

青藏高原的地幔结构: 地幔羽、地幔剪切带及岩石圈俯冲板片的拆沉

许志琴¹, 姜 枚^{1,2}, 杨经绥¹, 薛光琦^{1,2}, 宿和平¹,
李海兵¹, 崔军文¹, 吴才来¹, 梁凤华¹

(1. 中国地质科学院 地质研究所 大陆动力学重点实验室, 北京 100037;

2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要:通过横穿青藏高原近 8 000 km 长的 4 条天然地震层析剖面, 获得 400 km 深度以上的地壳和地幔速度图像及地震波各向异性, 揭示了青藏高原 400 km 深度范围内的地壳和地幔结构特征。地幔速度图像显示, 青藏高原腹地的深地幔中存在以大型低速异常体为特征的地幔羽, 其可能通过热通道与大面积分布的可可西里新生代高钾碱性火山作用有成因联系; 阿尔金、康西瓦、金沙江、嘉黎及雅鲁藏布江等走滑断裂可下延至 300~400 km 深度, 显示了低速高热物质组成的垂向低速异常带特征及大型超岩石圈或地幔剪切带的产出; 发现康西瓦、东昆仑—金沙江、班公湖—怒江和雅鲁藏布缝合带下部存在不连续的高速异常带, 可以解释为青藏高原地体拼合及碰撞过程中可能保留的加里东、古特提斯和中特提斯大洋岩石圈“化石”残片, 是“拆沉”的地球物理证据。印度大陆岩石圈的巨厚俯冲板片以 15~20° 倾角向北插入唐古拉山下 300 km 深处, 并被高热物质组成的地幔剪切带分开。结合新的横穿喜马拉雅及青藏高原的地幔层析资料, 提出青藏高原碰撞动力学新模式: 青藏高原南部印度岩石圈板片的翻卷式陆内超深俯冲, 北缘克拉通向南的陆内俯冲, 腹地深部的地幔羽上涌, 以及地幔范围内的高原“右旋隆升”及物质向东及北东方向运动及挤出。

关键词:青藏高原; 地震层析剖面; 地幔羽; 地幔剪切带; 岩石圈板片拆沉

中图分类号: P542⁺.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2321(2004)04-0329-15

0 引言

青藏高原的结构是由祁连地体、东昆仑—柴达木地体、西昆仑地体、巴颜喀喇—松潘甘孜地体、羌塘地体、冈底斯地体和喜马拉雅地体组成的。在青藏高原的各地体之间存在着地质历史中形成并保留下来的地体边界, 其中有加里东期形成的祁连—阿尔金^[1~4]和西昆仑库地缝合带^[5~8], 古特提斯期形成的东昆仑阿尼玛卿及金沙江缝合带^[9~13], 中特提斯期形成的班公湖—怒江缝合带及新特提斯期形成的雅鲁藏布江缝合带^[14,15]等, 它们分别是早古生代

洋盆、古特提斯洋盆、中特提斯洋盆及新特提斯洋盆消减和地体碰撞的见证。研究表明, 地体边界及内部由于地体之间的相对斜向会聚与碰撞而形成大型走滑构造^[16~19], 其中有加里东期以来的北祁连南缘韧性走滑剪切带^[20]和西昆仑康西瓦韧性走滑剪切带^[21], 印支期以来的南祁连南缘韧性走滑剪切带^[22]、阿尔金韧性走滑剪切带^[23,24]、东昆仑南缘韧性走滑剪切带及金沙江韧性走滑剪切带^[25,19], 新生代以来形成的喀喇昆仑韧性走滑剪切带^[26,27]、鲜水河韧性走滑剪切带^[11,28]、红河韧性走滑剪切带^[29]、嘉黎韧性走滑剪切带和海源走滑断裂等大型走滑构造以及古韧性走滑剪切带的再活化^[17,18,30]。青藏高原大型走滑构造的研究导致青藏高原地体向东及东南方向的侧向挤出^[31,17]以及“右旋隆升”动力学机制的提出^[32]。

喜马拉雅地体是大约 65~50 Ma 以来印度板块与欧亚大陆碰撞形成的增生地体^[33], 目前人们已普

收稿日期: 2004-07-16; 修订日期: 2004-07-29

作者简介: 许志琴(1941—), 女, 研究员, 中国科学院院士, 构造地质学专业, 主要从事显微构造、大地构造和大陆动力学研究, 长期从事青藏高原构造研究工作。

遍接受了“大印度”板块(即碰撞前印度次大陆的面积比现在要大得多)的观点,即“大印度”板块通过向北插入青藏高原以下上千 km 而消减^[34]。最新的全球地幔地震层析资料不仅揭示了东太平洋和西太平洋岩石圈板片可以俯冲到美洲及亚洲大陆之下的深地幔或核幔边界,而且通过西喜马拉雅的地幔层析剖面^[35,36]揭示了西喜马拉雅构造结部位的印度岩石圈板片以高速异常体的形式从地表往北下插,向下变成直立,最后在深部又往南翻转(over roll)的几何形态,俯冲至 800~1 000 km 的地幔深度。

自 20 世纪 90 年代初以来,由许志琴和 P. Tapponnier 组织的中法青藏高原地学合作开展了地质和地球物理多学科的研究和探测。其中姜枚和 Him 及 Wittlinger G. 负责的中法地球物理合作小组在青藏高原实施了 8 000 km 长的天然地震探测剖面^[37,38],包括横穿青藏高原中部及南部的格尔木—唐古拉—嘎拉剖面(3 000 km),位于青藏高原腹地的共和—玉树剖面(3 000 km),横穿青藏高原西北部柴达木盆地和阿尔金山的乌图美仁—若羌剖面(1 000 km),以及横穿青藏高原西部西昆仑山的叶城—狮泉河剖面(1 000 km)。这些剖面几乎穿过

了青藏高原所有地体,并通过了主要地体边界。上述剖面的成果大部分已发表,并作了初步地质解释,提出了有关青藏高原北部大型岩石圈断裂和腹地地幔底辟存在以及塔里木地块俯冲于阿尔金地体之下^[39~41]等观点。

本文对青藏高原地震层析资料作了进一步处理,并在此基础上进行综合地质解析,对青藏高原地壳和地幔的结构、物理性质和状态、高原隆升及碰撞动力学机制作新的探讨。需要说明的是本文在重新处理“格尔木—唐古拉—嘎拉”地震层析剖面时参考使用了国土资源部中美 INDEPTH 项目在该剖面南段西侧的有关地震层析数据(图 1 中示意)。

1 青藏高原 400 km 深度范围内的天然地震层析图像

通过转换波计算的地壳中地震速度层、地震横波分裂处理的地震各向异性资料及三维走向获得的 400 km 深度以上的地幔速度图像,为进行青藏高原 400 km 深度范围内地壳与地幔的天然地震层析图

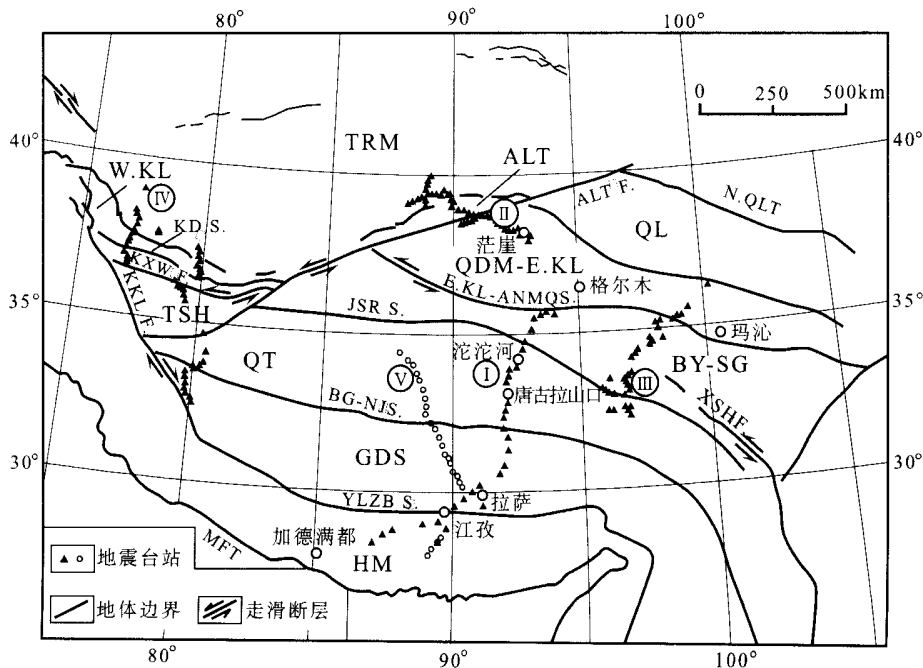


图 1 横穿青藏高原的天然地震层析剖面位置图

Fig. 1 Locations of the seismic tomographic profiles across the Qinghai-Tibet Plateau

I: 格尔木—唐古拉—嘎拉剖面; II: 乌图美仁—若羌剖面; III: 共和—玉树剖面; IV: 叶城—狮泉河剖面; V: INDEPTH 组的地震探测路线。QL: 祁连山地体; QDM-E. KL: 柴达木—东昆仑地体; BY-SG: 巴颜喀喇—松潘甘孜地体; QT: 羌塘地体; GDS: 冈底斯地体; HM: 喜马拉雅地体; ALT: 阿尔金地体; W. KL: 西昆仑地体; TSH: 甜水海地体; TRM: 塔里木地体; E. KL-ANMQ S.: 东昆仑—阿尼玛卿缝合带; JSR S.: 金沙江缝合带; BG-NJ S.: 班公湖—怒江缝合带; YLZB S.: 雅鲁藏布江缝合带; KD S.: 库地缝合带; KXW F.: 康西瓦缝合带; KKL F.: 喀喇昆仑断裂; ALT F.: 阿尔金断裂; N. QLT: 北祁连北缘逆冲断裂; MFT: 喜马拉雅主前缘逆冲断裂

像的分析提供了研究的基础。

1.1 地壳厚度及地震波速度层

根据天然地震转换波计算速度层编绘而成的各地体地震速度剖面图(图2)显示了青藏高原各地体地壳结构、地壳厚度和层速度变化的特征。获得了自北往南各地体地壳平均厚度如下:祁连山地体 62 km,柴达木地体 54 km,东昆仑地体 64 km,巴颜喀喇地体 66~68 km,羌塘地体 67 km,冈底斯地体 71 km,喜马拉雅地体中的特提斯喜马拉雅 68 km,高喜马拉雅 55 km。其中,冈底斯地体的地壳最厚,柴达木地体和高喜马拉雅地体的地壳最薄。

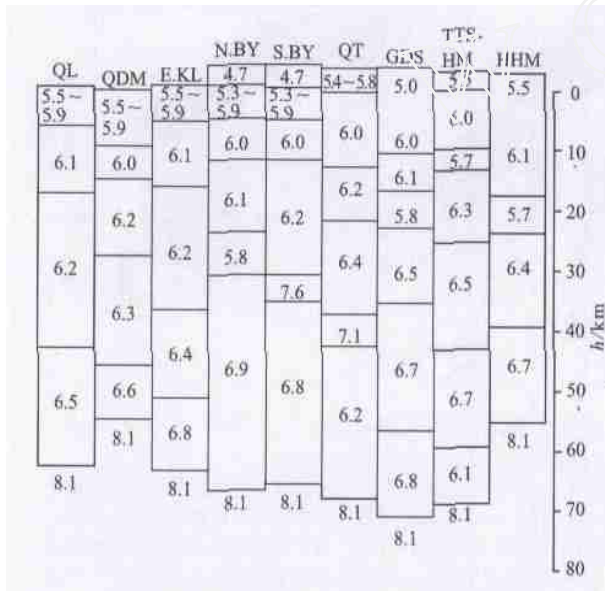


图2 青藏高原各地体的地震波平均速度剖面图

Fig. 2 Average seismic wave velocity sections of various terranes in Qinghai-Tibet Plateau

QL—祁连山地体; QDM—柴达木盆地; EKL—东昆仑地体; N.BY—北巴颜喀喇地体; S.BY—南巴颜喀喇地体; QT—羌塘地体; GDS—冈底斯地体; TTS-HM—特提斯—喜马拉雅地体; HHM—高喜马拉雅地体

青藏高原各地体的地震波速度剖面揭示各地体的如下结构特征:

(1) 存在上部地壳中的地震波低速层。在东昆仑地体以南的巴颜喀喇地体北部、冈底斯地体及喜马拉雅地体的上部地壳中存在地震波低速层,但低速层的深度及厚度有所不同:巴颜喀喇地体北部低速层位于深度 23~30 km,厚度 7 km;冈底斯地体低速层位于深度 16~22 km,厚度 6 km;喜马拉雅地体北部的特提斯喜马拉雅低速层位于深度为 10~13 km,厚度 3 km;高喜马拉雅低速层位于深度 17~22 km,厚度 5 km。

(2) 下部地壳中的地震波低速层和高速层。在

羌塘地体的 Moho 面 ($v_p = 8.1$ km/s) 之上, 43~68 km 深度处出现 25 m 厚的低速层,地震波层速度为 $v_p = 6.2$ km/s;在特提斯喜马拉雅的下地壳 ($v_p = 6.7$ km/s) 与上地幔 ($v_p = 8.2$ km/s) 之间 60~68 km 深度处出现 $v_p = 6.1$ km/s 的低速层。在巴颜喀喇地体南部正常的下地壳 (33~66 km) 波速 ($v_p = 6.8$ km/s) 之上和羌塘地体低速层之上均出现厚 3~5 km 的高速层 ($v_p = 7.6$ km/s 和 $v_p = 7.1$ km/s)。

(3) 各地体地震波速度剖面反映了各地体的物质组成及结构的差异,表明青藏高原是地质历史时期地体拼合的产物。

1.2 青藏高原地幔速度图像

横穿青藏高原的格尔木—嘎拉天然地震层析剖面(图3-A)、乌图美仁—若羌天然地震层析剖面(图4-A₁)、共和—玉树天然地震层析剖面(图4-A₂)和叶城—狮泉河天然地震层析剖面(图4-A₃),显示了400 km 深度范围的青藏高原深部结构是由高波速和低波速相互交错、镶嵌组成的复杂图像,分别对这些图像进行解析,为我们探讨青藏高原地幔结构提供了基础。

1.2.1 地震波低速异常图像

天然地震层析剖面显示了400 km 深部范围内的两种类型地震波低速图像:大型深地幔地震波低速异常体和地震波垂向低速异常带。(1) 大型深地幔地震波低速异常体:在格尔木—嘎拉天然地震层析剖面(图3-A)中,可观察到青藏高原腹地(柴达木—东昆仑地体、巴颜喀喇地体和羌塘地体北部)100 km 以下存在以昆仑山口为中心(北抵柴达木盆地,南到雁石坪)的深部地震波低速异常体。地幔低速异常体宽度约600 km,深度从100 km 延到400 km 以下,可与相邻的乌图美仁—若羌天然地震层析剖面(图4-A₁)及共和—玉树天然地震层析剖面(图4-A₂)中揭示的东昆仑—巴颜喀喇—羌塘地体及柴达木盆地下面的深地幔地震波低速异常体相连,表明高原腹地的深地幔中存在大型地震波低速异常体。同时在格尔木—嘎拉剖面中的深部地幔低速异常体通过低速异常通道直达可可西里地表的新生代高钾火山岩区。(2) 垂向地震波低速异常带:垂向低速异常带出现在地体边界及大断裂的下部,雅鲁藏布江垂向低速异常带宽50~100 km,从地表一直延伸至400 km 以下;嘉黎低速异常带与班公湖—怒江低速异常带发育在100~200 km 深度以下,并在350 km 深处相连(图3-A)。在乌图美仁

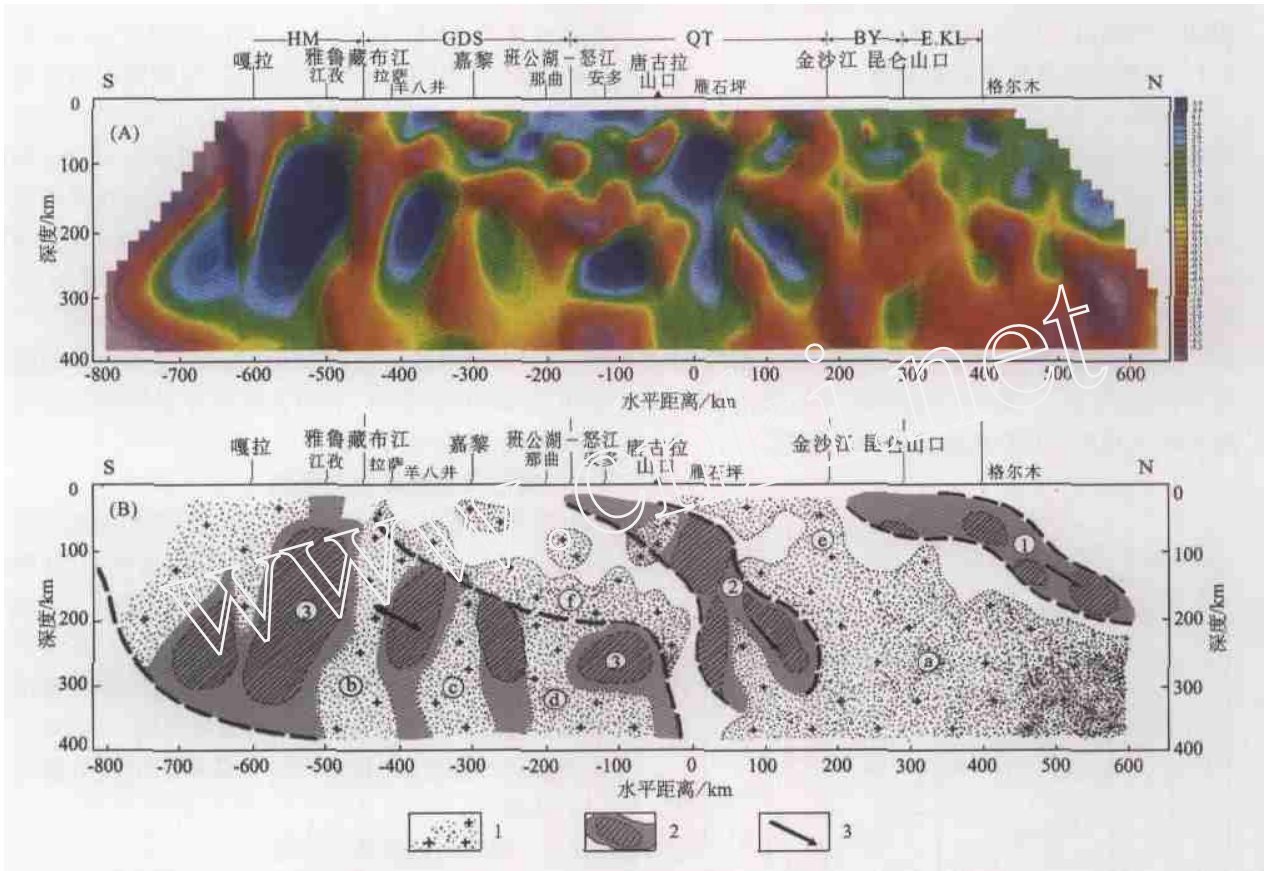


图3 格尔木—嘎拉天然地震层析剖面及解释剖面

Fig.3 Gölmut - Gala seismic tomographic cross section and geological interpretation

(A) 格尔木—嘎拉天然地震层析剖面: E, KL—东昆仑地体; BY—巴颜喀喇地体; QT—羌塘地体; GDS—冈底斯地体; HM—喜马拉雅地体。
(B) 格尔木—嘎拉天然地震层析解释剖面: 1—低速异常带; 2—高速异常带; 3—岩石圈板片俯冲方向。a—青藏高原腹地深部大型低速异常带解释为地幔羽; b—雅鲁藏布江地震波低速异常带解释为雅鲁藏布江地幔剪切带; c—嘉黎地震波低速异常带解释为嘉黎地幔剪切带; d—班公湖—怒江地震波低速异常带解释为班公湖—怒江地幔剪切带; e—金沙江地震波低速异常带解释为金沙江地幔剪切带; f—印度岩石圈板片上部的地壳低速熔融层; —东昆仑—金沙江高速异常带解释为古特提斯岩石圈俯冲残片; —班公湖—怒江高速异常带解释为中特提斯岩石圈俯冲残片; —印度高速异常带解释为印度岩石圈俯冲残片

—若羌天然地震层析剖面(图4-A₁)中,垂向低速异常带清晰地显示在阿尔金断裂带之下,阿尔金低速异常带宽度超过100 km,延伸深度大于300 km。(3)近水平低速异常层:在图3中,从雅鲁藏布江缝合带往北至唐古拉之下200 km深处,存在一条往北缓倾的不规则形态的厚度约20~50 km的地震波低速异常层,其下部与雅鲁藏布江、嘉黎和班公湖—怒江垂向低速异常带相连(图3-A)。

1.2.2 地震波高速异常图像

地震层析剖面中的地震波高速异常图像主要是通过浅部的地震波高速异常体和抵达300~400 km地幔深度的地震波高速异常带的形式表现出来的。

最明显的浅部地震波高速异常体——阿尔金地震波高速异常体在乌图美仁—若羌天然地震层析剖面(图4-A₁)的浅部低速图像背景中映出,该高速异常体被阿尔金走滑断裂和阿尔金逆冲断裂所夹持,

呈楔形几何学产出^[42],宽度约150 km,最大厚度100 km,表明了阿尔金地体的无根特征。

格尔木—嘎拉地震层析剖面(图3-A)显示了3条明显的高速异常带:(1)位于东昆仑—金沙江缝合带下部的地震波高速异常带,由若干小型高速异常体组成,整体向北倾斜,倾角约30~40°,其底界达200 km。(2)班公湖—怒江缝合带下部的地震波高速异常带(图3-A),包含3个高速异常体,以中等角度向北伸入至300 km深度。(3)位于青藏高原南部巨厚的喜马拉雅—印度地震波高速异常带(图3-A),该地震波高速异常带厚达300 km,整体向北缓倾(15~20°),插入雅鲁藏布江以北400 km的唐古拉山下,顶面达200 km的深处。该带被若干条垂向低速异常带分割成4个断续的近直立椭圆形的高速异常体。

此外,在共和—玉树剖面(图4-A₂)中位于东昆

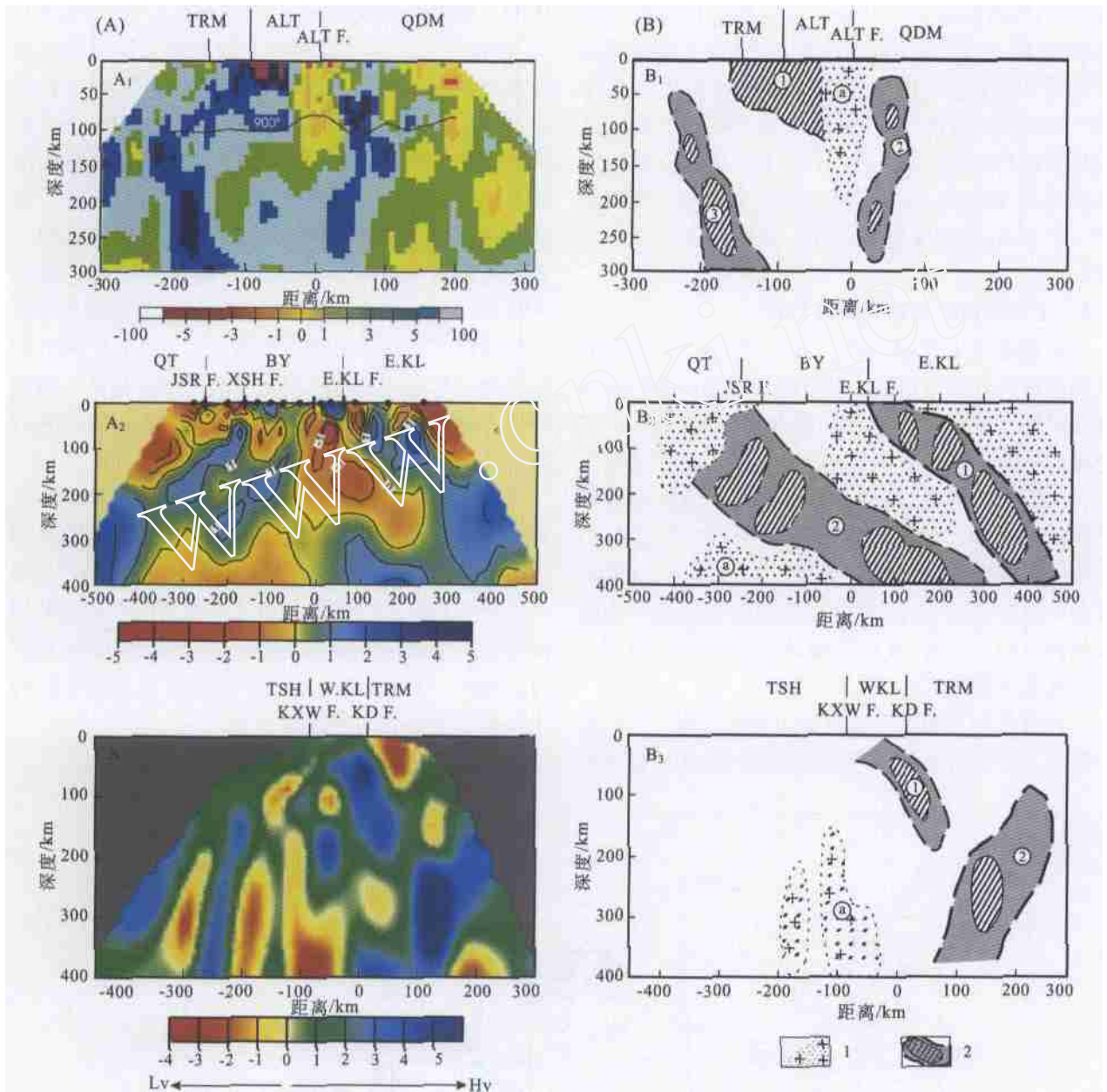


图4 青藏高原乌图美仁—若羌、共和—玉树及叶城—狮泉河天然地震层析剖面及解释剖面

Fig.4 Urt Mron - Ruoqiang, Gonghe - Yushu and Yecheng - Shiquanhe seismic tomographic crosssections and geological interpretation of the Qinghai - Tibet Plateau

(A) 青藏高原乌图美仁—若羌、共和—玉树及叶城—狮泉河天然地震层析剖面。(B) 青藏高原乌图美仁—若羌、共和—玉树及叶城—狮泉河天然地震层析解释剖面: TRM—塔里木地体; ALT—阿尔金地体; QDM—柴达木地体; QT—羌塘地体; BY—巴颜喀喇地体; E. KL—东昆仑地体; TSH—甜水海地体; W. KL—西昆仑地体; ALT F.—阿尔金断裂; E. KL F.—东昆仑断裂; XSH F.—鲜水河断裂; JSR F.—金沙江断裂; KD S.—库地缝合带; KXW S.—康西瓦断裂。A₁: 乌图美仁—若羌天然地震层析剖面。B₁: 乌图美仁—若羌天然地震层析解释剖面, a—阿尔金地震波垂向低速异常带可解释为阿尔金地幔剪切带;—阿尔金高速异常楔形体表明阿尔金地体为无根地体;—南阿尔金高速异常带可能为加里东期大洋岩石圈俯冲残片;—东塔里木高速异常带可解释为塔里木岩石圈向南俯冲于阿尔金山之下的俯冲板片。A₂: 共和—玉树天然地震层析剖面。B₂: 共和—玉树天然地震层析解释剖面, a—青藏高原腹地深部大型低速异常带解释为地幔羽;—东昆仑高速异常带;—金沙江高速异常带, 相当于图3中的东昆仑—金沙江高速异常带所代表的古特提斯岩石圈俯冲残片。A₃: 叶城—狮泉河天然地震层析剖面。B₃: 叶城—狮泉河天然地震层析解释剖面, a—康西瓦深部低速异常带, 可能代表深部地幔剪切带;—库地—康西瓦地震波高速异常带, 可能代表加里东(印支)大洋岩石圈俯冲残片;—南塔里木地震波高速异常带代表向南俯冲的塔里木岩石圈板片

论—金沙江缝合带下部的地震波高速异常带分为两条, 特征十分明显。在叶城—狮泉河天然地震层析剖面中(图4-A₃), 库地—康西瓦地震波断续高速异常带位于康西瓦缝合带的下部, 包含3个小型高速

异常体,该带在 150 km 深度以上以 30~40° 往北倾斜,至 150 km 以下变为近直立产出,并伴随强烈地震活动,震源深度达 150 km;南塔里木地震波高速异常带(图 4-A₃)位于塔里木地体南缘,地震波高速异常带往南以 60° 倾角伸入库地缝合带之下大于 400 km 的深度,在 200 km 深处似乎将往北倾的康西瓦高速异常带切割。在乌图美仁—若羌天然地震层析剖面(图 4-A₁)中,位于阿尔金低速异常带南侧 50~280 km 的深度范围存在一条南阿尔金高速异常带。

1.3 上地幔剪切波各向异性特征

地震波在上地幔中的扩散经常是各向异性的,地震波各向异性可用以示踪地幔动力学。弹性各向异性出现在地震波速度与它的方向有关的地方,在地幔中各向异性构造主要是由于流变引起矿物的优选方位而产生的,这些构造可以用来推测地球内部的流变几何学。地震产生挤压波(P)和剪切波(S)在各向异性岩石中的耦合导致波的散射、双折射和复杂的偏振,这些不同的特征将帮助我们揭示地幔和地壳中岩石结构,及研究地球历史中岩石圈板块的形成和大陆的增生。

青藏高原上地幔剪切波各向异性分布^[43~47]

(图 5)显示了以下特征:(1)雅鲁藏布江以南喜马拉雅地体的上地幔剪切波各向异性方向为 NNW-SSE 向。(2)雅鲁藏布江以北青藏高原腹地的上地幔剪切波各向异性方向表现为 NEE-SWW 及 NE-SW 向;羌塘地体中部的上地幔剪切波各向异性方向为近 E-W 向,而中东部转为 NEE-SWW 向;在巴颜喀喇地体上地幔剪切波各向异性方向由中部的 SW-NE 向转为东部 NNE-SSW 向,沿金沙江缝合带的玉树一带上地幔剪切波各向异性方向变为平行缝合带的 NW-SE 向;在柴达木—东昆仑地体的上地幔剪切波各向异性方向以 NW-SE 向为主。(3)上地幔剪切波各向异性在青藏高原西北缘的阿尔金地体中为近 EW 方向,沿阿尔金断裂为平行断裂 NEE-SWW 向。

上述表明上地幔剪切波各向异性的方向在雅鲁藏布江缝合带南北有明显区别,在青藏腹地的北部(柴达木—东昆仑地体)及中南部(巴颜喀喇—羌塘—冈底斯)也有不同,青藏腹地中南部的上地幔剪切波各向异性的方向自西往东由近 EW NE NNE 方向转换;沿地体边界及断裂有时出现与之平行的上地幔剪切波各向异性的方向。

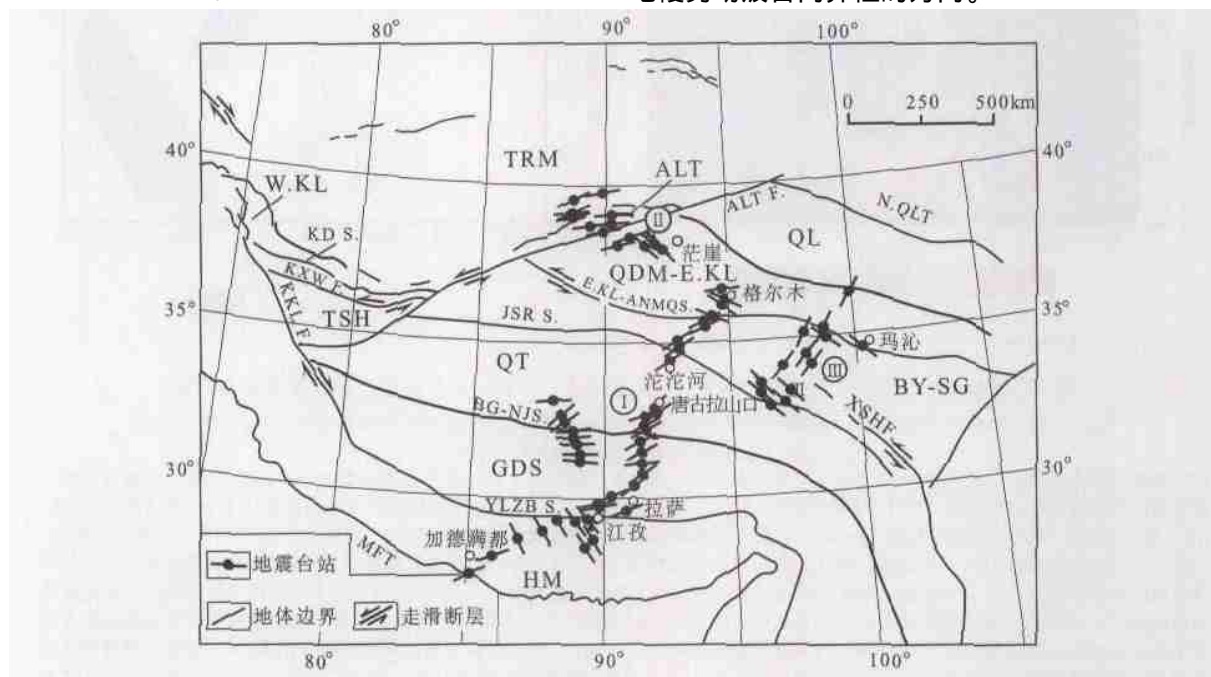


图 5 青藏高原剪切波各向异性图^[43]

Fig. 5 Shear-wave anisotropy of the Qinghai-Tibet Plateau

I: 格尔木—唐古拉—嘎拉剖面; II: 乌图美仁—若羌剖面; III: 共和—玉树剖面。QL: 祁连地体; QDM-E. KL: 柴达木—东昆仑地体; BY-SG: 巴颜喀喇—松潘甘孜地体; QT: 羌塘地体; TSH: 甜水海地体; TRM: 塔里木地体; GDS: 冈底斯地体; HM: 喜马拉雅地体; W. KL: 西昆仑地体; E. KL-ANMQ S.: 东昆仑—阿尼玛卿缝合带; JSR S.: 金沙江缝合带; BG-NJS.: 班公湖—怒江缝合带; YLZB S.: 雅鲁藏布江缝合带; MFT: 主前缘逆冲断裂; KXW F.: 康西瓦断裂; KKL F.: 喀喇昆仑断裂。表示地震波各向异性的黑短线方向代表剪切波快速波方向,黑短线中心的黑点为快速波与慢速波的时间延迟,表示各向异性强度

2 青藏高原的地幔结构

地震波低速异常体、垂向低速异常带及高速异常带是青藏高原下 400 km 深度范围内的最重要的地幔层析图像,对这些图像进行综合地质解释是研究青藏高原地幔结构的初步尝试。

2.1 深部地震波低速异常体及地幔羽

位于青藏高原腹地(东昆仑地体、巴颜喀喇地体及羌塘地体)400 km 深度范围内,存在宽度 600 km、厚度大于 300 km 的巨型地震波低速异常体(图 3-A),许志琴等曾认为该大型低速异常体为一地幔底辟,与可可西里新生代高钾质火山喷发^[48,49]有成因联系^[32,41]。现根据地震层析新资料,又可以圈出一个相当规模的深部三维地幔低速异常体,大致相当 P. Molnar (1988)^[50]的 Sn 波的缺失区的位置,推测其是由低速高热物质组成,往南有一条低速高热的通道与可可西里火山岩区相连(图 6)。

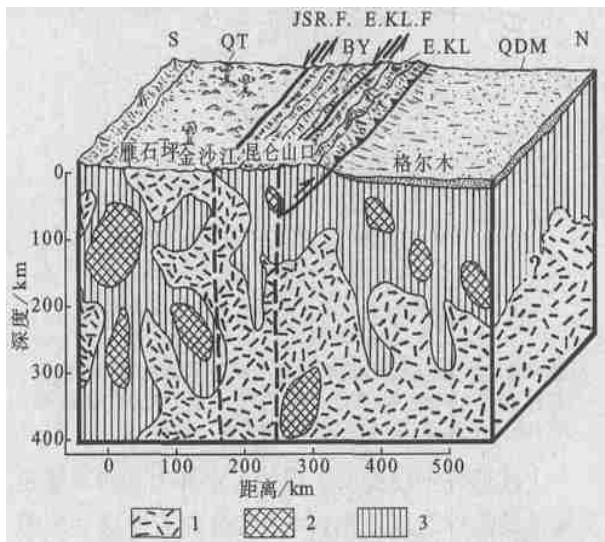


图 6 青藏高原腹地深部地幔羽的立体图示

Fig. 6 Block diagram of the mantle plume

in the deep interior of the Qinghai-Tibet Plateau

1—地震波低速异常;2—地震波高速异常;3—地震波中速域;
QDM—柴达木盆地;E. K. L.—东昆仑地体;BY—巴颜喀喇地体;
QT—羌塘地体;E. K. L. F.—东昆仑断裂;JSR. F.—金沙江断裂

高分辨的全球地震层析结果已经揭示了由高热低速异常体组成的超地幔羽可以在核幔边界存在,并从核幔边界往上横跨上、下地幔之间的不连续面(660 km 深处)到达浅部地幔中的其它边界,形成小的地幔羽^[51],或者抵达地壳上部,形成一系列热点^[52],如冰岛、东非、卡那利群岛和黄石公园等之下的热点。热点往往是一些孤立的火山中心,推测其

下面有悬浮着的地幔羽状物,热点的膨胀区紧紧夹住悬浮流,热流量由地幔羽传导。世界上最典型的超地幔羽是东非超地幔羽,东非超地幔羽是由低的剪切波速异常体组成的,位于核幔边界。东非超地幔羽的热上涌往上部向东和北东方向偏移,并与东非大裂谷地表的碱性火山岩相连,这种偏移被解释为冈瓦纳大陆的分裂致使非洲板块向北东迁移的结果^[53~55]。由此可见,超地幔羽—地幔羽状物—热点是高热低速异常从地球深部到浅部的反映。

青藏腹地的地震波低速异常体位于 100~400 km 深度范围,因此我们可以把它看作为浅部的地幔羽状物,地幔羽的热上涌往上向南偏移,导致可可西里高钾火山岩的喷发,其原因尚待探讨。

2.2 地幔剪切带

横穿青藏高原的 4 条地震层析剖面揭示了若干条延至地幔深部的垂向地震波低速异常带,它们大多位于地体边界,表明地幔剪切带(或超岩石圈)的特征(图 3,图 4)。

2.2.1 青藏高原北缘的地幔剪切带

阿尔金断裂带位于青藏高原北缘,其主体为 NEE-SWW 向,全长 1 800 km,自西藏北部的郭扎错、拉竹龙,经新疆硝尔库勒、阿羌、吐拉、索尔库里、老阿克赛县城至甘肃玉门的宽滩山,地表宽度 6~15 km。研究表明阿尔金主断裂为韧-脆性走滑剪切带,形成于印支期^[23],经历多期活动,是一条至今仍在活动的走滑断裂,沿阿尔金主断裂走滑位移达 400 km^[56]。阿尔金断裂带的基本构造样式表现为:以走滑断裂为中心的两侧反向逆冲断裂系、北西侧的阿尔金逆冲断裂及其后部发育的同倾向正断层^[23]。乌图美仁—茫崖—若羌天然地震探测剖面(图 4-A₁,图 4-B₁)揭示了阿尔金主断层的深部存在一宽度为 60~80 km、延伸超过 400 km 的低速异常带,是一条近直立的超岩石圈—地幔剪切带^[56]。低速异常带由低速度、低密度的高热物质组成,推测与大规模韧性剪切产生局部熔融有关。代表上地幔物质剪切流动矢量的 SKS 波各向异性强度大,各向异性方向与断裂带一致,也反映了该断裂带在上地幔深部发生了剪切位移。

2.2.2 青藏高原腹地的地幔剪切带

近 EW 向的金沙江断裂西段位于青藏高原腹地巴颜喀喇—松潘甘孜地体与羌塘地体之间,共和—玉树地震层析剖面(图 4-A₂)和格尔木—嘎拉地震层析剖面(图 3-A)均通过该断裂。金沙江断裂在地表

由糜棱岩带组成,具左行走滑特征,形成时代为印支期,后经多期活动,也是一条现代活动断裂^[19]。格尔木—嘎拉地震层析剖面揭示了金沙江断裂由垂向的地震波低速异常带组成,与北面的巴颜喀喇高速体相间,垂向低速异常带抵达 100 km 深度后,插入青藏高原腹地的巨型低速异常体之中,成为与地幔羽沟通的地幔剪切带(图 3)。

2.2.3 青藏高原南部的地幔剪切带

“格尔木—嘎拉”地震层析剖面(图 3-A)揭示了青藏高原南部有 3 条垂向的地震波低速异常带深入地幔之中。位于羌塘地体与冈底斯地体之间的班公湖—怒江走滑断裂叠置在晚侏罗世形成的班公湖—怒江缝合带之上,该断裂的 100 km 以下为一条垂向的地震波低速异常带;位于冈底斯地体内部的嘉黎断裂是一条现代大型右行走滑断裂,在剖面中显示了地壳上部有一小型低速体,从深度 100 km 到 380 km 为垂向低速异常带,后转向北与班公湖—怒江垂向低速异常相连;印度板块与欧亚板块之间的雅鲁藏布江走滑断裂是雅鲁藏布江缝合带基础上发育的,层析图像显示的垂向低速异常带向下延伸超过 400 km。上述 3 条地震波低速异常带都是沿剪切断裂向下延伸至地幔深处,并由高热低速的部分熔融物质组成,表明它们是超岩石圈或地幔剪切带(图 3-B)。

2.3 岩石圈俯冲及拆沉的地震层析证据

以 S. P. Grand (1997)^[52], R. Van der Voo (1999)^[36], R. D. Van der Hilst (1997)^[57], H. Bigwaard 和 W. Sjakman (1998)^[35] 等为首的科学家通过对全球地震层析资料所揭示的地幔中地震波速变化的研究,发现地震资料显示了有的板块可以俯冲到过去不可想像的核幔边界(2 891 km 深),R. D. Van der Hilst 等(1997)^[57]利用体波分辨下地幔中的高速板片构造,发现它们中的大部分可往上一直到达地球表面板块汇聚的俯冲带位置,往下可追踪到核幔边界,提供了从地表俯冲带经地幔一直到核幔边界的由高速体组成的超深俯冲的影像。

横穿北美洲南部的地幔层析剖面^[52]揭示了由高速异常体组成的太平洋法拉隆大洋岩石圈板片从北美洲南部海沟表面插到下地幔;通过西喜马拉雅构造结的地幔层析剖面^[34,35](图 7)揭示了印度岩石圈板片以高速异常体的形式从地表往北下插,向下变成直立,最后在深部又往南翻转(over-roll)的几何形态,一直俯冲至 800~1 000 km 的地幔深度;中

喜马拉雅的地幔层析剖面揭示了印度岩石圈向北俯冲的板片延伸至 500 km 深度,在其下侧存在两个孤立的高速异常体,分别代表 25 Ma 和 45 Ma 之前俯冲和拆沉的印度次大陆的岩石圈残片^[58];穿西伯利亚的地幔层析剖面^[35]揭示了蒙古—鄂霍茨克—科里亚克高速异常带(M)及其东部的西太平洋高速异常带(P)达到 2 300 km 深度,不仅提供了现代太平洋板块同样往西垂直俯冲到核幔边界的地球物理证据,而且揭示了西伯利亚板块与蒙古—北中国板块碰撞所保存的蒙古—鄂霍茨克侏罗纪古大洋岩石圈深俯冲和“拆沉”的历史记录。

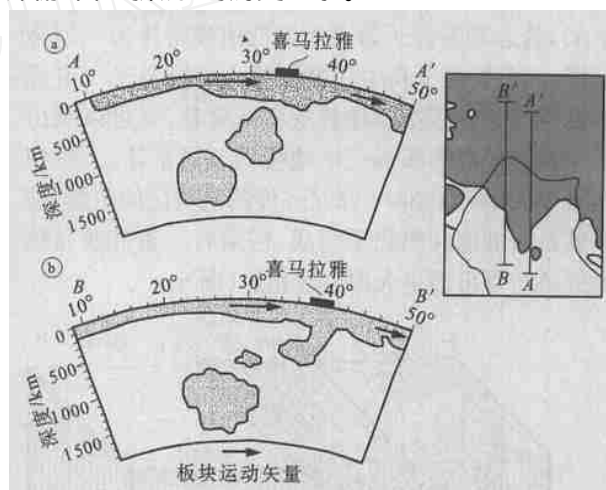


图 7 通过西喜马拉雅和中喜马拉雅地幔地震层析示意剖面^[58]

Fig. 7 Schematic seismic tomographic cross sections across the West and Central Himalayas^[58]

a 据中喜马拉雅地幔地震层析示意剖面^[35]表示的俯冲在中喜马拉雅下的岩石圈位置; b 据西喜马拉雅地幔地震层析示意剖面^[35]表示的俯冲在西喜马拉雅下的岩石圈位置

上述研究不仅提供了现代大洋和大陆岩石圈超深俯冲的地球物理证据,而且通过大陆板块会聚带的地幔地震层析成果寻找古大洋岩石圈俯冲和“拆沉”的地球物理证据和重塑这一历史过程已成为可能^[59]。

青藏高原格尔木—嘎拉剖面(图 3-B)、乌图美仁—若羌剖面(图 4-B₁)、共和—玉树剖面(图 4-B₂)以及叶城—狮泉河剖面(图 4-B₃)中位于加里东、古特提斯、中特提斯及新特提斯缝合带下部的高速异常带为我们提供了 400 km 深度范围内大洋/大陆岩石圈俯冲和“拆沉”的新的地球物理证据;塔里木地块向南陆内俯冲于西昆仑之下的证据也在乌图美仁—若羌剖面(图 4-A₁,图 4-B₁)和叶城—狮泉河剖面(图 4-A₃,图 4-B₃)的层析图像中得到进一步的显示。

我们曾根据阿尔金断裂两侧加里东构造单元特别是柴北缘与南阿尔金超高压变质带的对比以及阿尔金糜棱岩的年代学测定,指出阿尔金左行走滑断裂形成于印支期(240~220 Ma)。由于沿阿尔金断裂分布一系列加里东期蛇绿岩岩块,笔者曾怀疑这些岩块并不一定是印支期阿尔金断裂走滑造成的,可能早在加里东期就存在。乌图美仁—若羌剖面(图4-A₁)中的南阿尔金高速异常带可能代表加里东期沿阿尔金转换带分布的大洋岩石圈俯冲板片拆沉的“化石”残片。在叶城—狮泉河剖面中的库地—康西瓦高速异常带可能代表早期(加里东或印支)大洋岩石圈俯冲板片拆沉的“化石”残片(图4-B₃)。

在中生代早期,羌塘和巴颜喀喇—松潘甘孜地体以及冈底斯地体已成为从冈瓦纳大陆分离的基墨里大陆的组成部分。伴随新特提斯洋在南面的打开,古—中特提斯大洋岩石圈先后消减,羌塘和巴颜喀喇—松潘甘孜地体成为亚洲大陆在晚三叠世末的增生地体,冈底斯地体成为晚侏罗世—早白垩世的增生地体。我们认为高速异常带出现在古、中特提斯缝合带之位置并向北倾斜产出,可能分别代表了古、中特提斯大洋岩石圈板片曾先后往北俯冲的历史记录,在这些断续的高速异常带中出现若干孤立的高速异常体可以解释为岩石圈板片“拆沉”的结果,为俯冲的“化石”残片。

新特提斯大洋的闭合和印度板块与欧亚大陆碰撞事件发生在50~60 Ma前^[33],位于青藏高原南缘的喜马拉雅—印度高速异常带可以认为是印度岩石圈板片插入青藏高原之下的印证。高速异常带的巨厚(300 km)特征是与作为地盾的印度岩石圈的厚度相吻合。印度岩石圈板片往北缓倾,直达雅鲁藏布江以远400 km的唐古拉山之下。喜马拉雅—印度巨型高速异常带是被地幔剪切带切割成若干个直立椭圆形高速异常体,组成了一条断续高速异常带,这种几何学的特征类似于剪切布丁构造,直立椭圆形高速异常体可以相当于在印度岩石圈板片俯冲过程中分离的残片。笔者认为在400 km深度范围的印度岩石圈俯冲板片中不存在新特提斯大洋岩石圈的残片。根据西中喜马拉雅的地幔层析剖面^[34,35](图7),古特提斯大洋岩石圈的残片可能位于800~1000 km深度之下。

乌图美仁—若羌剖面(图4-B₁)和叶城—狮泉河剖面(图4-B₃)还揭示了塔里木地块向南俯冲的高速异常带图像:以60~70°角度向东南俯冲在阿尔金地

体下面大于300 km的深度,向南俯冲在西昆仑地体下面大于400 km的深度。

3 青藏高原碰撞动力学机制的再探讨

在青藏高原形成的碰撞动力学机制问题上一直存在不同的认识:一种认为高原的隆升是整个高原的连续加厚及壳幔之间的广泛性粘性流动的结果,或者是印度板块以低角度往北大规模俯冲于青藏高原之下,形成双层地壳,尔后由于重力均衡造成高原隆升^[60,61],藤吉文等(1999)^[62]根据地震面波三维速度结构,深部地震探测资料(宽角反射、折射与近垂直反射)和天然地震资料的研究进一步提出“双层楔板”的模式。另一种认为印度板块岩石圈以高角度往北深深俯冲于青藏高原之下^[63~65];Tapponnier等人(1977)^[16]用印度板块楔往北俯冲造成欧亚大陆向东挤出,来解释印度和欧亚板块碰撞所形成的陆内变形远程效应。某些学者还提出青藏高原的高度是由于地幔的“拆沉”作用^[66]或软流圈中的对流作用^[50]造成的。最近 Tapponnier 等又提出高原隆升与会聚拼合的岩石圈地体之间的剪切作用有关,提出印度和亚洲大陆碰撞以来斜向右旋隆升和增生的机制使青藏高原向东和北东方向不对称增生,它类似于具走滑分量的加厚地壳的板块构造^[33]。

3.1 青藏高原碰撞动力学机制的新模型

在讨论青藏高原碰撞动力学机制时,有必要明确以下几个关键问题:

3.1.1 关于印度岩石圈板片俯冲样式和俯冲深度

印度岩石圈板块究竟往北俯冲多远?以何种样式俯冲?这些是印度—欧亚板块碰撞及青藏高原隆升的重要制约因素。长期以来各种推测和讨论都是依据岩石圈尺度所获得的地球物理资料,并且对俯冲的倾角仍有缓倾和陡倾两种观点。横越西喜马拉雅的地震层析剖面(图7)揭示了印度岩石圈板块呈翻卷几何学的样式往北超深俯冲于青藏高原之下800 km深度,但是印度岩石圈板片的前缘在何处,俯冲有多远并不清楚。本研究表明,印度岩石圈板块的喜马拉雅—印度断续高速异常带以极缓的倾角俯冲至雅鲁藏布江缝合带以北400 km之远的唐古拉山下面200 km深处,比曾融生等(1998)和Kosarev等(1999)认为印度板块前缘到达班公湖—怒江缝合带^[67,68]还要远。

在格尔木—嘎拉剖面中,由高速异常体组成的

印度岩石圈板片被若干垂向低速异常带所分割, 构成以孤立的高速异常体为特征的不连续岩石圈板片, 在印度岩石圈板片的上部还存在向北缓倾的不规则的顶面起伏的低速异常层, 似乎把垂向低速异常带连接起来。我们对上述复杂的速度图像试作如下讨论: (1) 不连续高速异常体可能反映了被分割的印度岩石圈板片, 而不是拆沉的证据。根据西—中喜马拉雅的地震层析剖面的解释, 新特提斯大洋岩石圈的“化石”残片已掉入 500 km 以下直至 1 800 km 深的地幔中^[34, 35] (图 7)。(2) 垂向低速异常带位于雅鲁藏布江、嘉黎和班公湖—怒江断裂带的下部, 可以解释为地幔剪切带。(3) 印度岩石圈板片以上由低速异常层组成的近水平的地壳熔融层可能也与来自地幔剪切带深部的上升熔融柱有成因联系, 高热低速物质通过地幔剪切带聚集在欧亚板块与印度岩石圈板片之间。(4) 印度岩石圈板片的超深俯冲作用可以解释高喜马拉雅变质地体经历超高压变质作用、形成含柯石英的超高压变质带^[69~71]的事实。

3.1.2 青藏高原北部周缘克拉通的陆内俯冲新证据

笔者曾认为, 青藏高原北部周缘克拉通向南的陆内俯冲作用使祁连山—阿尔金山—西昆仑山崛起以及地壳的强烈缩短^[41]。但是河西走廊—北祁连地震反射剖面^[72]和格尔木—额济纳旗地学断面^[73, 74]虽然揭示了阿拉善地块向南插入祁连山下的现象, 但是, 显示的俯冲深度很浅 (30 km)。横穿西昆仑—塔里木结合带的深地震反射剖面^[75]显示了塔里木岩石圈下部南倾及西昆仑山下部北倾的强反射结构同时存在的特征, 高锐等^[75]认为西昆仑山下部北倾的强反射结构可延伸到 100 km 深度, 代表了在青藏高原西南缘的印度岩石圈俯冲板片; 而本文中所引用的叶城—狮泉河天然地震层析剖面揭示了西昆仑及其两侧在更深尺度 (400 km) 范围的地幔结构, 在该剖面中清晰地显示了南塔里木高速异常带为塔里木岩石圈向南陆内俯冲于西昆仑山之下 400 km 的“化石”残片。笔者还认为在乌图美仁—若羌剖面中, 东塔里木高速异常带可能代表了塔里木地块岩石圈向南东陆内俯冲的“化石”残片, 而不是 Wittlinger 等 (1998) 所认为的位于楔形阿尔金高速异常体下部的岩石圈板片^[39]; 因为无论大洋还是大陆岩石圈俯冲板片一般都由高速异常体组成^[34, 35, 52, 57]。

3.1.3 岩石圈—地幔剪切带与“右旋隆升”的新机制

根据青藏高原大型走滑断裂研究已提出青藏高

原“右旋隆升”的新机制^[33], 新的地震层析资料表明青藏高原新生代活动的主要走滑断裂大部分为超岩石圈或地幔剪切带, 因此可以认为高原“右旋隆升”的机制发生在超岩石圈—地幔的范围。笔者认为在青藏高原腹地的上地幔剪切波各向异性方向自西往东从 EW - NE - SE - NNE - SSW 的转化是与“右旋隆升”的观点相吻合的。

3.1.4 青藏高原腹地深部的热结构及伸展体制

位于青藏高原腹地 100 km 深度以下的巨型地幔羽与可可西里火山作用有成因联系, 表明青藏高原腹地深部具有热结构, 青藏高原南缘的陆内超深俯冲与北缘的陆内浅俯冲对高原产生南北向挤压及东西向拉伸, 深部挤压环境导致物质熔融和地幔羽的形成, 以及物质在地幔中的向东运动, 浅部东西向拉伸环境造成南北向裂谷及腹地的火山喷发。

Xu Zhiqin (1999)^[41]曾提出青藏高原隆升的“周缘陆内俯冲及内部地幔地辟”的碰撞动力学机制模型。在此基础上, 根据新的地震层析资料及地震反射资料, 提出了新的模式 (图 8), 新模式可归结为: “青藏高原南部印度岩石圈板片的陆内超深俯冲, 北缘克拉通的陆内深俯冲, 腹地深地幔羽构造, 超岩石圈范围的‘右旋隆升’及物质向东挤出。”

4 结论和讨论

长期以来, 由于青藏高原深部结构只限于岩石圈范围内讨论, 因此对青藏高原碰撞动力学的深部背景的认识受到很大制约。通过横穿青藏高原的 4 条天然地震层析剖面的横波分裂、三维走时及转换波的资料处理, 提供了地震各向异性、地震速度层及 400 km 深度以上的速度图像, 揭示了青藏高原地幔结构及物理性质, 归结如下:

(1) 青藏高原各地体的厚度及地壳平均地震波速度特征反映了各地体的物质组成及结构差异, 表明地体拼合的特征。

(2) 400 km 深度范围内的速度图像揭示了青藏高原腹地深部以大型低速异常体为特征的地幔羽的存在, 以及通过热通道与可可西里地表大面积分布的新生代碱性火山作用有成因联系。

(3) 伸入 300 km 以下的 5 条垂向低速异常代表高原内部大型超岩石圈—地幔剪切带, 伴随局部熔

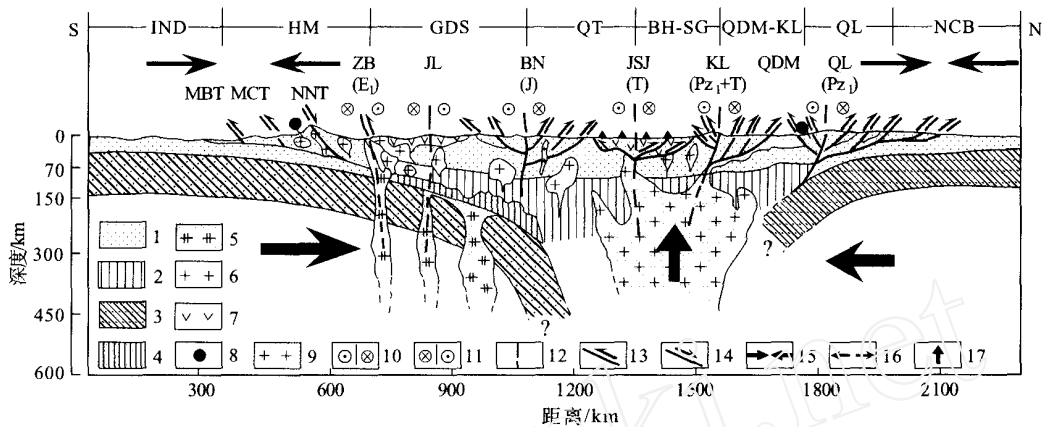


图8 青藏高原隆升的碰撞动力学模式

Fig.8 Collision dynamic model for the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau

1—大陆地壳;2—青藏高原岩石圈地幔;3—俯冲大陆的岩石圈地幔;4—翻转的印度俯冲板片在上部的局部熔融层;5—翻转的印度俯冲板片在深部的局部熔融;6—花岗岩;7—火山岩;8—超高压变质柯石英;9—地幔羽;10—左行走滑断裂;11—右行走滑断裂;12—地幔剪切带;13—逆冲断裂;14—正断裂;15—挤压作用;16—拉张作用;17—上升作用

融及高热物质的组成。青藏高原的“右旋上隆”的机制发生在超岩石圈-地幔的范围内。

(4) 青藏高原内部的南阿尔金、库地—康西瓦、东昆仑—金沙江和班公湖—怒江高速异常带分别代表了地体拼合的地质历史过程中保留的加里东、古特提斯和中特提斯大洋岩石圈“化石”残片,显示了岩石圈俯冲极性及其“拆沉”特征。

(5) 巨厚的印度岩石圈板片往北缓倾延伸,直达雅鲁藏布江以北400 km的唐古拉山之下。

(6) 进一步揭示了青藏高原北部周缘克拉通向南陆内俯冲的特征。

(7) 提出青藏高原隆升的新模式为:“青藏高原南部印度岩石圈板片的陆内超深俯冲,北缘克拉通的陆内深俯冲,腹地深地幔羽构造,超岩石圈范围的“右旋隆升”及物质向东挤出。”

本研究是在中法青藏高原地质-地球物理第二轮合作(1994—2001)基础上进行的,曾得到国土资源部(原地质矿产部)重点基础项目“东昆仑造山带的构造演化”,“祁连山-阿尔金山地质演化及岩石圈剪切作用”[编号9501106],国土资源部科技专项“青藏高原演化与资源”的课题“地体边界和岩石圈断裂对青藏高原形成的贡献”[编号2001010201]及国家自然科学基金重点项目“祁连造山带的组成及造山过程”[编号49732070]的支持。成文过程中与杨文采、高锐研究员、曾令森博士及加拿大达霍西大学 Robinson P. 教授进行了有益的讨论。

References[参考文献]:

- [1] XIAO Xuchang, CHEN Guoming, ZHU Zhizhi. Geological and tectonic significance for the Paleozoic of the Qilian mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1978(4): 281-295 (in Chinese). [肖序常, 陈国铭, 朱志直. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义[J]. 地质学报, 1978(4): 281-295.]
- [2] ZUO Guochao, LIU Jichen. Early-Paleozoic tectonic evolution of the North Qilian[J]. *Geologica Science*, 1987(1): 14-24 (in Chinese). [左国朝, 刘寄陈. 北祁连早古生代大地构造演化[J]. 地质科学, 1987(1): 14-24.]
- [3] XU Zhiqin, ZHANG Jianxi, LI Haibing. Architecture and orogeny of the Northern Qinling Orogenic Belt, Northwestern China[J]. *Journal of the Geological Society of China*, 2000, 43(1): 125-141.
- [4] LIU Liang, CHE Zicheng, WANG Yan. Features of the Altun high-pressure metamorphic belt and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15: 57-64 (in Chinese). [刘良, 车自成, 王焰. 阿尔金高压变质带的特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 1999, 15: 57-64.]
- [5] PAN Yusheng. Tectonic characteristics and evolution of the West Kunlun mountains[J]. *Geologica Sinica*, 1990, 25(3): 224-232 (in Chinese). [潘裕生. 西昆仑山构造特征与演化[J]. 地质科学, 1990, 25(3): 224-232.]
- [6] DING Daogui, WANG Daoxuan, LIU Weixin, et al. *The West Kunlun Orogenic Belt and Basin* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 1-230 (in Chinese). [丁道桂, 王道轩, 刘伟新, 等. 西昆仑造山带与盆地[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1-230.]
- [7] MATTE P H, TAPPONNIER P, ARNAUD N B, et al. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 142: 311-330.
- [8] XIAO Xuchang, LI Tingdong. *Tectonic Evolution and Uplift of Qing-*

- hai-Tibet Plateau[M]. Guangzhou: Guangzhou Science and Technology Press, 2000. 1-313 (in Chinese). [肖序常, 李廷栋. 青藏高原的构造演化与升降机制[M]. 广州: 广东科技出版社, 2000. 1-313.]
- [9] ZHANG Qi, ZHOU Guoqing. *Ophiolites of China*[M]. Beijing: Scientific Press, 2001. 1-182 (in Chinese). [张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩[M]. 科学出版社, 2001. 1-182.]
- [10] JIANG Chunfa, YANG Jingsui, FENG Bingui, et al. *Opening-Closing Tectonics of Kunlun Mountains*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992. 1-224 (in Chinese). [姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 昆仑开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992. 1-224.]
- [11] XU Zhiqin, HOU Liwei, WANG Zongxiu. *Orogenic Processes of the Songpan-Ganze Orogenic Belt of China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992. 1-190 (in Chinese). [许志琴, 侯立玮, 王宗秀. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992. 1-190.]
- [12] YANG J S, ROBINSON P T, JIANG C F, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 1996, 258: 215-231.
- [13] ZHONG Dalai, WU Genyao, JI Jianqing. Discovery of the ophiolites at Southeastern Yunnan [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43: 1365-1370 (in Chinese). [钟大赉, 吴根耀, 季建清. 滇东南发现蛇绿岩[J]. 科学通报, 1998, 43: 1365-1370.]
- [14] NICOLAS A, GIRARDEAU J, DUPRE B, et al. The Xigaze ophiolite (Tibet): A peculiar oceanic lithosphere [J]. *Nature*, 1981, 294: 414-417.
- [15] WANG Xibin, BAO Peisheng, CHEN Keqiao. Ophiolites of Tibet [J]. *Regional Geology of China*, 1987 (3): 248-256 (in Chinese). [王希斌, 鲍佩声, 陈克樵. 西藏蛇绿岩[J]. 中国区域地质, 1987 (3): 248-256.]
- [16] TAPPONNIER P, MOLNAR P. Active faulting and tectonics in China [J]. *J Geophys Res*, 1977, 82: 930-1095.
- [17] PELTZER G, TAPPONNIER P. Formation and evolution of strike slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: An experimental approach [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93 (12): 1508-15117.
- [18] AVOUAC J P, TAPPONNIER P. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 895-898.
- [19] XU Zhiqin, YANG Jingsui, XU Qiang, et al. Mesozoic crustal evolution and dynamics of the east Kunlun-Taggula composite mountain chains [A]. *Proc 30th Int 'l, Geol Congr* [C], 1997, 7: 7-20.
- [20] XU Zhiqin, ZHANG Jianxin, XU Huifen, et al. *Ductile Shear Zones of Main Continental Mountain Chains of China and Their Dynamics* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. 1-294 (in Chinese). [许志琴, 张建新, 徐惠芬, 等. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 1-294.]
- [21] XU Zhiqin, QI Xuxiang, LIU Fulai, et al. The Kangxiar Caledonian khondalite series in West Kunlun, China, and its geological significances [J]. *International Geological Review*, 2004 (in press).
- [22] XU Zhiqin, LI Haibing, CHEN Wen, et al. A large ductile sinistral strike-slip shear zone and its movement timing in the South Qilian Mountains, Western China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76 (2): 183-194.
- [23] CUI Junwen, TANG Zheming, DENG Jinfu, et al. *Altyn Tagh Fault System* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 1-249 (in Chinese). [崔军文, 唐哲民, 邓晋福, 等. 阿尔金断裂系[M]. 北京: 地质出版社, 1999. 1-249.]
- [24] LI Haibing, YANG Jingsui, XU Zhiqin, et al. Geological and geochronology evidences of Indosinian strike-slipping for the Altyn Tagh Fault [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46 (16): 1333-1338 (in Chinese). [李海兵, 杨经绥, 许志琴, 等. 阿尔金断裂带印支期走滑活动的地质及年代学证据[J]. 科学通报, 2001, 46 (16): 1333-1338.]
- [25] XU Zhiqin, LI Haibing, YANG Jingsui, et al. A large transpression zone at the south margin of the East Kunlun Mountains and oblique subduction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75 (2): 156-164 (in Chinese). [许志琴, 李海兵, 杨经绥, 等. 东昆仑山南缘大型转换挤压构造带和斜向俯冲作用[J]. 地质学报, 2001, 75 (2): 156-164.]
- [26] SEARLE M P. *Geology and Tectonics of the Karakoram Mountains* [M]. Chichester: J. Wiley & sons, 1991. 1-358.
- [27] MURPHY M A, AN Yin, KAPP P, et al. Southward propagation of the Karakoram fault system, southwest Tibet: Timing and magnitude of slip [J]. *Geology*, 2000, 28: 451-454.
- [28] ROGER F. *Datons et Tracage des Granitoides Associes a la Chaîne de Songpan Garze (West Sichuan, China) Par les Methods U/ Pb, Rb/ Sr et Sm/ Nd* [D]. These de doctorat, Montpellier II, 1994. 1-200.
- [29] TAPPONNIER P. The Ailao Shan/ Red River metamorphic belt: Tertiary left lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 1990, 343: 431-437.
- [30] XU Zhiqin. Large shear zones in the main orogenic belts, China [J]. *Episodes*, 1995, 18: 41-43.
- [31] TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 1982, 10: 611-616.
- [32] TAPPONNIER P, XU Zhiqin, ROGER F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. *Sciences*, 2001, 294: 1671-1677.
- [33] ARGAND E. La tectonique de l'Asie [A]. *C R Cong Geol Int* [C]. Liege, XIII Sess., Fasc. 1, 1922. 171-372.
- [34] MOLNAR R, TAPPONNIER P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision [J]. *Science*, 1975, 189: 419-426.
- [35] BIGWAARD H, SJAKMAN W. Closing the gap between regional and global travel tomography [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 30055-30078.
- [36] van der VOO R, SPAKMAN W, BIJWAAD H. Mesozoic subducted slabs under Siberia [J]. *Nature*, 1999, 397: 246-249.
- [37] WILTLINGER G, MASSON F, POUPINET G, et al. Seismic tomography of northern Tibet and Kunlun: Evidence for crustal blocks and mantle velocity contrasts [J]. *EPSL*, 1996, 139: 263-279.

- [38] XUE Guangqi, JIANG Mei, SU Heping, et al. Tomographic study on the tectonics in the depth of Yecheng-Shiquanhe of Tibetan Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34 (4): 329-334 (in Chinese). [薛光琦, 姜枚, 宿和平, 等. 利用层析成像研究青藏高原叶城—狮泉河地区深部构造[J]. 中国科学(D), 2004, 34 (4): 329-334.]
- [39] WILTLINGER G, TAPPONNIER P, POUPINET G, et al. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altun fault [J]. *Science*, 1998, 282: 74-76.
- [40] XU Zhiqin, JIANG Mei, YANG Jingsui. Tectonophysical process at depth for the uplift of the northern part of the Qinghai-Tibet plateau: Illustrated by the geological and geophysical comprehensive profile from Golmud to the Tanggula mountains, Qinghai Province, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 70 (3): 195-206 (in Chinese). [许志琴, 姜枚, 杨经绥. 青藏高原北部隆升的深部构造物理作用: 格尔木—唐古拉山地质与地球物理综合剖面的解析[J]. 地质学报, 1996, 70 (3): 195-206.]
- [41] XU Z Q, JIANG M, YANG J S. Mantle diapir inward intracontinental subduction: A discuss on the mechanism of uplift of the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Geological Society of America, Special Paper*, 1999, 328: 19-31.
- [42] XUE Guangqi, QIAN Hui, JIANG Mei, et al. Studies on the velocity structure of crust-upper mantle beneath Northeast Qinghai, China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2003, 24 (1): 19-26 (in Chinese). [薛光琦, 钱辉, 姜枚, 等. 青海东北部天然地震探测与岩石圈深部特征[J]. 地球学报, 2003, 24 (1): 19-26.]
- [43] JIANG Mei, L F Qingtian, SHI Danian, et al. The study on the structure of crust and upper mantle with natural earthquakes in central Tibetan Plateau [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1996, 39 (4): 470-481 (in Chinese). [姜枚, 吕庆田, 史大年, 等. 用天然地震探测青藏高原中部地壳、上地幔结构[J]. 地球物理学报, 1996, 39 (4): 470-481.]
- [44] JIANG Mei, XU Zhiqin, HIRN A, et al. Teleseismic anisotropy and corresponding features of upper mantle in Tibet Plateau and its Neighboring areas [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22 (2): 111-116 (in Chinese). [姜枚, 许志琴, HIRN A, 等. 青藏高原及其部分邻区地震各向异性和上地幔特征[J]. 地球学报, 2001, 22 (2): 111-116.]
- [45] HIRN A, JIANG M, SAPIN M, DIAZ J, et al. Seismic anisotropy as an indicator of mantle flow beneath the Himalayas and Tibet [J]. *Nature*, 1995, 375: 571-574.
- [46] DONG Yingjun, XUE Guangqi, MA Kaiyi. Studies on share wave anisotropy beneath Altyn-fault system and its adjacent area [J]. *Progress in Geophysics*, 1999, 14 (4): 58-63 (in Chinese). [董英君, 薛光琦, 马开义. 阿尔金断裂带各向异性研究[J]. 地球物理学报, 1999, 14 (4): 58-63.]
- [47] JIANG M, QIAN H, SU H P. Teleseismic anisotropy and its features in the upper mantle beneath the Tibet plateau and neighboring areas [J]. *Metallogenic implications Global Tectonics and Metallogeny*, 2003, 8 (1-4): 1-2.
- [48] DENG Wanming. The Quaternary volcanic petrology and geochemistry in the Northern Tibet-A preliminary study [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1978, 2: 148-162.
- [49] DENG Wanming. Cenozoic volcanism and intraplate subduction in northern margin of the Tibet plateau [J]. *Journal of Geochemistry*, 1991, 10: 140-152.
- [50] MOLNAR P. A review of geophysical constraints on the deep structure of the Tibetan Plateau, the Himalaya and the Karakoram, and their tectonic implications [J]. *Phil Trans R Soc Lond*, 1988, A326: 33-88.
- [51] CONDIE K C. What is a superplume [A]? *Superplume International Workshop Abstract* [C]. Tokyo, Japan, Jan. 28-31. 2002. 20-21.
- [52] GRAND S P, van der HILST R D, WIDIYANTORO S, et al. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth [J]. *Geol Soc Am Today*, 1997, 7 (4): 1-7.
- [53] RITSEMA J H J, HEIJST V, WOODHOUSE J H. Complex shear velocity structure beneath African and Iceland [J]. *Science*, 1999, 286: 1925-1928.
- [54] RITSEMA J, NI S, HELMBERGER D V, et al. Evidence for strong shear velocity reductions and velocity gradients in the lower mantle beneath Africa [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25: 4245-4248.
- [55] RITSEMA J. Structure of the African superplume [A]. *Superplume International Workshop Abstract* [C]. Tokyo, Japan, Jan. 28-31. 2002. 37-39.
- [56] XU Zhiqin, YANG Jingsui, ZHANG Jianxin, et al. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73 (3): 193-205 (in Chinese). [许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J]. 地质学报, 1999, 73 (3): 193-205.]
- [57] van der HILST R D, WIDIYANTORO S, ENGDAHL E R. Evidence for deep mantle circulation from global tomography [J]. *Nature*, 1997, 386: 578-584.
- [58] CHEMENDA A I, BURG J P, MATTAUER M. Evolutionary model of the Himalaya-Tibet system: Geopoe based on new modeling [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 174: 397-409.
- [59] XU Zhiqin, ZHAO Zhixing, YANG Jingsui, et al. Tectonics beneath plates and mantle dynamics [J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22 (3): 149-159 (in Chinese). [许志琴, 赵志兴, 杨经绥, 等. 板块下的构造及地幔动力学[J]. 地质通报, 2003, 22 (3): 149-159.]
- [60] POWELL C Mc A, CONAGHAN P J. Plate tectonics and the Himalayas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 20: 1-12.
- [61] BEGNOUL N, BARAZANGI M, ISACKS B L. Lithospheric structure of Tibet and western north America: mechanisms of uplift and a comparative study [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 1997-2016.
- [62] TENG J W, ZHANG Z J, WANG G J, et al. A new model for deep-seated dynamics and continent-continent collision of Himalaya orogenic belt [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42 (4): 481-493 (in Chinese). [滕吉文, 张中杰, 王光杰, 等. 喜马拉雅

- 碰撞造山带的深层动力学过程与陆-陆碰撞新模型[J]. 地球物理学报, 1999, 42 (4): 481-493.]
- [63] COWARD M P, BUTLER R W H. Thrust tectonics and the deep structure of the Pakistan Himalaya [J]. *Geology*, 1985, 13: 417-420.
- [64] COWARD M P, BUTLER R W H, CHAMBERS A F, et al. Folding and imbrication of the Indian crust during Himalayan collision[J]. *Phil Trans R Soc Lond*, 1988, A326: 89-116.
- [65] MATTAUER M. Intracontinental subduction, crust mantle decollement and crustal stacking wedge in the Himalaya and other collision belts [J]. *Spec Publ J Geol Soc London*, 1986, 19: 37-50.
- [66] ZHAO W L, MOEGAN W J. Uplift of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 1985(4): 359-369.
- [67] CENG R S, DING Z F, WU Q J. Crustal Structures of Himalaya-Qilianshan and continent-continent collision process[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1998, 41 (1): 49-60 (in Chinese). [曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 喜马拉雅—祁连山地壳构造与大陆-大陆碰撞过程[J]. 地球物理学报, 1998, 41 (1): 49-60.]
- [68] KOSAREV G, KIND R, SOBOLOV S V, et al. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet [J]. *Science*, 1999, 283: 1306-1309.
- [69] KANEKO Y, YAMAMOTO H, KATA YAMA I, et al. Coesite inclusions and prograde compositional zonation of zircons in Himalayan gneisses, NW Himalaya, Pakistan: Evidence from SHRIMP-dating of coesite-bearing zircon [A]. *Abstract of UHPM Workshop. Fluid/Slab/ Mantle Interactions and Ultrahigh P Minerals* [C]. Tokyo: Waseda University, 2001. 121-123.
- [70] SACHAN H K, MUKHERJEE B K, OGASAWARA Y, et al. Discovery of Coesite from Indian Him Mantle Interactions and Ultrahigh P Minerals [C]. Tokyo: Waseda University, 2001. 124-128.
- [71] O'BRIEN P J, ZOTV N, LAW R, et al. Coesite in Himalayan eclogite and implications for models of India-Asia collision [J]. *Geology*, 2001, 29: 435-438.
- [72] WU Xuanzhi, WU Chunling, LU Jie. Research on the fine crustal structure of the northern Qilian-Hexi corridor by deep seismic reflection [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1995, 38 (Suppl II): 29-35 (in Chinese). [吴宣志, 吴春玲, 卢杰. 利用深地震反射研究北祁连-河西走廊地壳细结构[J]. 地球物理学报, 1995, 38 (增刊 II): 29-35.]
- [73] GAO Rui, CHENG Xiangzhou, DING Qian. Preliminary geodynamic model of Gblmud-Ejin Qi geoscience transect [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1995, 38 (Suppl II): 3-14 (in Chinese). [高锐, 成湘洲, 丁谦. 格尔木—额济纳旗地学断面地球动力学模型初探[J]. 地球物理学报, 1995, 38 (增刊 II): 3-14.]
- [74] GAO Rui, CHENG Xiangzhou, WU Gongjian. Lithospheric structure and geodynamic model of the Gblmud-Ejin Qi transect in northern Tibet [J]. *Geological Society of America, Special Paper*, 1999, 28: 9-17.
- [75] GAO Rui, XIAO Xuchang, LIU Xun, et al. Detail lithospheric structure of the contact zone of West Kunlun and Tarim revealed by deep seismic reflection profile along the Xinjiang Geotranssect [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22 (6): 547-552 (in Chinese). [高锐, 肖序常, 刘训, 等. 新疆地学断面深地震反射剖面揭示的西昆仑—塔里木结合带岩石圈细结构[J]. 地球学报, 2001, 22 (6): 547-552.]

Mantle structure of Qinghai - Tibet Plateau : Mantle plume , mantle shear zone and delamination of lithospheric slab

XU Zhi-qin¹ , JIANG Mei^{1,2} , YANG Jing-sui¹ , XUE Guang-qi^{1,2} ,
SU He-ping¹ , LI Hai-bing¹ , CUI Jun-wen¹ , WU Cai-lai¹ , LIANG Feng-hua¹

(1. *Key Laboratory of Continental Dynamics , Institute of Geology , CAGS , Beijing 100037 , China ;*

2. *Institute of Mineral Resources , CAGS , Beijing 100037 , China*)

Abstract : By using four seismic tomographic profiles of nearly 8 000 km long across the Qinghai-Tibet Plateau , we obtained the crustal and mantle velocity images and seismic wave anisotropy over the depth down to 400 km , which revealed significant characteristics of the crust and mantle structure in the region. The mantle velocity images indicate the presence of a mantle plume characterized by a large low-velocity anomalous body beneath the interior of the Qinghai-Tibet Plateau ; this feature shows its genetic relationship to the widespread Hol-Xil Cenozoic potassic and alkaline volcanism through a thermal channel. The Altyn Tagh , Kangxiwa , Jinshajiang , Jiali and Yaluzangbu strike-slip faults extend downward to the depth of 300 ~ 400 km , which demonstrate the characteristics of a vertical low-velocity anomalous zone composed of high temperature material and the existence of large-scale translithospheric or mantle shear zones. The discontinuous anomalous high-velocity zones under the Kangxiwa , East Kunlun Jinsha River , Bangong Lake-Nu River and Yaluzangbu sutures are tentatively interpreted as the “fossil” slab remnants of Caledonian , Paleo-Tethyan and Meso-Tethyan oceanic lithosphere preserved during the terrane amalgamation and collision ; they formed several slab remnants separating the anomalous low-velocity zones , and can be the geophysical evidence for “delamination” . The Indian lithospheric slab , which is marked by a gigantic , discontinuous anomalous high-velocity zone , was subducted gently northward to a depth of 300 ~ 400 km beneath the Tanggula Mountains. Based on the new tomographic data across the Himalaya and Tibet plateau , we proposed a new collisional model for the uplift of the Tibet plateau , which involves the “roll over” of the subducted Indian lithospheric slab beneath the south of the Tibetan Plateau , the southward intracontinental subduction of the cratonic lithosphere in the northern margin of the plateau , the upwelling of the deep mantle plume in the interior of the plateau , and the “dextral uplift” of the plateau within the limits of the deep mantle , as well as the motion and the extrusion of material toward the east and the northeast.

Key words : Qinghai-Tibet Plateau ; seismic tomographic profile ; mantle plume ; mantle shear zones ; delamination of lithospheric slab