



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

青藏高原东南缘 地面隆升机制的地震学研究

SEISMIC STUDY ON MECHANISMS OF SURFACE UPLIFT
BENEATH THE SOUTHEAST TIBET

孙 娅 柳建新 钮凤林 著
Sun Ya Liu Jianxin Niu Fenglin



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

青藏高原东南缘 地面隆升机制的地震学研究

SEISMIC STUDY ON MECHANISMS OF SURFACE UPLIFT
BENEATH THE SOUTHEAST TIBET

孙 娅 柳建新 钮凤林 著
Sun Ya Liu JianXin Niu FengLin



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

青藏高原东南缘地面隆升机制的地震学研究/孙娅,柳建新,钮凤林著.
—长沙:中南大学出版社,2015.10
ISBN 978-7-5487-2085-0

I. 青... II. ①孙... ②柳... ③钮... III. 青藏高原-地面-隆起-地震学-研究 IV. TF812

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第296047号

青藏高原东南缘地面隆升机制的地震学研究

孙 娅 柳建新 钮凤林 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 长沙超峰印务有限公司

☐开 本 720×1000 1/16 ☐印张 10.25 ☐字数 194千字

☐版 次 2015年10月第1版 ☐印次 2015年10月第1次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2085-0

☐定 价 50.00元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

本书详细介绍了青藏高原东南缘地区的地质构造、地面隆升的动力学模型。为了进一步研究该地区地壳变形和地面隆升的主要动力学机制,本书充分利用中国地震局在青藏高原东南缘的数字台网和其他台网所观测的地震波形资料,首先,采用最新的地震学分析技术——接收函数综合分析方法估算地壳各向异性,进而采用改进的 $H-k$ 叠加方法计算地壳厚度及地壳内纵横波速比。然后对比了地壳各向异性和 SKS 横波分裂参数,论证了地壳各向异性在 SKS 分裂中的比例。最后采用有限频层析成像方法反演上地幔地震 S 波的三维精细速度结构。结合已有的地质和地球物理资料,综合研究青藏高原东南缘壳-幔运动耦合特点、地壳形变、地表运动的主要动力学机制等问题。

本书可供数字地震学和区域地震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、国土部门等专业人员参考阅读。

作者简介

About the Author

孙 娅 女，博士，1984 年生，中南大学讲师。自 2003 以来，在中南大学地球科学与信息物理学院学习。2010 年 10 月—2012 年 11 月，受国家留学基金委的资助，赴美国莱斯大学(Rice University)进行博士联合培养学习。2013 年 5 月获中南大学博士学位，同年 7 月进入中南大学地球科学与信息物理学院工作。主要从事深部地震学和地球动力学研究，主要研究对象为地震波接收函数、地壳各向异性、地震波层析成像等。

柳建新 男，博士，1962 年 5 月出生，博士生导师。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、湖南省第九届、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深入研究并取得了大量的研究成果。

钮凤林 男，博士，1966 年 12 月 20 日出生，博士生导师，“千人计划”入选者，美国莱斯大学教授，目前在中国石油大学(北京)非常规天然气研究院工作，是非常规天然气地球物理探测学科的学术带头人。美国地球物理学会(AGU)会员，美国地震学研究联合会全球地震台网常务委员会委员，美国国家自然科学基金会

评审委员会委员，美国国际开发署中东地区合作计划地质科学基金会评审委员会委员，中国地震学会英文版杂志《地震科学》编委，《自然》科学报告编委。主要从事地球深部结构和动力学研究，主要研究对象为地幔、核-幔边界的精细结构以及内核的三维构造和各向异性。近年来在完善前期研究成果的同时，主要从事地震发生机制的研究，包括地壳和岩石圈的构造及演化、震源破裂过程的成像及反演以及利用主动和被动震源对断层内应力和应变的监测等。

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原总经理)

副主任

邱冠周(教授 中国工程院院士)

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 湖南省新闻出版广电局副局长)

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的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技术方面的新理论、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、研究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

大陆地壳和岩石圈的组成、结构及其内部形变不仅仅是决定地表构造活动的关键,也是揭开大陆动力学演化的重要内容。在过去 50 Ma 间,印度板块与欧亚板块发生碰撞,使青藏高原产生强烈的变形和断裂作用,形成了地球上最壮观且最年轻的造山带,从而造就了该地区独特的地质构造。而作为青藏高原变形的前缘位置,青藏高原东南部地区受印度板块的挤压力作用和来自喜马拉雅弧、缅甸弧的俯冲,东部和北部受扬子板块和华北克拉通阻挡,发生了强烈的挤压变形。尤其是自新生代以来地壳受挤压缩短加厚,强烈隆起,同时向东南方向侧向流动,特别是第四纪以来该过程持续加大,使得该区域的地壳聚集了强大的应力。应力高度集中于边界的断裂带附近,并在挤压过程中,该地区东部受扬子板块的阻挡,形成复杂的地质现象。所以青藏高原东南缘的地壳和上地幔的精细结构,对研究青藏高原的抬升乃至整个大陆动力演化具有重要意义。

本研究充分利用中国地震局在四川、云南、广西、贵州、广东、湖南等区域,自 2007 年 7 月到 2010 年 7 月共四年的宽频数字台网和其他台站所观测的地震波形资料,采用接收函数计算 Moho 面深度(莫霍洛维奇不连续面)和地壳内纵横波速比(V_p/V_s),并在接收函数的基础上引入了一种新的综合性方法计算了地壳各向异性参数。该综合性方法基于地壳各向异性介质中 Moho 面 Ps 转换波的到时,在径向分量和切向分量的接收函数所展现出的性质和谐波分析,估算横波分裂的快波方向和分裂时间。发现在青藏高原东南缘的台站横波分裂时间变化较大,为 0.24 ~ 0.9 s 不等。而在相对青藏高原东南边缘较远的其他台站

并没有发现地壳内部具有各向异性。同时 Moho 面深度和 V_p/V_s 比值自青藏高原东南边缘向东南方向逐渐变薄变弱。表明青藏高原东南部相对其周围区域含有丰富的铁镁质岩或存在部分熔融。该结果为青藏高原东南地区存在的下地壳流模型提出了最新的地球物理证据。同时对比了上地幔 SKS/SKKS 分裂结果,发现地壳各向异性快波分裂方向与 SKS/SKKS 的上地幔处快波分裂方向基本一致,并且分裂时间与上地幔分裂时间几乎相同,说明青藏高原东南部地区地壳各向异性可能是 SKS/SKKS 横波分裂的主要贡献者。这表明上地幔构造可能是弱变形或者存在地壳与上地幔形变的解耦构造。

另外,将该接收函数综合计算地壳各向异性的方法应用到龙门山地区的地震台网数据上,计算了龙门山地区的地壳结构信息。从该研究区域 58 个台站中测量到 21 个台站下方具有明显的地壳各向异性,分裂时间从 0.22 ~ 0.94 s 分布,平均分裂时间是 0.57 s。地壳各向异性的快波方向在龙门山地区主要呈现西北 - 东南方向。对比了 GPS、SKS 分裂结果,发现龙门山地区的地壳各向异性主要来自于下地壳的构造变形。结合以往的地球物理研究和龙门山地区的陡峭的深断裂带地质背景,提出了在龙门山地区由于青藏高原物质的东向挤压和四川盆地的阻挡,地壳流从中下地壳顺着大的陡峭的深断裂带涌向上地壳,造成了龙门山地区的抬升,这也可能是造成青藏高原东南缘抬升的动力学机制。

为了进一步了解地壳与上地幔结构关系,解析上地幔岩石圈对地表抬升的作用,本研究在已知地壳信息的基础上,又采用有限频层析成像技术反演了该地区上地幔 S 波三维速度结构。由分析测量两台站所接收到穿越地球内部的地震波到时差,反演两个台站下方的构造。计算过程中选择 3 种不同频段的地震 S 波进行综合反演,分别是高频 0.1 ~ 0.5 Hz、中频 0.05 ~ 0.1 Hz、低频 0.02 ~ 0.05 Hz。为了扩大研究区域,本研究改进了台站对的选择方法,保证每个台站在反演矩阵中拥有合适比值。以每一个地震事件中的所有台站对首尾相连形成一个闭合圈,同时保证两个相邻台站间的地表距离大于 200 km。本研究共选用 3 种不同地

表距离分别是 200 km、300 km、400 km 的走时差进行联合反演。这样既保证了射线较好地覆盖研究区域也保证了反演结果精细可靠。其结果表明四川盆地具有约 350 km 深的大陆根,在扬子地块的转换带处存在高速异常,这可能与古老的太平洋板块俯冲有关。除此之外,层析成像结果还显示出在青藏高原东南边缘存在一个连续的高速异常体,它沿着东经 100° 和 101° 由南往北连续分布,从北纬 27° 约 100 km 深处到北纬 32° 附近约 350 km,其正上方覆盖着低速异常体,这种倾斜类似俯冲的高速异常体可能是由于印度板块的东北向俯冲所形成的。尽管本研究结果还需要更多证据来证实,但这些新发现为岩石圈拆沉造成高原抬升提供了有力的佐证。

针对以上研究,本专著对青藏高原东南部地区的抬升有了一个综合认识。在印度板块与欧亚板块碰撞之后,青藏高原东南部地区由于印度板块的挤压力作用,在青藏高原地壳内出现下地壳流,造成了青藏高原的逐步抬升。另一方面来自于印度板块俯冲到欧亚板块中的密度大的物质在重力作用下与岩石圈上部发生了部分拆沉现象,破坏了来自于岩石圈底部重物的牵引力作用,形成了岩石圈拆沉机制,从而使得岩石圈以上的地层被抬升。由此可知,青藏高原的地表抬升是多阶段非均匀、不等速过程,是包括有下地壳流和岩石圈部分拆沉等多种动力学机制联合作用的产物。

在该研究过程中特别感谢刘华峰博士、陈敏博士、唐有才副教授、李川博士等给予了数据的支持、方法的指导以及资料的分析等帮助,为完成本专著提供了详尽细致的指导意见,在此向诸位专家表示衷心的感谢。

本书得到国家自然科学基金(No. 4140040242)、中南大学创新驱动项目基金(No. 2015CX008)和中国博士后基金(No. 2014M552147)资助,在此一并致谢。

孙 娅

2015-10-29

目录

Contents

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 青藏高原岩石圈结构	2
1.2.1 地壳增厚与高原隆升	3
1.2.2 岩石圈拆沉与板块剥离	5
1.3 青藏高原东南缘的地质构造背景及其动力学模型	5
1.4 地震波各向异性的研究进展	9
1.5 地震波层析成像的发展	12
1.6 研究的内容与目标	14
1.6.1 研究内容	14
1.6.2 研究目标	15
第2章 接收函数及其叠加方法	16
2.1 接收函数的概念	16
2.2 接收函数理论	17
2.3 接收函数提取	19
2.4 地壳内部转换波走时的计算	20
2.5 Moho 面深度叠加和 $H-k$ 叠加方法	21
2.5.1 时差校正	22
2.5.2 深度叠加确定 Moho 面深度	23
2.5.3 $H-k$ 叠加确定 Moho 面深度和 V_p/V_s 比值	24
第3章 地震波各向异性的基本理论及研究方法	30
3.1 地震波各向异性的成因	30
3.2 地震波各向异性的类型	32

3.3 地震波各向异性的研究方法	33
3.3.1 Rayleigh 面波的频散方法	34
3.3.2 横波分裂方法	34
3.3.3 接收函数中 Moho 面 Ps 转换波方法	36
3.4 横波分裂与构造动力学之间的关系	37
3.5 小结	37
第4章 接收函数集计算地壳各向异性	39
4.1 接收函数生成和时差校正	39
4.2 各向异性介质下 Moho 面 Ps 转换波的方位角变换特征	40
4.3 单个接收函数的剪切波分裂	43
4.4 接收函数集的剪切波分裂	44
4.5 谐波分析 Moho 面 Ps 转换波	51
4.6 小结	52
第5章 青藏高原东南缘地壳结构分析	55
5.1 研究区域内地震数据来源	55
5.2 青藏高原东南缘地壳厚度、 V_p/V_s 比值及地壳各向异性分析	61
5.2.1 地壳厚度	63
5.2.2 V_p/V_s 比值	65
5.2.3 地壳各向异性	66
5.3 龙门山地区地壳厚度、 V_p/V_s 比值及地壳各向异性分析	70
5.3.1 地壳厚度与 V_p/V_s 比值	71
5.3.2 Moho 面 Ps 转换波分裂的来源	73
5.3.3 地壳各向异性与 GPS、SKS 分裂、APM 的对比	74
5.3.4 地壳各向异性与构造变形	75
5.4 小结	76
第6章 有限频层析成像研究上地幔构造	78
6.1 有限频层析成像的原理	79
6.1.1 地震波射线理论(Ray Theory)	79

6.1.2 香蕉甜甜圈理论 (Banana - Doughnut Theory)	80
6.2 初始相对到时的计算	82
6.3 台站对的选择	85
6.4 地壳信息的校正	89
6.5 模型参数化反演	91
6.6 检测板分析	92
6.7 小结	94
第7章 青藏高原东南缘上地幔 S 波三维速度结构分析	98
7.1 研究区域内地震数据	99
7.2 层析成像水平切片结果及分析	106
7.2.1 62 ~ 125 km 深度的切面图	106
7.2.2 125 km ~ 219 km ~ 281 km 深度的切面图	109
7.2.3 281 km ~ 312 km ~ 500 km 深度的切面图	109
7.3 层析成像纵向切片结果及分析	110
7.3.1 沿东经 100°层析成像剖面结果分析	110
7.3.2 沿东经 101°层析成像剖面结果分析	112
7.3.3 沿东经 102°、104°层析成像剖面结果分析	113
7.3.4 (E98°, N27°)—(E104°, N35°)和 N26°层析 成像的纵切面结果分析	114
7.3.5 华南板块下方转换带处的高速异常结果及 分析	116
7.4 青藏高原东南部地区三维构造的讨论	118
第8章 结论及建议	121
8.1 结论	121
8.2 建议	122
附录	123
参考文献	130

第1章 绪论

1.1 引言

大陆地壳和岩石圈的组成、结构及其内部形变的研究不仅是决定地表构造活动的关键,也是揭开大陆动力学演化规律的重点。中国大陆地壳有着复杂的地质构造,是世界上研究造山带、高原、盆地形成和演化的理想环境之一。在过去 50 Ma 间,印度板块与欧亚板块发生碰撞,使青藏高原产生强烈的变形和断裂,形成了地球上最壮观且最年轻的造山带,从而造就了该地区独特的地质构造。而作为青藏高原变形的前缘位置,青藏高原东南缘受印度板块的挤压力作用和来自喜马拉雅弧、缅甸弧的俯冲,东部和北部受扬子板块和华北克拉通的阻挡,发生了强烈的挤压变形。尤其是自新生代以来地壳受挤压缩短加厚,强烈隆起,同时向东南方向侧向流动,特别是第四纪以来该过程持续加大,使得该区域的地壳聚集了强大的应力。应力高度集中于边界的断裂带处,在挤压过程中由于该地区东部受扬子板块的阻挡,形成复杂的地质现象。所以青藏高原东南缘的地壳和上地幔的精细结构,对研究青藏高原的抬升乃至整个大陆动力演化具有重要意义。

地球内部物质弹性变化的规律与岩石演变过程、地质作用有密切关系。在深部复杂的地质作用力下,岩石结构会发生不可逆的结构变化,如岩、矿石物质颗粒的定向排列,就形成了物理参数意义上的各向异性,目前越来越多的野外地震资料和实验岩石样品测试结果证实,地壳内部的岩、矿石在外力作用下对地震波速度表现为地震波各向异性^[1]。地震波速度各向异性的程度常用横波分裂的两个速度差除以最大速度或最小速度的百分比来表示(以下地震波各向异性简称各向异性)。现在观测到的地球内部各向异性现象主要集中在地壳、上地幔(浅部 220 km 的范围内)和地核内^[2]。主要有方位各向异性,地震波速度随传播方向发生变化;横波分裂,两种偏振的 S 波以不同时间到达所产生的差异性;勒夫波和瑞利面波频散之间的不一致性;以及薄互层与裂隙定向分布产生的视各向异性等。地震波各向异性的观测结果可以提供地下矿物的性质、各向异性介质的内部结构和地球内部物质流动或运动方式等多方面的信息,是对地球内部动力学过程的反映。地球内部的各向异性与地下构造密切相关,所以各向异性在了解地壳和上地幔的演化中起着越来越重要的作用。

用地震资料来探索地球、了解地球内部结构是现代地震学研究的主要任务之