

doi: 10.12029/gc20160516

卢占武, 高锐, 李洪强, 等. 深反射地震数据揭示的拉萨地体北部到羌塘地体南部地壳厚度的变化[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1679–1687.

Lu Zhanwu, Gao Rui, Li Hongqiang, et al. Crustal thickness variation from Northern Lhasa terrane to Southern Qiangtang terrane revealed by deep seismic reflection data[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1679–1687(in Chinese with English abstract).

深反射地震数据揭示的拉萨地体北部到羌塘地体南部地壳厚度的变化

卢占武^{1,2} 高锐^{1,2,3} 李洪强^{1,2} 李文辉^{1,2} 熊小松^{1,2} 徐泰然^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 国土资源部深部探测与地球动力学重点实验室, 北京 100037;
3. 中山大学地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275)

摘要:由多个地体拼接而成的青藏高原,有着世界上最厚的地壳。在高原中部,从拉萨地体到羌塘地体,穿过班公湖—怒江缝合带(BNS)的地壳厚度变化长期存在争议。本文主要论述从拉萨地体北端横跨BNS到达羌塘地体的深地震反射剖面探测的结果。探测发现了清晰的Moho反射,揭示了拉萨地体—羌塘地体Moho深度和地壳厚度的变化。探测结果表明,在BNS下方Moho深度由南至北出现了6.2 km的急剧减小,并且与BNS向北28 km处的羌塘地体南部比较,地壳厚度变浅了12.5 km。否定了前人对BNS下方Moho存在20 km显著变化的认识。

关键词:青藏高原中部;班公怒江缝合带;莫霍面;地壳厚度;深地震反射

中图分类号:P312;P631.4⁴ 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)05-1679-09

Crustal thickness variation from Northern Lhasa terrane to Southern Qiangtang terrane revealed by deep seismic reflection data

LU Zhan-wu^{1,2}, GAO Rui^{1,2,3}, LI Hong-qiang^{1,2}, LI Wen-hui^{1,2}, XIONG Xiao-song^{1,2}, XU Tai-ran^{1,2}

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*
2. *Key Laboratory of Earth Probe and Geodynamics, Ministry of Land Resources, Beijing 100037, China;* 3. *School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China*)

Abstract: The Tibetan Plateau, which is made up of a number of terranes, has the world's most thick crust. There is a long-term dispute concerning crustal thickness across the Bangong–Nujiang suture (BNS) from the Lhasa terrane to the Qiangtang terrane. This paper mainly reports the result of the study of deep seismic reflection profile in this area. A clear reflection of Moho was detected, which reveals the change of crustal thickness from the Lhasa terrane to the Qiangtang terrane. Moho exhibits a sharp decrease of 6.2 km across the BNS and becomes 12.5 km shallower from the northernmost Lhasa terrane to the south Qiangtang terrane at 28 km north of the BNS. The viewpoint based on deep seismic reflection data denies previous understanding of a 20 km offset.

收稿日期:2016-09-02;改回日期:2016-09-08

基金项目:国家自然科学基金(41274096, 41574091)和国家深部探测专项项目(SinoProbe-02)资助。

作者简介:卢占武,男,1978年出生,博士,研究员,主要从事地球物理深部探测与地球动力学研究;E-mail:luzhanwu78@163.com。

Key words: central part of Tibet; Bangong–Nujiang suture; Moho; crustal thickness; deep seismic reflection profile

About the first author: LU Zhan-wu, male, born in 1978, doctor, senior researcher, majors in geophysical probe and geodynamics. E-mail: luzhanwu78@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Fund (No. 41274096, 41574091) and Sinoprobe project (SinoProbe-02).

青藏高原的形成及其隆升机制是一个非常复杂的问题^[1],常承法等提出高原并不是一个均一的整体,而是由多个发育历史不同的块体拼合而成的^[2]。地球物理探测工作支持了这一观点^[3-4]。吴功建等^[5]提出青藏高原是地体拼合碰撞过程中不断隆升的,各地体的拼合碰撞经历了“洋壳俯冲-陆陆碰撞-陆内俯冲”的过程。推测在青藏高原各个地体在拼合过程中,发生了不均匀的抬升。地体拼合过程也导致了不同地体之间地壳厚度的变化^[6]。但是,由于探测方法精度的所限,由于地体拼合过程的导致不同地体之间地壳厚度的变化、Moho面的深度及形态,始终没有被精确的揭示出来。

由班公湖-怒江缝合带(BNS)及其两侧的拉萨地体和羌塘地体组成的青藏高原的中部一直被认为是研究理解陆-陆碰撞的最佳区域。曾融生等(1994)利用宽频地震观测的结果显示出在班公-怒江缝合带以南,Moho深度在80~84 km,向北越过班公-怒江缝合带Moho深度变浅,只有67~77 km,存在约10 km的Moho错断^[7]。而INDEPTH-III的结果揭示拉萨地体北部Moho深度为63~65 km和羌塘地体的南部Moho深度为58~60 km^[8],越过班公-怒江缝合带Moho没有大规模错断(仅有5 km的变化)。而徐强等根据Hi-Climb的结果认为BNS中部Moho存在10 km的错断,呈现南浅北深、即拉萨地体地壳薄、羌塘地体地壳厚的现象^[9]。正是由于缺少了精细探测数据的制约,导致了关于拉萨地体、羌塘地体地壳厚度变化的差异认识。

在过去的30年里,深地震反射剖面已经被证明是解决地壳和上地幔精细结构最有效的方法之一^[10]。许多深地震反射探测计划已经获得了大量的揭示大陆地壳和和壳幔边界的精细图像^[11-15]。在20世纪90年代初,这种方法在藏南地壳结构的研究中取得了一批科学发现^[16-18]。然而,在青藏高原的中部,由于险峻的地势、巨大的地壳厚度及近地表速度的强烈变化,使得在这一地区获取地壳厚度的精细数据及Moho反射的图像面临巨大的挑战。

为了实验适用于获得青藏高原中部巨厚地壳的采集技术,SinoProbe-02项目部署了一条310 km的深地震反射剖面,剖面始于拉萨地体北部的色林错西侧,向北穿过班公湖怒江缝合(BNS),经羌塘中央隆起区,向北止于金沙江缝合带以南的多格错仁(图1)。通过野外认真施工,精心设计,我们获得了能够揭示拉萨地体-班公怒江缝合带-羌塘地体的地壳精细结构的高质量数据。本文主要讨论通过BNS两侧的1000 kg大炮的资料和局部处理剖面的成果对比,研究BNS两侧地壳厚度的变化。

1 地质背景

青藏高原一直被认为是研究大陆碰撞理想窗口。新生代印度板块和亚洲板块之间的碰撞与汇聚造就了青藏高原现今的主体结构。从南到北,形成了喜马拉雅、拉萨、羌塘、松潘-甘孜和昆仑-柴达木等地体,这些地体被一系列近东西走向的缝合带分离^[19-21]。在羌塘地体的南部边界,BNS成为在南部的拉萨地体与北部的羌塘地体之间的构造联结。BNS缝合带最初在晚侏罗纪期间形成,经历了拉萨地体与羌塘地体白垩纪早期碰撞并出现广泛的蛇绿混杂岩^[19,22-25]。它代表了在三叠纪之前打开,在中晚侏罗纪闭合的洋盆残余^[26-28]。在白垩纪中期时,BNS以发育大量火山作用和陆相盆地为特点。该区域的古近-新近纪变形特点主要为在北倾逆冲系统下形成的始新世-渐新世红层和火山岩。青藏高原中部发生的古近-新近纪缩短和盆地的形成演化可能记录了拉萨地体沿BNS的持续俯冲行为^[24]。

2 数据采集与处理

2.1 深地震反射数据采集

野外数据采集用408XL数字地震仪;前放增益12 dB;采用硝铵炸药做震源,共分大炮、中炮和小炮3种类型,分别用10井组合、2井组合和单井,药量分别为1000 kg,200 kg和50 kg;单井井深为30 m,

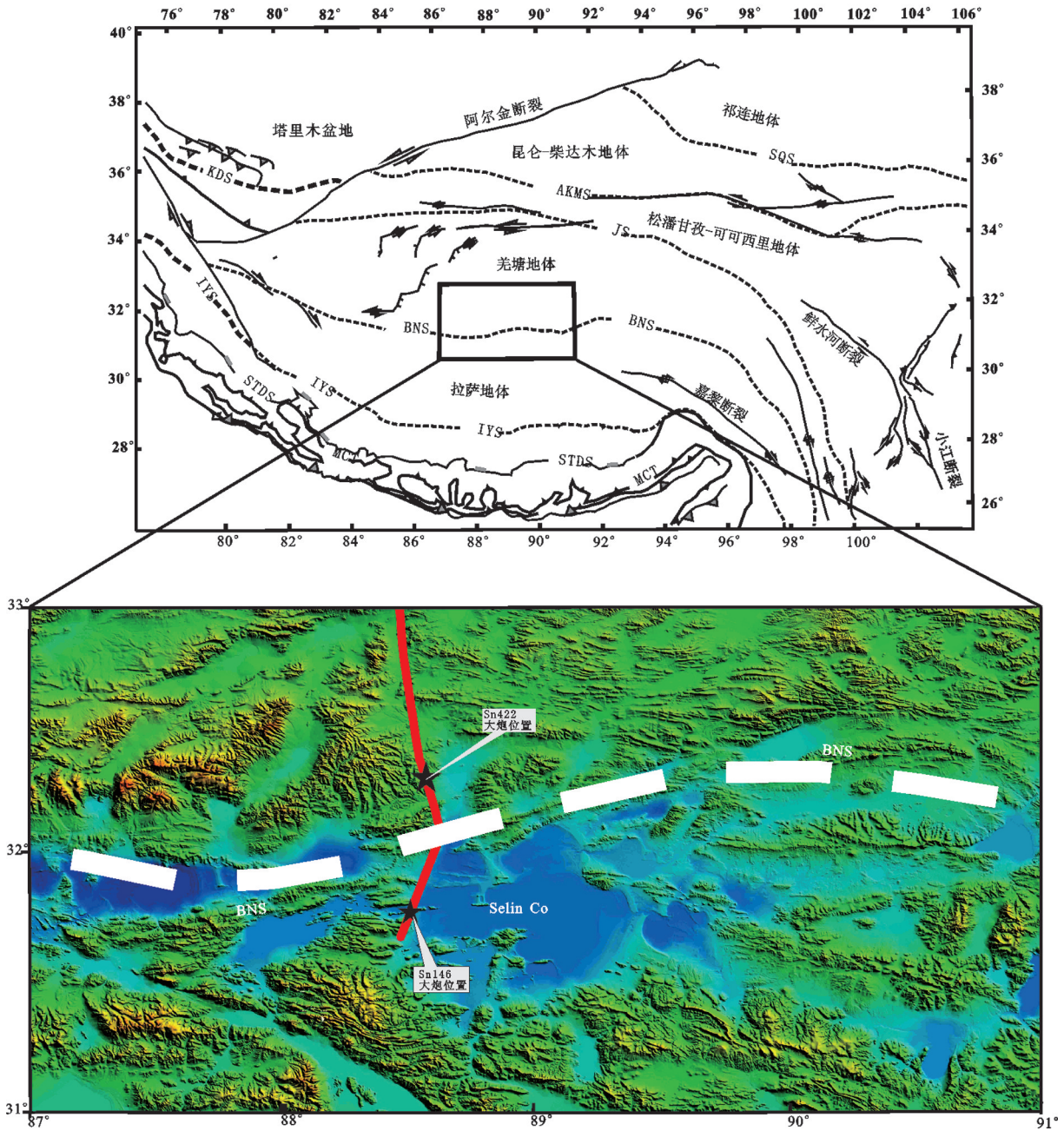


图1班公湖怒江缝合带两侧深地震反射剖面及大炮点位置

红色实线示出了地震反射剖面,黑星标记了在BNS两侧激发的药量为1000 kg的大炮位置,黑色框显示在本文的研究领域。IYS—印度—雅鲁藏布江缝合带;BNS—班公湖怒江缝合带;JS—金沙江缝合带;AKMS—阿尼玛卿—昆仑—慕士塔格缝合带;SQS—南祁连缝合带;KDS—库地缝合带;STDS—藏南拆离系;MCT—主中央冲断裂

Fig.1 Location of the deep seismic reflection profile. BNS—Bangong Nujiang suture. The red solid line shows the seismic reflection profile. The black stars mark the locations of large shots using 1000 kg explosive fired on the both sides of the BNS. The black box shows the study area in this paper.

IYS—Indus—Yarlung Zangbo suture; BNS—Bangong—Nujiang suture; JS—Jinsha River suture; AKMS—Ayimaqin—Kunlun—Mutztagh suture; SQS—South Qilian suture; KDS—Kudi suture; STDS—South Tibet Detachment System; MCT—Main Central Thrust

组合井单个井深为 50 m。炮间距分别为 50 km、1 km 及 250 m。采用主频 10 Hz 的低频检波器接收,每道采用 2 串,每串 12 个检波器线性组合,道间距为 50 m。采样间隔中小炮为 2 ms,大炮为 4 ms。所有炮最小炮间距均为 225 m,大炮最大偏移距为 47975 m,中小炮最大偏移距为 14975 m。中小炮采用 30 s 接收,大炮采用 60 s 接收。为保证激发井深,使用 235 kW 大功率钻机钻进。野外数据采集从 2009 年 10 月至 2010 年 5 月,在冬季进行施工,以避免陷车危险,钻机能够顺利到达激发点位置,确保钻井深度。在西藏地区,强风可以极大降低数据的质量,为了避免风的干扰,我们把地震检波器挖坑埋置并每天监测风力,选择干扰最小的时间段进行数据采集。

2.2 单炮数据针对性处理

在西藏深地震反射剖面工作中,地势崎岖、地表高差大、风噪声及各种复杂地质结构和较差的爆炸能量穿透力是影响地震记录质量的主要因素。为了获得高质量的成像结果,在单炮数据处理中采用了如下有针对性的技术。

(1)层析反演静校正。应用层析静校正方法原理,反演得到浅地表速度结构,人工交互拾取一个稳定高速界面,从该速度面向地表面做静校正时差计算得到静校正量。该方法应用于许多山区和复杂地表地区的地震数据静校正处理,获得了良好的效果。

(2) 50 Hz 干扰的压制。根据 50 Hz 深浅层能量一致的特点,我们用深层 50 Hz 的能量合成 50 Hz 模型道,再根据相关法求出模型道的相位,然后对存在 50 Hz 干扰的地震道进行减去处理。

(3)面波的去附和振幅恢复。对原始资料分析可知,本地区的面波干扰均较为严重。面波速度在 800~1650 m/s,频率在 5~15 Hz,主要能量集中在 15 Hz 以内,频带范围与有效波特别是深层有效反射的频率相近,并且能量较强。因此,在处理过程中采用自适应面波衰减技术和区域滤波技术对面波进行消除和衰减。

地表一致性振幅补偿采用能量分解模型,对所有的单炮进行统计,对每道计算其自相关函数,分别计算各炮点、检波点、共偏移距、共 CDP 域的平均能量。再用这些参数计算补偿因子并作用于该道,这种方式可以消除震源能量差异、检波器耦合差异

及能量衰减对反射波振幅的影响,有利于提高振幅保真度,使叠加剖面能量分布均匀。

(4)线性干扰滤除。针对本区较为发育的线性干扰,我们采用叠前线性干扰滤除技术,在 $t-x$ 域根据线性干扰波与有效波之间速度、位置及能量上的差异,采用倾斜叠加和向前、向后线性预测方法确定线性干扰波的视速度、分布范围及规律,将识别出的线性干扰从原始数据中减去,实现线性干扰波的压制,与 F-K 滤波相比具有保持振幅、波形不畸变和无蚯蚓化现象等特点。

(5)反褶积。由于大炮数据采用了近 50 km 的排列接收,地表变化对于同一个接收点所有的道,都具有这个接收点及其附近地表引起的相同影响。这种影响使信号产生畸变,包括旅行时间、振幅和子波的形状。如果要对这种畸变进行校正,就必须建立在地表一致性的原理之上。因此,采用地表一致性反褶积,不仅具有校正剩余静校正时差的功能,而且还具有波形一致性校正的作用。

通过上述针对性处理技术,得到了如图 2、图 3 所示的清晰大炮单炮记录,获得了来自地壳深部单次反射信息。

2.3 结果

在许多情况下,下地壳底部连续密集反射底界通常可以解释为莫霍面。例如,COCORP^[29]和英国的常规深地震反射勘测^[30]都把层状反射的底部解释为莫霍面。此外,反射层位的振幅也是确定莫霍面的重要因素。我们对 BNS 两端的两个大炮进行了振幅能量分析。图 2 为在 BNS 南部激发的大炮单炮记录。图 3 显示了在羌塘地体中 BNS 北面 28 km 激发的大炮单炮记录。在拉萨地体北部的单炮记录中,从双程走时 19.5 s 到 24 s 之间有一些连续反射。基于振幅分析,我们把在双程走时 24 s 具有高振幅特征的连续反射底部作为莫霍反射面(图 2)。在 BNS 北面 28 km 处的另一个大炮震源记录给出了具有高反射率的清晰反射的莫霍面图像,展布在双程走时 20 s 的连续反射面上(图 3)。

对 BNS 两侧不同位置的单炮记录进行振幅分析,发现穿过 BNS 的莫霍面反射能量的显著变化。位于 BNS 以南的炮序号为 146 的大炮和在 BNS 向北 28 km 处炮序号为 422 的大炮记录比较,在 BNS 以北 28 km 处,羌塘地体的地壳厚度较拉萨地体变

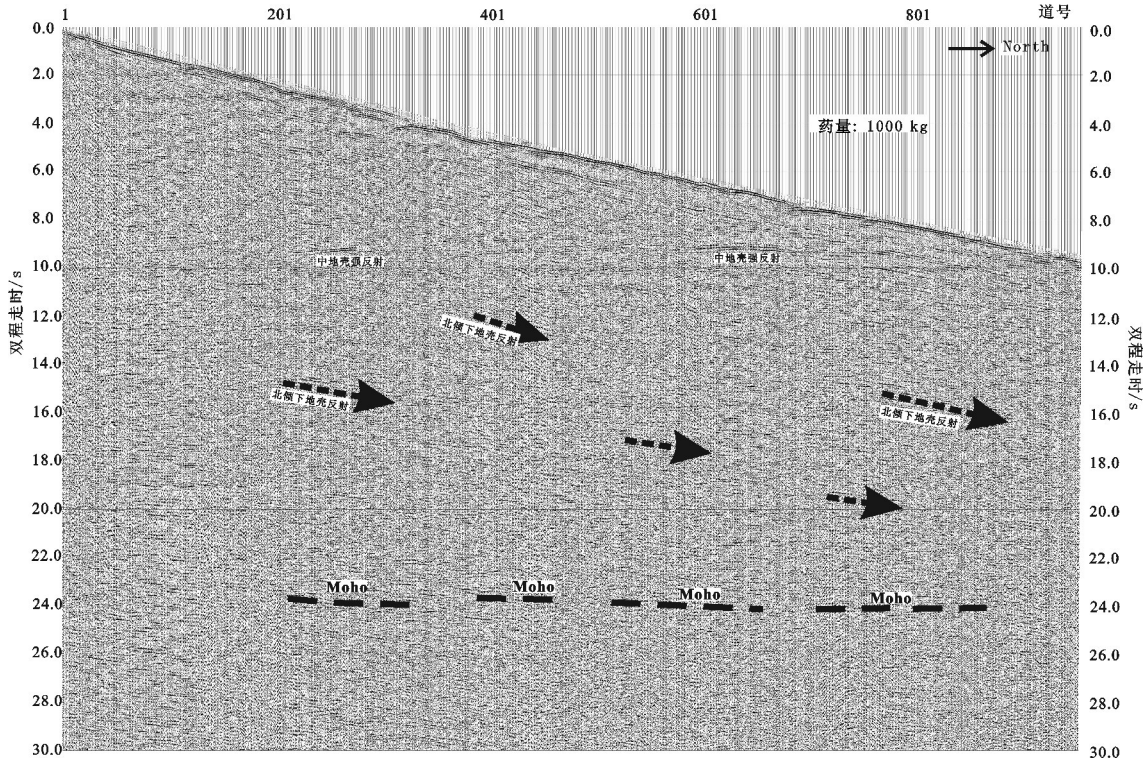


图2 拉萨地体北部BNS以南的大炮单炮记录(药量 1000 kg, 炮序号 Sn1 46; 具体位置示见图 1)
 Fig.2 Large shot gather fired in the northernmost Lhasa terrane and south of BNS (explosives 1000 kg, shot number Sn146; Shot location shown in Fig.1)

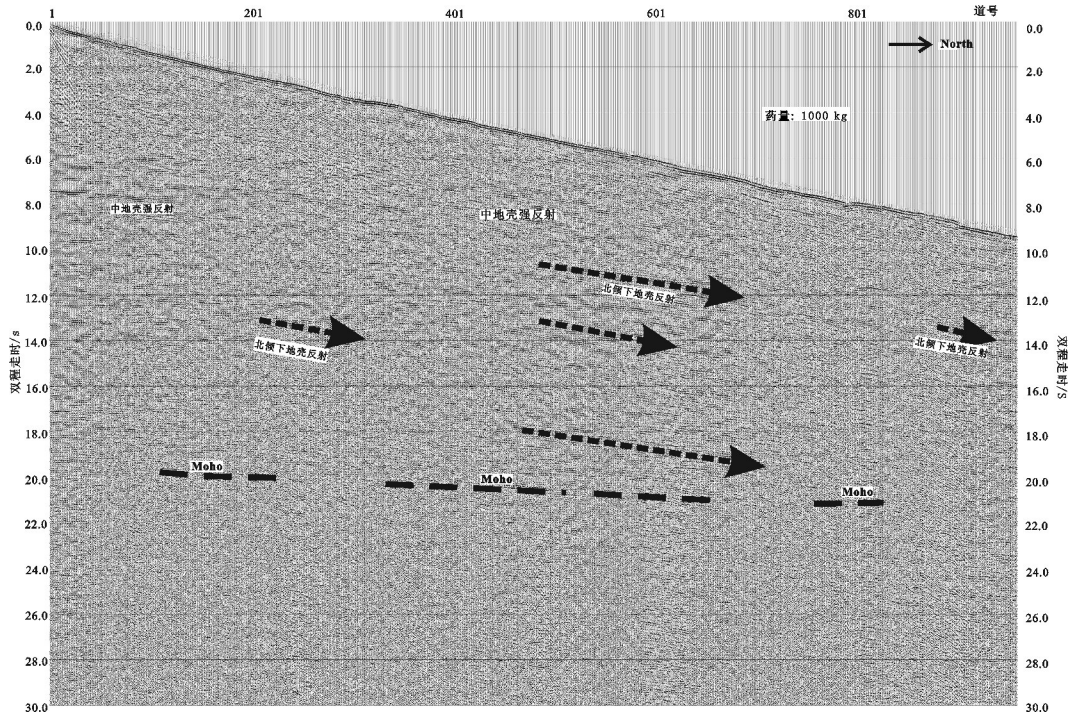


图3 羌塘地体南部BNS以北 28 km 处激发的大炮单炮记录(药量 1000 kg, 炮序号 Sn422; 具体位置示见图 1)
 Fig.3 Large shot gather fired at about 28 km north of the BNS in southern Qiangtang terrane (explosives 1000 kg, shot number Sn422; Shot location shown in Fig.1)

浅了12.5 km。

3 讨论

在过去的30年里,不同部门利用一系列的地震调查方法探测青藏高原不同地体之下的莫霍面深度和主要缝合带之下莫霍变化^[31-35]。Li et al.^[36]根据主动源地震剖面探测的结果总结了横跨青藏高原地壳的结构特征和厚度变化。然而,由于以往地震工作的覆盖范围不足且缺乏连续性的观测,在BNS之下的莫霍面错断及两侧地体地壳厚度变化仍存在争议。已经有研究认为跨BNS的莫霍面可能存在20 km的错断^[37]或是一个10多千米的错断^[38-39],或是约8 km的变化^[40],或为一个5 km的向北抬升^[33, 41],也可能是无明显变化^[42]。此外,史大年等^[34]发现BNS北部40 km的崩错—嘉黎断裂带在之下约(5±3) km的莫霍面错断。

深地震反射剖面可以获得地球内部的高分辨率结构。美国大药量震源爆破,成功提供了一个很好的探索大陆深地壳结构的例子^[43]。在SinoProbe项目中,BNS两侧1000 kg的炮集记录和偏移剖面提供了BNS之下的清晰莫霍面图像,显示了跨BNS的莫霍面深度变化。基于单炮记录(图2),我们认为拉萨地体最北面的莫霍面深度为75.1 km(双程走时24 s)。莫霍面位置与图5-B位置a匹配。另一个在BNS以北28 km的向北接收的大炮记录上(图3),莫霍面出现在左侧的62.6 km(双程走时20 s,匹配图5-B位置c处)和右侧65.7 km(双程走时21 s,匹配图5-B位置d处)。

由偏移剖面所确定的跨BNS的莫霍面变化幅度为6.2 km(图5-A)。在拉萨地体北端地壳厚度为75.1 km(双程走时24 s,如图5-B位置a)而羌塘地体南端为68.9 km(双程走时22 s,如图5-B位置

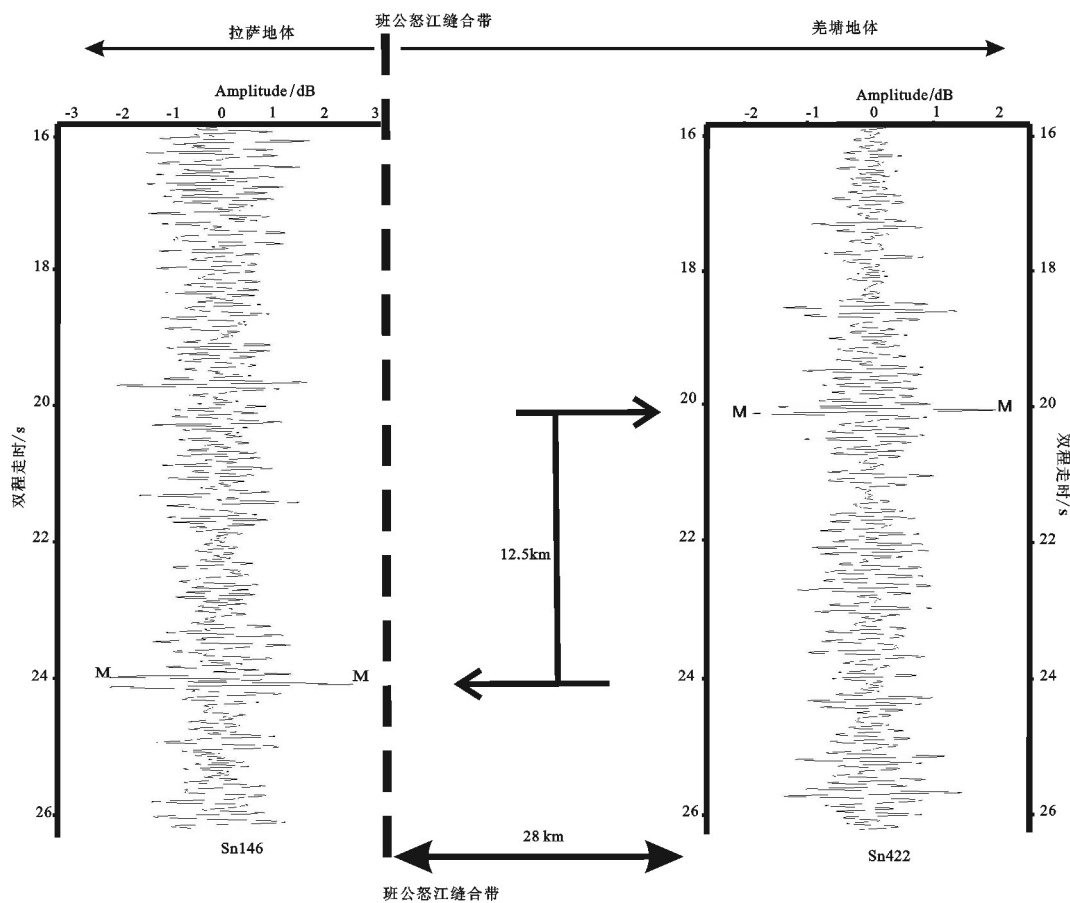


图4 BNS两侧大炮记录振幅分析显示出Moho反射面深度有明显变化

Fig.4 Amplitude analysis for the two large shot gathers across the BNS, showing clear variation of Moho depth

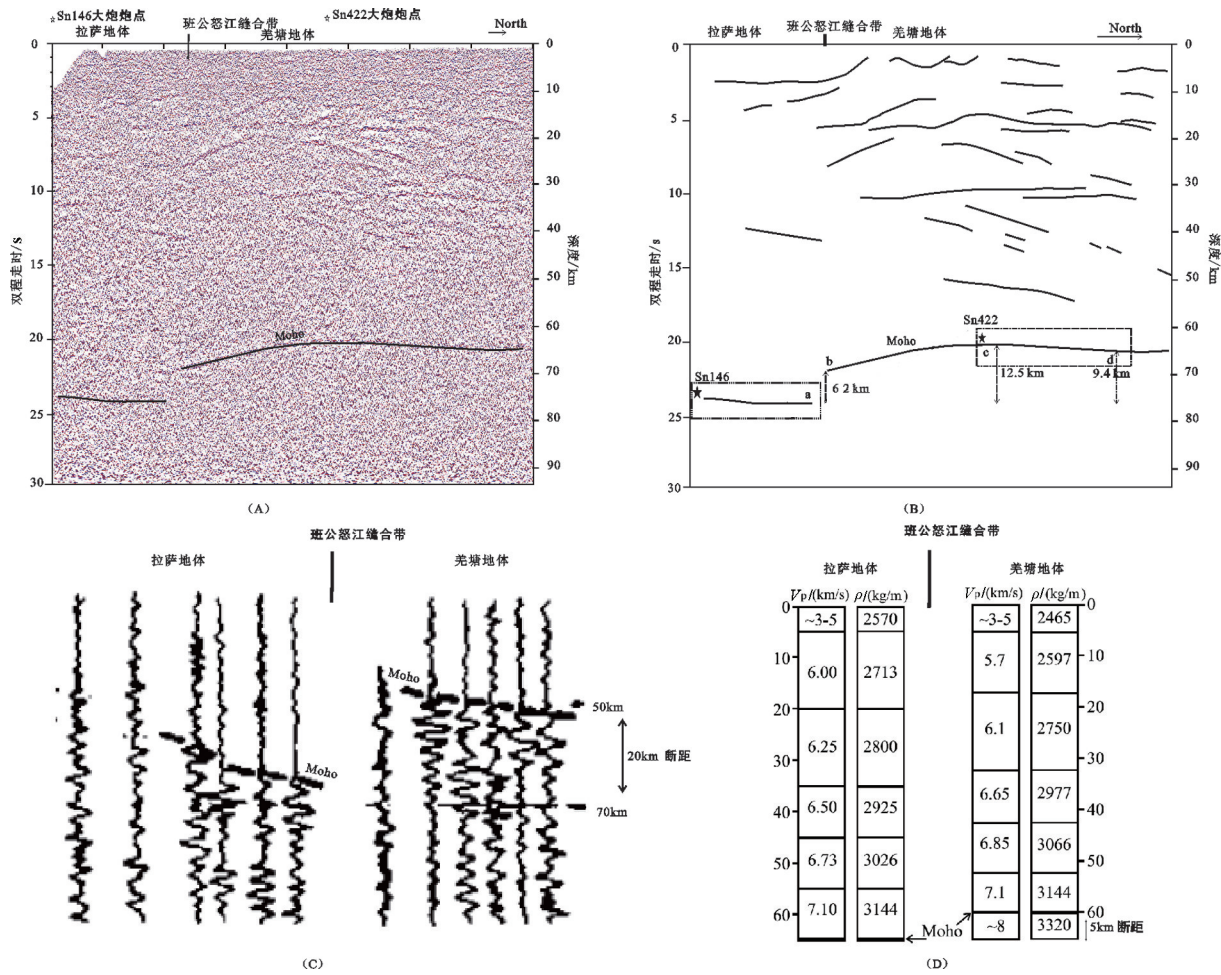


图5 跨BNS的莫霍面深度及地壳厚度变化(A)SinoProbe采集的偏移剖面(B)对偏移剖面的解释结果(C)Hirn认为跨BNS存在20 km的Moho断距(文献[37]) (D)Haines认为跨BNS仅存在5 km的Moho断距(文献[33])

Fig.5 Variation of Moho depth and crustal thickness across BNS. (A) Migration section by SinoProbe (B) Interpretation for the migration section. (C) Hirn's viewpoint of 20 km Moho offset across BNS (after reference [37]) (D) Haines' viewpoint of 5 km Moho offset across BNS (after reference [33])

b)。6.2 km的阶梯错断可从图5-B中的位置a到b表示出来。在羌塘地体南部,图5-B位置b处向北,莫霍面反射平滑,在地表25 km的横向距离上,莫霍面从68.9 km(双程走时22 s)到更浅的图5-B位置c处的62.6 km(双程走时20 s)。我们认为此处地壳厚度与拉萨地体北端地壳厚度相比较,更是变浅了12.5 km。而在羌塘中央隆起的南部,地壳厚度比拉萨地体地壳厚度对比也有9.4 km的变化,如图5-B位置a和d的比较。通过上述结果可见,深地震反射剖面揭示的跨BNS莫霍面变化明显不同于20 km^[37]的Moho错断。通过深地震反射探测到的班公怒江缝合带两侧的Moho错断,意味着早期古老缝合带已

经复活,老的缝合带后期转变为大型的东西向走滑断裂,变形席卷整个地壳。而羌塘地体岩石圈正是沿着两侧大型走滑断裂带发生了整体向东的逃逸^[44]。

4 结论

在BNS两侧,确实存在Moho断距,约6.2 km。BNS向北,进入到羌塘地体后莫霍面平缓抬升至62.6 km,至BNS以北28 km处,莫霍面变浅12.5 km,此处羌塘地体南部的地壳厚度比拉萨地体北部相比变薄了12.5 km。这种基于深地震反射数据得出的跨BNS两侧莫霍面深度和地壳厚度变化的观点与之前有20 km的莫霍面断距或无明显变化的观

点不符。

致谢:感谢中国石化集团西南石油局第五物探公司的出色的野外工作,以及地科院地质所王海燕研究员、北京派特森科技发展有限公司李兵工程师对于数据处理工作的建议。

参考文献(References):

- [1] 高锐.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,1997,43(5):460-464.
Gao Rui. Thirty problems of the lithospheric structure and geodynamics in the Qinghai- Xizang plateau[J]. Geological Review, 1997, 43(5): 460-464 (in Chinese with English abstract).
- [2] 常承法,潘裕生,郑锡澜,等.青藏高原地质构造[M].北京:科学出版社,1982
Chang Chengfa, Pan Yusheng, Zheng Xilan, et al. The Geological Tectonics of Qinghai- Xizang(Tibet) Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1982 (in Chinese)
- [3] 高锐,吴功建.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].长春地质学院学报,1995,25(3):241-250.
Gao Rui, Wu Gongjian. Geophysical model and geodynamic process of Yadong- Ge' ermu geoscience transect in Qinghai- Tibet plateau [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1995, 25(3): 241-250(in Chinese with English abstract).
- [4] 滕吉文,张中杰,杨顶辉,等.青藏高原地体划分的地球物理标志研究[J].地球物理学报,1996,39(5):629-641.
Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Yang Dinghui, et al. The study of geophysical criterion for dividing terranes in Qinghai- Xizang Plateau[J]. Acta Geophysica Sinica 1996, 39(5): 629- 641(in Chinese with English abstract).
- [5] 吴功建,高锐,余钦范,等.青藏高原“亚东-格尔木地学断面”综合地球物理调查与研究[J].地球物理学报,1991,34(5):552-562.
Wu Gongjian, Gao Rui, Yu Qinfan, et al. Intergrated investigations of the Qinghai- Tibet plateau along the Yadong- Golmud geoscience transect[J]. Acta Geophysica Sinica, 1991, 34(5): 552-562(in Chinese with English abstract).
- [6] 李秋生,彭苏萍,高锐.青藏高原莫霍面的研究进展[J].地质论评,2004,50(6):598-612
Li Qiusheng, Peng Suping, Gao Rui. A review on the Moho discontinuity beneath the Tibetan plateau[J]. Geological Review, 2004, 50(6): 598-612(in Chinese with English abstract).
- [7] 曾融生,丁志峰,吴庆举.青藏高原岩石圈构造及动力学过程研究[J].地球物理学报,1994,37(增刊):99-116.
Zeng Rongsheng, Ding Zhifeng, Wu Qingju. A review on the lithospheric structures in Tibetan plateau and constraints for dynamics[J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(supp.): 99- 116 (in Chinese with English abstract).
- [8] Ross A, Brown L, Passakorn P, et al. Deep reflection surveying in central Tibet: lower- crustal layering and crustal flow[J]. Geophysical Journal International, 2004, 156: 115-128.
- [9] 徐强,赵俊猛,崔仲雄,等.青藏高原班公湖-怒江缝合带中部的Moho错断[J].科学通报,2010,55(1):80-86.
Xu Qiang, Zhao Junmeng, Cui Zhongxiong, et al. Moho offset beneath the central Bangong-Nujiang suture of Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(1): 80- 86(in Chinese with English abstract).
- [10] Oliver J. Probing the structure of the deep continental crust[J]. Science, 1982, 216: 689-695.
- [11] Brown L, Wille D, Zheng L, et al. COCORP: New perspectives on the deep crust[J].Geophysical Journal International, 1987, 89: 47-54.
- [12] Clowes R M, Yorath C J, and Hyndman R D. Reflection mapping across the convergent margin of western Canada[J]. Geophys. J. R, 1987, 89:79-84.
- [13] Klempner S L, Hobbs R W, Freeman B. Dating the source of lower crustal reflectivity using BIRPS deep seismic profiles across the lapetus suture[J]. Tectonophysics, 1990, 173: 445-454.
- [14] Balling N. Deep seismic reflection evidence for ancient subduction and collision zones within the continental lithosphere of northwestern Europe[J]. Tectonophysics, 2000, 329: 269-300.
- [15] Cook F A, White D J, Jones A G, et al. How the crust meets the mantle: Lithoprobe perspectives on the Mohorovicic discontinuity and crust- mantle transition[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2010, 47:315-351.
- [16] Zhao W J, Nelson K D, Che J K, et al. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet[J]. Nature, 1993, 366:557-559.
- [17] Nelson K D, Zhao W J, Brown L D, et al. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: synthesis of project INDEPTH results[J]. Science, 1996, 274:1684-1688.
- [18] Brown L D, Zhao W J, Nelson K D, et al. Bright spots, structure, and magmatism in southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling[J]. Science, 1996, 274:1688-1690.
- [19] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan- Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28:211-280.
- [20] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, Meyer B, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 2001, 294:1671-1677.
- [21] Chung S, Chu M, Zhang YQ, et al. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism[J]. Earth-Science Reviews, 2005, 68:173-196.
- [22] Kapp P, Yin A, Manning C E, et al. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet[J]. Tectonics, 2003, 22:1043-1052.
- [23] Kapp P, Decelles P G, Gehrels G E, et al. Geological records of

- the Lhasa—Qiangtang and Indo—Asian collisions in the Nima area of central Tibet[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 2007, 119:917–933.
- [24] Guynn J H, Kapp P, Pullen A, et al. Tibetan basement rocks near Amdo reveal “missing” Mesozoic tectonism along the Bangong suture, central Tibet[J]. *Geology*, 2006, 34: 505–508.
- [25] Wu Z H, Ye P S, Barosh P J, et al. Early Cenozoic multiple thrust in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geological Research*, 2013, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/784361>.
- [26] Girardeau J, Marcoux J, Allegre C J, et al. Tectonic environment and geodynamic significance of the Neo—Cimmerian Donqiao ophiolite, Bangong—Nujiang suture zone, Tibet[J]. *Nature*, 1984, 307:27–31.
- [27] Pearce J A, Deng W M. The ophiolites of the Tibetan geotraverses, Lhasa to Golmud(1985) and Lhasa to Kathmandu (1986) [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Lond. A*, 1988, 327: 215–238.
- [28] Wang W, Aitchison J C, Lo C, et al. Geochemistry and geochronology of the amphibolite blocks in ophiolitic melanges along Bangong—Nujiang suture, central Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 33:122–138.
- [29] Klemperer S L. Deep seismic reflection profiling and the growth of the continental crust[J]. *Tectonophysics*, 1989, 161:234–244.
- [30] Warne, M, Spaargaren B, Jones R, et al. High—resolution images of the lower crust: deep seismic reflections from 15 to 80 Hz[J]. *Tectonophysics*, 1994, 232:225–237.
- [31] Zhu L P and Helmlberger DV. Moho offset across the northern margin of the Tibetan plateau[J]. *Science*, 1998, 281:1170–1172.
- [32] Vergne J, Wittlinger G, Qian H, et al. Seismic evidence for stepwise thickening of the crust across the NE Tibetan plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203: 25–33.
- [33] Haines S S, Klemperer S L, Brown L, et al. INDEPTH III seismic data: From surface observations to deep crustal processes in Tibet[J]. *Tectonics*, 2003, 22:1–18.
- [34] Shi D N, Shen Y, Zhao W J, et al. Seismic evidence for a Moho offset and south—directed thrust at the easternmost Qaidam—Kunlun boundary in the Northeast Tibetan plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288:329–334.
- [35] Zhang Z J, Klemperer S L, Bai Z M, et al. Crustal structure of the Paleozoic Kunlun orogeny from an active—source seismic profile between Moba and Guide in East Tibet, China[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19: 994–1007.
- [36] Li Q S, Gao R, Lu Z W, et al. The thickness and structural characteristics of the crust across Tibetan plateau from active—sources seismic profiles[J]. *Earth Sci.*, 2009, 22: 21–31.
- [37] Hirn A, Nercessian A, Sapin M, et al. Lhasa block and bordering sutures—a continuation of a 500 km Moho traverse through Tibet[J]. *Nature*, 1984, 307: 25–27.
- [38] Zeng R S, Ding Z F, Wu Q J. A Review on the Lithospheric Structures in Tibetan Plateau and Constraints for Dynamics[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1995, 145: 425–443.
- [39] Tseng T, Cheng W, Nowack R L. Northward Thinning of Tibetan Crust Revealed by Virtual Seismic Profiles[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, Article ID: L24304.
- [40] Li Y H, Wu Q J, Tian X B, et al. Crustal Structure beneath Qiangtang and Lhasa Terrane from Receiver Function[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2006, 19: 633–642.
- [41] Zhao W J, Mechie J, Brown L D, et al. Crustal structure of Central Tibet as derived from project INDEPTH Wide—Angle Seismic Data[J]. *Geophysical Journal International*, 2001, 145: 486–498.
- [42] Kind R, Yuan X, Saul J, et al. Seismic Images of Crust and Upper Mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian Plate Subduction[J]. *Science*, 2002, 298: 1219–1221.
- [43] Jarchow C M, Goodwin E B, Catchings R D. Are large explosive sources applicable to resource exploration? [J]. *The Leading Edge*, 1990, 9:12–17.
- [44] Meissner R, Tilmann F and Haines S. About the Lithospheric Structure of Central Tibet, Based on Seismic Data from the INDEPTH III Profile[J]. *Tectonophysics*, 2004, 380:1–25.