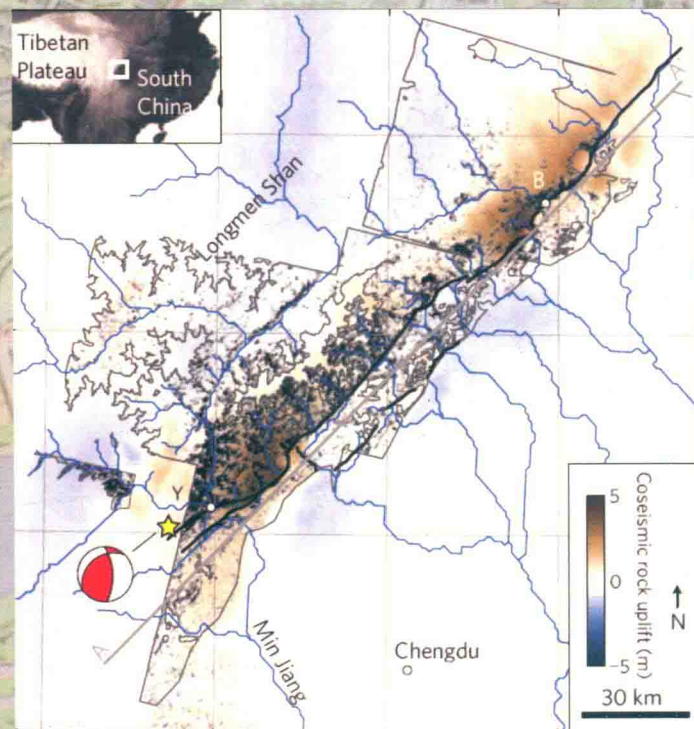


龙门山构造地貌与表面过程

TECTONIC GEOMORPHOLOGY AND SURFACE PROCESS OF LONGMEN SHAN

李 勇 周荣军 闫 亮 等 著
颜照坤 丁海容 邵崇建



科学出版社

龙门山构造地貌与表面过程

Tectonic Geomorphology and Surface Process of Longmen Shan

李 勇 周荣军 闫 亮 等 著
颜照坤 丁海容 邵崇建

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以2008~2013年间在青藏高原东缘龙门山发生的汶川和芦山地震为典型的研究对象,较为系统地阐述在龙门山造山带与前陆盆地、活动构造与汶川地震、构造地貌与表面过程等方面的研究成果,包括构造地貌特征与盆—山—原结构、活动构造与历史地震、地形雨与短周期剥蚀作用、水系样式与活动构造、河流纵剖面与隆升作用、地震滑坡沉积物的传输过程与水系响应、汶川地震与龙门山地貌生长、长周期剥蚀作用与始新世古长江的贯通、龙门山隆升机制与沉积响应、龙门山均衡重力异常与前陆盆地长周期挠曲沉降作用、汶川地震的构造负载量与前陆盆地短周期挠曲沉降作用等方面的内容。本项研究成果为国内外研究龙门山构造地貌与表面过程、汶川地震与灾后重建等提供了科学依据和典型范例。

本书可供地质学、地貌学、地理学、地震地质学、地质灾害等领域的科研和工程技术人员参考,也可作为高等学校地质学、地理学、地貌学、地震地质学、地质灾害学等相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

龙门山构造地貌与表面过程 / 李勇等著. — 北京: 科学出版社, 2017.8
ISBN 978-7-03-054041-6

I. ①龙… II. ①李… III. ①龙门山—地震构造—构造地貌 ②龙门山—地震构造—表面结构 IV. ①P315.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 180920 号

责任编辑: 冯 铂 / 责任校对: 唐 梅

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

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>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第 一 版 开本: 16 (889×1194)

2017年8月第一次印刷 印张: 36.75

字数: 950千字

定价: 398.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

李勇教授简介

李勇，男，1963年12月出生，成都理工大学二级教授、博士生导师、国家级有突出贡献中青年专家。现任能源学院院长。1984年毕业于中国地质大学(武汉)地质学系，1987年和1994年分别获成都理工大学地质学硕士学位和沉积学博士学位。先后到爱尔兰都柏林大学、美国孟菲斯大学和加拿大里贾纳大学进修和学术访问。1994年破格晋升为副教授，1996年破格晋升为教授，2001年遴选为博士生导师，2010年聘为二级教授。李勇教授先后在青藏高原、龙门山和渤海湾盆地开展地质调查和研究工作，主持国家自然科学基金项目、国际合作项目、重点科技项目、横向部门重大科技专项等20余项，完成地质调查和地质科学研究报告27部(项)，出版专著和教材15部，发表论文共150余篇。特别是李勇教授在龙门山造山带与前陆盆地耦合机制、龙门山活动构造与汶川地震等方面开展了国际合作研究，具有学术特色和国际学术影响力，在 Nature Geoscience、Basin Research、Tectonic、Geology、Journal of Geophysics Research、Tectonophysics、Bulletin of the Seismological Society of America、Quaternary International 等国际和国内地学刊物上发表了龙门山地质科学研究论文115篇(第一作者48篇，SCI论文29篇，EI论文2篇，国际、国内会议报告和论文28篇)，论文的被引频次达1921次，其中2篇为高被引的TOP论文，被引频次在ESI排名中进入1%行列。李勇教授获国家级和省部级科技奖励共17项，其中国家科技进步奖一等奖1项、侯德封青年地质学家奖1项、省部级科技进步奖、教学成果奖15项。李勇教授曾入选国家有突出贡献中青年专家、国家百千万人才工程国家级人选、国土资源部科技领军人才、教育部优秀青年教师、四川省学术技术带头人、四川省有突出贡献的优秀专家，享受国务院政府特殊津贴专家等。



《龙门山构造地貌与表面过程》

李 勇 周荣军 闫 亮 颜照坤 丁海容 邵崇建

赵国华 陈 浩 李奋生 董顺利 乔宝成 马博琳

云 锟 李敬波 郑立龙 张佳佳 张 威 马 超

王腾文 刘颖倩 陈 斌 王伟明 周 游 陆胜杰

Alexander L. Densmore Michael A. Ellis

Nicholas J. Richardson Robert N. Parker Svirchev Laurence

前 言

我国中西部地区发育众多的造山带,其中最具特色的是环绕青藏高原的造山带。它有丰富多彩的地质现象,素有“天然地质博物馆”之称,并被国际地学界誉为“打开全球造山带机制的金钥匙”、“大陆动力学理论形成的天然实验室”和“全球变化的起搏器”,它正在成为地学界新理论、新认识和新发现的重要源区和竞争领域。龙门山造山带与前陆盆地是青藏高原东缘独特的地域单元,是我国地学领域中的一块瑰宝,是研究青藏高原与周缘造山带和前陆盆地动力学(盆—山—原动力学)的典型地区。该区地貌自北西向南东可分为3个一级地貌单元,分别为青藏高原地貌区、龙门山高山地貌区和山前冲积平原区。在区域地质上,该区自北西向南东由川藏块体(青藏高原)—龙门山造山带—前陆盆地—前陆隆起带等4个构造单元构成。龙门山造山带—前陆盆地系统目前仍处于活动状态,变形显著,属于典型的活动造山带与活动前陆盆地系统。

汶川地震后,龙门山成为国际地学界关注的热点地区。新资料和新观点的大量涌现,使得我们这个长期从事龙门山地质研究的团队既兴奋又困惑,兴奋的是众多的新资料使我们更加理解了龙门山这本难懂的“书”,以及她所孕育的复杂的地质过程和强烈的地震;困惑的是目前所提出的各种新观点和新模式对已有的概念和观点形成了剧烈的冲击和碰撞,这使我们常常处于深思和对比中,渴望着能够更多地理解这个古老山脉的隆升机制及其孕育强烈地震的机理。

30年来,以李勇教授为首席专家的研究团队致力于龙门山造山带与前陆盆地耦合机制的研究。本研究聚焦于国内外地学界研究的热点区域,以青藏高原东缘汶川地震的地表响应与龙门山造山带—前陆盆地耦合机制为关键科学问题,以汶川地震及其地表变形为关键地质信息,开展了龙门山与四川盆地西部的活动构造、汶川地震与芦山地震、龙门山造山带—前陆盆地的耦合机制等方面的研究。本书以最新地质资料为基础,多学科相结合,以宇宙核素、裂变径迹、数字高程模型、GIS技术、地壳均衡模拟技术和弹性挠曲模拟技术等为手段,是8项国家自然科学基金项目成果的集合和升华,属地球科学中构造地质学、沉积学、第四纪地质学等学科的综合,为一项基础研究成果。先后完成了龙门山地区的国家自然科学基金项目8项、国土资源部地调局项目4项和成都市科技厅项目1项。具体项目名称和编号如下:①龙门山—锦屏山新生代走滑—逆冲作用的沉积响应(49802013);②青藏高原东缘龙门山晚新生代河流下蚀作用与隆升作用的耦合关系研究(40372084);③汶川特大地震的地表破裂与变形特征研究(40841010);④晚三叠世马鞍塘期龙门山前陆盆地礁、滩相的迁移规律及动力学机制研究(40972083);⑤汶川地震驱动的崩塌、滑坡和泥石流的河流响应过程研究(41172162);⑥龙门山冲断带(中段)异地系统晚三叠世地层标定与原型盆地恢复(41372114);⑦芦山地震的构造特征与地表响应研究(41340005);⑧龙门山前陆盆地南部晚三叠世沉积—物源体系及其构造动力学指示(41502116)。

汶川地震之后,本团队对龙门山地区开展了汶川地震的地表破裂与变形特征、孕震机理与震源机制、同震崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害、水系响应、震后洪水与泥石流等方面的研究工作,对龙门山地区的崩塌、滑坡和泥石流沉积物的侵蚀、迁移、传输、沉积等过程进行持续的观测与研究,逐步形成了活动造山带与活动前陆盆地耦合机制与地表过程的研究思路与研究方法。本次采用的关键技术包括数字高程模型(Digital Elevation Models, DEM)、卫星图像(TM、SPOT 5 和 EO-1)、航片、裂变径迹法(fission track)、宇宙核素法(cosmogenic nuclides)、均衡重力异常模拟、弹性挠曲模拟、River Tools、Matlab 分析法(矩阵实验室, Matrix Laboratory)和河流纵剖面等。此外,本研究还充分地应用全球定位系统(GPS)及干涉雷达等资料,以便获得当前地壳运动的图像和大量的现代变形的信息。这些资料

和新技术的应用加深了我们对该地区地球表面正在进行着的变形和地表过程的认识。本项研究成果属于多学科的交叉研究,利用国内外最新的科学技术手段,通过对龙门山与四川盆地西部的活动构造、汶川地震、芦山地震、龙门山造山带及其前陆盆地耦合机制等相关科学问题的研究,将为我国乃至全球研究内陆造山带的耦合关系提供了一个科学范例。该成果是本团队 30 余名科研人员和国际合作者多次深入青藏高原、龙门山和汶川地震、芦山地震灾区进行科考的结晶。该成果经四川省科技厅组织鉴定,认为“成果总体达到国际领先水平,在国际上有很高的影响”。

本项研究成果也是与国外知名专家和科学机构进行长期国际合作研究的结果。在研究过程中,先后与瑞士苏黎世理工大学(Institute of Geology, Department of Earth Sciences, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, Switzerland)P. A. Allen 教授、Richardson 博士、美国孟菲斯大学 Ellis 教授、英国杜伦大学(Department of Geography, Durham University)Densmore 博士、法国巴黎高等师范学校(Laboratory of Geology, Ecole Normale Supérieure, Paris, France)Julia de Sigoyer 教授等开展了一系列的国际合作研究。部分研究成果在《Basin Research》、《Tectonic》、《Geology》、《Tectonophysics》、《Nature Geoscience》等中外自然科学核心期刊上发表,已发表论文 146 篇,其中被 SCI、EI 收录 28 篇。部分研究成果已在 AGU、HKT、IAS、IAEG、IGCP、SinoRock、The 2011 Sino-US Workshop on Earthquake Science、The Gondwana、The First Joint Scientific Meeting of GSC and GSA(Roof of the World)等国际会议上宣读和发表。据《2011 年版中国期刊引证报告(扩刊版)》报告,李勇教授及团队近 5 年发表论文 23 篇,2010 年被引频次 107 次,被引率 73.91%,在天文学、地球科学领域的论文被引频次位居全国第 17 位。同时,本项目组提交的《汶川大地震未对成都主城区造成损害的初步分析》、《擂鼓镇处于北川断裂带上,不宜作为北川县城新址备选区》等建议和报告曾指导了地震灾后重建工作。研究成果曾被《科技日报》、《四川日报》和 British Geological Survey 等中外媒体和报刊报导 20 余次。美国科学院院士 Peter Molnar 教授曾在《Nature Geoscience》上发表对该项研究成果的评述,并给予很高的评价。以李勇教授为带头人的研究团队曾被媒体《The New York Times》称为“英雄的团队”。

综上所述,本项研究成果展示了我国在造山带与前陆盆地、活动构造与汶川地震的优势与特色,汶川地震前有预测、震后有研究和科学建议,为国内外研究造山带与前陆盆地耦合机制、汶川地震、芦山地震的灾害防治以及灾后重建、成都盆地的地震安全评价等提供了科学依据和典型范例。因此,该成果不仅具有重要的科学意义和社会意义,而且也对四川省今后的地震安全稳定、灾后重建、生态恢复与可持续发展具有重要的指导意义。因此,本项研究成果无论是在科学研究的理论价值还是在应用推广上都具有良好的学术扩展价值和科学前景。

本书是在已出版的《龙门山前陆盆地沉积及构造演化》(1995)、《青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应》(2006)和《The Geology of the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau》(2006)的基础上,以 2008~2013 年在青藏高原东缘龙门山发生的汶川地震和芦山地震为典型的研究对象,根据汶川地震后所获得的实际考察资料、分析数据和研究成果编写而成的。本书较为系统地研究和阐述了龙门山造山带与前陆盆地、活动构造与汶川地震、构造地貌与表面过程等方面的研究成果,包括了构造地貌特征与盆—山—原结构、活动构造与历史地震(汶川地震、芦山地震与遂宁地震)、地形雨与短周期剥蚀作用、水系样式与活动构造、河流纵剖面与隆升作用、汶川地震的水系响应与地震滑坡沉积物的传输过程、汶川地震与龙门山地貌生长、长周期剥蚀作用与始新世古长江的贯通、龙门山隆升机制与沉积响应、龙门山均衡重力异常与前陆盆地长周期挠曲沉降作用、汶川地震的构造负载量与前陆盆地短周期挠曲沉降作用等方面的内容。本项研究成果为国内外研究龙门山造山带与前陆盆地耦合机制、汶川地震与灾后重建等提供了科学依据和典型范例,期望能对地质工作者有所启发和帮助。本书第一章由李勇、周荣军、乔宝成等执笔撰写,第二章由李勇、周荣军等执笔撰写,第三章由李勇、周荣军、Densmore、Ellis、Richardson 等执笔撰写,第四章由李勇、周荣军、李敬波、董顺利执笔撰写,第五章由李勇、周荣军、闫亮、董顺利、颜照坤执笔撰写,第六章由李勇、周荣军、闫亮、颜照坤等执笔撰写,第七章由周荣军、李勇、闫亮、颜照坤等执笔撰写,第八章由丁海容、李勇、颜照坤、闫亮等执笔撰写,第九章

由李勇、陈浩、颜照坤、乔宝成、赵国华、邵崇建、闫亮、郑立龙、李敬波等执笔撰写，第十章由李勇、丁海容、赵国华、颜照坤、闫亮、邵崇建、Densmore、Ellis、Richardson、Parker、Laurence 等执笔撰写，第十一章由李勇、闫亮、颜照坤、丁海容、Ellis、Richardson、Parker、Laurence 等执笔撰写，第十二章由李勇、颜照坤、闫亮、丁海容、赵国华等执笔撰写，第十三章由李勇、Densmore、闫亮、丁海容、Richardson 等执笔撰写，第十四章由李勇、颜照坤、Densmore、Ellis、Richardson、Parker、赵国华、郑立龙等执笔撰写，第十五章由李勇、Richardson、Densmore、闫亮、邵崇建等执笔撰写，第十六章由李勇执笔撰写，第十七章由李勇、颜照坤、周荣军等执笔撰写，第十八章由颜照坤、李勇等执笔撰写，第十九章由李勇、邵崇建等执笔撰写，第二十章由李勇、邵崇建等执笔撰写。附件由闫亮、颜照坤等撰写。李辉、贾召亮、颜丙雷、游建飞、张露、孙弋、刘大局、田丛珊、王波、胡文超、梁昌健等完成了部分图件的绘制及校对工作。全书由李勇统筹定稿。

本项研究一直得到成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室、地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室、科技处、国际合作交流处、沉积地质研究院、能源学院、地球科学学院和环境与土木工程学院的领导和专家的支持，同时也得到四川大学水利水电学院、水力学与山区河流开发保护国家重点实验室、四川省地震局工程地震研究院、四川赛思特科技有限责任公司领导和专家的支持，在此向他们表示感谢！

在本项目研究过程中，曾与刘宝珺院士、许志琴院士、殷鸿福院士、王成善院士、张培震院士、马永生院士、徐锡伟研究员、李海兵教授、王二七教授、乔秀夫研究员、苏德辰研究员、梅冥相教授、廖仕孟研究员、郭彤楼研究员、王兰生教授、郑荣才教授、贾东教授、何登发教授、曹叔尤教授、丘东洲教授、黄润秋教授、倪师军教授、刘树根教授、许强教授等专家进行了讨论，对他们所给予的指导和建议深表感谢！

最后，我们还要感谢国家自然科学基金(49802013、40372084、40841010、40972083、41172162、41372114、41340005、41402159、41502116)、油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金、地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室基金、国家百千万人才工程、教育部优秀青年教师资助计划、国土资源部科技领军人才培养计划、四川省有突出贡献的优秀专家、四川省学术和技术带头人、青年地质学家基金等给予李勇教授及其团队的支持和资助。

著 者

2017年3月18日

目 录

第1章 青藏高原东缘的构造地貌特征	1
1.1 青藏高原东缘龙门山活动造山带的研究历史	1
1.2 青藏高原东缘的构造地貌单元	3
1.3 青藏高原东缘构造地貌的几何形态分析	7
1.3.1 地形形态分析	9
1.3.2 地形起伏度分析	11
1.3.3 剖面分析	14
1.4 青藏高原东缘的现代构造应力场	15
1.4.1 青藏高原东缘的水平运动(GPS)场	16
1.4.2 青藏高原东缘的垂直形变场	17
1.4.3 青藏高原东缘的构造动力学机制	19
第2章 青藏高原东缘的构造格架与盆—山—原结构	21
2.1 川藏块体(松潘—甘孜造山带)	23
2.2 茂汶韧性剪切带	25
2.2.1 茂汶剪切带的空间展布	25
2.2.2 茂汶剪切带的新活动性	26
2.2.3 茂汶剪切带的历史地震	27
2.2.4 茂汶剪切带与龙门山造山带的关系	27
2.2.5 茂汶剪切带的形成机制与形成时间	28
2.3 龙门山造山带	28
2.3.1 龙门山的地表构造特征	28
2.3.2 龙门山的深部构造特征	29
2.3.3 龙门山的构造演化过程	30
2.3.4 龙门山的构造单元划分	30
2.3.5 龙门山的逆冲作用与走滑作用	33
2.3.6 “新生代龙门山”与“中生代龙门山”	34
2.4 龙门山前陆盆地	35
2.4.1 前陆盆地的轮廓	35
2.4.2 前陆盆地的沉积基底	36
2.4.3 前陆盆地的沉积充填	36
2.4.4 前陆盆地的结构	37
2.4.5 前陆盆地的构造分带	37
2.5 龙门山的扩展性与构造单元形成次序的标定	37
2.6 青藏高原东缘的盆—山—原结构模式	38

第3章 龙门山造山带的活动构造与历史地震 40

3.1 龙门山造山带的活动构造 41

3.1.1 研究方法和技术 42

3.1.2 北川断层的活动构造 46

3.1.3 彭灌断层的活动构造 50

3.1.4 龙门山山前的变形特征 53

3.1.5 龙门山的地震危险性 56

3.2 龙门山造山带的历史地震 56

3.2.1 历史地震活动的时间分布特征 59

3.2.2 历史地震的空间分布特征 65

3.2.3 历史地震的震源深度分布特征 65

3.2.4 历史地震的震源机制解 66

3.3 龙门山强震复发周期的讨论与估算 70

3.3.1 龙门山强震复发周期的讨论 70

3.2.2 龙门山强震复发周期的估算 71

第4章 成都盆地的活动构造与历史地震 79

4.1 成都盆地的构造格架 79

4.2 成都盆地的历史地震 82

4.3 成都盆地的活动构造 83

4.3.1 关口断裂和彭灌断裂 83

4.3.2 大邑断裂 85

4.3.3 蒲江—新津断裂与熊坡背斜 91

4.3.4 龙泉山断裂与龙泉山隆起 101

4.3.5 苏码头断裂 106

4.3.6 新场—甘溪断裂 108

第5章 汶川地震 111

5.1 汶川地震的基本参数、震源机制解及余震的时空分布特征 114

5.1.1 汶川地震的基本参数与震源机制解 114

5.1.2 汶川地震余震的时空分布特征 117

5.2 汶川地震的地表破裂 118

5.2.1 北川断裂的地表破裂 119

5.2.2 彭灌断裂的地表破裂 145

5.2.3 小鱼洞断裂的地表破裂 149

5.2.4 擂鼓断裂的地表破裂 157

5.3 汶川地震地表破裂的类型和组合样式 161

5.3.1 平行逆冲断层型组合样式 162

5.3.2 捩断层型组合样式 162

5.3.3 阶梯状逆冲断层型组合样式 163

5.3.4 由捩断层连接的雁列状逆冲断层型组合样式 164

5.3.5 分叉断裂型组合样式 165

5.3.6	前缘逆冲后缘伸展型组合样式	165
5.3.7	叠瓦状叠置样式	167
5.4	汶川地震驱动的构造缩短	168
5.4.1	北川断裂的构造缩短	168
5.4.2	彭灌断裂的构造缩短	169
5.5	汶川地震的地表破裂带和先存活动断层之间的对比	169
5.5.1	地表破裂与活动断层的空间匹配关系	169
5.5.2	地表破裂变形样式对活动断层几何形态的约束	171
5.5.3	地表破裂运动学特征对龙门山活动变形的约束	171
5.6	汶川地震的地震动	173
5.6.1	仪器与资料	173
5.6.2	加速度峰值	175
5.6.3	加速度反应谱	178
5.6.4	加速度峰值与地震烈度的相关性	179
5.7	汶川地震的破裂过程分析	180
5.7.1	擦痕特征分析	182
5.7.2	利用赤平投影求解断层的主应力方位	183
5.7.3	汶川地震的地表破裂过程	184
5.7.4	汶川地震发震断层的运动特征	186
5.8	汶川地震的发震模式与成因机制	189
5.8.1	龙门山断裂模式	189
5.8.2	对汶川地震的构造运动学过程的讨论	191
5.8.3	对汶川地震构造动力学机制的讨论	193
5.9	汶川地震的地质灾害及灾后重建	194
5.9.1	汶川地震的地质灾害	194
5.9.2	汶川地震观测数据的积累与整合	195
5.9.3	灾后重建及其建议	196
第6章 芦山地震		198
6.1	芦山地震及其震害特点	199
6.2	芦山地震和余震的定位	201
6.3	龙门山南段及前缘地区的地震构造分带	202
6.3.1	龙门山造山带地震活动带(A)	202
6.3.2	龙门山前缘扩展变形带地震活动带(B)	204
6.3.3	龙门山南段及前缘地区的地震构造模式	205
6.4	芦山地震的构造成因机制与断层模式	208
6.4.1	芦山地震的地表变形特征及构造解释	208
6.4.2	芦山地震的震源机制解、余震分布与构造解释	210
6.4.3	龙门山前缘地区逆冲—滑脱作用与芦山地震的断层模式	211
6.5	龙门山前缘扩展变形带的地震构造模式	212

第 7 章 遂宁地震	214
7.1 2008 年以来四川盆地的地震	214
7.2 遂宁地震的基本特点	216
7.3 遂宁地震的地震波形特征与震源机制	218
7.4 遂宁地震的构造背景	220
7.5 遂宁地震区的天然气开采	223
7.6 遂宁地震的发震构造分析	223
7.7 遂宁地震的成因机制分析	225
第 8 章 龙门山的地形雨与短周期剥蚀作用	228
8.1 山脉的隆升作用与剥蚀作用	228
8.2 龙门山的地形雨	229
8.2.1 龙门山地形雨与降水分布	229
8.2.2 龙门山地形雨的形成机制	230
8.2.3 龙门山地区的暴雨中心	231
8.3 龙门山地形雨的降水量与高程变化的相关性分析	232
8.3.1 黑水河流域降水量与高程变化的相关性分析	233
8.3.2 杂谷脑河流域降水量与高程变化的相关性分析	233
8.3.3 岷江干流北部(松潘—沙坝河段)降水量与高程变化的相关性分析	233
8.3.4 岷江干流南部(龙门山东南坡)降水量与高程变化的相关性分析	234
8.4 岷江上游径流量与降水量的相关性分析	235
8.4.1 岷江上游径流量与降水量的趋势分析	235
8.4.2 岷江上游径流量与降水量的季节性变化	236
8.4.3 岷江上游洪水的变化趋势分析	237
8.4.4 岷江上游径流量与降水量的相关性分析	238
8.5 岷江上游输沙量与径流量的相关性分析	239
8.5.1 岷江上游输沙量与径流量的年际变化趋势分析	239
8.5.2 岷江上游输沙量与径流量的季节性变化	240
8.5.3 岷江上游输沙量与径流量的相关性分析	240
8.5.4 岷江上游输沙量与降水量的相关性分析	240
8.6 龙门山地区主要流域输沙量与径流量的相关性分析	241
8.6.1 岷江流域输沙量与径流量的相关性分析	241
8.6.2 沱江流域输沙量与径流量的相关性分析	242
8.6.3 涪江流域输沙量与径流量的相关性分析	243
8.6.4 龙门山地区主要流域输沙量与径流量相关性的对比分析	244
第 9 章 岷江上游的水系样式与活动构造	246
9.1 岷江上游水系样式的基本特征	246
9.1.1 岷江上游的水系平面样式	248
9.1.2 岷江上游的水系剖面样式	249
9.2 岷江上游水系平面样式对活动构造的响应	250
9.2.1 岷江上游的流向对活动断层的响应	250

9.2.2	岷江上游河道的水平位错对右旋走滑作用的响应	255
9.2.3	岷江上游非对称性水系展布特征对差异性隆升作用的响应	259
9.3	岷江上游河谷剖面样式对活动构造的响应	263
9.3.1	岷江上游河谷剖面样式对差异性隆升的响应	264
9.3.2	岷江上游阶地面的垂直位错对逆冲作用的响应	270
9.4	岷江上游水系样式的其他控制因素分析	272
9.4.1	气候因素对岷江上游水系样式的影响	272
9.4.2	岩性差异性对岷江上游水系样式的影响	275
9.4.3	岷江上游水系样式的主要控制因素分析	277
第 10 章	湍江流域的水系样式与活动构造	279
10.1	湍江流域水系样式的基本特征	279
10.1.1	湍江流域的水系平面样式	279
10.1.2	湍江流域的水系剖面样式	281
10.2	湍江流域的地貌特征	282
10.2.1	湍江流域的坡度及地形起伏度	282
10.2.2	湍江流域的面积—高程积分	282
10.3	湍江流域水系平面样式对活动构造的响应	283
10.4	湍江流域河谷剖面样式对活动构造的响应	285
10.4.1	湍江流域河谷地貌形态对差异性隆升的响应	285
10.4.2	湍江流域河流梯度剖面对活动构造的响应	286
10.4.3	湍江流域阶地面的垂直位错对逆冲作用的响应	286
第 11 章	龙门山的河流纵剖面与构造隆升作用	288
11.1	原理与方法	288
11.1.1	河流纵剖面的函数拟合	289
11.1.2	河流水力侵蚀模型	290
11.1.3	河流坡降指标与 Hack 剖面	291
11.1.4	面积—高程积分(HI)	292
11.2	龙门山的河流纵剖面拟合函数	292
11.2.1	计算过程	293
11.2.2	河流纵剖面拟合函数与构造活动的关系	296
11.3	龙门山的河流水力侵蚀模型	296
11.3.1	计算过程	296
11.3.2	河流水力侵蚀模型的对比分析	296
11.3.3	河流水力侵蚀模型与构造隆升的关系	297
11.4	龙门山的河流坡降指标与 Hack 剖面	298
11.4.1	计算过程	298
11.4.2	河流纵剖面、SL 参数及 Hack 剖面与构造活动的关系	299
11.5	龙门山的河流面积—高程积分	301
11.5.1	龙门山中段的河流面积—高程积分对构造隆升作用的指示	301
11.5.2	龙门山南段的河流面积—高程积分对构造隆升作用的指示	302

11.6 龙门山的河流分支比与集水区的不对称性分析	309
11.6.1 计算过程	309
11.6.2 分支比、集水区不对称性与构造活动的关系	310
第12章 汶川地震的水系响应	313
12.1 龙门山的水系类型	315
12.1.1 岷江水系	316
12.1.2 沱江水系	316
12.1.3 青衣江水系	317
12.1.4 涪江水系	317
12.1.5 嘉陵江水系	318
12.2 龙门山的水系样式	318
12.2.1 龙门山水系网络	318
12.2.2 龙门山水系及亚流域特征的提取	321
12.2.3 岷江流域和涪江流域水系样式的对比分析	324
12.3 汶川地震驱动的逆冲—走滑作用的河流地貌响应	327
12.3.1 汶川地震的逆冲作用与河道坡折点	327
12.3.2 汶川地震的右旋走滑作用与河道转折点	329
12.3.3 汶川地震地表破裂的走向与河道走向	329
12.3.4 龙门山平行的走滑—逆冲断层组合对水系样式的控制作用	331
12.3.5 龙门山叠瓦状逆冲断层组合对水系样式的控制作用	332
12.3.6 汶川地震的隆升作用对河床梯度剖面的影响	333
12.3.7 龙门山地震的构造—地貌—水系响应模式	337
第13章 汶川地震滑坡沉积物的传输过程	340
13.1 地震滑坡沉积物的传输模型	340
13.1.1 同震滑坡的空间分布特征	341
13.1.2 震后泥石流的空间分布特征	342
13.1.3 震后滑坡、泥石流沉积物的传输模型	343
13.2 地震滑坡、泥石流与河床演变	346
13.2.1 河道变窄	347
13.2.2 河床升高	348
13.2.3 河床比降增大	348
13.2.4 地震滑坡、泥石流对河谷谷坡的影响	348
13.3 地震滑坡、泥石流的产沙量及其对河流输沙量的影响	349
13.4 汶川地震对植被覆盖率的破坏及其对输沙量的影响	352
13.4.1 森林植被覆盖率对径流量、输沙量的影响	352
13.4.2 森林植被覆盖率与径流量的相关性分析	353
13.4.3 森林植被覆盖率与输沙量相关性分析	354
13.4.4 汶川地震前、后植被覆盖率的对比及其对输沙量的影响	355
13.5 汶川地震对水土流失的影响	356
13.5.1 汶川地震前、后水土流失的变化及对输沙量的影响	357

13.5.2	汶川地震前、后固体松散物质量的变化及对输沙量的影响	357
13.6	汶川地震后暴雨型泥石流及其对输沙量的影响	358
13.6.1	汶川地震后泥石流、洪水与强降雨发育的基本条件	358
13.6.2	汶川地震后强降雨驱动的泥石流和洪水	359
13.6.3	汶川地震后暴雨的分布特点	360
13.6.4	汶川地震后特大暴雨型泥石流的空间分布	363
13.6.5	汶川地震后引发泥石流的临界降水量分析	366
13.6.6	汶川地震前、后岷江上游输沙量的对比分析	367
13.7	汶川地震后河流输沙量的增量	369
第 14 章	汶川地震与龙门山地貌生长	371
14.1	汶川地震驱动的隆升作用与水平位移	371
14.1.1	基于 InSAR 技术获得的汶川地震位移	371
14.1.2	基于双断层面震源模型反演的地形变化	374
14.1.3	基于水准剖面的地形变化	374
14.1.4	基于 GPS 监测的水平位移	374
14.2	汶川地震驱动的构造隆升量	376
14.3	汶川地震驱动的地震滑坡量	377
14.3.1	龙门山的坡度与滑坡发育的基本条件	377
14.3.2	汶川地震的同震滑坡	377
14.3.3	汶川地震滑坡的特性	379
14.3.4	同震滑坡的填图与统计	380
14.3.5	同震滑坡的面积	381
14.3.6	同震滑坡的体积	382
14.3.7	同震滑坡量沿断层走向上的变化	383
14.3.8	同震滑坡量在垂直于断层方向上的变化	384
14.4	汶川地震驱动的构造隆升量与滑坡剥蚀量及其对龙门山地貌生长的约束	386
14.5	红椿沟流域构造隆升量与滑坡剥蚀量的对比	387
14.5.1	红椿沟的同震滑坡量	390
14.5.2	红椿沟震后强降雨驱动的泥石流流量	390
14.5.3	红椿沟地震滑坡、泥石流的侵蚀速率及其对岷江沉积通量的影响	393
14.5.4	红椿沟流域同震构造抬升量与滑坡量的对比及其对地貌生长的影响	395
14.5.5	红椿沟震后泥石流的形成机制	396
14.6	湔江流域的构造隆升量与滑坡剥蚀量的对比	398
14.6.1	湔江流域的同震滑坡量	399
14.6.2	湔江流域震后强降雨驱动的泥石流流量	400
14.6.3	湔江流域的构造抬升量与滑坡量的对比	401
14.7	平通河流域的构造隆升量与滑坡剥蚀量的对比	403
14.7.1	平通河流域的水系网络	404
14.7.2	平通河流域降水量与输沙量的相关性分析	408
14.7.3	汶川地震前、后平通河流域输沙量的变化	411
14.7.4	平通河流域的构造抬升量与滑坡量的对比及其对地貌生长的影响	415

第 15 章 四川盆地的长周期剥蚀作用与始新世古长江的贯通 416

15.1 四川盆地的剥蚀作用 417

15.1.1 低温热年代学分析的原理及方法 418

15.1.2 磷灰石裂变径迹热年代学结果 422

15.1.3 (U-Th)/He 测年结果 429

15.1.4 讨论 429

15.2 始新世古长江的贯通 432

15.2.1 裂变径迹分析的结果 433

15.2.2 对三峡始新世下切作用的讨论 434

第 16 章 龙门山隆升机制与沉积响应 437

16.1 龙门山隆升机制 437

16.2 龙门山活动造山带与活动前陆盆地的耦合机制 441

16.2.1 青藏高原东缘的盆—山体系 441

16.2.2 龙门山隆升机制与前陆盆地之间的耦合关系 442

16.2.3 成都盆地挠曲沉降与龙门山下地壳流的耦合机制 443

16.3 晚新生代龙门山隆升机制的沉积响应 447

16.3.1 晚新生代成都盆地的底部不整合面 447

16.3.2 晚新生代成都盆地的不对称充填结构 448

16.3.3 晚新生代成都盆地的充填序列 451

16.3.4 晚新生代龙门山逆冲—走滑作用的标定 455

第 17 章 青藏高原东缘均衡重力异常与盆—山—原系统 467

17.1 研究目标 468

17.2 研究方法 468

17.2.1 青藏高原东缘的均衡重力异常分带与构造地貌单元之间的对应关系 470

17.2.2 青藏高原东缘的均衡重力异常陡变带与地形陡变带的对应关系 471

17.2.3 青藏高原东缘的均衡重力异常陡变带与岩石密度陡变带的对应关系 471

17.3 利用 Airy 均衡模式对均衡重力异常的反演模拟 471

17.3.1 Airy 均衡模式与反演模拟的方法 471

17.3.2 模拟结果 473

17.4 利用挠曲均衡模式对龙门山构造负载与前陆盆地挠曲沉降作用的模拟 476

17.4.1 龙门山的构造负载量 476

17.4.2 前陆盆地的沉降量 476

17.4.3 前缘隆起的隆升量 477

17.4.4 弹性挠曲模拟 477

17.5 讨论 478

17.5.1 对下地壳流机制与均衡重力异常相关性的讨论 478

17.5.2 对下地壳流机制与汶川地震的讨论 478

17.5.3 对龙门山正均衡重力异常形成时间的讨论 478

17.6 结论与认识 479

第 18 章 汶川地震驱动的构造负载量与前陆盆地挠曲沉降作用的模拟	481
18.1 汶川地震的同震变形量	481
18.1.1 汶川地震驱动的同震地表隆升量	481
18.1.2 汶川地震驱动的同震地表沉降量	482
18.2 弹性挠曲模拟的原理与方法	483
18.3 弹性挠曲模拟的结果	485
18.4 讨论	488
18.5 结论与认识	489
第 19 章 九寨沟地震	490
19.1 九寨沟 Ms7.0 级地震的构造背景	490
19.2 九寨沟 Ms7.0 级地震的地震学参数	490
19.3 九寨沟 Ms7.0 级地震的地表变形	491
19.4 虎牙断裂的活动性与历史地震	492
19.5 讨论	493
19.6 小结	496
第 20 章 2017 年茂县震后滑坡的形成机制	497
20.1 茂县震后滑坡的区域地质地貌背景	498
20.2 茂县滑坡的几何形态与参数	499
20.3 茂县滑坡的沉积物特征	503
20.4 滑动机制分析	505
20.5 成因机制与地质条件分析	506
20.6 小结	512
参考文献	515
附件: Field Trip Guidebook for Geology of the Longmen Shan and Geohazards of the Wenchuan Earthquake	535