

## 由地震探测揭示的青藏高原莫霍面深度

高 锐, 熊小松, 李秋生, 卢占武

中国地质科学院地质所岩石圈中心, 北京 100037;

中国地质科学院深部探测与地球动力学开放实验室, 北京 100037

**摘要:** 全球最新、规模最大的青藏高原造山带是研究陆陆汇聚、板块俯冲和高原隆升等大陆动力学问题的天然实验室。自 20 世纪 50 年代至今, 已经积累大量被动源地震观测和主动源地震探测资料用于揭示青藏高原的地壳与上地幔结构, 勾勒出青藏高原的壳幔结构的基本特征。本文在汇总前人工作基础上, 通过对深地震测深、深地震反射剖面和宽频地震观测三种地震方法资料的梳理, 探讨青藏高原的莫霍面深度及其分布特征。结果表明, 青藏高原莫霍面形态复杂, 深度变化很大, 分布总体特征呈现出中间浅, 南部较深, 北部较浅, 西部较深, 东部较浅的趋势, 最深的和最浅的莫霍面可以相差 40 km。这种变化趋势记录了印度板块和欧亚板块的相互作用使高原地壳增厚、减薄过程, 并驱使地壳物质由西向东流动。

**关键词:** 青藏高原; 地震探测; 莫霍面深度; 地球动力学

中图分类号: P315.2; P315.01 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2009)06-761-13

## The Moho Depth of Qinghai-Tibet Plateau Revealed by Seismic Detection

GAO Rui, XIONG Xiao-song, LI Qiu-sheng, LU Zhan-wu

*Lithosphere Research Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;  
Key Laboratory of Earthprobe and Geodynamics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

**Abstract:** The Qinghai-Tibet plateau is the newest and biggest orogenic belt in the world and can serve as a natural laboratory for studying such aspects of continental geodynamics as continent-continent collision, convergence, subduction and plateau uplift. From the 1950s to the present, lots of active-source (deep seismic sounding and deep seismic reflection profiling) and passive-source seismic detection (broadband seismic observation) researches have been carried out to reveal the crust-mantle structure. In this paper, the authors have mainly summarized three seismic detection methods for revealing the Moho depth of the Qinghai-Tibet plateau based on previous achievements. The results show that the Moho of the Qinghai-Tibet plateau is very complex and its depth varies from place to place, and that the Moho is on the whole deeper beneath the south than beneath the north and deeper in the west than in the east. It is also revealed that the Moho in the Qiangtang terrane, the hinterland of the Qinghai-Tibet plateau, is shallower than that on both the southern and the northern sides of the Qinghai-Tibet plateau, and that the deepest Moho is 40 km deeper than the shallowest Moho. Such a trend has recorded the crustal thickening and thinning caused by the mutual response between the India plate and the Eurasia plate as well as the eastward mass flow in the Qinghai-Tibet plateau.

**Key words:** Qinghai-Tibet plateau; seismic detection; Moho depth; Geodynamics

莫霍面, 即地壳与地幔之间的分界面, 是南斯拉夫地震学家莫霍洛维奇于 1909 年发现, 称为莫霍

洛维奇不连续面, 简称莫霍面, 英文缩写为“Moho”。后来, 由于不同学科的发展, 对莫霍面的

本文由国家自然科学基金项目(编号: 40830316, 40874045), 国际科技合作项目(2006DFA21340)和国家专项 SINOPROBE-02 资助。  
收稿日期: 2009-05-05; 改回日期: 2009-11-07。

第一作者简介: 高锐, 男, 1950 年生。研究员。长期从事于中国大陆的地壳上地幔地球物理探测与地球动力学研究。电话: 010-68999730。E-mail: gaorui@cags.net.cn。

定义有了一定的差异。

多年来, 经全球学者的广泛研究, 已经获知莫霍面是一个全球性的地球内部分界面。莫霍面及其分布特征反映了地壳的演化和壳幔的相互作用。对应不同的地球动力学过程和构造单元, 莫霍面性质与分布特征有所不同。稳定地块的莫霍面呈一级速度间断面, 分布较稳定, 通常具有较强的地震反射; 活动造山带的莫霍面常呈现出速度梯度变化, 分布不稳定, 地震反射通常较弱, 有时缺失。莫霍面作为建立地壳和岩石圈结构三维几何模型的重要组成部分, 是了解区域构造演化的关键。

莫霍面深度(通常表征地壳厚度)记录了地壳的生长与经历的地球动力学过程, 因而莫霍面深度是人们认识地球演化的关键证据。由于地震波在莫霍面上传播特征和产生的强弱反射最为明显, 能够为人们直观识别, 因此地震学探测(主动源和被动源)一直是探知莫霍面深度的主要方法。

青藏高原, 作为地球上海拔最高的大陆地区, 地壳最厚达 80-90 km。其巨厚的地壳厚度一直是研究青藏高原深部结构和大陆动力学的重要参数, 为全球地学界所关注。自 20 世纪 50 年代至今, 大量被动源地震观测和主动源地震探测资料的获得揭示了青藏高原的地壳与上地幔结构。本文在综合前人工作基础上(王椿镛等, 1991; 高锐, 1997; 曾融生等, 1994; 滕吉文等, 2002; Zhao, et al., 2004; 赵文津等, 2008; 李秋生等, 2004a; 卢占武等, 2006; Li et al., 2009), 通过对深地震测深、深地震反射剖面和宽频地震观测三种地震方法资料的梳理, 探讨青藏高原的莫霍面深度及其分布特征, 进而探求青藏高原的地壳结构及其所阐释的大陆动力学意义。

## 1 青藏高原莫霍面地震探测程度与资料汇总

青藏高原被公认为地球上最年轻的陆陆碰撞造山带, 由一系列性质不同的地体拼贴组成(图 1)。由北向南, 大致分为 5 大地体, 分别是祁连山地体、昆仑-柴达木地体、松潘-甘孜-可可西里地体、羌塘地体、拉萨地体(尹安, 2001)。这些地体为若干板块缝合带相隔开。自 20 世纪 50 年代至今, 已经有大量的地震探测资料揭示青藏高原的壳幔结构, 为探讨青藏高原升降机制与动力学提供了科学依据和基础。在研究地球内部结构的地球物理方法中, 地震探测可称为最有效、最精确的方法。以深地震测深、深地震反射剖面探测和宽频地震观测三种方法为代表的探测成果, 勾勒了青藏高原的壳幔结构, 揭示了青藏高原部分地区的莫霍面深度与分布的基本规律。

本文收集了到 2008 年为止, 青藏高原公开发表的三种地震方法探测成果文献, 并将所有探测剖面和测点展示在图 1 中。根据收集的文献中关于青藏高原莫霍面深度的探测成果和空间位置, 将莫霍面深度表示在青藏高原构造格架图中(图 2), 以便于综合研究和对比分析莫霍面深度及其分布特征。

需要指出的是, 以往有些学者曾使用不同资料研究过青藏高原莫霍面特征。例如, 使用重力、地震联合反演(吕庆田等, 1997; Chen, et al., 1998), 或使用主动源深地震测深资料(Li, et al., 2009), 或使用宽频地震观测资料(曾融生等, 1992; 王椿镛等, 2008), 或使用深地震反射剖面资料(Zhao 等, 1993; 高锐等, 2000, 2001a, 2001b, 2006; Lu, et al., 2009)。这些研究以及其他学者的研究均取得一些鲜为人知的发现。但是, 对于宽广辽阔的青藏高原, 按目前的工作程度, 仅使用一种资料难以覆盖整个青藏高原, 得到比较全面客观的认识。为了提高覆盖程度, 本文将三种地震方法探测成果都表示在图 2 中。诚然, 三种地震方法对莫霍面的探测精度不同, 各具特色, 对莫霍面性质的反映敏感程度也是不同的。但是由于本文仅限于从了解青藏高原莫霍面深度入手, 故所有探测方法的工作均具有参考价值。

还需要说明的是, 本文对每一种地震探测方法的文献资料没有取舍。对每篇文献的成果数据均表示在图 2 中。当然, 这样表示也存在一定的问题, 即显露出数据的矛盾。不同方法对同一地区的探测结果可能不同, 甚至同一剖面的资料前后解释结果也可能不同。我们并不回避矛盾, 深入讨论能够促使我们加深理解青藏高原莫霍面结构的复杂性和探测方法的局限性。在下文中, 我们将按方法逐一介绍其研究特色与工作程度。

### 1.1 深地震测深

深地震测深(Deep Seismic Sounding), 也称之为宽角反射与折射(wide-angle reflection and refraction), 是用于研究深达几十公里的地壳上地幔结构的一种有效地震探测方法。目前来说, 特别对确定莫霍面深度是比较有效的方法。在 20 世纪 60 年代的国际上地幔计划、70 年代的地球动力学计划以及 80 年代的岩石圈计划的实施过程中, 深地震测深研究在全球获得了大量的成果, 几乎遍布所有构造单元, 比较精细刻画了地球内部结构, 反映出地壳上地幔复杂的结构及不均匀性。

青藏高原的深地震测深研究可以追溯到 20 世纪 70 年代。1977 年, 中国科学院地球物理研究所在青藏高原南部亚东到当雄实施了一条长达 460 km

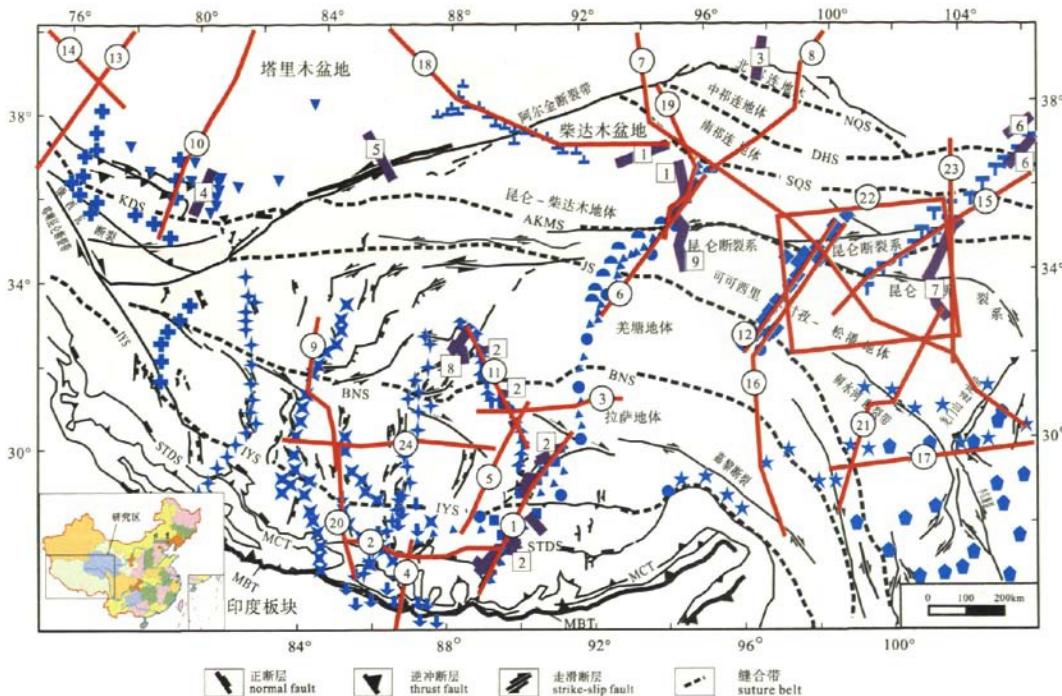


图 1 青藏高原莫霍面地震探测工作程度示意图(资料收集截止到 2008)

Fig. 1 Seismic detection extent in Qinhai-Tibet plateau (up to 2008)

构造背景划分(引自尹安, 2001): IYS-雅鲁藏布江缝合带; BNS-班公怒江缝合带; JS-金沙江缝合带; AKMS-阿尼玛卿 - 木孜塔格 - 昆仑缝合带; SQS-南祁连缝合带; DHS-党河南山缝合带; NQS-北祁连缝合带; KS-库地缝合带; STDS-藏南拆离系; MCT-主中央逆冲断裂; MBT-主边界逆冲断裂。1-正断裂; 2-逆冲断裂; 3-走滑断裂; 4-缝合带。

Tectonic settings (Yin, 2001): IYS: Indus-Yarlung suture belt; BNS: Bangong-Nujiang suture belt; JS: Jinsha suture belt; AKMS: Ane-maqen-Kunlun-Mutztagh suture belt; SQS: South Qilian suture belt; DHS: Danghe Nanshan suture belt; NQS: North Qilian suture belt; KS: Kudi suture belt; STDS: South Tibet Detachment System; MCT: Main Central Thrust; MBT: Main Boundary Thrust. Inset: 1. normal fault; 2. thrust fault; 3. strike-slip fault; 4. suture.

宽频带地震台站分布位置: ●: 格尔木 - 日喀则(丁志峰等, 1996); ▲: 定日 - 格尔木锡铁山(吕庆田等, 1996; 姜枚, 1996); ■: 萨马达 - 纳木错(Kind, et al., 2002); ━: 茂崖 - 若羌(姜枚等, 1999); ▽: 西昆仑 - 塔里木(Kao, et al., 2001); ◆: 共和 - 玉树(J vergne, et al., 2002); ♦: 德庆 - 龙尾错(Tilmann, et al., 2003); +: 叶城 - 狮泉河(Wittlinger, et al., 2006); ┌: 榆林 - 马沁(陈九辉等, 2005); ↓: 尼泊尔 - 喜马拉雅(Pelkum, et al., 2005); ♠: 川西高原(Xu, et al., 2007); ✕: 印度 - 尼泊尔 - 西藏西部(李海鸥等, 2008; 姜枚等, 2008); ★: 青藏高原东缘(王椿镛等, 2008); †: 西藏东西线(赵俊猛, 未发表); ▨: INDEPTH IV (Marianne, et al., 2008).

The location of broadband seismic station: ●: Golmud-Rikaze (Ding, et al., 1996); ▲: Dingri-Xitieshan (Shi, et al., 1996; Lu, et al., 1996, Jiang, et al., 1996); ■: Samada-Namu Co(Kind, et al., 2002); ━: Mangya-Ruoqiang(Jiang, et al., 1999); ▽: Xikunlun-Tarim(Kao, et al., 2001); ◆: Gonghe-Yushu(Gverge, et al., 2002); +: Deqing-Longwei Co(Tilmann, et al., 2003); +: Yecheng-Shiquanhe(Wittlinger, et al., 2006); ┌: Yulin-Maqin(Chen, et al., 2005); Nepal-Himalayas(Pelkum, et al., 2005); ♠: Western Sichuan Plateau(Xu, et al., 2007); ✕: Hi-Climb(Gyorgy, et al., 2006; Li, et al., 2006; Jiang, et al., 2008); ★: Eastern wedge of the Tibetan plateau(Wang, et al., 2008); †: eastern and western line in Tibet(\*); ▨: INDEPTH IV(Marianne, et al., 2008)

深地震反射剖面及编号: ①: 鱼卡 - 甘森, 格尔木 - 大柴旦(曾融生等, 1961); ②: INDEPTH 测线(Zhao, et al., 1993; Ross, et al., 2004); ③: 吊大坂 - 花海(吴宜志等, 1995); ④: 西昆仑-塔里木(高锐等, 2000); ⑤: 阿尔金-塔里木(高锐等, 2001a); ⑥: 靖远 - 新庄集、同心 - 王新庄(张先康等,\*); ⑦: 合作 - 唐克(高锐等, 2006); ⑧: QT07, QT08 (Lu, et al., 2009); ⑨: INDEPTH IV (Marianne, et al., 2008). \*: 未公开发表或尚在进行研究中。

Deep seismic reflection profiles: ①: Yuka-Gansen,Golmud-Da Qaidam (Zeng, et al., 1961); ②: INDEPTH Project (Zhao, et al., 1993; Roff, et al., 2004); ③: Diaodaban-Huahai (Wu, et al., 1995); ④: West Kunlun-Tarim(Gao, et al., 2000); ⑤: Altyn-Tarim (Gao, et al., 2001a); ⑥: Jingyuan- Xinzhuangji; Tongxin-Wangxinzhuang (Zhang, et al., unpublished); ⑦: Hezuo-Tangke (Gao, et al., 2006); ⑧: QT07, QT08 (Lu, et al., 2009); ⑨: INDEPTH IV (Marianne, et al., 2008). Note: \* Unpublished or in process of research.

深地震测深剖面及编号: ①: 亚东 - 当雄(中国科学院地球物理研究所, 1981); ②: 佩枯错 - 普莫雍错(滕吉文等, 1983); ③: 色林错 - 雅安多(滕吉文等, 1985); ④: 藏南 - 尼泊尔(Hirn A., 1984a); ⑤: 噶拉 - 安多(绍柏等, 1985); ⑥: 沱沱河 - 格尔木(卢德源等, 1990); ⑦: 阿克赛 - 花石峡 - 简阳(王有学等, 2004); ⑧: 格尔木 - 额济纳旗(崔作舟等, 1995); ⑨: 摆勤 - 三个湖(熊绍柏等, 1997); ⑩: 泉水沟 - 独山子(李秋生等, 2001); ⑪: 德庆 - 龙尾错(Zhao, et al., 2001); ⑫: 玉树 - 共和(Jiang, et al., 2006); ⑬: 塔什库尔干 - 阿合奇(张先康等, 2002); ⑭: 莎车 - 阿图什 - 托云(张先康等, 2002); ⑮: 玛沁 - 兰州 - 靖边(李松林等, 2002); ⑯: 共和 - 玉树 - 下察隅(张中杰等, 2002); ⑰: 巴塘 - 资中(王椿镛等, 2003a); ⑱: 大柴旦 - 拜城(赵俊猛等, 2003); ⑲: 格尔木 - 花海子(Zhao, et al., 2006); ⑳: 樟木 -

措勤(郑度等, 2004); ⑩: 唐克-奔子栏(王椿镛等, 2003b); ⑪: 东昆仑三维地震探测(张中杰等,\*); ⑫: 马尔康-唐克-碌曲(张先康等, 2008); ⑬: 色林错东-措勤西(张中杰等,\*). \*: 未公开发表或尚在进行研究中。

DSS profiles: ①: Yadong-Damxung (Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1981); ②: Paiku Co-Puma Yumco (Teng, et al., 1983); ③: Selin Co-Ya'ngando (Teng, et al., 1985); ④: Nepal-South Tibet (Hirn A., 1984a); ⑤: Gala-Ambo (Xiong, et al., 1985); ⑥: Tuotuohe-Golmud (Lu, et al., 1990); ⑦: Aksay-Huashixia-Jianyang (Wang, et al., 2004); ⑧: Golmud-Ejin Qi (Cui, et al., 1995); ⑨: Cuoqin-Sangehu (Xiong, et al., 1997); ⑩: Quanshuiugou-Dushanzi (Li, et al., 2001); ⑪: Deqing-Longwei (Zhao, et al., 2001); ⑫: Gonghe-Yushu (Jiang, et al., 2006); ⑬: Tashikuergan-Aheqi (Zhang X K, et al., 2002); ⑭: Shache-Atushi-Tuoyun (Zhang X K, et al., 2002); ⑮: Maqin-Lanzhou-Jingbian (Li, et al., 2002); ⑯: Gonghe-Yu-Xiachayu (ZHANG Zhong-jie et al., 2002); ⑰: Batang-Zizhong(Wang, et al., 2003a); ⑱: Da Qaidam-Baicheng (Zhao, et al., 2003); ⑲: Golmud-Huahaizi (Zhao, et al., 2006); ⑳: Zham-Coqen(Zheng, et al., 2004); ㉑: Tangke-Benzilan (Wang, et al., 2003b); ㉒: 3D profile on east Kunlun (Zhang,\*); ㉓: Ma'erkang-Tangke-Luqu (Zhang, et al., 2008); ㉔: East Selin Co-West Coqen(Zhang, et al.,\*). Note: \* unpublished or in research.

的深地震测深剖面, 获得了藏南地区的地壳厚度(中国科学院地球物理研究所, 1981)。1980-1982年中法合作项目“喜马拉雅地质构造与地壳上地幔的形成演化”实施过程中, 完成了“色林错-雅安多”、“佩枯错-普莫雍错”两条东西向纵剖面, 沿“嘎拉-安多”以及横过喜马拉雅山脉进行了非纵剖面探测。1986-2000年, 在青藏高原地学断面实施过程中沿“亚东-格尔木”、“格尔木-额济纳旗”、“阿尔泰-台湾”、“西昆仑-塔里木-天山”等断面, 穿过青藏高原相继完成了4条深地震测深长剖面。随后, 国家自然科学基金委、科技部、国土资源部、中国科学院、中国地震局等部门在不同的调查与研究计划中, 组织实施了一批深地震测深剖面。截至到2008年, 在青藏高原已完成了深地震测深剖面24条, 共计15000余km(图1)。

## 1.2 深地震反射剖面探测

“深地震反射剖面”(Deep Seismic Reflection Profiling)是研究岩石圈精细结构最有效的方法, 能获取地壳内部和莫霍面的细微变化。青藏高原的深地震反射剖面探测可追溯到1958年柴达木盆地的反射地震法地壳调查(曾融生等, 1961), 首次揭示了柴达木盆地的地壳厚度。INDEPTH项目首次将多次覆盖的深反射地震方法应用于青藏高原的探测研究, 发现喜马拉雅山北坡莫霍面深度可达72-76 km(Zhao, et al., 1993)。1992年, “格尔木-额济纳旗”地学断面项目组在青藏高原北缘的祁连山进行了深地震反射剖面探测试验, 揭示出横过盆山结合部位莫霍面由北面河西走廊44 km向祁连山下加深到50 km(吴宣志等, 1995)。1998-2000年中国地质科学院岩石圈研究中心在跨越西昆仑-塔里木、阿尔金山-塔里木盆山结合带完成2条深地震反射剖面探测, 发现莫霍面的强反射特征, 为研究青藏高原北缘碰撞变形的深部过程提供了有力证据(高锐等, 2000, 2001a, 2001b)。2004-2005年, 为配合油气战略选区, 在国土资源部、国家自然科学基金委、中石化公司等部门联合资助下, 跨越松潘-西秦岭实施了青藏高

原最长, 约260 km的一条深地震反射探测剖面(高锐等, 2006)。2007-2008年, 在科技部、国土资源部、国家自然科学基金委资助下, 中国地质科学院岩石圈中心分段在羌塘盆地内横穿羌塘中央隆起完成了2条各约50 km长的剖面, 为揭示羌塘地体的深部结构和青藏高原腹地两大板块汇聚前缘提供了有利的深部信息(Lu, et al., 2009)。到目前为止, 青藏高原深地震反射剖面探测长度累积达1400多公里。

## 1.3 宽频地震观测

近年来, 随着数字化观测技术的迅速发展, 宽频地震观测(Broadband Seismic Observation)方法被广泛采用, 研究地震观测台阵下方地壳和上地幔结构, 结果层出不穷, 特别是接收函数逐渐成为研究地壳上地幔结构的一种简易高效的方法。

青藏高原宽频地震观测始于1991年, 曾融生与吴大铭的中美合作计划中, 沿格尔木到日喀则一线布置了11台宽频带地震仪, 揭示了剖面沿线的莫霍面深度变化(曾融生等, 1992; 吴庆举等, 1998)。1992-1994年, 中法合作进行了青藏高原天然地震合作研究, 沿着青藏高原主干公路布设了宽频地震仪(姜枚, 1994)。1995-1998年, 又完成了青藏高原北缘的观测(姜枚等, 1999)。INDEPTH-III“德庆-龙尾错”宽频地震观测穿越了班公湖-怒江缝合带, 并进入了羌塘地体, 对高原内部深部构造特征进行了研究(Tilmann, et al., 2003; 吴庆举等, 2004)。1997-1998年, 大陆学者与中国台湾学者合作进行塔里木-西昆仑北部的宽频地震观测, 发现西昆仑下莫霍面的叠置现象(Kao, et al., 2001)。进入21世纪后, 在青藏高原又进行了大量的宽频地震观测, 其中包含了穿越喜马拉雅的“Nepal-Tibet”计划和“Hi-Climb”项目(Pelkum S., et al., 2005; 钱辉等, 2007; 李海鸥等, 2008; 姜枚等, 2008), 以及穿越青藏高原东缘龙门山断裂带的“川西高原”和“林芝-永川”观测(Xu, et al., 2007; 王椿镛, 2008)。目前, 横跨青藏高原各主要地体都实施了宽频带地震观测(图1), 累积长度达10000余公里。

## 2 青藏高原莫霍面深度及其变化

### 2.1 最深与最浅的莫霍面

Wittlinger 等(2004)利用宽频地震观测数据解释西昆仑构造带的莫霍面深度约为  $90 \pm 2$  km, 此深度可能是高原最深的莫霍面。高锐等(2006)年完成了跨越西秦岭造山带和若尔盖盆地的深反射地震剖面, 发现在若尔盖盆地南缘下方莫霍面强反射出现在 16.5 s (TWT, 双程走时), 用地壳平均速度为 6.00 km/s 计算, 折合深度为 49.50 km, 这可能是青藏高原的最浅莫霍面, “马尔康-碌曲-古浪”深地震测深剖面也揭示了该区莫霍面深度为 48-51 km(张先康等, 2008)。

### 2.2 高原各构造单元的莫霍面深度与变化

喜马拉雅构造带, 位于恒河平原和雅鲁藏布江缝合带之间, 由南向北又可以分为低喜马拉雅、高喜马拉雅和特提斯喜马拉雅三个单元, 分别以主边界逆冲断裂(MBT)、主中央逆冲断裂(MCT)和藏南拆离系(STDS)为界。高喜马拉雅, 由深地震测深非纵测线给出的莫霍面深度为 55 km(Hirn, 1984b)。INDEPTH-1 深地震反射剖面探测获得喜马拉雅北坡莫霍面反射出现 24-25 s TWT(双程走时), 对应的深

度为 72-75 km(Zhao, et al, 1993)。“尼泊尔-西藏”宽频地震观测剖面的接收函数结果, 揭示横过喜马拉雅由南向北莫霍面深度从 45 km 逐渐加深到 75 km(Pelkum, 2005)。姜枚等(2008)通过“Hi-Climb”项目的宽频数据, 认为整个喜马拉雅构造带莫霍面总体是平的, 深约 45 km。王卫民等(2008)利用 IRIS 公开的宽频数据采用转换函数的方法, 获得了喜马拉雅构造带的莫霍面深度为 55-76 km, 最深的莫霍面出现在特提斯喜马拉雅地区, 深度约为 82 km。

“佩枯错-普莫雍错”剖面沿特提斯喜马拉雅带走向展布, 揭示其莫霍面深度为 70-78 km(Hirn, et al., 1984a), 新的处理结果为 74 km 左右(张中杰等, 2002)。尽管不同的地震观测方法给出的喜马拉雅构造带的莫霍面深度不尽相同, 但是其总体的趋势是从南向北, 莫霍面深度由 45-55 km 加深到 70-75 km, 甚至最深处可达 80 km。

拉萨地体, 位于雅鲁藏布江缝合带和班公湖-怒江缝合带之间。“亚东-当雄”深地震测深剖面揭示莫霍面平均深度为 70 km(中科院地球物理研究所, 1981; 尹周勋等, 1990); 1980-1982 期间中法合作完成的“嘎拉-安多”非纵测线揭示其深度至少为 70

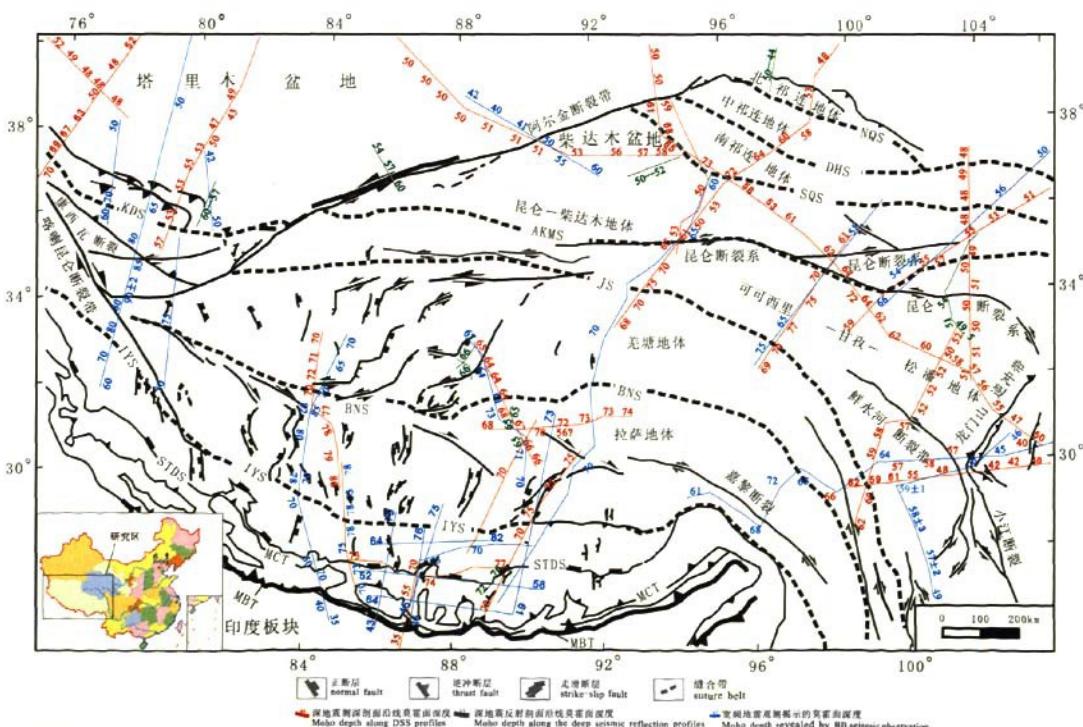


图 2 青藏高原莫霍面深度图(截止到 2008)  
Fig. 2 The Moho depth map of Qinghai-Tibet plateau based on seismic detection (up to 2008)

km(熊绍柏等, 1985), 而黄立言(1992)解释其深度为 56 km; “色林错-雅安多”深地震测深剖面获得拉萨地体的莫霍面深度为 70-75 km(刘宏兵等, 1990; 张中杰等, 2001); “措勤-三个湖”深地震测深剖面穿过了拉萨地体西部改则地区, 揭示了该地区莫霍面深度为 75-78 km(熊绍柏等, 1997); INDEPTH-III “德庆-龙尾错”深地震测深与深地震反射剖面穿过了拉萨地体的中北部地区, 认为其深度为 65 km(Zhao, et al., 2001; Ross, et al., 2004)。曾融生等(1994)运用宽频带数据, 获得了该地区的莫霍面深度为 80-84 km。王卫民等(2008)认为拉萨地体的莫霍面要比喜马拉雅地体深, 最深的莫霍面出现在靠近班公湖-怒江缝合带地区, 深度约为 89 km。根据“Hi-Climb”项目的宽频数据, 李海鸥等(2008)得出整个拉萨地体的平均莫霍面深度约为 70 km。根据宽频的结果, 王椿镛等(2008)认为拉萨地体东部莫霍面深度为 70 km 左右。根据上述资料, 拉萨地体的莫霍面深度约为 70-80 km, 但由于不同学者对震相的不同识别, 可能导致同一地区获得不同的莫霍面深度, 也说明了该区的莫霍面并非尖锐的一级界面, 而呈壳幔过渡带的形式。

羌塘地体, 位于班公湖-怒江缝合带和金沙江缝合带之间, 目前对于其属性一直存在争议(李才等, 1987, 2001, 2005; 黄继均, 2001; Kapp, et al., 2000, 2005)。由于羌塘地体位于青藏高原腹地, 恶劣的气候环境和交通条件制约了对其实施深部探测的实施。至今, 只有少数几条剖面分别穿过该区的北部和南部。1991 年中美合作的“格尔木-日喀则”宽频带地震观测, 根据接收函数反演获得该地体平均地壳厚度为 70 km(陈国英等, 1992)。“措勤-三个湖”深地震测深剖面穿过了该地体的西部, 获得其深度为 65-68 km(熊绍柏等, 1997); INDEPTH III “德庆-龙尾错”深地震测深剖面揭示其深度小于 60 km(Zhao, et al., 2001; Rolf, et al., 2004)。“格尔木-沱沱河”剖面经过了羌塘地体的北部, 获得了该地区的莫霍面深度为 68 km(卢德源等, 1990; 李秋生等, 2004b)。INDEPTH-III 宽频带穿过了羌塘地体的中南部班戈地区, 揭示该地区莫霍面深度为 59-67 km, 平均为 63 km(李永华等, 2006); 利用“西藏林芝-汶川”宽频带地震观测数据进行的接收函数反演显示该羌塘地体东部地区莫霍面深度小于 65 km(王椿镛等, 2008)。INDEPTH III 深地震反射剖面获得了多玛附近莫霍面深度为 65 km(Ross, et al., 2004), 中国地

质科学院岩石圈中心 QT07、08 两段深地震反射剖面也获得了双湖附近莫霍面深度为 66 km(Lu, et al., 2009)。通过上述资料, 可以看出羌塘地体莫霍面深度在 60-67 km 之间变化。

松潘-甘孜-可可西里地体介于金沙江缝合带和阿尼玛卿-昆仑缝合带之间。“格尔木-沱沱河”和“共和-玉树”深地震测深剖面均揭示了该地区莫霍面深度为 60-70 km(卢德源等, 1990; 王有学等, 2005)。

“玛沁-兰州-靖边”深地震测深剖面穿过了该地体的中部, 揭示玛沁地区莫霍面深度为 60-62 km(李松林等, 2002)。“奔子栏-唐克”深地震测深剖面穿过了该地体的东部, 获取莫霍面深度为 52-62 km(王椿镛等, 2003b)。“合作-唐克”深地震反射剖面穿过了该地体的东北部位, 发现青藏高原最浅的莫霍面为 49.50 km, 位于剖面的南侧。整条剖面莫霍面较平, 起伏不大, 平均深度为 51-54 km(高锐等, 2006; 王海燕等, 2007)。上述资料显示, 该地体的莫霍面深度从西向东变化较大, 似乎有逐渐变浅的趋势。

昆仑-柴达木地体, 包括了东昆仑和柴达木盆地两个构造单元。1958 年, 在柴达木盆地进行的反射地震实验获得了盆地中部平均地壳厚度为 50-52 km(曾融生, 1961; 滕吉文, 1974); “茫崖-若羌”宽频带观测量数据反演结果显示柴达木盆地的莫霍面深度为 50-60 km(姜枚等, 1999; 史大年, 2007)。“格尔木-花海子”深地震测深剖面揭示了柴达木盆地地壳厚度由南向北从 53 km 逐渐增厚到 59 km(Zhao, et al., 2006b); “大柴旦-拜城”剖面揭示了盆地东部地壳厚度约为 56 km(Zhao, et al., 2006a)。“格尔木-沱沱河”深地震测深剖面揭示东昆仑地壳厚度为 64 km(卢德源等, 1990; 李秋生等, 2004b)。

祁连地体位于青藏高原的最北缘, 分为三个亚地体, 由南向北分别为南祁连、中祁连和北祁连地体。“格尔木-额济纳旗”深地震测深剖面获得该区平均地壳厚度应大于 60 km, 而且由北向南, 逐渐由 57 km 加深到 63 km, 南祁连哈拉湖下最深达 72 km(崔作舟等, 1995)。“北祁连-花海盆地”深反射地震剖面揭示了祁连地体北部边缘莫霍面深度为 50 km 左右(吴宣志等, 1995)。可见, 祁连地体的总体莫霍变化趋势是从北向南变深, 由 50-57 km 加深到 60-72 km。

### 2.3 横过构造缝合带莫霍面的深度变化

目前, 横过青藏高原各主要缝合带均实施了主动源或被动源地震剖面探测。揭示出各缝合带下的莫霍面错断现象。

雅鲁藏布江缝合带, 根据中法合作完成的扇形地震剖面, Hirn(1984a)认为雅鲁藏布江缝合带下莫霍面错断了 20 km, 但从熊绍柏(1985)的东西向长剖面结果和非纵测线的结果可以看出, 该断裂的断距北岸约比南岸高出 6-8 km(尹周勋, 1990)。Kind (2002)通过宽频地震数据偏移接收函数反演, 认为在雅鲁藏布江缝合带之下不存在莫霍面错断。王卫民等(2008)认为存在 6 km 的错断。姜枚等(2008)认为在该缝合带下部, 莫霍面存在 20 km 的错断。

班公湖-怒江缝合带, 曾融生等(1998)根据接收函数反演结果认为莫霍面错断不超过 10 km。INDEPTH-III “德庆-龙尾错”深地震测深剖面认为该带之下无明显的莫霍面错断(Zhao, et al., 2001), Kind(2002)利用接收函数方法得到的结果也认为此缝合带之下没有莫霍面错断。但是该剖面另外的接收函数反演结果, 却显示了 8 km 左右的莫霍面错断(吴庆举等, 2004, 李永华等, 2006)。

金沙江缝合带, “格尔木-沱沱河”和“共和-玉树”深地震测深剖面穿过了该带, 显示没有莫霍面错断(卢德源, 1990; 李秋生等, 2004b; Jiang, et al., 2006)。“奔子栏-唐克”深地震测深剖面穿过了该缝合带的东段, 显示了约 4 km 的莫霍面错断(王椿镛等, 2003b)。但是宽频带的结果显示没有明显的莫霍面错断(姜枚等, 1996; 王椿镛等, 2008)。

阿玛尼卿-昆仑缝合带, 朱露培使用双台宽频地震观测方法, 认为该缝合带中部之下存在 15-20 km 的莫霍面错断(Zhu, et al., 1998)。但是, 张先康等(2008)在东部地区进行的深地震测深结果显示并不存在莫霍面错断。

由上述资料, 可见莫霍面的错断并非沿各缝合带一成不变的, 而是在不同的区段存在很大差异, 而且由于接收函数反演的灵敏度和分辨率不及深地震测深, 我们倾向于后者所获得的认识。

### 3 讨论—青藏高原莫霍面深度分布特征及其地球动力学意义

#### 3.1 青藏高原莫霍面深度分布总体轮廓

上述地震资料结果显示, 青藏高原莫霍面形态复杂, 深度变化很大。莫霍面总体变化趋势是西部较深, 东部较浅, 最深的和最浅的莫霍面可以相差 40 km。以羌塘地体为中心, 以南的特提斯喜马拉雅-拉萨地体莫霍面较深, 以北的柴达木地块和松潘地块较浅。柴达木盆地的地壳厚度从盆地中心的 50-52 km, 向盆地边缘加厚到 60 km, 呈现了柴达木盆地中心莫霍面的上隆现象。松潘地块地壳厚度是青藏

高原内部最薄的, 并且向北过西秦岭造山带地壳厚度没有明显加厚。羌塘地体下的莫霍面深度明显比两边地体浅。在各个缝合带下部, 莫霍面均存在不同程度的错断。

#### 3.2 莫霍面深度分布特征阐释的地球动力学意义

青藏高原最深和最浅的莫霍面深度大致相差了 40 km, 相当于一个正常的大陆地壳厚度。青藏高原西段的印度板块-欧亚板块碰撞启动时间早于东段的穿时性碰撞观点(Beck et al., 1995; Qayyum et al., 1997; Rowley, 1996, 1998)目前得到多数地质学家的认可, 青藏高原莫霍面深度由西向东逐渐变浅的特点, 可能同这种碰撞过程有关。同时, 青藏高原东西部巨大地壳厚度之差能够合理解释青藏高原物质向东流动的 channel flow 模式(Brid, 1991)。

印度板块和欧亚板块的双向汇聚模式(吴功建等, 1991; 高锐等, 1995)已经被越来越多的深部地球物理证据所证实(曾融生 1998; 高锐, 2000, 2001a; Kao, et al., 2001; Kind, et al., 2002; Tilman, et al., 2003)。羌塘地体地壳厚度的减薄可能说明了印度板块和欧亚板块的双向汇聚引发的地壳跨塌作用。郑洪伟等(2007)的地震层析成像研究, 发现印度岩石圈板块和欧亚岩石圈板块双向汇聚的前缘就在羌塘地体下部。汇聚加厚的岩石圈因此发生拆沉作用(Kind, et al., 2002), 上地幔软流圈物质的上涌同地壳物质的相互作用生成了新的浅的莫霍面。羌塘内部广泛分布的新生代火山岩可能就是深部构造活动的浅部反应。

羌塘地体以南的特提斯喜马拉雅-拉萨地体莫霍面较深, 可深达 80 km。可能是反映了印度板块向北俯冲形成的双地壳厚度, 也说明印度板块向北俯冲的主动挤压作用仍在继续, 西昆仑构造结可能位于挤压变形最强烈的地方, 莫霍面最深。青藏高原东北部松潘地块-西秦岭造山带浅而平的莫霍面, 表明自松潘地块-高原东北边缘下地壳经历了强烈的伸展作用。

**致谢:** 本文得到许多从事青藏高原研究的学者支持, 张中杰、赵俊猛、刘宏兵等提供了尚未发表的信息。在资料收集过程中, 得到贺日政、王海燕及李文辉的帮助, 在此一并表示感谢。

#### 参考文献:

- 陈国英, 曾融生, 吴大铭, 安昌强, 苏小兰. 1992. 青藏高原瑞利波相速度与深部结构的横向变化[J]. 地震学报, 11(增): 565-572.  
陈九辉, 刘启元, 李顺成, 郭飙, 赖院根. 2005. 青藏高原东北

- 缘—鄂尔多斯地块地壳上地幔 S 波速度结构[J]. 地球物理学报, 48(2): 333-342.
- 崔作舟, 李秋生, 吴朝东, 尹周勋, 刘宏兵. 1995. 格尔木—额济纳旗地学断面的地壳结构与深部构造[J]. 地球物理学报, 38(增): 15-28.
- 丁志峰, 曾融生. 1996. 青藏高原横波分裂的观测研究[J]. 地球物理学报, 39(2): 211-220.
- 高锐, 黄东定, 卢德源, 钱桂, 李英康, 匡朝阳, 李秋生, 李朋武, 冯如进, 管, 烨. 2000. 横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面[J]. 科学通报, 45(17): 874-879.
- 高锐, 马永生, 李秋生, 朱铉, 张季生, 王海燕, 李鹏武, 卢占武, 管, 烨. 2006. 松潘地块与西秦岭造山带下地壳的性质和关系—深地震反射剖面的揭露[J]. 地质通报, 25(12): 1361-1367.
- 高锐, 史大年. 2001a. 青藏高原北缘碰撞变形的深部过程—深地震探测成果之启示[J]. 中国科学:D 辑, 31(B12): 66-71.
- 高锐, 吴功建. 1995. 青藏高原亚东—格尔木地学断面地球物理综合解释模型与现今地球动力学过程[J]. 长春科技大学学报, 25(03): 241-250.
- 高锐, 肖序常. 2001b. 新疆地学断面深地震反射剖面揭示的西昆仑—塔里木结合带岩石圈细结构[J]. 地球学报, 22(6): 547-552.
- 高锐. 1997. 青藏高原岩石圈结构与地球动力学的 30 个为什么[J]. 地质论评, 43(5): 460-464.
- 黄继钩. 2001. 羌塘盆地基底构造特征[J]. 地质学报, 75(3): 333-337.
- 黄立言, 李光岑, 高恩源, 王式, 崔作舟. 1992. 西藏高原地壳结构与速度分布特征[M]. 地质专报: 构造地质地质力学[M], 北京: 地质出版社.
- 姜枚, 吕庆田, 史大年, 薛光琦. 1996. 用天然地震探测青藏高原中部地壳、上地幔结构[J]. 地球物理学报, 39(4): 470-482.
- 姜枚, 吕庆田, 薛光琦. 1994. 中、法两国联合进行青藏高原天然地震探测地壳结构的研究[J]. 地球物理学报, 37(3): 412-413.
- 姜枚, 王有学, Nabelek J., 钱辉, 王亚军, 刘因, 张立树, 赵磊. 2008. 喜马拉雅造山带的地壳上地幔结构—近震反射观测结果[J]. 岩石学报, 24(7): 1509-1516.
- 姜枚, 许志琴, 薛光琦, 史大年, Gerard, Wittlinger, Georges, Poupinet, 董英君, 张春贺. 1999. 青海茫崖—新疆若羌地震探测剖面及其深部构造的研究[J]. 地质学报, 73(2): 153-161.
- 李才, 叶和飞. 2001. 西藏羌塘盆地中央隆起区物质组成, 构造演化及主要分歧[M]. 北京: 科学出版社.
- 李才, 翟庆国, 程立人, 徐峰, 黄小鹏. 2005. 青藏高原羌塘地区几个关键地质问题的思考[J]. 地质通报, 24(004): 295-301.
- 李才. 1987. 龙木错—双湖—澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳边界[J]. 长春地质学院学报, 17(2): 155-166.
- 李海鸥, 徐锡伟, 姜枚. 2008. 青藏高原中南部的深部地球动力学过程—Hi-Climb 剖面北段接收函数和走时残差分析[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 38(05): 622-629.
- 李秋生, 卢德源, 高锐, 张之英, 刘文, 李英康, 李敬卫, 范景义, 熊贤明. 2001. 新疆地学断面(泉水沟-独山子)深地震测深成果综合研究[J]. 地球学报, 22(06): 534-540.
- 李秋生, 彭苏萍, 高锐, 管, 烨, 范景义. 2004b. 东昆仑大地震的深部构造背景[J]. 地球学报, 25(001): 11-16.
- 李秋生, 彭苏萍, 高锐. 2004a. 青藏高原莫霍面的研究进展[J]. 地质论评, 50(006): 598-612.
- 李松林, 张先康, 张成科, 赵金仁, 成双喜. 2002. 阿沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究[J]. 地球物理学报, 45(02): 210-217.
- 李永华, 吴庆举, 田小波, 曾融生, 张瑞青, 李红光. 2006. 青藏高原拉萨及羌塘块体的地壳结构研究[J]. 地震学报, 28(06): 586-595.
- 刘宏兵, 滕吉文, 尹周勋. 1990. 西藏高原北缘色林错—雅安多地带的二维速度结构及断裂分布特征[J]. 地球学报, 21: 259-277.
- 卢德源, 王香泾. 1990. 青藏高原北部沱沱河—格尔木地区的地壳结构和深部作用过程[J]. 中国地质科学院院报, 21: 227-237.
- 卢占武, 高锐, 李秋生, 管, 烨, 张季生, 贺日政, 黄立言. 2006. 中国青藏高原深部地球物理探测与地球动力学研究(1958—2004)[J]. 地球物理学报, 49(03): 753-770.
- 吕庆田, 姜枚, 高锐. 1997. 青藏高原莫霍面形态的重力模拟及其对探讨高原隆升机制的意义[J]. 地球学报, 18(1): 78-86.
- 吕庆田, 姜枚, 马开义, A. Hirn, A. Nercessian. 1996. 三维走时反演与青藏高原南部深部构造[J]. 地震学报, 18(04): 451-459.
- 钱辉, 姜枚, Wangping C., Nabelek J., Dapeng Z., 赵磊, 王亚军. 2007. 青藏高原吉隆—普鲁 (Hi-Climb) 层析成像与印藏碰撞的消减作用[J]. 地球物理学报, 50(005): 1427-1436. 史大年, 余钦范, Georges, Poupinet, Herquel, Gerard, Wittlinger, 姜枚. 2007. 阿尔金断裂带附近地壳结构的接收函数成像及其地球动力学意义[J]. 地质学报, 81(01): 139-148.
- 滕吉文, 熊绍柏, 尹周勋, 徐忠信, 王香泾, 卢德源, Georges, Jobert, Alfred, Hirn. 1983. 喜马拉雅山北部地区的地壳结构模型和速度分布特征[J]. 地球物理学报, 26(06): 525-540.
- 滕吉文, 尹周勋, 熊绍柏. 1985. 西藏高原北部地区色林错—蓬措—那曲—索县地带地壳结构与速度分布[J]. 地球物理学报, 28(2): 28-42.
- 滕吉文, 曾融生. 2002. 东亚大陆及周边海域 Moho 界面深度分布和基本构造格局[J]. 中国科学:D 辑, 32(002): 89-100.
- 滕吉文. 1974. 柴达木东盆地的深层地震反射波和地壳构造[J]. 地球物理学报, 17(02): 121-134.
- 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平, 楼海, 白志明. 2003b. 松潘—甘孜造山带地壳速度结构[J]. 地震学报, 25(3): 229-241.
- 王椿镛, 楼海, 吕智勇, 吴建平, 常利军, 戴仕贵, 尤惠川, 唐方头, L.Zhu, P.Silver. 2008. 青藏高原东部地壳上地幔 S 波速度结构—下地壳流的深部环境[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 38(1): 22-32.
- 王椿镛, 吴建平, 楼海, 周民都, 白志明. 2003a. 川西藏东地区的地壳 P 波速度结构[J]. 中国科学 D 辑, 33(增): 181-189.
- 王椿镛, 朱良保, 朱露培, 丁志峰. 1991. 青藏高原的地壳地震学研究进展[J]. 国际地震动态, 2: 1-4.
- 王海燕, 高锐, 马永生, 朱铉, 李秋生, 匡朝阳, 李朋武, 卢占武. 2007. 若尔盖与西秦岭地震反射岩石圈结构和盆山耦合[J]. 地球物理学报, 50(2): 472-481.

- 王卫民, 苏有亮, 高星, 郭志. 2008. 用转换函数方法研究喜马拉雅地区速度结构[J]. 地球物理学报, 51(6): 1735-1744.
- 王有学, Mooney, 韩果花, 袁学诚, 姜枚. 2005. 台湾—阿尔泰地学断面阿尔金—龙门山剖面的地壳纵波速度结构[J]. 地球物理学报, 48(1): 98-106.
- 吴功建, 高锐, 余钦范, 程庆云, 孟令顺, 董学斌, 崔作舟, 尹周勋, 沈显杰, 周烧秀. 1991. 青藏高原“亚东—格木木地学断面”综合地球物理调查与研究[J]. 地球物理学报, 34(5): 552-562.
- 吴庆举, 曾融生, 赵文津. 2004. 喜马拉雅—青藏高原的上地幔倾斜构造与陆—陆碰撞过程[J]. 中国科学 D 辑, 34(10): 919-925.
- 吴庆举, 曾融生. 1998. 用宽频带远震接收函数研究青藏高原的地壳结构[J]. 地球物理学报, 41(5): 669-679.
- 吴宣志, 吴春玲, 卢杰, 吴杰. 1995. 利用深地震反射剖面研究北祁连—河西走廊地壳细结构[J]. 地球物理学报, 38(增): 29-35.
- 熊绍柏, 刘宏兵. 1997. 青藏高原西部的地壳结构[J]. 科学通报, 42(12): 1309-1312.
- 熊绍柏, 腾吉文. 1985. 西藏高原地区的地壳厚度和莫霍界面的起伏[J]. 地球物理学报, 28(5): 16-28.
- 尹安. 2001. 喜马拉雅—青藏高原造山带地质演化—显生宙亚洲大陆生长[J]. 地球学报, 22(3): 193-230.
- 尹周勋, 腾吉文, 刘宏兵. 1990. 西藏高原亚东至当雄地带二维地壳结构的研究[J]. 地球学报, 21(2): 239-245.
- 曾融生 吴大铭 Thomas J. Owens. 1992. 中美合作课题“青藏高原地壳上地幔结构以及地球动力学的研究”介绍[J]. 地震学报, 14(增): 521-522.
- 曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 1994. 青藏高原岩石圈构造及动力学过程研究[J]. 地球物理学报, 37(增): 99-116.
- 曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 1998. 喜马拉雅—祁连山地壳构造与大陆一大陆碰撞过程[J]. 地球物理学报, 41(1): 49-60.
- 曾融生, 阚荣举. 1961. 柴达木盆地西部地壳深界面的反射波[J]. 地球物理学报, 10(2): 120-125.
- 张先康, 嘉世旭, 赵金仁, 张成科, 杨健, 王夫运, 张建狮, 刘宝峰, 孙国伟, 潘素珍. 2008. 西秦岭—东昆仑及邻近地区地壳结构——深地震宽角反射/折射剖面结果[J]. 地球物理学报, 51(2): 439-450.
- 张先康, 赵金仁, 张成科, 任青芳, 聂文英, 成双喜, 潘素珍, 唐周琼. 2002. 帕米尔东北侧地壳结构研究[J]. 地球物理学报, 45(5): 665-671.
- 张中杰 腾吉文 杨立强 李英康 S. Klemperer. 2002. 藏南地壳速度结构与地壳物质东西向“逃逸”——以佩枯错—普莫雍错宽角反射剖面为例[J]. 中国科学 D 辑, 32(10): 793-798.
- 张中杰 王光杰 腾吉文 陈勇 李英康 李敬卫 范进义 S. Klemperer. 2001. 藏北地壳东西向结构与“下凹”莫霍面——来自宽角反射剖面的启示[J]. 中国科学 D 辑, 31(11): 881-888.
- 赵俊猛, 张先康, 邓宏钊, 张进. 2003. 拜城——大柴旦剖面上的地壳 Q 值结构[J]. 地球物理学报, 46(4): 503-509.
- 赵文津, 吴珍汉, 史大年, 熊嘉育, 薛光琦, 宿和平, 胡道功, 叶培盛. 2008. 国际合作 INDEPTH 项目横穿青藏高原的深部探测与综合研究[J]. 地球学报, 29(3): 328-342.
- 郑度, 姚檀栋, 2004. 青藏高原隆升与环境效应. 北京: 科学出版社.

- 郑洪伟, 李廷栋, 高锐, 赵大鹏, 贺日政. 2007. 印度板块岩石圈地幔向北俯冲到羌塘地体之下的远震 P 波层析成像证据[J]. 地球物理学报, 50(5): 1418-1426.
- 中国科学院地球物理研究所. 1981. 西藏高原当雄—亚东地带地壳与上地幔结构和速度分布的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, 24(2): 155-170.

## References:

- ANDREW R. Ross, BROWN Larry D, PASSAKORN Pananont, K D NELSON, SIMON KLEPERER, SETH Haines, ZHAO Wenjin, GUO Jingru. 2004. Deep reflection surveying in central Tibet: lower-crustal layering and crustal flow[J]. Geophysical Journal International, 156(1): 115-128.
- BECK Richard A, Burbank Douglas W, Sercombe William J, Riley Gregory W, Barndt Jeffrey K, Berry John R, Afzal Jamil, Khan Asrar M, Jurgen Hermann, Metje Jorgen, Cheema Amjad, Shafique Nasir A, Lawrence Robert D, Khan M. Asif. 1995. Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia[J]. Nature, 373(6509): 55-58.
- BRID P. 1991. Lateral extrusion of lower crust from under high topography, in the isostatic limit[J]. Journal of Geophysical Research, 96(B6): 10275-10286.
- BROWN L D, ZHAO Wenjin, NELSON K. D, Hauck M, Alsdorf D, Ross A, Cogan M, Clark M, LIU Xianwen, CHE Jinkai. 1996. Bright Spots, Structure, and Magmatism in Southern Tibet from INDEPTH Seismic Reflection Profiling[J]. Science, 274(5293): 1688-1690.
- CHEN Guo-ying, ZENG Rong-sheng, WU Da-ming, AN Chang-qiang, SU Xiao-lan. 1992. The lateral variation of rayleigh wave phase velocity and deep structure in Qinghai-Tibet. Acta Seismologica Sinica, 11(Suppl.): 565-572 (in Chinese).
- CHEN Jiu-hui, LIU Qi-yuan, LI Shun-cheng, GUO Biao, LAI Yu-an-gen. 2005. Crust and Upper Mantle S-Wave Velocity Structure across Northeastern Tibetan Plateau and Ordos Block[J]. China. Chinese J. Geophys., 48(2): 333-342 (in Chinese with English Abstract).
- CHEN Wang-ping, Ozalaybey S. 1998. Correlation between seismic anisotropy and bouguer gravity anomalies in Tibet and its implications for lithospheric structures[J]. Geophys. J. Int., 135: 93-101.
- CUI Zuo-zhou, LI Qiu-sheng, WU Chao-dong, YIN Zhou-xun, LIU Hong-bing. 1995. The crustal and deep structures in Golmud-Ejin Qi Ggt[J]. Chinese J. Geophys., 38 (Suppl. II): 15-28 (in Chinese with English Abstract).
- DING Zhi-feng, ZENG Rong-sheng. 1996. Observation and study of shear wave anisotropy in Tibetan plateau[J]. Chinese J. Geophys., 39(2): 211-220 (in Chinese with English Abstract).
- GAO Rui, HUANG Dong-ding, LU De-yuan, QIAN Gui, LI Ying-kang, KUANG Chao-yang, LI Qiu-sheng, LI Peng-wu, FENG Ru-jin, GUAN Ye. 2000. Deep seismic reflection profile across the contact zone of the west Kunlun orogenic belt and the Tarim basin[J]. Chinese Science Bulletin, 45(17): 2281-2286 (in Chinese).

- GAO Rui, LI Peng-wu, LI Qiu-sheng, GUAN Ye, SHI Da-nian, KONG Xiang-ru, LIU Hong-bing. 2001a. Deep process of the collision and deformation in northern Tibetan plateau— implications from deep seismic sounding results[J]. *Science in China (Series D)*, 31(Suppl.): 66-71 (in Chinese).
- GAO Rui, MA Yong-sheng, LI Qiu-sheng, ZHU Xuan, LI Qiu-sheng, LI Peng-wu, KUANG Chao-yang, LU Zhan-wu. 2006. Structure of the Lower Crust beneath the Songpan Block and West Qinling Orogen and Their Relations as Revealed by Deep Seismic Reflection Profiling[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(12): 1361-1367 (in Chinese with English Abstract).
- GAO Rui, WU Gong-jian. 1995. Geophysical model and geodynamic process of Yadong-Golmud geoscience transect on Qinghai-Tibet plateau[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 25(3): 241-250 (in Chinese with English Abstract).
- GAO Rui, XIAO Xu-chang, LIU Xun, et al.. 2001b. Detail lithosphere structure of the contact zone of west Kunlun and Tarim revealed by deep seismic reflection profile along the Xinjiang geotransect[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(6): 547-552 (in Chinese with English Abstract).
- GAO Rui. 1997. Thirty problems of the lithospheric structure and geodynamics in the Qinghai-Xizang Plateau. *Geological Review*, 43(5): 460-464 (in Chinese with English Abstract).
- HETENYI G, CATTIN R, VERGNE J, NABELEK JL. 2006. The effective elastic thickness of the India Plate from receiver function imaging, gravity anomalies and thermomechanical modelling[J]. *Geophysical Journal International*, 167(3): 1106-1118.
- HIRN A, LEPINE Jean Claude, JOBERT Georges, SAPIN Martine, WITTLINGER Gerard, XU Zhong-xin, GAO En-yuan, WANG Xiang-jing, TENG Ji-wen, XIONG Shao-Bai, PANDEY M. R, TATER J M. 1984a. Crustal structure and variability of the Himalayan border of Tibet[J]. *Nature*, 307(5946): 23-25.
- HIRN A, NERCESSIAN Alexandre, SAPIN Martine, JOBERT Georges, XU Zhong-Xin, GAO En-yuan, LU De-yuan, TENG Ji-wen. 1984b. Lhasa block and bordering sutures—a continuation of a 500-km Moho traverse through Tibet[J]. *Nature*, 307(5946): 25-27.
- HUANG Ji-jun. 2001. Structural characteristics of the basement of the Qiangtang basin. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 333-337.
- HUANG Li-yan, LI Guang-cen, GAO En-yuan, WANG Shi, CUI Zuo-zhou. 1992. Characteristics of the structure and velocity distribution of crust in Xiang plateau[M]. Geological Memors, Beijing: Geological publishing house69-100(in Chinese).
- Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences (CAS), 1981. Explosion seismological study for velocity distribution and structure of the crust and upper mantle from Damxung to Yadong of Xizang plateau[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 24(2): 155-170 (in Chinese with English Abstract).
- J VERGNE, G WITTLINGER, QIANG Hui, PTAPPONNIER, G POUPINET, JIANG Mei, G HERQUEL, A PAUL. 2002. Seismic evidence for stepwise thickening of the crust across the NE Tibetan plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(1): 25-33.
- JIANG Mei, Galv A, HIRN A, DE VOOGD B, LAIGLE M, SU H. P, DIAZ J, LERINE J C, WANG Y X 2006. Crustal thickening and variations in architecture from the Qaidam basin to the Qang Tang (North-Central Tibetan Plateau) from wide-angle reflection seismology[J]. *Tectonophysics*, 412(3-4): 121-140.
- JIANG Mei, LU Qing-tian, SHI Da-nian. 1996. The study on the structure of crustal and upper mantle with natural earthquakes on central Tibetan plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 39(4): 470-482 (in Chinese with English Abstract).
- JIANG Mei, LU Qing-tian, XUE GUANG-qi. 1994. Research on crustal structures of Qinghai-Xizang plateau by means of a seismic experiment jointly conduct by Chinese and French geophysicists[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 37(3): 412-413 (in Chinese with English Abstract).
- JIANG Mei, WANG You-xue, Nablek, J, QIAN Hui, WANG Ya-jun, ZHANG Li-shu, ZHAO Lei. 2008. The crust and upper mantle structure beneath the Himalaya orogenic belt: the result from local earthquake data analysis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1509-1516 (in Chinese with English Abstract).
- JIANG Mei, XU Zhi-qin, XUE GUANG-qi, SHI Da-nian. 1999. Seismic Profiling between Mangnai, Qinghai and Ruqiang[J], Xinjiang and Infrastructure Study. *Acta Geologica Sinica*, 73(2): 153-161 (in Chinese with English Abstract).
- KAO Honn, GAO Rui, RAU Ruey-Juin, SHI Danian, CHEN Rong-Yuh, GUAN Ye, WU Francis T. 2001. Seismic image of the Tarim basin and its collision with Tibet[J]. *Geology*, 29(7): 575-578.
- KAPP Paul, YIN An, HARRISON T. Mark, DING Lin. 2005. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 117(7-8): 865-878.
- KAPP Paul, YIN An, MANNING Craig E, MURPHY Mike, HARRISON T. Mark, SPURLIN Matthew, DONG Lin, DENG Xi-Guang, WU Cun-Ming. 2000. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet[J]. *Geology*, 28(1): 19-22.
- KIND R, YUAN X, SAUL J, NELSON D, SOBOLEV S. V, MECHIE J, ZHAO W, KOSAREV G, NI J, ACHAUER U, JIANGM. 2002. Seismic Images of Crust and Upper Mantle Beneath Tibet: Evidence for Eurasian Plate Subduction[J]. *Science*, 298(5596): 1219-1221.
- LI Cai, CHAI Qing-guo, CHENG Li-ren, XU Xiao-feng, HUANG Xiao-peng. 2005. Thought on some key geological problems in the Qiangtang area, Qinghai-Tibet plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(24): 295-301(in Chinese with English Abstract).
- LI Cai, WANG Tian-wu, YANG De-ming, YANG Ri-hong. 2001. The lithological composition and tectonic evolution of Qiangtang central uplift region, Tibet[J]. *Journal of Changchun college of Geology*, 31(1): 25-32(in Chinese with English Abstract).

- LI Cai. 1987. The Longmucuo-Shuanghu-Lancangjiang plate suture and the north boundary of distribution of Gondwana facies permo-carboniferous system in northern Xiang, China[J]. Journal of Changchun College of Geology, 17(2): 155-166 (in Chinese with English Abstract).
- LI Hai-ou, XU Xi-Wei, JIANG Mei. 2008. The deep geodynamics process in south central Qinghai-Tibet plateau[J]. Science in China (Series D), 38(5): 622-629 (in Chinese).
- LI Qiu-sheng, GAO Rui, LU Zhan-wu, GUAN Ye, ZHANG Ji-sheng, LI Peng-wu, WANG Hai-yan, HE Ri-zheng, KARPLUS Marianne. 2009. The thickness and structural characteristics of the crust across Tibetan plateau from active-sources seismic profiles[J]. Earth Science, 22: 21-31.
- LI Qiu-sheng, LU De-yuan, GAO Rui, ZHANG Zhi-ying, LIU Wen, LI Ying-kang, LI Jing-wei, FAN Jing-yi, XIONG Xian-ming. 2001. An Integrated Study of Deep Seismic Sounding Profile along Xinjiang Global Geoscience Transect (Quanshugou-Dushanzi)[J]. Acta Geoscientia Sinica, 22(6): 534-540 (in Chinese with English Abstract).
- LI Qiu-sheng, Peng, S. P, GAO Rui. 2004a. A review on the moho discontinuity beneath the Tibetan plateau[J]. Geological Review, 50(6): 598-612 (in Chinese with English Abstract).
- LI Qiu-sheng, Peng, Su-ping, GAO Rui, GUAN Ye, FAN Jing-yi. 2004b. Deep Tectonic Background of the 8.1 Ms Earthquake in the East Kunlun[J]. Acta Geoscientia Sinica, 25(1): 11-16 (in Chinese with English Abstract)
- LI Song-lin, ZHANG Xian-kang, Zhang, Cheng-ke. 2002. A preliminary study on the crustal velocity structure of Maqin-Lanzhou-Jingbian, China, by means of deep seismic sounding profile[J]. Chinese J of Geophys, 45(2): 210-217 (in Chinese with English Abstract).
- LI Yong-hua, Tian Xiao-bo, WU Qing-ju, ZENG Rong-sheng, ZHANG Rui-qing.. 2006. The poisson ratio and crustal structure of the central Qinghai-Xizang inferred from INDEPTH-Ⅲ teleseismic waveforms: Geological and Geophysical Implications[J]. Chinese J. Geophys, 49(4): 1037-1044 (in Chinese with English Abstract).
- LIU Hong-bing, TENG Ji-wen. 1990. Characteristics of the 2-D crustal structure and fault distribution beneath the Seiling Co-Yangamdo in the northern Xizang plateau[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 21: 259-277 (in Chinese with English Abstract).
- LU De-yuan, WANG Xiang-jing. 1990. The crustal structure and deep internal processes in Tuotuohe-Golmud area of the north Qinghai-Xizang plateau[J]. Bulletin of The Chinese Academy of Geological sciences, 21: 227-237 (in Chinese with English Abstract).
- LU Qing-tian, JIANG Mei, GAO Rui, et al.. 1997. The gravity modelling of moho variations and its significance to uplift of Qinghai-Xizang plateau[J]. Acta Geoscientia Sinica, 18(1): 78-86 (in Chinese with English Abstract).
- LU Qing-tian, JIANG Mei, MA Kai-yi, A. HIRN A, NERCESSIAN. 1996. 3-D travel time tomography inversion and the deep structure of suthern Tibet[J]. Acta Seismologica Sinica, 18(4): 451-459 (in Chinese).
- LU Zhan-wu, GAO Rui, LI Qiu-sheng, GUAN Ye, ZHANG Ji-sheng, HE Ri-zheng, HUANG Li-yan. 2006. Deep geo-physical probe and geodynamic study on the Qinghai-Tibet Plateau (1958-2004)[J]. Chinese J. Geophys, 49(3): 753-770 (in Chinese with English Abstract).
- LU Zhan-wu, GAO Rui, LI Qiu-sheng, HE Ri-zheng, KUANG Chao-yang, HOU He-sheng, XIONG Xiao-song, GUAN-ye, WANG Hai-yan. 2009. Test of deep seismic reflection profiling across central uplift of Qiangtang terrane in Tibetan plateau. Journal of Earth Science, 20(2): 438-447.
- Marianne Karplus, Simon KLEPERER, ZHAO Wenjin, WU Zhen-han, SHI Danian, Su Heping, Larry BROWN, CHEN Chen, Jim Mechie, Rainer KIND, Fred Tilmann, Yizhaq Makovsky, Rolf MEISSNER, INDEPTH Team. 2008. Northeast Tibetan crustal structure from INDEPTH IV controlled-source seismic Data[R]. 23<sup>RD</sup> HIMALAYAN-KARAKORAM-TIBET WORKSHOP, INDIA.
- PELKUM Vera, MONSALVE Gaspar, SHEEHAN Anne, PANDEY M. R, SAPKOTA Som, BILHAM Roger, WU Francis. 2005. Imaging the Indian subcontinent beneath the Himalaya[J]. Nature, 435(7046): 1222-1225.
- QAYYUM M, LAWRENCE R, NIEM A. 1997. Molasse-Delta-flysch continuum of the Himalayan orogeny and closure of the Paleogene Katawaz Remnant Ocean, Pakistan[J]. International geology review, 39(10): 861-875.
- QIAN Hui, JIANG Mei, CHEN Wang-ping, JOHN Nabelek, ZHAO Da-peng, ZHAO Lei, WANG Ya-jun. 2007. Tomography of Tgyirong-Lugu profile (Hi-Climb) and the subduction of Indian-Tibet collision[J]. Chinese J. Geophys, 50(5): 1233-1244 (in Chinese with English Abstract).
- R MEISSNER, W RABELL, H KERN. Seismic lamination and anisotropy of the Lower Continental Crust[J]. Tectonophysics, 416(1-4): 81-99.
- ROSS A R, BROWN L D, PANANONT P, NELSON K D, KLEMPERER S, HAINES S, ZHAO W, GUO J. 2004. Deep reflection surveying in central Tibet: lower-crustal layering and crustal flow[J]. Geophys J Int 156: 115-128.
- ROWLEY David B. 1996. Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data[J]. Earth and Planetary Science Letters, 145(1-4): 1-13.
- ROWLEY David B. 1998. Minimum Age of Initiation of Collision between India and Asia North of Everest Based on the Subsidence History of the Zephure Mountain Section[J]. The Journal of Geology, 106(2): 220-235.
- SHI Da-nian, YU Qin-fan, Georges HERQUEL, Gerard WITTLINGER, JIANG Mei. 2007. Crustal structures across the Altyn Tagh fault imaged by teleseismic receiver functions and their geodynamic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 81(1): 139-148 (in Chinese with English Abstract).
- TENG Ji-wen, 1974. Deep reflected waves and the structure of the earth crust of the eastern Chaidam basin[J]. Acta Geophysica Sinica, 17(2): 122-135 (in Chinese with English Abstract).
- TENG Ji-wen, XIONG Shao-bo, YIN Zhou-xun, XU Zhou-xin,

- WANG Xiang-jing, LU De-yuan, Georges Jobert, Alfred HIRN. 1983. Structure of the Crust and Upper Mantle Pattern and Velocity Distributional Characteristics at Northern Region of the Himalayan Mountains[J]. Chinese J. Geophys., 26(6): 525-540 (in Chinese with English Abstract).
- TENG Ji-wen, YIN Zhou-xun, XIONG Shao-bo. 1985. Crustal structure and velocity distribution beneath the Serlin, Peng Naqu and Suo counties region in the northern Xizang plateau[J]. Acta Geophysica Sinica, 28(2): 28-42 (in Chinese with English Abstract).
- TENG Jiwen, ZENG Rongsheng, YAN Yafen, ZHANG hui. 2002. The depth distribution of Moho boundary and its basic structural pattern of East Asian continent and its peripheral sea[J]. Science in China, Series D, 32(2): 89-100.
- TILMANN F, NI James, INDEPTH Seismic Team. 2003. Seismic imaging of the downwelling Indian lithosphere beneath central Tibet[J]. Science, 300(5624): 1424-1427.
- VERGNE Jerome, WITTLINGER Gerard, HUI Qiang, TAPPONNIER Paul, POUPINET Georges, JIANG Mei, HERQUEL Georges, PAUL Anne. 2002. Seismic evidence for stepwise thickening of the crust across the NE Tibetan plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 203(1): 25-33.
- WANG Chun-yong, ZHU Liang-ban. 1991. Progress in research on crustal seismology of the Qinghai-Xizang plateau[J]. Recent Developments in World Seismology, 2: 1-4 (in Chinese with English Abstract).
- WANG Chun-yong, Han Wei-bin, WU Jian-ping, LOU Hai, BAI Zhi-ming. 2003b. Crustal Structure beneath the Songpan-Garze Orogenic Belt[J]. Acta Seismologica Sinica, 16(3): 237-250 (in Chinese with English Abstract)
- WANG Chun-yong, LOU Hai, LU Zhi-Yong, YAO Zhi-xiang, DAI Shi-gui, YOU Hui-chuan. 2008. S wave velocity structure of crust and upper mantle in eastern Qinghai-Tibet plateau: the deep environment of lower crust flow[J]. Science in China (Series D), 38(1): 22-32 (in Chinese).
- WANG Chun-yong, WU Jian-ping, Lou, Hai, ZHOU Min-du, BAI Zhi-ming. 2003a. P Wave Crustal Velocity Structure in Western Sichuan and Eastern Tibetan Region[J]. Science in China (Series D), 33(Suppl.): 254-265 (in Chinese).
- WANG Hai-yan, GAO Rui, MA Yong-sheng, ZHU Xuan, LI Qiu-sheng, KUANG Chao-ying, LI Peng-wu, LU Zhan-wu. 2007. Basin-Range Coupling and Lithosphere Structure between the Zoige and the Set Qinling[J]. Chinese J. Geophys., 50(2): 472-481 (in Chinese with English Abstract).
- WANG Wei-min, SU You-liang, GAO Xing, GUO Zhi. 2008. A study of the velocity structure beneath Himalaya mountain chain region using transform function method[J]. Chinese J. Geophys., 51(6): 1735-1744 (in Chinese with English Abstract)
- WANG You-xue, W D MOONEY, HAN Guo-hua, YUAN Xue-cheng, JIANG Mei. 2005. Crustal P-wave velocity structure from Altyn Tagh to Longmen mountains along the Taiwan Altay geoscience transect[J]. Chinese J. Geophys., 98-106 (in Chinese with English Abstract).
- WITTLINGER G, VERGNE J, TAPPONNIER P, FARRE V, POUPINET G, JIANGM, SU H, HERQUEL G, PAUL A. 2004. Teleseismic imaging of subducting lithosphere and Moho offsets beneath western Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 221(1-4): 117-130.
- WU Gong-jian, GAO Rui, YU Qin-fan, CHENG Qing-yun, MENG Ling-shun, DONG Xue-bin, CUI Zuo-zhou, YIN Zhou-xun, SHEN Xian-jie, ZHOU Yao-xiu. 1991. Integrated investigations of the Tibetan plateau along the Yadong-Golmud geoscience transect. Acta Geophysica Sinica, 34(5): 552-562 (in Chinese with English Abstract).
- WU Qing-ju, ZENG Rong-sheng, ZHAO Wen-jin. 2004. Dipping Structure of Upper Mantle and Continent-Continent Collision in Himalayas-Tibet Plateau[J]. Science in China (Series D), 34(10): 919-925 (in Chinese).
- WU Qing-ju, ZENG Rong-sheng. 1998. The crustal structure of Qinghai-Xizang plateau inferred from broadband teleseismic waveform[J]. Chinese J. Geophys., 41(5): 669-679 (in Chinese with English Abstract).
- WU Xuan-zhi, WU Chun-ling, LU Jie, WU Jie. 1995. Research on the Fine Crustal Structure of the Northern Qilian-Hexi Corridor by Deep Seismic Reflection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 38(Suppl. A): 29-35 (in Chinese with English Abstract).
- XIONG Shao-bo, TENG Ji-wen, YIN Zhou-xun. 1985. The Thickness of the crust and undulation of discontinuity in Xizang (Tibet) plateau[J]. Acta Geophysica Sinica, 28(Suppl.): 16-27 (in Chinese with English Abstract).
- XIONG Shao-bo, LIU Hong-bing. 1997. Crustal structure in the western Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 42(12): 1309-1312 (in Chinese with English Abstract).
- XU Lili, RONDENAY Stephane, VAN DER Hilst Robert D. 2007. Structure of the crust beneath the southeastern Tibetan Plateau from teleseismic receiver functions[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 165(3-4): 176-193.
- YIN An. 2001. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen in the context of phanerozoic continental growth of Asia[J]. Acta Geoscientia Sinica, 22(3): 193-230 (in Chinese with English Abstract).
- YIN Zhou-xun, TENG Ji-wen, LIU Hong-bing, 1990. The 2-D crustal structure study in the Yadong-Damxung region of the Xizang plateau[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 21: 239-245 (in Chinese with English Abstract).
- ZENG Rong-sheng, DING Zhi-feng, WU Qing-ju. 1994. A review of the lithospheric structures in Tibetan plateau and constraints for dynamics. Acta Geophysica Sinica, 37(Suppl.): 99-116 (in Chinese with English Abstract).
- ZENG Rong-sheng, DING Zhi-feng, WU Qing-ju. 1998. The crustal structure from Himalaya to Qilian and its implications for continent-continent collision process[J]. Chinese J. Geophys., 41(1): 49-60 (in Chinese with English Abstract).
- ZENG Rong-sheng, KAN Rong-ju. 1961. Reflected waves from

- crustal interface in western Qaidam basin[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 10(1): 120-125 (in Chinese with English Abstract).
- ZENG Rong-sheng, WU F, Owens T J. 1992. Introduction of Sino-American project "study of geodynamics and structure of crust and upper mantle of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 14(Suppl.): 521-522 (in Chinese).
- ZHANG Xian-kang, JIA Shi-xu, ZHAO Jin-ren, ZHANG Cheng-ke, YANG Jian, WANG Fu-yun, ZHANG Jian-shi, LIU Bao-feng, SUN Guo-wei, PAN Su-zhen. 2008. Crustal structures beneath west Qinling-east Kunlun orogen and its adjacent area—results of wide-angle seismic reflection and refraction experiment[J]. *Chinese J. Geophys.*, 51(2): 439-450 (in Chinese with English Abstract).
- ZHANG Xian-kang, ZHAO Jin-ren, ZHANG, Chen-ke, REN Qing-fang, NIE Wen-ying, CHENG Shuang-xi, PAN Su-zhen, TANG Zhou-qiong. 2002. Crustal Structure at the Northeast Side of the Pamirs[J]. *Chinese J. Geophys.*, 45(5): 665-671 (in Chinese with English Abstract).
- ZHANG Z J, Wang, G J. 2002. P-wave structure along 1100 km long wide-angle seismic profile in the eastern Tibet[R]. AGU, Japan.
- ZHANG Zhong-jie, TENG Ji-wen, YANG Li-qiang, LI Ying-kang, S. KLEPERER. 2002. Crustal Velocity Structure and Eastward Escaping of Crustal Material in the Southern Tibet[J]. *Science in China (Series D)*, 32(10): 793-798 (in Chinese).
- ZHANG Zhong-jie, WANG GUANG-jie, TENG Ji-wen, CHEN Yun, LI Ying-kang, LI Jing-wei, FAN Jin-yi, S Klemperer. 2001. E-W crustal structure under the northern Tibet and 'down-bowing' Moho under the northern Tibet revealed by wide-angle seismic profile[J]. *science in China (Series D)*, 31(11): 881-888 (in Chinese).
- ZHAO Jun-meng, MOONEY Walter D, ZHANG Xian-kang, LI Zhi-chun, JIN Zhi-jun, OKAYA Nihal. 2006a. Crustal structure across the Altyn Tagh Range at the northern margin of the Tibetan Plateau and tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3-4): 804-814.
- ZHAO Jun-meng, JIN Z, WANG S, GAO X, TANG L, PEI S, LIU H, XU Q, 2006b. Structure of the crust and uppermost mantle of the Qaidam basin imaged by active seismic data, 2006 Western Pacific Geophysics Meeting. *Tectonophysics* [T].
- ZHAO Jun-meng, ZHANG Xian-kang, DENG Hong-zhao, ZHANG Jin. 2003. Q value structure of the upper crust along the profile from Baicheng to Da Qaidam[J]. 46(4): 503-509 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO W, MECHIE J, BROWN L. D, GUO J, HAINES S, HEARN T, KLEPERER S L, MA Y S, MEISSNER R, NELSON K. D, NI J F, PANANONT P, RAPINE R, ROSS A, SAUL J. 2001. Crustal structure of central Tibet as derived from project INDEPTH wide-angle seismic data[J]. *Geophysical Journal International*, 145(2): 486-498.
- ZHAO Wen-jin, NELSON K. D, CHE J, QUO J, LU D, WU C, LIU X. 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet[J]. *Nature*, 366(6455): 557-559.
- ZHAO Wen-jin, WU Zhen-han, SHI Da-nian, XIONG Jia-yu, XUE Guang-qi, SU He-ping, HU Dao-gong, YE Pei-sheng. 2008. Comprehensive Deep Profiling of Tibetan Plateau in the INDEPTH Project[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(3): 328-342 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO Wenjin, ZHAO Xun, SHI Da-nian, LIU Kui, JIANG Wan, WU Zhen-han, XIONG Jia-yu, ZHENG Yu-kun. 2004. Progress in the Study of Deep Profiles of Tibet and the Himalayas (INDEPTH)[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(4): 931-939.
- ZHENG Du, YAO Tan-dong, et al. 2004. Uplift of Tibetan plateau with its environmental effects[M]. Beijing: Science Press, 60-65 (in Chinese).
- ZHENG Hong-wei, LI Ting-dong, GAO Rui, ZHAO Da-peng, HE Ri-zheng. 2007. Teleseismic P-wave tomography evidence for the Indian lithospheric mantle subducting northward beneath the Qiangtang terrane[J]. *Chinese J. Geophys.*, 50(5): 1223-1232 (in Chinese with English Abstract).
- ZHU Lupei, HELMBERGER Donald V. 1998. Moho offset across the northern margin of the Tibetan plateau[J]. *Science*, 281(5380): 1170-1172.