



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属

理论与技术前沿丛书
SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

青藏高原岩石圈力学强度 与深部结构特征

LITHOSPHERIC MECHANIC STRENGTH OF TIBET AND ITS IMPLICATIONS
OR DEEP STRUCTURE

陈波 柳建新 陈超 著
Chen Bo Liu Jianxin Chen Chao



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

青藏高原岩石圈力学强度与 深部结构特征

LITHOSPHERIC MECHANIC STRENGTH OF TIBET AND
ITS IMPLICATIONS FOR DEEP STRUCTURE

陈波 柳建新 陈超 著
Chen Bo Liu Jianxin Chen Chao



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原岩石圈力学强度与深部结构特征/陈波,柳建新,陈超著.
—长沙:中南大学出版社,2017.3

ISBN 978-7-5487-2728-6

I.青... II.①陈...②柳...③陈... III.①青藏高原-岩石圈-岩石力学-研究 ②青藏高原-岩石圈-岩石结构-研究
IV.P587.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第044156号

青藏高原岩石圈力学强度与深部结构特征

QINGZANGGAOYUAN YANSHIQUAN LIXUEQIANGDU YU SHENBUJIEGOU TEZHENG

陈波 柳建新 陈超 著

责任编辑 刘石年 胡业民

责任印制 易红卫

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙鸿和印务有限公司

开 本 720×1000 1/16 印张 8.25 字数 154千字

版 次 2017年3月第1版 印次 2017年3月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5487-2728-6

定 价 40.00元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

为了及时总结“资源与灾害探查”湖南省高校创新团队的研究成果,柳建新教授组织团队中部分从事电(磁)法和深部地球物理研究的骨干人员,撰写了《地球物理计算中的迭代解法及其应用》《直流激电反演成像理论与方法应用》《大地电磁贝叶斯反演方法与理论》《频率域可控源电磁法三维有限元正演》《便携式近地表频率域电磁法仪器及其信号检测》《东昆仑成矿带典型矿床电(磁)响应特征及成矿模式识别》《青藏高原东南缘地面隆升机制的震学问题》和《青藏高原岩石圈力学强度与深部结构特征》共8本专著,集中反映团队最新的相关理论与应用研究成果。

本书首先介绍了青藏高原—喜马拉雅构造带的深部结构和岩石圈变形、岩石圈均衡、岩石圈力学强度研究进展等相关研究背景,然后详细阐述了基于地形和重力异常谱研究岩石圈力学强度的原理和方法,包括基于挠曲模型的均衡响应函数、挠曲变形解算、导纳法、相关法和 Fan 小波谱分析技术等,开展了平板模型和椭圆模型的正、反演模拟实验。利用最新卫星重力数据和高精度地形数据,采用 Fan 小波谱相关法估算青藏高原—喜马拉雅构造带的岩石圈有效弹性厚度的空间分布,进而采用各向异性的 Fan 小波获得了青藏高原东南缘地区各向异性的力学强度。结合已有的地质和地球物理资料,综合探讨青藏高原深部结构和变形隆升的动力学机制等问题。

本书可供重力学和地球动力学等相关研究人员和高等院校相关专业师生使用,也可供地震局、国土资源等部门专业人员参考阅读。

作者简介

About the Author

陈波，女，讲师，1985年9月生，2004年进入中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院地球探测与信息技术专业学习，先后获得学士和博士学位。2013年进入中南大学地球科学与信息物理学院从事博士后研究。2016年入选中南大学“升华猎英”计划。自2007年以来，一直从事卫星重力学、地球动力学、青藏高原形成与演化等研究。

柳建新，男，博士，教授，博士生导师。1962年5月出生，1979年考入中南矿冶学院应用地球物理专业。现为中南大学地球科学与信息物理学院副院长、新世纪百千万人才工程国家级人选、教育部新世纪优秀人才支撑计划获得者、教育部青年骨干教师、湖南省“121”人才、“地球探测与信息技术”学科带头人、湖南省有色资源与地质灾害探查重点实验室主任、中国有色金属信息物理工程研究中心主任、湖南省第九、第十届政协委员，兼任湖南省地球物理学会理事长、中国地球物理学会海洋专业委员会常务理事、中国地球物理学会工程专业委员会理事、湖南省第二届知识分子联谊会常务理事、《地质与勘探》编委、《物探化探计算技术》编委、《工程地球物理学报》编委。长期从事矿产资源勘探、工程勘察领域的理论与应用研究，在深部隐伏矿产资源精确探测与定位、生产矿山深部地球物理立体填图、地球物理数据高分辨处理与综合解释、工程地球物理勘察等方面具有稳定的研究方向并取得了大量的研究成果。

陈超，博士，教授，博士生导师，1982年毕业于原武汉地质学院，曾在荷兰国际空间测量与地球科学学院、美国堪萨斯大学进修、访问与合作研究。研究方向：重、磁资料处理和三维反演方法理论；精密重力监测与时变重力理论及应用；地球及行星岩石圈特征；综合地球物理数据解释技术与软件开发。主持和参加了多项国家自然科学基金项目、国际科技合作项目、国家“油气”专项、大洋资源评价、中国地调局新方法试点项目等基础课题，以及油气、矿山资源、矿山灾害等方面应用课题。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张懿	中国工程院院士	陈景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周廉	中国工程院院士	钟掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

陈春阳(教授 中南大学党委常委、副校长)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东 王飞跃

委员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 谭晓萍

陈灿华 胡业民 史海燕 刘 辉 谭 平

张 曦 周 颖 汪宜晔 易建国 唐立红

李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础，是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国，我国在有色金属研究领域，特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近30年来发展迅速，产量连年来居世界首位，有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时，有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出，对国外资源的依赖程度逐年增加，严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展，已探明的优质矿产资源接近枯竭，不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机，而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后，对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合有色金属科技图书的出版，对于提高我国有色金属工业的自主创新能力，促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用，确保我国有色金属产业的可持续发展，具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目，《有色金属理论与技术前沿丛书》计划出版100种图书，涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。《有色金属理论与技术前沿丛书》瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在《有色金属理论与技术前沿丛书》的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、科研院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王淀佐

2010年12月

前言

Foreword

青藏高原—喜马拉雅构造带是全球构造运动和岩石圈变形最活跃的陆—陆造山带。独特的构造特征和现今持续的造山运动使青藏高原—喜马拉雅构造带成为研究岩石圈变形和大陆动力学的天然实验室。尽管开展了大量科学实验和研究,但是目前对青藏高原岩石圈深部结构、地壳增厚和隆升的变形机制等关键动力学问题尚存在不同的认识,这些是地球动力学研究的热点。

岩石圈力学强度的空间变化能为研究青藏高原—喜马拉雅构造带的岩石圈深部结构和变形提供重要约束。岩石圈有效弹性厚度(T_e)作为岩石圈综合力学强度的指标,主要反映了岩石圈在长期(10^5 年以上)构造载荷作用下抵抗变形的能力,是研究大陆岩石圈大规模构造和岩石圈动力学的有力工具。研究岩石圈有效弹性厚度的空间变化,对于了解具有复杂地质构造和地壳形变的青藏高原—喜马拉雅构造带岩石圈的力学特征、深部结构和变形演化,进而对其动力学机制进行分析至关重要。

本书针对目前国内对青藏高原—喜马拉雅构造带岩石圈力学强度结构研究不足的问题,利用高精度的卫星重力模型和地形数据,采用 Fan 小波谱相关法,获得了青藏高原—喜马拉雅构造带岩石圈 T_e 空间分布特征,并细致地开展了青藏高原东南缘的 T_e 各向异性研究。结合地质、大地测量和其他地球物理资料得到了以下新认识:

(1) 不同中心波数 $|k_0|$ 的 Fan 小波反演的青藏高原—喜马拉雅造山带 T_e 空间分布趋势基本一致。连续的高 T_e 值分布在克拉通地区,例如印度地盾和塔里木盆地;而低 T_e 值主要分布在青藏高原和中国西南地区。研究发现:青藏高原南部地壳强度低,而岩石圈上地幔强度高,这一特点与印度板块的俯冲相关。在青藏高原中部和北部, T_e 值均较低,表明青藏高原中部和北部大部分地区具有弱地壳和弱地幔,特别是以力学强度弱为特征的东昆仑、阿尔金山和祁连山可能是容纳印度—欧亚大陆汇聚变形的主要地区。

(2) 岩石圈力学强度的横向变化指示了岩石圈深部结构的变化, 为确定高强度印度板块的俯冲前缘位置提供了一定参考依据。基于 T_c 的空间变化, 本书提出了高强度印度板块向青藏高原俯冲的北部边界模型: 在西部地区 ($70^\circ \sim 80^\circ \text{E}$), 印度岩石圈俯冲前缘可能到达了兴都库什山脉和塔里木盆地的西南边界; 中部 ($80^\circ \sim 87^\circ \text{E}$) 俯冲前缘沿着班公湖—怒江缝合带分布; 往东在 87°E 和 93°E 之间, 俯冲前缘往南移到了雅鲁藏布江缝合带; 在东部, 印度岩石圈的俯冲可能到达了羌塘地体和松潘甘孜地体东部。

(3) 青藏高原东南缘的岩石圈 T_c 及其各向异性的空间分布特征的研究表明, 青藏高原东南缘岩石圈综合力学强度低, 且具有显著的力学各向异性, 符合地壳流变形模式; 东南缘地区的 T_c 各向异性主要受现今的构造应力控制。由于印度板块的俯冲和刚性的四川盆地的阻挡, 青藏高原东南部处在强烈的挤压环境, 且岩石圈化石应变场 (*lithospheric fossil strain*) 与现今构造应力相关; 而低岩石圈强度的云南和印度支那地区(青藏高原东南部以南), 由于受到缅甸板块向中国西南地区俯冲的影响, 处于拉张环境, T_c 各向异性指示了 WNW—ESE 的拉张应力方向。两个地区可能存在不同的地球动力学机制: 即由高原东南部的碰撞后挤压构造环境转变到高原以南的云南地区由于缅甸微板块俯冲导致的弧后拉张环境。

本书得到国家自然科学基金(No. 41404061)、中南大学创新驱动项目(No. 2015CX008 和 No. 2016CX005)和中国博士后基金(No. 2014M552162 和 No. 2015T80888)资助, 在此谨表谢意。此外, 在本书的撰写过程中, 得到了德国波兹坦地学中心 Mikhail Kaban 博士、中国地质大学(武汉)杜劲松博士和梁青博士、中南大学孙娅博士和郭荣文博士等学者的大力支持和帮助, 特此感谢。

限于作者水平, 书中难免存在不足之处, 敬请读者批评和指正。

2016 年 9 月

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 青藏高原深部结构与岩石圈变形	(2)
1.2.1 青藏高原岩石圈结构和深部动力学	(3)
1.2.2 青藏高原东南缘岩石圈变形	(4)
1.3 岩石圈均衡	(5)
1.3.1 局部均衡和区域均衡	(5)
1.3.2 岩石圈力学强度与弹性厚度	(7)
1.4 岩石圈力学强度研究进展	(8)
1.4.1 岩石圈力学强度研究发展	(8)
1.4.2 青藏高原岩石圈力学强度研究进展	(12)
1.5 研究内容	(13)
第 2 章 地形和重力异常谱计算 T_0 的原理	(16)
2.1 弹性板模型的均衡响应函数	(16)
2.1.1 地表荷载均衡响应	(17)
2.1.2 地下荷载均衡响应	(18)
2.1.3 地表和地下荷载共同作用的均衡响应	(21)
2.2 挠曲变形解算	(22)
2.2.1 空间均一的 T_0 挠曲计算	(22)
2.2.2 空间不均一的 T_0 挠曲计算	(23)
2.3 地形和重力异常导纳函数	(26)
2.3.1 自由空气重力异常导纳函数	(27)
2.3.2 布格重力异常导纳函数	(31)
2.4 地形和重力异常导纳法	(32)

2.4.1	实测导纳	(32)
2.4.2	模型导纳	(32)
2.4.3	预测导纳	(34)
2.5	地形和重力异常谱相关法	(37)
2.5.1	实测相关度	(37)
2.5.2	理论相关度	(38)
2.5.3	预测相关度	(39)
2.6	各向同性小波谱分析	(40)
2.6.1	Fan 小波	(40)
2.6.2	Fan 小波相关法	(42)
2.6.3	Fan 小波导纳法	(44)
2.6.4	优化反演	(45)
2.7	各向异性小波谱分析	(46)
第3章	谱相关法模型实验	(48)
3.1	模拟地形和重力数据	(48)
3.1.1	分形模拟地形荷载	(48)
3.1.2	布格重力异常正演	(49)
3.2	小波谱相关法模型实验	(50)
3.2.1	平板模型	(52)
3.2.2	椭圆模型	(55)
第4章	青藏高原 T_e 与岩石圈结构	(59)
4.1	地质构造背景	(59)
4.2	数据及处理	(61)
4.3	青藏高原 T_e 空间分布特征	(63)
4.4	荷载比率	(71)
4.5	T_e 空间变化对青藏高原岩石圈结构的启示	(72)
4.5.1	印度地盾和青藏高原南部	(72)
4.5.2	青藏高原中部和北部	(74)
4.5.3	T_e 和青藏高原南部的俯冲结构	(75)
第5章	青藏高原东南缘 T_e 与岩石圈变形	(77)
5.1	T_e 分布与岩石圈结构	(79)

5.2 青藏高原东南缘 T_e 各向异性空间分布	(81)
5.3 T_e 各向异性和构造应力	(85)
5.4 T_e 各向异性和岩石圈应变	(86)
5.5 T_e 与岩石圈变形	(89)
第6章 结论和展望	(90)
附录1 挠曲差分系数推导	(92)
附录2 多层密度界面反演公式	(95)
参考文献	(98)

第1章 绪论

1.1 引言

地球岩石圈是指包括地壳和上地幔顶部在内的固体地球的外壳^[1]。岩石圈力学强度反映了岩石圈受长期构造加载作用(超过 10^5 年)的响应,是影响岩石圈变形和演化的主要因素之一^[2-4]。岩石圈力学强度可以通过有效弹性厚度(The effective elastic thickness, T_e)来量化^[5]。岩石圈有效弹性厚度定义为在地球真实的荷载作用下,能产生与实际岩石圈相等的挠曲变形的理论弹性薄板的厚度^[6]。从重力异常和地形的挠曲均衡分析获得的岩石圈有效弹性厚度是岩石圈流变强度在时间和深度上的综合反映^[2],其幅值大小表征了岩石圈综合力学强度的强弱。

在大洋中,岩石圈有效弹性厚度受控于 $450 \pm 150^\circ\text{C}$ 的等温面,因此大洋岩石圈 T_e 强烈依赖于岩石圈的热结构,并且 T_e 随着加载时岩石圈的年龄增加而增加^[6]。与简单的大洋岩石圈不同,大陆岩石圈是不均一、不连续、具有多层结构和复杂流变性质的复合体^[1],其岩石圈有效弹性厚度比大洋岩石圈更为复杂,主要受到岩石圈的成分、构造、热年龄和热结构等因素的综合影响^[2],并且没有特定的地质或物理界面与之对应。

大陆岩石圈有效弹性厚度主要反映了在山脉、冰川、火山和沉积层等载荷作用下,大陆岩石圈抵抗变形的能力,是研究大陆岩石圈大规模构造和岩石圈动力学的有力工具。对 T_e 的研究不仅可以了解一个地区是否经历热重建,提供岩石圈内部的热状态信息,而且 T_e 的横向变化能够揭示岩石圈深部结构特征,探索地球动力学机制和岩石圈内部圈层耦合关系(耦合或解耦)等,是当前大陆动力学研究中的热点。许多学者对欧洲、北美、南美以及非洲等前寒武纪巨型克拉通的岩石圈有效弹性厚度进行了研究,并根据 T_e 的空间横向变化开展了大量关于岩石圈演化及动力学机理的研究与探讨(例如 Banks 等^[7]、Zuber 等^[8]、Bechtel 等^[9]、Pérez - Gussinyé 和 Watts^[10]、Audet 和 Burgmann^[11]、Mouthereau 等^[12])。

青藏高原—喜马拉雅构造带是地球上最年轻的活动造山带,其中青藏高原被誉为“世界屋脊”,在近 300 万 km^2 的区域内海拔高达 5 km,地壳厚度达 80 km,以宏伟的喜马拉雅山、龙门山、祁连山和阿尔金山等为高原边界,与印度克拉通、华南陆块、华北克拉通和塔里木盆地等刚性块体相隔,是全球大陆构造变形和地

震活动最活跃的地区,它的形成、演化及隆升机制一直是国际地学研究的热点。一般认为,青藏高原—喜马拉雅构造带是70~50 Ma以来,印度板块与欧亚板块碰撞和持续汇聚的结果^[13, 14]。现今,青藏高原西南侧仍受印度板块向北碰撞俯冲,北部受到贝加尔裂谷带的张裂作用及西伯利亚陆块的向南推挤,东部则受到刚性的华北和华南陆块的阻挡。高原及周缘岩石圈变形强烈,深大断裂发育,地震和火山活动频繁,独特的构造特征和现今仍然持续的造山运动使青藏高原—喜马拉雅构造带成为研究岩石圈变形和大陆动力学的天然实验室。

尽管人们开展了大量科学实验和研究,但是对青藏高原—喜马拉雅构造带的深部结构、地壳增厚和隆升的变形机制、地壳和地幔的力学耦合程度以及大尺度地表形变的本质等关键动力学问题目前仍存在不同的认识^[14]。为了解释青藏高原—喜马拉雅构造带的变形隆升机制,一些动力学模型被提出,包括:印度大陆向亚洲大陆的下插、亚洲岩石圈南向俯冲于青藏高原之下、厚岩石圈地幔的拆沉和下地壳流等模型。这些岩石圈动力学模型不仅在深部结构上存在差异,而且其对应的岩石圈力学强度也存在显著不同。例如,冷的刚性印度板块下插入青藏高原可能形成强岩石圈地幔,并为地形荷载提供一个有力的支持^[15, 16]。此外,不同强度板块的相互作用能造成岩石圈力学强度的显著横向变化。地球动力学模拟^[17, 18]表明:在青藏高原内部和周边,强度异向性在确定变形的模式和变形聚集位置中起到重要作用。因此,确定力学强度的空间变化能为研究青藏高原—喜马拉雅构造带的岩石圈深部结构和变形提供重要约束。

本书基于高精度的地形测量和卫星重力模型数据,采用Fan小波谱相关法^[19]开展青藏高原—喜马拉雅构造带的 T_e 及其各向异性研究。结合地质学、地震学、地壳运动学和岩石圈热力学等研究成果,分析 T_e 及其各向异性横向变化的成因,深入探讨青藏高原—喜马拉雅构造带的岩石圈深部结构、变形模式和壳幔耦合状态等动力学问题,为进一步认识青藏高原隆升和演化提供重要的依据。

1.2 青藏高原深部结构与岩石圈变形

青藏高原—喜马拉雅构造带是由于印度板块和亚洲板块的碰撞形成的^[13, 20]。碰撞前,印度大陆和亚洲大陆曾被特提斯洋分隔,碰撞后特提斯洋俯冲到了亚洲板块南部边界之下。自碰撞以来,印度大陆已经嵌入亚洲大陆约3000 km,使得大量横向物质逃逸和地壳增厚,造就了地球上最高的地貌特征^[21, 22]。碰撞过程中约有1500 km的南北向缩短量是由地壳增厚的过程来吸收的,形成了平均厚度约70 km的青藏高原(两倍于正常地壳厚度),同时形成了印度板块与西伯利亚板块之间南北约2000 km、东西约3000 km的巨大范围的新生代陆内变形域^[20-23]并产生了大量的地质活动产物,如大规模逆冲断裂带、大型走滑断层、广

泛的岩浆作用和火山作用、显著的区域变质作用等,使得青藏高原—喜马拉雅构造带成为地球上岩石圈变形最强烈的地区之一。

1.2.1 青藏高原岩石圈结构和深部动力学

青藏高原及其周缘岩石圈深部结构和变形隆升的动力学机制一直是地学界研究的热点。20世纪80年代以来,地学界对青藏高原—喜马拉雅构造带开展了一系列国际合作的深部地质调查研究和实验^[24],包括:1980—1982年中法合作的“喜马拉雅地质构造与地壳上地幔的形成演化”研究^[25]、1986—1995年的“亚东—格尔木—额济纳旗南北地学大剖面”^[26-28]、1991—1992年中美合作的“地壳与岩石层的地震台阵研究计划”(PASSCAL)^[29,30]、1992—1998年中法开展的“青藏高原天然地震台网观测”^[31-34]、1992—2008年中美德加四国合作开展的“喜马拉雅山和青藏高原深剖面及综合研究”INDEPTH I~IV^[35-40]、2002—2005年的“穿越喜马拉雅山的地震探测”(Hi-CLIMB)^[41]、2008—2012年“中国深部探测技术与实验研究”SinoProbe^[42]等。这些实验研究包括深地震反射、地震测深、天然地震台阵、宽频及超深大地电磁等调查。研究结果提供了青藏高原内部地壳和地幔区域震相传播、上地幔剪切波各向异性、深地壳和岩石圈结构和变形的最新资料。

一些模型也被提出来解释青藏高原—喜马拉雅构造带变形和隆升的深部动力学机制^[1],主要包括:①印度板块向亚洲板块的俯冲下插模型^[43,44]。第一类观点认为,青藏高原的隆升是由于印度板块向北以低角度俯冲于青藏高原之下,形成双层地壳,在重力均衡作用下进行地壳物质的调整所致^[20,45]。第二类观点认为青藏高原的隆升是印度板块以高角度向北俯冲,伴随超高压变质岩的折返所致^[46]。②印度板块和亚洲板块的双向俯冲模型^[22,38]。③厚岩石圈地幔的拆沉作用^[47];④下地壳流或管道流模型^[14,17,48]。

在青藏高原南部,以印度板块向亚洲板块的俯冲下插为主导的模型已得到了大量观测数据和研究的支持。穿过喜马拉雅和青藏高原南部的反射地震研究揭示了喜马拉雅的主要构造,并反映出印度地壳穿越雅鲁藏布江缝合带俯冲到青藏高原地壳内部^[35]。剪切波各向异性研究^[49,50]显示:青藏高原中部的羌塘地体存在一个标志印度岩石圈地幔俯冲到羌塘地体中部的宽边界。Owens和Zandt^[44]利用P波速度推测印度岩石圈以低角度俯冲到青藏高原地壳之下。Kosarev等^[30]基于远震转换波提出了印度岩石圈向北倾斜插入青藏高原地幔。区域地幔P波成像显示:印度板块的俯冲前缘可到达班公湖—怒江缝合带附近^[51-53]。最近,Nábělek等^[41]揭示了喜马拉雅主逆冲断裂带从浅部的主前缘断裂向北以低角度插入喜马拉雅—青藏高原南部之下,连续延伸450 km抵达班公湖—怒江缝合带之下的上地幔,证实了沿着喜马拉雅主构造带,印度岩石圈以低角度和长距离(抵达班公湖—怒江缝合带)的单向俯冲模式起主导作用。