

EARTHQUAKE-INDUCED LANDSLIDE
DISTRIBUTION REGULARITY AND HAZARD
ASSESSMENT METHOD

大地震诱发滑坡分布规律 及危险性评价方法研究

乔建平 主编



科学出版社

大地震诱发滑坡分布规律 及危险性评价方法研究

乔建平 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书选择汶川大地震的10个极震区县(市)26 000km²面积为研究区域,通过统计分析和模拟实验方法,对大地震诱发滑坡的区域规律及破坏机理进行系统研究,形成大地震滑坡研究的基本理论体系和技术方法。应用这些理论和方法,完成汶川地震的10个极震区县(市)区域内滑坡分布规律、滑坡致灾因子、滑坡震动破坏机理、滑坡转化碎屑流、地震滑坡震中距、滑坡危险度区划、滑坡易损度区划、滑坡风险区划、滑坡风险综合评估、滑坡预警监测等内容分析研究。

本书研究内容广泛,涉及范围大,图文并茂,基础数据翔实,研究成果可供高校、科研院所相关专业人员和相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大地震诱发滑坡分布规律及危险性评价方法研究 / 乔建平主编. —北京: 科学出版社, 2014. 3

ISBN 978-7-03-040098-7

I. ①大… II. ①乔… III. ①地震危险区-滑坡-分布规律-研究-汶川县
②地震危险区-滑坡-危险性-评价法-研究-汶川县 IV. ①P642.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第043111号

责任编辑: 张井飞 韩 鹏 / 责任校对: 郭瑞芝

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>

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

*

2014年3月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014年3月第一次印刷 印张: 26 3/4

字数: 620 000

定价: 198.00 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,四川省汶川发生里氏8.0级特大地震灾害,此次地震诱发的崩塌滑坡是新中国成立以来数量最多、规模最大、范围最广、灾害损失最严重的一次。因此,开展大地震区崩塌滑坡灾害的分布规律和危险性评价方法研究,为汶川地震灾区,以及我国其他主要大地震灾区的潜在地震崩塌滑坡预测提出参考依据。

本书选择汶川地震极震区10个县(市)(汶川县、都江堰市、彭州市、茂县、什邡市、绵竹市、安县、北川县、平武县、青川县,总面积26 000km²)为研究区域,通过对大地震诱发滑坡的分布规律(空间范围、发震构造、地形地貌、地层岩性、震源距等的分布相关性)和破坏机理(地震动参数与斜坡破坏的结构模型相关性、滑坡转化的碎屑流)研究,分析了大地震诱发滑坡的致灾因子和危险性特点。在此基础上,对10个极震区县(市)进行了地震滑坡的危险性、易损性、风险性区划评价,获得了汶川大地震极震区滑坡风险综合性评估结果。为了对研究结论作出进一步验证,选择了极震区对人民生命财产有直接危害的典型滑坡建立了危险性监测预警系统,从而基本形成了地震滑坡分布规律、形成机理、危险性、风险评估研究的系统结构。本书研究由国家科学技术部(后简称科技部)国际合作项目资助完成,其中部分研究内容是与日本东京大学和中央开发株式会社合作的成果。

全书共80余万字,由中外合作的滑坡专家共同编写完成。全书由乔建平主编,共分为11章;第1章由杨宗佶编写,系统介绍汶川地震重灾区地质环境,以及开展研究工作的背景及地质灾害成灾概况;第2章由杨宗佶编写,从地震滑坡规模、破坏模式、物质结构入手,对滑坡进行分类研究,并在此基础上系统阐述了地震滑坡分布规律;第3章由田宏岭编写,主要介绍地震滑坡数据统计的特点,建立地震滑坡数据库;第4章由樊晓一编写,主要论述地貌因子和地震因素作用下滑坡的形成机制、分布规律、运动特征及其致灾规律;第5章由黄栋、东佃郁生(日本)、三城徹也(日本)编写,主要介绍采用振动台实验的方法,对概化后5种滑坡模型的变形破坏过程及动力响应机制进行研究;第6章由姜元俊、东佃郁生(日本)编写,主要介绍地震、余震等因素激发下,崩塌后的滑坡碎屑物对山区公路沿线阻挡结构的冲击作用;第7章由乔建平、黄栋编写,主要介绍地震滑坡以震中为 midpoint,沿断层走向分布的距离关系,确定相关性统计模型,得出最危险的分布距离范围;第8章由王萌编写,主要介绍在地震作用条件下,极震灾区产生滑坡灾害的区域危险性 & 空间分布状况;第9章由吴彩燕编写,主要介绍地震重灾区滑坡灾害承灾体的易损性,并进行分区;第10章由乔建平编写,主要介绍在区域滑坡危险性、易损性区划的基础上,对全区地震滑坡潜在风险区划,并进行滑坡风险综合评估;第11章由田宏岭、杨宗佶、内村太郎(日本)、王林编写,主要介绍通

过重点滑坡（塔子坪滑坡）监测，建立滑坡变形监测及预警成套系统，并开展现场大型实验，提出结合物理力学参数、地形地貌条件和降雨条件相耦合的临界条件。本书介绍的研究方法和取得的研究成果可供专业技术人员、高校师生参考。

本书的研究成果是受科技部国际合作项目（2009DFB20190）、科技部“十二五”科技支撑计划项目（2011BAK12B00）、科技部“973”计划项目（2010CB731504）共同资助，经历了三年的努力完成。在项目研究过程中，曾得到四川省地质环境监测总站、四川省地震局、中国科学院对地观测与数字地球科学中心、成都市国土局等部门的大力帮助和支持，并提供了丰富的相关资料，在此表示衷心的感谢！

编 者

2012 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 汶川大地震极震区地质环境背景	1
1.1 研究区自然地理环境概况	2
1.2 研究区的大地构造环境	5
1.3 地质灾害成灾概况	13
参考文献	15
第 2 章 汶川地震滑坡数据库	16
2.1 建库意义与目标	16
2.2 相关研究现状	17
2.3 相关概念	19
2.4 滑坡数据信息分级与分类	20
2.5 地震滑坡数据类型分析	20
2.6 数据库资料要求	22
2.7 数据库设计	23
2.8 数据准备	26
2.9 数据库应用系统	26
2.10 不足与建议	37
参考文献	38
第 3 章 汶川大地震滑坡分布规律	40
3.1 地震滑坡主要类型及特征	40
3.2 地震滑坡分布的区域空间环境	65
3.3 地震滑坡分布的局地环境	74
参考文献	98
第 4 章 汶川大地震滑坡致灾因子	99
4.1 地震滑坡与地貌因子	99
4.2 地震滑坡与地震因子	107
4.3 滑坡致灾的运动性指标因子	110
4.4 滑坡运动性指标的影响因子	117
4.5 灾难性地震滑坡的运动距离与堵江	125

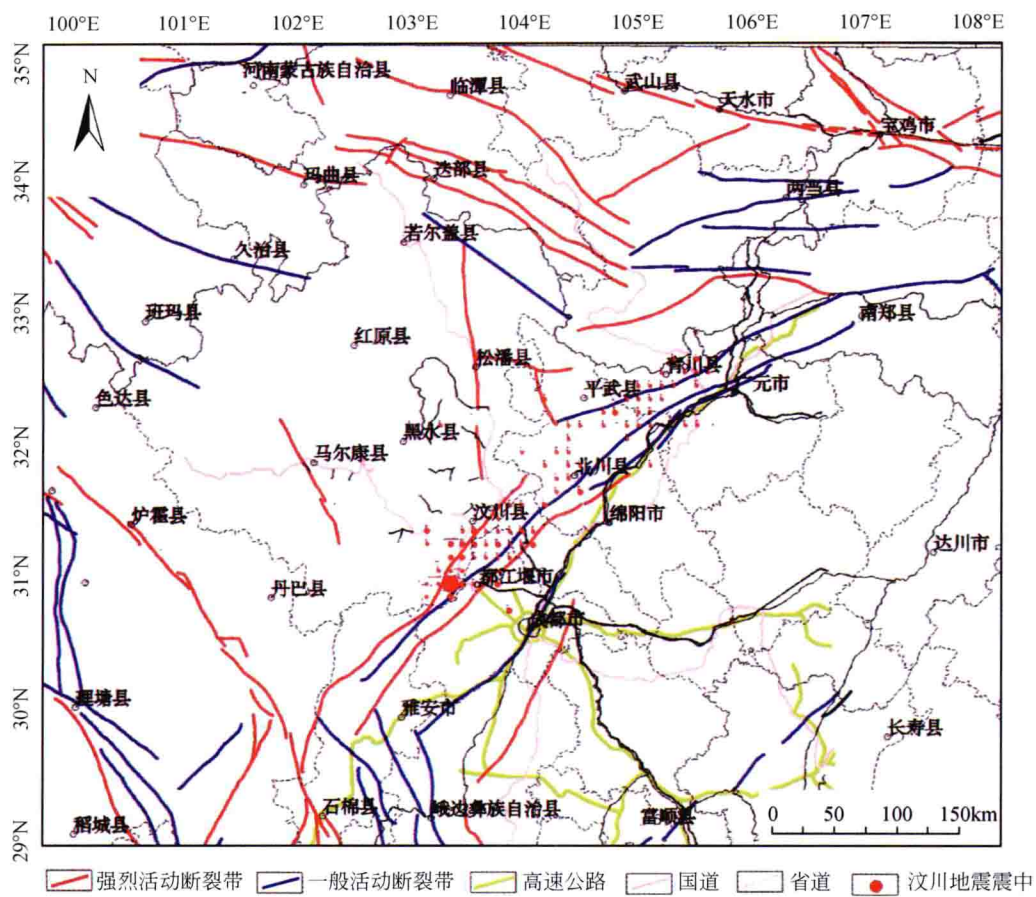
参考文献	130
第 5 章 地震滑坡破坏模型	132
5.1 滑坡振动台模型	132
5.2 模型的设计与试验的方法	134
5.3 模型试验及成果分析	139
5.4 典型滑坡振动台试验	156
参考文献	173
第 6 章 汶川大地震崩塌滑坡碎屑流对结构物的冲击	174
6.1 实验材料与实验设备	176
6.2 实验方法	179
6.3 实验结果	179
6.4 结论	197
参考文献	198
第 7 章 汶川大地震滑坡分布震中距	200
7.1 研究意义及国内外动态	200
7.2 微观震中与宏观震中	209
7.3 区域滑坡分布与宏观震中距	223
7.4 单体滑坡分布与宏观震中距	231
7.5 结论	252
参考文献	252
第 8 章 汶川大地震滑坡危险度区划研究	255
8.1 地震滑坡危险度区划理论和方法研究	255
8.2 地震滑坡危险度基础数据	260
8.3 地震滑坡危险度评价指标体系建立	260
8.4 地震滑坡危险度评价模型建立	261
8.5 地震滑坡危险度因子评价	263
8.6 地震滑坡危险度区划结果检验及结论	276
8.7 基于遥感解译数据的地震滑坡危险度分区及评价	279
参考文献	288
第 9 章 汶川大地震滑坡易损性区划	290
9.1 滑坡易损性区划的基本理论	290
9.2 滑坡易损性区划的研究方法	292
9.3 地震滑坡易损性评价指标体系的建立	297
9.4 地震滑坡易损性评价模型选取	309
9.5 地震重灾区滑坡易损性评价结果	320
9.6 易损性评价结果的分析	321

参考文献	323
第 10 章 汶川大地震滑坡风险评估	324
10.1 地震滑坡风险分类	324
10.2 地震滑坡风险区划结构	328
10.3 地震滑坡风险区划方法	334
10.4 汶川地震灾区滑坡风险评估	342
10.5 结论	372
参考文献	374
第 11 章 汶川大地震滑坡变形监测	375
11.1 监测地点选择	375
11.2 监测示范点滑坡概况	377
11.3 监测方案设计	379
11.4 方案实施	387
11.5 数据处理	393
11.6 降雨滑坡变形监测现场试验	396
11.7 塔子坪滑坡趋势分析及建议	416
参考文献	418

第 1 章 汶川大地震极震区地质环境背景

研究区包括汶川大地震地震烈度Ⅸ度及其以上极震区域，即安县、北川县、汶川县、绵竹市、什邡市、平武县、彭州市、茂县、都江堰市、青川县 10 个县（市）区，面积共 26 000km²。区内主要地质环境为龙门山地区。

龙门山地区（或龙门山构造带）位于中国大陆青藏高原东部边缘与四川盆地的交接地带，是巴颜喀拉活动地块向东部扬子稳定地块的过渡地区。该区处在南北地震带中段，是现今全球构造活动最为复杂、地形切割最为剧烈的地区之一，也是地震活动密集、崩塌、滑坡、泥石流地质灾害频发的地区之一。2008 年 5 月 12 日发生的汶川 8 级特大地震的发震断裂为龙门山主中央断裂带内的映秀-北川断裂（图 1-1）。



1.1 研究区自然地理环境概况

龙门山属青藏高原东缘边界山脉，位于川西高原和四川盆地之间，北起广元，南至天全，长约 500km，宽约 30km，呈 NE—SW 向展布，北东与米仓山、大巴山相交，南西被鲜水河断裂所截。龙门山山脉位于中国大地构造单元的重要部位，处于我国西部（青藏）幔拗区和中部深层构造过渡带。贺兰山—龙门山陡变带斜贯本带，西北为青藏高原厚壳厚幔区，东南部为四川盆地薄壳薄幔区。在区域地质构造上，研究区自 NW 向 SE 由川藏块体、龙门山断裂带和四川盆地构成。

龙门山地区位于中国大陆地形第一级阶梯向第二级阶梯的过渡地带（图 1-1，图 1-2），是成都平原与川西高原的天然界线，以典型的高山峡谷地貌为主。区域 SE—NW 向宽约 180km 的范围内，地表高程由成都平原海拔 450 ~ 600m 陡升至西侧龙门山山系平均海拔 2500 ~ 3000m，最高处可达 5300m 左右（图 1-2）。由区域地形的剖面可知，自 SW—NE 龙门山山系向成都平原地形高差的骤降渐趋缓和，具体表现为剖面处高山峡谷与山前冲洪积平原并存，而地貌类型已演变为高山峡谷为主。

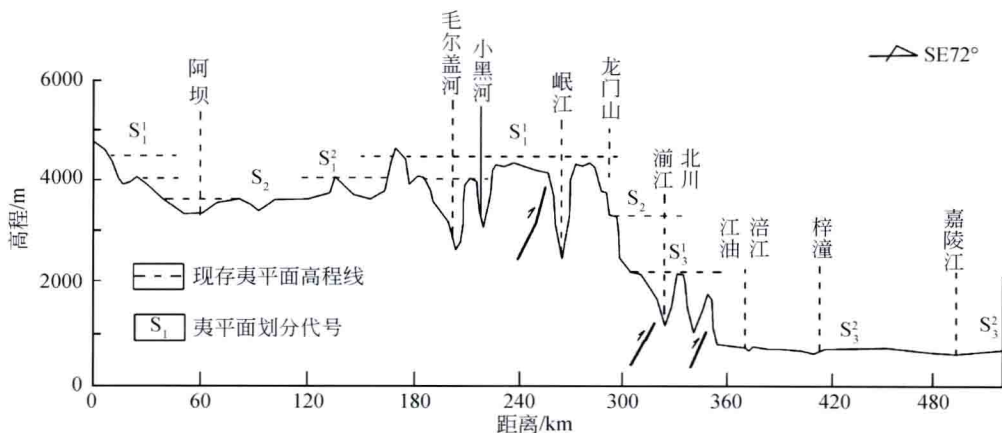


图 1-2 区域地貌剖面图（四川省地质矿产局，1991）

汶川地震触发的崩塌、滑坡、泥石流等次生地质灾害，绝大部分分布于地形切割强烈、高差悬殊的龙门山山脉地区，该山脉为岷山山系的东南延伸部分，由龙门山、九顶山及茶坪山等山脉组成，整体走向约沿 NE40° 延伸，山系主体北起广元市，南抵泸定县，全长约 500km。从基础背景条件观之，龙门山地区的西部的高山峡谷地貌为崩滑流的形成提供了有利的势能条件。相对而言，东部边缘的山前冲洪积平原，则以地震砂土液化和地表塌陷等灾害为主。

1.1.1 地貌环境

研究区处于中国西部地貌的陡变带，分布有青藏高原地貌、龙门山高山地貌和山前冲积平原三个一级地貌单元，龙门山与山前地区的高差大于 5000m，其地形陡度比青藏高原南缘的喜马拉雅山脉的地形陡度变化还要大，显示了龙门山是青藏高原边缘山脉中陡度变化最大的山脉，目前仍以 0.3 ~ 0.4mm/a 的速率持续隆升。

研究区大地貌单元处于我国地貌第一阶梯和第二阶梯的过渡地带，根据研究区地貌类型特征，可将研究区划分为四个类型区：西部高原区、龙门山区、龙门山山前平原区和盆地低山丘陵区，各类型区涉及的县见表 1-1。

表 1-1 汶川地震灾区带主要地貌类型分区

分区	涉及县（市）	基本特征
西部高原边缘区	理县、松潘、黑水及汶川、茂县西部	东部山高沟深，海拔 3000 ~ 5500m，高差 1500 ~ 3000m。西部呈现高原景观，高差减少，500 ~ 1000m
龙门山区	北川、平武、青川、汶川、茂县以及都江堰、彭州、崇州、什邡、绵竹、安县、江油西部山地	盆地与西部高原的过渡带，海拔 1000 ~ 5000m，高差 500 ~ 1500m
龙门山山前平原区	都江堰、彭州、崇州、什邡、绵竹、安县等东部平原区	海拔 500 ~ 800m，相对高差小于 50m
盆地低山丘陵区	江油	海拔多在 2000m 以下，高差 50 ~ 800m

1.1.2 气候环境

研究区东部山地基带气候为亚热带湿润季风气候，西部山地为干旱河谷气候。整个区域由于地势梯度变化显著，立体气候显著。各地气候差别特别大，气温、降水、光照分布极不均衡。

研究区年降水量最多的区域是北川，达 1280mm，都江堰年降水量为 1178mm，年最多暴雨日数可达 10 天；而茂县和汶川的年降水量仅为 484mm 和 524mm。降水季节分布不均，干旱和洪涝并存，常对灾区水土流失、生态环境保护和农业生产造成严重影响。

研究区主要的气象灾害有暴雨、洪涝、干旱、大风、冰雹、雷电、低温、连阴雨、寒潮、霜冻、雪灾、大雾和高温等。这些气象灾害将会进一步加剧研究区的次生灾害，并严重影响灾区的恢复重建工作。其中暴雨天气及其灾害对灾区灾后危害最大。湿润、半湿润的森林区的暴雨洪涝灾害较多，北川、绵竹是该区暴雨、大暴雨较易发生的区域（表 1-2）；干旱、半干旱森林/草原区的暴雨山洪型洪灾发生较多，常诱发滑坡、泥石流等地质灾害。

表 1-2 汶川地震灾区部分县暴雨频率

(单位:%)

暴雨等级	汶川	茂县	绵竹	北川	青川	都江堰	什邡	平武
≥50.0mm	15.8	16.7	100	100	94.7	96.7	100	80
50~100mm	15.8	13.3	100	96.7	94.7	83.3	100	76.7
100~250mm	0	3.3	63.3	73.3	47.4	40	58.6	16.7
≥250mm	0	0	3.3	6.7	0	0	0	0

1.1.3 水文环境

龙门山现代水系以横向河为主,流向与龙门山走向垂直,以龙门山和岷山的山顶面为分水岭,以深切河谷特征为主,均汇于长江。该区河流可分为两种类型:一种为贯通型河流(如岷江),起源于青藏高原东部的川藏块体,流经并下蚀龙门山,进入四川盆地西部;另外一种为龙门山山前水系(如湍江、石亭江等),起源于龙门山中央断裂(映秀-北川断裂以东),流经并下蚀龙门山山前地区,进入成都平原。

区域内主要水系均为长江左岸的支流,自西向东依次包括岷江、沱江及嘉陵江流域,整体均为自北向南的流向。岷江又称都江,发源于岷山南麓,自都江堰市以上河段纵比降为8.2‰,流速最大可达6~7m/s;岷江于都江堰市分为内、外两江,并于彭山江口汇合。大渡河位于岷江西侧,为岷江的主要支流之一。沱江也称中江,发源于龙门山主峰九顶山,自北西向南东流成成都平原,自西向东依次包括渝江、石亭江及绵远河等支流,沱江水势整体较为平稳。嘉陵江发源于秦岭和岷山,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,分布于研究区域内。

1.1.4 植被与土壤环境

根据气候、土壤、植被等综合生态因子,可将研究区15个县简化为2个生态类型区,即湿润、半湿润森林区和干旱、半干旱森林/草原区(表1-3)。

表 1-3 汶川地震灾区所属县对照表

分区	所属县区	备注
干旱、半干旱森林/草原区	理县、松潘县、黑水县、汶川县、茂县共5县	西部高原边缘区全部及龙门山区部分属干旱、半干旱森林/草原区
湿润、半湿润森林区	北川县、平武县、青川县及都江堰市在内的龙门山区、龙门山山前平原区和盆地低山丘陵区,共10个县	龙门山区大部分及龙门山山前平原区和盆地低山丘陵区全部属湿润、半湿润森林区

1. 湿润、半湿润森林区

其基带地带性植被类型为亚热带常绿阔叶林。在此范围内,由于自然和人为原因,可常见到有较大面积的常绿、落叶阔叶混交林、落叶阔叶林或针阔混交林分布。该生态

区多山,山区植被也表现出了较明显的垂直地带性。以龙门山为例,东部山地由下而上依次为常绿阔叶林—常绿阔叶与落叶阔叶混交林—亚高山常绿针叶林—亚高山灌丛草甸。与以上该区气候、植被的地带性分布相适应,其基带的地带性土壤为棕壤。以龙门山为例,东部山地由下而上依次为黄壤—黄棕壤—棕壤—亚高山草甸土,由于山地隆升和土壤侵蚀强烈,山地土壤土层浅薄。本区植被条件好,森林覆盖率高,除地质灾害较为多发的河谷地段水土流失较为严重外,其余大部分地区水土流失强度以中、轻度为主。

2. 干旱、半干旱森林/草原区

该区主要包括理县、松潘、黑水、汶川、茂县共5县。

该区地形陡峻,海拔变幅大,立体气候明显。与之相适应,植被的垂直地带性也很明显,从下至上可划分为:暖温带干旱河谷稀疏灌丛带(1400~1800m)、温带山地针阔叶混交林带(1800~2600m)、寒温带亚高山暗针叶林带(2600~3600m)、亚寒带高山草甸带(3600~4081m)。其中,退化最为严重的地带属暖温带干旱河谷带,它是有名的生态退化地区之一。

同样,与该区气候、植被的地带性分布相适应,从下而上其土壤类型为新积土、褐土类—棕壤—暗棕壤—高山草甸土。该区土壤发育较为年轻,土层浅薄,土壤中多砾石,粗骨性强,土壤结构不良,土肥力较低,抗蚀、抗冲能力弱,保水、蓄水能力也弱,这在干旱河谷和高山草甸两个脆弱带内表现得最为突出。河谷带由于植被稀疏、退化,其土壤中的生物学过程较弱,土壤肥力渐趋衰退,其土壤的抗蚀、抗冲性能及保水能力也随之退化,加之河谷区是该生态类型区坡耕地的集中分布区。因此,河谷基带是研究区15个县水土流失最为严重的地带。

1.2 研究区的大地构造环境

1.2.1 研究区的大地构造背景与构造格局

四川的大地构造格局大致以龙门山断裂带、小金河断裂带为界,东部为相应稳定的扬子地台区,西部为相对活动的松潘—甘孜地槽褶皱系,也属于四川西部三江地槽褶皱系和秦岭地槽褶皱系的一部分。从龙门山地区的大地构造演化史分析,晋宁运动和印支运动对四川及龙门山的大地构造演化的影响最大,前者使全川结晶基底固结和泛扬子地台形成,最后又使这个地台发生解体。后者使四分五裂的各个地块又联结到一起。加里东、海西、燕山及喜山等运动对四川的构造建造与改造起了重要的作用。燕山运动后就基本形成了四川及龙门山断裂带的大地构造格局雏形。

龙门山构造带是划分四川省东、西部构造的界限,空间上大致沿北川—汶川—康定一线展布,此界线以东为扬子陆块,以西为松潘—甘孜地块,构造带以北为秦岭弧盆系。扬子陆块基底具有双层结构,下部为结晶基底,形成时限为晚太古代—早元古代,组成

结晶基底的地层以康定群为代表；上部为褶皱基底，形成时限为中元古代—晚元古代。松潘—甘孜地块呈倒三角形，再往西侧为三江地槽褶皱系，出露地层主要为上二叠统一三叠系。

龙门山构造带及其邻区涉及的深断裂带包括安宁河断裂带、小江断裂带、映秀—北川断裂带、玛沁—略阳断裂带、汶川—茂县断裂带、鲜水河断裂带；大断裂包括灌县—江油断裂、平武—青川断裂、岷江断裂、虎牙断裂。这一系列深大断裂（带）共同组成了“Y”字形活动构造体系，成为青藏高原东缘近南北向地震带的重要组成部分。

1.2.2 研究区的新构造运动特征

1. 龙门山地区的沉积建造

区域最近一次构造变革发生于古近纪（E）与新近纪（N）交接期，此次构造运动结束了晚三叠世以来地跨四川、云南及贵州的大型红色盆地沉积史，并使龙门山构造带内震旦系—古近系盖层发生褶皱。自新近纪以来，现代构造地貌意义上的“四川盆地”开始形成，龙门山地区及其西侧高原逐渐隆起形成。

受喜马拉雅运动（简称“喜山运动”）的影响，四川西部（为“青藏地块”的一部分）的构造活动仍较为强烈。形成的古夷平面为新近纪末期，显示了喜山运动在古近纪、新近纪和第四纪运动性质的根本区别。四川地区新生代沉积在成都平原有大面积分布，其余地区仅零星分布在河谷地带。表现为西部地区古近系、新近系几乎都为断陷谷地、盆地堆积，第四系也明显沿断裂河谷分布，显示受构造（主要是活动性大断裂带）控制明显。第四系的其他类型（如洪积物、坡积物、冰碛物）也有沿断裂带分布的现象，显示了活动断裂的某些特征。

2. 活动性构造地貌

龙门山是四川盆地与西部山地的明显地貌分界线（图 1-2），大致以龙门山—大凉山为界，东部为四川盆地，西部为川西高原，而龙门山、大凉山则为西部高原与四川盆地的地貌过渡区，海拔 2500 ~ 3500m。

龙门山东部的四川盆地，周围山地海拔大多为 1000 ~ 2500m，部分超过 2500m，盆地内部海拔一般为 200 ~ 750m，为中生代大型内陆盆地，古近纪还有残余湖盆堆积，由于主要为紫红色砂页岩，惯称“红层盆地”。龙门山西部高原区为青藏高原块体的一部分，以岷江—夹金山—雪山—锦屏山至云南玉龙雪山为界，海拔 4000 ~ 5000m，最高峰为贡嘎山，海拔高达 7556m，与近年划分青藏块体东边吻合。此带以西的地貌可分为两部分：岷江以西的松潘—黑水、炉霍—甘孜—邓柯一线以北为阿坝高原区，海拔 3500 ~ 4000m，切割甚微，地表平旷，多为岭缓谷宽的丘原地貌景观。除岷江断裂外，无明显差异活动显示。阿坝高原区在四川西南地区为海拔 4500m 左右的高原区，仅德格—巴塘—乡城一线存在 5000m 左右的山顶面，与藏东地区一致。

1.2.3 区域地层岩性

龙门山构造带及其邻区的地层由老到新序列较为完整,区域分布特征主要表现为:地层空间展布明显受构造带的优势走向控制,尤其沿龙门山构造带及秦岭弧盆系地区表现更为显著,地层多呈条带状沿 SW—NE 向或近 EW 向分布;太古宇—上古生界等时代较老地层主要沿龙门山断裂带及其北侧秦岭弧盆系呈“J”字形分布;龙门山断裂带南东侧的成都平原地区为时代较新的中生界—第四系(Q),且以侏罗系(J)和白垩系(K)分布为主;北西侧川西高原地区主要以中生界的三叠系(T)分布最广,其次为第四系(Q)及二叠系(P);区域内华力西期及燕山期的岩浆岩主要零星分布于龙门山断裂带及其北西侧高原和秦岭弧盆系地区。

区域岩性种类多样,其中主要地层岩性由老到新包括:中元古界黄水河群变质火山岩及石英片岩等,震旦系火山岩、白云岩及硅质岩等,寒武系变质砂岩、千枚岩、板岩及硅质岩等,奥陶系灰岩、大理岩及片岩,志留系中浅变质的千枚岩,泥盆系千枚岩及灰岩等,石炭系碳酸盐岩,二叠系灰岩、白云岩、凝灰岩及砂岩等,三叠系粉砂岩及页岩等,侏罗系及白垩系泥岩、粉砂岩及砂砾岩等,第四系包括成都平原岷江及沱江等流域的冲洪积黏土—砂砾石层,以及川西高原黄河及长江流域的断陷盆地中沼泽泥炭沉积、Ⅲ级以上阶地上披挂式沉积的黄土;另外,川西高原地区的第四纪冰川堆积物也有较广泛分布。区域地层岩性的工程地质性质差异较大,对地震诱发崩滑流地质灾害的影响程度也不同。

研究区地质构造复杂,龙门山区由一个北东—南西走向的强烈褶皱断裂带控制。此断裂带西南起于雅安市天全县夹金山东侧,向北东延伸,与大巴山断裂相接,全长约 500km 左右,宽 70km,为逆冲断层,分为前山断裂、中央断裂、后山断裂三支。龙门山区地层出露齐全,出露地层主要为古生代志留纪和泥盆纪的灰岩、片岩、板岩、千枚岩、石英岩及中生代的红色砂页岩和砾岩。地层岩石变质作用强烈,地表岩石结构破碎,松散固体物质丰富,易形成滑坡、崩塌和泥石流等地震次生地质灾害。

西部高原区地质构造为走向北西的巴彦喀拉褶皱带和基底稳定的松潘地块所控制。出露地层岩性为三叠纪的砂岩、片岩、板岩,间夹灰岩。龙门山山前平原区构造平缓,岩层缓和,松散岩系广布,成因复杂,厚度大,主要由岷江、沱江和涪江冲洪积扇堆积的砂、卵砾石、黏土组成,厚度可达 300~500m。

龙门山断裂带呈 40°~50°方向斜贯四川省中部。地理位置上位于四川盆地西北部边缘及山地,大致在龙门山—大凉山一线,地理坐标大致在 104°E 附近。这条边界也是大地构造、地球物理及新构造运动差异的明显边界。龙门山断裂带东部即为四川盆地,西部即为川西高原地区。东部地区主要为扬子准地台区,构造相对较简单。而西部地区主要为松潘—甘孜地槽区,构造十分复杂。从板块构造分区分析,东部属南华亚板块,西部属青藏亚板块。地壳厚度东部地区为 40~50km,西部地区为 60~70km。同时,龙门山断裂带两侧的地球物理场特征也很分明,为中国东、西部重力分区重力梯级突变带,梯度幅度达 $2.3 \times 10^3 \text{ m/s}^2$,而且也是航磁 ΔT 化极异常的明显分界线。东部以 NNE

向磁异常为特征,西部则以 NNW 和 NW 向磁异常为特征。新构造运动以来,龙门山断裂带两侧的抬升差异明显,东部抬升幅度小于 500m,西部高原抬升幅度达 4000m 左右,成为青藏高原的前缘地区,也是构造活动强烈的地区(四川省地质矿产局,1991)。

1.2.4 研究区的新构造特征与汶川地震

1. 研究区的新构造运动特征

(1) 第四纪大面积快速抬升运动在龙门山东部和西部有明显差异。东部四川盆地,海拔 500~600m,西部山地平均海拔 4000m 左右,四川的地震活动几乎都集中在西部。而这两大块体的边界正是我国南北地震带的中、南段。正是由于有强烈的抬升,才有强烈的差异活动。深大断裂带的差异活动往往与挤压走滑活动相伴生,是活动断裂带的重要标志。

(2) 新构造活动的方式,在时间进程上呈现出交替活动的趋势,即一个时期以抬升运动为主,另一个时期则以挤压水平滑动为主,主要表现在边界断裂上。前者控制断陷谷、断陷盆地的发生和发展,为物质堆积期;后者控制断裂带走滑活动的发生和发展,为物质变形期。地震的孕育和发生主要与这种活动方式有关。边界断裂之间的断块区内部,一般表现为整体活动,是相对稳定区。

(3) 断块活动随着时间进程变化,空间活动范围也发生一定变化,并受区域主压应力场的严密控制。如前所述,四川西部断块差异活动主要发生在青藏高原东边界的南北向边界断裂上,西部高原内部差异活动相对较弱,包括鲜水河断裂、理塘-德巫断裂等北西向大断裂带。整个青藏高原块体的差异活动都主要表现在北、东、南边界带上,内部差异活动是次要的。四川西部的北西向断裂差异活动虽不强,但左旋走滑活动却很强烈。这和板块运动导致的构造应力场有关,即与近东西向应力场和“川滇菱形块体”的向南运动有关。

2. 龙门山断裂构造的震害特点

龙门山断裂构造带的形成与新构造活动特点是地质时期以来形成的结果,特别是新生代以来由印度洋板块向欧亚板块俯冲形成的巨大作用力,导致青藏高原的隆起和东部地块的向东位移,由于受到四川盆地地块的阻挡,高原东缘龙门山断裂构造带受到挤压,形成龙门山断裂构造带应力的集中与累积,最终使龙门山中央断裂带中段——映秀-北川断裂应力突然释放,导致汶川地震发生。地震致使龙门山中央断裂形成的地壳破裂由南西向北东发展,在地表形成总长约 300km 的破裂带。在龙门山中央断裂带应力释放的过程中,龙门山前山断裂的都江堰-江油断裂也同时发生活动,在地表形成长约 100km 前山破裂带。龙门山断裂带具有逆冲顺时针扭动的特点。

龙门山中央断裂是汶川地震的主要发震构造,断裂呈北东南西展布,走向 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$,断层面倾向北西,倾角 $65^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。中央断裂带在地表变形破裂带宽 1~4km。在映秀一带的地震中心区域,地表变形破裂带的宽度更大,达到 5~6km。

1.2.5 研究区地震断裂带特征

汶川 M_s 8.0 级地震的主要发震断裂为龙门山断裂构造带。龙门山断裂构造带长约 500km，宽 40~50km。南起泸定、大牟，向 NE 延伸，经灌县、江油、广元进入陕西勉县一带。由走向 45° 、倾向 NW、倾角 $50^\circ \sim 75^\circ$ 的 3 条逆断裂叠瓦状组合而成。从 NW 向 SE 分别为龙门山后山断裂、中央断裂、前山断裂，又称汶川-茂县断裂、映秀-北川-青川断裂、都江堰-江油断裂（图 1-3）。野外考察表明，汶川地震是龙门山断裂构造带上的映秀-北川-青川断裂、都江堰-江油断裂同时发生破裂。其中，映秀-北川-青川断裂地表破裂带长约 240km，具有右旋走滑位移的逆断层型破裂，最大垂直位移 6.2m，最大右旋走滑位移 4.9m。都江堰-江油断裂的地表破裂带长约 72km，最长可达 90km，为典型的逆断层型地表破裂。两条断裂在空间上成倾向 NW 的叠瓦状排列。震源深度 14km，发生在龙门山推覆构造带中段。龙门山推覆构造带中央（映秀-北川）断裂沿线的映秀镇、龙门山镇、高川乡、茶坪乡、曲山镇、北川县城等地震震烈度达到 XI 度。前山（都江堰-江油）断裂沿线的白鹿镇、金城镇、汉旺镇等地区地震震烈度达 X 度。除映秀-北川-青川断裂和都江堰-江油断裂外，在彭州市西北部还发育着一条 NW 向的小鱼洞地表破裂带。小鱼洞断裂具有逆冲、左旋走滑性质的，长约 6km。

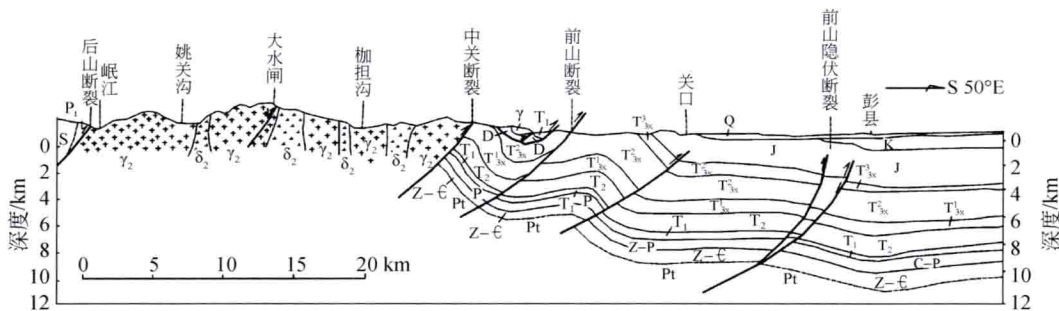


图 1-3 龙门山中段构造剖面图（四川省地质矿产局，1991）

1. 龙门山中央断裂构造带活动性特征

龙门山中央断裂走向 45° ，倾向 NW，倾角 60° ，断裂南西始于泸定两河口以南，经盐井、映秀、茶坪、北川、茶坝进入陕西，与勉县-阳平断裂相接，长约 500km。其中，中段的映秀-北川断裂走向 $35^\circ \sim 45^\circ$ ，倾向 NW，由数条次级逆断裂叠瓦状构成。

映秀-北川断裂是汶川地震主要的发震断裂，也是汶川地震所形成的主要地表破裂带，其总长约 240km。在映秀附近，破裂带由两条走向 $60^\circ \sim 70^\circ$ 的次级破裂带组成，破裂性质为逆冲型。其中，北支位于映秀镇北部，形成高 1~2.3m 的陡坎。从映秀镇向东数千米，两条次级地表破裂带合并为走向 $42^\circ \sim 45^\circ$ 的具顺扭特征的破裂带。北川-映秀断裂在都江堰虹口、北川城区曲山镇等地，断裂的顺扭分量明显小于垂直分量，断裂表现为以逆冲运动为主，兼有少量顺扭走滑，在地表形成较多的逆断层陡坎。在都江堰