分析了川滇地区公元前26年至1989年 $M_s \geq 6.0$ 级的147次地震资料,其中至少114次