

# 东亚西太平洋巨型裂谷体系 岩石圈与软流圈结构及动力学

蔡学林<sup>1</sup> 朱介寿<sup>2</sup> 曹家敏<sup>2</sup>  
严忠琼<sup>2</sup> 阳正熙<sup>1</sup> 洪学海<sup>2,3</sup>

(1.成都理工大学地球科学学院,成都 610059; 2.成都理工大学地球物理系,成都 610059;  
3.北京大学计算机科学技术系,北京 100871)

**摘要** 笔者根据地震面波层析成像结果,对欧亚大陆及西太平洋岩石圈和软流圈速度结构进行了研究,发现东亚至西太平洋间存在一巨型低速异常带,结合构造地质学、地幔岩石学、地球化学及其他地球物理特性的研究,确认该区存在巨型裂谷体系。该巨型裂谷体系的岩石圈和软流圈三维 $V_s$ 速度结构与太平洋洋中脊、大西洋洋中脊和印度洋洋中脊及其邻区的岩石圈和软流圈地震 $V_s$ 速度结构十分相似,而与东太平洋边缘现代板块俯冲带的岩石圈与软流圈 $V_s$ 速度结构有显著差异。在进一步论述该区动力学特征后认为,该巨型裂谷体系是中生代中晚期以来岩石圈整体主动伸展变形,大型裂陷盆地形成,岩石圈强烈拆沉减薄,以及软流圈物质上涌加热引起的。边缘海是在大陆裂谷系形成基础上发展起来的,主导扩张期为中渐新世至中中新世(32~13 Ma),这些边缘海在17~15 Ma后停止扩张,因而未能将所有边缘海和洋中脊联通。据此划分出4期构造变形动力学演化阶段,现今东亚至西太平洋间大陆裂谷、边缘海与沟弧体系是新生代中晚期以来,邻区各板块构造相互作用叠加的结果。

**关键词** :巨型裂谷体系;巨型地震低速异常带;地震层析成像;岩石圈;软流圈;地幔岩;东亚大陆;西太平洋  
中图分类号 :P31 文献标识码 :A 文章编号 :1000-3657(2002)-03-0234-12

东亚大陆至西太平洋大陆裂谷、边缘海和沟弧体系及其地球动力学既是当今地球科学前沿研究领域之一,又是研究热点地区之一,不少学者<sup>[1-7]</sup>进行了广泛而全面的研究。关于东亚至西太平洋间大陆裂谷、边缘海和沟弧体系形成的地球动力学特征,国内外学者对这一问题主要有两种认识:一是弧后扩张说<sup>[8,9]</sup>,认为太平洋板块向欧亚板块俯冲碰撞引起的被动伸展作用,形成大陆裂谷、边缘海和沟弧体系;另一是碰撞—挤出—扩张说<sup>[1]</sup>,认为印度板块向欧亚板块俯冲碰撞挤出,引起东亚大陆各块体向东离散,形成大陆裂谷及边缘海。笔者运用天然地震面波层析成像,对东亚、南亚及西太平洋岩石圈与软流圈三维 $V_s$ 速度结构进行了分析与研究,编制出东亚西太平洋岩石圈与软流圈等厚度图及岩石圈与软流

圈 $V_s$ 速度结构图,发现东亚至西太平洋间存在一巨型低速异常带<sup>[1]</sup>。结合构造地质学、地幔岩石学、地球化学和其他地球物理特征的研究,认为东亚至西太平洋间存在巨型裂谷体系,将称之为东亚大陆巨型裂谷体系。该裂谷体系是中生代中晚期以来岩石圈整体主动伸展变形,大型裂陷盆地形成,岩石圈强烈拆沉减薄,以及软流圈物质上涌加热引起的。现今东亚至西太平洋间大陆裂谷、边缘海、沟弧体系是新生代中晚期以来,邻区各板块构造相互作用叠加引起的。

## 1 东亚西太平洋巨型地震低速异常带特征

利用欧亚及西太平洋地区数字地震仪台网

收稿日期:2002-01-07;改回日期:2002-04-08

基金项目:国家自然科学基金重点项目(49734150)和国土资源部专项计划(20001010)联合资助。

作者简介:蔡学林,男,1935年生,教授,主要从事构造地质、前寒武纪地质与深部地质教学与研究工作。

(CDSN、GSN和GEOSCOPE)资料,进行地震面波层析成像反演,发现东亚至西太平洋间深70~250 km范围内,存在宽2 500~4 000 km,南北长12 000 km的巨型 $V_s$ 低速异常带。该低速异常带包括俄罗斯远东沿海、中国东北、华北、下扬子、华夏地区以及东南沿海、黄海、东海陆架、西太平洋边缘海(含千岛海盆、日本海、冲绳海槽、南海、菲律宾海、苏禄海、苏拉威西海、班达海、劳海)、婆罗洲和印支半岛等。这一规模巨大的 $V_s$ 低速异常带具有如下特点:

(1)异常带岩石圈 $V_s$ 速度值最低。从东亚至西太平洋间深130 km的 $V_s$ 速度分布图(图1)中可知,该区域面波速度较低, $V_s$ 多在4.20~4.35 km/s之间,而两侧面波速度较高, $V_s$ 均在4.40~4.70 km/s之间。从东亚至西太平洋间岩石圈中下部面波 $V_s$ 速度等值线图(图2)中可知,该低速异常带 $V_s$ 速度值最低,例如,边缘海 $V_s$ 在4.35~4.45 km/s间,其中苏禄海 $V_s$ 为4.38 km/s,东海地区 $V_s$ 仅有4.35 km/s。该带东西两侧岩石圈 $V_s$ 速度较高,一般在4.45~4.80 km/s之间,部分

可达4.85 km/s以上。根据中国大陆地壳上地幔S波品质因子三维层析成像显示,中国东部岩石圈上地幔和软流圈为一低Q值带<sup>①</sup>。

(2)异常带岩石圈厚度最小。该带范围内岩石圈厚度最小,多在50~80 km之间(图3),例如,西太平洋边缘海及沟弧体系岩石圈平均厚度仅有55~65 km,华北裂谷系岩石圈平均厚度为70~73 km,华南地块岩石圈平均厚度为75~79 km,其岩石圈构造类型属减薄型碎块状岩石圈(图3)。而在亚洲大陆西部岩石圈厚度均大于150 km以上,在大陆克拉通地区和青藏高原存在大于180~220 km的大陆根或岩石圈根(图3)。地震面波层析成像发现,西太平洋地区岩石圈厚度较大,多在70~110 km之间(图3、4)。

(3)异常带软流圈厚度最大。巨型地震低速异常带软流圈底界面埋藏最深,一般在300 km左右,部分深达330~340 km以上。巨型地震低速异常带软流圈厚度比邻区大,通常在200 km以上,最厚可达250~300 km(图5),从而为巨型裂谷体系的形成与演化提

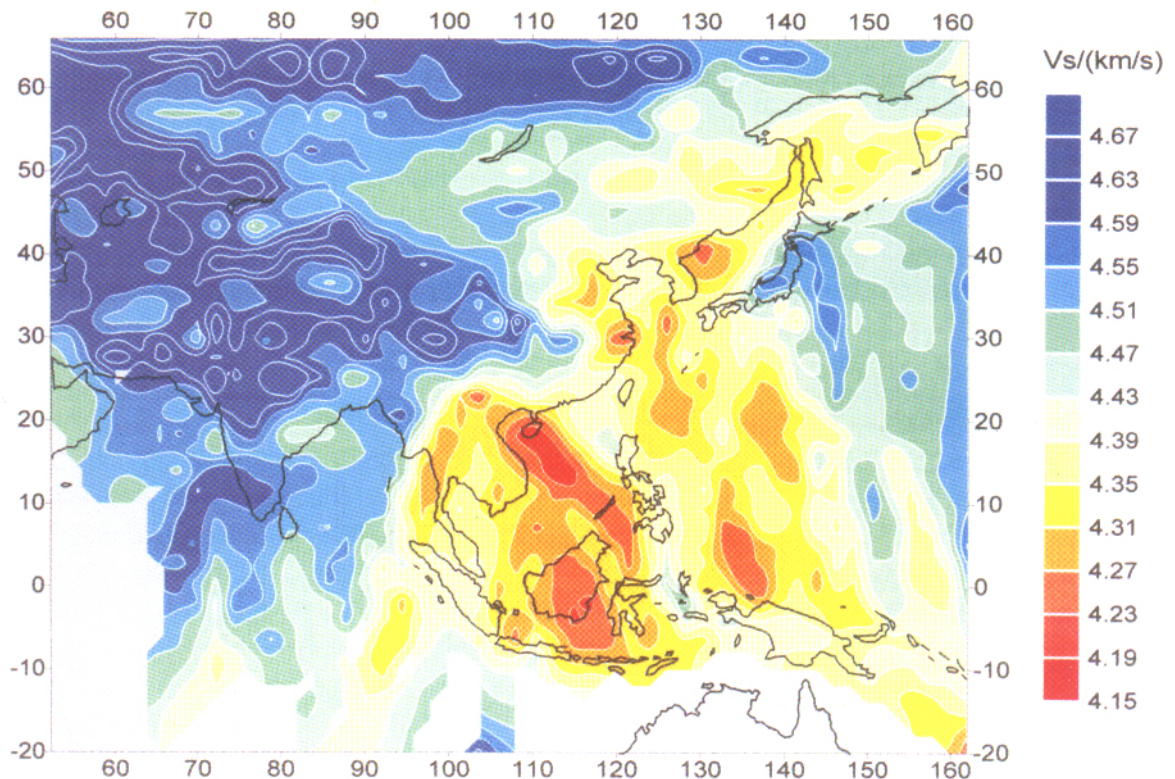


图1 东亚西太平洋地区 $V_s$ 速度分布图(深130km)

Fig. 1  $V_s$  velocity distribution in marginal seas between East Asia and the Western Pacific (depth 130 km)

① 洪学海. 中国大陆地壳上地幔S波品质因子三维层析成像. 成都理工大学博士学位论文, 2001.

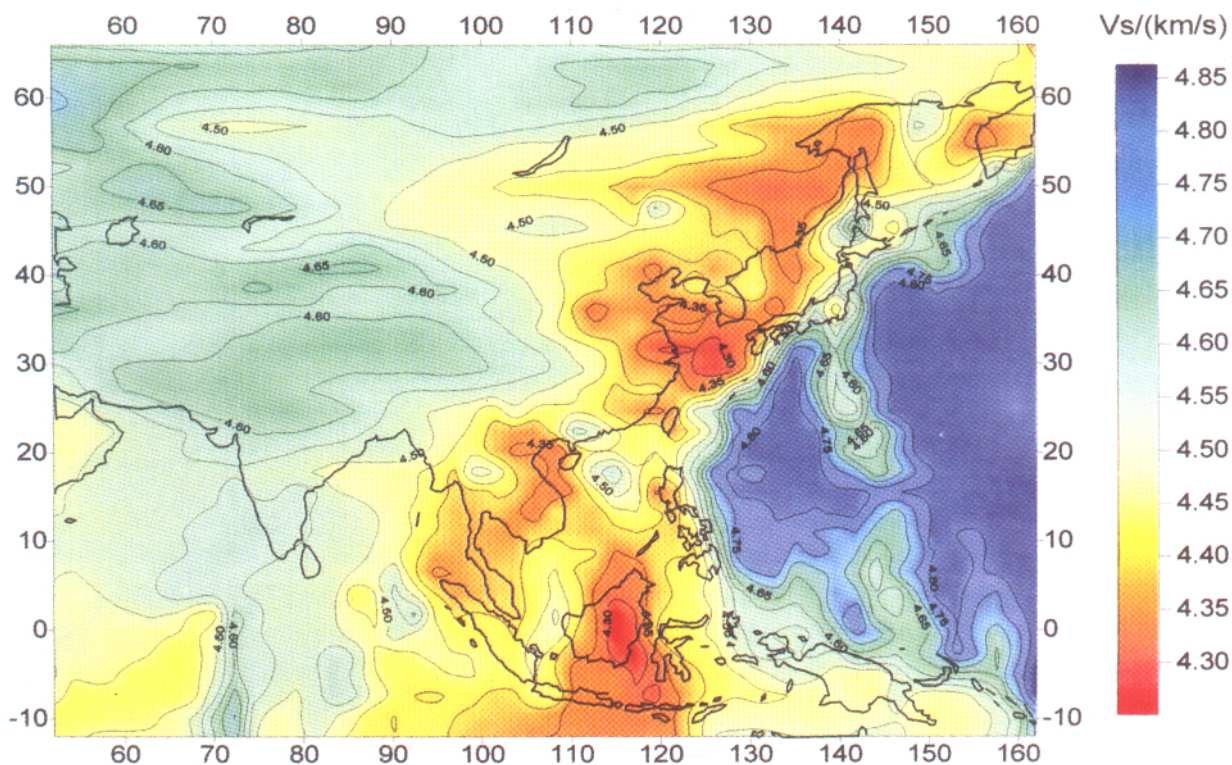


图2 东亚西太平洋岩石圈中下部速度分布图

Fig. 2 Vs velocity distribution of the lower lithosphere in East Asia and the Western Pacific

供了物质及热动力条件。Турезов<sup>[6]</sup>根据热流研究指出,该带是热流高异常带。对中国东部地幔捕虏体的地热—地压研究结果表明,其热剖面可以与大洋岩石圈的热剖面进行对比,而在蒙古的塔里亚特地区大陆地幔地温相当于大洋中脊的地温<sup>[7]</sup>。

(4)异常带软流圈Vs速度值最低。该巨型地震低速异常带软流圈Vs速度普遍比邻区低,多在4.15~4.28 km/s之间,其中南海及婆罗洲Vs速度最低,在4.10~4.22 km/s之间,而邻区软流圈内Vs速度高,多在4.20~4.35 km/s以上。为了进一步研究软流圈结构特征,笔者将软流圈内Vs小于4.30 km/s的地区称为“软内极低速带”,通过分析研究发现,从南纬6°至北纬20°之间的南海地区,深80~220 km间存在一近南北向“工”字型极低速异常体(图6)。

(5)异常带软流圈内高速块体特性。在中国东部,特别是对华南地区东段及东南亚地区软流圈速度结构研究发现,软流圈内存在规模不等的高速块体,笔者将这些小型高速块体暂称为“软内高速块

体”<sup>①</sup>。高速块体内Vs速度为4.40~4.50 km/s,部分高达4.50~4.65 km/s,它们在软流圈内均比周围Vs速度值高(图6、7)。华南地区这些软流圈内小型高速块体可能是岩石圈底部发生拆沉作用,在重力作用下,岩石圈底部的高速块体下沉到软流圈内所致。

上述巨型Vs低速异常带的岩石圈和软流圈三维Vs速度结构,完全不同于东太平洋边缘板块俯冲带的岩石圈与软流圈Vs速度结构特征,却与太平洋洋中脊、大西洋洋中脊和印度洋洋中脊及邻区的岩石圈与软流圈Vs速度结构特征十分相似<sup>[11]</sup>,从全球天然地震Vs速度结构显示,东亚至西太平洋间巨型地震Vs低速异常带比大西洋洋中脊低速异常带规模大得多,而且速度更低。由此推断,东亚至西太平洋间巨型低速异常带具有洋中脊扩张特性,它可能是古东亚大陆中生代中晚期以来发育的巨型裂谷体系的深部特性之一。华北裂谷盆地热状态研究表明,中生代时期其热流值与现今洋中脊热流值相吻合( $>100 \text{ mW/m}^2$ ),具有以洋脊型等温线为主的特

① 蔡学林,朱介寿,曹家敏,等. 上扬子地块岩石圈与软流圈结构及大陆动力学, 2000.

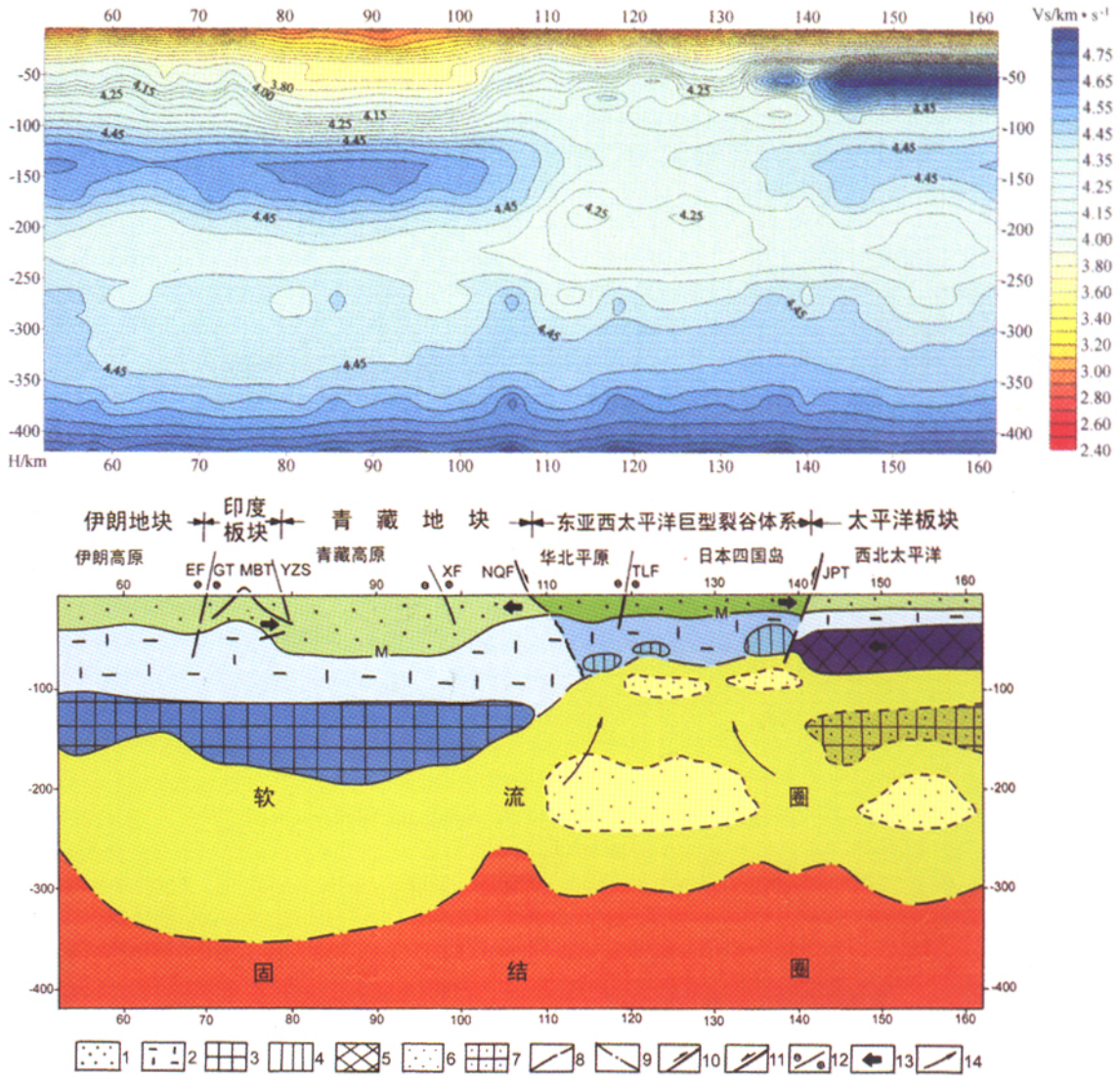


图3 东亚西太平洋巨型裂谷体系 (中段) 岩石圈与软流圈结构图

Fig. 3 Lithosphere and asthenosphere structures in the giant extensional rift system in East Asia and the Western Pacific (central section)

上图系天然地震面波层析成像 $V_s$ 速度结构剖面图(北纬 $34^\circ$ ),下图系地质解析图:1—岩石圈地壳;2—岩石圈上地幔;3—印度板块岩石圈和欧亚板块、伊朗地块及青藏地块中下部高速块体或幔块构造;4—东亚西太平洋巨型裂谷体系岩石圈中、下部高速块体或幔块构造;5—太平洋板块岩石圈中、下部高速块体或幔块构造;6—软流圈内部极低速带;7—软流圈内部高速块体;8—岩石圈底界面;9—软流圈底界面;10—大型逆冲断裂带或板块俯冲碰撞带;11—大型伸展正断裂带;12—大型走滑断裂带;13—板块及块体运移方向;14—软流圈物质流变方向;M—莫霍界面;EF—欧文走滑断裂带;GT—基尔塔尔逆冲断裂带;MBT—主边界逆冲断裂带;YZS—雅鲁藏布江碰撞缝合带;XF—鲜水河走滑断裂带;NQF—北秦岭伸展正断裂带;TLF—郯庐走滑断裂带;JPT—日本海沟;下图示裂谷体系减薄型碎块状岩石圈

性<sup>[2]</sup>。最近,陈国达<sup>[6]</sup>、任纪舜等<sup>[5]</sup>通过对东亚区域地质学和构造地质学的研究亦指出中生代时期存在古亚洲大陆和西太平洋古陆。根据地震及重力资料显示,西太平洋翁通爪哇海台具有大陆壳特性<sup>[3]</sup>,该区地壳厚度在28~33 km之间<sup>[4]</sup>,海台上分布

大量白垩纪火山熔岩。近期不少学者<sup>[5, 6, 10, 15, 16]</sup>亦指出,西太平洋边缘带具有陆壳性质,可能是淹没水下的亚洲大陆的东部边缘或者存在西太平洋古陆。其大型陆壳海台与大陆分离时间多集中在110~60 Ma时期<sup>[5]</sup>。

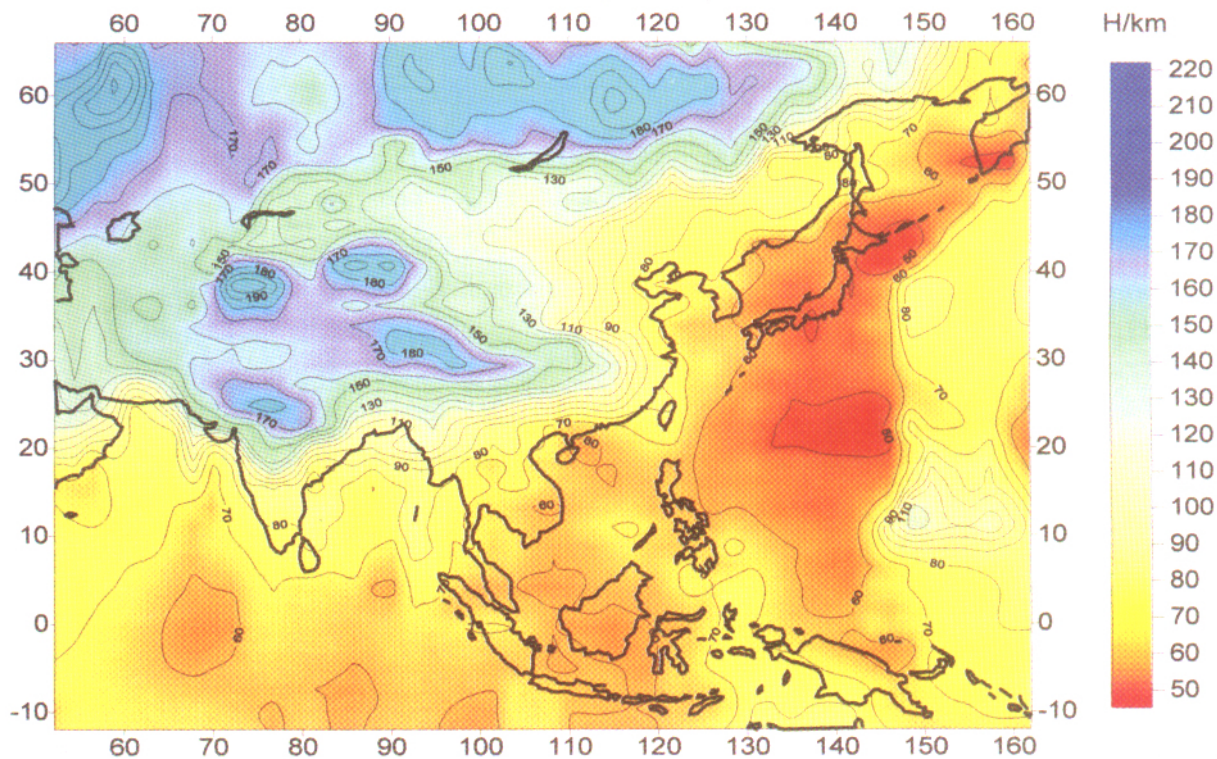


图4 东亚西太平洋岩石圈厚度分布图

Fig. 4 Lithospheric thickness in East Asia and the Western Pacific

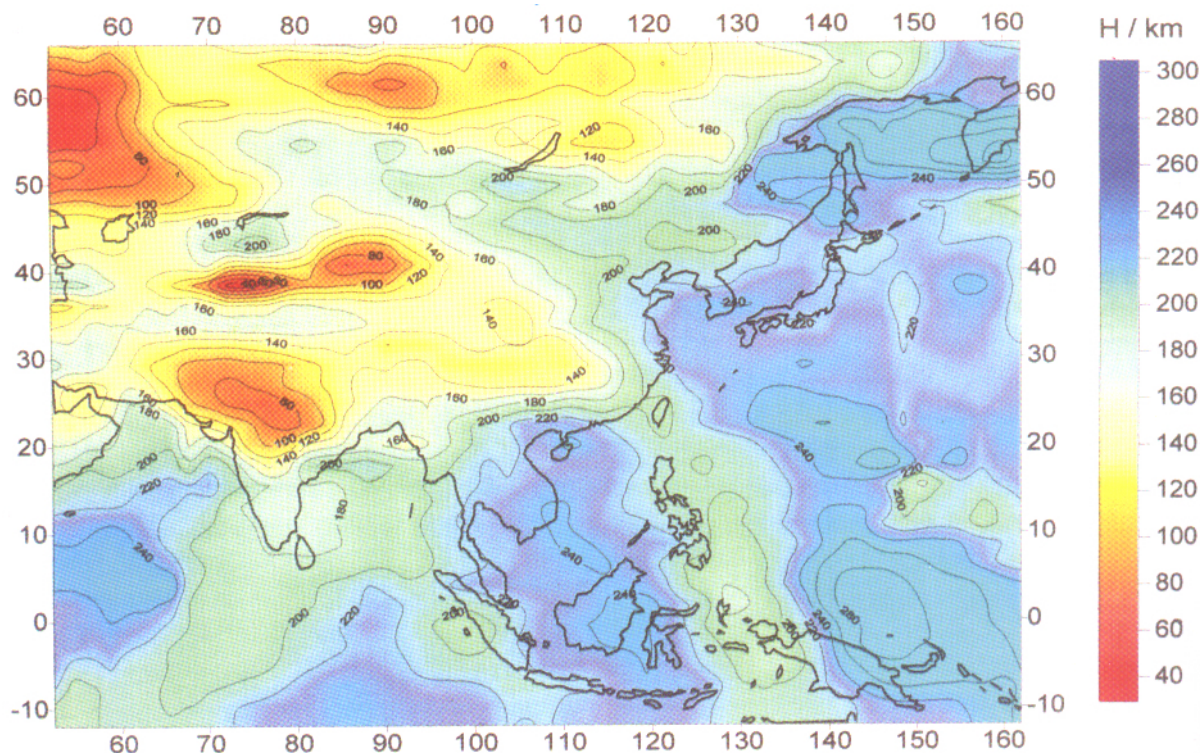


图5 东亚西太平洋软流圈厚度分布图

Fig. 5 Asthenosphere thickness in marginal seas between East Asia and the Western Pacific

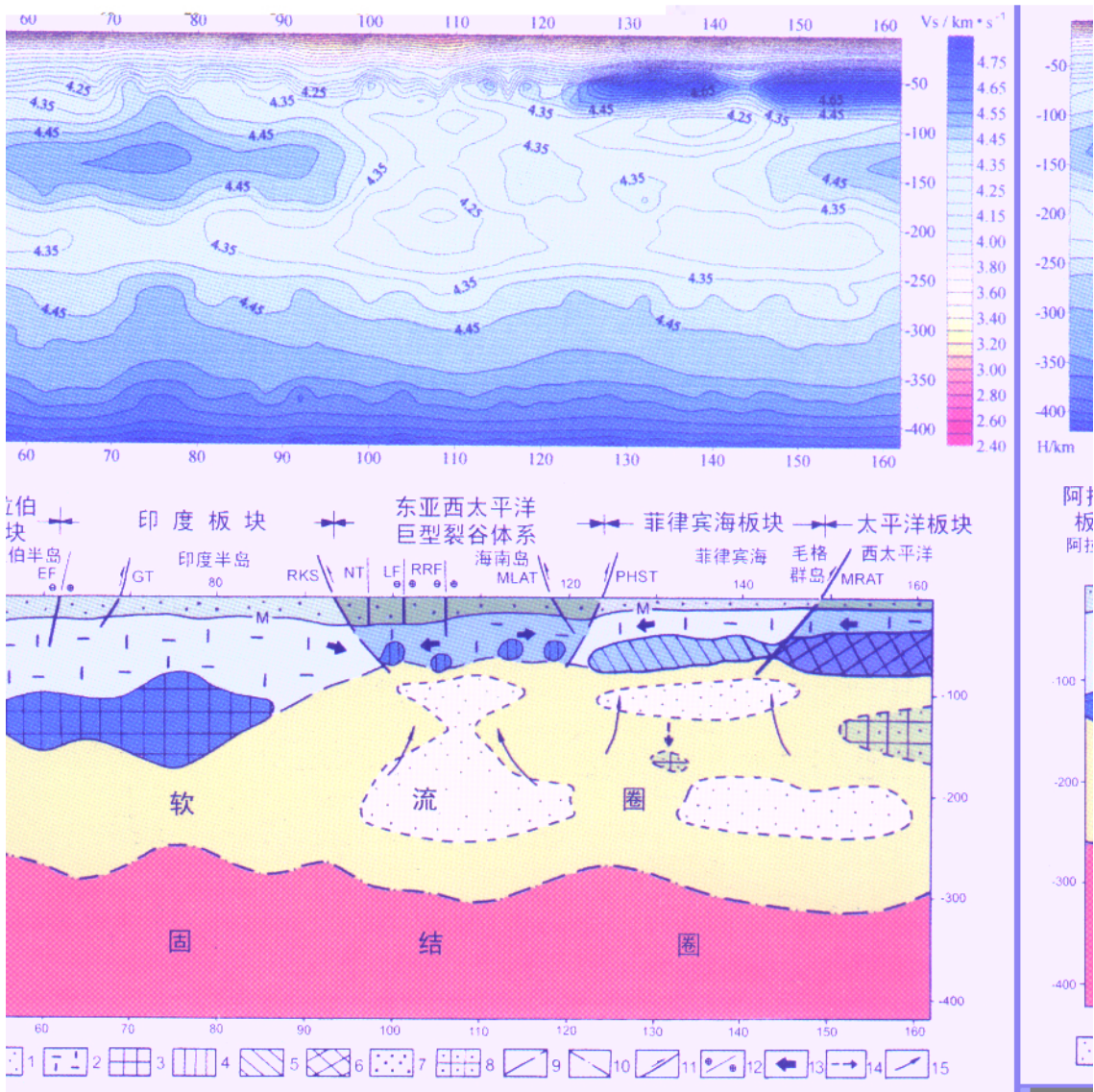


图6 东亚西太平洋巨型裂谷体系(南段)岩石圈与软流圈结构与动力学模式

Fig. 6 Lithosphere and asthenosphere structures and dynamic model in the giant extensional rift system in East Asia and the Western Pacific (south section)

上图系天然地震面波层析成像Vs速度结构剖面图(北纬20°),下图系地质解析图:1—岩石圈地壳;2—岩石圈上地幔;3—阿拉伯板块、印度板块岩石圈中、下部高速块体或幔块构造;4—东亚西太平洋巨型裂谷体系岩石圈中、下部高速块体或幔块构造;5—菲律宾海板块岩石圈中、下部高速块体或幔块构造;6—太平洋板块岩石圈中、下部高速块体或幔块构造;7—软流圈内部极低速带;8—软流圈内部高速块体;9—岩石圈底界面;10—软流圈底界面;11—大型逆冲断裂带或板块俯冲碰撞带;12—大型走滑断裂带;13—板块及块体运移方向;14—岩石圈与软流圈高速块体下沉方向;15—软流圈物质流变方向;M—莫霍界面;EF—欧文走滑断裂带;GT—基尔塔尔逆冲断裂带;RKS—若开山碰撞缝合带;NT—怒江碰撞缝合带;LF—澜沧江走滑断裂带;RRF—红河走滑断裂带;MLAT—马尼拉海沟;PHST—菲律宾海沟;MRAT—马里亚纳海沟;下图示裂谷体系减薄型碎块状岩石圈和软流圈“工”字型极低速体

## 2 东亚西太平洋巨型裂谷体系岩石圈与软流圈物质结构特性

天然地震面波层析成像显示,东亚西太平洋巨

型裂谷体系岩石圈厚度一般在50~80 km之间。而欧亚大陆若干克拉通地块,例如东欧地块、西伯利亚地块、塔里木地块、上扬子地块、印度板块北段等岩石圈厚度多在160~230 km之间(图4),它们存在大陆根

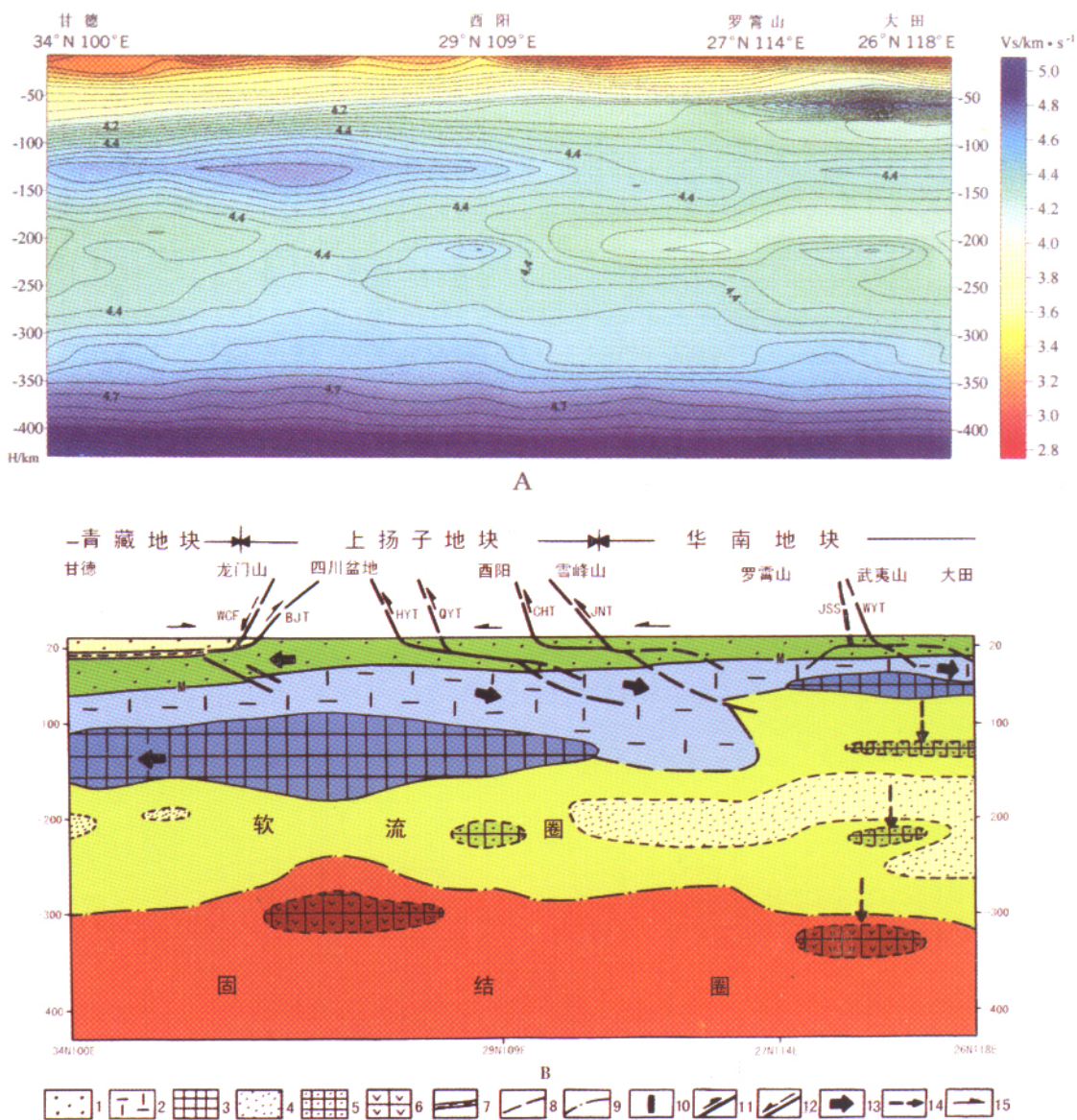


图7 龙门山—雪峰山—武夷山岩石圈及软流圈结构与大陆动力学模式

Fig. 7 Lithosphere and asthenosphere structures and continental dynamic model of the Longmen Mountains-Xuefeng Mountains-Wuyi Mountains

A—华南地区天然地震面波层析成像Vs速度结构剖面(起点位置34°N,100°E—终点位置16°N,118°E);B—地质解析剖面:

- 1—岩石圈地壳 2—岩石圈上地幔 3—青藏地块、上扬子地块及华南地块岩石圈中下部高速块体或慢块构造; 4—软流圈内部极低速带 5—软流圈内部高速块体 6—固结圈内部高速块体 7—壳内低速层 8—岩石圈底界面 9—软流圈底界面;
- 10—古板块俯冲碰撞缝合带; 11—大型逆冲断裂带; 12—早期逆冲断裂带,晚期伸展正断裂带; 13—板块及块体相对运移方向;
- 14—岩石圈、软流圈高速块体相对下沉方向; 15—地壳表层岩块相对运移方向; M—莫霍界面; WCF—汶川早期逆冲断裂带,晚期伸展正断裂带; BJT—北川—九顶山逆冲断裂带; HYT—华蓥山逆冲断裂带; QYT—七曜山逆冲断裂带; CHT—慈利—花垣逆冲断裂带; JNT—江南逆冲断裂带(或溁浦—黔阳逆冲断裂带); JSS—江山—绍兴古板块俯冲碰撞缝合带; WYT—武夷山逆冲断裂带

或岩石圈根 [7~22]。例如,塔里木地块岩石圈平均厚度达170 km,岩石圈根深可达195~210 km,西伯利亚地块岩石圈根深达195~205 km。华北克拉通地块东段

和下扬子克拉通地块与欧亚大陆其他克拉通地块比较,岩石圈存在明显拆沉减薄作用,现今岩石圈厚度减少约100~150 km,而华南地块现今岩石圈平均厚

度仅有78 km (图4、7)。该区体波层析成像研究发现,这部分岩石圈可能下沉到地幔1 500~2 000 km之间深处<sup>①</sup>。

根据中国东部岩石的电子探针和幔源岩石包体地质学、岩石学、地球化学的研究<sup>[2,23-25]</sup>,中国东部太古宙—元古宙岩石圈厚度在200~250 km之间,从元古宙到古生代末,岩石圈厚度没有多大变化,多在160~220 km之间,到中生代160~100 Ma时期,岩石圈发生大规模拆沉作用,岩石圈厚度迅速减少到60~80 km<sup>[2,20]</sup>,到新生代时期岩石圈厚度略有增加(图8)。与新生代岩石圈薄、热、易熔和不稳定相比,前寒武纪和古生代岩石圈具有厚、冷、难熔和稳定的性质(图8)。在安徽女山地区据新生代玄武岩中地幔包体温度曲线和推测的地幔绝热线交点确定岩石圈厚度在100 km左右<sup>[26]</sup>。上述这些特征与我们利用面波层析成像获得该地区岩石圈厚度70~115 km是吻合的(图4)。现今获得的岩石圈厚度基本反映了该区中生代中晚期以来岩石圈厚度,所以,岩石圈拆沉减薄作用主要

是中生代中晚期燕山运动的产物。由此显示,燕山运动及其所显示的岩石圈大规模拆沉减薄作用是显生宙以来东亚大陆岩石圈最重要的地质事件之一。

幔源岩石包体成分与地球化学研究显示,中国东部存在华北太古宙岩石圈地幔和华南元古宙岩石圈地幔,由于中生代以来燕山运动引起的岩石圈拆沉减薄作用,它们已被年青的、较富集的岩石圈地幔物质所代替,仅残存少量古老的岩石圈地幔<sup>[25,27]</sup>。由此表明,中国东部岩石圈地幔主体是新生的大陆岩石圈地幔。中国东部众多幔源包体成分特征研究表明,它们具有大洋橄榄岩成分演化特点,但是,它们不是俯冲至大陆边缘下方的大洋橄榄岩,因为它们与大洋橄榄岩成分有明显的区别<sup>[25,28,29]</sup>,前者为富集型地幔岩,后者(大洋橄榄岩)一般为中—高程度亏损的岩石组合,这种具有大洋橄榄岩成分演化特征,可能反映了大陆下方新生代岩石圈地幔作用的过程<sup>[30]</sup>。Flower等<sup>[30]</sup>和徐义刚<sup>[27]</sup>通过东亚新生代板内玄武岩地球化学研究指出,这些玄武岩是克拉通

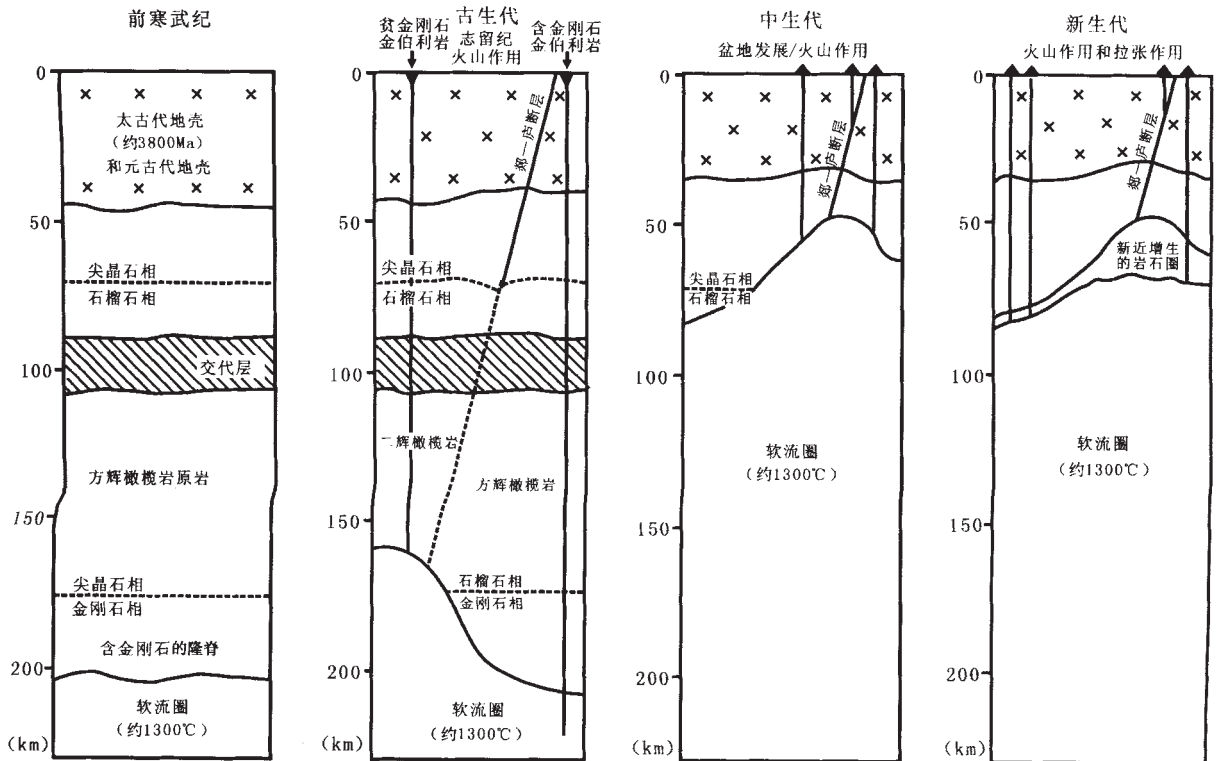


图8 华北地区克拉通不同时期岩石圈物质结构对比图 (据Menzies et al., 1998)

Fig. 8 Comparison of the lithospheric material structures beneath the North China craton in different periods of time (after Menzies et al., 1998)

① 梁春涛. 东亚及邻区地幔体波层析成像, 成都理工大学硕士学位论文, 2001.



地幔的熔融产物,很少受到太平洋板块消减作用的影响,因此,中国东部新生代玄武岩中的橄榄岩包体绝大多数为富集型或稍有亏损的地幔岩样品。由此表明,中国东部大陆下部整体上是一个新生的、受到很少改造的软流圈地幔<sup>[5]</sup>。

总之,通过幔源岩石包体成分研究表明,中生代中晚期以来东亚西太平洋地区存在大规模岩石圈拆沉减薄作用,巨大的软流圈物质上涌,以及强烈的地壳伸展作用和大型裂陷盆地形成,巨量岩浆侵入与喷出活动和大规模成矿作用,从而形成东亚西太平洋巨型裂谷体系。

### 3 东亚西太平洋大陆裂谷、边缘海与沟弧体系与周边板块作用

根据东亚西太平洋中生代以来火山-沉积地层学、岩石年代学和区域构造演化研究成果显示,大陆裂谷系是从中生代中晚期开始发育的<sup>[2,5,31-33]</sup>。例如,晚侏罗世至白垩纪伸展裂陷作用形成了以松辽沉积盆地为代表的裂陷盆地,到古近纪伸展裂陷作用规模更大,形成了以华北沉积盆地为代表的裂谷系。通过区域构造应力场研究,该区域应力场显示以NW-SE向拉张作用为主<sup>[64]</sup>。由此表明,东亚西太平洋巨型裂谷体系的形成大体与大西洋洋中脊扩张时代是同步进行的<sup>[65]</sup>,而且该巨型裂谷体系向北延伸过东西伯利亚后到北极圈与大西洋洋中脊相连,并将地球分成东西两半部分。

边缘海是在大陆裂谷系基础上发展起来的,南海北部边缘裂谷系中发育白垩纪—早渐新世陆相与海相沉积地层<sup>[66]</sup>。深海大洋钻探研究成果显示<sup>[67]</sup>,边缘海扩张年代是非常年青的,从充填沉积物地质年代学研究,边缘海一般从新生代渐新世开始伸展,主导扩张时期为中渐新世到中中新世(32~13 Ma),海盆扩张时期短暂,一般不超过25 Ma<sup>[68]</sup>。例如,南海从65~50 Ma开始拉张裂解,但南海中央洋壳年龄为32~17 Ma<sup>[69]</sup>,因此,南海中央海盆在晚渐新世—早中新世末发生海底扩张,并出现次生洋壳,通过ODP1148站海洋沉积物元素地球化学变化研究,证实南海中央海盆从32 Ma开始扩张,到17~15 Ma扩张停止,转变为挤压环境<sup>[67,40]</sup>。通过对哀牢山—红河走滑断裂带内变质岩年代学与区域高钾岩石年代学研究,获得哀牢山—红河走滑断裂带活动时期大体在27~17 Ma之间,由此表明,南海中央海盆

扩张先于印度板块向欧亚板块俯冲碰撞引起印支地块的挤出,印支地块挤出主要引起南海扩张脊从近EW向转变为NE—SW向以及海洋沉积物的间断等<sup>[60,41]</sup>。高分辨地震层析成像显示,哀牢山—红河走滑断裂带可能向南东穿过南海海盆延伸到印度尼西亚班达海,将南海海盆分为南北两部分。有的边缘海,如日本海、南海、苏禄海和苏拉威西海等在扩张停止后,于17~15 Ma以来趋向挤压环境,这种挤压环境的形成可能与澳大利亚板块向欧亚板块俯冲有关<sup>[60,37]</sup>。

从冲绳海槽具有快速沉降、强烈火山活动、张性断层性质、强地震活动以及高热流值等特征显示,冲绳海槽正处在大陆地壳拉张最强烈阶段,海槽主要伸展时期约2 Ma前,冲绳海槽伸展过程可能同时具有高温地幔物质上涌、岩石圈拆沉减薄、莫霍面上隆显示的主动伸展,以及叠加了与琉球俯冲带引起的弧后扩张的被动伸展<sup>[62]</sup>。位于菲律宾海板块与太平洋板块间的马里亚纳海槽是现今仍在扩张的海槽,东侧为马里亚纳岛弧带与俯冲带,对其中弧后扩张脊玄武岩K—Ar法年龄测定结果,多数年龄值为3.5~1.5 Ma<sup>[63]</sup>,因此,马里亚纳海槽弧后扩张和相伴随的玄武岩浆活动是晚上新世至更新世以来形成的。菲律宾海板块西侧不仅发育菲律宾海板块向西俯冲形成的菲律宾海俯冲带,而且发育欧亚板块向东俯冲形成的马尼拉俯冲带。刘光鼎等<sup>[6]</sup>指出,马尼拉俯冲带是南海中央海盆停止扩张后,于晚中新世至全新世发育的。地震面波层析成像三维 $V_s$ 速度结构解析结果表明,马尼拉俯冲带是欧亚板块向菲律宾海板块俯冲碰撞的产物(图6),它叠加在早期形成的边缘海之上。俯冲带向北延伸到台湾省西侧与基隆—南投断裂带等相连,构成十分壮观的双向俯冲碰撞构造格局<sup>[64]</sup>,主要碰撞期在3Ma左右。因此,越来越多事实表明西太平洋边缘沟弧体系是新生代中晚期以来形成的。

这些事实表明,东亚大陆边缘裂谷系是中生代中晚期开始发育的,而西太平洋边缘海是在大陆裂谷系形成基础上,于新生代中晚期在拉张条件下形成的<sup>[60]</sup>,并受到印度板块向欧亚板块碰撞的影响。西太平洋边缘沟弧体系是太平洋板块、菲律宾海板块、澳大利亚板块和欧亚板块相互作用的产物。因此,东亚西太平洋巨型裂谷体系的主体是中生代中晚期以来岩石圈主动伸展变形动力学作用下形成的,仅在新生代中晚期叠加了西太平洋沟弧盆体系。

## 4 东亚大陆巨型裂谷体系动力学演化模式

根据沉积地质学、同位素地质年代学、构造地质学、地球物理与地球化学的分析和研究,东亚大陆巨型裂谷体系动力学演化大致可划分为4个构造演化阶段:

(1)古东亚大陆及陆内造山带形成阶段( $T_1-J_2$ , 250~150 Ma)。古生代末至中生代早期印支运动末在南北向挤压动力作用下,最终完成华北地块与西伯利亚地块,扬子地块与华北地块,华南地块与扬子地块,印支地块与扬子地块等的碰撞拼合为一整体,构成欧亚板块构造的一部分<sup>[5,16,45]</sup>,形成了以近东西向构造线为主导的陆内造山带及古东亚大陆,导致了东高西低的地貌构造特征,仅在局部地区存在残留海。印支运动使东亚及西太平洋间大陆与海洋重新配置,从而进入构造演化的新阶段,因此,印支运动是亚洲乃至全球一次极重要的构造运动。

(2)东亚大陆边缘裂谷系形成阶段( $J_3-E_1$ , 150~55 Ma)。经过一段时间相对稳定的构造演化之后,到中生代中期晚侏罗世开始的燕山运动,岩石圈由相对稳定转向强烈活化<sup>[6]</sup>,此阶段地球演化可能发生不均匀有限热膨胀<sup>[6]</sup>,地球动力学体制发生了根本的转变,由以SN向主压应力场为主的挤压变形,转向以近EW向为主的巨大的岩石圈伸展变形(图3、6),从而使东亚大陆构造格局发生了翻天覆地的变化,在近东西向强大的伸展变形动力学作用下,引起东亚大陆边缘岩石圈强烈拆沉减薄(图7)与规模巨大的软流圈物质上涌加热,开始发育东亚大陆巨型裂谷体系以及新生岩石圈的形成(图8)在亚洲东部形成巨量花岗岩浆侵入和巨大的岩浆喷发活动,以及伴随大规模的成矿作用<sup>[87-49]</sup>。并形成一系列NNE向大陆伸展裂陷盆地和陆缘裂谷系,以及西太平洋古陆的裂解和沉陷<sup>[5,45]</sup>。不少地质与地球物理资料表明,东亚大陆巨型裂谷体系形成和演化大体与大西洋中脊扩张是同步进行的<sup>[65]</sup>。由此表明,燕山运动引起的岩石圈大规模拆沉减薄作用和巨大的软流圈物质上涌是显生宙以来东亚大陆岩石圈最重要的一次构造运动之一,研究它具有重大的学术价值和实际意义。

(3)东亚大陆边缘伸展海盆形成阶段( $E_2-N_1$ , 55~15 Ma)。从始新世开始,在近东西向大规模伸展

裂陷作用下,东亚大陆继续发育NNE向陆内裂谷系外,东亚大陆边缘开始发育伸展裂陷海盆地,到中渐新世(32~30 Ma)海底扩张达到高潮,估算其伸展距离达800~1300 km。边缘海部分陆壳转变为洋壳,同时发育洋中脊,例如,南海中央海盆在渐新世—早中新世末(32~17 Ma)发生海底扩张<sup>[89]</sup>。千岛海盆扩张期为30~15 Ma,日本海盆扩张期为28~15 Ma,帕里西维拉海盆扩张期为30~17 Ma。随后,由于周边动力学环境从伸展转向挤压,这些海盆在17~15 Ma停止扩张,因而未能将所有海盆和洋中脊联通,这是与现今典型的大洋洋中脊最大的差异所在。与此同时,由于印度板块向欧亚板块俯冲碰撞,引起印支地块等的挤出(27~22 Ma),导致南海扩张洋中脊从近E—W向转变为NE—SW向以及引起南海西南海盆的扩张<sup>[90]</sup>。

(4)东亚西太平洋大陆裂谷、边缘海与沟弧体系叠加形成阶段( $N_2-Q$ , 15 Ma至现在)。新生代中晚期以来,除整体近东西向伸展变形外,还受太平洋板块、菲律宾海板块向欧亚板块挤压俯冲碰撞和澳大利亚板块向欧亚板块俯冲碰撞,最终形成和发育了现今的大陆裂谷、边缘海及其沟弧体系。例如,南海等海盆于17~15 Ma停止扩张,使海盆转变为挤压发展阶段,并叠加在东亚西太平洋巨型裂谷体系之上。此时多数边缘海停止扩张,转向挤压发展阶段,此阶段,不仅太平洋板块、菲律宾海板块向欧亚板块俯冲碰撞,而且发生欧亚板块向菲律宾海板块的俯冲作用(图6),从而在晚中新世至第四纪发育马尼拉俯冲带等<sup>[91]</sup>。经过上述构造演化形成现今东亚大陆至西太平洋间大陆裂谷、边缘海与沟弧体系构造格局,并叠加在东亚大陆裂谷体系上。

研究过程中得到李廷栋院士、袁学诚教授、孙若昧研究员及彭大钧、杨巍然、万天丰教授等的指导、帮助和研讨,袁学诚教授审阅了全文,在此,一并表示衷心感谢。

### 参考文献:

- [1] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 1982, 7: 611~616.
- [2] 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 等. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造 [J]. *地质学报*, 1983, 57 (1): 22~32.
- [3] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理图集 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 56~91.

- [4] 杨巍然, 孙继源, 纪克诚, 等. 大陆裂谷对比——汾渭裂谷系与贝加尔裂谷系例析 [M] 武汉: 中国地质大学出版社, 1995. 100~121.
- [5] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明 [M] 北京: 地质出版社, 1998. 1~35.
- [6] 陈国达. 亚洲陆海壳体大地构造 [M] 长沙: 湖南教育出版社, 1998. 67~281.
- [7] Smith A D. The geodynamic significance of the DUPAL anomaly in Asia [A] In: Flower MFJ ed. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia [C] Geodynamics Ser. 27. Washington, D.C.: AGU, 1998. 89~105.
- [8] 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质 [J] 高校地质学报, 2000, 6 (6): 379~388.
- [9] 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 等. 东亚西太平洋边缘海高分辨率地震层析成像 [J] 中国大洋钻探通讯, 2001, (6): 4~7.
- [10] Тезов И К著, 何志桐译. 亚洲—澳洲—太平洋过渡带的大地构造、地球动力学及地质特征 [J] 地球物理学进展, 1991, 6 (1): 99~113.
- [11] Ekström G J, Tromp J E, Larson W F. Measurements and global models of surface wave propagation [J] J. Geophys. Res., 1997, 102: 8137~8158.
- [12] Menzies A M and Xu Yigang. Geodynamics of the North China Craton [A] In: Flower M F J ed. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia [C] Geodynamics Ser. 27. Washington, D.C.: AGU, 1998. 155~165.
- [13] 王登红. 地幔柱及成矿作用 [M] 北京: 地震出版社, 1998. 45~61.
- [14] Gladchenko T P. Crustal structure of the Ontong Java Plateau: Modeling of new gravity and existing seismic data [J] J. Geophys. Res., 1997, 102 (B10): 22711~22729.
- [15] 和政军, 任纪舜. 大洋中的水下陆块 [J] 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14 (2): 71~80.
- [16] 许东禹, 刘锡清, 张训华, 等. 中国近海地质 [M] 北京: 地质出版社, 1997. 179~262.
- [17] 袁学诚, 左愚, 蔡学林, 等. 华南板块岩石圈构造与地球物理 [A] 见: 八十年代中国地球物理学进展 [C], 北京: 学术书刊出版社, 1989. 243~250.
- [18] 袁学诚. 中国地球物理图集 [M] 北京: 地质出版社, 1996. 113~199.
- [19] 朱介寿, 曹家敏, 李显贵, 等. 中国及其邻区地球三维结构初始模型的建立 [J] 地球物理学报, 1997, 40 (6): 627~648.
- [20] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根—柱构造——大陆动力学的钥匙 [M] 北京: 地质出版社, 1996. 1~83.
- [21] 蔡学林, 彭大钧, 刘援朝, 等. 塔里木盆地变形构造格局及其动力学模式——兼论楔入造山推覆成盆作用 [J] 成都理工学院学报, 1997, 24 (2): 29~39.
- [22] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 欧亚大陆及西太平洋岩石圈构造样式及地球动力学 [A] 见: 中国地球物理学会年刊 (2000) [C] 武汉: 中国地质大学出版社, 2000. 271.
- [23] 鄂莫岚, 赵大升. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体 [M] 北京: 科学出版社, 1987. 10~478.
- [24] 钟应先, 刘援朝, 蔡学林. 湖南道县玄武岩中麻粒岩包体初步研究 [J] 成都地质学院学报, 1993, 20 (1): 56~61.
- [25] 徐夕生, 蔡元峰, 周新民. 中国东南部新生代岩石圈地幔研究 [J] 南京大学学报 (自然科学), 2000, 36 (6): 773~779.
- [26] Xu Xisheng, O'Reilly S Y, Griffin WL, et al. The Nature of the Cenozoic Lithosphere at Nushan, Eastern China [A] In: Flower M F J ed. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia [C] Geodynamics Ser. 27. Washington, D.C.: AGU, 1998. 167~195.
- [27] 徐义刚. 拉张环境中的大陆玄武岩浆作用: 性质及动力学过程 [A] 见: 郑永飞主编. 化学地球动力学 [C] 北京: 科学出版社, 1999. 119~167.
- [28] Johnson K T M, Dich H J B, Shimizu N. Melting in the oceanic upper mantle: an ion microprobe study of diopside in abyssal peridotites [J] J. Geophys. Res., 1990, 95: 2661~2678.
- [29] Niu Y. Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges: Evidence from Abyssal peridotites [J] Jour Petrol., 1997, 38: 1047~1074.
- [30] Flower M F J, Tamaki K, and Hoang M. Mantle extrusion: A model for dispersed volcanism and DUPAL-like asthenosphere in east Asia and the western Pacific [A] In: Flower M F J ed. Mantle Dynamics and Plate interactions in East Asia [C] Geodynamics ser. 27. Washington D.C.: AGU, 1998. 67~87.
- [31] 李思田. 中国东部及邻区中、新生代盆地演化及地球动力学背景 [J] 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. 1~225.
- [32] 谯汉生, 纪友亮, 姜在兴. 中国东部大陆裂谷与油气 [M] 北京: 石油工业出版社, 1999. 6~65.
- [33] 谢奕克, 马荣生, 张禹慎, 等. 华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造 [M] 北京: 地质出版社, 1996. 1~173.
- [34] 万天丰. 中国东部中、新生代板内变形构造应力场及其应用 [M] 北京: 地质出版社, 1993. 12~37.
- [35] 吴树仁, 陈庆宣, 谭成轩. 洋脊分段研究进展 [J] 地质科技情报, 1998, 17 (2): 1~6.
- [36] 姚伯初, 曾维军, Hayes D E, 等. 中美合作调查南海地质专报 (GMSCS) [M] 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. 1~196.
- [37] 金性春, 周祖翼, 汪品先. 大洋钻探与中国地球科学 [M] 上海: 同济大学出版社, 1995. 181~205.
- [38] Tamaki K, and Honza E. Global tectonics and formation of marginal basins: Kule of the western Pacific [J] Episodes, 1991, 14 (6): 224~229.
- [39] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Sea [J] Geophysical Monograph, 1980, 23: 89~104.
- [40] 李献华, 韦刚健, 刘颖, 等. 南海扩张先于印支挤出 [J] 中国大洋钻探通讯, 2001, (6): 45~47.
- [41] 陈文寄, 李齐. MDD模式与快速冷却事件 [J] 地学前缘, 1999, 6 (4): 371~377.
- [42] 周祖翼, 廖宗廷, 金性春, 等. 冲绳海槽—弧后背景下大陆张裂的最高阶段 [J] 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21 (1): 51~55.
- [43] 高永军, 穆治国, 吴世迎. 马里亚纳海槽玄武岩K-Ar地质年代

- 学和地球化学研究 [J] 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20 (3): 53~59.
- [44] Lu Chia-Yu, Yu Shui-Beih and Chu Hao-Tsu. Neotectonics of the Taiwan Mountain Belt [A] In: Flower MFJ ed. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia [C] Geodynamics Ser. 27. Washington, D.C.: AGU, 1998.301~315.
- [45] 吴根耀, 马力, 钟大赉, 等. 滇桂交界区印支期增生弧型造山带: 兼论与造山作用耦合的盆地演化 [J] 石油实验地质, 2001, 23 (1) 8~18.
- [46] 王鸿祯. 地球的节律与大陆动力学的思考 [J] 地学前缘, 1997, 4 (3-4): 1~12.
- [47] 华仁民, 毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发 [J] 矿床地质, 1989, 18 (4) 300~308.
- [48] 毛景文, 王志良. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨 [J] 矿床地质, 2000, 19 (4) 289~296.
- [49] 裴荣富, 邱小平, 尹冰川, 等. 成矿作用大爆发及异常与巨量金属堆积 [J] 矿床地质, 1999, 18 (4) 333~340.

## Structure and dynamics of lithosphere and asthenosphere in the gigantic East Asian–West Pacific rift system

CAI Xue-lin<sup>1</sup>, ZHU Jie-shou<sup>2</sup>, CAO Jia-min<sup>2</sup>, YAN Zhong-qiong<sup>2</sup>,  
YANG Zheng-xi<sup>1</sup>, HONG Xue-hai<sup>2,3</sup>

1. *Institute of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*

2. *Department of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*

3. *Department of Computer Science and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*

**Abstract:** Based on the seismic S-wave tomography, the authors carried out a systematic study of the speed structures of the lithosphere and asthenosphere of Eurasia and the West Pacific, and found a gigantic low-velocity anomaly zone between East Asia and the West Pacific. According to this discovery, combined with the tectonic, mantle petrological and geochemical characteristics, as well as other geophysical features, a mega-rift system is defined in the region. The 3D seismic Vs speed structures of the lithosphere and asthenosphere are very similar to those of the Mid-Pacific, Mid-Atlantic, and Mid-Indian ridges and their neighboring regions, but notably different from those of the present plate subduction zone on the East Pacific margin. On the basis of a further discussion on the dynamic characteristics of this region, it is concluded that the rift system resulted from the massively active extensional deformation and strong delamination and thinning of the lithosphere, formation of large rift basins, and upwelling and heating of a large amount of the asthenospheric substances since the Mid-Late Mesozoic. Marginal seas developed on the basis of the continental rift system, and the main extension stage is determined to be from the middle Oligocene to middle Miocene (32–13 Ma). The extensions of these marginal seas had ended after the period from 17 to 15 Ma; as a result not all of the seas were connected with the mid-ocean ridges. Four stages of the tectonic-deformational dynamic evolution may be distinguished, and it is considered that the tectonic superposition of interactions of various neighboring plates resulted in the formation of the continental rifts, marginal seas, and trench-arc-basin systems between present East Asia and the West Pacific since the Mid-Late Cenozoic.

**Key words:** gigantic longitudinal extensional rift system; giant longitudinal seismic low-velocity zone; seismic tomography; lithosphere; asthenosphere; pyrolyte; East Asian continent; West Pacific