

# 青藏高原北部新生代火山岩区深部结构 特征及其成因探讨

郑洪伟<sup>1,2</sup>, 李廷栋<sup>3,4</sup>, 高锐<sup>2</sup>, 贺日政<sup>2</sup>

(1. 北京大学地球物理系, 北京 100871; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;  
3. 中国地质科学院, 北京 100037; 4. 国土资源部咨询研究中心, 北京 100035)

**摘要:** 青藏高原北部发育的大量新生代钾质、高钾质火山岩体的成因一直是个谜。利用布置在青藏高原内部及其周围的305个临时宽频地震台站和固定地震台站记录到的9 649个远震事件, 共139 021条P波初至到时资料对青藏高原深部结构特征进行了层析成像反演研究。结果显示, 印度岩石圈地幔俯冲前缘已经到达了羌塘地体中部之下, 在俯冲前缘存在一个从地幔深处延伸至地表的大规模低速体。该低速体可能是由于印度岩石圈地幔前缘俯冲进入软流圈深处而引起地幔热扰动, 造成深部软流圈地幔的热物质向上扩散而形成的深部地幔物质上涌通道; 该通道为青藏高原北部的新生代钾质、高钾质火山岩体的形成提供了条件。因此, 青藏高原北部新生代火山岩可能是印度岩石圈地幔持续北向俯冲的结果。

**关键词:** 青藏高原北部火山岩区; 低速体; 印度岩石圈地幔; 层析成像

中图分类号: P588.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2010)01-0131-09

## Deep Structure beneath the Cenozoic Volcanic Zone in the Northern Qinghai-Tibet Plateau and Its Cause of Formation Discussion

ZHENG Hong-wei<sup>1,2</sup>, LI Ting-dong<sup>3,4</sup>, GAO Rui<sup>2</sup>, HE Ri-Zheng<sup>2</sup>

(1. Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;  
4. Senior Consulting Research Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

**Abstract:** There are a lot of Cenozoic potassic and ultrapotassic lavas in the northern Qinghai-Tibet Plateau, their existing is an enigma. We have collected all the available arrival time data recorded by the temporary seismic stations and phase reports from the International Seismological Center in Tibet and its surrounding areas. In the tomographic inversion, we have used 139,021 P-wave arrival times from 9,649 teleseismic events recorded by 305 seismic stations. Tomographic images show that the frontier of the lithospheric mantle of Indian plate (ILM) subducted beneath the center of Qiangtang terrane, and there is a great scale vertical low-velocity zone from deep to surface at the frontier of ILM. It supplies a channel for deep mantle upwelling. Hot materials of deep asthenospheric mantle might flow upward along the channel, then potassic and ultrapotassic lavas erupted in the northern Tibet. Cenozoic potassic and ultrapotassic lavas in the north Tibet are the direct result of northward subducting of ILM.

**Key words:** volcanic zone in the northern Qinghai-Tibet Plateau; low-velocity plume; Indian lithospheric mantle; tomography

收稿日期: 2009-09-01; 改回日期: 2009-12-10; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40904026, 40774051, 40974060); 国家自然科学基金重点基金项目(40830316); 中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(J0911, J0915); 科技部国际合作项目(2006DFA21340); 中国地质大学(北京)地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室开放课题项目(GDI0901); 中国国家专项项目“深部探测技术实验与集成”(SinoProbe-02)。

作者简介: 郑洪伟, 女, 助理研究员, 1977年出生, 地球物理学专业, 主要从事地震层析成像及青藏高原深部结构与构造研究。Email: zhenghongwei004@sina.com。

### 0 引言

青藏高原是全球海拔最高的高原，而且它还是变形规模最大和形成时代最晚的陆—陆碰撞造山带。在高原形成与演化过程中，记录并保存了陆—陆碰撞过程中发生的丰富地学现象<sup>[1]</sup>。其中具有代表性的是青藏高原北部星罗棋布地分布着的一系列新生代火山(图1)，作为青藏高原岩石圈在特定地质条件下演化的产物，它们被认为是探索新生代以来青藏高原岩石圈物质组成、壳幔相互作用以及青藏高原北部高原隆升机制的重要窗口。

青藏高原快速隆升和向周缘快速生长时期也

是青藏高原北部火山频繁活动的时期<sup>[2]</sup>。青藏高原北部新生代火山岩西起喀喇昆仑，东至可可西里，南北介于玛依岗日—唐古拉山(北羌塘)和昆仑山脉之间，宽约200多公里，主要呈东西走向的带状分布，在青藏高原中部尤为集中，以钠质、钾质和超钾质为主要成分的碱性玄武岩系列、高钾钙碱性系列、钾玄岩系列和过碱性钾质—超钾质系列<sup>[3-10]</sup>。青藏高原北部火山岩活动从古近纪开始一直延续至今，在喷溢时间上总体上呈南老北新，东老西新的特征<sup>[6-10]</sup>。

青藏高原北部新生代火山岩的成因曾有较多研究。钠质火山岩的同位素成分指示其来自原始地幔<sup>[13]</sup>，是板内地幔柱从源区向上注入并快速喷

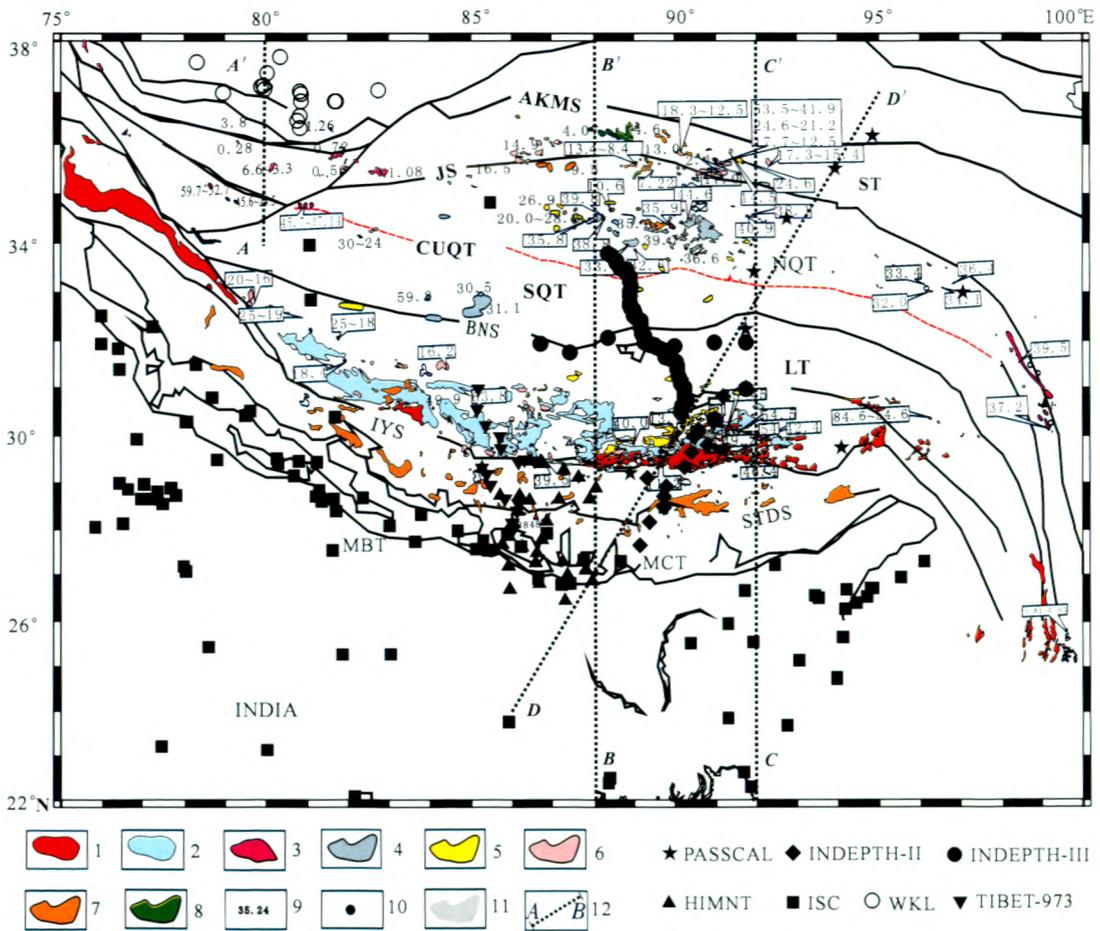


图1 青藏高原地体构造与火山岩、地震台站分布图(据文献[9]和[11]修改)

Fig. 1 Distribution of volcanic rocks, seismic stations within Qinghai-Tibet Plateau and its main tectonic features(after references of [9] and [11])

IYS. 雅鲁藏布江缝合带; BNS. 班公—怒江缝合带; JS. 金沙江缝合带; AKMS. 阿尼玛卿—昆仑—木孜塔格缝合带; MBT. 主边界逆冲断层; MCT. 主中央逆冲断层; STDS. 藏南拆离系; LT. 拉萨地体; QT. 羌塘地体; ST. 松潘—甘孜地体; CUQT. 羌塘中央隆起。1. 与碰撞有关的深成岩; 2. 与碰撞有关的火山岩; 3. 与走滑体制有关的火成岩; 4~8. 与折沉体制有关的火成岩(形成年龄范围: 4. 45~27 Ma; 5. 27~17 Ma; 6. 17~9 Ma; 7. 9~4 Ma; 8. 4~0 Ma); 9. 火成岩同位素年龄; 10. 样品位置; 11. Sn 无效区和低 Pn<sup>[12]</sup>; 12. 剖面位置

发而形成的结果<sup>[14]</sup>。Ding 等<sup>[6]</sup>依据青藏高原火山岩的地球化学元素的地域分区和喷溢年龄特征,认为羌塘西部出露碱性玄武岩是 65 ~ 45 Ma 原始地幔熔融结果,并用大洋板片俯冲到大陆俯冲的转变过程来解释其形成。Guo 等<sup>[10]</sup>认为青藏高原北部钾质、超钾质火山岩的母岩浆来自富集地幔而不是正常的软流圈地幔,且在其生成之前,母岩浆的地幔源区经历了大面积的俯冲沉积物混染或者由部分熔融/俯冲沉积物的大面积熔融交代。邓万明等<sup>[13]</sup>认为,在始新世形成的高钾钙碱性火山岩起源于加厚的下地壳,渐新世喷发的钾玄武岩质火山岩源自壳—幔过渡带或 EM II 型富集地幔的部分熔融,而在渐新世—中新世喷发的超钾质强碱性火山岩则代表了交代富集型地幔部分熔融过程,是陆块强烈挤压、碰撞和陆内俯冲作用的产物。还有学者认为,青藏高原北部钾质、超钾质火山岩的原始岩浆起源于由软流圈流体和俯冲岩石圈地幔释放的流体交代混合的古俯冲地幔楔<sup>[15]</sup>。Williams 等<sup>[7]</sup>认为源区位于大陆岩石圈地幔底部,是相对原始地幔的金云母橄榄岩 3% ~ 4% 成分熔融结果,是来自岩石圈地幔底部对流减薄作用的结果。Chung 等<sup>[8]</sup>认为青藏高原北部原始岩石圈地幔于 13 ~ 0 Ma 发生的拆沉作用导致了该区钾质火山岩的大面积喷发。罗照华等<sup>[9]</sup>从区域构造和岩石学特征出发,认为是印度大陆岩石圈的持续向北俯冲的诱因,致使高原岩石圈受热、变形和重力不稳定性增强,产生拆沉作用和软流圈物质的大规模上涌,导致青藏高原北部离散性火山岩的大面积喷发。

综上所述,青藏高原北部火山岩的形成多与地幔作用有关,但地幔如何作用还不是很清楚。本文利用宽频地震流动台网和固定台站记录到的远震事件,通过层析成像技术<sup>[16-17]</sup>对火山岩区深部结构进行了三维反演,揭露青藏高原北部火山岩区的深部结构特征,探讨大面积火山岩产出的原因。

## 1 层析成像反演的数据和方法

本次研究使用的远震 P 波数据主要来自:中美合作沿青海格尔木—西藏日喀则布设的 11 个 PASSCAL 台站; INDEPTH - II、INDEPTH - III 获得的宽频数据;中国新疆地学断面项目实施期间,在西昆仑—塔里木地区布设的 14 个宽频台站;中美合作沿喜马拉雅—尼泊尔布置的 29 个宽频台

站;中国科学院与中国地质科学院沿措勤—聂拉木布设的 16 个宽频台站;国际地震中心 1990 年 1 月—2004 年 2 月震相报告中远震 P 波到时数据。收集了共 305 个地震台站(图 1)记录的 9 649 个远震事件(图 2),共挑选出 139 021 条远震 P 波到时数据。反演方法采用了赵大鹏的地震层析成像方法及程序<sup>[16-17]</sup>。

值得说明的是,由于自然条件恶劣,羌塘地体内部台站稀少;因此,只能通过尽可能多地收集现有数据对青藏高原北部火山岩大面积产出的原因进行推测。

## 2 层析成像结果与合成分辨率检测

层析成像结果显示(图 3):从 25 km 到 75 km,即青藏高原地壳部分,两条平行展布的高、低速带与地表构造走向一致,以近东西向为主。其中低速带位于喜马拉雅地体北部,该低速带对应于喜马拉雅山,并且存在明显的东西向分块特征,推测可能是造山后期东西向伸展作用的结果。与其平行展布的高速异常带则位于喜马拉雅地体南部,推测它是印度板块的一部分。另外,格尔木地区稳定地存在一个低速体。

在 75 km 到 200 km 之间,即青藏高原岩石圈地幔部分,低速异常走向由近东西向转变为北北东向,而且在羌塘地体内部的低速体仍然比较明显。印度岩石圈部分则显示比较明显的连续向北俯冲到达羌塘地体内部的高速特征。

在 300 km 到 400 km 之间,即青藏高原岩石圈地幔以下部分,速度结构特征转变为以低速异常近南北向展布为主。由此可以看出,虽然青藏高原是由东西走向的不同块体南北方向拼贴而成的,但是其深部结构并非这样简单。

笔者沿南北向分别切了 4 条剖面(位置见图 1),分别为 AA'(沿 80°E)、BB'(沿 88°E)、CC'(沿 92°E)和 DD'(24°N, 86°E; 37°N, 95°E)。4 条剖面的层析成像结果如图 4 所示。

从 AA'剖面的层析成像图上,可以清晰地看到在昆仑造山带下的 150 ~ 300 km 处,高速的印度岩石圈地幔与低速的塔里木岩石圈地幔发生了面对面的碰撞。不同探测方法得到的研究成果<sup>[19-20]</sup>证实了在西昆仑山下,在地壳尺度内存在着陆内汇聚 V 型耦合关系,而在岩石圈地幔尺度内发生了面对面的陆陆碰撞<sup>[21-22]</sup>。

BB'剖面的层析成像结果显示,印度岩石圈

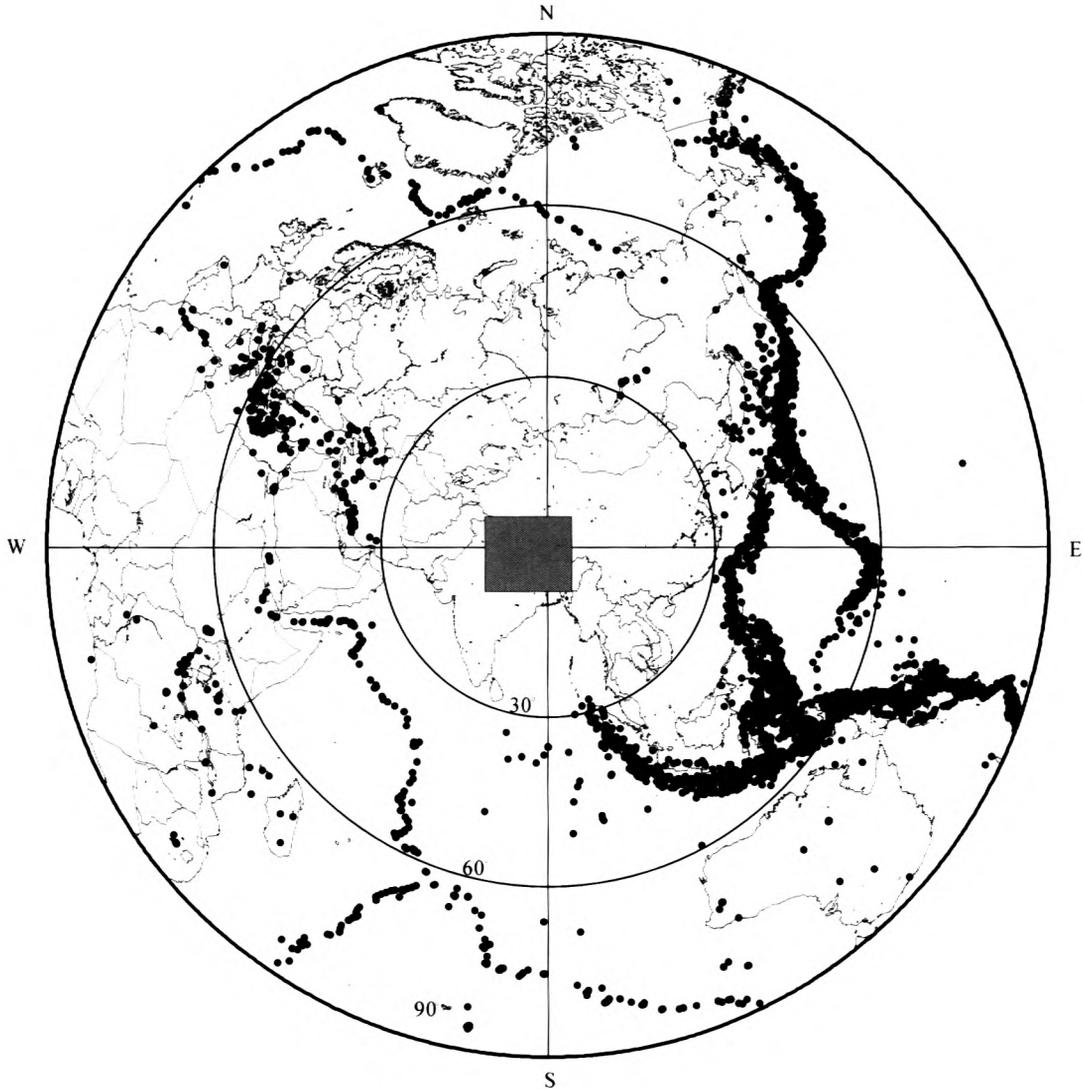


图2 所使用的地震事件分布图

Fig. 2 Distribution of teleseismic events used in the study

(约 200 km 厚)在主边界逆冲断裂 (MBT) 之下 100 km 深度处, 以约  $22^\circ$  角度开始向北俯冲, 岩石圈地幔前缘到达羌塘地体中部约  $34^\circ\text{N}$  地区, 进入上地幔深处, 即虚线刻画的部分<sup>[23]</sup>。羌塘地体中部存在一个北倾的低速体。

$CC'$  剖面结果显示, 印度板块俯冲的形态与  $BB'$  不同, 俯冲角度转变为近水平, 俯冲前缘到达班公—怒江缝合带附近。在俯冲前缘的 300 km 深度处, 存在一个似乎拆沉掉的印度岩石圈地幔块体。同样在羌塘地体之下, 从地幔深处一直到地表存在一个类似地幔柱的低速体。

$DD'$  剖面结果则显示, 印度地幔从恒河平原 100 km 深度几乎水平地插入青藏高原之下, 向北到达  $33^\circ\text{N}$  附近, 以近乎垂直地向下俯冲脱离。剖面北部是一个从深部到地表北倾的巨型低速带, 在

$32^\circ\text{N} \sim 37^\circ\text{N}$  100 km 深度以上分布的低速体与大地电磁测深<sup>[18]</sup> 所显示的高导低阻体位置大致相当。

在  $DD'$  剖面的北段, Wittlinger 等<sup>[24]</sup> 利用 ACH 层析成像方法进行了反演, 结果显示大致沿青藏公路一线 ( $33^\circ\text{N} \sim 37^\circ\text{N}$ ) 存在一个深度达 400 km 的地幔低速体, 而本文利用 Grid 层析成像方法也得到了类似结果, 且图像更为清晰。

在  $DD'$  剖面的南段, 吕庆田等<sup>[25]</sup> 同样利用 ACH 层析成像方法得到了嘎拉—安多剖面的层析成像图像, 由于受观测数据范围所限, 安多以北地区深部结构不清楚, 推断在  $28^\circ\text{N}$  附近的嘎拉, 印度岩石圈地幔以大角度俯冲。从  $DD'$  剖面可以看出, 虽然在  $28^\circ\text{N}$  高速体有向下倾斜延伸的趋势, 但在  $29^\circ\text{N}$  又转为近水平俯冲, 因此推断俯冲是近水平的。

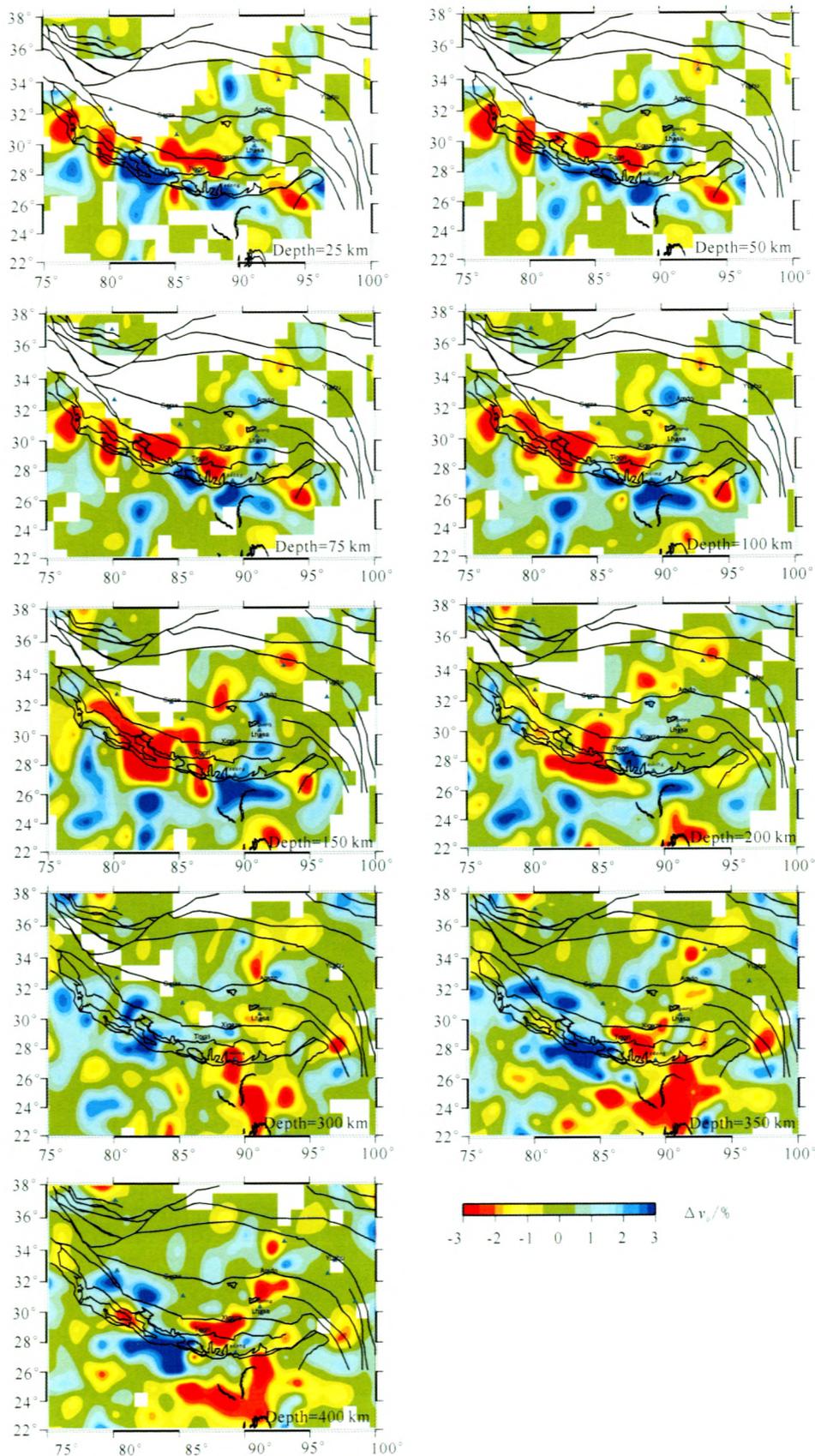


图 3 青藏高原水平剖面的层析成像图像(大地构造线同图 1)

Fig. 3 The tomography images at each depth slice in the Qinghai-Tibet Plateau (tectonic lines are same as Fig. 1)

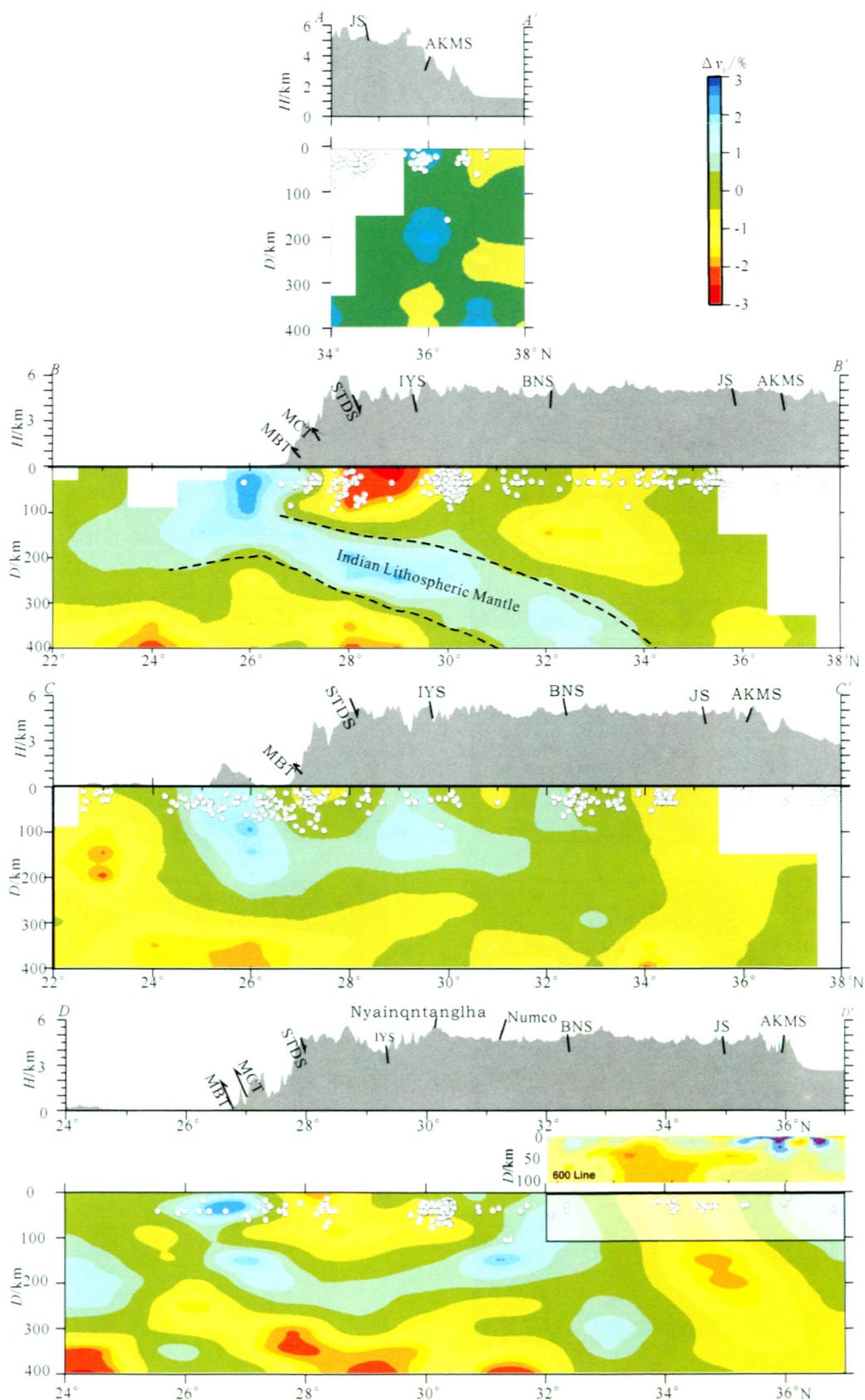


图4 青藏高原南北向剖面的层析成像图像(大地构造线同图1;  $H$  为高度,  $D$  为深度)

Fig. 4 The tomography images of the south-north vertical cross section profiles in the Qinghai-Tibet Plateau  
 每条剖面的上图为地形剖面图, 下图为层析成像图, 图中构造线说明见图1, 图中白圈为地震震中分布;  $DD'$  中间的图是对应的  
 下图中半透明位置处的大地电磁测深结果<sup>[18]</sup>;

印度岩石圈地幔在不同的位置向北俯冲的形态不同。在青藏高原西部俯冲角度较小，近似面对面碰撞，在高原中部俯冲角度较大，而在青藏高原东部俯冲角度较小并且印度岩石圈地幔发生了断离，但其俯冲前缘都到达羌塘地体之下，并且俯冲前缘都存在一个从地幔深处延伸至地表的大规模低速体。

为验证层析成像结果，笔者采用合成分辨率测试方法进行了检测。所谓合成分辨率测试，即初始模型是人工合成的模型，再进行反演，看是否能将初始模型恢复出来。针对高速的印度板块向北俯冲和藏北巨型地幔柱的存在，人为地设置了一个与反演结果相近的高速印度板块俯冲体和藏北几乎直立的低速地幔柱体的模型。然后在该合成模型的基础上进行理论射线走时计算，得到合成数据。最后对合成数据采用普通反演的办法进行反演，将输入与输出的结果进行对比来判别分辨率及对反演结果进行评估。检测结果(图5)显示，两者具有很好的一致性，说明本次反演的模型设置和结果是可信的。

### 3 讨论

过去人们一直认为印度板块是一个非常稳定的克拉通，然而近年来该板块内部相继发生6级以上的板内强震，说明印度板块并非是铁板一块。

Pandey<sup>[26]</sup>根据地球物理和地球化学的研究揭示整个印度地区由几个不同的克拉通构成，它们在岩石圈厚度、热流及物质组成等方面都存在明显的东西方向上的差别。因此，印度板块向北俯冲过程中，可能出现东西方向上在不同部位俯冲形态不同的现象。

从图4可以看出，印度板块岩石圈地幔的西部向北俯冲的角度较小，中部较大，东部俯冲角度近水平，其端部发生了拆沉，俯冲前缘到达了羌塘地体之下。张进和马宗晋<sup>[27]</sup>综合青藏高原重力场、地震层析成像、地震活动性、GPS以及地质等资料，也推测印度板块存在东西部俯冲的形态的不同。结合东西向横穿该低速异常区的深地震测深剖面结果<sup>[28-29]</sup>进行分析，表明高原下的印度板块的岩石圈地幔已经变形，呈中间低两侧高的“勺形”。

吴建平和曾融生<sup>[30]</sup>利用PASSCAL宽频带数字地震记录的瑞利面波资料，反演得到青藏高原东部地区 $Q$ 值随深度逐渐降低的结果，推测在该深度范围内可能存在岩石的熔融或部分熔融现象。Wei等<sup>[18]</sup>用大地电磁方法给出藏北中、下地壳普遍存在部分熔融或者是含水流体的范围。这些都表明层析成像结果中的羌塘地体内部存在低速体。笔者推测由于印度岩石圈地幔的“勺形”俯冲，导致了来自深部软流圈地幔的热物质沿着北北东向

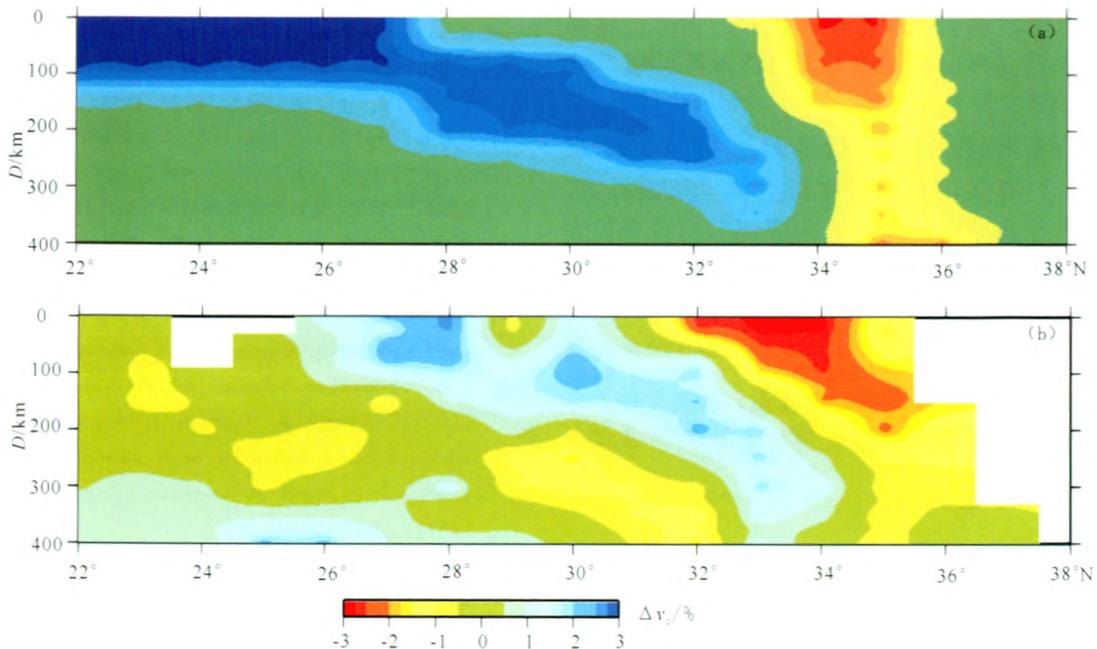


图5 合成分辨率检测结果((a)为设置的模型,(b)为检测的结果)

Fig. 5 The result of the synthesis resolution test((a) the input model, (b) the result of the test)

的勺状印度板块岩石圈地幔向南流动,同时也径直向上流动,形成该类似地幔柱的低速异常体。它可能是青藏高原北部火山岩在新生代晚期持续喷发的深部热源。青藏高原北部地幔熔融和软流圈热物质的持续上涌,导致了新生代青藏高原北部火山活动频繁。

## 4 结 论

利用青藏高原内部及其周缘临时或者固定地震台站所记录的远震P波到时,对青藏高原深部结构与构造进行了层析成像反演。水平切片的反演结果显示羌塘地体内格木地区稳定地存在一个深达软流圈地幔的低速体;岩石圈地幔部分结果则显示,高速特征的印度岩石圈部分比较明显地连续向北俯冲到达羌塘地体内部。结合前人研究成果,认为印度岩石圈地幔在不同的位置向北俯冲的形态不同。在青藏高原西部俯冲角度较小,近乎面对面碰撞,在中部俯冲角度较大,而在东部俯冲角度较小并且印度岩石圈地幔发生了断离,但其俯冲前缘都到达羌塘地体之下,并且俯冲前缘都存在从地表直达软流圈地幔的低速体。该低速体可能是由于印度岩石圈地幔前缘俯冲进入软流圈深处,引起地幔热扰动,造成深部软流圈地幔的热物质向上扩散,是深部地幔物质上涌的通道,从而导致青藏高原北部上地幔低 $Q$ 值、低 $P_n$ 波速、 $S_n$ 波缺失,为青藏高原北部的新生代钾质、高钾质火山岩体的形成提供了条件。因此,推测青藏高原北部火山岩是印度岩石圈地幔持续北向俯冲的结果。

因为羌塘地体内部多数是无人区,研究程度相对较低,本文仅对现有数据进行了反演计算,推测了青藏高原北部火山岩的成因。随着今后大量宽频带仪器在羌塘地区的布设,相信人们会对其成因有更丰富的认识。

致谢:非常感谢中国地质大学(北京)罗照华教授提供青藏高原火山岩分布底图;感谢野外工作者在极其艰苦的条件下所积累的大量宽频带观测数据。

## 参考文献:

- [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.
- [2] 肖序常, 李廷栋. 青藏高原的构造演化与隆升机制[M]. 广州: 广东科技出版社, 2000: 1-313.
- [3] Turner S, Hawk S, Liu J Q, et al. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks [J]. Nature, 1993, 364: 50-53.
- [4] 邓万明, 郑锡澜, 松本征夫. 青海可可西里地区新生代火山岩的岩石特征与时代[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(4): 289-298.
- [5] Hacker B R, Gnos E, Ratschbacher L, et al. Hot and dry deep crustal xenoliths from Tibet [J]. Science, 2000, 287: 2463-2466.
- [6] Ding L, Kapp P, Zhong D, et al. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction [J]. Journal of Petrology, 2003, 44(10): 1833-1865.
- [7] Williams H M, Turner S P, Pearce J A, et al. Nature of the source regions for post-collisional, potassic magmatism in southern and northern Tibet from geochemical variation and inverse trace element modeling [J]. Journal of Petrology, 2004, 45(3): 555-607.
- [8] Chung S L, Chu M, Zhang Y, et al. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. Earth Science Reviews, 2005, 68: 173-196.
- [9] 罗照华, 莫宣学, 侯增谦, 等. 青藏高原新生代形成演化的整合模型——来自火成岩的约束[J]. 地学前缘, 2006, 13(4): 196-211.
- [10] Guo Z F, Wilson M, Liu J, et al. Post-collisional, potassic and ultrapotassic magmatism of the Northern Tibetan Plateau: constraints on characteristics of the mantle source, geodynamic setting and uplift mechanisms [J]. Journal of Petrology, 2006, 47(6): 1177-1220.
- [11] 尹安. 喜马拉雅—青藏高原造山带地质演化——显生宙亚洲大陆生长[J]. 地球学报, 2001, 22(3): 193-230.
- [12] McNamara D E, Owens T J, Walter W R. Observations of the regional phase propagation in the Tibetan plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 22215-22229.
- [13] 邓万明, 孙宏娟, 张玉泉. 青海囊谦盆地新生代火山岩的K-Ar年龄[J]. 科学通报, 1999, 44(20): 2554-2558.
- [14] 邓万明, 孙宏娟. 藏北羌塘地区火山岩的同位素地球化学与源区特征[J]. 地学前缘, 1998, 5(4): 307-317.
- [15] 迟效国, 李才, 金巍. 藏北羌塘地区新生代火山作用与岩石圈构造演化[J]. 中国科学: D辑, 2005, 35(5): 399-410.
- [16] Zhao D P, Hasegawa A, Horiuchi S. Tomographic Imaging of P and S wave velocity structure beneath Northeastern Japan [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(B13): 19909-19928.
- [17] Zhao D P, Hasegawa A, Kanamori H. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(B11): 22313-22329.
- [18] Wei W B, Unsworth M, Jones A, et al. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies [J]. Science, 2001, 292: 716-718.
- [19] Kao H, R Gao, Ruy-Juin Rau, et al. Co-existence of north- and south-dipping structures beneath the western Tibet-Tarim region [J]. Geology, 2001, 29(7): 575-578.

- [20] Wittlinger G, Vergne J, Tapponnier P, et al. Teleseismic imaging of subducting lithosphere and Moho offsets beneath western Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 221: 117-130.
- [21] 高锐, 黄东定, 卢德源, 等. 横过西昆仑造山带与塔里木盆地结合带的深地震反射剖面 [J]. *科学通报*, 2000, 45(17): 1874-1879.
- [22] 贺日政, 赵大鹏, 高锐, 等. 西昆仑造山带下岩石圈地幔速度结构 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49(3): 778-787.
- [23] 郑洪伟, 李廷栋, 高锐, 等. 印度板块岩石圈地幔向北俯冲到羌塘地体之下的远震P波层析成像证据 [J]. *地球物理学报*, 2007, 50(5): 1418-1426.
- [24] Wittlinger G, Masson F, Poupinet G, et al. Seismic tomography of northern Tibet and Kunlun: evidence for crustal blocks and mantle velocity contrasts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 139: 263-279.
- [25] 吕庆田, 姜枚, 许志琴, 等. 印度板块俯冲仅到特提斯喜马拉雅之下的地震层析证据 [J]. *科学通报*, 1998, 43(12): 1308-1311.
- [26] Pandey O P. Lithospheric mantle deformation beneath the Indian cratons [J]. *Journal of Geology*, 1999, 107: 683-692.
- [27] 张进, 马宗晋. 西藏高原西、中、东的分段性及其意义 [J]. *地质学报*, 2004, 78(2): 218-227.
- [28] 滕吉文, 尹周勋, 刘宏兵, 等. 青藏高原岩石层三维和二维结构与大陆动力学 [J]. *地球物理学报*, 1994, 37(增刊II): 117-130.
- [29] 张中杰, 李英康, 王光杰, 等. 藏北地壳东西向结构与“下凹”莫霍面——来自宽角反射剖面的启示 [J]. *中国科学: D辑*, 2001, 31(11): 881-888.
- [30] 吴建平, 曾融生. 青藏高原Q值结构反演 [J]. *地震学报*, 1996, 18(2): 208-214.
- [31] 郑洪伟. 青藏高原地壳上地幔三维速度结构及其地球动力学意义 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2006.
- [32] Owens T J, Zandt G. Implications of crustal property variations for models of Tibetan Plateau evolution [J]. *Nature*, 1997, 387: 37-43.
- [33] 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]. *The Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1988, A326: 33-88.
- [34] Barazangi M, Ni J. Velocities and propagation characteristics of Pn and Sn beneath the Himalayan Arc and Tibetan Plateau: Possible evidence for underthrusting of Indian continental lithosphere beneath Tibet [J]. *Geology*, 1982, 10: 179-185.