



青藏高原东缘

大陆动力学过程与地质响应

● 李 勇 周荣军 Alexander L. Densmore Michael A. Ellis 等著

地 质 出 版 社

国家自然科学基金 (编号: 49803013, 40372084)

四川省重点学科建设项目 (编号: SZD0408)

青年地质学家基金 (编号: 979816)

教育部优秀青年教师资助计划项目

高等学校博士点基金项目 (编号: 20050616004)

地震联合基金 (编号: 95-07-0425)

油气藏地质及开发工程国家重点实验室项目

American Scientific Fund (Grant No. EAR-0125565; EAR-980344)

ETH Forschungskommission, the Swiss Academy of Science (TH-4/03-01)

International Collaboration Programme (IC/2000/064), Enterprise of Ireland

青藏高原东缘 大陆动力学过程与地质响应

李 勇 周荣军 A. L. Densmore M. A. Ellis
李永昭 P. A. Allen D. Steffen 黎 兵
张 毅 N. J. Richardson 王凤林 何玉林
席晓虹 黎小刚 司光影 王 谋 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

青藏高原东缘的松潘—甘孜造山带、龙门山冲断带与前陆盆地是青藏高原东缘独特的地域单元,不仅是研究青藏高原与周边盆地动力学的典型地区,而且是验证青藏高原是以地壳加厚还是左旋挤出方式来吸收印—亚大陆碰撞后印度大陆向北挤入作用的关键部位;同时也是研究长江上游地区气候、水系和生态环境变迁与高原隆升的关键地区。区域地质上,该区自西北向东南由松潘—甘孜造山带、龙门山冲断带、前陆盆地、前陆隆起带等四个构造单元构成了一个完整的构造系统;地貌上,自西向东可分为四个一级地貌单元:青藏高原地貌区、龙门山高山地貌区、山前冲积平原区和四川盆地东部隆起区。

本书以大陆动力学为主线,采用了宇宙核素热年代学、裂变径迹热年代学、高精度数字高程模型、河流下切速率、地壳均衡模拟技术、弹性模拟技术等先进的方法和技术,开展了青藏高原东缘造山带和前陆盆地耦合关系,隆升作用与剥蚀作用,剥蚀作用与沉积作用、活动构造等方面的研究。研究成果不仅可为青藏高原东缘造山带成山模式的甄别提供约束条件,而且可以为青藏高原边缘山脉晚新生代隆升与剥蚀耦合模式的研究提供范例,也可为青藏高原及东缘地区环境变化和水土流失研究及预测提供重要理论基础,进而为印—亚碰撞在青藏高原东缘的作用提供科学依据。

本书可供从事地质、地理、环境等工作的教学和科研人员参考,也可作为高等院校地质、地理、环境等专业学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应/李勇等著.
北京:地质出版社,2006.10
ISBN 7-116-05013-2

I. 青... II. 李... III. 青藏高原—地球动力学—
研究 IV. P548.27

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第119171号

QINGZANG GAORYUAN DONGYUAN DALU DONGLIXUE GUOCHENG YU DIZHI XIANGYING

责任编辑:李凯明

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号、100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324576(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787 mm × 1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张:10.5 图版:4 页

字 数:250 千字

印 数:1—800 册

版 次:2006年10月北京第一版·第一次印刷

定 价:35.00 元

ISBN 7-116-05013-2/P·2735

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

前 言

我国中西部发育众多的造山带，其中最具特色的是环绕青藏高原的造山带，其具丰富多彩的地质现象，有“天然地质博物馆”之称，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”，她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。青藏高原东缘的松潘—甘孜造山带、龙门山冲断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瑰宝，不仅是研究青藏高原与周边盆地动力学（盆原动力学）的典型地区，而且是验证青藏高原是以地壳加厚还是左旋挤出方式来吸收印—亚大陆碰撞后印度大陆向北挤入作用的关键部位；同时，也是研究长江上游地区气候、水系和生态环境变迁与高原隆升的关键地区。青藏高原东缘处于中国大地构造单元的重要部位，位于我国西南部南区（青藏）幔坳区和中部深层构造过渡带，贺兰山—龙门山陡变带斜贯路线东部，该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，岩石圈纵、横向存在明显的不均一性，发育多条深大断裂，其中以龙门山岩石圈断裂带和鲜水河断裂带最为重要。在区域地质上，该区自北西向南东由松潘—甘孜造山带、龙门山冲断带、前陆盆地、前陆隆起带等四个构造单元构成了一个完整的构造系统。该区地貌自西向东可分为四个一级地貌单元：青藏高原地貌区、龙门山高山地貌区、山前冲积平原区和四川盆地东部隆升区。该地区地质过程仍处于活动状态，变形显著，露头极好，地貌和水系是青藏高原碰撞作用和隆升过程的地质记录。

一、研究历史

该区研究历史悠久，最早可以上溯到20世纪20~30年代。我国的地质工作者于1914年开始入川工作，最早入川工作的地质工作者是丁文江，其后，赵家骧、黄汲清、谭锡畴、李春昱、叶连俊、朱森、潘钟祥、李承三等先后入川工作，开创了该区地质研究工作。测有1:20万、1:40万地质图共41幅，并编制了1:50万地质图7幅，1:20万地质图28幅及重庆地区1:2.5万地质图，著有《秦岭山及四川之地质研究》、《四川西康地质志》、《重庆南川间地质志》、《四川嘉陵、三峡地质志》等。30年代美国地质学家Arnold Heim考察了1923年道孚7¹/₄级地震，发表有《道孚地震区》一文，对鲜水河断裂带地震开展了研究。

新中国成立后，先后有中国科学院、地质建材部、中国地质大学、成都理工大学、南京大学、四川省地震局、四川省地质矿产局、成都地质矿产研究所等单位在此进行了大量的科学研究。20世纪50~60年代，龙门山地质构造研究多以传统的构造理论为指导，涉及四川地质构造的代表性著作有《中国主要地质构造单位》（黄汲清，1954）、《中国大地构造纲要》（中国科学院地质研究所，1965）及《1:400万中国及邻区大地构造图》、《中国大地构

造基本特征》(地质部地质科学院, 1965) 及《1:300 万中华人民共和国大地构造图》。

20 世纪 60~70 年代先后完成了 1:100 万和 1:20 万的区域地质调查工作, 首次完成了系统的地质制图工作, 同时查明了一批矿产资源, 如煤矿、铁矿、铜矿、石油及天然气等。在此期间, 地质部西南地震地质队、成都地震大队、四川省地震局和四川省地质矿产局等单位在鲜水河地区开展了比较全面的区域地质、地震地质、历史地震、地震活动性、测震及地震前兆观测等方面的研究工作, 将鲜水河断裂带的研究推向了一个新的阶段。80 年代末至 90 年代, 在该区部分地区开展了 1:5 万地质填图, 如在鲜水河断裂带取得了一批有关断裂几何学、运动学及大地震复发间隔等方面的可贵进展; 在松潘-甘孜造山带开展了造山带变质岩区填图方法研究, 提出了“碰撞造山带”(俞如龙等, 1989)、“陆内转换造山带”(俞如龙等, 1996)、“构造岩片填图法”(侯立纬, 1996); 在龙门山及前陆盆地开展了盆山耦合关系的研究工作, 利用前陆盆地沉积记录确定了冲断带断裂活动的序次, 提出了“龙门山逆冲推覆作用的沉积响应模式”(李勇等, 1995)、“三段式造山模式和推覆滑覆叠加模式”(林茂炳等, 1996)和“盆山转换”(许效松等, 1998)。此外, 该区先后发现了一批矿产, 提出了“山是后来居上, 矿是大器晚成”的新思路(骆耀南等, 1998); 开辟了一批旅游景点, 并在龙门山前山带发现和探明了一些天然气田(郭正吾等, 1997)。

20 世纪 80 年代以来, 先后有罗志立(1984, 1991)、赵友年(1985)、潘桂棠等(1990)、许志琴等(1992)、唐若龙(1991)、林茂炳等(1992, 1996)、骆耀南等(1998)对龙门山的推覆构造开展了研究, 李勇(1994, 1995, 1998, 2003, 2006)、刘树根(1993)、Chen Shefa & Wilson(1995)等对龙门山中生代前陆盆地与龙门山耦合关系开展了研究, 唐荣昌等(1993)研究了龙门山的活动构造, Burchfiel & Chen Zhiliang(1995)等在美国刊物上介绍了龙门山构造。近年来完成的该区主要成果有:《扬子地台西缘地质构造演化》(陈智梁, 1987)、《中国松潘-甘孜造山带造山过程》(许志琴等, 1992)、《四川活动断裂与地震》(唐荣昌等, 1993)、《龙门山冲断带与川西前陆盆地的形成演化》(刘树根, 1993)、《龙门山造山带的崛起和四川盆地的形成与演化》(罗志立等, 1994)、《龙门山前陆盆地沉积及构造演化》(李勇等, 1995)、《Tectonics of the Longmen Shan and Adjacent Regions, Central China》(Burchfiel et al., 1995)、《龙门山中段地质》(林茂炳等, 1996)、《四川龙门山带造山模式研究》(林茂炳等, 1996)、《四川盆地形成与演化》(郭正吾等, 1997)、《龙门山-锦屏山陆内造山带》(骆耀南等, 1998)。

近年来, 美国、英国、法国、瑞士、澳大利亚、日本、德国等一大批外国地质学家在此区作了不同程度的地质考察和研究工作。如美国加利福尼亚理工学院 C. Allen 教授等人与四川省地震局对鲜水河断裂带的合作研究, 澳大利亚墨尔本大学 Christopher J. L. Wilson 教授等人与成都理工大学对松潘-甘孜造山带的合作研究, 美国麻省理工学院 B. C. Burchfiel 教授等人与成都地质矿产研究所等单位对龙门山和鲜水河断裂带以及青藏高原东缘 GPS 测量的合作研究。研究工作主要集中在高原边缘的区域地质(Burchfiel et al., 1995)、地热和侵蚀演化(Dirks et al., 1994; Kirby et al., 2002, 2003)、现今地壳运动学(Chen Zhiliang et al., 2001)以及对于印-亚大陆碰撞期间底部地壳行为的推测之上(Clarke & Royden, 2000)。

二、工作概况

本项国际合作研究是由李勇教授访问都柏林三一学院 (Trinity College Dublin) 开始的。在访问期间, 李勇教授与国际知名沉积学专家 P. A. Allen 教授、A. L. Densmore 博士一起讨论和研究了青藏高原东缘造山带和前陆盆地, 制定了本项国际合作研究的思路、内容和基本工作机制。正是基于上述认识, 1999 年以来, 在国家基金委的支持下, 成都理工大学李勇教授、四川地震局周荣军高级工程师等与瑞士苏黎世理工大学 Densmore 博士和美国孟菲斯大学 Ellis 教授对印亚碰撞在青藏高原东缘的作用展开了连续 7 年的科学考察和合作研究, 共同拟定了 “Commitment to long-term research program on the role of the Longmen Shan and the eastern Tibetan Plateau in the India-Asia collision (印-亚碰撞在龙门山和青藏高原东缘的作用的长期研究计划的协约)”。根据合作协议, 外方合作者侧重于对青藏高原东缘和四川盆地西部活动构造的研究, 即注重新生代构造变形的研究, 并于 2001 年获得了美国国家自然科学基金项目的资助, 题目为 “Active faulting in the eastern Tibetan plateau and the western Sichuan Basin, China”。中方本着发挥在青藏高原东缘中新生代地质学研究的优势, 突出利用定量化方法研究青藏高原东缘龙门山晚新生代隆升和河流下蚀作用之间的耦合关系以及盆山耦合关系, 既注重新生代沉积地质学研究, 先后承担了 “龙门山-锦屏山新生代逆冲-走滑作用的沉积响应” (1999~2001) 和 “青藏高原东缘晚新生代河流下切作用与隆升作用的耦合关系研究” (2004~2006) 2 项国家自然科学基金项目的研究工作。

参加本项研究的人员包括成都理工大学的李勇、李永昭、侯中健、司光影、王凤林、黎兵、张毅、徐公达等, 四川地震局的周荣军, 瑞士苏黎世理工大学 (ETH Zentrum, Zürich) 的 P. A. Allen、A. L. Densmore、N. J. Richardson、D. Steffen、Melissa Swartz, 美国孟菲斯大学的 M. A. Ellis。在本项研究过程中, 中方先后获得国家自然科学基金 (编号: 49803013, 40372084)、四川省重点学科建设项目 (编号: SZD0408)、青年地质学家基金 (编号: 979816)、教育部优秀青年教师资助计划项目、高等学校博士点基金项目 (编号: 20050616004)、国家留学基金、地震联合基金 (编号: 95-07-0425) 和油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金等项目的资助; 外方先后获得 International Collaboration Programme (IC/2000/064), Enterprise of Ireland, The Swiss Academy of Science (SANW), NSF (EAR-9803484) 等基金项目的资助。研究成果已在 2000 年的 20th Regional Meeting International Association of Sedimentologists, 15th Himalaya-Karakoram-Tibet Workshop 和 2000 年、2001 年 American Geophysical Union Fall Meeting 等重要国际会议上宣读和发表。经过 6 年的努力, 目前合作研究的经费扩展到三个国家的科学基金的资助, 分别由中国国家自然科学基金 (负责人: 李勇)、瑞士 ETH Forschungskommission 基金 (负责人: A. L. Densmore 博士) 和美国国家自然科学基金项目 (负责人: M. A. Ellis 教授) 资助, 具有明显的国际影响。同时在项目执行过程中和国际合作研究中, 业已联合培养博士研究生 2 名 (其中包括瑞士苏黎世理工大学博士研究生 1 名)、硕士研究生 3 名 (其中包括瑞士苏黎世理工大学硕士研究生 1 名), 并实现了研究生的互访和中方研究生在对方实验室工作。

三、研究思路与研究方法

在分析国内外研究现状的基础上,我们认为应加强青藏高原边缘山脉地区的晚新生代隆升与剥蚀作用之间耦合关系的研究,为青藏高原东缘山脉成山模式的甄别提供约束条件。本次研究的思路与方法主要体现在:在理论上,以印-亚碰撞在龙门山和四川盆地的作用为主线,开展了新生代沉积地质学、构造地貌学、山脉的隆升作用和剥蚀作用等方面的研究;在方法上,采用了宇宙核素热年代学、裂变径迹热年代学、高精度数字高程模型(李勇等, 2005; Densmore et al., 2005)、河流下切速率(Li Yong et al., 2004; 李勇等, 2005)、地壳均衡模拟技术(李勇等, 2006)、弹性模拟技术(李勇等, 2005)等先进的方法和技术。

本次采用的关键技术包括以下几个方面。

1. 数字高程模型

数字高程模型(Digital Elevation Models, DEM)是用数字显示地球表面地形变化,通常是用三维网格形式来展示地形的空间高程变化。最新的数字高程模型是基于遥感方法获得的,包括卫星图像、激光高程数据和雷达卫星数据。青藏高原东缘区域的数字高程模式图像原始数据资料由美方合作者提供。我们利用DEM制作了青藏高原东缘的三维立体模型,定量计算青藏高原东缘晚新生代以来河流下切的深度和表面剥蚀的厚度。

2. 裂变径迹法

裂变径迹(Fission Track)是20世纪60年代开始兴起的一种新的同位素年代学方法,目前在国内外高水平的研究机构中已是众多低温年代学技术中最成熟的一种。目前裂变径迹理论的发展主要集中在退火动力学研究、自动径迹统计技术和模拟软件的开发等方面。目前,裂变径迹技术已被应用到不同造山模式和不同盆地类型的研究之中。另外,样品的选择也多样化一些,沉积岩样品的分析相对也比从前更为重要。

根据裂变径迹技术的发展现状,考虑到研究区可能经历了多次隆升事件,为了更好地约束青藏高原东缘及四川盆地的新生代隆升作用与剥蚀作用,我们分别采用了连续剖面裂变径迹法与同一样品中磷灰石裂变径迹和锆石裂变径迹法等两种方法研究古地温和冷却年龄,揭示青藏高原东缘及四川盆地的多次隆升事件和不同时期的隆升速率。

项目组与瑞士苏黎世理工大学热年代学实验室建立了很好的合作关系,已测试了大量的样品。项目组成员张毅曾于2005年访问瑞士苏黎世理工大学,其间,学习了有关裂变径迹技术,并在瑞士苏黎世理工大学裂变径迹年代学实验室对已采集的裂变径迹样品进行了测试。目前,我们在龙门山和四川盆地取了35个点的裂变径迹样品,均在苏黎世理工大学裂变径迹实验室测试。初步的测定表明,从30~40Ma以来,测试样品以4.3℃/Ma的速度变冷;初步的模拟结果表明,新生代以来四川盆地平均有1.5~3km的物质被剥蚀,龙门山平均有7~10km的物质被剥蚀。

3. 宇宙核素法测定与阶地沉积物定年技术

阶地沉积物的测年资料是本次研究和计算河流下切速率的关键数据。前人曾采用¹⁴C

测年技术、热释光技术 (TL) 和电子自旋共振技术 (ESR) 等定年技术研究了青藏高原东缘的阶地, 曾获得了大量测年数据。在此基础上, 本次将主要利用宇宙核素 (Cosmogenic Nuclides) 技术和热释光技术测定阶地沉积物年龄, 分别计算河流下切速率。在此基础上, 对利用不同测试方法所获年龄计算的河流下切速率进行对比和评估。

目前, 国际上利用宇宙核素技术测定地表暴露年龄和侵蚀速率等研究蓬勃发展, 在理论上和方法上也日渐成熟, 有效地促进了地貌学、第四纪地质学和地质年代学的发展。与其他技术相比, 该技术能够直接测定地质体的暴露年龄和本地 (in-situ) 的侵蚀速率 (Bierman, 1994; Granger et al., 1996; Lal, 1999; 李英奎等, 2005)。

宇宙核素的产生是宇宙射线轰击地表或接近地表岩石矿物中原子核的结果, 其中 Be 和 Al 宇宙核素在自然界分布广泛、稳定, 具有较长的半衰期 (其中 Be 为 1.5Ma, Al 为 0.705Ma), 成为用于研究地表暴露时间和剥蚀速率的一种最新方法。其原理在于: 宇宙射线穿过地表进入岩石内部发生核反应和电粒损耗, 如地表的二氧化硅矿物中的氧同位素 (^{16}O) 可转变为铍同位素 (^{10}B), 铍同位素 (^{10}B) 的富积量由地表向地下递减。因此, 可用 Be、Al 同位素的富积量的变化速率来计算地表的剥蚀速率和暴露年龄 (Bierman, 1994; Granger et al., 1996; Lal, 1999; 李英奎等, 2005)。

本次利用宇宙核素技术确定了阶地沉积物暴露年龄, 具体野外采集样品方法为: 在选定的阶地剖面上, 宇宙核素样品采集于阶地沉积物, 在阶地表面之下 30~50cm 深处采集含石英较多的砾石 (最好是花岗岩砾石) 30~50 粒, 用黑色样品袋包装并密封。同时, 为了暴露年龄的校正, 在阶地表面之下 100~150cm 深处再采集另一组样品备用。

此外, 鉴于可利用宇宙核素技术可以确定河床本地 (in-situ) 的侵蚀速率或下切速率, 本次也在岷江和青衣江流域, 在选定的河床剖面上, 采集花岗岩表面 10~20cm 深处的样品, 样品重量为 2~3kg, 并标定上下方位。其价值在于: 一方面该测定结果可为岷江和青衣江提供一个中周期的河流下切速率值; 另一方面将该测定结果与利用阶地计算的河流下切速率值进行对比。特别是与利用一、二级阶地计算的河流下切速率值进行对比, 其结果将有助于我们对利用不同方法计算结果的相互效验和评价。

值得指出的是, 在本项研究中, 我们已初步尝试开展了宇宙核素年代学在表面剥蚀速率和阶地沉积物暴露年龄研究中的应用。我们在龙门山区和四川盆地西部取了 20 个点的宇宙核素样品, 经过一年多的测试, 现已获得宇宙核素年龄 7 个, 其中, 一级阶地的年龄为 4.0~4.7ka, 二级阶地的年龄为 11.0ka, 三级阶地的年龄为 13.0ka, 湔江河床沉积物的年龄为 5.8ka, 岷江河床花岗岩基岩的年龄分别为 6.3ka 和 16ka。从已获结果来看, 宇宙核素年龄值自身序列性与阶地序列匹配性很好, 各阶地的年龄值相对稳定, 差别不大; 其中一、二级阶地的宇宙核素年龄值与 ^{14}C 测年值和热释光 (TL) 测年值 (李勇等, 2005) 相近, 具有很好的匹配性, 三级阶地的宇宙核素年龄值与热释光 (TL) 测年值 (李勇等, 2005) 相比偏年轻。

4. 均衡重力异常模拟技术

均衡重力异常反映了一个地区现今的均衡状态, 即现今的稳定程度。地壳均衡是基于流体静力平衡原理的一种假说。地学界先后提出了两种均衡作用的端元假说: 一个为 Pratt 均衡假说, 另一个为 Airy 均衡假说。李勇等 (2006) 曾应用 Airy 均衡模式对龙门山

正均衡重力异常进行了反演模拟,结果表明,均衡重力异常模拟是研究山脉地壳隆升的有效方法,并可揭示构造隆升和剥蚀作用在相似的时间尺度上和空间尺度上对山脉地貌的形成控制作用。

5. 弹性挠曲模拟技术

目前,岩石圈挠曲模型主要有两种:一种为弹性挠曲模型,另外一种为黏弹性挠曲模型,我们采用了弹性挠曲模型开展了龙门山剥蚀卸载作用的弹性挠曲模拟(Li Yong & Allen, 2003; 李勇等, 2005; Densmore & Li Yong et al., 2005),并取得了很好的效果。

四、研究进展

在总结前人富有成效的研究成果的基础上,我们应用了以上先进的技术和方法,获得了以下进展。

1. 晚新生代构造变形研究

众所周知,印-亚碰撞是新生代发生的最重大的构造事件,其导致了青藏高原隆升、变形和地壳加厚。这一构造事件及其对亚洲新生代地质构造的影响一直是人们关注的焦点,业已提出了两个著名的端元假说:一个是地壳增厚模式(Dewey & Burke, 1973; England & Houseman, 1986);另一个为侧向挤出模式(Tapponnier et al., 1982, 1986; Pelzer & Tapponnier, 1988)。前者强调南北向缩短和地壳加厚,后者强调沿主干走滑断裂的向东挤出,争论的核心问题为新生代青藏高原隆升过程(垂向运动)与变形过程(水平运动)相互关系及其与印-亚碰撞的关系。就青藏高原东缘而言,也相应存在两种成因模式:Avouac 和 Tapponnier 等人(1982, 1986)提出的向东逃逸模式;England 等(1986)提出的右旋剪切模式。两者争论的核心问题是在晚新生代时期龙门山是以逆冲作用为主,还是以走滑作用为主。其中向东逃逸模式在龙门山应表现为以逆冲作用为主,而右旋剪切模式在龙门山应表现为以右行走滑作用为主。

青藏高原东缘地区的地质过程仍处于活动状态,变形显著,露头极好,地貌和水系是青藏高原碰撞作用和隆升过程的地质记录,因此,对该地区新生代构造作用与地貌和水系响应的研究,不仅可验证 Tapponnier 等的向东挤出模式(1982, 1986)和 England 等(1986)的右旋剪切模式,而且可能提出新的模式。目前急需量化的数据来检验和约束这些模式,真实地理解青藏高原及其东缘地区的地球动力学过程与机制。迄今为止,我们对龙门山新生代变形的动力学和运动学及其地貌响应并不清楚或知之甚少,而这些资料却是认识龙门山地质、地貌演化的关键,同时也是研究印-亚碰撞作用及四川盆地西部地震灾害的关键。

鉴于此,我们重点考察了青藏高原东缘地区的主要活动断裂,包括汶川-茂汶断裂、北川断裂、彭灌断裂、大邑断裂、熊坡断裂和龙泉山断裂等。对典型的活动断裂和古地震遗迹开展了详细的野外地质填图,利用全站仪和 GPS 对活动构造地貌进行了精确的测量,采用了宇宙核素、热释光(TL)、电子自旋共振(ESR)等方法对活动断裂和阶地沉积物进行测年,研究了活动断裂发育规模、期次、构造组合、地貌错位、运动学和动力学。在

此基础上,利用地表断距的精确测量数据和测年数据,定量计算了青藏高原东缘龙门山主干断裂的逆冲速率和走滑速率,开展了活动构造的逆冲速率和走滑速率的定量对比研究。其目的是确定青藏高原东缘地区活动断裂的速率和动力机制,定量约束青藏高原东缘不同的成因模式。初步的研究结果(Li Yong et al., 2000, 2001; Densmore and Li Yong et al., 2005; 李勇等, 2006)表明:龙门山晚新生代构造变形微弱,逆冲速率一般小于 1.1mm/a ,表明该地区没有显著的缩短作用;走滑速率一般小于 1.46mm/a ,表明该地区存在晚新生代龙门山断裂北北东向的右行走滑作用。走滑分量明显大于逆冲分量。因此,我们认为该时期青藏高原东缘地区所发育的以走滑作用为主的断层与 England and Molnar (1986)提出的地壳增厚构造模式在青藏高原东缘表现为大尺度右旋剪切作用的推论相吻合,而与 Avouac and Tapponnier 等人(1982, 1986)的侧向挤出模式在青藏高原东缘表现为以逆冲作用为主的推论不吻合。这一研究成果也得到了古地磁(Enkin et al., 1991, 古地磁表明四川盆地在新近纪以来旋转了 10° , 龙门山相对于四川盆地存在右行走滑作用)和 GPS 测量成果的支持(Chen Zhiliang et al., 2001; 陈智梁等, 1998)。

目前,本项目组已在该领域研究方面发表了《Active Tectonics in the Longmen Shan Region, Eastern Tibetan Plateau》(Li Yong et al., 2000)、《Evidence for active strike-slip faults in the Longmen Shan, Eastern margin of Tibet》(Li Yong et al., 2001)、《Active tectonics and erosional unloading of eastern margin of the Tibetan Plateau》(Densmore and Li Yong et al., 2005)和《青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志》(李勇等, 2006)等论文。

2. 青藏高原东缘隆升作用与剥蚀作用研究

当前,隆升作用与剥蚀作用(或气候)的相互作用过程的研究是近年来大陆岩石圈动力学和地球表面过程研究中最前沿的科学问题,对理解山地的形成和气候长期变化的机理提供了新的线索,具有重要的理论意义。但实际研究工作中,隆升作用与剥蚀作用(或气候)的相互作用过程也是一个难度极大的科学问题,自从 England 和 Molnar (1989)提出这个类似鸡与蛋的问题后,许多研究者在讨论山地隆升问题时都非常重视隆升作用与剥蚀作用(或气候)的影响。

隆升作用是青藏高原东缘新生代构造作用的重要表现形式之一。目前对青藏高原东缘的隆升过程和隆升幅度的研究相对较少。隆升(Uplift)的原始定义有:“将一部分岩石抬升的过程或抬升一部分岩石的过程所造成的结果”,“陆地的一个范围相对海平面或相对于周围其他地区的抬升或升高”,“这个术语最好限定在推测的隆升过程”(国际构造地质辞典, 1983)。近年来的研究成果表明隆升有两种不同的形式,即岩石隆升(Rock uplift)或地壳隆升(Crust uplift)和表面隆升(Surface uplift)(Molnar & England, 1990)。山脉的表面隆升过程并不等于山脉的地壳隆升过程,表面隆升还受控于剥蚀作用。从理论上讲,山脉的表面隆升速率应等于地壳隆升速率与表面剥蚀速率之间差值,即山脉的表面隆升速率等于地壳隆升速率与表面剥蚀速率的差:如果地壳隆升速率大于表面剥蚀速率,表面隆升速率为正值,山脉的高度将不断升高;如果地壳隆升速率小于表面剥蚀速率,表面隆升速率为负值,山脉的高度降低;如果地壳隆升速率等于表面剥蚀速率,表面隆升速率为零值,山脉的海拔高度将没有变化。因此,山脉的地貌高度实际上是地壳隆升速率与表

面剥蚀速率的函数。从近年来国内外已发表的有关探讨山脉隆升方面的论文来看,一些学者主要以表层环境变化的记录(砾岩、夷平面、阶地、生物和古土壤等)来推算山脉的隆升,而另一些学者则通过地球内部过程来研究山脉的隆升(如矿物的裂变径迹测定、正断层和熔岩年龄测定、地壳均衡、弹性挠曲等)。两种观点存在着明显的分歧和争论。但从理论上来看,我们认为前者揭示的是山脉的表面隆升(Surface uplift)过程,后者揭示的是山脉的地壳隆升(Crust uplift)过程。因此,区分山脉的表面隆升(Surface uplift)与地壳隆升(Crust uplift)是甄别青藏高原东缘隆升的重要问题之一。

剥蚀作用可分为面状剥蚀和线状剥蚀作用,其中河流下切作用是线状剥蚀作用中的主要类型。目前,河流下切速率与隆升速率相互关系的研究成为构造地貌学研究的前缘和争论的焦点问题之一(Montgomery, 1994; Masek et al., 1994; Gupta, 1997; Zeitler, 2001; 程绍平等, 2004; 李勇等, 2005)。Maddy (1997)研究了英格兰地区隆升驱动的河流下切作用与阶地的形成,提出了利用阶地直接标定隆升作用,在国际地学界引起了对河流下切作用与隆升作用相互关系的争论。一些研究者(Maddy, 1997; 王国芝等, 1999; 潘保田等, 2000; 李愿军等, 1996)将河流阶地记录的下切速率等同于隆升速率,而另外一些研究者(李勇等, 2005)则认为河流阶地记录的下切速率不等于隆升速率,引发了人们对山区河流动力学研究的兴趣。值得指出的是,水系模式控制了侵蚀作用的空间分布、沉积物传输和扩散以及盆地的沉积作用。水系是控制表面剥蚀作用最为重要的因素。因此,只有真正地认识了以水蚀作用为主的剥蚀作用的自然规律,才能精确地刻画剥蚀速率及其与隆升速率之间的关系,而该研究方向则是当前沉积学中最为前沿的研究方向之一(Einsele, 2000)。因此,一方面,贯流水系的阶地序列能够揭示山脉表面隆升的运动性质,反映表面隆升和变形,为其他任何方法所不能替代,如科罗拉多高原隆起和莱茵地盾隆起都是通过贯流水系研究取得了重要进展(Lucchitta, 1979; Fucks, 1983);另一方面,对山脉特别是处于稳定区的山脉的地壳隆升作用的研究也有助于对水系贯通的研究。

长期以来,在山脉的隆升研究中如何分辨构造和剥蚀(或气候)各自的作用,仍然没有可靠的技术方法和手段,多是从概念或逻辑推理出发,认定剥蚀(或气候)变化的影响很大,或是主要因素。但是,近年来在研究山脉隆升作用与剥蚀作用的方法方面也有创新,值得我们借鉴和应用。在短周期的隆升作用与剥蚀作用(或气候)的相互作用过程的研究方面,国外许多科学家在喜马拉雅山南坡通过实际测量年降水量和GPS测定的隆升量的变化,精确定量地刻画两者之间的关系,得出了一些重要结论,并将这种思路的工作引向天山和其他地区,并在概念上加以发展(如Burbank et al., 2003; Molnar, 2003; Reiners et al., 2003; Lamb & Davis, 2004)。在长周期的隆升作用与剥蚀作用(或气候)的相互作用过程的研究方面,以裂变径迹法、宇宙核素法等热年代学数据(Bierman, 1994; Granger et al., 1996; Lal, 1999; 李英奎等, 2005)为主要基础,研究隆升作用与剥蚀作用(或气候)的相互作用过程。

本次将高精度数字高程模型(李勇等, 2006)、地壳均衡模拟技术(李勇等, 2005)和剥蚀卸载模拟技术(李勇等, 2005; Densmore & Li Yong et al., 2005)、河流阶地法(李勇等, 2005; Li Yong et al., 2005)、裂变径迹法(张毅等, 2006)和宇宙核素法等热年代学应用到研究青藏高原东缘山脉的隆升和剥蚀作用。李勇等(2005)利用地壳均衡模拟技术揭示了青藏高原东缘的地壳隆升(Crust uplift)厚度;张毅等(2006)利用矿物

的裂变径迹测定揭示了青藏高原东缘山脉和四川盆地的地壳的剥蚀厚度和速率;李勇等(2005, 2006)和 Li Yong et al. (2005) 利用河流阶地、高精度数字高程模型等方法揭示了青藏高原东缘山脉和四川盆地的表面隆升 (Surface uplift) 过程。通过上述研究,我们认识到龙门山地区的构造抬升和剥蚀作用在相似的时间尺度上和空间尺度上控制着地貌的形成,山脉的表面隆升过程并不等于地壳隆升过程,表面隆升还受控于剥蚀作用,即“山脉表面隆升幅度 = 地壳隆升幅度 - 剥蚀厚度”。此外,通过我们对青藏高原东缘山脉的研究表明,青藏高原内部与边缘山脉在隆升机制和隆升过程的方面也存在着不同,边缘山脉的隆升并不等于青藏高原内部的隆升,青藏高原内部的隆升以构造隆升为主,边缘山脉的隆升以剥蚀隆升和构造隆升结合为特征。

目前,本项目组已在该领域研究方面发表了《Field studies of Late Cenozoic Minjiang incision rate and its constraints on morphology of the eastern margin of Tibetan Plateau》(Li Yong et al., 2004)、《晚新生代岷江下切速率及其对青藏高原东缘山脉隆升机制和形成时限的定量约束》(李勇等, 2005)、《青藏高原东缘数字高程剖面及其对晚新生代河流下切深度和下切速率的约束》(李勇等, 2006)、《Active tectonics and erosional unloading of eastern margin of the Tibetan Plateau》(Densmore & Li Yong et al., 2005)、《青藏高原东缘龙门山晚新生代剥蚀厚度与弹性挠曲模拟》(李勇等, 2005)、《龙门山均衡重力异常及其对青藏高原东缘山脉地壳隆升的约束》(李勇等, 2006)、《青藏高原东缘晚新生代成都盆地物源分析与水系演化》(李勇等, 2006)、《剥蚀 - 沉积体系中剥蚀量与沉积通量的定量对比研究——以岷江流域为例》(李勇等, 2006) 等论文。

3. 中新世代龙门山前陆盆地与造山带耦合关系研究

在我国众多的造山带中,龙门山的研究历史最长。1929 年赵亚曾、黄汲清首次发现了彭县飞来峰构造,1942 年朱森对龙门山推覆构造进行了研究,1945 年黄汲清概括出了龙门山式构造,其后,许多学者研究了龙门山推覆构造及其与前陆盆地的耦合关系,具有约 42% ~ 43% 的构造缩短率,并将龙门山作为我国典型的推覆构造带,并在其前缘地区形成了典型的中生代前陆盆地(李勇等, 1995, 1998, 2006; Li Yong et al., 1994, 2001, 2003, 2006)。

虽然与龙门山构造带走向平行的走滑作用早在 20 世纪 80 ~ 90 年代就被人们认识,但是走滑作用在龙门山造山带演化中所起的关键作用却被忽视或估计过低。值得指出的是,近年来在龙门山发现了更多的走滑作用的证据,如雅安地区第三系古地磁测定结果显示自早第三纪中晚期以来四川盆地逆时针旋转了 $7^{\circ} \sim 10^{\circ}$ (Enkin, 1992), 表明龙门山造山带与四川盆地之间发生过大规模的走向滑动;刘树根(1993)、Chen Shefa(1994)、王二七等(2001) 等提出了印支期龙门山左行走滑运动,并认为在印支期龙门山在发生推覆构造作用的同时还发生了左行走滑运动。Burchfiel et al. (1995) 首次提出龙门山前缘缺乏与逆冲推覆作用相关的晚新生代前陆盆地,认识到晚新生代龙门山可能不是以构造缩短为主形成的。

本次以不整合面为界将龙门山前陆盆地充填序列划分为 6 个构造层序,根据几何形态将构造层序区分为两种类型,即楔状构造层序和板状构造层序,其中晚三叠世、晚侏罗世、晚白垩世 - 古近纪构造层序为楔状构造层序,其余为板状构造层序。研究结果表明楔

状构造层序为逆冲构造负载的产物,板状构造层序为走滑剥蚀卸载的产物。在此基础上,我们利用龙门山前陆盆地中楔状体和板状体标定了龙门山构造活动的期次和性质,表明在中新生代期间龙门山具有逆冲作用与走滑作用交替发育的特征。此外,本次以晚三叠世前陆盆地为典型的楔状前陆盆地开展了逆冲构造负载系统的弹性挠曲动力学模拟,以晚新生代龙门山前陆盆地为典型的板状前陆盆地开展了与走滑剥蚀卸载系统的弹性挠曲动力学模拟,并计算了龙门山构造负载系统向扬子克拉通的推进速率,进而对比了龙门山幕式逆冲作用与青藏高原中生代以来的基麦里大陆加积碰撞和印-亚碰撞作用之间的耦合关系。

在此基础上,研究了晚新生代成都盆地。结果表明,在垂直于龙门山造山带方向上,成都盆地具有不对称的楔形结构,盆地的沉降中心具有逐渐向远离造山带方向迁移的特征,在平行于龙门山造山带方向上,成都盆地具有一系列的北东向延伸的次级凸起和凹陷,其中次级凹陷(沉降中心)和冲积扇具有在平行龙门山造山带方向迁移的特征,表明成都盆地是在龙门山造山带晚新生代走滑与逆冲的联合作用下形成的走滑挤压盆地。

此外,对龙门山前陆盆地西缘中生代以来的沉降中心、冲积扇侧向迁移等进行了标定和对比,标定了龙门山在中生代以来的走滑作用和走滑方向。结果表明,龙门山断裂带具有走滑性质,走滑方向曾发生过反转,在反转之前以左行走滑作用为特征,在反转之后以右行走滑作用为特征。根据地层记录和古地磁证据,我们认为龙门山走滑方向反转的时间应介于43~3.6Ma之间,即由中生代至早新生代时期的左行走滑作用反转为晚新生代时期的右行走滑作用。

目前,本项目组已在该领域研究方面发表了《Tectono-sedimentary evolution of Cenozoic basins at the eastern margin of the Qinghai-Tibet plateau》(Li Yong et al., 2000)、《Sedimentary responses to thrusting and strike-slip of Longmen Shan along eastern margin of Tibetan Plateau, and their implication of Cimmerian continents and India/Eurasia collision》(Li Yong et al., 2001)、《Geological evolution of the Longmen Shan foreland basin (western Sichuan, China) during the Late Triassic Indosinian Orogeny》(Li Yong et al., 2003)、《青藏高原东缘新生代龙门山前陆盆地动力学及其与大陆碰撞作用的耦合关系》(李勇等, 2006)、《青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑挤压作用的沉积响应》(李勇等, 2006)、《龙门山断裂带走滑方向的反转及其沉积与地貌标志》(李勇等, 2006)等论文。

4. 晚新生代龙门山的成山模式与成因机制

青藏高原东缘自西向东由三个一级地貌单元构成,即青藏高原地貌区、龙门山高山地貌区和四川盆地地貌区。其中青藏高原地貌区平均海拔在2500~3500m之间;龙门山呈北东-南西向展布,长约500km,宽约30km,最高峰在5000m左右(九顶山4984m),山前的成都盆地最低高程为710~750m。龙门山与山前地区的高差大于5000m,地形陡度变化的宽度仅为15~20km,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的陡度变化最大的山脉。那么,龙门山的高起伏陡地貌是如何形成的?是何时形成的?这些问题成为当前人们最为关注的问题,而解决这些问题的关键之一是评价隆升作用与剥蚀作用的关系及其对地貌形成的控制作用。

然而,山脉的起源和形成又是地学界长期争论的问题(Ollier et al., 2000)。自Davis提出地貌旋回理论以来,科学家就剥蚀作用和构造作用对地貌的影响程度的争论已持续了

100 余年。板块构造理论提出后, 板块间的碰撞和构造缩短一直被认为是山脉形成的主要机制, 并成为统治流派, 构造驱动的山脉成因说影响了近 30 年来人们对山脉的研究, 加之受 Davis 的地理旋回或地貌旋回理论的影响, 人们一般认为山脉构造形成后, 在剥蚀作用的影响下, 山脉剥蚀夷平, 直至最终消失。Allen (1997) 以新西兰 Southern Alps 为例, 探索了造山楔的构造-剥蚀作用对地貌的影响, 表明构造作用和剥蚀作用在相似的时间尺度上控制着地貌的形成。同时, 一些研究也表明, 剥蚀和气候对山脉形成具有重要的控制作用, 大量的剥蚀作用并未使山峰降低, 反而使山峰在不断地增高, 逐渐形成了与剥蚀相关的均衡成山理论 (Beaumont et al., 1992; Pinter et al., 1997), 并成功地解释了澳洲大陆和北美西部山脉的隆升。此外, 也有一些研究者将山地的隆升 (包括青藏高原周边山地的隆升), 从概念上完全归结为气候变化导致的山地蚀顶均衡反弹的结果, 同时将高原周边的巨砾岩的出现和沉积速率的增加都归结为气候变化的统一结果 (如 Zhang & Molnar, 2002; Molnar, 2004; Ann Rev, 2004; Wang et al., 2004)。

鉴于这种情况, 目前在国际上已提出了三种山脉的成山模式, 用来解释在各种不同构造背景下山脉的形成。它们分别为: ①与构造缩短相关的构造成山模式; ②与剥蚀相关的均衡成山模式; ③第一和第二种机制的结合。这种认识上的变化也体现了人们对剥蚀作用理解的加深, 开始强调构造作用和剥蚀作用在相似的时间尺度上控制着山脉的形成。

我们的初步研究成果表明, 龙门山的高起伏陡地貌可能是由构造缩短作用和剥蚀卸载作用联合作用形成的 (Li Yong et al., 2000, 2001; 李勇等, 2005, 2006), 而且山脉可能是 3.6Ma 左右以来形成的, 其与青藏高原东北缘临夏盆地反映的 3.6Ma 的强烈隆升和青藏运动 (李吉均等, 2001) 基本相当, 也与亚洲季风开始的时期 (李吉均等, 2001) 基本相当。

目前, 本项目组已在该领域研究方面发表了《青藏高原东缘龙门山晚新生代剥蚀厚度与弹性挠曲模拟》(李勇等, 2005)、《龙门山均衡重力异常及其对青藏高原东缘山脉地壳隆升的约束》(李勇等, 2006)、《Active tectonics and erosional unloading of eastern margin of the Tibetan Plateau》(Densmore and Li Yong et al., 2005) 等论文。

本书正是对近年来本项目组对青藏高原东缘的研究成果的总结, 其目的和意义在于有利于国外同行了解和认识我们在青藏高原东缘造山带和前陆盆地耦合关系、隆升作用与剥蚀作用、剥蚀作用与沉积作用、活动构造等方面所做的研究和已取得的成果; 同时也有利于开展进一步的国际合作研究, 培养我国从事该领域研究的人才, 提高我们的研究水平, 尽快与国际同领域研究接轨, 推动我国青藏高原大陆动力学研究进程。本研究成果不仅可为青藏高原东缘造山带成山模式的甄别提供约束条件, 而且可以为青藏高原边缘山脉晚新生代隆升与剥蚀耦合模式研究提供一个范例, 也可为青藏高原及东缘地区环境变化和水土流失研究及预测提供重要理论基础, 进而为印-亚碰撞在青藏高原东缘的作用提供科学依据。本研究成果特色在于定量化, 造山带与前陆盆地相结合, 表面隆升与地壳隆升相结合, 隆升作用与剥蚀作用相结合, 隆升作用与河流下切作用相结合, 剥蚀作用与沉积作用相结合, 活动构造与地貌、水系变迁相结合。

本研究成果是国内外专家集体研究的结果, 其中前言、第一章由李勇、李永昭撰写; 第二章由李勇、P. A. Allen、A. L. Densmore、王凤林撰写; 第三章由周荣军、何玉林、席晓虹和黎小刚撰写; 第四章由李勇、D. Steffen 和黎兵撰写; 第五章由李勇、

A. L. Densmore 和 M. A. Ellis 撰写；第六章由李勇和周荣军撰写；第七章由张毅和 N. J. Richardson 撰写；第八章由李勇和黎兵撰写；第九章由李勇、李永昭撰写；第十章由李勇、A. L. Densmore 和 M. A. Ellis 撰写。全文由李勇编纂定稿。

五、致谢

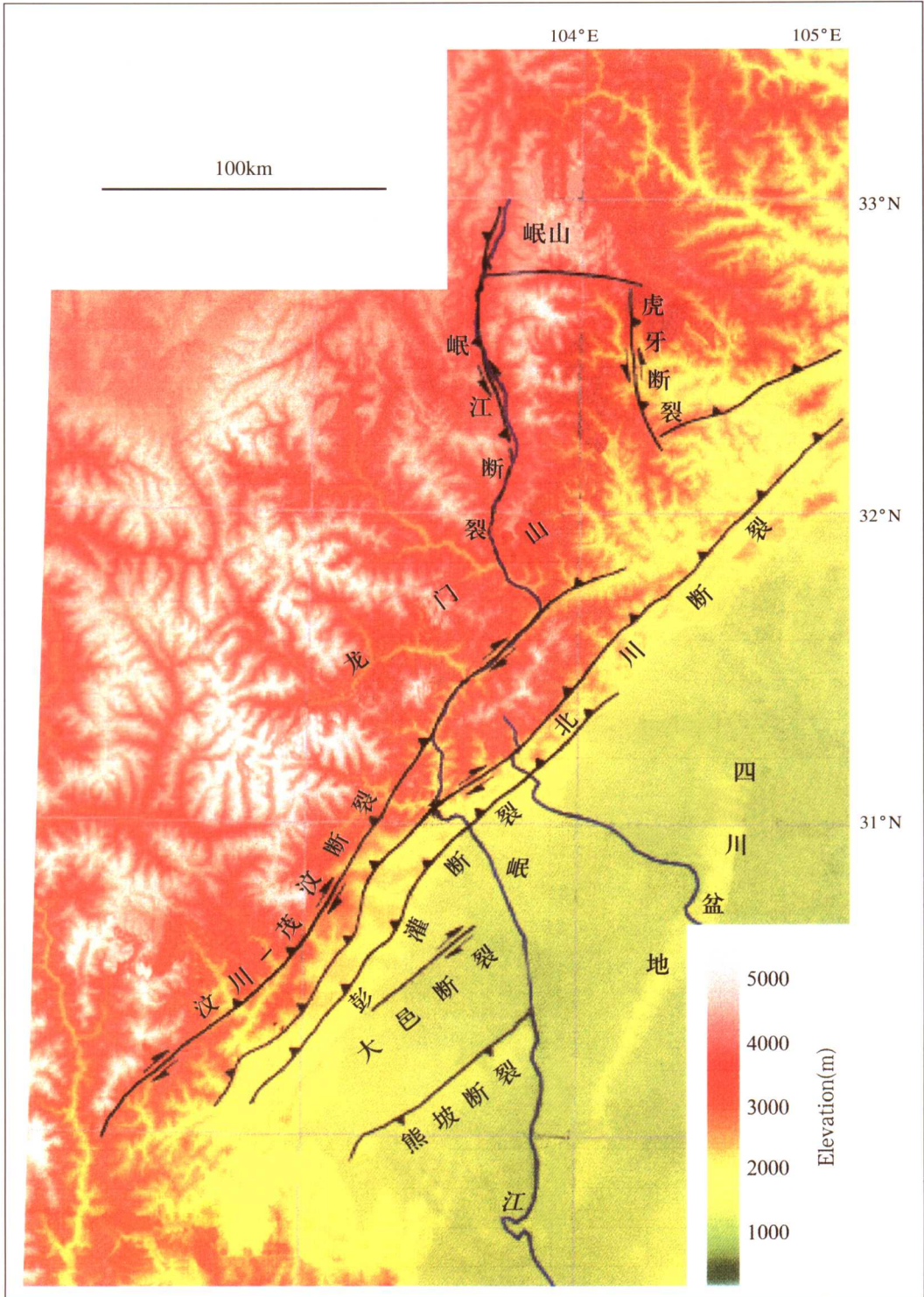
我们感谢瑞士苏黎世理工大学地球科学系地质研究所 (Institute of Geology, Department of Earth Sciences, ETH Zentrum, CH - 8092 Zürich, Switzerland)、美国孟菲斯大学地震研究与信息中心 (Center for Earthquake Research and Information, University of Memphis, 3890 Central Avenue, Memphis, USA) 和都柏林三一学院地球科学系 (Department of Earth Sciences, Trinity College Dublin, Ireland) 对本项国际合作研究的支持, 感谢他们对中方人员的款待和提供的工作条件, 也感谢他们在测试分析等方面所提供的帮助。我们非常感谢曾允孚教授、刘宝珺教授、刘东生教授、李吉均教授、殷鸿福教授、郭正吾教授、曹叔尤教授、王成善教授、贺振华教授、刘家铎教授、倪师军教授、陈智梁教授、丘东洲教授、梁川教授、陈洪德教授、郑荣才教授、伊海生教授和徐公达教授对本项国际合作研究的支持以及给予的关心和指导。

本项研究一直得到成都理工大学科技处、国际合作交流处、油气藏地质及开发工程国家重点实验室和沉积地质研究院的领导和专家的支持, 同时也得到四川大学水电学院、水力学与山区河流开发保护国家重点实验室的领导和专家的支持, 在此向他们表示衷心的感谢!

此外, 李晓平、黄继均、蔡开基、王洪峰和 Melissa Swartz 参加了部分野外考察工作和研究工作, 在此向他们表示感谢!

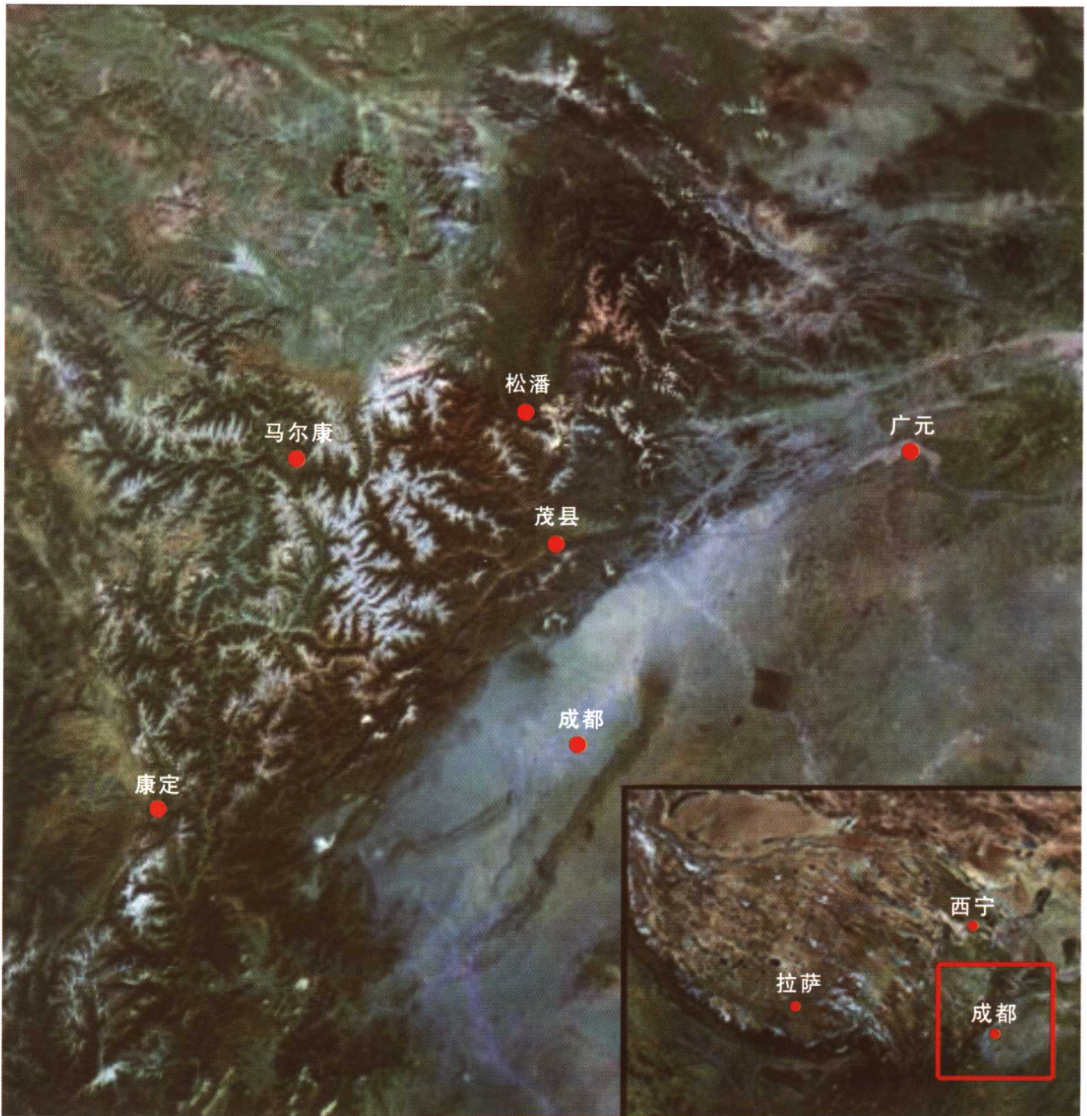
最后, 我们还要感谢国家自然科学基金 (49803013、40372084)、国际合作基金、教育部优秀青年教师资助计划基金、四川省重点学科建设项目 (编号: SZD0408)、青年地质学家基金 (编号: 979816)、高等学校博士点基金 (编号: 20050616004)、地震联合基金 (编号: 95 - 07 - 0425)、国家留学基金、博士后基金、油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金、American Scientific Fund (Grant No. EAR - 0125565; EAR - 980344)、ETH Forschungskommission, the Swiss Academy of Science (TH - 4/03 - 01) 和 International Collaboration Programme (IC/2000/064), Enterprise of Ireland 给予的资助。

图版 I



彩图 1-2 青藏高原东缘龙门山及四川盆地西部的数字地貌图和活动构造格架图

图版 II



彩图 1-3 青藏高原东缘卫星影像图