

## 穿越冈底斯地体的宽频地震探测研究

薛光琦<sup>1)</sup>, 吴珍汉<sup>2)</sup>, 赵文津<sup>2)</sup>, 宿和平<sup>1)</sup>, 史大年<sup>1)</sup>, 钱 辉<sup>3)</sup>

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2) 中国地质科学院, 北京 100037; 3) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

**摘 要:** 青藏高原是大约 60 Ma 以来印度次大陆与欧亚大陆直接碰撞形成的, 是研究大陆碰撞过程和发展板块构造理论的最佳场所。冈底斯构造带位于印度次大陆与欧亚大陆碰撞的前沿地带, 对冈底斯构造带的探测结果将直接影响到对大陆碰撞过程和整个青藏高原地壳变形过程的认识。2011 年 9 月至 2012 年 9 月一条穿越冈底斯(GDS)地体的地震深部探测剖面始于班公怒江断裂带北缘, 向南穿越了崩错—嘉黎断裂带、冈底斯地体、雅鲁藏布缝合线并跨过藏南拆离断层系(STD), 终止于喜马拉雅山南坡。本文作者利用天然地震体波完成了该条剖面的二维走时残差反演, 展现出了该地段深部构造格局。首先验证了冈底斯地体浅部存在大面积部分熔融层的研究结论; 支持甲玛大型斑岩铜矿为大陆碰撞挤压条件下岩浆上侵的成矿模式; PKP 曲线描绘出了本次研究区间内 Moho 界面的形态, 确定地壳最厚处在雅江缝合线南北两侧约 50 km 区间。这些推论和发现为青藏高原深部的结构研究提供了重要信息。

**关键词:** 冈底斯; 宽频地震探测; 层析反演; 部分熔融

中图分类号: P313; P315.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.06.06

## A Tomography Study of the Broad-band Seismic Profiling across Gangdise Block

XUE Guang-qi<sup>1)</sup>, WU Zhen-han<sup>2)</sup>, ZHAO Wen-jin<sup>2)</sup>, SU He-ping<sup>1)</sup>, SHI Da-nian<sup>1)</sup>, QIAN Hui<sup>3)</sup>

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

**Abstract:** As the Tibetan Plateau resulted from the direct collision between Indian and Eurasian continents which started about 60 Ma ago, it is regarded as the best stage for studying the continental collision process and perfecting the theory of plate tectonics. As the Gangdise Block (GDS) lies in the frontier of the collision zone, the research on the GDS would be greatly helpful to the understanding of the whole process of the collision and the derived crustal deformation evolution of the Tibetan Plateau. A seismic profiling stretching from the north of Bangong–Nujiang faulted zone to southern Himalayas was performed from September 2011 to September 2012. This profile ran across Bengcuo–Jiali faulted zone, Gangdise Block (GDS), Yarlung Zangbo suture zone and South Tibetan De-collaboration (STD) system. The authors conducted the 2D travel-time residual inversion of the profile using the body wave of natural earthquakes, revealed the deep structural geometry of the study region, and for the first time verified the conclusion about the existence of massive partial-melting layer in the shallow part of GDS. The results obtained by the authors support the metallogenic model that the Jiama porphyry Cu deposit was derived from the magma intrusion in a continental collision environment. The PKP curves depict the Moho pattern of the study area, and determine that the thickest crust lies within 50 km from the north and south sides of the Yarlung Zangbo suture zone. The authors hold that these discoveries and inferences would provide significant information for the study of deep structures of the Tibetan Plateau.

本文由中国地质调查局地质调查工作项目(编号: 1212011120185)资助。

收稿日期: 2014-01-16; 改回日期: 2014-05-25。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 薛光琦, 女, 1950 年生。研究员。长期从事深部地球物理探测研究, 近年来重点探讨青藏高原的深部构造问题。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。电话: 010-68994822。E-mail: xueguangqi@cags.ac.cn。

**Key words:** Gangdise; broad-band seismic profiling; tomography inversion; partial melting

青藏高原是大约 60 Ma 以来印度次大陆与欧亚大陆直接碰撞形成的,是研究大陆碰撞过程和发展板块构造理论的最佳场所。冈底斯(GDS)构造带位于印度次大陆与欧亚大陆碰撞的前沿地带,对冈底斯地体的探测结果将直接影响到对大陆碰撞过程和整个青藏高原地壳变形过程的认识。本次穿越冈底斯地体的宽频地震深部探测剖面北端始于那曲地区聂荣县桑荣乡,位于班公怒江断裂带北侧,向南穿越了崩错—嘉黎断裂带、冈底斯地体、雅鲁藏布缝合线,并跨过了藏南拆离断层系(STD),终止于喜马拉雅山脉南坡错那县的浪波乡。该剖面经过了藏南若干条重大的构造断裂带以及冈底斯成矿区带,是当今国际地球科学领域在高原隆升及深部成矿问题的热点研究地区之一。

1992 年,中法合作在青藏高原的拉萨、日喀则、麻江以北布设了 51 个地震台站,为研究高原的隆升获得了可贵的宽频地震信息。遗憾的是由于观察时间短,数据量比较少。自 1992 年至 2001 年在西藏开展的 INDEPTH 项目,用多种技术方法、多国合作的方式,在喜马拉雅造山作用、雅鲁藏布江缝合带的结构构造等关键问题上获得了大量科学研究成果;此外,还有中美合作的 HICLIMB 项目及中国地质科学院(高锐等, 2009)、中国科学院、地震局、PASSCAL 等单位都曾在西藏地区布设了大量的宽频地震台阵,致力于认识青藏高原形成和演化过程等问题。

在研究前人成果的基础上,中国地质科学院于 2011 年 9 月至 2012 年 9 月在那曲地区聂荣县桑荣乡—错那县的浪波乡沿线布设了 50 台宽频地震仪器,剖面长度约为 500 km,且跨越冈底斯地体关键成矿地段。本文依据地震层析成像结果,仅就沿剖面位置区间的深部构造进行讨论,为研究该区成矿作用深部构造、岩浆活动的动力学背景和过程提供信息。

地震探测剖面自那曲地区的聂荣县,至山南地区的错那县,全长约为 500 km,跨过了数个构造单元(图 1)。剖面北端位于班公怒江断裂带北缘,向南穿越了聂荣微地块、崩错—嘉黎断裂带、雅鲁藏布缝合线、藏南拆离断层系(STD)等;自北而南经过了冈底斯地体、特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅,各个地体都是以断裂带或缝合线为界,且构造线走向基本呈东西向。这些地体和构造带的形成时代有由北向南渐新的趋势,而且都可以和高原东、西部的主要构造带相连接。

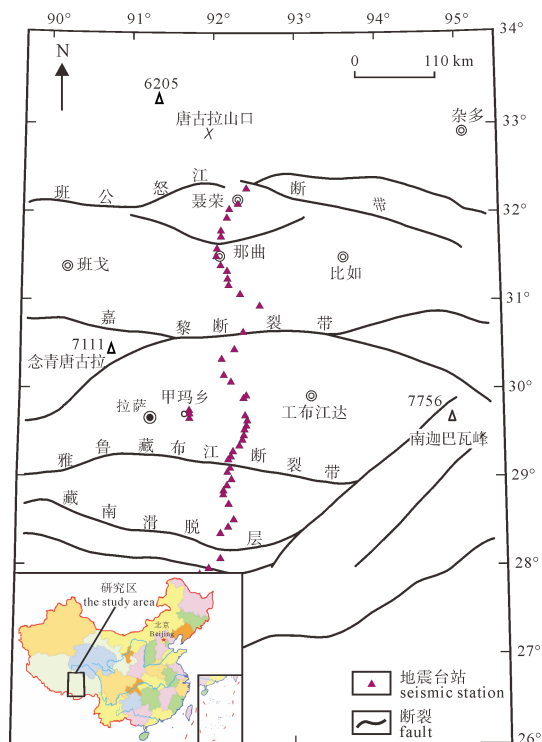


图1 GDS地区地质构造简图

Fig. 1 Geological and tectonic sketch map of GDS area

## 1 地震层析反演

### 1.1 资料及模型

此次野外施工使用了 50 台频带宽度为 60 s 的 GURALP 三分量地震仪器,记录到的体波震相清晰。用于远震层析反演的大于 5.0 级的 P+PKP 震相,地震事件共 1001 次,射线为 24807 条。考虑到线性台站布设的方式,本文的反演技术采用了 ACH 远震地震层析方法(薛光琦等, 2011)。这种由相对走时残差反演台站下方速度结构的方法首先由 Aki 等人提出(称为 ACH 法)。最简单且常用的参数化方法是将研究区沿垂向分为若干水平层,每层给定一平均速度  $V_{i0}$ ,然后再将每层划分为若干个矩形块,每一块的速度扰动由观测到的远震 P 波走时残差  $\delta t$  求出,用数学公式表示,对某一条射线,穿过模型的走时残差可由下式表示:

$$\delta t = \int_{\text{射线}} \frac{1}{V_{i0}} \frac{\delta V}{V_{i0}} ds$$

式中  $V_{i0}$  为模型的参考速度,  $\delta V/V_{i0}$  为相对于模型参考速度的速度扰动。上述积分方程经模型参数化后可划为线性方程组,求解如下:

$$d = Am,$$

$d$  为相对走时残差向量,  $A$  为射线穿过每一块的理论走时矩阵,  $m$  为所求的未知速度扰动向量。利用随机逆对上述问题求解可得:

$$m = (A^T A + \theta^2 I)^{-1} A^T d,$$

$\theta$  为阻尼系数, 它由数据和模型的方差决定,  $m$  即为所求的每个块体相对平均速度的扰动。理论上讲, 台站下方横向速度变化的确定要求有大量来自不同方向和震中距的射线。所有的台站几乎呈直线分布(近南北), 而且地震射线大多数来自北东和南东两个方向, 这必然造成东西向射线稀少。为保证每个模型块都有足够的射线数, 使解更为可靠, 假定模型为二维模型, 即东西向速度均匀, 这种假设对该地区是合理的, 因为该地区的构造主体是东西走向。ACH 方法是地震层析成像反演中比较有效的方法之一, 由于射线的转折点在模型之外, 所以初始模型的建立对反演结果的影响很小。但是 ACH 方法的不足是对数据的要求比较严格, 个别误差较大的数据会影响计算效果; 再有就是模型块体的划分也对反演结果有影响。所以, 一是严格进行数据检查, 删除反演中误差较大的数据; 还要合理的配置模型块体垂直、水平尺寸。本次研究参考前人在该区的研究成果, 模型的建立采用了 7 层结构, 由于地震波到时挑选的精确度高, 模型选择合理, 所以反演前的走时残差方差为 0.1448, 反演后的方差为 0.01199, 层析反演数据的改进值为 92.3%。

## 1.2 速度结构特征

### 1.2.1 区域性速度分布特征

图 2 为 27°—33°N 及 90.5°—94°E 区间不同深

度的地震层析相对速度扰动图像。速度扰动值如色标所示, 冷色为高速, 暖色表示低速。图 2a 为 20—70 km 深度的层析图, 反映了中下地壳的速度分布特征。自北向南, 班公怒江断裂带至嘉黎断裂带之间的冈底斯地体北部以高速扰动分布为主; 在嘉黎断裂至雅鲁藏布缝合线之间的冈底斯地体南部则是被大面积的低速扰动覆盖。在这片低速扰动区带中, 有很多的热泉分布, 像羊八井、德仲、日多温泉等等, 这与 INDEPTH-2 多方法调查发现在冈底斯带壳内有一个大的部分熔融层位置相当。据研究认为, 该熔融层生成机制主要是由于壳内发生的多个大型推覆构造磨擦生热及壳内放射性元素产生的热所造成的(赵文津等, 2004)。但该熔融层仍不能证明青藏高原中下地壳存在着广泛的物质流动。除了热泉, 还有大量的地震在该区发生过, 所以这是一个构造运动相当剧烈的活动地块。另外, 甲玛斑岩铜矿成矿带位于高低速度扰动的交界位置, 即构造的变化地带。雅江缝合线以南的低速扰动一直到达藏南滑脱层(STD)。

70—130 km 深度的速度分布(图 2b)反映了下地壳上地幔的速度结构, 剖面北部的班公怒江断裂至那曲比如逆冲断裂之间的聂荣微地块仍为高速扰动体覆盖; 嘉黎断裂以北分布着低速块体, 断裂以南是零散的、较弱的高速扰动体; 甲玛斑岩铜矿附近的地震台站位于弱强度的高低速扰动体交界部位边缘。冈底斯地体的南端分布的低速扰动体穿越雅鲁

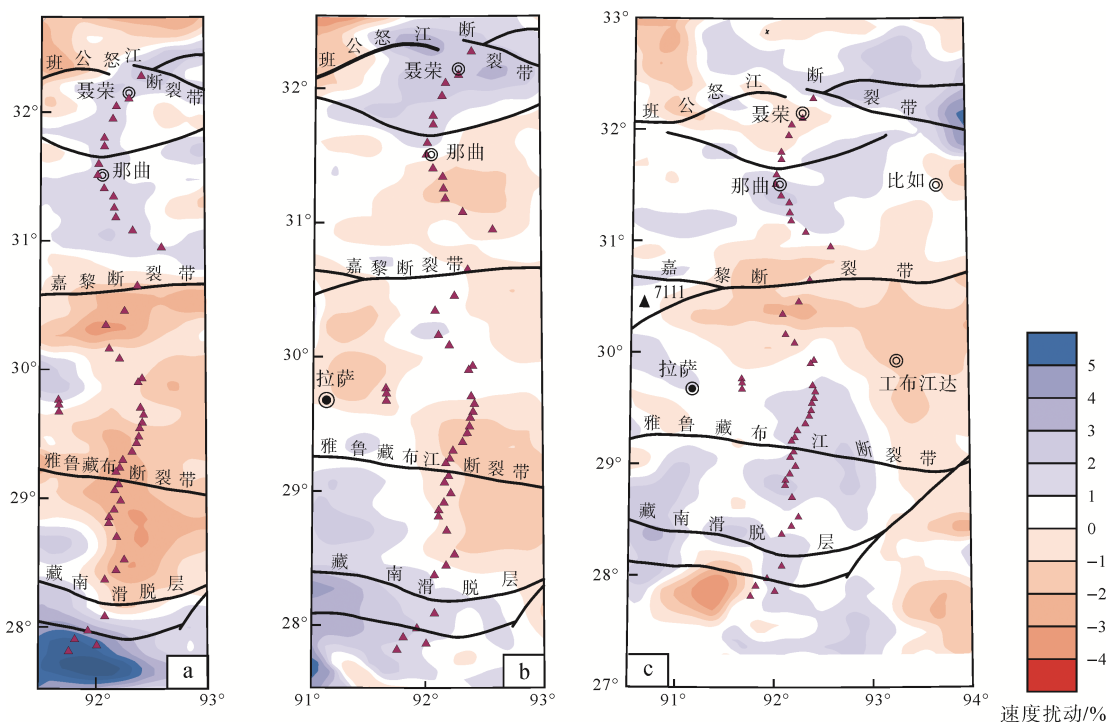


图 2 地震体波层析结果水平切片图

Fig. 2 Horizontal layers of the body wave in the tomography mapping

a-深度 20—70 km 的水平切片; b-深度 70—130 km 的水平切片; c-深度 130—210 km 的水平切片  
a-20—70 km in depth; b-70—130 km in depth; c-130—210 km in depth

藏布缝合线直至喜马拉雅山南麓,跨越STD的剖面南端位于较强的高速扰动体中,而且该高速体的范围在向北发展扩大。

在这层深度上,冈底斯地体的速度扰动分布较为复杂,呈现高速、低速、高速的结构。可否理解为出现在藏南的部分熔融层只局限在地壳内,印度板块俯冲产生的剧烈的构造活动对高原隆升的影响在地壳内产生的构造变形更大些。另外,剖面南部高速体向北的扩张可以解读为印度地体的岩石圈在向北俯冲。

130—210 m 深度的速度图(图 2c)表现出在地幔深度上班公怒江断裂带以北的唐古拉山一带为高速扰动体覆盖,聂荣微地块内则是以低速为主,那曲以南有一局部高速扰动体;地幔中的低速体集中分布在冈底斯地体的中部,即嘉黎断裂两侧;剖面向南穿过了雅鲁藏布缝合线和 STD,该地段为高速扰动带。

可以看到剖面穿过的地带在这层深度中除了嘉黎断裂两侧(恰好进入念青唐古拉山系地段)依旧保持低速度(较热)外,其余地段都已进入高速的(较冷)地幔了。剖面南部越过雅鲁藏布江的高速扰动块体,表现出印度地体岩石圈继续保持向北俯冲的趋势。

### 1.2.2 断面的速度分布特征

在 0—100 km 深度,沿剖面(图 3)自北向南首先经过的是冈底斯地体,在班公怒江断裂带至雅鲁藏布江之间 300 余 km 的地段,其下方对应着大面积的低速扰动体,在嘉黎断裂一带厚度可达 70 km;据研究表明,在冈底斯基岩的北缘有一系列自北向南逆冲推覆构造(Wu et al., 2013),这与印度大陆北向俯冲密切相关,同时也导致了很热泉的出现和局部熔融的产生(Nelson et al., 1996)。大约在甲玛地区,近地表的低速扰动体延深至 200 km 之下。关于甲玛大型斑岩铜矿大量铜金属的来源有观点认为是地幔热物质带上来的,还有的认为是从上升

的下地壳萃取的。据本次层析结构所描绘出的速度结构分布状况分析,基本支持前者的推论,因为该区位于高低速扰动的边缘,也就是构造变化较剧烈的地段,所受到的板块碰撞挤压的程度超强,而且这条低速扰动带与幔源物质相连(Liang et al., 2012),很像一条壳幔间热物质传递的通道。据吴珍汉等(2009)在《青藏高原新生代构造演化与隆升过程》一书中所给出的推论,在印度地块与欧亚地块持续挤压作用下,上熔融层的花岗质物质分 3 个阶段侵入、剥蚀而出露地表,带来成矿物质,形成巨大的

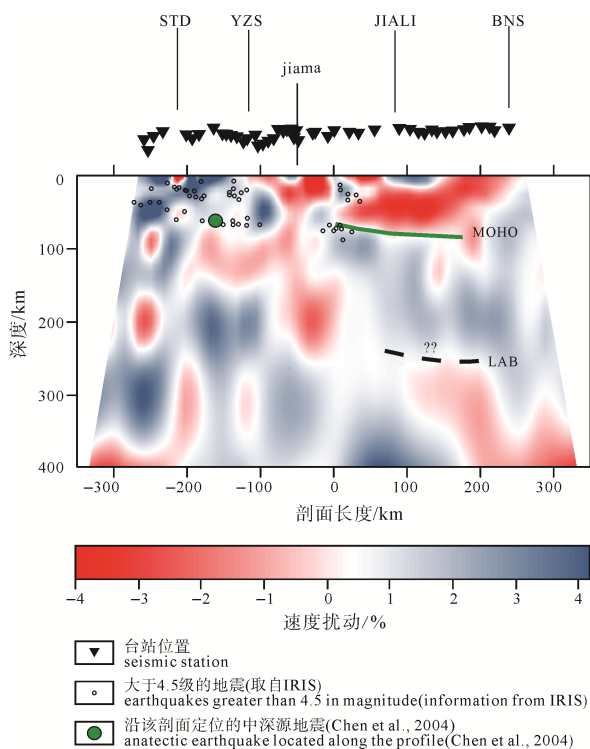


图 3 体波层析沿剖面断面图

Fig. 3 Body wave tomography along the profile

STD-藏南拆离断层系; YZS-雅鲁藏布缝合线; JIALI-嘉黎断裂;  
BNS-班公—怒江缝合线; jama-甲玛乡  
STD-South-Tibetan De-collaboration; YZS-Yarlung Zangbo suture; JIALI-Jiali fault; BNS-Bangong-Nujiang suture; jama-Jiama Town

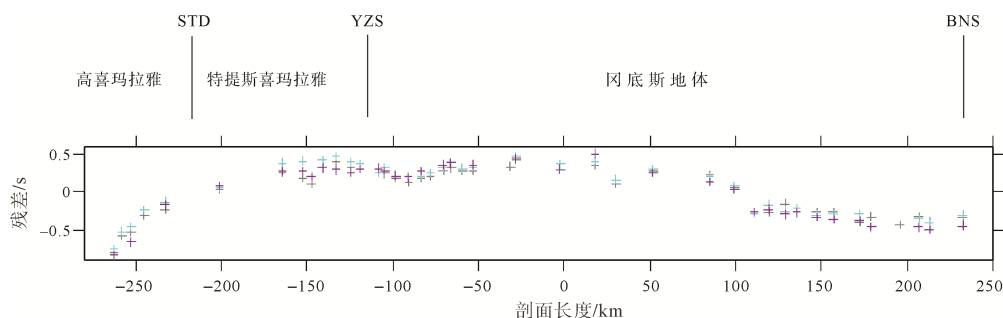


图 4 沿剖面的 PKP 残差曲线

Fig. 4 PKP residual mapping along the profile

图中不同颜色的十字标为不同地震事件的 PKP 残差值; STD-藏南拆离断层系; YZS-雅鲁藏布缝合线; BNS-班公怒江缝合线  
The crosses in different colors suggest the PKP residuals of the events; STD-South Tibetan De-collaboration; YZS-Yarlung Zangbo suture; BNS-Bangong-Nujiang suture

斑岩铜矿,这是大陆碰撞挤压条件下岩浆上侵的成矿模式,也为拉萨地块中新世早中期大型斑岩铜矿成矿提供了较为合理的构造解释。

这层深度上的雅江以南低速体分部零星,有高速体穿过了 STD,覆盖了高喜马拉雅和特提斯喜马拉雅地体。这条高速带自地表缓缓地向北延深,直至被甲玛下方的低速体隔断。该高速体可以视为印度地块向北俯冲的前缘,在其内部和下界曾经发生过不少 4 级以上的地震,是一条明显的地质构造界面。图 3 分布在高速带边缘的绿色圆形是被再定位的地震(1996 年 6 月 9 日位于藏南  $24.68^{\circ}\text{N}$ ,  $92.25^{\circ}\text{E}$ ),其深度为  $(69 \pm 5) \text{ km}$ (Chen et al., 2004)。据震源机制解的研究,青藏高原这种中深源的地震多发生在 Moho 附近,证明了上地幔顶部具备很强的弹性应变能力,故而推断上述的地质构造界面是该区的 Moho,这与接收函数的结果也很吻合(Zhao et al., 2011)。藏南大部分的中深源地震分散在 STD 以南地区,该区浅部是以逆冲为主的构造应力环境,而中深源地震的震源机制解所反映的构造应力情况则表明它们处于印度岩石圈开始近水平俯冲的区域(Chen et al., 2004; 姜明明等, 2009)。嘉黎断裂一带下方 70 km 左右也有条明显的高低速分界带,而且同样分布着不少地震,能否被视为 Moho 呢? 这条界面下方的高速扰动体为该区的上地幔,这一点与 PKP 残差曲线分布(图 4)对应很好,相对残差到时比较早,说明下方存在地震波传输良好的坚硬物质。

在 100 km 深度之下,速度扰动的显著特征是在雅鲁藏布缝合线两侧存在大面积的低速异常体,并有一部分向下延伸至 250 km,也许壳幔热物质交流的通道就存在于这里;雅江以南(特提斯喜马拉雅)80 km 至 240 km 深度下方分布的高速扰动体,可能为残留的古特提斯俯冲洋壳的碎片;GDS 地体北部的高速扰动体,不知可否定义为西藏的岩石圈? 参照接收函数和地震面波的结论该深处存在有西藏的 LAB,即岩石圈与软流圈的分界面(Zhao et al., 2011; 苏伟等, 2002); 本文的层析结果显示这条 LAB 断续地出现在冈底斯地体的中、北部,最深处约为 240 km。这一点可以与前面的水平切片图(图 2c)呼应,在接近北纬  $31^{\circ}$  的位置上嘉黎以北高速的岩石圈延伸至唐古拉山一带。

### 1.2.3 PKP 走时残差与 Moho 的对应

PKP 入射角近乎垂直到达台站下方的远震震相,它的走时变化与岩石圈内垂向速度变化有关,而 Moho 界面是影响 PKP 走时异常的主要因素,所以 PKP 走时残差的相对变化能粗略反映出 Moho 的相

对起伏。

笔者挑选了发生在南美五次大于 6 级的地震(14/05/2012 10:40.0,  $D=106 \text{ km}$ , ( $17^{\circ}40.70'\text{S}$ ,  $69^{\circ}35.50'\text{W}$ )); (28/05/2012 5:7.23,  $D=587 \text{ km}$ , ( $28^{\circ}2.60'\text{S}$ ,  $63^{\circ}5.60'\text{W}$ )); (07/06/2012 16:3.18,  $D=110 \text{ km}$ , ( $15^{\circ}52.60'\text{S}$ ,  $72^{\circ}24.80'\text{W}$ )); (02/08/2012 9:38.30,  $D=145 \text{ km}$ , ( $8^{\circ}24.80'\text{S}$ ,  $74^{\circ}15.50'\text{W}$ )); (05/09/2012 14:42.7,  $D=35 \text{ km}$ , ( $10^{\circ}5.90'\text{N}$ ,  $85^{\circ}18.50'\text{W}$ )), 获得了一条清晰的 PKP 走时残差曲线,残差曲线显示出中部高两侧低的形态。这与该区的地壳厚度分布是相关的,雅鲁藏布江缝合线两侧至嘉黎断裂带是地壳厚度最大的地区,据接收函数的结果(Zhao et al., 2011),此处的 Moho 深度可达 80 余 km。而在 STD 以南,地壳厚度明显减薄,在嘉黎断裂带以北的地壳厚度相对要薄一些。表现在残差曲线上,则是冈底斯地体的南部、特提斯喜马拉雅的北部残差到时晚,而在冈底斯地体的北部和 STD 以南,相对残差到时早些。接收函数的结果(Zhao et al., 2011)所描绘的 Moho 形态支持 PKP 曲线上上述分析。

另外,冈底斯地体南部和特提斯喜马拉雅北部到时的延迟比较晚,也暗示由于其下方地幔中熔融物质的存在而影响了地震波的传播速度。

## 2 结论及解释

(1)地震层析图像反映在冈底斯地体浅部存在大面积的低速扰动,可以认为是一个产生在壳内的部分熔融层。这也验证了 INDEPTH-2 多方法调查发现在该区存在部分熔融层的研究结论(Zhao et al., 1993)。但该熔融层仍不能证明青藏高原中下地壳存在着广泛的物质流动。据研究认为,该熔融层生成机制主要是由于壳内发生的多个大型推覆构造磨擦生热及壳内放射性元素产生的热所造成的(赵文津等, 2004; Wu et al., 2013)。除了热泉,还有大量的地震在该区发生过,所以这是一个构造运动相当活跃的地块。

(2)甲玛铜矿恰好处于一个浅部的高速扰动与上述局部熔融体交界位置,即构造活动变化剧烈的地带,由于该区为板块碰撞的前缘地带,而且这条低速扰动带与地幔相连,很像一条传递壳幔间热物质的通道,可否解释为大量铜金属是由地幔热物质带上来呢? 陆陆碰撞的持续作用导致熔融层内花岗岩被侵蚀、出露,带来成矿物质,形成巨大的斑岩铜矿,为拉萨地块中新世早中期大型斑岩铜矿成矿提供较为合理的构造解释。

(3)本文的层析结果显示出岩石圈与软流圈的分界面(LAB)断续地出现在冈底斯地体的中、北部,最深处约达 240 km。前人所作的接收函数和地震面

波的研究也表明该深处存在有西藏的 LAB(Zhao et al., 2011; 苏伟等, 2002)。几种不同年代的地震探测数据、不同的处理方法得出如此相似的结果可以作为西藏的 LAB 存在的佐证。

(4)地震层析图像(图 3)所示出的另一个显著现象是剖面中的高速扰动带均呈现出向北倾斜的趋势,尤其是在 100 km 之下的图像更为清晰。地质研究证明,青藏高原地表及中上地壳以自北向南逆冲推覆构造为主(Wu et al., 2013; 吴珍汉等, 2013),这与印度大陆北向俯冲存在密切关系,也已经被深地震反射、宽频地震探测所验证。那么,对于下地壳上地幔出现的大范围北倾的高速体,能否解释为向北俯冲的印度板块的岩石圈呢?

(5)PKP 残差曲线描绘出了高原地区 Moho 界面的大概形态。雅鲁藏布缝合线两侧约 50 km 区间内地壳厚度最大,在高喜马拉雅和冈底斯地体的北部,地壳厚度逐渐减薄。

**致谢:** 感谢在高海拔、缺氧、严寒等极其艰苦的条件下为本文撰写提供原始资料的全体项目组成员;感谢西藏自治区地质调查院、山南、那曲、林芝地区及拉萨市的各级政府部门在项目实施中所给予的支持与协助。

## 参考文献:

- 高锐,熊小松,李秋生,卢占武. 2009. 由地震探测揭示的青藏高原莫霍面深度[J]. 地球学报, 30(6): 761-773.
- 姜明明,周仕勇,佟啸鹏,梁晓峰,陈永顺. 2009. 藏南地区中深源地震精确定深研究及其地球动力学含义[J]. 地球物理学报, 52(9): 1-8.
- 苏伟,彭艳菊,郑月军,黄忠贤. 2002. 青藏高原及其邻区地壳上地幔 S 波速度结构[J]. 地球学报, 23(3): 193-200.
- 吴珍汉,吴中海,胡道功,赵逊,赵希涛,叶培盛. 2009. 青藏高原新生代构造演化与隆升过程[M]. 北京:地质出版社: 245-275.
- 吴珍汉,叶培盛,殷才云. 2013. 藏北改则新生代早期逆冲推覆构造系统[J]. 地球学报, 34(1): 31-38.
- 薛光琦,赵文津,宿和平,钱辉,冯梅,MECHIE J. 2011. 藏北低速体存在的地球学证据—INDEPTH4 宽频地震结果[J]. 地球学报, 32(3): 331-335.
- 赵文津,薛光琦,吴珍汉,赵逊,刘葵,史大年,MECHIE J, NELSON D, BROWN L, HEARN T. 2004. 西藏高原上地幔的精细结构与构造——地震层析成像给出的启示[J]. 地球物理学报, 47(3): 449-455.

## References:

- CHEN Wang-ping, YANG Zhao-hui. 2004. Earthquakes Beneath the Himalayas and Tibet: Evidence for Strong Lithospheric Mantle[J]. Science, 304(5679): 1949-1952.
- GAO Rui, XIONG Xiao-song, LI Qiu-sheng, LU Zhan-wu. 2009. The Moho Depth of Qinghai-Tibet Plateau Revealed by

- Seismic Detection[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(6): 761-773(in Chinese with English abstract).
- JIANG Ming-ming, ZHOU Shi-yong, TONG Xiao-peng, LIANG Xiao-feng, CHEN Yong-shun. 2009. Accurate depth determination of deep earthquake in southern Tibet and its geodynamic implication[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(9): 1-8(in Chinese with English abstract).
- LIANG Xiao-feng, SANDVOL E, CHEN Y J, HEARN T, NI J, KLEMPERER S, SHEN Yang, TILMANN F. 2012. A complex Tibetan upper mantle: A fragmented Indian slab and no south-verging subduction of Eurasian lithosphere[J]. Earth and Planetary Science Letters, 333-334: 101-111.
- NELSON K D, ZHAO Wen-jin, BROWN L D, KUO J. 1996. Partially Molten Middle Crust Beneath Southern Tibet Synthesis of Project INDEPTH Results[J]. Science, 274(5293): 1684-1688.
- SU Wei, PENG Yan-ju, ZHENG Yue-jun, HUANG Zhong-xian. 2002. Crust and Upper Mantle Shear Velocity Structure beneath the Tibetan Plateau and Adjacent Areas[J]. Acta Geoscientica Sinica, 23(3): 193-200(in Chinese with English abstract).
- WU Zhen-han, YE Pei-sheng, BAROSH P J, HU Dao-gong, LU Lu. 2013. Early Cenozoic Multiple Thrust in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geological Research, 2013: 1-12.
- WU Zhen-han, YE Pei-sheng, YIN Cai-yun. 2013. The Early Cenozoic Gerze Thrust System in Northern Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(1): 31-38(in Chinese with English abstract).
- WU Zhen-han, YU Zhong-hai, HU Dao-gong, ZHAO Xun, ZHAO Xi-tao, YE Pei-sheng. 2009. Cenozoic Tectonic Evolution and Uplift Process of the Tibetan Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House: 245-275(in Chinese with English abstract).
- XUE Guang-qi, ZHAO Wen-jin, SU He-ping, QIAN Hui, FENG Mei, MECHIE J. 2011. Seismological Evidence for the Existence of the Low-velocity Body in Northern Tibet: A Result from INDEPTH-IV Based Broad-Band Seismological Study[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(3): 331-335(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Wen-jin, KUMAR P, MECHIE J, KIND R, MEISSNER R, WU Zhen-han, SHI Da-nian, SU He-ping, XUE Guang-qi, KARPLUS M, TILMANN F. 2011. Tibetan Plateau Overriding the Asian Plate in Central and Northern Tibet[J]. Nature Geoscience, 4: 870-873.
- ZHAO Wen-jin, NELSON K D, Project Indepth Team. 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet[J]. Nature, 366: 557-559.
- ZHAO Wen-jin, XUE Guang-qi, WU Zhen-han, ZHAO Xun, LIU Kui, SHI Da-nian, MECHIE J, NELSON D, BROWN L, HEARN T. 2004. Fine Velocity Structure of the Upper Mantle Beneath the Xizang Plateau from Tomography and Its Geological Interpretation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 47(3): 449-455(in Chinese with English abstract).