

ZAOSHAN DE GAOYUAN

造山的高原

——青藏高原及其邻区的宽频地震探测与地壳上地幔结构

姜 枚 王有学 钱 辉 等著

地质出版社

造 山 的 高 原

——青藏高原及其邻区的宽频地震 探测与地壳上地幔结构

姜 枚 王有学 钱 辉 等著

参加撰写与相应工作的人员：

吴良士 王亚军 张春贺 史大年 薛光琦
魏素花 李海鸥 宿和平 吕庆田 董英军
王俊峰 孙 懿 张立树 李庆庆 赵 磊等

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

利用便携式数字宽频带地震仪器探测地壳上地幔结构是在20世纪90年代初开始在青藏高原逐步扩大研究的一项深部探测计划。近十年来,国内外许多国家研究所和高等学校的研究人员参加了这方面的合作研究。本书主要围绕中国地质科学院系统在过去廿年时间里,与法国、美国以及其他一些国家合作或独立进行的研究项目,介绍进行探测研究的工作方法、数据处理、资料解释以及对深部构造若干问题的认识与推断。它既是以往研究工作的实际记录,也是有关研究成果的汇集,书中还尽可能地收集其他部门探测研究的成果。

本书共七章,其中介绍了近廿年几乎遍布青藏高原的工作路线和研究的基本状况,总结了近廿年快速发展的宽频带天然地震探测技术的发展状况,并对目前使用较多的资料处理的方法如地震层析、接受函数及各向异性、震源定位、近震地震广角反射处理方法等有关方法的处理结果做了具体分析;从第2章到第7章分别介绍了历年在青藏高原及其邻区进行宽频地震探测的实施的成果,包括:西藏定日-康马-唐古拉山-青海格尔木剖面,青海茫崖-新疆若羌剖面,新疆克拉玛依-库车剖面,青海共和-玉树剖面(含人工爆破地震的结果),新疆叶城-西藏狮泉河剖面,新疆富蕴-库尔勒剖面,以及尼泊尔-西藏改则-鲁谷剖面。

在这些剖面的研究结果中,我们可以了解到在深达数百千米深度范围内地壳和上地幔的结构特征,建立了处于青藏高原腹地、南北边缘和其他重要构造位置的速度结构模型图;给出地壳速度结构 Moho 面、岩石圈底界面以及上地幔转换带 410km, 660km 界面的若干特征及其地质意义,并以实际资料为依据给出了合理的解释和相应的推断。

本书可供从事构造地质、地球物理探测、深部构造研究、地震资料处理的地质工作者,特别是在青藏高原工作的地质工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

造山的高原:青藏高原及其邻区的宽频地震探测与
地壳上地幔结构/姜枚等著. —北京:地质出版社,
2009.12

ISBN 978-7-116-06428-7

I. ①造… II. ①姜… III. ①青藏高原—地震勘探②
青藏高原—上地幔—地质构造 IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 235380 号

ZAOSHAN DE GAOYUAN; QINGZANG GAOYUAN JIQU LINQU DE KUANPIN
DIZHEN TANCE YU DIQIAOSHANGDIMAN JIEGOU

编辑编辑:白 铁 王大军

责任编辑:白 铁 于春林

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

咨询电话:(010)82324538(总编室);(010)82324579(编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印刷:北京大地彩印厂

开 本:889mm×1194mm $1/16$

印 张:13.75

字 数:420 千字

印 数:1—1000 册

版 次:2009 年 12 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:60.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-06428-7

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序 言

青藏高原是具有特殊几何形态和地貌景观的、正在快速隆起的世界上最高、最厚和最新的大陆地块。青藏高原由诸多的地体组成,经历了特提斯洋盆演化及多地体/多岛弧拼合、多俯冲/多碰撞/多造山的长期动力学过程。在印度/亚洲碰撞之前,其前身是早古生代以来形成的巨型复合碰撞造山拼贴体,印度/亚洲碰撞导致的青藏高原隆升是地球上新生代最壮观的事件,形成一望无垠的高原地貌及周缘为高峻陡峭、剧烈起伏的山链所构筑的屏障。因此青藏高原又被称为“造山的高原”。青藏高原的魅力使其成为地学家们的永恒课堂,成为当今“大陆动力学”研究的最佳实验室和窗口。

青藏高原的研究经历了100多年的历史,20世纪80年代开始,《造山的高原-青藏高原原地体拼合、碰撞造山和高原隆升》的主要作者许志琴和杨经绥等分别参与李廷栋、肖序常为首的中法喜马拉雅科考队及姜春发为首的青藏高原科考队(国内),进行了青藏高原南部及腹地的地质考察。90年代中法新一轮的青藏高原国际地学合作开始向青藏高原继续进军,由许志琴院士、杨经绥研究员、姜枚研究员等中方科学家和马托耶教授、达波尼埃教授、伊恩教授、维特列教授等法方科学家,联合开展了青藏高原全区多学科的地质考察和研究,运用新的深部地球物理探测技术,包括随后与美国等多国合作的宽频地震剖面在内,完成了横穿青藏高原的地震层析剖面超过上万公里。青藏高原及邻区完成的宽频地震剖面主要是:

- 1) 西藏定日-唐古拉山口地震探测剖面;
- 2) 西藏唐古拉山口-青海格尔木、锡铁山地震探测剖面;
- 3) 青海茫崖-新疆若羌地震探测剖面;
- 4) 新疆克拉玛依-库车地震探测剖面;
- 5) 青海共和-玉树地震探测剖面;
- 6) 新疆叶城-西藏狮泉河宽频地震探测剖面;
- 7) 新疆富蕴-乌鲁木齐-库尔勒-若羌宽频地震探测剖面;
- 8) 青海-甘肃祁连山南北台阵;
- 9) 西藏改则-喜马拉雅山-尼泊尔、印度边界的剖面及藏南的台阵。

20年来,我们艰苦涉足的主要地区包括松潘-甘孜、祁连山、阿尔金山、东-西昆仑、巴颜喀拉山、羌塘-唐古拉山、可可西里、喀喇昆仑山和喜马拉雅山。在青藏高原的调查和研究中,以“大陆动力学”为主导,“地体拼合与碰撞造山”为主线,以解决与青藏高原碰撞动力学有关的关键地质学问题为出发点,以多学科和结合、交叉及新技术为手段,以获取大量的第一性翔实资料和数据为基础,在青藏高原结构、构架、变质基底、地体边界及缝合带、

超高压变质带、大型走滑构造、地体拼合和碰撞的长期活动过程、青藏高原的形成、青藏高原 400km 深度范围内的岩石圈和地幔结构的揭示以及青藏高原地体形成的深部驱动力模式等方面,取得一系列新的认识及创新性的丰硕成果。《造山的高原-青藏高原及其邻区的宽频地震探测与地壳上地幔结构》正是介绍了青藏高原进行深部探测的成果。

无数次走进青藏高原,无数次领略高原的风采。艰险和拼搏,发现与考证,追索与探究,汇聚与碰撞,失败与成功,集成了《造山的高原》这两部专著。意将我们这支长期活跃在“青藏”舞台上,对“青藏”事业永不放弃的科研群体的辛苦和成果,献给青藏高原,献给研究高原的同仁,献给关心高原的人们!

以青藏高原陆壳结构、动态行为和驱动力为主导的青藏高原大陆动力学的研究,通过微观/宏观、物质/机制、定性/定量、几何学/运动学/动力学、浅部/深部,以及地质/地球化学/地球物理的多学科和多方位的研究,确立青藏高原基本构造格架、地体结构、地体边界、变形构造体制以及地体相对运动;重塑印度/亚洲碰撞前和碰撞后的地体拼合、碰撞造山、大型走滑、高原的隆升及周缘造山带的崛起,揭示青藏高原深部地壳和地幔结构的和驱动力,阐明青藏高原是一个特殊的“造山的高原”。

中国科学院院士:

许志宁

前 言

青藏高原雄伟的气势、迷人的景观、独特的位置以及种种神秘的过去和未来,长期以来吸引着世界上各方面科学工作者的关注,为揭开高原的秘密投入了大量的精力与物力。在 20 世纪 90 年代新一轮青藏高原的研究热潮中,我国与法国、美国、德国、尼泊尔等国的合作在高原广泛地展开了。在众多地质地球物理调查中,宽频地震探测由于其探测深度大,适于在特别恶劣的环境下工作以及花费较少等优势而成为 20 世纪 90 年代以来在青藏高原得到了迅速发展的一个领域,从而改变了人工爆破地震的一统天下,获得了大量新的深部资料,而且已经成为研究岩石圈的最重要的手段。

过去的十几年里,以中国地质科学院为主的研究项目所完成的宽频地震剖面遍布了青藏高原的大部分地区,这本书正是总结了该项工作相应的成果。虽然许多工作尚待深入,但是本着实事求是的精神,本书大致按工作剖面介绍了宽频地震探测的方法技术、台站设计、资料处理与成果解释及其地质意义。据粗略统计在青藏高原近十几年来获取的宽频地震的数据量近 2500G,剖面长度已达上万千米,布设的台站总数超过了 500 台次,如此大量的实际资料所包含的信息是非常丰富的,目前的结果是初步的,尚有多方面资料有待利用,而且已经做过的工作随着方法本身的发展、随着人们对许多地质问题认识的提高,还会再次处理原有数据,继续加深已有的认识,提供出更新的成果。因此,本书依据掌握的资料做出的解释不可能是全面和唯一的,但是本书将忠实地反映出实际探测结果。作者的心愿是通过本书能够提供给读者一份今后工作的参考。

继 20 世纪 80 年代第一次中法合作之后,自 1992 年开始的第二轮中国与法国合作的青藏高原地学研究项目是依据两国政府间协议进行的科技合作的组成部分,青藏高原岩石圈探测研究的中国方面负责人是中国地质科学院地质研究所许志琴院士,法方负责人是 Paul Tappouner,由国土资源部和法国科研中心资助。从 1992~2005 年先后完成了西藏南部定日、康马-唐古拉山-格尔木,西藏若羌-青海茫崖,新疆克拉玛依-库车,青海共和-玉树,以及新疆叶城-西藏狮泉河等多条剖面。

印度板块和欧亚板块的碰撞不仅造就了青藏高原,使地壳增厚、高原隆升,而且直接影响到了青藏高原的周边地区,对于远离碰撞带的新疆广大地区山脉盆地结构的形成与发展都有重大作用,因此,研究工作在青藏高原北缘和新疆地区都进行了相应的工作。由国家“305”项目办资助,中法合作进行了新疆克拉玛依-库车的宽频地震探测;随后又得到“305”项目办支持,作为新疆国家“973”项目的组成部分,由中国地质科学院承担并完成了新疆富蕴-库尔勒剖面的宽频地震探测。

作为中法地球物理探测部分的负责人分别是法国地震学家 A. Hirn, G. Poupinet, G. Wittlinger 等人, 中方负责人是姜枚研究员。

在 2001 ~ 2005 年期间, 由中国地质科学院地质研究所与美国伊利诺大学、俄立冈大学合作进行了穿越喜马拉雅山的宽频地震探测, 这是第一次进入喜马拉雅山南侧在山脉两侧同时进行地震探测的一条剖面, 该项工作以密集的台站、长达 5 年的观测, 获取了大量数据, 提供了新的研究结果, 也奠定了进一步深入工作的基础。该项研究由中国国土资源部、中国地质调查局和美国基金会提供了支持。

与此同时地质研究所有关人员在祁连山南北地区、在塔里木边缘地区布设台站进行观测, 目的在于补充已有剖面尚未涉及的地段, 以求更全面地研究青藏高原。到目前为止, 在青藏高原完成的宽频地震探测已覆盖了高原的大部分地区, 虽然仍然存在“空白地区”, 但是目前的工作已经为全面研究青藏高原打下了良好的基础。这也是我国十几年青藏高原地震探测的重要积累。

本书共分 7 章, 各章参加相应工作和编写执笔分工如下: 前言由姜枚撰写; 第一章由姜枚、吴良士撰写; 第二章由姜枚、A. Hirn、史大年、吕庆田、薛光琦、董英君撰写; 第三章由姜枚、史大年、张春贺撰写; 第四章由王有学、姜枚、钱辉、薛光琦撰写; 第五章由姜枚、李海鸥、王亚军、魏素花撰写; 第六章由钱辉、薛光琦、姜枚、王有学、董英君撰写; 第七章由姜枚、钱辉、王有学撰写。全书由姜枚主编、吴良士审核。参加编辑、作图、校对等工作的还有王俊峰、孙懿、张立树、李庆庆、赵磊等同志。

目 次

序 言

前 言

第一章 1992~2005 年青藏高原的深部探测概况	(1)
第一节 青藏高原合作研究概况	(1)
第二节 研究区地质构造概述	(3)
第三节 区域磁场、负磁异常、区域重力场特征	(12)
第二章 青藏高原中段西藏定日-青海格尔木的天然地震探测与深部构造	(21)
第一节 研究概况	(21)
第二节 接收函数反演、各向异性、地震层析成像	(22)
第三节 壳幔结构与地幔转换区上下底界面的研究	(40)
第三章 青海茫崖-新疆若羌天然地震探测剖面及深部构造研究	(44)
第一节 研究工作概况	(44)
第二节 接收函数、地震层析、震源定位、各向异性特征	(49)
第三节 阿尔金地区深部构造特征	(55)
第四章 青海共和-玉树地区地震探测结果与地壳上地幔结构	(58)
第一节 工作区及地质概况	(58)
第二节 爆破地震测深	(60)
第三节 地震层析、接收函数、上地幔各向异性研究	(75)
第四节 青藏高原东北部地壳深部速度结构与构造特征	(85)
第五章 新疆天山地区地壳上地幔构造研究	(97)
第一节 研究区概况	(97)
第二节 宽频带地震接收函数、地震层析、各向异性处理	(102)
第三节 天山地区的深部构造	(123)
第六章 新疆叶城-西藏狮泉河的地震探测	(129)
第一节 地质背景与工作概况	(129)
第二节 地震层析反演与结果	(131)
第三节 上地幔各向异性研究	(138)
第四节 接收函数反演与结果	(143)
第七章 穿越喜马拉雅山的宽频地震探测	(151)
第一节 研究概况	(151)

第二节	近震的震相分析与喜马拉雅构造带的地壳结构	(158)
第三节	远震事件的接收函数反演与地壳结构	(168)
第四节	远震事件的接收函数偏移结果与深部构造	(173)
第五节	远震事件的地震层析方法处理与结构模式	(177)
第六节	穿越喜马拉雅造山带的宽频地震探测资料的综合解释与地壳上地幔结构模式 ...	(181)
结束语		(192)
参考文献		(193)
英文摘要		(209)

CONTENTS

Preface

Introduction

Chapter 1 Overview of Deep Profiling on Qinghai-Tibet Plateau from 1992 to 2005	(1)
1.1 Overview of cooperation research on Qinghai-Tibet Plateau	(1)
1.2 The summary of the geological structure in research areas	(3)
1.3 Regional magnetic field, negative magnetic anomaly, the features of regional gravity field	(12)
Chapter 2 Teleseismic Profiling and Deep Tectonic from Dingri in Tibet to Germu in Qinghai	(21)
2.1 Research summary	(21)
2.2 The resets from receiver function, anisotropy, seismic tomography	(22)
2.3 Crust-mantle structure and the research on the upper and the lower bottom interface of mantle transposition zone	(40)
Chapter 3 Teleseismic Profiling and Deep Tectonic from Mangai in Qinghai to Ruoqiang in Xinjiang	(44)
3.1 Research summary	(44)
3.2 The resets from receiver function, seismic tomography, hypocenter location and anisotropy	(49)
3.3 The deep tectonic characters of Altun area	(55)
Chapter 4 The Results of Seismic Survey and Crust and Upper Mantle Structure from Gonghe to Yushu in Qinghai	(58)
4.1 Research areas and its geological overview	(58)
4.2 Explosion seismic probing	(60)
4.3 Seismic tomography, Receiver function and the anisotropy of upper mantle	(75)
4.4 The deep crust-velocity structure and tectonic characters of north-east Qinghai-Tibet Plateau	(85)
Chapter 5 The Research of Crust and Upper Mantle of Tianshan Area in Xinjiang	(97)
5.1 Research summary	(97)
5.2 Using Receiver function, Seismic tomography and Anisotropy to process the broadband data	(102)
5.3 The deep tectonic of Tianshan area	(123)

Chapter 6 Seismic Survey from Yecheng in Xinjiang to Shiquanhe in Tibet	(129)
6.1 The geological background and work summary	(129)
6.2 Seismic tomography and result	(131)
6.3 Anisotropy of the upper mantle	(138)
6.4 Receiver function and result	(143)
Chapter 7 Broadband Seismic Survey through Himalayas (Hi-CLIMB)	(151)
7.1 The overview of research	(151)
7.2 Local seismic phase analysis and the crust structure of Himalayan tectonic belt	(158)
7.3 The result of teleseismic receiver function inversion and crust structure	(168)
7.4 The result of teleseismic receiver function migration and deep struture	(173)
7.5 Teleseismic tomography and structural model	(177)
7.6 The integrated interpretation of broadband seismic data through Himalayan Orogen and the structural model of crust and upper mantle	(181)
Conclusion	(192)
References	(193)
Abstract	(209)

第一章 1992~2005年青藏高原的 深部探测概况

第一节 青藏高原合作研究概况

20世纪80年代,中国与法国在我国青藏高原对某些地区的地层、古生物、岩浆岩、构造及地球物理等方面进行了首次合作研究,经过双方五年多的努力,取得了很大进展,为揭示世界屋脊的奥秘和开展国际合作研究迈出了可喜的一步。20世纪90年代初,随着我国改革开放的深入和中法两国关系的发展,两国又签订了中法政府间新的科技合作协议,并在1992年开始了新一轮青藏高原岩石圈合作研究,且同时中国地质科学院与美国、法国、瑞士、尼泊尔等国进行了合作,使青藏高原的合作研究继续进行着。

中法合作研究任务是由国土资源部及中国地质科学院的有关研究所与法国有关大学研究所共同承担。法方项目负责人是Paul Tapenner教授,中方项目负责人是中国地质科学院地质研究所许志琴院士。地球物理研究是配合此项目的地质目标进行的,在安排上大致是按三个阶段进行的:

第一阶段:1992~1996年,地震探测主要沿着通向尼泊尔的青藏公路进行,地质任务是研究东昆仑及其邻区岩石圈缩短机制。

第二阶段:1996~2000年,地质任务主要进行祁连山-阿尔金地质演化及岩石圈剪切作用的研究,地震探测在青藏高原东缘、北缘进行相应工作。

根据协议,在合作研究中地球物理工作是以天然地震观察研究为主,同时开展部分人工地震研究,以便进行深部构造探测,阐述青藏高原岩石圈三维构造。为此,按上述两阶段工作的任务要求,进行了如下剖面性地震探测。

- 1) 西藏定日-唐古拉山口地震探测剖面(野外观测时间为1992年6~11月)
- 2) 西藏唐古拉山口-青海格尔木、锡铁山地震探测剖面(野外观测时间为1993年6~11月)
- 3) 青海茫崖-新疆若羌(阿尔金地区)地震探测剖面(野外观测时间为1995年6月~1996年3月)
- 4) 新疆克拉玛依-库车(天山地区)地震探测剖面(野外观测时间为1997年5月~1998年2月)
- 5) 青海共和-玉树(东昆仑)地震探测剖面(野外观测时间为1998年5~11月)

第三阶段:2001~2005年,主要进行了新疆叶城-西藏狮泉河宽频地震探测剖面(野外观测时间为2001年5~12月)

在这十几年地震剖面观测与研究工作中,法方参加工作人员以法国国家研究中心及其所属大学为主,并有瑞士和西班牙等有关院所参加,参加工作有41人,其中多数人是多次来华工作的,人员状况详见表1-1-1,同时历年来参加工作的中方人员列入表1-1-2。

在2001~2005年期间中美等多国合作进行了穿越喜马拉雅山的宽频地震探测,这是中国地质科学院地质研究所与美国伊利诺大学、俄立冈大学合作进行的,由美国科学基金会、中国国土资源部、中国地质调查局共同资助完成的,其初步成果也收入了本书。

本书是在20世纪90年代通过国际科技合作研究基础上,以天然地震观测为主,配合其他物探方法对青藏高原岩石圈构造进行地球物理研究的总结。重点是以地震观测结果来阐述青藏高原地壳和岩石圈构造。虽然天然地震观测研究在技术方法上还需要进一步发展与提高,但它作为青藏高原深部研究的重要手段已是不争的事实,且无疑对人们认识青藏高原岩石圈深部构造又提供一个新的视角。

表 1-1-1 中法合作地震探测法方成员名单 (1992 ~ 2000)

姓 名	所 在 单 位
Alfred Hirn	法国国家科研中心全球物理研究所地震实验室, 巴黎
Jean-Claude Lepine	法国国家科研中心全球物理研究所地震实验室, 巴黎
Audrey Galve	法国国家科研中心全球物理研究所地震实验室, 巴黎
Veronique Farra	法国国家科研中心全球物理研究所地震实验室, 巴黎
Christophe Clement	法国国家科研中心全球物理研究所地震实验室, 巴黎
Alan Vigner	法国国家科研中心全球物理研究所地震实验室, 巴黎
Abdallah Aboulkair Ahmed	法国国家科研中心全球物理研究所地震实验室, 巴黎
Mireille Laigle	法国国家科研中心全球物理研究所地震实验室, 巴黎
Daphne-Anne Griot-Pommer	法国国家科研中心全球物理研究所地震实验室, 巴黎
Georges Poupinet	法国国家科研中心内部地球物理及构造物理实验室, 约瑟夫·富力叶大学, 格林诺贝尔
Jocelyn Guilbert	法国国家科研中心内部地球物理及构造物理实验室, 约瑟夫·富力叶大学, 格林诺贝尔
Robert Guiguet	法国国家科研中心内部地球物理及构造物理实验室, 约瑟夫·富力叶大学, 格林诺贝尔
Michel Dietrich	法国国家科研中心内部地球物理及构造物理实验室, 约瑟夫·富力叶大学, 格林诺贝尔
Michel Lambert	法国国家科研中心内部地球物理及构造物理实验室, 约瑟夫·富力叶大学, 格林诺贝尔
Cecile Cornou	法国国家科研中心内部地球物理及构造物理实验室, 约瑟夫·富力叶大学, 格林诺贝尔
Fabrice Cotton	法国国家科研中心内部地球物理及构造物理实验室, 约瑟夫·富力叶大学, 格林诺贝尔
Olivier Coutant	法国国家科研中心内部地球物理及构造物理实验室, 约瑟夫·富力叶大学, 格林诺贝尔
Benoit Lebrun	法国国家科研中心内部地球物理及构造物理实验室, 约瑟夫·富力叶大学, 格林诺贝尔
Catherine Pequegnat	法国国家科研中心内部地球物理及构造物理实验室, 约瑟夫·富力叶大学, 格林诺贝尔
Anne Paul	法国国家科研中心内部地球物理及构造物理实验室, 约瑟夫·富力叶大学, 格林诺贝尔
Gerard Wittlinger	法国国家科研中心全球物理学校及观测站, 路易斯帕斯朵大学, 斯特拉斯堡
Uli Achauer	法国国家科研中心全球物理学校及观测站, 路易斯帕斯朵大学, 斯特拉斯堡
Jacques Durand	法国国家科研中心全球物理学校及观测站, 路易斯帕斯朵大学, 斯特拉斯堡
Jacky Sahr	法国国家科研中心全球物理学校及观测站, 路易斯帕斯朵大学, 斯特拉斯堡
Georges Herquel	法国国家科研中心全球物理学校及观测站, 路易斯帕斯朵大学, 斯特拉斯堡
Jerome Vergne	法国国家科研中心全球物理学校及观测站, 路易斯帕斯朵大学, 斯特拉斯堡
Brigitte Wagner	法国国家科研中心全球物理学校及观测站, 路易斯帕斯朵大学, 斯特拉斯堡
Frederic Deschamps	法国国家科研中心行星学实验室
Francoise Courboux	法国国家科研中心蓝色地球研究所, 尼斯大学
Edi Kissling	瑞士苏黎世地球物理研究所
Jean-Philippe Avouac	法国国家科研中心地球物理探测实验室
Beatrice De Voogd	法国国家科研中心地球物理图片制作中心
Guy Senechal	法国国家科研中心地球物理图片制作中心
Jordi Diaz Cusi	西班牙地质与地球物理研究所, 地震实验室, 巴塞罗纳
Josep Gallart Muset	西班牙地质与地球物理研究所, 地震实验室, 巴塞罗纳
Valent Salles Casas	西班牙地质与地球物理研究所, 地震实验室, 巴塞罗纳
Yvone Jimenez Muni	西班牙地质与地球物理研究所, 地震实验室, 巴塞罗纳
David Pedreira Rodriguez	西班牙地质与地球物理研究所, 地震实验室, 巴塞罗纳
Christiane Grappin	法国国家科研中心
Jean-Francois Ternay	法国国家科研中心
Luc Ronat	法国国家科研中心

表 1-1-2 历年来参加本项工作的中方成员名单(1992~2006)

姓 名	所 在 单 位
姜 枚	中国地质科学院,北京
钱 辉	中国地质科学院,北京
王有学	桂林工学院,桂林
薛光琦	中国地质科学院,北京
宿和平	中国地质科学院,北京
董英君	中国地质科学院,北京
张春贺	中国地质科学院,北京
魏素花	中国地质大学,北京
钱荣毅	中国地质大学,北京
曾校丰	中国地质大学,北京
李海鹏	中国地质大学,北京
王亚军	中国地质大学,北京
郑秀芬	中国地震局,北京
彭 聪	中国地质科学院,北京
吕庆田	中国地质科学院,北京
史大年	中国地质科学院,北京
王寅生	中国地质科学院,北京
马开义	中国地质科学院,北京
刘 妍	中国地质科学院,北京
张立树	合肥工业大学
李庆庆	合肥工业大学
赵 磊	合肥工业大学
刘郑军	第四综合物探大队,河南新乡
刘 文	562 综合地质研究所,北京燕郊
孙东海	562 综合地质研究所,北京燕郊
徐新忠	第二综合物探大队,西安
胡 宁	青海勘察技术研究院,西宁
孙敷是	青海勘察技术研究院,西宁
严永邦	青海勘察技术研究院,西宁

以天然地震观测为主进行岩石圈构造研究中利用便携式天然地震记录仪进行深部构造探测已取得了引人注目的进展,并与同期进行的地质构造研究相结合,获得了大量新的深部资料,成为青藏高原合作研究中最有成效的项目之一。我们相信这项研究的继续将会有更多的新资料、新认识展现在我们面前,使我们在揭开青藏高原奥秘的里程上再前进一步。

第二节 研究区地质构造概述

一、区域地质构造主要特征

青藏高原的地质调查研究工作在近十几年来发展很快,有关著作、论文以及正在执行的中多国、多

学科研究项目是其他地区难以比拟的。全面论述其研究现状不是本书的目的。现仅将与其有关的地质构造基本情况予以介绍。目的是为本书研究提供地质背景资料,以便更有依据地开展地球物理深部探测工作及其成果的地质解释。

(一) 大地构造

位于我国西南部的青藏高原目前所指范围包括西藏、青海以及新疆南部、甘肃西南部、四川西北部和云南西部等地,面积约 250 万 km^2 。

青藏高原作为亚洲板块的一部分,不论是在地形、地貌上的,还是在地质、地球物理上的特征都非常独特。

关于青藏高原大地构造及其单元划分一直存在分歧,从 20 世纪 80 年代以来就有诸多方案,其中王鸿祯、黄汲清、李春昱等分别提出喜马拉雅、冈底斯、羌塘、东昆仑等板块的基本格架。随后,不断有人提出新方案。这些不同方案均有各自的岩石、地层、古生物及其他地质、地球物理等多方面的依据,反映了在认识上的某种差异(图 1-2-1 ~ 图 1-2-4 及表 1-2-1)。但是,从地球物理研究角度以及本书阐述问题看,他们之间尽管有这样或那样的分歧,但其中有比较一致或比较趋于一致的,并且对深部地球物理探测将有极大影响。

许多地质学家都认为青藏高原周边是受刚性地块控制(或制约的)(图 1-2-1)。

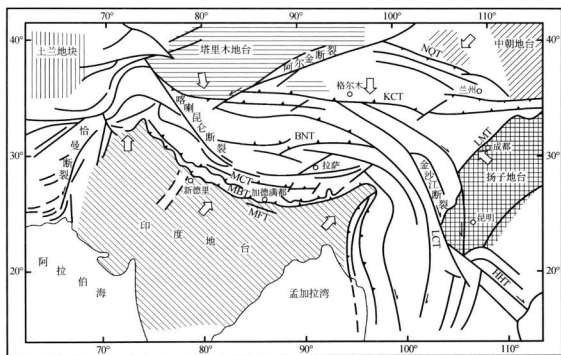


图 1-2-1 青藏高原及邻区构造纲要图

(据甘塞尔,1980;李廷栋,1986)

MCT—喜马拉雅中央主断裂;MFT—喜马拉雅边缘主断裂;MFT—喜马拉雅边缘主断裂;KCT—昆仑中央主断裂;NQT—北祁连断裂;LMT—龙门山主断裂;HHT—红河断裂;LCT—澜沧江断裂;BNT—班公错-怒江断裂

目前大量资料表明,青藏高原内部各地体(块)相互之间为各种形式的缝合带、结合带、断裂带,其在性质、形成时代、演化机制上仍有不少分歧,但对于它的规模、空间位置、延伸走向,甚至命名基本上趋于一致,并且它在地球物理资料中都有明显的反映。因而它的存在又为青藏高原深部地球物理探测提供了良好的标志。

近年地质调查表明,晚近以来青藏高原构造运动仍在继续,反映了印度板块向欧亚大陆俯冲并未中

表 1-2-1 青藏高原构造单元对比表

崔军文(2001)			刘训奇(1992)			陈纳尉(1998)			熊盛青(2001)			程格琪(1994)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
昆仑-阿尔金山构造带	西昆仑-阿尔金山构造带	南祁连山-柴达木北缘断裂	柴达木盆地	北昆仑断裂	祁连山构造带	柴达木北缘断裂带	祁连山地块	柴达木北缘断裂	祁连山-北秦岭褶皱带	柴达木北缘断裂	柴达木微陆块	祁连山-北秦岭褶皱带	柴达木北缘新裂	柴达木北缘新裂																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	东昆仑柴达木构造带	柴达木盆地													柴达木微陆块	柴达木微陆块	柴达木微陆块	柴达木微陆块																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
中昆仑结合带	松潘-甘孜地块	中昆仑断裂	北昆仑构造带	中昆仑断裂	昆仑-秦岭构造带	东昆仑南缘结合带	昆仑地块	中昆仑断裂	东昆仑-南秦岭褶皱带	中昆仑断裂	东昆仑-南秦岭褶皱带	东昆仑-南秦岭褶皱带	东昆仑中央新裂	东昆仑中央新裂																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
															南昆仑构造带	南昆仑构造带	南昆仑构造带	南昆仑构造带	南昆仑构造带	南昆仑构造带	南昆仑构造带	南昆仑构造带																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
鲜水河断裂	可可西里-巴颜喀拉地块	鲜水河断裂	巴颜喀拉地块	昆仑-秦岭结合带	巴颜喀拉-松潘-甘孜构造带	金沙江结合带	可可西里-巴颜喀拉地块	昆仑-秦岭结合带	可可西里-巴颜喀拉地块	昆仑-秦岭结合带	可可西里-巴颜喀拉地块	可可西里-巴颜喀拉地块	可可西里-巴颜喀拉地块	可可西里-巴颜喀拉地块																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
															西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金	西昆仑-金

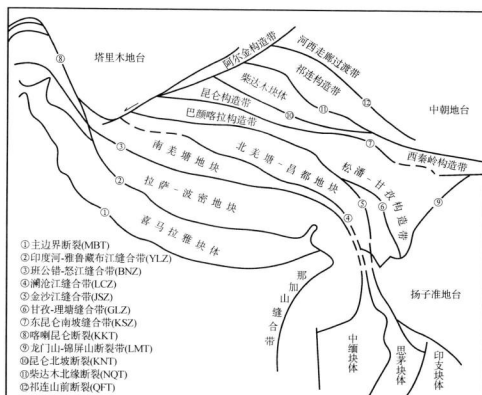


图 1-2-2 青藏高原及其邻区构造分区略图
(据陈炳蔚, 2000)

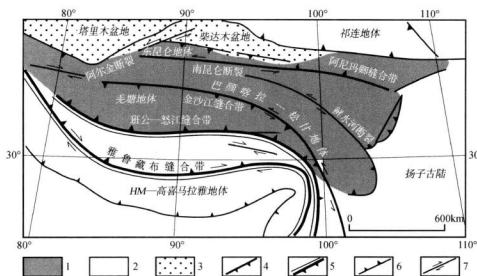


图 1-2-3 东昆仑-唐古拉山中生代复合山链的板构造图
(据许志琴, 1994)

1—中生代造山带范围; 2—周缘地体; 3—中-新生代盆地; 4—古特提斯缝合带; 5—新特提斯缝合带; 6—逆冲断层; 7—平移断层

止,而由此产生了地壳升降、河流改道、地貌变迁等地质现象处处可见,特别是引起了频繁的地震是所有地质学家与地震学家所共识的。由于地震波在不同地体(块)中及其结合带上传播的差异性,又为本书所涉及项目的实施与深入研究创造了条件。