

藏北低速体存在的地震学证据 ——INDEPTH4 宽频地震结果

薛光琦¹⁾, 赵文津²⁾, 宿和平¹⁾, 钱辉³⁾, 冯梅⁴⁾, James Mechie⁵⁾

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;

4) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

5) 德国 GFZ 地学研究中心, 德国波斯坦 14473

摘要: 位于青藏高原东北部的 INDEPTH-IV 地震探测剖面, 始于柴达木盆地南缘, 穿越东昆仑造山带、金沙江缝合线, 终止于羌塘地体。本文作者利用天然地震体波完成了该区的三维走时残差反演, 勾划出了青藏高原东北部的深部构造格局。研究区最显著的现象则是分布在昆仑地体、可可西里地体、羌塘地体北部下地壳、上地幔中的低速体。对其成因, 有可能与向北俯冲的印度板片与向南俯冲的欧亚板片在此聚合形成的地幔热物质有关。另外, 昆南、昆中断裂、金沙江断裂向南的逆冲现象比较明显; 推测柴达木盆地的上地幔中没有热物质的交流, 为刚性岩石圈。

关键词: 昆中断裂; 地震层析; 低速体; INDEPTH-IV

中图分类号: P313; P315.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2011.03.08

Seismological Evidence for the Existence of the Low-velocity Body in Northern Tibet: A Result from INDEPTH-IV Based Broad-Band Seismological Study

XUE Guang-qi¹⁾, ZHAO Wen-jin²⁾, SU He-ping¹⁾, QIAN Hui³⁾, FENG Mei⁴⁾, James Mechie⁵⁾

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;*

4) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;*

5) *GeoForschungsZentrum Potsdam, Telegrafenberg, Potsdam 14473 Germany*

Abstract: The INDEPTH-IV seismic profile, located in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, starts at the north end of Qaidam Basin, extends across East Kunlun Fault Zone, Jinsha Suture, and ends at Qiangtang Terrain. The authors implemented a 3-D travel-time residual reversion using body-wave from the natural earthquake, and outlined the pattern of the deep-seated structure underneath the northeast part of the Qinghai-Tibetan Plateau. The most notable phenomenon in the area of interest is the existence of low-velocity bodies distributed between the lower-crust and the upper-mantle beneath the Kunlun Terrain, Hoh Xil Terrain and the north part of Qiangtang Terrain, probably related to the hot mantle material derived from the collision between the northward thrusting Indian Plate and southward moving Eurasian Plate. The result obviously indicates that the South Kunlun Fault, Central Kunlun Fault and Jinshajiang Fault are all southward thrusting. It is then presumed that the upper -mantle

本文由中国地质调查局项目“青藏高原深部结构探测与地壳活动特征”(编号: 1212010511809)、美国自然科学基金委员会(NSF)、德国 GFZ 地学研究中心联合资助。

收稿日期: 2011-03-18; 改回日期: 2011-04-18。责任编辑: 魏乐军。

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实验研究, 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。

beneath the Qaidam Basin is rigid, where there is no exchange of hot material.

Key words: Central Kunlun Fault; seismic tomography; low-velocity body; INDEPTH-IV

INDEPTH-IV 地震深部探测剖面自北向南穿越了东昆仑造山带、松潘—甘孜—可可西里地体、金沙缝合线,终止于羌塘地体,是当今国际地球科学领域的热点研究地区之一。

1986—1991 年,中国地质科学院、中国地质大学、长春地质学院与中国科学院地质研究所、地球物理研究所等单位联合完成了亚东—格尔木 GGT 地学断面并在深部研究方面取得了重要成果(高锐等, 1989, 2009)。1991—1992 年,国家地震局与美国合作开展了 PASSCAL 实验,在拉萨—格尔木青藏公路沿线布设了 11 台宽频带天然地震仪,进行深部探测实验。1993 年,中法合作在青藏高原的北部从唐古拉—格尔木—锡铁山—线布设了 53 台天然地震仪,主要进行了层析成像研究。远震层析成像结果显示在青藏高原的中北部上地幔中存在低速异常(Wittlinger et al., 1996)。1998 年,中法科学家合作在青藏高原的东北部实施了“共和—玉树地震调查与深部构造研究”项目,进行了爆炸地震与天然地震研究。中法研究结果显示,青藏高原北段不同地体有着明显不同的基底和地壳结构特点,东昆仑—柴达木地体具有厚的上地壳和薄的下地壳,和较低的地壳平均速度($V_p=6.2$ km/s),厚度 55~65 km,松潘—甘孜地体的地壳具有复杂的高低速互层结构和接近于全球平均的地壳速度(6.45 km/s),而羌塘地体具有薄的上地壳和厚的下地壳(Galve et al., 2002),厚度达 75 km。前人现有深部探测资料对于我们认识青藏高原形成和演化过程起了非常重要的作用。

在研究前人成果的基础上,中国地质科学院与美国康内尔大学、德国 GFZ 地学中心于 2007 年 5 月至 2008 年 7 月合作在格尔木—曲麻莱沿线布设了 50 台宽频地震仪器,探测青藏高原东北缘的深部构造,旨在获得描绘青藏高原东北缘深部构造的图像,了解高原北部块体相互作用的关系、岩石圈深部结构等有争议的问题。本文依据地震层析成像结果,对高原北部上地幔存在的低速体进行研究探讨。

1 研究区大地构造背景

地震探测剖面自格尔木进入昆仑山,在昆中断裂以南分为两支,以终点为曲麻莱和风火山的探测路线进入了羌塘地体,全长约为 300 km,跨过了数个构造单元(图 1)。剖面北部进入了柴达木盆地的南缘,向南穿越了昆中断裂带、昆南断裂带、金沙

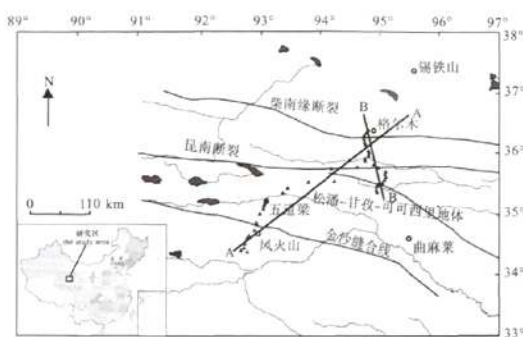


图 1 昆仑地区地质构造简图

Fig. 1 Tectonic sketch map of Kunlun region

图中三角为天然地震流动台站; AA、BB 为进行层析反演的剖面位置

Triangles represent the portable seismic stations; AA and BB are profiles making the tomographic analysis

江缝合线等;自北而南经过了昆仑地体、松潘—甘孜—可可西里地体、羌塘地体,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、北西向。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。

2 地震层析反演

2.1 资料及模型

此次野外施工使用德、英方投入的 50 台三分量地震仪器,检波器分别为 30 s、120 s,记录到的体波震相清晰。用于远震层析反演的大于 4.5 级的地震事件 1560 次,地震射线为 46230 条。

本文的反演技术与 Wittlinger 于 1998 年在《Science》上登载的层析成果所使用的方法相同。考虑到台站布设的方式,将模型设计成两部分(AA 和 BB)。由于 BB 剖面长度短,本文只论述了沿着 AA 进行层析反演的结果。参考前人在该区的成果,模型的建立采用了 8 层结构,反演前的走时残差方差为 0.1345,反演后的方差为 0.01543,层析反演数据的改进值为 88.52%。

2.2 速度结构特征

(1) 区域性速度分布特征

图 2 为 32°~39° N 及 91°~98° 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 2(a)为 10 km 深度的层析图,反映了地壳上部的速度分布特征。以

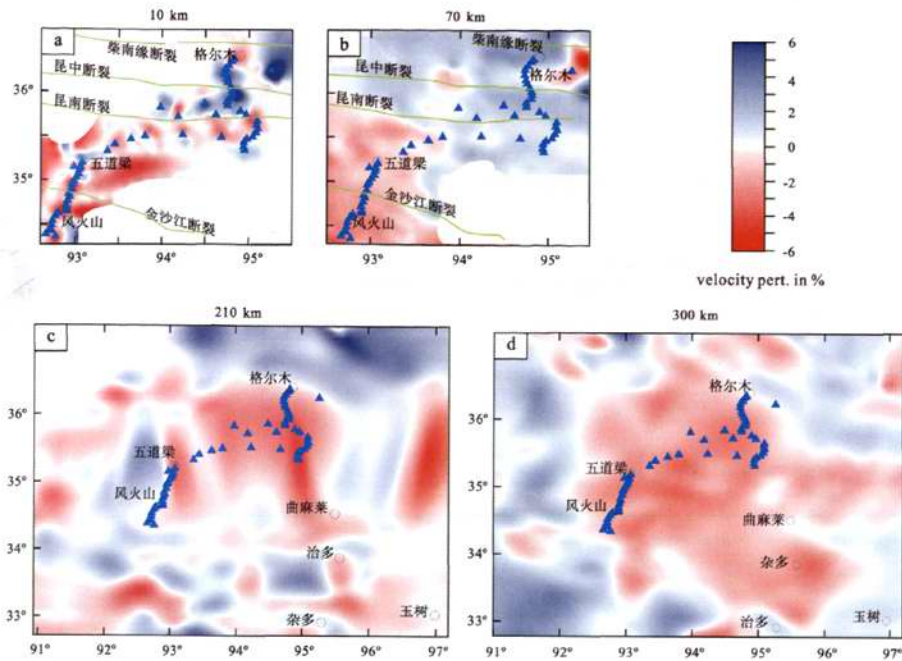


图 2 体波层析结果水平切片图

Fig. 2 Horizontal layers in the body-wave tomography

a-d 分别为深度 10 km、70 km、210 km、300 km 的水平切片

a to d are horizontal layers of 10km, 70 km, 210 km and 300 km in depth respectively

南昆仑断裂为分界，昆仑地体内以高速扰动分布为主，松潘—甘孜—可可西里和羌塘地体为低速扰动所覆盖。另外，在格尔木一带的柴达木盆地南缘也存在低速体。

70 km 深度的速度分布(图 2(b))反映了下地壳上地幔的速度结构，昆中断裂以北有局部的低速块体

分布，昆仑地体仍为高速扰动并延续至剖面东部的可可西里地体；昆南断裂的西部明显地区分出昆仑地体和松潘—甘孜—可可西里地体的速度差异；金沙江断裂的东部，两侧的速度变化也非常明显；羌塘地体为低速扰动覆盖。

210 m 深度的速度图(图 2(c))表现出地幔中的低

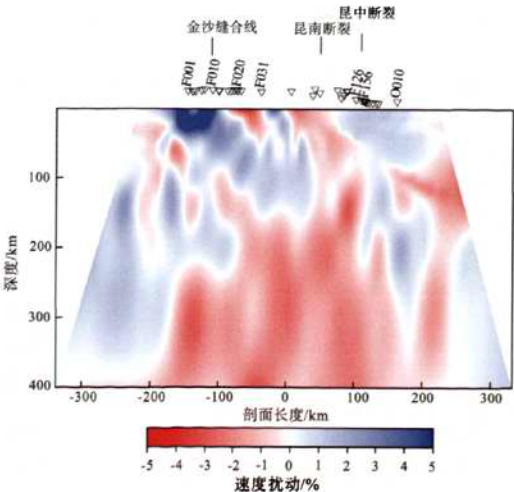


图 3 体波层析沿 AA 剖面断面图

Fig. 3 Transect of the body-wave tomography along the AA profile

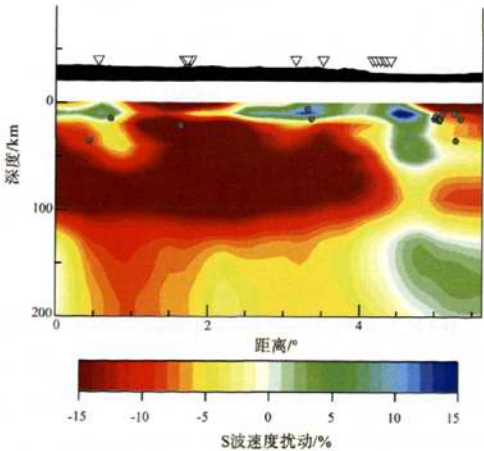


图 4 沿 AA 剖面的面波层析结果

Fig. 4 Surface-wave tomographic image along the AA profile

速体集中分布在剖面两侧的昆仑地体和可可西里地体内,而位于昆仑地体北部的柴达木南缘及柴达木地体内部则为高速扰动覆盖,表现出了两个地体冷热不同的上地幔结构。可以推测柴达木盆地不存在热交流活动,岩石圈为刚性(尹安等, 2007)。地震面波的速度分布也显示了柴达木岩石圈是高速的(冯梅, 待发表)。

在 300 km 深处(图 2(d)), 昆仑地体、可可西里地体下方的低速体持续向东向南蔓延, 穿越了金沙缝合线, 终止于羌塘地体的北缘。这种持续在上地幔中的低速区的分布暗示着该区存在着相对较厚的熔融物质。剖面北部进入了柴达木盆地南缘地带, 该区仍为高速扰动, 而且在 300 km 深的地幔中, 波速突变带与盆山转换带仍能较好地对应。

(2) AA' 断面的速度分布特征

在 0~100 km 深度, 沿 AA' 剖面(图 3)自北向南首先经过的是昆仑地体与柴达木盆地的接触部位, 其下方对应着北倾的高速扰动体, 高速体向南穿过了昆中断裂, 终止于昆南断裂下方, 昆中、昆南断裂带均显示出向南逆冲的趋势(吴珍汉等, 2007)。在金沙缝合线位置有一条北倾的高速带向下延深至 150 km 深处, 也许是反映了金沙江断裂的一种向南的逆冲(或是向北的俯冲?)。另外, 2001 年发生在昆仑山口西的 8.1 级大地震以及 2010 年巴颜喀拉地体(松潘—甘孜—可可西里地体)南缘的玉树大地震均可体现出昆仑断裂与金沙断裂的活动性, 并反映出印度板块和欧亚板块仍然在以进行时代的方式运动着。

在 150 km 深度之下, 速度扰动的显著特征是在昆中断裂与金沙缝合线之间存在大面积的低速异常体。中法合作体波层析结果也显示出该区上地幔中的低速体(Wittlinger et al., 1996)。而在层析图中松潘—甘孜地体(巴颜喀拉地体)南部, 150 km 深度之下有高速体自南向北出现。可以解释为该高速异常代表了俯冲至青藏高原之下的印度板块前缘, 而位于昆中断裂与金沙缝合线之间低速异常则可能反映了由于俯冲产生的高温幔源物质。另外, 沿本区相同剖面的面波层析图(图 4)也展示了藏北壳幔中分布着大面积低速体的现象。

PKP 走时残差与浅部构造带的对应: PKP 是入射角度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, 所以能反映出 Moho 的形态变化。

笔者挑选了发生在智利北部三次大于 5 级的地震 (21/11/2007 12: 55.5 D=115 km (24.48.6S 68.28.3W)); (24/11/2007/ 5: 26 D=92km (23.46.2S

69.0.7W)); (14/11/2007 17: 18: 45 D=46 km (23.8.8S 70.05W)), 获得了清晰的 PKP 走时残差, 残差曲线显示出南高北低的形态。这与高原的地壳厚度西、南部深, 东、北部浅是一致的, 羌塘地体和巴颜喀拉地体(松潘—甘孜—可可西里地体)地壳厚度大, 而柴达木的地壳要相对薄些。表现在残差曲线上则是羌塘地体和巴颜喀拉地体(松潘—甘孜—可可西里地体)残差到时晚, 而柴达木盆地内部的残差到时可以早到 0.8 s。本项目接收函数结果所描绘的 Moho 形态支持 PKP 曲线上上述分析。

另外, 羌塘地体和巴颜喀拉地体(松潘—甘孜—可可西里地体)到时的延迟比较晚(可以达到 0.8 s), 也暗示了由于其下方地幔中大量的熔融物质的存在而影响了地震波的传播速度。

3 结论及讨论

(1)地震层析图像所给出的最显著现象则是分布在昆仑地体、可可西里地体、羌塘地体北部下地壳、上地幔中的低速体。对其成因, 一般认为与该低速异常体有可能与由向北俯冲的印度板块与向南俯冲的欧亚板块在此聚合形成的地幔热物质有关。

也就是说, 高原内部存在的大面积的低速体是与青藏高原的形成过程近乎同步的。藏南地处大陆碰撞的较早时期, 壳内俯冲比较剧烈, 俯冲过程中的摩擦导致壳内 10~30 km 深度处温度的相对升高, 地震波速度降低, 形成该地区地壳上部的低速异常区。而藏北地区已到了大陆碰撞的后期阶段, 地壳上部已逐渐冷却下来, 这时期的壳幔之间的相互作用呈相对活跃的趋势, 俯冲对流导致深处热物质的上涌, 壳幔物质的相互交融, 使得藏北地区的下地壳和上地幔顶部的温度相对升高, 表现为该地区的地震波速度偏低(Vergne et al., 2002; Wittlinger et al., 2004)。对 PKP 残差曲线延迟的分析, 也反映出可可西里地体、羌塘地体北部存在大面积低速物质的现状。

相关研究发现, 沿东昆仑山逆冲左旋走滑断裂

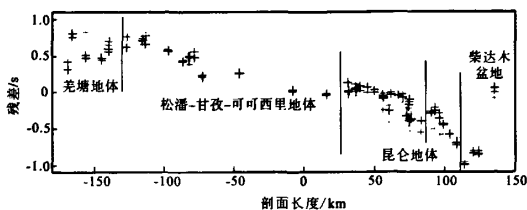


图 5 PKP 走时残差与构造单元的对应关系
Fig. 5 Correlation between PKP travel-time residuals and tectonic units

带有以中心式喷发为主, 裂隙式喷发次之的火山活动, 沿断带有火山口存在。喷发时间从古近纪至更新世, 从未停止。唐古拉山和可可西里山有上新世过碱性岩的火山喷发活动; 1952 年在昆仑山与阿尔金山交汇处, 沿断裂带还有火山喷发活动(蔡厚维, 2009)。这些岩浆与地热活动反映出壳幔中存在的热能, 而在地震层析图中则以低速扰动的形式表现出来(图 2)。

笔者认为, 上述提到的藏北火山活动、高原的隆升史、各向异性等现象均反映了该区深部热交换的存在, 由此出现的低速异常体有可能与由向北俯冲的印度板片与向南俯冲的欧亚板片在此聚合形成的地幔热物质有关。

(2) 断面对昆南、昆中断裂、金沙江断裂向南的逆冲现象有较好的表现。而且根据断裂两侧近年频繁发生的地震(董树文等, 2009), 说明青藏高原的活动并未减速。巴颜喀拉地体(松潘—甘孜—可可西里地体)北部稳定, 但南北两侧的金沙缝合线与昆仑断裂则是地震多发区。

(3) 柴达木盆地在上海幔没有低速体存在(210 km 层析水平切片图), 说明盆地岩石圈是刚性的, 未存在热物质交流的迹象。

致谢: 感谢为本文撰写提供原始资料的全体 INDEPTH4 项目组成员; 感谢青海省地震局、地调院、省军区在项目实施中所给予的协助。同时对在数据预处理中提供帮助的阎木森、崔湘等人, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- 蔡厚维. 2009. 青藏高原现今地壳活动性[J]. 西北地质, 42(1): 34-42.
- 董树文, 许志琴, 吴珍汉. 2009. 中国地质科学院对 5.12 汶川地震的快速反应与调查研究[J]. 地球学报, 30(1): 21-26.
- 高锐, 孟令顺, 李莉. 1989. 青藏高原亚东—格尔木条带布格重力异常数字图象处理与地壳现代构造[J]. 地球学报, 11(2): 162-173.
- 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.
- 吴珍汉, 叶培盛, 赵文津, PARTRICK J B, 胡道功. 2007. 东昆仑南部晚新生代逆冲推覆构造系统[J]. 地质通报, 26(4): 448-456.
- 尹安, 党玉琪, 陈宣华, 汪立群, 蒋武明, 蒋荣宝, 王小凤, 周苏平, 刘明德, 马立协. 2007. 柴达木盆地新生代演化及其构造重建——基于地震剖面的解释[J]. 地质力学学报, 13(3): 193-211.

References:

- CAI Hou-wei. 2009. Present Crustal Activity Tibetan Plateau[J]. *Northwestern Geology*, 42(1): 34-42(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, XU Zhi-qin, WU Zhen-han. 2009. CAGS Quick Response to and Geoscientific Survey on May 12 Wenchuan Earthquake[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(1): 21-26(in Chinese with English abstract).
- GALVE A, HIRN A, JIANG M, GALLART J, VOOGD B D, LEPINE J C, DIAZ J, WANG Y X, QIAN H. 2002. Mode of raising northeastern Tibet probed by explosion seismology[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 203(1): 35-43.
- GAO Rui, MENG Ling-shun, LI Li. 1989. The Imagery Processing of Gravity Anomaly in the Yadong-Golmud Strip on Qinghai-Xizang Plateau and its Regent Crustal Structure[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 11(2): 162-173(in Chinese with English abstract).
- 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).
- VERGNE J, WITTLINGER G, HUI Q, TAPPONNIER P, POUPINET G, MEI J, HERQUEL G, PAUL A. 2002. Seismic evidence for stepwise thickening of the crust across the NE Tibetan plateau[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 203(1): 25-33.
- WITTLINGER G, MESSON F, POUPINET G. 1996. Seismic tomography of northern Tibet and Kynlun: Evidence for crustal block and mantle velocity contrasts[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 139: 263-279.
- WITTLINGER G, TAPPONNIER P, POUPINET G. 1998. Tomographic Evidence for Localized Lithospheric Shear Along the Altyn Tagh Fault[J]. *Science*, 282: 74-76.
- WITTLINGER G, FARRA V, VERGNE J. 2004. Lithospheric and upper mantle stratifications beneath Tibet: New insights from Sp conversions[J]. *Geophysical Research Letters*, 31(19): 1-4.
- WU Zhen-han, YE Pei-sheng, ZHAO Wen-jin, PARTRICK J B, HU Dao-gong. 2007. Late Cenozoic overthrust system in the southern East Kunlun Mountains, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 448-456(in Chinese with English abstract).
- YIN An, DANG Yu-qi, CHEN Xuan-hua, WANG Li-qun, JIANG Wu-ming, JIANG Rong-bao, WANG Xiao-feng, ZHOU Su-ping, LIU Ming-de, MA Li-xie. 2007. Cenozoic Evolution and Tectonic Reconstruction of the Qaidam Basin: Evidence From Seismic Profiles[J]. *Journal of Geomechanics*, 13(3): 193-211(in Chinese with English abstract).