

·综述与进展·

# 板块下的构造及地幔动力学

许志琴,<sup>1</sup> 赵志兴,<sup>1</sup> 杨经绥,<sup>1</sup> 袁学诚,<sup>2</sup> 姜 枚<sup>1</sup>

(1.中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室,北京 100037; 2.国土资源部高咨中心,北京 100812)

摘要:最新的全球地幔地震层析资料揭示了岩石圈板片可以俯冲到核幔边界,超地幔羽可以从核幔边界上升到地壳上部形成热点。在大陆板块汇聚边界,地幔地震层析图像不仅显示了岩石圈板片的超深俯冲,还保存了拆沉的岩石圈“化石”残片的重要信息。从地幔深部所获取的新资料为全地幔“单层对流”的新模式提供了依据。在介绍上述全球构造研究新动向的基础上,本文强调了研究岩石圈板块必须了解板块下的构造,探索岩石圈板块的驱动力应该从“岩石圈动力学”升华到“地幔动力学”,并提出了大陆板块汇聚边界地幔动力学研究的新思考。

关键词:板块下的构造;超深俯冲;核幔边界;超地幔羽;地幔动力学

中图分类号:P541 文献标识码:A 文章编号:1671-255X(2003)03-0149-11

板块理论被公认为20世纪自然科学领域的五大成就之一,该理论的提出是一次地学革命,因为它重新调整了人们对地球动力学的认识。

根据板块观点,板块之间不断发生水平位移,它们的离散和分开形成了大洋,它们的汇聚与碰撞又形成山脉。研究表明,在地质历史中板块聚敛速度是很快的,东太平洋与美洲大陆之间的洋陆聚敛速度为10 cm/a,西太平洋板块和亚洲大陆之间达10~17 cm/a,而印度板块俯冲于欧亚板块之下的陆陆聚敛速度达5 cm/a<sup>[1]</sup>。当板块汇聚和对接时,一个板块俯冲于欧亚板块之下,并使俯冲带及其板块边缘两侧的地壳发生强烈挤压和褶皱,形成碰撞造山带。研究还表明,许多板块的俯冲首先从“洋内俯冲”开始,然后经过大洋板块插入大陆板块之下的“洋陆俯冲”,最后是一个大陆板块俯冲到另一大陆板块下面的“陆陆俯冲”<sup>[1,2]</sup>。

基于此,一个重要问题便引伸出来,板块本身究竟能插入到地幔多大深度?

根据沿俯冲带的地震震源中心位置与深度资料,地学家们曾认为板块只插入地球内部数百公里深度(不超过600~700 km),即板块可产生向下数百公里深度的俯冲作用;同时进一步认为随深度增加,温度和压力值增大,岩石圈板块会变软,降低了

下插的能干性,而消失在软流圈中。但是,最近以Grand<sup>[3]</sup>,R.V.der Voo<sup>[4]</sup>,Van der Hilst<sup>[5]</sup>,Widiyantoro<sup>[6]</sup>,Bigwaard<sup>[7]</sup>和Kendall, J.M<sup>[8]</sup>等为首的科学家通过对最新全球地震层析资料揭示的地幔中地震波速变化的研究,认为有的板块可以俯冲到过去不可想象的核幔边界(2891 km深),从而提出了新的假设。

随之,另一个重要问题提了出来,地球内部究竟存在什么样的物质运动方式?

长期以来,地学家们用地球内部的对流来解释地球热历史、地球内部物质成分及分异过程。最初的板块观点认为,地球表面板块运动的几何学是简单的,板块的水平位移使冷板块插入热地幔中,又因为大洋中脊的热物质上升而得以补偿,曾提出“双层对流”模式。“双层对流”是由上地幔中的小对流环与下地幔的大对流环组成的,两个对流体系是独立的,中间为410~660 km深度的过渡带所分开,因为在理论上过渡带上、下的地幔流变学存在差异。但最新的全球地震层析资料揭示了板块可俯冲到过去不可想象的深度,这对于“双层对流”模式无疑是一种挑战。

最近,Mattauer<sup>[9,10]</sup>强调最新的全球地震层析资料使地学家们重新考虑板块插入地幔及重新认识山脉的形成,提出研究地幔动力学具有重要意义。

本文通过最近几年来国际上已发表的全球最新

的深部地震层析资料,介绍地幔层析、岩石圈板片的超深俯冲、超地幔羽的研究进展以及新的“地幔对流”观点和“板块下构造”的新假设、新模式,进而强调从“岩石圈动力学”到“地幔动力学”的地学研究新阶段已经到来。

## 1 地幔层析及岩石圈板片的超深俯冲

地壳与地幔的分界面为莫霍面,地幔又可分为上地幔(650 km以上)及下地幔(650~2 891 km),下地幔与地核的边界通常称为“D”层。进入地幔后地震波速度突然增大到8.1 km/s,在莫霍面至150 km深度的上地幔中,地震波速度变化不大,但到150~250 km深度速度变低(P波速度为7.4 km/s, S波速度为4.2 km/s),称为古登堡低速层(地幔软流层)。该层在全球普遍存在,又可称软流圈。在深度410~660 km过渡带处,由于相变地震波速度突然增大,650 km以下的地震波速度缓慢增大<sup>[11]</sup>。

地震层析的原理相当于医学上的“CT”,根据与俯冲相关的毕尼奥夫带的深源地震位置及形状,可以直接推测出俯冲板片下沉体的深度。但是深度加大时“CT”的追踪则失效,因此,许多研究都停留在上、下地幔界线附近的俯冲板片的行为上。在此处深部地震活动停止,并出现明显的不连续面,推测可能标志其物质化学相的变化,这种变化大大阻止了物质在上、下地幔之间的流动。因而,上、下地幔的界线似乎成了岩石圈俯冲板片继续往下插入的禁区。那么这些板片在660 km之下的地幔中命运究竟如何?

最新的全球地震层析图像<sup>[5]</sup>包含了地幔地震构造的高分辨的P波和S波模型。两种模型是通过体波资料获得的,但数据的类型、选取和处理过程是不同的。P波模型运用国际地震中心的走时数据绘制了P波速度在地幔中的三维变化<sup>[5]</sup>, S波模型通过多次波动的剪切波资料绘制了地幔中的剪切波速的变化。这两种模型虽然是运用不同的反演技术和不同的数据组合而分别得到的,但它们对整个地幔中的许多大小规模的构造,甚至短波长的构造显示了相当的一致性(图1)。

特别是在板块汇聚边界,利用体波分辨的下地幔高波速异常为线型窄长构造,发现它们中的大部分可往上一直到达地壳表面俯冲带位置,往下追踪到核幔边界“D”层,展现了从地表俯冲带经中地幔一直到核幔边界的由高速体组成的超深俯冲图景。

在最新的全球高分辨P波和S波的地震层析图像(图1)中,在北美洲法拉隆板块(Farallon)、南欧亚大陆的特提斯板块、西太平洋板块(Izangi和Kula)、西北太平洋板块<sup>[12]</sup>及太平洋Tonga板块<sup>[13]</sup> 660 km之下都出现了线性高速异常体,异常体与上地幔板片相连接,并有一部分往下延伸到下地幔下部<sup>[13]</sup>。

下地幔最底部地震构造与中地幔不同,无明显的线性特征。这可以解释为地幔最深处粘度的增加引起下沉板块的横向模糊图像,但是,核幔边界的高速异常区依然存在,可以解释为俯冲岩石圈的最后栖息地。

下面通过全球两个新的P波速和S波速在不同地幔深度的高分辨地幔层析图像以及地幔层析剖面的分析,来了解北美洲、南欧亚大陆及西伯利亚等板块汇聚边界的中下地幔构造模式。

### 1.1 北美洲的中下地幔构造

在不同地幔深度P波速和S波速高分辨地幔层析图像中,P波速和S波速的两个模型几乎完全一致。在北美洲东部的下地幔上部的800 km深度,高速异常带在平面上沿走向从30°S延伸到50°N;在下地幔中部(1 050~1 350 km),高速异常带往北继续延伸到Hudson湾的西岸和北阿拉斯加。在北美洲南部,P波速和S波速两个模式均显示高速异常带在1 300 km的深度终止,但在下地幔下部(1 800~2 300 km)显示了简单线性构造的扩散(图2)。

横穿北美洲南部的地幔层析剖面<sup>[3]</sup>的端点位于30.1°N, 117.1°W和30.2°N, 56.4°W,揭示了太平洋东侧的法拉隆大洋板块与北美洲板块的洋陆板块汇聚边界从地球表面至核幔边界的P波速地震层析图像,记录了由高速异常体组成的法拉隆大洋岩石圈板片在50~100 Ma期间从北美洲南部海沟表面下插到下地幔的历史。很明显,高速异常体越过了660 km的上、下地幔的过渡带直至核幔边界,并在上述不同地幔深度的高分辨地幔层析图像中显示了纵向的连续性。Grandt等<sup>[3]</sup>认为,北美洲下面的高速异常体的底部是50 Ma俯冲的板片前缘,利用板片在上地幔下沉速率10 cm/a,可推测板片在下地幔的下沉速率大约为1~1.5 cm/a。板片下沉速率的减小意味着俯冲阻力随深度的增加,这与粘度随深度增加一致,或者与660 km深处吸热相的改变有关。法拉隆大洋板块的俯冲与大西洋的打开有关<sup>[7]</sup>。

上述表明,北美洲的中下地幔构造的地震图像

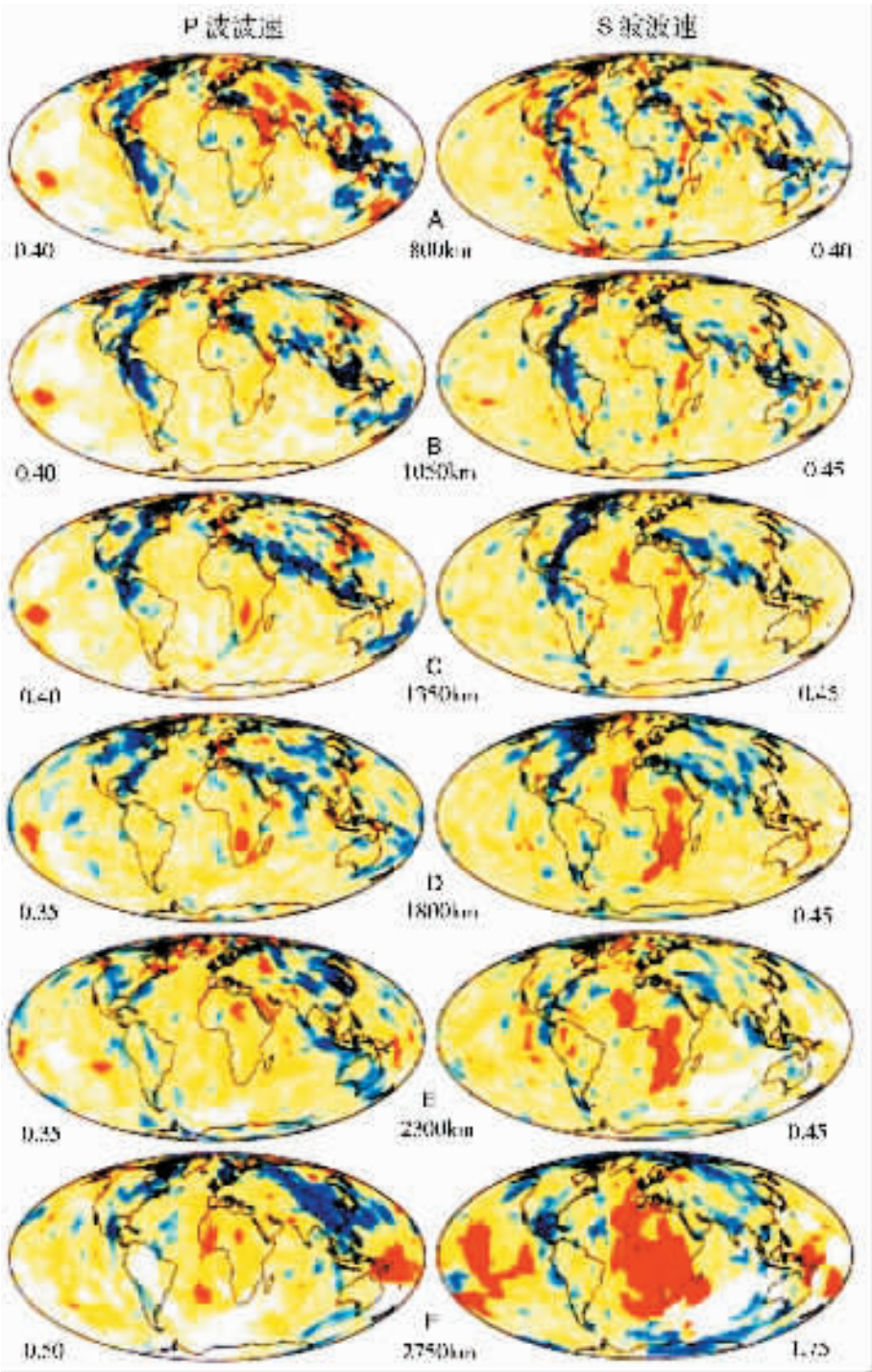


图1 全球P波和S波对比模式( 据R. D.Van der Hilst等 ,1997<sup>[51]</sup>)

Fig. 1 Comparative model of global P waves and S waves  
显示通过下地幔不同深度( 800 km、1 050 km、1 350 km、1 800 km、2 300 km、2 750 km )  
P波和S波地震波速的变化 ,两边的数字是平均波速不同百分比中  
的最大异常 ,蓝色代表高波速 ,红色代表低波速



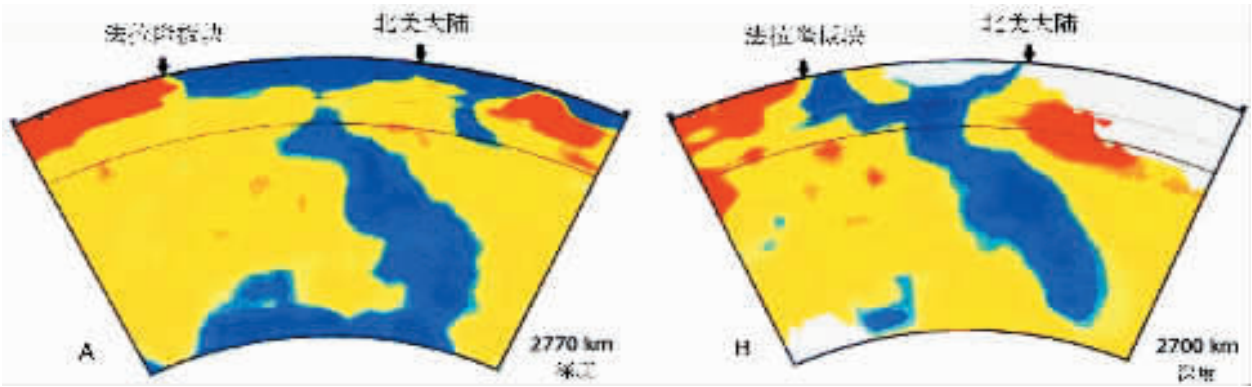


图2 通过北美洲南部地幔中P波(A)和S波(B)波速变化剖面(据Grandt , S.P.等 , 1997<sup>[31]</sup>)

Fig. 2 Section of P-wave ( A ) and S-wave ( B ) velocity variations penetrating through the mantle beneath southern North America

图像显示了从地表至核幔边界不同深度相对全球平均波速的波速变化 ,蓝色代表高于平均波速 ,红色代表低于平均波速。穿过整个地幔的大蓝色板状异常可能代表过去100 Ma中俯冲下沉的法拉隆板块。S波与P波模型在转换带( 400~600 km )及地幔底部的构造的不同是由于两种研究的数据采集不同

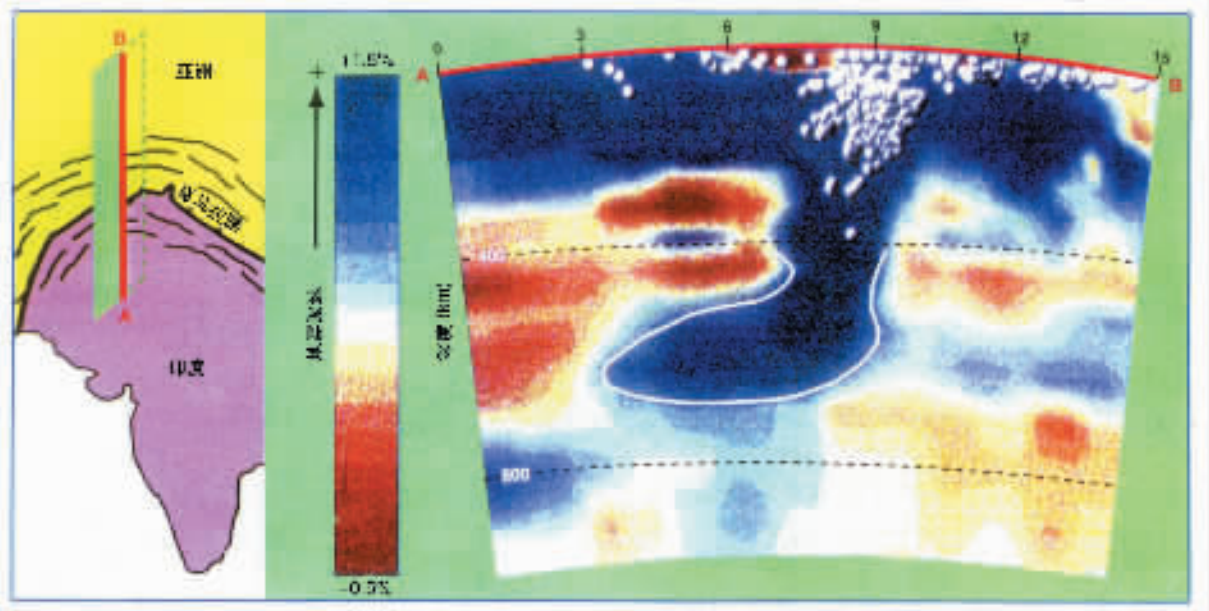


图3 西喜马拉雅1000km深度范围内地震层析剖面(据H.Bigwaard ,1998<sup>[71]</sup> ;Grandt,S.P.等 ,1997<sup>[31]</sup>)

Fig. 3 Seismic tomographic section in the 1000 km depth range below the western Himalayas

蓝色代表高于平均波速 ,红色代表低于平均波速。图像显示了印度岩石圈板块呈“ 翻转构造 ”几何学插入下地幔中

显示了法拉隆大洋岩石圈板片超深俯冲的特征。

1.2 南欧亚大陆的中下地幔构造

在欧亚大陆南部存在一条近EW向往东又转为NW—SE向的特提斯构造带 ,从南欧地中海、阿尔卑斯往东经喜马拉雅延至印度尼西亚 ,长达15 000 km ,为北面的欧亚板块与南面的非洲板块、阿拉伯板块及印度—澳大利亚板块碰撞的产物。在

P波速和S波速的高分辨地幔层析图像(图1)中 ,该带的S波和P波模型中的高速异常带表现出复杂性 :下地幔上部的高速异常带在1 800 km以下显示了该带在平面上的逐渐连续 ;在1 200~1 800 km之间高速异常带从地中海一直到印度尼西亚完全连接 ;1 800 km之下高速异常带只在S波速的地幔层析图像中有断续显示。

通过印度、西藏及邻近的印度洋下面的西喜马拉雅地幔层析剖面<sup>[4]</sup>(图3),揭示了不同深度的一些高速异常体的存在。在东北阿富汗的兴都库什地区上地幔600 km范围内,高速异常板片向北倾斜并与印度板块岩石圈连接;在北巴基斯坦,同样的高速异常板片显示了“翻转构造”,即印度板片高速异常体从地表往北下插,向下变成直立,最后在深部600~800 km深度又往南翻转,表明印度板片以“翻转”几何形态俯冲至地幔深度;往东及南东的尼泊尔附近450 km以下的高速异常体与兴都库什俯冲板片相连接,但与350 km以上的岩石圈板片是分开的。这些异常体可以解释为板块碰撞之后大印度板块与亚洲板块汇聚过程中拆离的印度次大陆的岩石圈残片。

在印度次大陆下面1 000~2 300 km的下地幔深度范围内,还出现4个与浅部高速异常体析离的高速异常体,有的甚至掉到核幔边界的深度。这些异常体在纵向上形成3条平行于WNW—ESE方向延伸的带。R.V. der Voo等<sup>[4]</sup>认为,这些下地幔的高速异常体可解释为新特提斯洋封闭、两大陆碰撞后印度大陆俯冲岩石圈下部拆沉的大洋岩石圈残片(图4),其中南面的Ⅱ、Ⅲ两个异常体代表新特提斯洋岩石圈残片,Ⅳ代表将拆沉的印度大陆俯冲岩石圈,位于北面的Ⅰ可能代表了中特提斯洋岩石圈残片。西喜马拉雅地震层析剖面不仅证明了拆沉构造的假设,而且反映了在大洋岩石圈板片拆沉之前存在大洋岩石圈超深俯冲。

### 1.3 西伯利亚的中下地幔构造

位于亚洲东北部西伯利亚地区的蒙古—鄂霍次克—弗霍扬次克缝合带是早白垩世前西伯利亚板块与蒙古—北中国板块碰撞所保存的蒙古—鄂霍次克侏罗纪大洋岩石圈的记录。

在地壳中,蒙古—鄂霍次克—科里亚克缝合带从贝加尔湖以北经鄂霍次克海到达科里亚克山脉,长达4 000 km。近来R.Van der Voo等<sup>[14]</sup>的研究表明,通过蒙古—鄂霍次克—科里亚克缝合带的P波速在地壳及上地幔中有显示,在面波中也有表现。西伯利亚地区新的地震层析资料获得了西伯利亚的中下地幔构造的图像(图5)。在1200 km深度,高分辨的高速异常(M)无论在垂向上还是在水平方向上都十分清晰;在大于1500 km深度,高速异常带在平面上形成“弯钩”形,从蒙古的西北部往北,一直

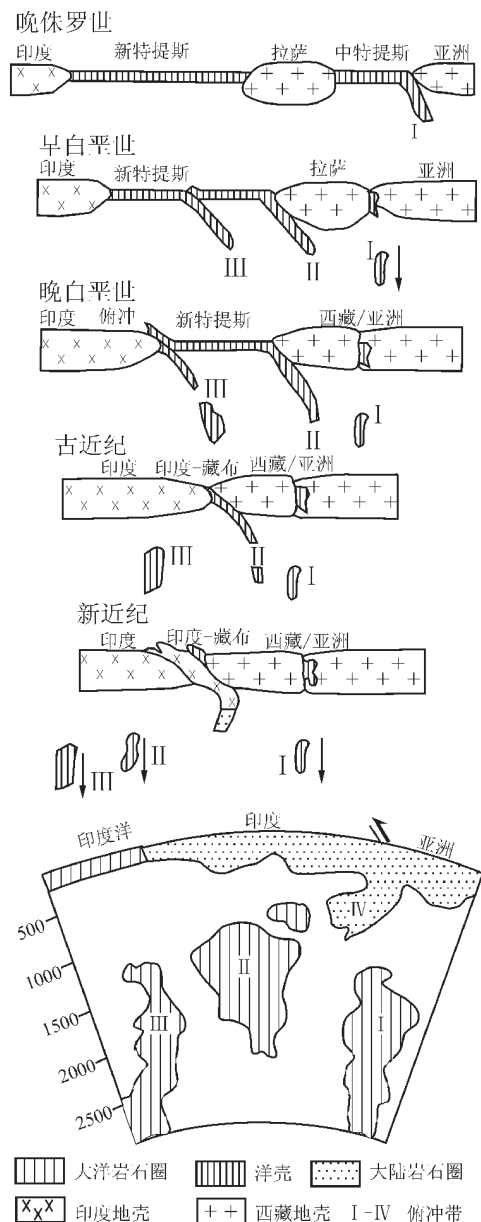


图4 通过印度洋、印度和西藏的地幔(2 500 km深度范围内)地震层析示意剖面(下图)及特提斯演化模式(上图)(据R.V. der Voo, 1999<sup>[4]</sup>)

Fig. 4 Seismic tomographic section crossing mantle (in the 2500 km depth range) beneath the Indian, India and Tibet(below Fig.)and evolution model for Tethyan(upper Fig.)

Ⅱ、Ⅲ为新特提斯洋岩石圈残片,Ⅳ代表将拆沉的印度大陆岩石圈,Ⅰ代表中特提斯洋岩石圈残片

到西伯利亚的北极海岸;1900~2300 km深度,高速异常带在平面上往西位移;在2300 km深度,平面上呈现“Z”形特点。在西伯利亚地区地震层析的不同深



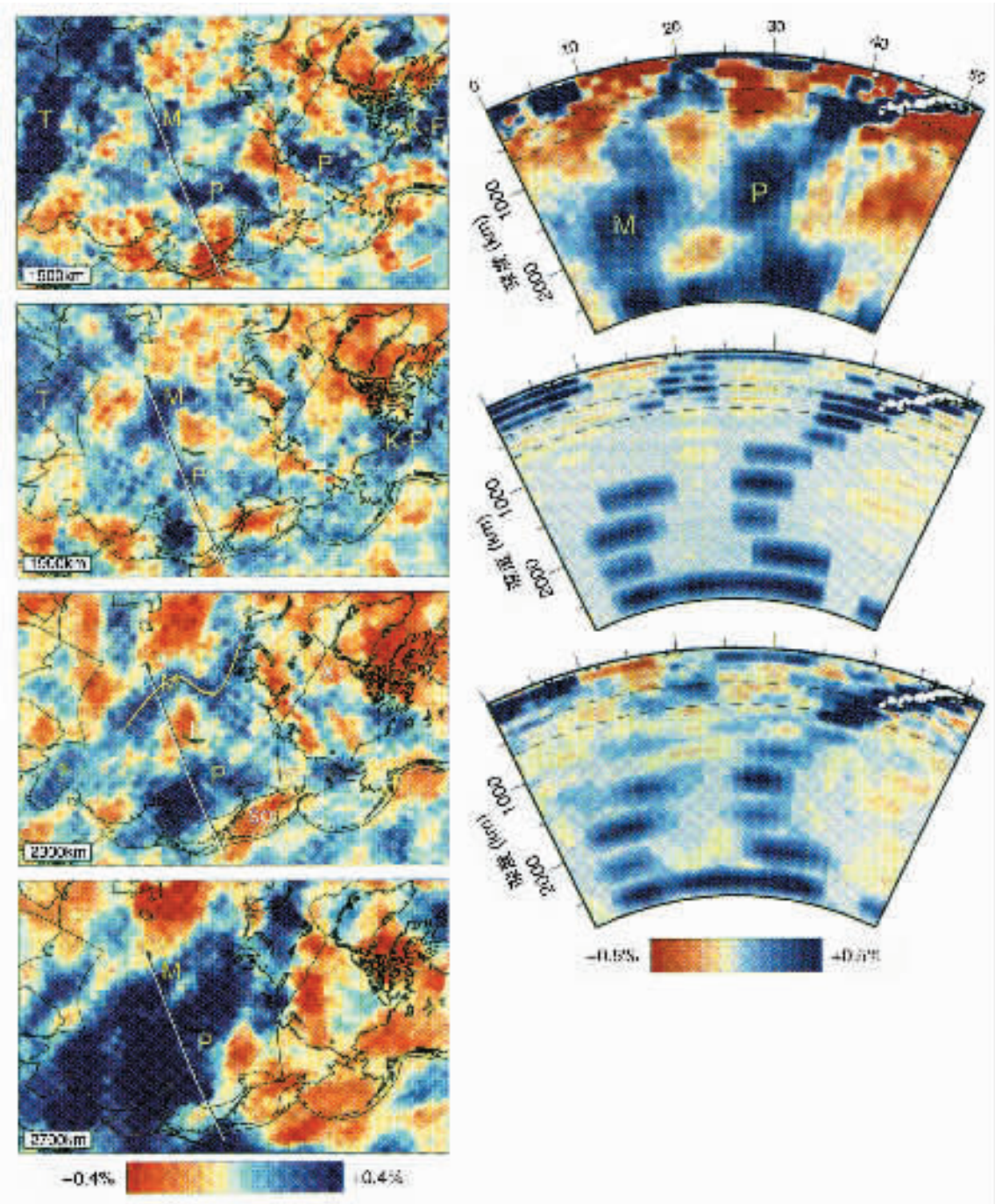


图 5 西伯利亚深地幔地震层析 P 波速异常模型(左图)及剖面(右图)(据 R.Van der Voo 等,1999<sup>[14]</sup>)

Fig.5 Tomographic P-wave velocity anomaly patterns (left) and cross-section through tomographic model (right) in the deep mantle under Siberia

(左图)西伯利亚下面 1500~2700 km 之间深地幔中 4 个不同深度地震层析 P 波速异常模型。M 代表西伯利亚蒙古-鄂霍次克-科里亚克缝合带下面的 P 波高速异常,P 代表日本下面的西太平洋高速异常;T—特提斯带高速异常;  
K—F—库拉-法拉隆板块;b—贝加尔湖;o—鄂霍次克海;x—北极  
(右图)上图:横穿西伯利亚的地震层析 P 波速异常剖面;M 代表西伯利亚蒙古-鄂霍次克-科里亚克缝合带下面的 P 波高速异常,P 代表日本下面的西太平洋高速异常;白点代表西太平洋毕尼奥夫带的地震位置;  
中图:剖面的全地幔蛋糕模型的模拟输入;下图:反演分析的结果

度平面图中,还明显显示了蒙古-鄂霍次克-科里亚克高速异常带(M)东部的日本下面的西太平洋高速异常带(P)的存在,它代表了在现代太平洋板块往西垂直俯冲到核幔边界的地球物理证据。

在横穿西伯利亚的地震层析剖面(图5)中,同时展现了蒙古-鄂霍次克-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)。在650 km深度,可见M高速异常带往西插入转换带;在650~1400 km之间,M高速异常带断缺或不清晰;在1500 km以下的深度,M和P都具有高分辨的异常特征,在西伯利亚下面的深地幔高波速异常与在其他地区(东、西太平洋及欧亚南部等)所见相同。西伯利亚深地幔高波速异常(M)与东部的西太平洋高速异常带(P)的几何形态在下地幔下部都发生向东翻转,与喜马拉雅下面的高速异常体的特征十分相似。M和P在核幔边界连接,构成了巨大的俯冲板片的“墓地”。

研究表明<sup>[14]</sup>,西伯利亚之下的高速异常带与新生代的俯冲无关。它代表了蒙古-鄂霍次克侏罗纪大洋岩石圈的记录。西伯利亚下的高速异常带分成上、下两段,在转换带至1400 km缺失,1500 km以下的高速异常体部分可能代表了“拆沉”的大洋岩石圈的“化石”残片。这种巨大的拆沉可能是两大板块碰撞及大陆增生的标志。值得提出的是,蒙古-鄂霍次克侏罗纪大洋岩石圈俯冲发生在150 Ma之前,今天,我们还能通过新的地震层析资料发现它的信息,是值得注意的事情。

## 2 地震层析与超地幔羽

Roger Larson在1991年根据西南太平洋下面大型地幔上涌特点,提出“超地幔羽”的观点。由于地幔中放射性热的丢失,比地核冷得快,造成从地核到下地幔的热传导,形成热边界“D”层。热边界层的不稳定性使热的、上浮的地幔呈圆柱状上升,形成“超地幔羽”。超地幔羽把地球内部10%的热量通过上涌流带到地表,成为补充俯冲的被动回返流。超地幔羽由3部分组成:幔头、幔尾及上涌流。实验和数值模拟显示了超地幔羽呈蘑菇状。地幔羽由于较周围地幔的粘度低而往上流动,使“幔头”直径可增大到1000 km以上,并不断从细圆柱状的“幔尾”中吸收新的物质。在地幔中的其他浅部边界也可以形成小的地幔羽<sup>[15]</sup>。

近来,高分辨的全球地震波速度层析结果不仅表明在俯冲区的高速俯冲板片可以直接透入下地

幔底部的核幔边界“D”层,而且深部热的低速异常体也可以从核幔边界“D”层往上横跨660 km不连续面到达全球地表热点<sup>[3]</sup>,如东非、冰岛、卡那利群岛、黄石和大洋群岛之下的热点<sup>[16~18]</sup>(图1)。

非洲的超地幔羽是由最近提出的地震层析S20RTS模型(图6)证实的<sup>[16~18]</sup>。S20RTS模型是指20°剪切波模型,是综合了1980—1998年大于5级地震的面波震相波速、体波走时和自由振荡分裂测量的地震数字宽频记录而确定的。S20RTS模型的剖面首先显示了非洲的低剪切波速异常带被北美、南美、南极、东亚和印度洋下面的高剪切波速带围绕,揭示了非洲大陆下面的低速异常体有一个复杂的三维形态,非洲的低速异常体覆盖了靠近非洲西部的大西洋东南部之下核幔边界的广大区域(4000 km×2000 km),它与中非、西北非和南印度下面的低剪切波速的异常区相连接。非洲的低速异常带在中地幔(1350~2350 km)深度变窄,并且往东及北东方向聚中在核幔边界以上较高的部位。垂直的S20RTS剖面表明,至少从2000 km到上地幔范围内的低波速异常是连续的,异常从南非下面的核幔边界延至东非裂谷的上地幔,说明异常从非洲西南往东及北东方向倾斜上延,这种倾斜在2000 km处发生侧向错位(图6)。

低速异常体代表了热的低密度物质,因此,可用大规模的热上涌流来解释东非超地幔羽。在地幔羽底部热上涌流的形态是复杂的,并且上涌的方向往东及北东方向偏移,这可能是冈瓦纳大陆分裂致使非洲板块向北东方向迁移的结果。

据推测,与板块离散边界有关的热点(火山中心)下面存在悬浮着的狭窄的地幔羽状物,热流是由地幔羽传导的,其热流量约为地球总热量的12%,可与地核发射的热量相比,而且与地幔底部热边界层的超地幔羽一致。这些地幔羽状物可能是来自核幔边界朝地幔羽所提供的热物质的部分熔融的产物<sup>[19]</sup>。

## 3 地幔“双层对流”到“单层对流”模式

地球内部的“对流”首先是Fisher(1881)提出来的,地幔对流的提出者是Holmes(1929),Hess的海底扩张假设(1962)是以Holmes的地幔对流为基础的。

板块运动的主要动力来自地幔对流。最早提出的“被动对流”论认为,板块是由地幔对流运载而运动的。由于“被动对流论”存在许多不完善的方面,很快就被“主动对流”论所代替。“主动对流”指对流



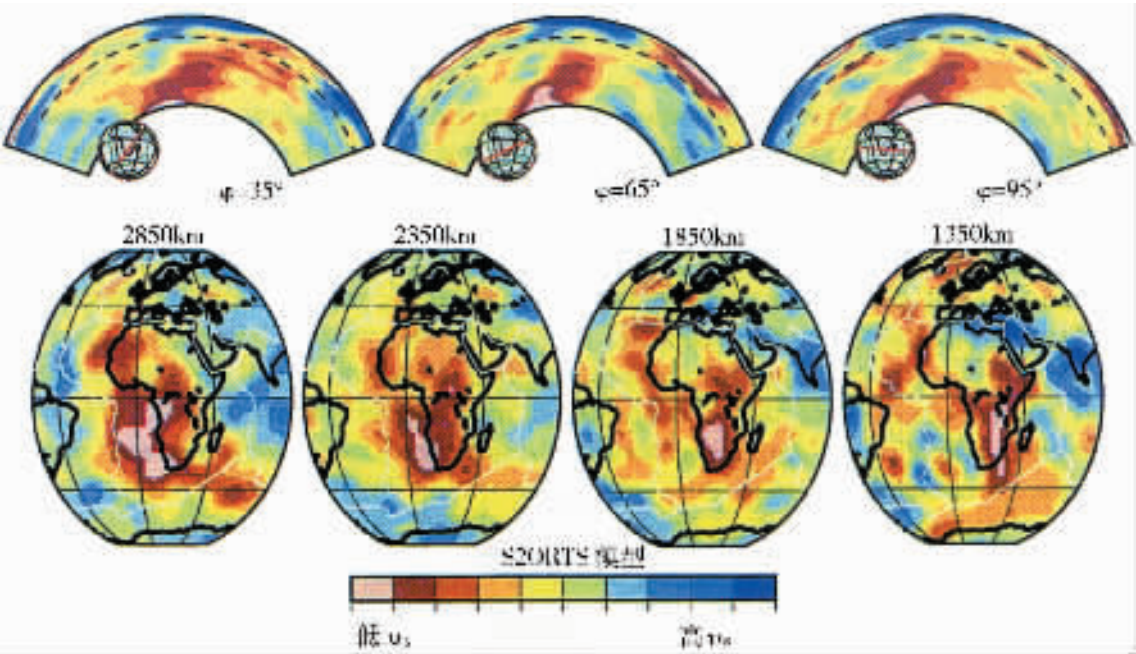


图6 通过S20RTS模型的垂直及水平剖面( 据Ritsema , J. 2002<sup>[18]</sup>)  
Fig. 6 Vertical and horizontal sections across the S20RTS model  
蓝色与红色分别代表高速及低速异常,白线代表板块边界

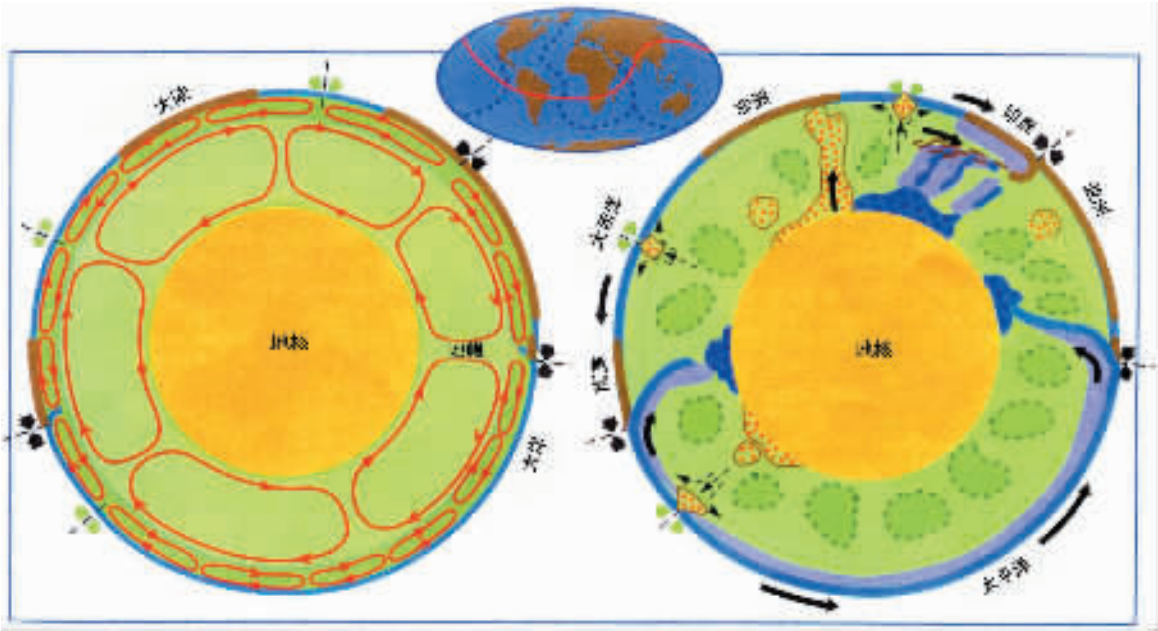


图7 地幔的对流模式( 据Mattaueu ,M. , 1999<sup>[9]</sup>)  
Fig. 7 Mantle convection model

左图为双层对流模式,分为两部分:由上地幔的小对流环与下地幔的大对流环组成,是两个对流体系;右图为单层对流模式,表现了太平洋岩石圈板片往东及往西分别俯冲在美洲和亚洲大陆之下,抵达核幔边界,形成“墓地”,印度次大陆岩石圈板片呈翻转几何学俯冲在亚洲大陆之下,下面有若干拆沉的岩石圈残片;东非、大西洋及东太平洋位置上有从核幔边界形成的超地幔羽上升到地表。假设整个中下地幔的对流由无数小对流环运载。褐色代表大陆地壳,蓝色代表大洋地壳,紫色代表厚度变化的上地幔,核幔边界附近带有十字的深蓝色地域为俯冲岩石圈的“墓地”,红点域代表热的地幔羽,绿色虚线圈代表下地幔中的对流环



在海岭上升,在海沟消失,俯冲体由于高密度而具有牵引拖力的动力作用而往下俯冲。但“主动对流”对地幔对流的具体动力学过程有不同说法:一种认为地幔对流限于软流层以上的部分,其热能是由下地幔的中间层经热传导供给的;另一种提出“双层对流”模式,认为对流分别在上、下地幔两层中沿水平方向流动进行,上下对流圈是分开的,因为在650 km深度存在的不连续面可能是物质的分隔界面。

Silver P.G.等<sup>[20]</sup>在1988年曾提出双层和单层混合地幔模式,认为下地幔的结构比上地幔致密,但并没有致密到冷却的状态,高密度的俯冲体并没有穿过660 km的过渡层而进入下地幔里面去,有可能在进入下地幔时只作短暂停留,高密度俯冲体就被高温熔化变成浮体,而又被返回到上地幔。这一解释与600~700 km Benioff中的深源地震分布结果相一致。

Davies G.F.(1992)<sup>[21]</sup>曾认为,在大陆板块汇聚边界的俯冲板片向地幔俯冲时,由于过渡带粘性增加,俯冲板片在660 km过渡带可能发生局部的扭结,而继续进入较深部位时,由于下地幔的粘度的稳定增加而受到压力或热力,使之弯曲形变及坍塌。

新的板块汇聚边界地震层析结果支持了Davies G.F.的推测,不仅揭示板块大规模整体运动使俯冲板块穿过上下地幔过渡层,并穿透地幔到达核幔边界;另一方面,导致火山热点的上涌超地幔羽从地幔底部的相对弱的热边界层(D层)直接升起,因而形成了全地幔的深循环。板块汇聚边缘的深部俯冲板片穿透地幔到达核幔边界的观察结果还表明,下地幔流动虽然距上地幔很远,但不可能单独构成对流系统,一定与上地幔流动有关。

在新的地幔地震层析结果揭示全地幔对流的基础上,Mattauer(1999)<sup>[9]</sup>提出了“单层地幔对流”模式,用图7示意了“单层地幔对流”模式与“双层地幔对流”模式的区别,表示了东太平洋板块及西太平洋板块分别往东及往西俯冲到美洲和亚洲大陆下面的地幔底部,由于地幔最深处粘度的增加引起下沉板块的横向模糊,核幔边界的高速异常区成了俯冲岩石圈的“墓地”;印度次大陆及邻近地区下面的上中地幔内显示了俯冲岩石圈的翻转构造,1000 km以下的中下地幔中保存了拆沉的特提斯大洋俯冲岩石圈残余板片,它们也与核幔边界的高速异常区组成的“墓地”相连;在非洲和亚洲大陆内部

以及太平洋、印度洋和大西洋板块中的热点与地幔羽有关,有的与来自核幔边界的超地幔羽有关。假设下地幔中的对流通过大量的小对流环运载来完成。

模式中以地幔底部的低波速热边界层为能源来源地的超地幔柱首先上涌到扩张中心,地幔羽在上升时会拖曳着周围的物质,在穿过板块时由于板块规模水平运动使幔羽发生垂向偏移。同时地幔对流可以产生与观测结果相匹配的板块速度,板块在形成地幔对流结构和决定上升和下涌的主要位置方面起着决定性作用。由于热量向地表传导,板块随年龄增加而增厚,这个浅层过程至少使来自地幔的85%的热量失去了,这也是对流过程的一个很强的约束。它说明板块是地幔对流的整体,构成整个系统的主要驱动来自热边界层。这些在地幔中穿过660 km过渡带的对流形成了全地幔的对流特征,即全地幔对流与构造板块运动的动力学过程<sup>[9]</sup>。

#### 4 板块下的构造及地幔动力学

传统板块理论立足于岩石圈,板块运动指岩石圈板块在软流圈上的运动。新的研究表明,研究板块构造只考虑岩石圈的尺度及岩石圈动力学已远远不够了。全球地震层析新资料为我们揭示了岩石圈板片可以从地球表面俯冲到核幔边界,超地幔羽也可以从核幔边界直接上涌到地壳表层并导致大量热点的产生;同时,全球范围内地幔中地震波高速异常和低速异常的连续出现,表明物质可以从上往下或者从下往上穿过660 km的不连续带。这一发现进一步证实了660 km边界可以抵抗但不能阻止大规模物质从上地幔进入下地幔,反之亦然。因此,研究板块的运动力必须考虑整个地幔的动力学背景。

现代板块构造研究展示了地球上的两大巨型板块汇聚边界:环太平洋和欧亚大陆南部的特提斯。前者是太平洋板块俯冲于美洲大陆板块(东面)及亚洲大陆板块(西面)之下的“洋陆俯冲”产物;后者是欧亚大陆板块与非洲板块、阿拉伯板块、印度-澳大利亚板块汇聚的结果,其中西段板块(欧亚大陆板块与非洲、阿拉伯及印度板块之间)已经碰撞,为“陆陆碰撞”及“陆陆俯冲”的产物,东南段板块(欧亚大陆板块与澳大利亚板块之间)尚未碰撞,印度与澳大利亚之间的印度洋正往北东方向俯冲于印度尼西亚岛弧之下,为“洋陆俯冲”的产物。

地幔地震层析资料揭示了洋陆板块汇聚边界及

大陆板块汇聚边界的俯冲板片抵达核幔边界的超深俯冲的证据,特别是大陆板块汇聚边界的地幔构造的显示,为我们研究大陆板块汇聚边界的深部状态提供了更多的思考。

(1)印度和欧亚板块碰撞及青藏高原形成的研究一直是地学界关注的热点。自 Argand E.(1924)<sup>[22]</sup>提出印度板块往北俯冲在欧亚大陆之下的观点以来,地球物理的探测不断提供了岩石圈范围内的俯冲证据<sup>[22-27]</sup>。喜马拉雅下面新的地幔地震层析资料,显示了在中上地幔范围内印度克拉通的岩石圈俯冲板片的几何形态呈上部往北、中部直立往下及下部往南翻转的特殊的超深俯冲形式<sup>[4,7]</sup>。这种超深俯冲的几何形式是如何形成的?反映了地幔中物质运动的什么特点?对两个大陆的碰撞造山及青藏高原的形成起了什么作用?

(2)喜马拉雅的地幔地震层析图像,揭示中下地幔范围内保存了若干高速异常体板片。R.V. der Voo 等(1999)<sup>[4]</sup>把它们当做特提斯大洋岩石圈或者拆沉的印度次大陆岩石圈的“化石”残片。这说明地幔层析资料支持了侏罗纪—白垩纪时期印度北面特提斯大洋及岩石圈超深俯冲的观点,而且提供了拆沉作用的地震层析的证据;无独有偶,西伯利亚下面的地幔地震层析图像不仅揭示了蒙古—鄂霍次克—科里亚克高速异常带的存在,也支持了西伯利亚和蒙古—北中国板块之间的蒙古—鄂霍次克侏罗纪大洋岩石圈的超深俯冲及拆沉的认识<sup>[14]</sup>。

通过大陆板块汇聚带的地幔地震层析资料,我们可以寻找与新生代俯冲无关的古俯冲残片(侏罗纪—白垩纪)并捕捉拆沉的证据。这一贡献给予我们重要的启示:拆沉作用与大陆增生的关系是什么?三叠纪时期(或更老)的岩石圈超深俯冲(大陆和大洋)及拆沉的证据能否在地幔地震层析资料中保存?

(3)岩石圈板片可以俯冲到地幔深部,一部分成为拆沉的“化石”残片,一部分在碰撞的过程中折返上来,折返上来的板片保存了大量地幔动力学的信息,包括超高压变质作用、超高压矿物相的转换、超高压矿物流变学、流体及熔融作用、壳—幔作用及地幔中的物质循环等。因此,我们可以通过地球物理以外的各种地质手段来研究超高压变质带,发现超深地幔矿物及超深俯冲的证据,探究汇聚板块边界的地幔动力学。

经过深俯冲在地幔中遨游的超高压变质带主要分布在碰撞造山带中。中国的大别—苏鲁超高压变质带是世界上最大的超高压变质带,是研究板块汇聚边界地幔动力学的最佳地区之一。

(4)实际上,太平洋板块俯冲和印度与欧亚板块的碰撞只是反映了从“洋陆俯冲”到“陆陆俯冲”的板块运动演化过程,因而两类汇聚边界的地幔地震层析是不同演化阶段的记录。

岩石圈的超深俯冲、超地幔羽及全地幔对流的揭示是对传统的板块构造有关对流、俯冲及驱动力的基本模型的挑战。核幔边界既是高速深俯冲异常板片的“墓地”又是低速异常体(超地幔羽)的发源地,新观点给与人们新的启示:板块下的全地幔运动是研究岩石圈板块运动之根本,研究板块下的构造必将从岩石圈动力学拓展到地幔动力学。

#### 参考文献:

- [1] Mattauer M. La formation des chaines de montagnes[J] Science (Edition francaise de Scientific American), 1981 (46): 40~56.
- [2] Mattauer M. Monts et Merveilles Beate's et richesses de la geologie[A] In: Hermann ed. Teurs des Sciences et des Arts [C] 1989.
- [3] Grandt S P, et al. Global Seismic Tomography: a Snapshot of Convection in the Earth[J] Nature, 1997, 386: 578~584.
- [4] R. Van der Voo, et al. Tethyan Subducted Slabs under India[J] Earth plan. Sc. Lett., 1999, 171: 7~20.
- [5] Van der Hilst R D, Widiyantoro S, Engdahl E R. Evidence for Deep Mantle Circulation from Global Tomography[J] Nature, 1997, 386: 578~584.
- [6] Widiyantoro S, Van der Hilst R D. The slab of subducted lithosphere beneath the Sunda arc, Indonesia[J] Science, 1996, 271: 1566~1570.
- [7] Bigwaard H, Sjakman Win. Closing the Gap between Regional and Global Travel Tomography[J] Journ. Geoph. Res., 1998, 103: 30055~30078.
- [8] Kendall, J. M. & Siliver, P. G. Constraints from seismic anisotropy on the nature of the lowermost mantle. Nature, 1996, 381: 409~412.
- [9] Mattauer M. Seismique et tectonique[J] La Science, 1999, (265): 28~31.
- [10] Mattauer M. La tectonique sous les plaques[J] Science (Edition francaise de Scientific American), 2002 (295): 70~75.
- [11] Kamiya S, Miyatake T, Hirahara K. How deep can we see the high velocity anomalies beneath the Japan islands?[J] Geophys. Res. Lett., 1988, 15: 828~831.
- [12] Van der Hilst R D. Complex morphology of subducted litho-



- sphere in the mantle beneath the Tonga trench [J] Nature , 1995 ,374 :154~157.
- [ 13 ] 曾融生 ,陈运泰. 探索地球内部的奥秘[ M ] 北京 :清华大学出版社 ,暨南大学出版社 ,2002.120.
- [ 14 ] Van der Voo R, Spakman W, Bijwaard H. Mesozoic subducted slabs under Siberia[ J ] Nature,1999,(397): 246~249.
- [ 15 ] Condie K C. What is a superplume ?[ A ] In : Superplume International Workshop Abstract[ C ]Tokyo , Japan , 2002.20~21.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Ritsema J , van Heijst H J , Woodhouse J H. Complex shear velocity structure beneath African and Iceland [ J ] Science , 1999 286 :1925~1928.
- [ 18 ] Ritsema J. Structure of the African superplume[ A ] In : Superplume International Workshop Abstract[ C ] Tokyo , Japan , 2002.37~39.
- [ 19 ] Zhao Dapeng. A new tomography of the mantle : Slicing plumes and superplumes [ A ] In Superplume International Workshop Abstract[ C ] Tokyo , Japan ,2002.24~27.
- [ 20 ] Silver P G , Carlson R W , Olson P. Deep slabs , geochemical heterogeneity , and the large-scale structure of mantle convection : investigation of an enduring paradox : Ann. Rev. Earth Planet[ J ] Sci. ,1988 ,16 :477~541.
- [ 21 ] Davies G F ,Richards M A. Mantle convection[ J ] J. Geol. , 1992 ,100 :151~206.
- [ 22 ] Argand E. La tectonique de l'Asie[ C ] Proc. 13th Int. Geol. Congr. Brussels, 1924, 1: 171~372.
- [ 23 ] Barazangi M, Ni J. Propagation characteristics of Pn beneath the Himalayan arc and Tibetan plateau:possible evidence for underthrusting of Indian continental lithosphere beneath Tibet [ J ] Geology, 1982, 10: 179~185.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] Beghoul 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.
- [ 26 ] Hirn A, Jiang M, Diaz J,et al. Seismic anisotropy as an indicator of mantle flow beneath the Himalayas and Tibet [ J ] Nature, 1995, 375:571~574.
- [ 27 ] Zhao W, Nelson K D, Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath S. Tibet[ J ] Nature ,1993, 366:557~559.

## Tectonics beneath plates and mantle dynamics

XU Zhiqin <sup>1</sup> , ZHAO Zhixing <sup>1</sup> , YANG Jingsui <sup>1</sup>

YUAN Xuecheng <sup>2</sup> , JIANG Mei<sup>1</sup>

( 1. Laboratory of Continental Dynamics , Institute of Geology ,

Chinese Academy of Geological Sciences , Beijing 100037 , China ;

2. Senior Consulting Center , Ministry of Land and Resources , Beijing 100812 , China )

**Abstract :** The latest global mantle seismic tomographic data have revealed tectonics beneath plates : the lithospheric slab may be subducted to the core-mantle boundary and the superplume may rise from the core-mantle boundary to the upper crust to form a hot spot. The mantle “single-layer convection” model challenges the mantle “double-layer convection” model. Through the introduction of the aforesaid new hypothesis and new model , this paper emphasizes that to study the lithospheric plate is necessary to gain knowledge of the tectonics beneath the plate and that to explore the driving force of the lithospheric plate “lithosphere dynamics” should be sublimated into “mantle dynamics”.

**Key words :** tectonics beneath the plate ; superdeep subduction ; core-mantle boundary ; superplume ; mantle dynamics