

Zhao WJ, Xue GQ, Wu ZH, et al. Fine velocity structure of the upper mantle beneath the Xizang plateau from tomography and its geological interpretations. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2004, 47(3): 449 ~ 455

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

赵文津¹ 薛光琦² 吴珍汉³ 赵 逊¹ 刘 葵³ 史大年²

J. Mechie⁴ D. Nelson⁵ L. Brown⁶ T. Hearn⁷

1 中国地质科学院, 北京 100037

2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

3 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

4 GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam 14473, Germany

5 Department of Earth Sciences, Syracuse University, Syracuse, New York 13244, USA

6 Department of Geological Sciences, Cornell University, Ithaca, New York 14853, USA

7 Department of Physics, New Mexico State University, Las Cruces, NM 88003, USA

摘 要 利用布置在亚东—格尔木的 164 个流动地震台站记录的 926 个远震事件的 24241 条射线, 进行远震 P 波层析成像处理, 高分辨率的西藏高原上地幔的速度结构图, 显示了印度巨厚地幔岩石圈在向高原之下推进的过程中, 在高喜马拉雅之下拆分成上、下两层, 这是发生的第一次拆沉。下层从高喜马拉雅以下约以 22° 的角度向高原北部插入到 350 km 深; 而其上层则向北伸展直到雁石坪, 并构成了高原薄的地幔岩石圈。在雁石坪北 (33.7° N), 当其与亚洲大陆岩石圈地幔相遇后发生断离并下沉。再次证实了五道梁 (35.27° N) 深部低速体的存在, 本区内地壳内低速物质可能与上述运动有联系, 反映了深层热物质的上涌。

关键词 P 波成像 青藏高原 上地幔结构 地幔岩石圈 拆沉

文章编号 0001-5733 (2004) 03-0449-07 中图分类号 P315 收稿日期 2003-07-02, 2003-12-20 收修定稿

FINE VELOCITY STRUCTURE OF THE UPPER MANTLE BENEATH THE XIZANG PLATEAU FROM TOMOGRAPHY AND ITS GEOLOGICAL INTERPRETATIONS

ZHAO Wen-Jin¹ XUE Guang-Qi² WU Zhen-Han³ ZHAO Xun¹ LIU Kui³

SHI Da-Nian² J. Mechie⁴ D. Nelson⁵ L. Brown⁶ T. Hearn⁷

1 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3 Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

4 GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam 14473, Germany

5 Department of Earth Sciences, Syracuse University, Syracuse, New York 13244, USA

6 Department of Geological Sciences, Cornell University, Ithaca, New York 14853, USA

7 Department of Physics, New Mexico State University, Las Cruces, NM 88003, USA

Abstract We use 24241 rays from 926 distant events recorded at 164 portable stations along the line Yadong -

基金项目 原地质矿产部及国土资源部基金项目 (9501207), 美国国家科学基金会资助项目 (grant EAR9614616), 德国研究协会、德国地学研究中心的资助项目。

作者简介 赵文津, 男, 1931 年生, 中国工程院院士, 主要从事地球物理勘探与深部勘查. E-mail: Zhaowj@cae.cn

Golmud to perform teleseismic P wave tomography. Our aim is to obtain the velocity structure of the upper mantle beneath the Xizang Plateau with high resolution. Our results show that the thick lithospheric mantle of the Indian plate is divided into two layers beneath the High Himalayas during the underthrusting of India below the plateau, representing the first time of its delamination. The lower layer underthrusts beneath the High Himalayas at about 22° angle northward to depth 350 km and the upper layer extends northward to Yanshiping, forming the thin lithospheric mantle below the plateau. North to Yanshiping (33.7° N), the upper layer of the Tibetan mantle fractures and sinks when it meets the lithosphere of the Asia continent. Our results also confirm the existence of a deep low-velocity body beneath Wudaoliang (35.27° N). We suggest that this low-velocity body in the crust may be associated with upwelling of hot materials at depth.

Keywords P wave tomography, Xizang Plateau, Upper mantle structure, Lithospheric mantle, Delamination.

1 引言

印度大陆与欧亚大陆碰撞后持续向北推挤^[1], 这已为最近公布的 GPS 观测结果再一次肯定. 印度大陆向北推移过程中西藏高原的地壳增厚了, 并提出了多种增厚方式^[2]; 这时印度大陆地幔岩石圈的去向, 高原地幔岩石圈增厚没有? 这是现在人们关注的热点问题之一, 关于壳幔状况可以概括为 4 种说法:

藏南为薄和热的地幔岩石圈 (发生拆沉), 藏北是厚和冷的地幔岩石圈地幔^[2];

藏南为厚地幔岩石圈冷地幔, 藏北是薄地幔岩石圈 (发生拆沉) 热地幔^[3];

藏南、藏北都为厚的地幔岩石圈, 藏北岩石圈是热地幔 (藏北几个地块的地幔岩石圈分别向南俯冲叠加形成)^[4~6];

藏南、藏北都是薄地幔岩石圈^[7,8].

Beghoul^[3] 推测藏北的地幔岩石圈变薄是从解释藏北火山活动多、Pn 波传播吸收严重和横波分裂强而提出的; Tapponnier^[4] 则用藏北不同地块的地幔岩石圈在碰撞后期先后发生斜向俯冲而激发起深部火山岩浆活动来解释;

最近发表的面波成像文献^[4~6] 都提出高原下面存在一巨厚的地幔岩石圈. 虽然增厚的机制有不同的解释, 但是如果它与地壳没有发生拆离, 则地壳下面将附着一个又厚又重的地幔岩石圈, 这将加重高原地壳的负荷从而会不利于高原的抬升, 在活动区内存在巨厚的地幔岩石圈也是难以想象的.

为了进一步检验上述结果, 本文利用了 1992~1993 年中法联合“东昆仑岩石圈探测项目 (SF

9293)”及 1991~2001 年的中美德加合作开展的“国际喜马拉雅与西藏高原深剖面与综合研究 (简称 IN-DEPTH)”项目, 沿喜马拉雅山的亚东—西藏高原北部的格尔木布置的密集流动地震台站获得的远震 P 波走时数据, 进行了地震层析成像试验, 并结合人工地震、大地电磁、重力以及构造地质、地球化学等多学科的调查成果做出解释.

2 地震台站和数据提取

两个计划的两条测线在中部 (拉萨—当雄段) 是重合的, 而南、北两段则分开, 并构成一定的交角, 形成面积性观测, 地震台站分布图示于图 1.

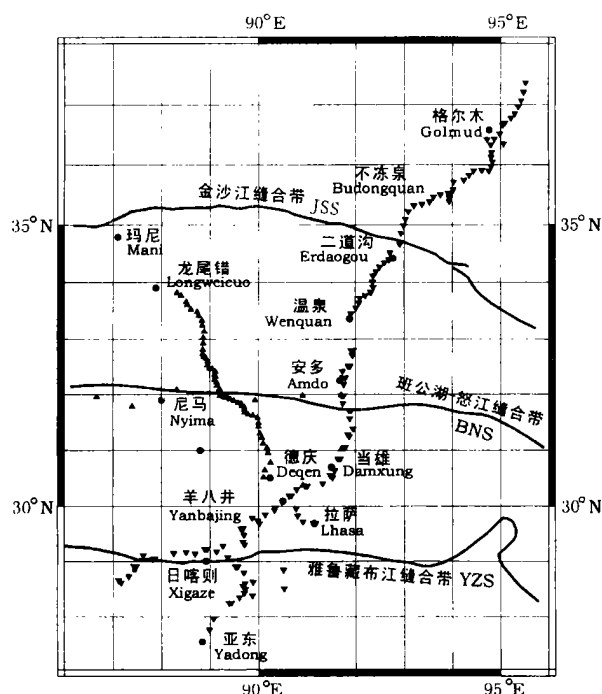


图 1 地震台站分布图

Fig.1 Map showing the location of seismic stations used

2.1 INDEPTH计划

在亚东—当雄—龙尾错测线上 800km 长的工作地段, 安放了有 126 台地震仪, 在雅鲁藏布江缝合带的南北两侧部署的仪器间距较小, 仅 5 ~ 6km, 其他地段仪器安放的间距约为 10 ~ 35km; 地震仪的探头包括有 L-28 型 4.5Hz, L-4 型 1Hz, CMG-40 型, CMG-3T 型及 STS2 探头, 122 个台站, 全部为三分量记录, 半数仪器的记录时间长达一年。

2.2 F-9293 计划

台站是沿定日—嘎拉—羊八井—当雄—安多—沱沱河—格尔木—锡铁山剖面布置的, 总长约 800km, 部署了 109 台站, 台站间距为 15 ~ 20km, 其中 49 个台站为三分量, 60 个台站为单分量, 检波器主频为 5Hz 和 1Hz。记录时间均为 5 个月。

2.3 数据提取及质量状况

选用震级大于 4.5 级的, 同一个地震事件至少有 10 个台站记录到的射线。各台站数据记录状态良好, 初至时间清楚。

层析成像反演主要利用了震中距大于 30 的 P 波, 少量的 PKP 波震相。根据野外台站记录状况(包括仪器性能和时间漂移情况)建立时间参数表并对到时数据做时间校正。取得的 INDEPTH 及 SF-9293 远震到时数据, 经检查精度在 0.1s 之内。

3 远震 P 波走时残差层析反演及其结果

3.1 走时残差数据的提取

INDEPTH 数据主要取自当雄—龙尾错剖面的 45 个和雅鲁藏布江以南 6 个台站。共选用了来自全球的 670 个地震事件。为避免 PKP 震相带来的垂向

变化比较大的影响, 本文采用的震相提取误差为 $\pm 0.1s$ 的 18945 个 P 波及少数的 PKP 参加运算。F-9293 数据, 选用了定日到格尔木的 109 个台站记录的 256 个地震事件, 共 5296 个 P 波及 PKP 波走时残差。地震射线来自全球不同震源区域, 但是主要来自东北亚与东南亚。

3.2 亚东—格尔木层析成像反演模型

采用 ACH 远震体波层析成像软件^[9] 对上述两组独立的走时残差数据进行反演运算。依据文献 [10, 11] 给出的有关数据, 设计了反演模型, 共 10 层, 划分成 2772 个块体, 东西宽 640km (浅部) ~ 400km (深部), 南北长 1200km (浅部) ~ 1920km (深部), 延深 330km (分 10 层), 见表 1。按每个块体要有 10 条射线穿过的条件来筛选, 共有 1606 个块体, 形成一个 1606 \times 1606 阶矩阵。反演所用阻尼参数 0.25², 数据拟合残差方差从初始模型的 0.217², 减少到 0.035², 最终改进值为 84 %。

反演得出的亚东—格尔木一线地震层析成像断面图见图 2 (图版)。我们还用了两组数据分别做了层析反演, 两者的基本特征是一致的, 表明这一速度分布图案是稳定可信的。图 3 (图版) 给出了 3 个深度的层析成像切片图。

3.3 层析成像的分辨率分析

成像的分辨率包括水平分辨率与垂直分辨率, 与许多因素有关, 如所用的地震波波长, 测站间距, 穿过块体的射线数与方向, 块体大小等等。一般用分辨率矩阵主对角线元素值表示成像的分辨率, 分辨率矩阵描述反演得出的速度模型与真实速度模型的关系, 即 $\Delta m = R m$ 。其中 m 为真实的速度模型, Δm 为利用走时残差反演出的模型, R 为分辨率矩阵。由于 $\Delta m = [A^T A + I]^{-1} A^T A m$, 所以 $R = [A^T A + I]^{-1}$

表 1 亚东—格尔木剖面层析成像综合反演模型

Table 1 Integrated inversion model of seismic tomography of Yadong - Golmud profile

层数	给定速度 (km/s)	层厚 (km)	块数	南北向长度 (km)	偏移量	块数	东西向长度 (km)	偏移量
1	5.80	10.00	60	20.00	0.00	8	80.00	0.00
2	5.80	15.00	50	25.00	0.00	8	80.00	0.00
3	6.60	20.00	50	25.00	0.00	6	80.00	0.00
4	7.60	25.00	50	25.00	0.00	6	80.00	0.00
5	8.00	30.00	50	26.00	0.00	6	80.00	0.00
6	8.20	35.00	40	30.00	0.00	6	80.00	0.00
7	8.20	40.00	38	30.00	0.00	6	80.00	0.00
8	8.20	45.00	34	30.00	0.00	6	80.00	0.00
9	8.30	50.00	32	30.00	0.00	5	80.00	0.00
10	8.50	60.00	32	60.00	0.00	5	80.00	0.00

$A^T A$, 它为奇异的, 又是对称的, R 相当于一个模糊透镜, 通过它观测一个实体, 对角线的数值 (R_V) 显示了图像上各点的分辨率, 即对应块体结果的可信度, 1.0 是最可信的, 0.5 以上即为可信值. 图 4 (见图版) 为 3 个切片层各层的分辨率矩阵主对角线元素等值线图. 但是这一分辨率数字与具体的空间尺度的关系并不直接对应.

Wittlinger 等^[12] 认为浅层速度异常的水平分辨率大体上与台站间距接近, 约为 12km 或 10~15km, 一般说来, 分辨率可达到 50km, 甚至更高, 在深部, 以第七层块体 (220km 深, 80km 厚, SW-NE 向长 40km, NW-SE 向长 100km) 为例, 成像的垂向分辨率可达 80km. 本项结果使用了 INDEPTH 和 F-9293 的数据, 台站间距加密了, 水平和垂直分辨率将会大大提高, 垂向分辨率可达 100km 以内.

4 地质解释

层析图的速度扰动可分为 2 个带: 0~80km 深度区间的地壳部分, 为高、低速度扰动带交叉区; 80~300km 深区间为上地幔的主要层位, 这一层段有 3 个特征带, 见图 5 (图版).

4.1 100km 深处北倾的高速度扰动带

出现在剖面南段, 为 1 条由 5 个高速体组成的带, 连续性较好, 从日喀则的深部约以 22° 的倾角向北伸展下去, 在 28°N 处 (相当于堆纳北) 约 100km 深, 到雁石坪 (k48) 增加到 250km 深, 再向北直插到五道梁低速体, 深度达 300km; 高速扰动可达 +5%, 相应的速度值为 8.2~8.5km/s. 高速度扰动带中间的 3 个低速通道, 将高速扰动带分开, 成为其上部 and 下部低速扰动带的连接通道. 在高速度扰动带的上、下均为低速扰动带, 连续性较好, 扰动值可达 -5%; 其中上低速扰动带从雅鲁藏布江开始断断续续地向北伸展到 300km 以下.

高速扰动带的速度值为 8.4~8.5km/s. 与 J.Ni 等^[13] 和 Molnar^[14] 给出印度大陆地幔岩石圈和喜马拉雅山下的 P_n 值 8.40~8.42km/s 是一致的. 一般人们已把这一特征作为印度大陆这类前寒武纪地盾的典型特征, 它代表了一个冷的地幔岩石圈, 与其他活动性地块具有的热地幔岩石圈是不同的. 因为后者没有这样的高速地幔岩石圈. 所以上地幔低速背景下的高速层按照其高的速度值推测, 这一高速条带应代表了斜插下去的印度大陆地幔岩石圈. 不同数据组处理的结果显示这 5 个高速体总的成带

趋势是稳定的.

这一高速体向南伸展, 与一个厚度可达 200km (由于南部射线数太少, 有很大不确定性) 的巨厚高速体相连, 但其位置已是在印度大陆之下了. 表明两者的相互关联, 说明这一巨厚高速体应当是印度地幔岩石圈的显现.

等面波层析结果的解释^[4~6, 15~17] 提出印度大陆岩石圈地幔整体俯冲到青藏高原之下, 由于其垂向分辨率太低, Griot 等^[4, 16] 给出的是 100km 深度以下为 350km, 庄真等给出的是 110km 深度以下为 100km^[7]. 对比之下, 本文层析成像结果显示了较高的分辨率.

4.2 藏南的地幔岩石圈

Beghouel 等^[3] 求得的喜马拉雅地块下的 P_n 值为 8.43 ± 0.16km/s, INDEPTH 研究组^[10] 利用双站法测得拉萨地块下莫霍层的 P_n 值为 8.1~8.3km/s; 丁志峰等^[18] 给出藏南拉萨地块的 P_n 小于 8.0km/s, 喜马拉雅地块则大于 8.0km/s; N.Jobert 等^[19] 给出的藏南地幔岩石圈的 P 波速度为 8.4km/s, S 波速度为 4.65km/s. 这些速度值与 Molnar^[14] 给出的 P_n 波与 S 波的波速分别为 8.4km/s 和 4.7km/s 是一致的, 与文献 [13, 20] 得出的数值也一致. 这一高速层也应当是印度大陆的地幔岩石圈的显现. 从大地构造上分析喜马拉雅地体是属于印度大陆的, 其深部的地幔岩石圈应为高速度, 应属印度大陆, 层析结果反而是相对低的, 可能是地处测线的边缘, 成像结果不可靠所致, 这一点尚需进一步研究. 拉萨地体和印度大陆均来自冈瓦纳大陆, 其下的地幔岩石圈也应是高速的, 这和层析结果基本一致. 这一层是拉萨地块下原有的还是碰撞后印度大陆地幔岩石圈伸展进来的? 从对上面 100km 深的高速地幔岩石圈分析看, 它应当是从南边伸展进来的.

4.3 印度大陆地幔岩石圈厚度有多厚?

Molnar^[14] 给出数字约为 200km; 庄真等^[7] 给出恒河盆地下为 86 ± 10km (面波); Dewey 等^[21] 给出印度恒河盆地下面的厚度为 75km~200km. 估计藏南 100km 深处的高速层厚度约为 70~80km, 其上部的高速层, 即藏南的地幔岩石圈的厚度, 可能仅为几十公里到上百公里. N.Jobert 等^[19] 给出的数据 (30km) 也可证实, 因为约束的深度并不大, 所以有一定的可信度. Beghouel 等^[3] 求出为 45km, 赵文津等^[22] 从接收函数结果得出藏北高速层厚度为 30~40km; Kind 等^[23] 的接收函数结果也给出厚度约为 40km. 庄真等^[7] 利用面波求得的西藏南北地幔岩石圈厚度都为

35km(按剪切波速度为 4.60km/s 圈定);滕吉文等^[8]利用面波资料求得的厚度为 60~80km;Dewey 等^[21]总结提出高原下面的地幔岩石圈厚度应为 30~50km. 从这些结果看,高原下面的地幔岩石圈厚度大体上为 30~50km 或更大一些. 加上 100km 深的高速地幔岩石圈厚度约为 70~80km,印度地幔岩石圈的总厚度为 100~130km,而藏南藏北包括地壳在内的岩石圈总厚度约为 100~120km.

这样,印度大陆厚的地幔岩石圈在向北推进过程中,不是整体向北俯冲到高原之下,而是分成上、下两层. 上述 100km 深处的高速扰动带为其下层,以较陡的角度向北插入,而现在的藏南高速地幔岩石圈为其上层,它也向北伸展出去,两层之间为一条低速带分隔. 它是在高喜马拉雅之下,由于水平挤压强烈,地壳迅速加深,使得其发生了拆离和强烈地挠曲.

按照 Lyon-Caen 等^[14]的分析,确定印度地幔岩石圈深度变化有两个约束条件,一是跨过高喜马拉雅出现了很大的负重力梯度带,表明莫霍层深度加深很快;二是印度大陆地幔岩石圈弯曲要符合恒河下面为 4km 深(沉积厚度),高喜马拉雅之下为 75km 深. 他们用厚 100km 的固定弯曲刚性的弹性板模拟不能满足条件,用可变弯曲刚性的弹性板模拟也拟合不了,最后提出用两段弯曲刚性不同的弹性板加上一个力. 但是又认为加一个水平压力是不可能的,在板的远端加上一垂直作用力才可以满足上述两个条件. 本文结果显示巨厚岩石圈地幔在高喜马拉雅之下分成两层厚,上层变薄后弯曲刚性减小,此外在拉萨地块与喜马拉雅地块相对挤压过程中水平力可以很大,使地壳由北向南逐步推覆增厚,并使特提斯喜马拉雅的地壳增加到最厚,达到约束条件的要求.

印度大陆岩石圈地幔可否分层? 这一问题较难确定,已有数据很不充分. 但是可以从两个方面得到启示: 地球化学研究地幔结构的研究成果,Корылова 等^[24]提出克拉通地区岩石圈地幔的成分有分层现象;任向文等^[25]总结这方面的研究归纳出:0~40km 深度为斜长石橄榄相稳定区,45~82km 深度区间是尖晶石橄榄相稳定区,80~132km 深度为低温尖晶石-石榴石橄榄相稳定区,132~172km 深度区间为低温石榴石橄榄相稳定区等等. 印度地幔岩石圈的上层与下层的分界可能是尖晶石橄榄相稳定区与低温尖晶石-石榴石橄榄相稳定区的分界,这方面还需要求证; 面波成像的结果^[7,8]显示了印度

大陆岩石圈地幔是均匀而且有分层现象,并提出 55~83km 的深度区间为低速层,表明了其内部可能存在着物性界面. 此结果还表明,拉萨地块的地幔岩石圈的厚度与其南北地块的相差不多,既无加厚现象,也无减薄的迹象.

4.4 高原下面高速地幔岩石圈向北的延伸

设反演模型在 70km 深的第 5 层为地幔岩石圈,速度取为 8.00km/s,其顶部即壳幔分界的莫霍层,显示为一速度梯度带,一些地段变化很陡,深度也有变化. 图上显示高速地幔岩石圈向北一直伸展到雁石坪(33.5°N),并向下伸展到 34.5°N,即雅鲁藏布江缝合带以北 470km,高喜马拉雅以北 650km 处. 在此出现高、低速块体相嵌地段,既有较低速度体(8.0~8.2km/s),也有高速体(8.3~8.4km/s). Kossarev 等^[26]认为由于印度大陆地幔岩石圈温度为 600~800℃,欧亚大陆岩石圈地幔温度为 1100~1300℃,热的岩石圈地幔在上,冷的岩石圈地幔在下,两者相差 300~700℃. 冷的印度大陆岩石圈地幔与热的欧亚大陆岩石圈地幔相遇后,冷的下沉,热的上浮,并可能因下沉过快而断离. 印度地幔岩石圈的上层可一直向北下落到五道梁深部低速体附近,倾斜长度达 210km.

本区内印度大陆地幔岩石圈的断块为高速体,还应考虑北部羌塘地块和巴颜喀拉地块下面存在的大洋岩石圈的残块存在问题. 当北部的地块相互碰撞后,其间的大洋岩石圈将向下俯冲. 大洋型岩石圈主要为地幔岩石圈. 中国南海的岩石圈速度为 7.9~8.4km/s,以 8.2km/s 速度值占多数^[27]. 依据速度特征和地块的大地构造位置,我们推测北部不同深度产出的向南倾斜的高速块体可能是大洋岩石圈的残块. 也可能是羌塘地块的地幔岩石圈向北插入而保留下来的高速岩石圈残块.

上述的印度巨厚的地幔岩石圈因大挠曲而拆分与北部印度高速地幔岩石圈与亚洲大陆的地幔岩石圈的分离,构成了高原地幔岩石圈的两种拆沉的方式. 俯冲下去的地幔岩石圈都进入了软流圈内,进入新的温压条件下的相变区.

4.5 关于五道梁深部低速体

这一低速体深 150km,沿剖面宽约 150km,下延约 250km,并沿北西方向伸展出去(按照文献[5]及我们做的尚未发表的区域性面积层析成像结果). 与 G. Wittlinger 等^[10]发现的藏北低速块体大体一致. 但是新的结果显示,这一低速体向上伸展到地壳内,与地壳内的低速层有联系,向下可以伸展到 400km

以下,总体上形成一向南倾斜的巨型低速区,南北宽可达 200km. 按照苏伟^[5]的面波结果,它与上地幔低速层是相连接的. 低速区中间包围了几个向南倾的高速条带,可能就是存在的残块显示. 按 Wittlinger 等推算这一低速体反映了低速体温度可能升高了 300 K,认为这一低速体与一个典型的地幔柱相当,但是 Tapponnier^[4]认为藏北的火山岩不像是典型的地幔火山岩. 由于向下与向北情况不明,所以难以从总体上对此进行判断. 估计可能是一种上地幔内循环的地幔柱类型的显示.

1) 200km 深度相当于低速层的底界,其温压条件约为:6600MPa,1520 ~ 200 ~ 400km 之间正是橄榄石相向尖晶石相的主要转换区间,在压力不变的条件下(即深度不变)温度升高则会导致尖晶石相向橄榄石相变化,这样将使岩石的密度减小,速度也将减小,产生低速区. 推测这一地段温度升高可能与印度地幔岩石圈从南向北,与亚洲地幔岩石圈从北向南相对俯冲有关,对冲扰动了软流圈,使局部温度升高,将上部地层加热,并触发了地壳内岩浆熔体形成并上涌,造成了藏北火山岩涌出. 藏北广泛分布有橄榄粗玄岩、高钾粗玄岩和粗玄岩,以及粗面岩岩流和流纹岩^[28]. 火山岩中捕虏体是下地壳的无水变沉积岩组成,温压平衡条件为 800 ~ 1100 ,相当于地下 30 ~ 50km 深^[28]. 在这一深度,大地电磁结果显示为高导电性,并有相对高布格重力异常存在,表明下部存在质量较大的玄武质岩浆.

2) 火山岩向北年龄变新的现象,藏北火山岩年代较新. 我们的解释是印度地幔岩石圈是逐步向北推进的,越是向北,到达时间越晚,对软流圈的扰动就越晚,使深部热流上升的时间也就越晚. 最新的 GPS 观测结果^[29]表明北部地块的挤压速率减小,也使北部的地块增厚速度变慢,后来壳内的逆冲推覆将引起地壳内温度升高,形成壳源新岩浆上涌.

3) 横波各向异性显著也是这一深部低速体的特征. 低速体的部位正好位于区内各向异性强的地段^[30]. 由于本区内地壳浅部的裂隙带方向与快波方向不一致,快波方向与软流圈中橄榄石流动定向有关. 高温的熔融岩浆体更易于流动,使地幔中二辉橄榄岩形成优势取向,产生了快波方向变化.

5 结 论

5.1 高原下面不存在巨厚的地幔岩石圈,而是分成上、下两层,成为两个不同挠曲刚度的弹性板;下层

以高角度下插到软流圈中,而上层以正常的厚度向北延伸,构成现今高原之下的地幔岩石圈,并于高喜马拉雅之下形成较大的挠曲,可以将高的负重力梯度与印度地幔岩石圈向下陡然加深而两者协调起来.

5.2 藏北火山活动多,波速度低,是与下、上两层地幔岩石圈分别向下插入和断裂下沉有关,下插形成深部高温低速体,并发生热流上涌. 形成藏北是薄幔盖与热幔. 藏北几个地块间发生大规模走滑,以及地壳发生构造增厚作用也会有重要贡献.

5.3 鉴于藏北地块仅仅是上地壳刚性较大,而下地壳以下塑性强,地表的走滑运动将仅限于上地壳,而不是在下地壳内,因此,地表发生的大规模走滑运动不会是藏北深部活化的主要因素.

许多同行给予了热情支持和鼓励,提出许多宝贵建议,徐立、郑玉坤对文章的成文和图件作了大量的工作,在此一并致谢.

参考文献

- [1] Dewey JF, JFSCande, WCC Pitman. Tectonic evolution of the India/Eurasia collision zone. *Eclogae Geol. Helv.*, 1989, **82**(3): 717 ~ 734
- [2] 吴功建, 肖序常, 李廷栋. 青藏高原亚东—格尔木地质断面. *地质学报*, 1989, **63**(4): 285 ~ 296
Wu GJ, Xiao XC, Li TD. The Yadong—Golmud geoscience section on the Qinghai—Xizang plateau. *Acta Geologica Sinica*, 1989, **32**(4): 285 ~ 296
- [3] Beghoul N, Barazangi Muawia, Isacks bryan L. Lithospheric structure of Tibet and western north america: mechanisms of uplift and a comparative study. *J. Geophys. Res.*, 1993, (B2): 1997 ~ 2016
- [4] Tapponnier Paul, Xu Zhiqin. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 2001, **294**: 1671 ~ 1677
- [5] 苏伟, 彭艳菊, 黄忠贤等. 青藏高原及其邻区地壳上地幔 S 波速度结构. *地球物理学报*, 2002, **23**(3): 193 ~ 200
Su Wei, Peng YJ, Zheng YJ, et al. Crust and upper mantle shear velocity structure beneath the Qinghai—Xizang plateau and adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(3): 193 ~ 200
- [6] 周华伟, Michael A Murphy, Lin QL. 西藏及其周围地壳、地幔地震层析成像—印度板块大规模俯冲于青藏高原之下的证据. *地质前缘*, 2002, **9**(4): 285 ~ 292
Zhou HW, Michael A Murphy, Lin QL. Tomographic imaging of the Tibet and surrounding region: evidence for wholesale underthrusting of India slab beneath the Xizang plateau. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2002, **9**(4): 285 ~ 292
- [7] 庄真, 傅竹武, 吕梓龄等. 青藏高原及邻近地区地壳与上地幔剪切波三维速度结构. *地球物理学报*, 1992, **35**(6): 694 ~ 709
Zhuang Z, Fu ZW, Lu ZL, et al. 3-D shear velocity model of crust and upper mantle beneath the Qinghai—Xizang plateau and its adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chi-

- nese), 1992, **35**(6): 694 ~ 709
- [8] 滕吉文, 张中杰, 王光杰, 等. 喜马拉雅碰撞造山带的深层动力过程与陆-陆碰撞新模型. 地球物理学报, 1999, **42**(4): 481 ~ 494
- Teng JW, Zhang ZJ, Wang GJ, et al. The Deep Internal Dynamical Processes and New Model of Continental-Continental Collision in Himalayan Collision Orogenic Zone. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 1999, **42**(4): 481 ~ 494
- [9] Evans JR, U Achauer, Teleseismic velocity tomography using the ACH method: theory and application to continental-scale studies. In: H M Iyer et al. ed. *Seismic Tomography: Theory and Practice*. London: Chapman & Hall Press, 1993, 319 ~ 360
- [10] WJ Zhao, INDEPTH 'Term. Deep Structure and Tectonics of The Himalaya and Yaluzangbu Suture. Beijing: Geological Publishing House, 2001
- [11] WJ Zhao, J Mechie, L D Brown, et al. Crustal structure of central Tibet as derived from project INDEPTH wide-angle seismic data. *Geophys. J. Int*, 2002, **145**: 486 ~ 498
- [12] Wittlinger G, Frederic Masson, G Poupinet, et al., Seismic tomography of northern Tibet and Kunlun: evidence for crustal blocks and mantle velocity contrasts. *EPSL*, 1996, **139**: 263 ~ 276
- [13] Ni J, Barazangi M. High-frequency seismic wave propagation beneath the Indian shield, Himalaya arc, Tibetan plateau and surrounding regions: high uppermost mantle velocities and efficient S wave propagation beneath Tibet. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1983, **72**: 665 ~ 689
- [14] Molnar Peter. A review of geophysical constraints on the deep structure of the Tibetan Plateau, the Himalaya and the Karakoram, and their tectonic implications. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1988, (A326): 33 ~ 88
- [15] Yushen Zhang. Upper mantle structure and plate tectonics under the Tibetan and adjacent area. In: *Advances in China Solid Geophysics*. Beijing: Ocean Press, 1994
- [16] Griot Daphne Anne, Jean-Pau Montagner, Tapponnier Paul. Phase velocity structure from Rayleigh and Love waves in the Tibetan and its neighboring regions. *J. Geophys. Res.* 1998, **103**(B9): 21213 ~ 21232
- [17] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像. 地球物理学报, 2002, **45**(5): 646 ~ 664
- Zhu JS, Cao JM, Cai XL, et al. High resolution surface wave tomography in East Asia and West Pacific marginal seas. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 2002, **45**(5): 646 ~ 664
- [18] 丁志峰, 曾融生. 青藏高原的 Pn 波速度和 Moho 面的起伏. 地震学报, 1992, **14**(增刊): 592 ~ 599
- Ding ZF, Zeng RS. Pn of Qinghai plateau and the relief of the Moho. *Acta Seismologica Sinica*, 1992, **14**(Suppl.): 592 ~ 599
- [19] Jobert N, Journet B, et al. Deep structure of southern Tibet inferred from the dispersion of Rayleigh waves through a long-period seismic network. *Nature*, 1985, **313**: 386 ~ 388
- [20] Rodgers Arthur J, Susan Y Schwartz. Lithospheric structure of the Qiangtang terrane, northern Tibetan plateau, from complete regional waveform modeling: evidence for partial melt. *J. Geophys. Res.* 1998, 7137 ~ 7152
- [21] Dewey JF, Shackleton RM, Chang CF, et al. The tectonic evolution of the Tibetan. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1988, **327**: 379 ~ 413
- [22] DNShi, WJ Zhao, L Brown, et al., Seismic image of the crustal and upper mantle structures as an evidence for an accretionary thrust wedge rise of the central Tibetan plateau. *Geology*, 2004 (in print)
- [23] Kind R, X Yuan, J Saul, et al. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: evidence for Eurasian plates subduction. *Science*, 2002, **298**: 1219 ~ 1221
- [24] Kopylova MG, J K Russell. Chemical stratification of cratonic lithosphere: constraints from the northern Slave craton. *Earth Planet. Sci. Lett. (Canada)*, 2000, **181**: 71 ~ 87
- [25] 任向文, 吴福元. 大陆岩石圈地幔形成与演化研究的新进展. 地球物理学进展, 2002, **17**(3): 514 ~ 524
- Ren XW, Wu FY. New progress of the formation and evolution of subcontinental lithospheric mantle. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2002, **17**(3): 514 ~ 524
- [26] Kosarev G, R Kind S, V Sobolev, et al. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet. *Science*, 1999, **283**: 1306 ~ 1309
- [27] 姚伯初, 曾维军, DE Hayes, 等. 中美合作调研南海地质专报. 北京: 中国地质大学出版社, 1994
- Yao BC, Zeng WJ, DE Hayes, et al., The Geological Memoir of South China Sea Surveyed jointly by China & USA. Beijing: Chinese University of Geosciences Press, 1994
- [28] Hacker Bradley R, Edwin Gnos, Lothar Ratschbacher, et al. Hot and dry crustal xenoliths from Tibet. *Science*, 2000, **287**: 2463 ~ 2466
- [29] Qi Wang, Zhang PZ, Jeffrey T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 2001, **294**: 574 ~ 577
- [30] McNamara DE, WR Walter, TJ Owens, et al. Upper mantle velocity structure beneath the Tibetan plateau from Pn travel time tomography. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(B1): 493 ~ 505

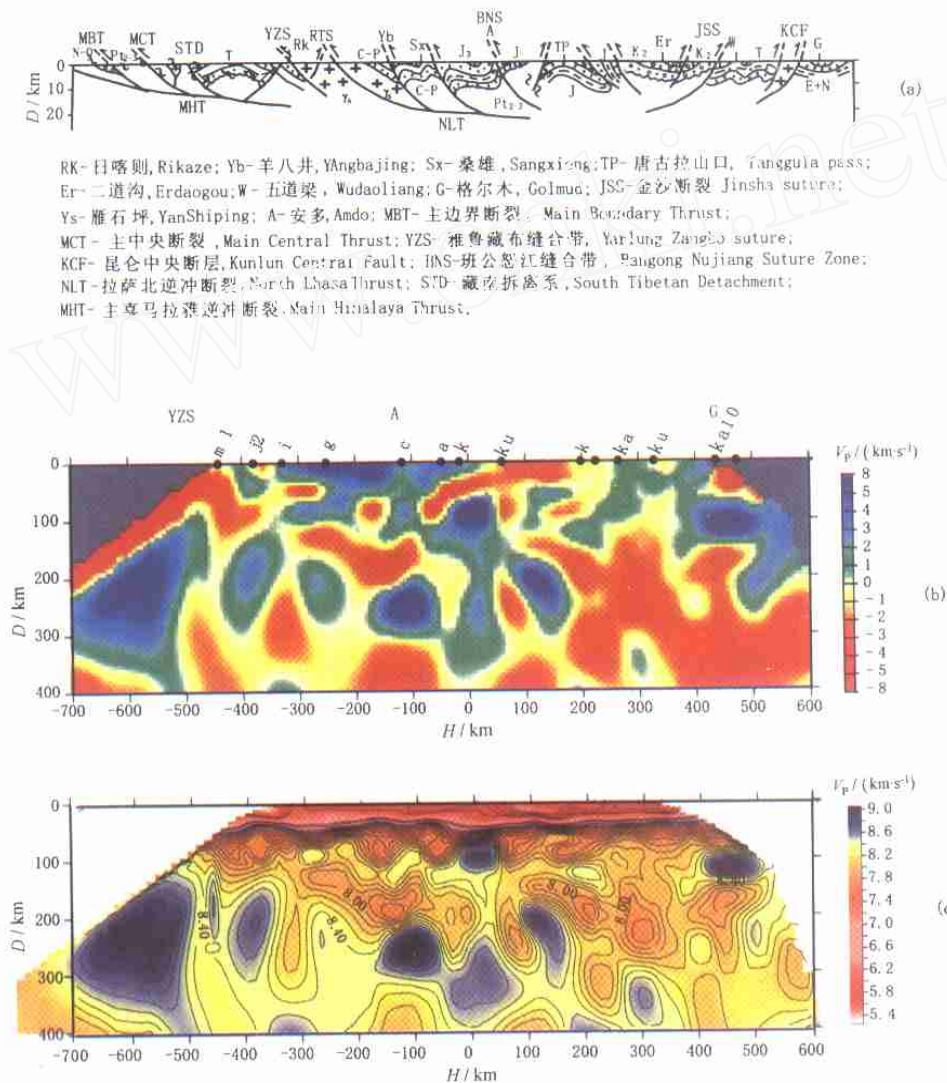


图2 亚东-格尔木测线层析成像垂直剖面图

Fig. Tomographic vertical section along Y-G line

(a) 亚东-格尔木地质剖面图; (b) 亚东-格尔木测线层析成像垂直剖面图; (c) 亚东-格尔木测线速度结构剖面图。

(a) Geological profile along Y-G line; (b) Tomographic vertical section along Y-G line;

(c) Vertical section of velocity structure along Y-G line.

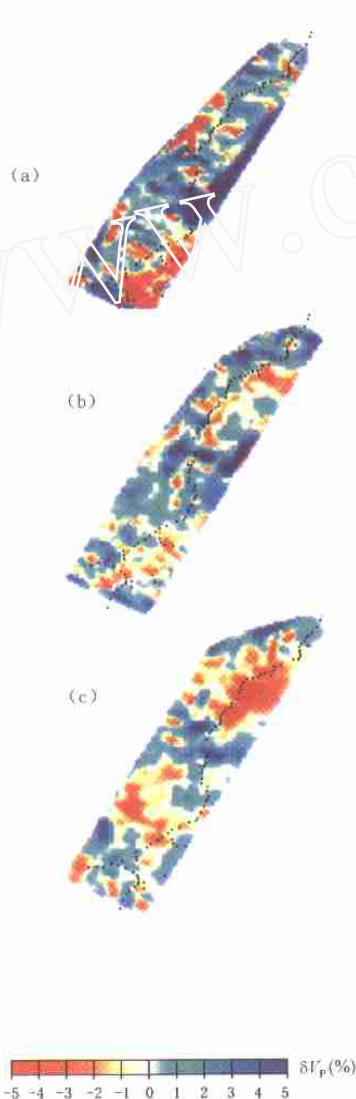


图3 三个水平层的速度扰动图

(a) 85km; (b) 155km; (c) 245km.

Fig. 3 P-wave velocity perturbation in horizontal layers at 85km(a), 155km(b), 245km(c) depths

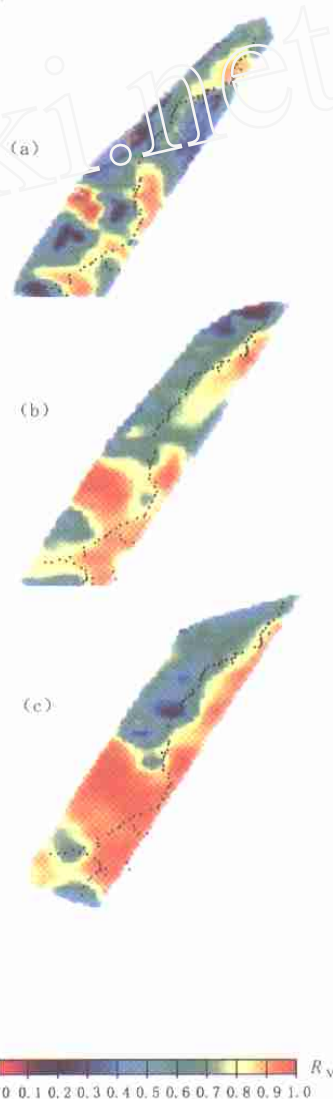
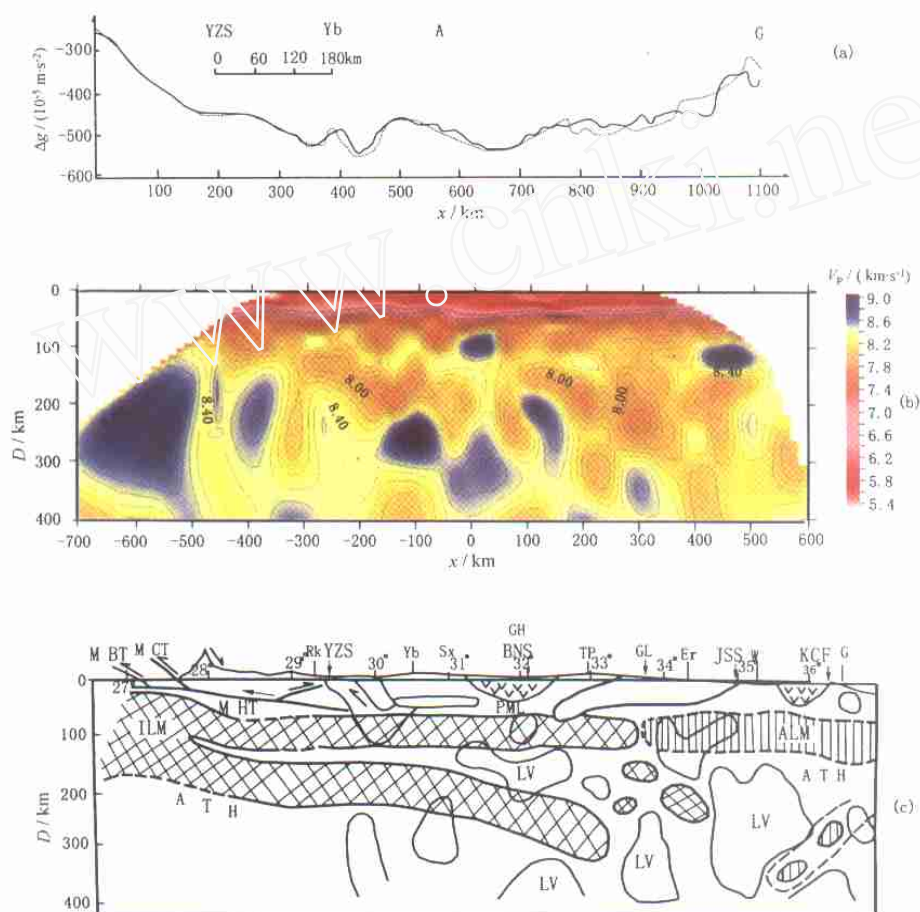


图4 三个水平层的分辨率矩阵对角线项数值

(a) 85km; (b) 155km; (c) 245km.

Fig. 4 Diagonal terms of the resolution matrix for horizontal layers at 85km(a), 155km(b), 245km(c) depths



RK-日喀则, Rikaze; Yb-羊八井, Yangbajing; Sx-桑雄, Sangxiong; TP-唐古拉山口, Tanggula pass;
Er-二道沟, Erdaogou; GL-重力低, Lower gravity; GH-重力高, higher gravity; W-五道梁, Wudaoliang;
G-格尔木, Golmud; ATH-软流圈, Asthenosphere; PML-部分融熔层, Partially melting Layer;
JSS-金沙断裂, Jinsha suture; Ys-雁石坪, YanShiping; A-安多, Amdo; LV-低速区, Lower velocity Area;
MBT-主边界断裂, Main Boundary Thrust; MCT-主中央断裂, Main Central Thrust;
YZS-雅鲁藏布缝合带, Yarlung Zangbo suture; ALM-亚洲大陆岩石圈地幔, Asia Lithosphere Mantle;
KCF-昆仑中央断层, Kunlun Central Fault; BNS-班公怒江缝合带, Bangong Nujiang Suture Zone;
NLT-拉萨北逆冲断裂, North Lhasa Thrust; STD-藏南拆离系, South Tibetan Detachment;
MHT-主喜马拉雅逆冲断裂, Main Himalaya Thrust; ILM-印度岩石圈地幔, Indian Lithospheric Mantle.

图5 亚东格尔木测线层析成像地质解释剖面

Fig. 5 Geological interpretation section along Y-G line

(a) 亚东-格尔木重力剖面图; (b) 亚东-格尔木速度结构剖面; (c) 亚东-格尔木测线层析成像地质解释剖面.

(a) Gravity profile along Y-G line; (b) Velocity structure along Y-G line;

(c) Geological interpretation section along Y-G line.