

# 喜马拉雅东构造结岩石圈板片深俯冲的地球物理证据<sup>\*</sup>

姜枚<sup>1</sup> 彭淼<sup>1,2</sup> 王有学<sup>3</sup> 谭捍东<sup>2</sup> 李庆庆<sup>1</sup> 张立树<sup>1</sup> 王伟<sup>1,2</sup>

JIANG Mei<sup>1</sup>, PENG Miao<sup>1,2</sup>, WANG YouXue<sup>3</sup>, TAN HanDong<sup>2</sup>, LI QingQing<sup>1</sup>, ZHANG LiShu<sup>1</sup> and WANG Wei<sup>1,2</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所,大陆构造与动力学国家重点实验室,北京 100037

2. 中国地质大学地球物理与信息技术学院,北京 100083

3. 桂林理工大学地球科学学院,桂林 541004

1. State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. School of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2010-02-10 收稿,2010-04-28 改回.

Jiang M, Peng M, Wang YX, Tan HD, Li QQ, Zhang LS and Wang W. 2012. Geophysical evidence for deep subduction of Indian lithospheric plate beneath Eastern Himalayan Syntaxis. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1755–1764

**Abstract** We conducted broadband seismic observation and MT detection around the Namche Barwa from 2009 to 2010. P wave velocity perturbations down to 300km were obtained and two electrical models were acquired by 2D inversion. There are similar features between electrical models and the corresponding tomographic images by joint interpretation. Our results show that the upper crust of Namche Barwa is separated by IYS and consists of prominent high-velocity and resistive blocks. The mid-lower crust is inhomogeneous and characterized by low-velocity and conductive anomaly. The Indian lithospheric mantle has subducted beneath Eurasian plate and its frontier has passed through the Jiali shear zone and reached the Bangong-Nujiang suture; A large-scale low-velocity anomaly is revealed within the Lhasa block beneath the high-velocity plate from 100km to 200km depth, above which the mid-lower crust is an extensive low-velocity conductor. This suggests that there exist channels beneath southeastern Tibetan Plateau favorable to weak and flowable materials exuding towards east and southeast, which gives geophysical evidence for the dynamics mode of deep-subduction of Indian Plate beneath the Namche Barwa.

**Key words** Broadband; Magnetotellurics; Slab deep subduction; Eastern Himalayan Syntaxis; Himalaya

**摘 要** 2009~2010 年在南迦巴瓦地区进行了宽频带地震和大地电磁探测,分别处理获得东构造结及其邻区的地下 300km 以上的 P 波速度图像和两条大地电磁电阻率剖面。通过资料的对比和综合解释,发现电阻率分布与地震波速有较好的对应关系。研究结果表明:南迦巴瓦变质体的上地壳部分呈现明显高速高阻特征,为两侧的雅鲁藏布江缝合带所夹持;中下地壳具有不均匀性,且普遍呈低速低阻特征;印度板块在藏东南向欧亚板块的俯冲前缘越过嘉黎断裂,抵达班公湖-怒江缝合带;在拉萨地体的高速俯冲板片以下 100km 至 200km 深度范围内存在大规模的低速异常带,其上盘中下地壳也广泛发育低速高导体,指示青藏高原东南缘可能存在韧性易流动的物质向东、东南逃逸的通道,为印度板块在南迦巴瓦的深俯冲动力学模式提供了地球物理证据。

**关键词** 宽频地震;大地电磁;板片深俯冲;东构造结;喜马拉雅

中图法分类号 P313

印度板块与欧亚板块的碰撞一直以来都为广大地质、地球物理学家所关注,喜马拉雅造山带被公认为是印度板块与

<sup>\*</sup> 本文受中国地质调查局项目(1212010918015)资助。

第一作者简介:姜枚,男,1937 年生,研究员,长期从事深部和矿区地球物理探测研究,E-mail: mjmeij@gmail.com

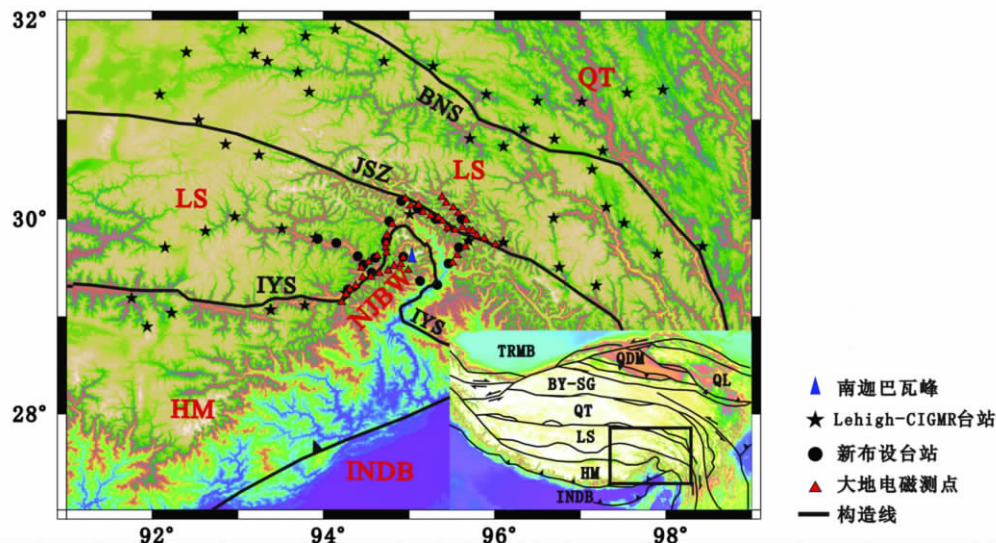


图1 喜马拉雅东构造结宽频地震台站及大地电磁测点位置

IYS-雅鲁藏布江缝合带; JSZ-嘉黎剪切断裂带; BNS-班公湖-怒江缝合带; NJBW-南迦巴瓦东构造结; LS-拉萨地体; QT-羌塘地体; HM-喜马拉雅地体; INDB-印度陆块

Fig. 1 Map of the location of broadband seismic stations and magnetotelluric sites in Eastern Himalayan Syntaxis

IYS-Indus-Yarlung Tsangpo suture; JSZ-Jiali shear zone; BNS-Bangong-Nujiang suture; NJBW-Namche Barwa tectonic syntaxis; LS-Lasa terrain; QT-Qiangtang terrain; HM-Himalaya terrain; INDB-Indian block

欧亚板块相碰撞的结果 (Argand, 1924; Yin and Harrison, 2000; Tapponnier *et al.*, 2001; 许志琴等, 2006a, b)。南迦巴瓦东构造结 (Namche Barwa Sytaxis) 位于喜马拉雅山脉的东缘, 是研究陆-陆碰撞的重点地区之一。区内从南往北划分为印度地体、雅鲁藏布江缝合带和拉萨地体三个构造单元。构造结外侧为欧亚大陆岩系, 其核部变质地体为印度大陆高喜马拉雅岩系。组构运动学的研究认为: 南迦巴瓦变质体受制于东侧右行走滑和西侧左行走滑断裂相对喜马拉雅地体向北推移, 并深深插入拉萨地体之下 (许志琴等, 2008)。南迦巴瓦变质体中大片高压麻粒岩和石榴辉石岩的发现揭示出古近纪的高压 (超高压) 变质作用, 认为印度板块向欧亚板块之下的俯冲深度达到 80 ~ 100 km (张泽明等, 2007)。

在东构造结形成的动力学机制方面, 最近的研究认为楔形印度板块与大亚洲板块的碰撞同时产生正向碰撞和斜向碰撞两类效应, 而东、西构造结的形成均受到斜向碰撞的影响, 并且与深部板块的俯冲角度和样式以及板块边界的几何学、运动学、岩石圈流变学等有关 (许志琴等, 2010, 2011)。

尽管近年来对东构造结的构造格架和岩石学研究都有了一些成果, 但由于南迦巴瓦地区地形地势的复杂性, 地球物理学研究程度还相当低, 缺乏对岩石圈深部结构的认识。为此, 我们从 2009 年至 2010 年在南迦巴瓦地区开展了宽频地震和大地电磁法的探测工作 (图 1)。本文通过对这一地区已有地震资料及新观测到的宽频地震数据处理获得的地震层析结果, 并结合两条大地电磁剖面的反演结果进行对比和综合解释, 为喜马拉雅东构造结的地球动力学研究提

供深部地球物理证据。

## 1 地球物理探测方法与数据处理

### 1.1 地震层析和宽频地震数据处理

天然地震层析 (Teleseismic Tomography) 是利用地震波各种震相的走时、射线路径等运动学资料反演地下介质速度分布的一种地球物理方法, 在解决地壳上地幔深部构造和地球动力学问题上是十分有效的方法。自从 1974 年地震波走时层析成像方法问世以来, 地震层析成像在理论和方法上都取得了重大进展, 全球和区域尺度的应用成果相继发表 (Zhao *et al.*, 1992, 1994; Zhao and Lei, 2004), 特别是在青藏高原得到了广泛应用 (Matte *et al.*, 1996; Wittlinger *et al.*, 1996, 1998, 2004; Kosarev *et al.*, 1999; Kind *et al.*, 2002; Kao *et al.*, 2001; Tilmann and Ni, 2003; Li *et al.*, 2008)。

国内研究者普遍通过分析 P 波或 S 波的走时残差数据, 采用 ACH 方法反演台站下方三维速度结构研究青藏岩石圈结构 (吕庆田等, 1996; 史大年等, 1999; 姜枚等, 1996; 丁志峰等, 2001; 王有学等, 2004, 2006; 薛光琦等, 2004, 2006)。近年来, 国内学者采用日本爱媛大学赵大鹏教授的 TOMO3D 地震层析成像方法 (Zhao *et al.*, 1992, 1994) 进行青藏高原天然地震资料的处理 (郭飏等, 2004; 郑洪伟等, 2007; He *et al.*, 2010)。为了提高速度结构的分辨率, 也有学者把一些转换、反射后序震相 (如 sP, pP, Pn, PmP, PKIKP 等) 加入到层析成像反演中 (Zhao and Lei, 2004; Rawlinson and Sambridge, 2004;

Rawlinson and Urvoy 2006), 或者联合使用区域震和远震数据做反演(钱辉等 2007)。

本文利用 ACH 层析成像技术 (Aki *et al.*, 1977; Wittlinger *et al.*, 1996, 1998, 2004) 对其下部的深部速度结构进行成像。用于层析成像的宽频带地震数据由两部分组成: 一部分是来自 Lehigh-CIGMR 在南迦巴瓦及其周边地区完成的宽频带地震探测项目的地震数据, 另一部分来自中国地质科学院正在南迦巴瓦地区进行的宽频带地震观测数据。其中正在进行的宽频带地震观测具有更密的台站分布, 观测采用美国 Ref-Tek130 地震仪, 配备 STS-2 和 Trillium-40 检波器, 期间共布设三分量地震台站 24 台次, 台站间距约 20km, 其中部分地震台至今仍在持续观测中。此外, 还使用了林芝等地方台网的地震记录(郑秀芬等 2009)。数据的联合使用为研究青藏高原东部的深部细结构提供了更丰富的宽频带地震数据。

挑选的地震数据由震级大于 4.5 级的 2762 个地震的 P 和 PKPdf 两个震相构成, 共有 26626 走时数据参加了该区的深部速度结构的研究(图 2)。按照水平面内 25km × 25km、厚度为 25km 的尺度大小, 将研究区域剖分为 15625 个体, 在成像过程中, 对每个台站的地震射线计算相对走时残差, 射线穿过了其中的 3153 个单元, 最终的反演方差达到 0.061。

## 1.2 大地电磁测深及其数据处理

大地电磁法 (Magnetotellurics) 也是研究地壳和上地幔结构的主要方法之一。大陆普遍存在地壳内和上地幔高导层。它以天然平面电磁波为场源, 通过在地表观测相互正交的电

磁场分量来获取地下地电构造信息, 是一种天然源的频率域电磁法。由于天然电磁场中含有从高频到低频丰富的频率成分, 不同频率成分的电磁波具有不同的趋肤深度, 因此通过观测地面信号能达到探测不同深度的目的。其最大探测深度可以达到上百千米, 并且具有不受高阻层屏蔽, 对低阻层反映灵敏等优点, 近十年来在青藏高原得到广泛应用, 发现了高原的地壳可能普遍存在“流体”或局部“熔融体”(Wei *et al.*, 2001), 而且揭示青藏高原东部存在两条地壳物质流 (Bai *et al.*, 2010)。

大地电磁资料获得的深部高导体通常与宽频地震获得的深部低速层有较好相关性, 主要反映脱水相变和部分熔融, 这一点可以相互验证各自结果的可靠性。一般壳内高导层大多出现在中地壳, 而且高导层的分布与地球动力学过程密切相关。更为重要的是, 非常低的电阻率和速度结构一般是地下连通的流体的反应, 流体可能是局部熔融体或者是水。对于这一点地震资料是无法区分的, 但是由大地电磁提供的电阻率值结合热结构则有可能区分是局部熔融体或者是水, 成为天然地震探测所获得信息的有力补充。

本文大地电磁数据观测使用加拿大凤凰公司生产的 V5-2000 大地电磁系统, 期间共采集 51 个点的 320 ~ 0.0005Hz 宽频数据, 测点间距约 5km。室内的资料处理首先对电磁场各个分量的时间序列进行频谱分析, 采用 Robust 估计方法估算阻抗张量元素, 并进行 Rhoplus 分析(谭捍东等 2004a, b) 消除背景噪声干扰等因素引发的视电阻率和相位曲线的畸变。此外, 对采集到的岩石标本做了电阻率测定, 标本位于钻孔中 206.6m 至 252.4m 深度范围内, 主要由纯橄岩、辉橄岩和橄榄岩组成, 测试所获得的平均电阻率为 4092 欧姆·米。

大地电磁二维反演的的方法较多, 主要以非线性迭代反演方法为主, 包括奥克姆 (OCCAM) 法 (Constable *et al.*, 1987; deGroot-Hedlin and Constable, 1990), 快速松弛反演法 (RRI) (Smith and Booker, 1991; 谭捍东等 2003) 和共轭梯度反演法 (CG) 等 (Newman and Alumbaugh, 2000; Rodi and Mackie, 2001; Lin *et al.*, 2011)。其中共轭梯度反演是当前实用性较强、效果较好的反演方法之一。本文采用共轭梯度反演方法分别对两条测线选取两种极化模式 (即 TE 和 TM 模式) 的视电阻率和阻抗相位数据进行了联合模式的二维反演, 经过反复修改反演控制参数, 达到了整条断面多参数的最佳拟合。

## 2 南迦巴瓦及其邻区的速度结构特征

东构造结及其邻区的体波速度扰动图像如图 3 和图 4 所示。其中图 3 为不同深度的水平切片, 图中南迦巴瓦变质体位于雅江缝合带 (IYS) 的内部, 为印度板块的高喜马拉雅岩系, 外侧为拉萨地体 (LS), 广泛发育冈底斯花岗岩。拉萨地体被嘉黎断裂 (JSZ) 所分割, 一直延伸到班公湖-怒江缝合带 (BNS)。

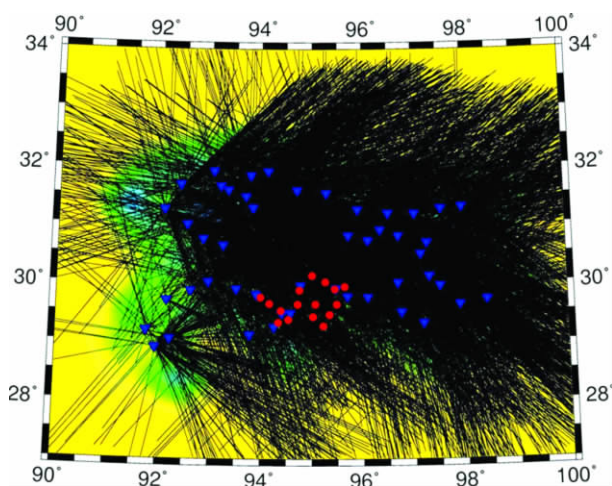


图 2 地震射线路径分布图

图中反三角为 Lehigh-CIGMR 台站, 圆图为 2009 ~ 2010 年新布设台站

Fig. 2 Map of the seismic ray path distribution

Inverse triangle-Lehigh-CIGMR; circle-latest stations from 2009 to 2010



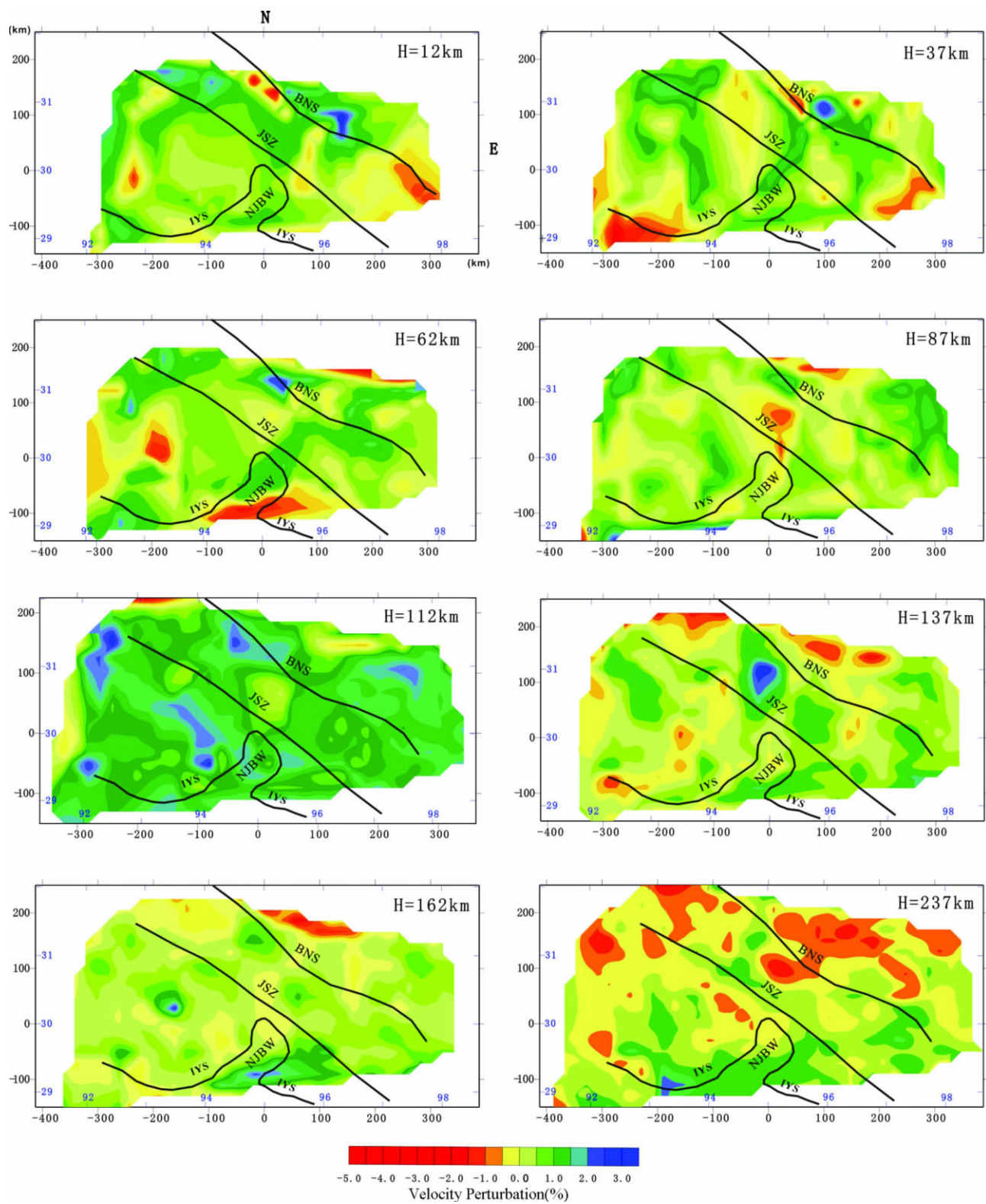


图3 南迦巴瓦及其邻区不同深度的体波速度扰动图像  
IYS-雅鲁藏布江缝合带; JSZ-嘉黎剪切断裂带; BNS-班公湖-怒江缝合带; NJBW-南迦巴瓦东构造结  
Fig. 3 P-velocity perturbation with different depth in the Namche Barwa and its purlieus  
IYS-Indus-Yarlung Tsangpo suture; JSZ-Jiali shear zone; BNS-Bangong-Nujiang suture; NJBW-Namche Barwa tectonic syntaxis

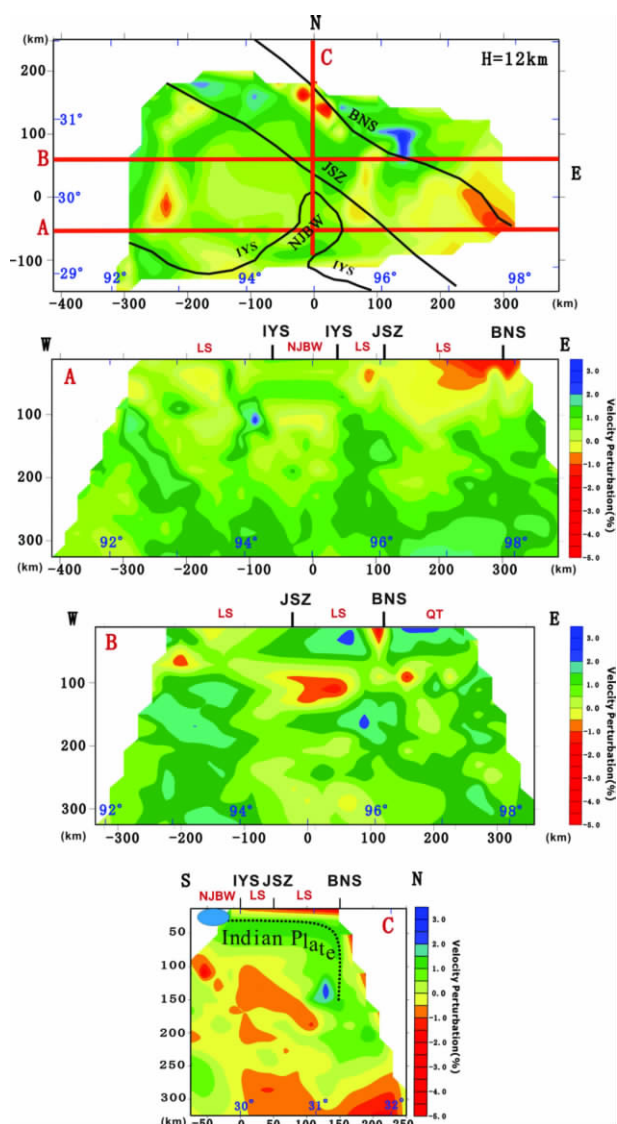


图4 南迦巴瓦及其邻区体波速度扰动垂直剖面图像

顶图为12km水平切片及标示的A、B、C剖面位置,下图分别为A、B、C剖面的层析图像。IYS-雅鲁藏布江缝合带;JSZ-嘉黎剪切断裂带;BNS-班公湖-怒江缝合带;NJBW-南迦巴瓦东构造结;LS-拉萨地体;QT-羌塘地体

Fig. 4 P-velocity perturbation in the Namche Barwa and its purlieus

The top figure shows horizontal slice at 12km depth and the location of profile A, B and C, the picture below show the corresponding tomography results of profile A, B and C. IYS-Indus-Yarlung Tsangpo suture; JSZ-Jiali shear zone; BNS-Bangong-Nujiang suture; NJBW-Namche Barwa tectonic syntaxis; LS-Lasa terrain; QT-Qiangtang terrain

12km 和 37km 水平切片均显示在位于拉萨地体的上地壳总体呈现北部高速,南部低速的特征,其中东南部速度更低;而南迦巴瓦构造结地区则呈高速扰动。62km 的切片显示在南迦巴瓦出现了明显的低速扰动,这可能与中下地壳的

流体或熔融的物质有关。南迦巴瓦的下地壳普遍存在低速带,这为南迦巴瓦为中下地壳楔状挤出的形成模式提供了地球物理证据。在 87km 的切片上,低速带出现在南迦巴瓦北面,而且越过了嘉黎断裂;而南迦巴瓦地区则是东西两侧具有高速扰动。在 112km 深度上,速度普遍较高,这一分布显示了上地幔顶部岩石圈的厚度变化特征。拉萨地块的北部显示为 NW 向展布的高速体,并且为嘉黎断裂及班公-怒江缝合带所夹持。由此向下至 237km 的范围内,速度扰动整体上呈现为低速扰动,反映了该区的软流圈的速度特征。而且,我们还发现南迦巴瓦及其附近地区从 137km 到 237km 深度都呈现高速扰动,这与周边区域形成鲜明对比,关于这一深部特征很值得做进一步地探讨。

在东西方向上,做了两条剖面(图4):A 剖面 and B 剖面。其中 A 剖面横穿南迦巴瓦,南迦巴瓦地质体呈高速扰动,而且被其两侧的低速带所夹持,与两侧的具有低速扰动的拉萨地块形成鲜明的对比。而在 B 剖面中,位于嘉黎断裂和班公湖-怒江缝合带之间的拉萨地体的深部具有明显的低速带。

在南北方向的剖面上(图4,C 剖面),可以清楚地看到印度板块向北部青藏高原深俯冲的图像,俯冲板片越过了嘉黎断裂,到达班公湖-怒江缝合带,并且在深部以高角度下插,向下伸入至 200km 以下。而且值得注意的是,在拉萨地体的高速体以下存在大规模的低速异常带,产状向北倾,这也是一个重要特征。另外还发现在俯冲带前缘 150km 深处具有一块更高速度扰动的物质,推测可能与碰撞过程中拆沉的“化石”残片的折返有关。

### 3 大地电磁反演结果

纵观两条大地电磁二维反演电阻率断面图,电性分布特征有一定差异,下面依次对每条测线的电性特征进行描述并做出推断解释。

大地电磁近东西向剖面(图5a)指示电阻率总体呈现西边高阻,东边低阻的电性特征。西边高阻区的浅地表具有串珠状的高阻体,规模比较小。这些浅部的高阻体应该对应于白垩—古近纪冈底斯花岗岩;中间两条陡立的低阻带可能来自嘉黎断裂带的反映。剖面东侧中下地壳呈低阻特征,而且电阻率值非常低,普遍低于 25 欧姆·米。而在西侧则呈现明显的高阻特征:高阻区 10km 以下发育巨大规模的高阻体,中心埋深在 30km 左右,延伸至 50km 以下,电阻率值普遍高于 6000 欧姆·米。由于该处测点位于拉萨地体,所以关于这个高阻体的解释有两种可能:一种观点认为是拉萨地体中下地壳的物质,另一种推测是南迦巴瓦变质体在深部的反映,认为南迦巴瓦变质体向北部拉萨地体的插入已经达到或者甚至越过了嘉黎断裂带。本文则更倾向于第二种观点,南迦巴瓦变质体应该是高阻异常的主要反映。

位于南迦巴瓦西侧的剖面(图5b)在浅地表也广泛发育高阻体,其中南部高阻体的规模较大,主体位于横向 10km 至



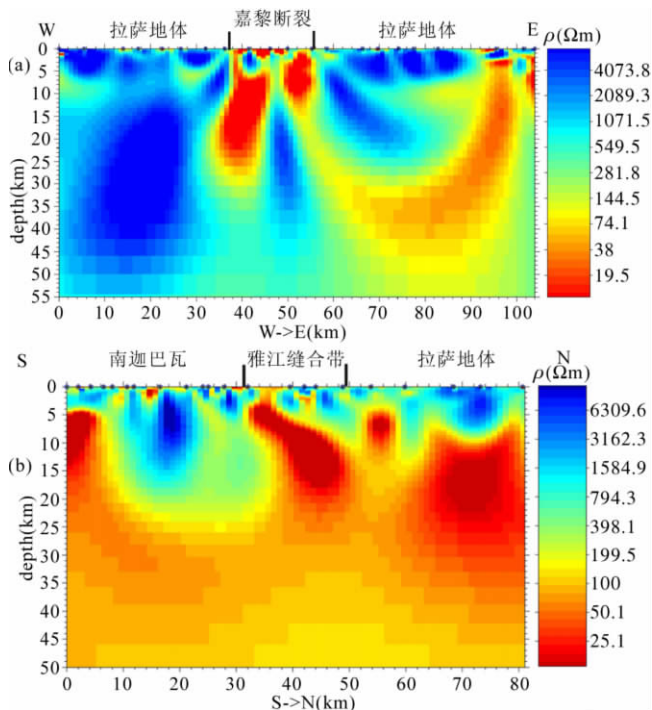


图5 南迦巴瓦大地电磁共轭梯度二维反演电阻率剖面  
(a) -东构造北侧近东西向电阻率剖面; (b) -东构造西侧近南北向电阻率剖面

Fig. 5 Magnetotelluric resistivity profile by conjugate gradient 2-D inversion in the Namche Barwa

(a) -W-E magnetotelluric resistivity profile to the north of the Namche Barwa; (b) -S-N magnetotelluric resistivity profile to the west of the Namche Barwa

25km 范围内, 向下延伸至 20km, 电阻率值达到 3000 欧姆·米, 推断高阻体为南迦巴瓦变质体的反映。最北端浅部的高阻体规模稍小, 仅延伸到地下 10km, 该高阻体可能对应于冈底斯花岗岩, 也有可能是花岗岩和南迦巴瓦变质体浅部岩片的综合反映; 25km 以下过渡到低阻区, 并且电阻率非常低, 部分区域小于 25 欧姆·米。在剖面中部的横向 30~50km 范围内具有低阻带, 延伸至地下 20km, 并与深部低阻区相连, 该处低阻带对应于雅鲁藏布江缝合带, 低阻带产状指示其向北倾。

#### 4 资料对比与综合解释

为了便于与大地电磁进行对比以进行综合地质解释, 对地震层析剖面做了单独的切片(剖面位置如图 6a 所示, 层析成像结果如图 6b 所示)。大地电磁电阻率剖面比地震层析短而且深度浅, 在地震层析图中圈出了大地电磁剖面的范围(如图 6b 蓝框所示)。

通过对比北纬 30°地震层析和大地电磁剖面的结果, 发现地震波速和电性特征具有宏观相似性: 地震层析剖面总体

呈现西侧高速, 东侧低速的波速变化特征, 并为嘉黎断裂所分割; 大地电磁剖面的嘉黎断裂以西发育大规模高阻体, 且一直延伸到下地壳, 而嘉黎断裂以东中下地壳物质则呈高导特征。也就是说, 无论是地震波速特征还是电性都指示了剖面上嘉黎断裂东西两侧的中上地壳物质的差异性: 西侧高阻高速, 东侧低阻低速。两种地球物理资料的吻合说明南迦巴瓦北侧(北纬 30°附近)的中下地壳结构在嘉黎断裂两侧具有较大差异。

为了对比南迦巴瓦变质体西侧大地电磁测线, 我们将地震层析剖面投影到南北方向上。通过对比这两种方法的结果, 发现具有以下相似结构: (1) 大地电磁和地震层析的结果显示在剖面南侧浅部具有高阻高速体, 由于该地区地表出露南迦巴瓦变质体岩片, 推断该高阻高速体为南迦巴瓦变质体的反映; (2) 剖面深部都呈现低阻低速的特征, 而且通过地震层析切片可见在下地壳 60km 深度附近具有更低的波速扰动区, 并指示该低速带向北部延伸, 但未越过嘉黎断裂。

#### 5 关于印度岩石圈板片深俯冲的探讨

在印度板块和亚洲板块碰撞过程中, 关于印度岩石圈板片的俯冲样式以及俯冲前缘位置一直都是青藏高原大陆动力学的关键问题。近些年来, 横跨喜马拉雅造山带的远震接收函数和地震层析资料为我们揭示印度俯冲板片的深部特征提供了重要证据。

根据 PASSCAL(1991~1992) 和 INDEPTH II(1994) 的流动台站数据, Kosarev *et al.* (1999) 处理得到的东经 90°至 95°范围内的近北向接收函数长剖面的结果显示, 印度岩石圈板片向北以低角度俯冲至班公湖-怒江缝合带, 而后直立下插, 深入到 300km 以下的亚洲大陆的地幔中。联合使用 INDEPTH II(1994) 和 INDEPTH III(1998~1999) 数据的 P 波层析成像结果表明, 印度板块在东经 88°至 90°范围内也俯冲至北纬 32°(班公湖-怒江缝合带) 以下, 前缘形态为陡倾下插(Tilmann and Ni 2003)。位于东经 84°至 86°范围内的 Hi-CLIMB 剖面的接收函数图像揭示了印度地壳以较缓角度插入青藏高原之下, 一直到达北纬 31°附近, 而且印度岩石圈地幔一直向前延伸, 并与欧亚大陆发生正向碰撞(Nábelek *et al.* 2009)。

Li *et al.* (2008) 的研究相应增加了 Lehigh-CIGMR, MIMNT 和 MIT 等流动台的数据, 其中东经 87°至 90°的层析结果进一步证实印度岩石圈板片前缘的俯冲样式为抵达班公湖-怒江缝合带的高角度深俯冲。可见, 在喜马拉雅造山带中段, 印度岩石圈板片先以低缓角度俯冲为主导, 当俯冲前缘抵达班公湖-怒江缝合带一带时, 其前缘以高角度深俯冲的样式下插至欧亚大陆地幔。此外, Li *et al.* (2008) 的研究还表明: 印度岩石圈板片的俯冲形态从西向东具有分段差异性, 其中在东段印度岩石圈板片向北并未见有明显下插的迹象, 而是向东深俯冲。

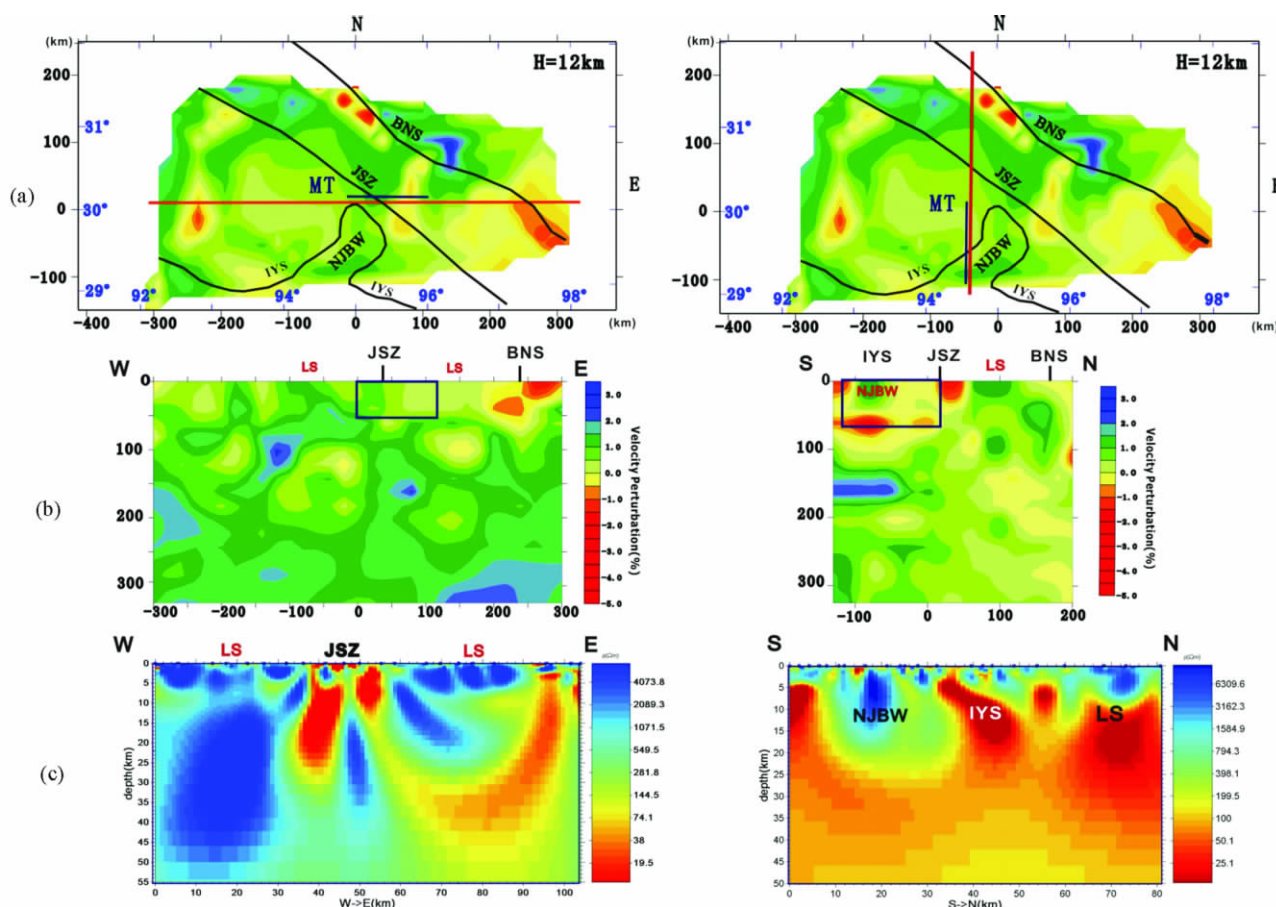


图6 南迦巴瓦地震层析与大地电磁测深剖面对比图

(a) 12km 水平切片及标示的地震层析和大地电磁剖面位置; (b) 地震层析剖面的速度扰动图像; (c) 大地电磁剖面的电阻率反演图像。IYS-雅鲁藏布江缝合带; JSZ-嘉黎剪切断裂带; BNS-班公湖-怒江缝合带; NJBW-南迦巴瓦东构造结; LS-拉萨地体

Fig. 6 Comparison between seismic tomography and magnetotelluric resistivity profiles in the Namche Barwa

(a) horizontal slice at 12km depth and the location of the location of seismic tomography and magnetotelluric profiles; (b) seismic tomography of P-velocity perturbation; (c) magnetotelluric resistivity profiles by inversion. IYS-Indus-Yarlung Tsangpo suture; JSZ-Jiali shear zone; BNS-Bangong-Nujiang suture; NJBW-Namche Barwa tectonic syntaxis; LS-Lasa terrain

本文的层析结果所揭示的喜马拉雅东构造结(东经95°)的印度岩石圈板片向北的俯冲样式与前面讨论的喜马拉雅造山带中段结果有类似之处,而且也抵达班公湖-怒江缝合带,但通过对比又具有以下几点不同:

(1) 东构造结印度岩石圈板片的俯冲距离(150~200km)相比喜马拉雅造山带中段(250~300km)更短,这可能与东构造结印度-欧亚板块的碰撞时间和东构造结独特的深部动力学机制有关。

(2) 东构造结北部拉萨地体的高速俯冲板片以下100km至200km深度范围内存在大规模的低速异常带,而且其上盘中下地壳也广泛发育低速高导体,因而指示青藏高原东南缘可能存在韧性易流动的物质向东、东南逃逸的通道,同时也与近年来GPS所观测到的绕喜马拉雅东构造结顺时针旋转(Zhang *et al.*, 2004; 曹建玲等, 2009)的动力学特征相吻合。

(3) 本文层析结果显示印度岩石圈板片在喜马拉雅东构造

结明显具有向北的深俯冲样式,俯冲板片越过了嘉黎断裂,接近班公湖-怒江缝合带,这与Li *et al.* (2008)的层析结果有一定差别。

## 6 结论

本文利用在南迦巴瓦东构造结新布设的宽频地震流动台站以及收集的北部邻近地区的数据进行层析成像处理,获取了不同深度(12k~237km)的层析切片和EW、NS方向的剖面图;同时分别对南迦巴瓦北侧近EW和西侧近NS向的大地电磁剖面进行了共轭梯度法二维反演。通过对南迦巴瓦地震层析和大地电磁结果的单独分析和综合解释,得到以下结论:

(1) 不同深度的层析切片揭示了南迦巴瓦的下地壳普遍存在低速带,这为南迦巴瓦为中下地壳楔状挤出的形成模式

提供了地球物理证据; 112km 深度的速度分布显示了上地幔顶部岩石圈的厚度变化特征; 137 ~ 237km 的范围内, 速度扰动整体上呈现为低速扰动, 反映了该区的软流圈的速度特征, 但南迦巴瓦及其附近地区则呈现高速扰动, 与周边区域形成鲜明对比。

(2) 横穿南迦巴瓦的 EW 层析剖面揭示南迦巴瓦地质体呈明显高速扰动, 而且被其两侧的低速带所夹持, 与两侧的具有低速扰动的拉萨地块形成鲜明的对比; 位于嘉黎断裂和班公湖-怒江缝合带之间的拉萨地体的 100 ~ 200km 深度范围内具有明显的低速带。

(3) 北纬 30°EW 地震层析剖面和大地球磁剖面的对比结果显示, 地震波速和电性特征具有宏观相似性: 地震层析剖面总体呈现西侧高速, 东侧低速的波速变化特征, 并为嘉黎断裂所分割; 大地电磁剖面的嘉黎断裂以西发育大规模高阻体, 且一直延伸到下地壳, 嘉黎断裂以东中下地壳物质则呈高导特征, 说明南迦巴瓦北侧(北纬 30°附近)的中下地壳结构在嘉黎断裂两侧具有较大差异。

(4) 地震层析与南迦巴瓦变质体西侧大地电磁剖面的对比结果显示, 上地壳浅部都具有高阻高速体, 推断为南迦巴瓦变质体的反映; 深部都呈现低阻低速特征, 而且下地壳 60km 深度附近具有更低的波速扰动区, 指示该低速带向北延伸, 但未越过嘉黎断裂, 推测剖面中的低阻低速带与现今中下地壳物质的部分熔融或韧性物质的向东、东南方向的运移有关。

(5) 印度岩石圈板片在喜马拉雅东构造结向北深俯冲, 俯冲板片越过了嘉黎断裂, 接近班公湖-怒江缝合带, 并且在深部以高角度下插, 向下延伸至 200km 以下。

**致谢** 感谢中国地震局地球物理所“国家数字测震台网数据备份中心”为本研究提供地震波形数据。

## References

- Aki K, Christofferson A and Husebye ES. 1977. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 82: 277–296
- Argand E. 1924. La tectonique de l'Asie. *Proc. 13<sup>th</sup> Int. Geol. Cong.* 7: 171–372
- Bai DH, Unsworth MJ, Meju MA *et al.* 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NGEO830
- Cao JL, Shi YL, Zhang H *et al.* 2009. Numerical simulation of GPS observed clock wise rotation around the eastern Himalayan syntax in the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 54 (2): 224–234 (in Chinese)
- Constable SC, Parker RL and Constable CG. 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3): 289–300
- deGroot-Hedlin C and Constable S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55(12): 1613–1624
- Ding ZF, He ZQ, Wu JP *et al.* 2001. Research on the 3-D seismic velocity structures in Qinghai-Xizang Plateau. *Earthquake Research in China*, 17 (2): 202–209 (in Chinese with English abstract)
- Guo B, Liu QY, Chen JH *et al.* 2004. Seismic tomographic imaging of the crust and upper mantle beneath the northeastern edge of the Qinghai-Xizang Plateau and the Ordos area. *Chinese J. Geophys.*, 47 (5): 790–797 (in Chinese with English abstract)
- He RZ, Zhao DP, Gao R and Zheng HW. 2010. Tracing the Indian lithospheric mantle beneath central Tibetan Plateau using teleseismic tomography. *Tectonophysics*, 491 (1–4): 230–243
- Jiang M, Lu QT, Shi DN *et al.* 1996. The study on the structure of crustal and upper mantle with natural earthquakes in central Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.*, 39(4): 470–482 (in Chinese with English abstract)
- Kao H, Gao R, Rau R, Shi D, Chen R, Guan Y and Wu FT. 2001. Seismic image of the Tarim basin and its collision with Tibet. *Geology*, 29(7): 575–578
- Kind R, Yuan X, Saul J, Nelson D, Sobolev SV, Mechie J, Zhao W, Kosarev G, Ni J, Achauer U and Jiang M. 2002. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian Plate Subduction. *Science*, 298(5596): 1219–1221
- Kosarev G, Kind R, Sobolev SV, Yuan X, Hanka W and Oreshin S. 1999. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet. *Science*, 283(5406): 1306–1309
- Li C, Hilst van der RD, Meltzer AS and Engdahl ER. 2008. Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma. *Earth and Planetary Science Letters*, 274: 157–168
- Lin CH, Tan HD and Tong T. 2011. Three-dimensional conjugate gradient inversion of magnetotelluric full information data. *Applied Geophysics*, 8(1): 1–10
- Lu QT, Jiang M, Ma KY *et al.* 1996. 3-D travel time tomography inversion and the deep structure of southern Tibet. *Acta Seismologica Sinica*, 18(4): 451–459 (in Chinese with English abstract)
- Matte P, Tapponnier P, Arnaud N, Bourjot L, Avouac JP, Vidal P, Liu Q, Pan YS and Wang Y. 1996. Tectonics of western Tibet, between the Tarim and the Indus. *Earth and Planetary Science Letters*, 142: 311–316
- Nábelek J, Hetényi G, Vergne J, Sapkota S, Kafle B, Jiang M, Su HP, Chen J, Huang BS and the Hi-Climb Team. 2009. Underplating in the Himalaya-Tibet collision zone revealed by the Hi-CLIMB experiment. *Science*, 325: 1371–1374
- Newman GA and Alumbaugh DL. 2000. Three-dimensional magnetotelluric inversion using non-linear conjugate gradients. *Geophys. J. Int.*, 140: 410–424
- Qian H, Jiang M, Chen WP *et al.* 2007. Tomography of Tgyirong-Lugu profile (Hi-Climb) and the subduction of Indian-Tibet collision. *Chinese J. Geophys.*, 50 (5): 1427–1436 (in Chinese with English abstract)
- Rawlinson N and Sambridge M. 2004. Multiple reflection and transmission phases in complex layered media using a multistage fast marching method. *Geophysics*, 69: 1338–1350
- Rawlinson N and Urvoy M. 2006. Simultaneous inversion of active and passive source datasets for 3-D seismic structure with application to Tasmania. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L24313
- Rodi WL and Mackie RL. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66(1): 174–187
- Shi DN, Jiang M, Ma KY *et al.* 1999. Crust and upper mantle tomographic structure across the Altyn fault zone using teleseismic P waves. *Chinese J. Geophys.*, 42(3): 341–350 (in Chinese with English abstract)
- Smith JT and Booker JR. 1996. Rapid inversion of two and three dimensional magnetotelluric data. *J. Geophys. Res.*, 96(B3): 3905–3922
- Tan HD, Yu QF, Booker J *et al.* 2003. Three-dimensional rapid relaxation inversion for the magnetotelluric method. *Chinese J. Geophys.*, 46(6): 850–854 (in Chinese with English abstract)
- Tan HD, Qi WW and Lang J. 2004a. The rho-plus theory in magnetotelluric method and its application. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 28 (6): 532–535 (in Chinese with English abstract)



- Tan HD, Wei WB, Unsworth M *et al.* 2004b. Crustal electrical conductivity structure beneath the Yarlung Zangbo Jiang suture in the southern Xizang Plateau. *Chinese J. Geophys.*, 47(4): 685–690 (in Chinese with English abstract)
- Tapponnier P, Xu ZQ, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G and Yang JS. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294: 1671–1677
- Tilmann F and Ni J. 2003. Seismic imaging of the downwelling Indian lithosphere beneath central Tibet. *Science*, 300(5624): 1424–1427
- Wang YX, Han GH, Jiang M *et al.* 2004. Crustal structure along the geosciences transect from Altay to Altuntagh. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(2): 240–249 (in Chinese with English abstract)
- Wang YX, Jiang M, Xiong SQ *et al.* 2006. Delamination of the lithosphere below the West Kunlun and its tectonic implications—evidence from seismic tomographic images and aeromagnetic anomalies. *Geology in China*, 33(2): 299–308 (in Chinese with English abstract)
- Wei WB, Unsworth M, Jones A *et al.* 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. *Science*, 292(5517): 716–718
- Wittlinger G, Masson F, Poupinet G, Tapponnier P, Jiang M, Herquel G, Guilbert J, Achauer U, Guanqi X, Daniau S and Lithoscope KT. 1996. Seismic tomography of northern Tibet and Kunlun: Evidence for crustal blocks and mantle velocity contrasts. *Earth and Planetary Science Letters*, 139(1–2): 263–279
- Wittlinger G, Tapponnier P, Georges P *et al.* 1998. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh Fault. *Science*, 282: 74–76
- Wittlinger G, Vergne J, Tapponnier P, Farra V, Poupinet G, Jiang M, Su H, Herquel G and Paul A. 2004. Teleseismic imaging of subducting lithosphere and Moho offsets beneath western Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1–4): 117–130
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB *et al.* 2006a. The Qinghai-Tibet Plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau. *Geology in China*, 33(2): 221–238 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Li HB and Yang JS. 2006b. An orogenic plateau: The orogenic collage and orogenic types of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 1–17 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Cai ZH, Zhang ZM *et al.* 2008. Tectonics and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane, Eastern Himalayan Syntaxis. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1463–1476 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Ji SC *et al.* 2010. On the continental tectonics and dynamics of China. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 1–29 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB *et al.* 2011. On the tectonics of the India-Asia Collision. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 1–33 (in Chinese with English abstract)
- Xue GQ, Jiang M, Su HP *et al.* 2004. A study on deep structure of Yecheng-Shiquanhe region on Tibetan Plateau by tomographic imaging. *Science in China (Series D)*, 34(4): 329–334 (in Chinese)
- Xue GQ, Su HP, Qian H *et al.* 2006. Seismic tomographic constraint on the northward subduction of the Indian Plate. *Acta Geologica Sinica*, 80(8): 1156–1160 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 28: 211–280
- Zhang PZ, Shen ZK, Wang M *et al.* 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 32(9): 809–812
- Zhao DP, Hasegawa A and Horiuchi S. 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.*, 97(B13): 19909–19928
- Zhao DP, Hasegawa A and Kanamori H. 1994. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events. *J. Geophys. Res.*, 99(B11): 22313–22329
- Zhao DP and Lei JS. 2004. Seismic ray path variations in a 3D global velocity model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 141(3): 153–166
- Zhang ZM, Zheng LL, Wang JL *et al.* 2007. Garnet pyroxenite in the Namjagbarwa Group-complex in the eastern Himalayan tectonic syntaxis, Tibet, China: Evidence for subduction of the Indian continent beneath the Eurasian plate at 80 ~ 100km depth. *Geological Bulletin of China*, 26(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Zheng HW, Li TD, Gao R *et al.* 2007. Teleseismic P-wave tomography evidence for the Indian lithospheric mantle subducting northward beneath the Qiangtang terrane. *Chinese J. Geophys.*, 50(5): 1418–1426 (in Chinese with English abstract)
- Zheng XF, Ou YB, Zhang DN *et al.* 2009. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.*, 52(5): 1412–1417 (in Chinese with English abstract)

# 附中文参考文献

- 曹建玲, 石耀霖, 张怀等. 2009. 青藏高原 GPS 位移绕喜马拉雅东构造顺时针旋转成因的数值模拟. *科学通报*, 54(2): 224–234
- 丁志峰, 何正勤, 吴建平. 2001. 青藏高原地震波三维速度结构的研究. *中国地震*, 17(2): 202–209
- 郭颀, 刘启元, 陈九辉. 2004. 青藏高原东北缘-鄂尔多斯地壳上地幔地震层析成像研究. *地球物理学报*, 47(5): 790–797
- 姜枚, 吕庆田, 史大年. 1996. 用天然地震探测青藏高原中部地壳、上地幔结构. *地球物理学报*, 39(4): 470–482
- 吕庆田, 姜枚, 马开义. 1996. 三维走时反演与青藏高原南部深部构造. *地震学报*, 18(4): 451–459
- 钱辉, 姜枚, Chen WP 等. 2007. 青藏高原吉隆-鲁谷 (Hi-Climb) 层析成像与印藏碰撞的消减作用. *地球物理学报*, 50(5): 1427–1436
- 史大年, 姜枚, 马开义. 1999. 阿尔金断裂带地壳和上地幔结构的 P 波层析成像. *地球物理学报*, 42(3): 341–350
- 谭捍东, 余钦范, Booker J 等. 2003. 大地电磁三维快速松弛反演. *地球物理学报*, 46(6): 850–854
- 谭捍东, 齐伟威, 郎静. 2004a. 大地电磁法中的 RHOPUS 理论及其应用研究. *物探与化探*, 28(6): 532–535
- 谭捍东, 魏文博, Unsworth M 等. 2004b. 西藏高原南部雅鲁藏布江缝合带地区地壳电性结构研究. *地球物理学报*, 47(4): 685–690
- 王有学, 韩果花, 姜枚. 2004. 阿尔泰-阿尔金地学断面地壳结构. *地球物理学报*, 47(2): 240–249
- 王有学, 姜枚, 熊盛青. 2006. 西昆仑岩石圈的拆沉作用及其深部构造含义——地震层析成像及航磁异常证据. *中国地质*, 33(2): 299–308
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵. 2006a. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力. *中国地质*, 33(2): 221–238
- 许志琴, 李海兵, 杨经绥. 2006b. 造山的高原——青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型. *地学前缘*, 13(4): 1–17
- 许志琴, 蔡志慧, 张泽明. 2008. 喜马拉雅东构造结——南迦巴瓦构造及组构运动学. *岩石学报*, 24(7): 1463–1476

- 许志琴, 杨经绥, 嵇少丞等. 2010. 中国大陆构造及动力学若干问题的认识. 地质学报, 84(1): 1–29
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵等. 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造. 地质学报, 85(1): 1–33
- 薛光琦, 姜枚, 宿和平等. 2004. 利用层析成像研究青藏高原叶城-狮泉河地区深部构造. 中国科学(D辑), 34(4): 329–334
- 薛光琦, 宿和平, 钱辉等. 2006. 地震层析对印度板块向北俯冲的认识. 地质学报, 80(8): 1156–1160
- 张泽明, 郑来林, 王金丽等. 2007. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群中的石榴辉石岩——印度大陆向欧亚板块之下俯冲至 80 ~ 100km 深度的证据. 地质通报, 26(1): 1–12
- 郑洪伟, 李廷栋, 高锐等. 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. 地球物理学报, 50(05): 1418–1426
- 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁等. 2009. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑. 地球物理学报, 52(5): 1412–1417