

黄忠贤, 胥 颐, 郝天珧等. 中国东部海域岩石圈结构面波层析成像. 地球物理学报, 2009, 52(3): 653~662

Huang Z X, Xu Y, Hao T Y, et al. Surface wave tomography of lithospheric structure in the seas of east China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(3): 653~662

中国东部海域岩石圈结构面波层析成像

黄忠贤¹, 胥 颐², 郝天珧², 彭艳菊¹, 郑月军¹

1 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘 要 本文通过面波层析成像得到了中国东部海域及邻近地区的地壳上地幔 S 波速度图像, 给出了主要构造单元的区划及其结构特征, 并讨论了速度结构与现今构造活动及构造演化历史的关系. 研究区内中下地壳的平均速度与地震活动存在比较显著的关系, 强震基本都发生在低速区内或高低速过渡区. 太行山以东地壳内存在几条北西向低速带, 其中张家口—渤海地震带下方的低速带最为显著. 东部海域划分成北黄海、南黄海、东海、和冲绳海槽等 4 个构造块体. 北黄海具有较薄较高速的岩石圈, 与南华北盆地类似, 推测是中生代特提斯洋向北俯冲造成岩石圈减薄的遗迹. 北华北地区具有低速的地壳和较厚的岩石圈, 岩石圈地幔速度偏低且上下比较均匀, 可能反映中生代沿北方缝合带持续碰撞作用的特点. 南黄海具有相对较厚的岩石圈, 较多地保存了下扬子克拉通的特征. 在下扬子与华北地块的拼合过程中, 洋壳俯冲可能是北黄海和苏皖地区上地幔低速特征的成因. 在 125°E 以东的朝鲜半岛地区未发现这一拼合过程的遗迹. 有可能整个朝鲜半岛都是华北地块的一部分; 但也有可能是太平洋俯冲和日本海张开的的作用完全改造了朝鲜半岛的岩石圈上地幔, 抹去了以往构造运动的痕迹. 东海地区的地壳厚度, 特别是岩石圈厚度向冲绳海槽方向减小, 反映出菲律宾海板块俯冲在弧后广大地区都有影响. 冲绳海槽地区可见俯冲的菲律宾海板片以及板片上方显著低速的地壳和上地幔, 为冲绳海槽的弧后扩张机制提供了证据.

关键词 中国东部, 海域, 岩石圈, 面波, 层析成像

文章编号 0001-5733(2009)03-0653-10

中图分类号 P315

收稿日期 2008-12-20, 2009-02-04 收修定稿

Surface wave tomography of lithospheric structure in the seas of east China

HUANG Zhong-Xian¹, XU Yi², HAO Tian-Yao², PENG Yan-Ju¹, ZHENG Yue-Jun¹

1 *Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China*

2 *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China*

Abstract This paper presents the S-wave velocity structure of crust and upper mantle in the marginal seas of east China resulted from surface wave tomography, describes the structural features of various tectonic units in the region, and discusses their relation with present tectonic activity and past evolution history. The average velocity of the middle and lower crust has a remarkable relation with strong earthquakes, which took place within the low velocity zones or along the boundaries between low and high velocity. There are several NW-trending low velocity zones in the crust east of the Taihang Mountains, among them the one beneath the Zhangjiakou-Bohai seismic belt is most conspicuous. The sea area can be divided into 4 tectonic units, i. e., the northern and southern Yellow Sea, the East China Sea, and the Okinawa Trough. The northern Yellow Sea has a thin and high velocity lithosphere similar to that of southern North China Basin, presumably resulted from Mesozoic lithosphere thinning caused by the northward

基金项目 国家自然科学基金(40574038), 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-234-2)和公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2007-1)资助.

作者简介 黄忠贤, 男, 1943 年生, 研究员, 主要从事地震波和地球结构方面的研究. E-mail: zhxhuang@eq-icd.cn

subduction of Paleotethys. In contrast the northern North China has a low velocity crust and thicker lithosphere, the velocity of lithospheric mantle is rather low and homogeneous vertically, probably indicating the result of long-lasting Mesozoic collision along the northern suture zones. The southern Yellow Sea has a thicker lithosphere with the characteristics of lower Yangtze craton. In the suturing process of lower Yangtze and North China the subduction of oceanic lithosphere might have caused the low velocity features of the upper mantle in northern Yellow Sea and Su-Wan region. However, such suturing relics were not found in Korea Peninsula east of 125°E. It may imply that the whole Korea Peninsula is a part of North China Craton, or the effect of Pacific subduction and Japan Sea opening might have totally reformed the lithospheric mantle beneath the peninsula and erased the sign of past suturing. In the East China Sea the crust, especially the lithosphere thins towards the Okinawa Trough, indicating that the subduction of Philippine plate affects a vast back-arc area. In the Okinawa Trough the subducting Philippine slab and the conspicuously low velocities above the slab are clearly seen, providing evidence for the back-arc spreading mechanism of the Okinawa Trough formation.

Keywords East China, Sea, Lithosphere, Surface wave, Tomography

1 引言

中国东部海域位于欧亚板块和菲律宾海/太平洋板块俯冲带之间,是研究中国大陆构造演化历史和现今构造运动的一个重要部位,也是我国勘探开发油气资源的重要区域.对该区域的地壳深部及上地幔结构已开展了相当数量的研究^[1~9],但是对于大地构造单元的划分和各单元岩石圈/软流圈速度结构的特征,还存在一些有争论、需要深入研究的问题.面波层析成像是研究大尺度 S 波速度结构的有效方法.由于面波沿地球表面传播,可以对海域和其他难以布设地震台的区域进行有效采样,因此,虽然其分辨能力远低于体波,但是在地球内部结构的研究中有着广泛应用.利用面波层析成像方法已对中国东部海域的岩石圈结构开展了一些研究,或在大区域的研究中有所涉及,如文献^[10~13].近年来数字地震台网建设和流动观测台阵迅速发展,地震记录的数量和质量及面波路径覆盖情况有了很大改善.在此基础上我们对东亚地区重新作了面波层析成像反演.本文着重介绍中国东部海域及邻近陆域(图 1)的岩石圈速度结构,描述大地构造单元的区划和各单元岩石圈结构的特征,并对其与现今构造运动和构造演化历史的关系展开初步讨论.

2 资料和方法

本研究是我们过去工作^[14,15]的延续.在原有资

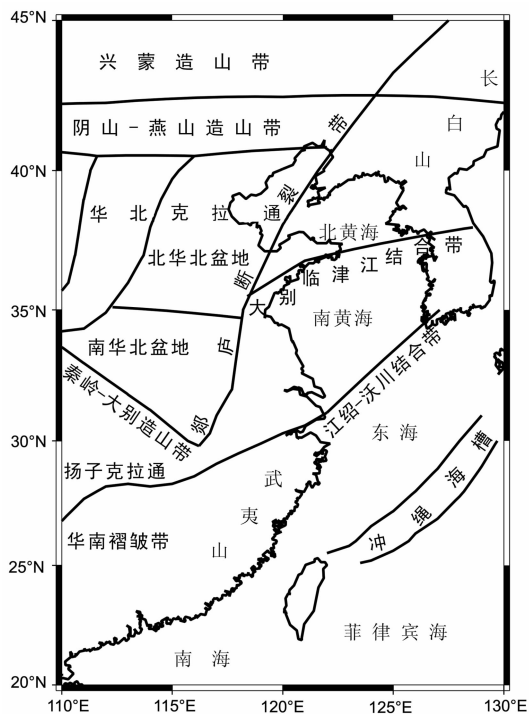


图 1 研究区域大地构造分区示意图

Fig. 1 A schematic tectonic map of the study region

料的基础上收集了大量新的面波记录,特别是注意收集了来自中等地震较短路径的短周期(10~40 s)记录,以期对地壳结构有较好的约束.在 10 s 周期,参与整个东亚地区反演的路径为 11268 条.图 2a 给出 39.8 s 周期的路径覆盖情况,总路径数为 13724 条,可看出本文的研究区域完全在路径覆盖良好的区域内.为了适应整个区域中路径密度不均匀的情况,反演中采用了非均匀网格,在本文的研究

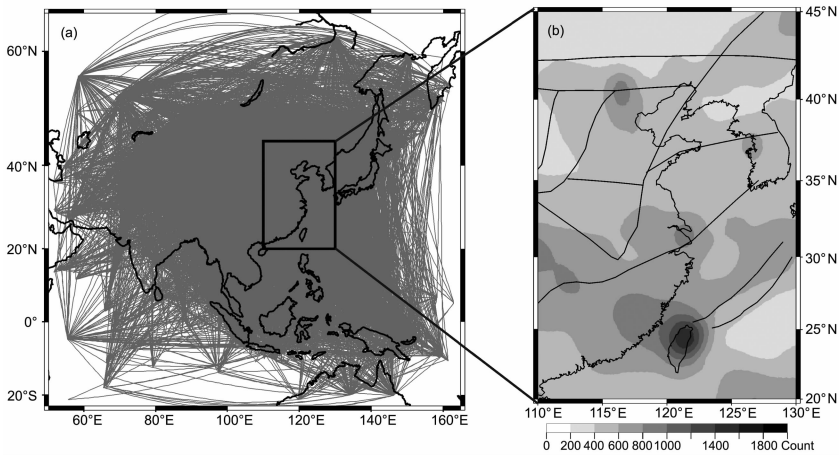


图2 显示层析成像反演中使用的瑞利面波路径(a),中部黑框表示本文的研究区域; 及本文研究区域中通过结点路径数的分布(b)

Fig. 2 Rayleigh wave paths used in the tomographic inversion (a), the rectangular frame in the middle indicates the study region of this article; Number of paths passing by each node (b)

区域中网格结点间距为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 结点间速度利用双线性内插计算. 图2b显示本文区域中经过每个结点的路径数, 即通过结点周围四个单元内的路径数, 最低为204, 最高为1636, 可看出绝大多数结点的路径数都在400以上. 利用基于多重滤波技术的时频分析方法提取了10~184 s的瑞利波群速度频散.

面波层析成像采用传统的两步法. 第一步将反演区域划分成可变尺寸的二维网格, 利用Occam反演方法求得各周期群速度的二维分布^[16], 从而得到每个网格结点的纯路径频散曲线. 第二步利用线性化反演方法和层状地球模型, 逐点进行每个网格结点下方的S波速度结构反演. 初始模型的设置参考了基于测深和重力资料的中国及外围地区莫霍面深度分布图^[17]、Gabi Laske的Crust2.0模型(<http://mahj.ucsd.edu/Gabi/rem.html>), 以及我们以往研究的结果^[14], 每个结点的初始模型不同. 在实际操作中并不需要对每个结点设置初始模型, 而是采取相邻节点的反演结果作为初始模型. 在同一构造单元中, 只需对地壳厚度作适当改变, 力求使相邻的下地壳速度保持稳定而且莫霍面的速度间断值比较合理. 这种做法是基于以下的考虑, 在一个构造单元中地壳厚度可能会有系统的变化而岩性和物理条件则相对比较稳定. 当穿越不同构造块体的边界时, 需要根据上述参考资料对初始模型作较大的调整. 这种做法可能改善速度模型横向变化的可信度, 并不能消除面波反演固有的不惟一性, 模型分层的任意性仍存在, 层内速度还会受迭代次数的影响, 但是对不同构造单元中一些点利用不同初始模型的反演试验表明, 虽然层厚、层间速度等存在一定程度的不确定

性, 速度结构的特征是不变的. 在后面对结果的分析 and 解释中, 我们利用一个层位(深度范围)内的平均速度进行横向比较, 以避免模型设置任意性的影响.

本文所采用的数据处理技术、反演方法、以及分辨率试验方法与我们以往所用方法一样^[14,15], 此处不再赘述. 由于数据量的增大以及台站分布更为均匀, 目前的反演结果对研究区内不同块体结构分辨的清晰度等方面有所改善. 根据分辨率试验的结果和反演得到的速度图像的合理性来判断, 本文结果对于尺度大于 3° 的较显著的异常有比较可靠的分辨能力.

3 结果和讨论

3.1 地壳结构

3.1.1 地壳厚度

图3给出由面波反演得到的研究区内Moho面深度分布, 等值线间隔为1 km. 应当指出, 面波给出的是忽略小尺度横向变化后的平均结果, 而且由于深度/速度折衷引起的不确定性估计为 $\pm 1 \sim 2$ km. 但是我们在反演中尽量使用统一的步骤和标准, 以便比较真实地反映各个构造单元中地壳厚度的特征和变化趋势. 从图中可以看到太行山重力梯度带也是地壳厚度急剧变化的梯度带, 郯庐断裂带南段附近(分割华北和扬子地块)地壳厚度变化也较大. 在北黄海和北华北地区等值线走向是以东西向为主, 这可能是中生代时期沿Solonker缝合带碰撞引起的板内造山作用和地壳增厚的遗迹. 在东海地区等值线走向大体平行于琉球岛弧, 反映了菲律宾海

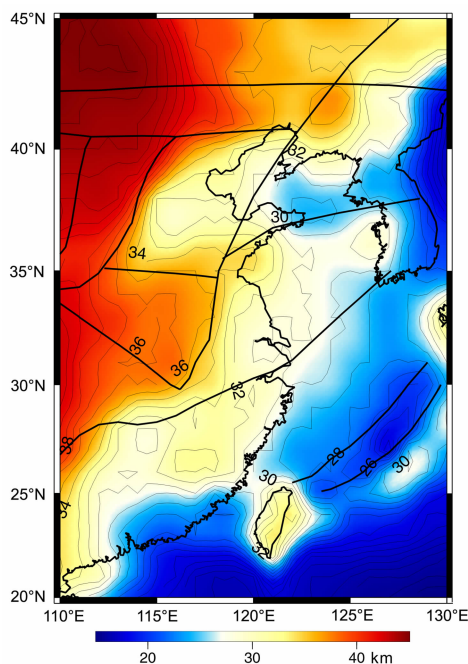


图 3 由面波反演得到的 Moho 面深度分布
Fig. 3 Moho depth distribution from surface wave inversion

板块俯冲的影响。

3.1.2 上地壳速度分布

我们用一个深度范围内的地壳平均速度来表示速度的横向变化,这样可以最大限度地减小地球模型分层的随意性和厚度/速度折衷造成的影响.图 4a 显示 0~8 km 平均速度在研究区内的分布.这一速度图像主要受沉积层厚度的控制,但是冲绳海槽和岛弧地区的低速与温度和流体的影响有关.可以看出中国东部的的主要沉积盆地在图中有较好的显示,但有些细节不正确,一些较小尺度的构造(如渤海湾盆地内的次级隆起和凹陷)无法分辨.

由于地壳存在很强的横向不均匀性,短周期面波(特别是沿长路径传播的面波)很容易受到多重路径等现象的影响,从而引起面波频散测量的误差并影响结构反演的正确性.我们采取了两项措施来减轻这一问题:尽可能多利用较短路径的资料;在初步反演后计算出每条路径的理论频散曲线并与观测曲线对比,删除不合理的资料.结果看来是基本合理的.层析成像结果的可靠性和分辨率是一个比较复

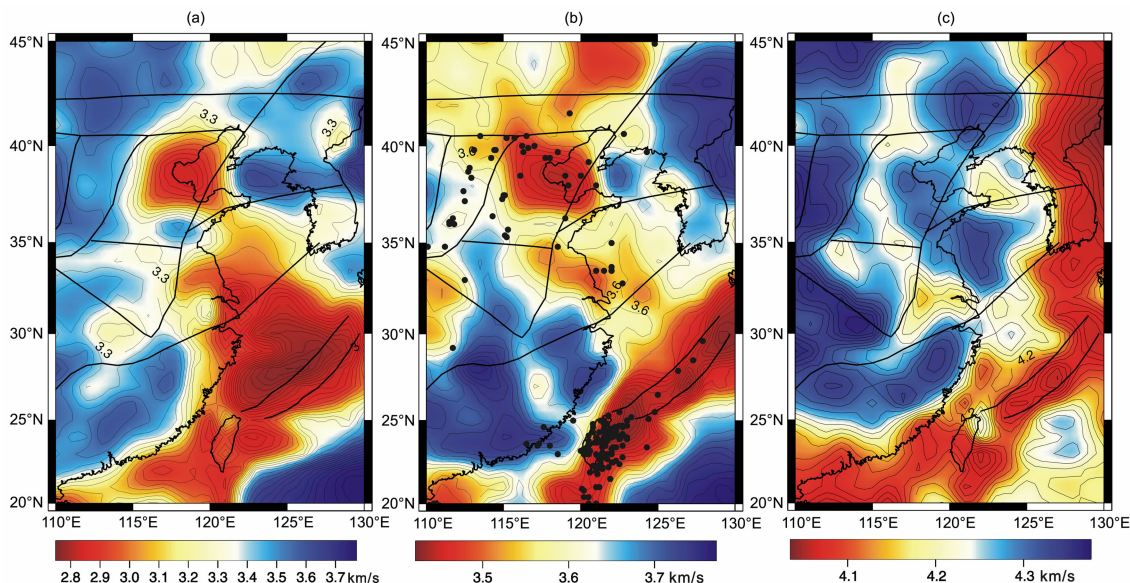


图 4 (a) 0~8 km、(b) 8 km~Moho 和 (c) Moho~120 km 深度平均剪切波速度,
黑点为历史和现代 6.5 级以上浅源地震震中

Fig. 4 Averaged shear wave velocities in the depth range (a) 0~8 km, (b) 8 km~Moho, and (c) Moho~120 km. Black dots are earthquake epicenters of magnitude above 6.5

杂的问题.常用的分辨矩阵和棋盘试验、尖峰试验等方法可以看作是层析成像研究必需通过的门槛,所给出的分辨估计只具有参考意义,因为实际资料所包含的误差往往不能确切了解,而且正演和反演中采用了同样的计算理论走时的近似方法,因此在分辨率的理论分析中,除了路径覆盖的因素得到较好

的考虑以外,还有一部分引起误差的因素被忽略了.根据上地壳速度图像的结果以及后面给出的速度图像与已知的构造单元特征和边界的对比,我们判断结果中大于 3° 的异常基本可靠.

3.1.3 中下地壳速度分布

图 4b 给出中下地壳(8 km~Moho)的平均速

度图像. 图中黑点为历史和现代大于等于 6.5 级浅源地震震中. 冲绳海槽和琉球、台湾一带的显著低速和强烈地震活动显然与板块的俯冲碰撞有关. 强烈地震基本都发生在地壳的低速区内或高低速区的边界附近. 地壳的低速区可以看作是容易发生变形的区域, 而高低速的边界附近容易产生应力集中, 因此这一现象是可以理解的. 在很多体波层析成像的研究中也指出了地壳速度结构与地震的关系, 只是由于分辨尺度的不同, 与本文的结果不易做简单的比较.

从图中可以看出在中国东部地壳中存在三条近北西向的低速带, 其中最北的一条最为显著, 其位置与强烈活动的张家口—渤海地震带大致相当. 徐杰等在对中国东部北西向断裂带的研究中^[18], 指出在本文的研究区域中有三条北西向断裂带, 分别是张家口—北京—蓬莱、介休—新乡—溧阳、巴东—泉州—台湾断裂带. 图 4b 显示在纬度 38°N 、 33°N 和 26°N 上下有三条近北西向的低速带, 与上述地震带的位置大体一致. 因此, 虽然北西向断裂带在地表上不具有北东向断裂那样的规模和显著性, 它们可能与地壳深部构造有一定的关联. 华北地区的北西向地壳低速带与北东向大型断裂带可能构成共轭的地壳软弱带, 在现今构造变形中起重要作用, 这一问题值得进一步探讨.

3.2 上地幔结构

图 4c 给出 Moho~120 km 深度范围内平均剪切波速度的分布. 蓝色表示岩石圈厚(或高速), 红色表示岩石圈薄(或低速). 总体上来看, 研究区西部较多地保存着克拉通性质的岩石圈特征, 而东部和南部呈现板块俯冲和弧后扩张引起的显著低速. 从图 4c 可以清楚看出, 中国东部海域分成北黄海、南黄海、东海以及冲绳海槽和琉球岛弧 4 个不同的构造单元. 必需指出, 在造山带、活化的地台和克拉通、以及岛弧和弧后区域, 岩石圈一般都经历过不同程度的改造或置换, 因而呈现比稳定大陆和古老洋盆复杂得多的结构. 在这种情形下只用岩石圈厚度一个单一的参数往往很难表达岩石圈的主要特征, 何况岩石圈/软流圈界面本身不是一个清晰的地震学间断面, 岩石圈厚度的测定都有较大的不确定性. 因此有必要对上地幔的速度结构进行比较详细的考察. 图 5 和 6 分别给出沿经度和纬度方向的一些速度剖面, 基本上可以反映出各个构造单元的岩石圈/软流圈结构的主要特征. 以下我们着重讨论东部海域和邻近地区的岩石圈结构及其与现今和以往构造运动的关系.

3.2.1 北黄海

(1) 岩石圈结构特点及其与扬子板块俯冲的关系
北黄海地壳速度较高(图 4b), Moho 面下方至 70~80 km 深度速度较高, 再向下速度迅速减小, 其岩石圈结构与南黄海显著不同(图 5d, 6(f~i)). 如果扣除太平洋板块俯冲造成东部地壳上地幔速度普遍下降这一因素, 北黄海岩石圈结构及其与南黄海的对比, 和南华北(河淮)盆地的结构及其与扬子地块的对比(图 5a, 6(e, f))很相似. 这种减薄了的岩石圈与东海地区类似, 那里由于菲律宾海板片俯冲引起的热/化学效应, 自下而上地侵蚀了岩石圈下部, 而岩石圈上部相对而言较好地保留了原有状态. 据此我们推测, 南华北和北黄海中生代岩石圈减薄的主要机制是特提斯海洋板块向北俯冲在弧后地区产生的热/化学效应, 扬子板块碰撞和俯冲的影响可能局限于缝合带附近地区.

(2) 华北克拉通中生代岩石圈减薄机制

关于华北克拉通新生代的演化历史还存在不少争论. 岩石圈减薄的机理主要有自上而下的拆沉和自下而上的侵蚀/置换两类模型; 关于驱动力问题, 对南、北缝合带碰撞及太平洋板块俯冲各自的作用亦有不同看法^[19]. 层析成像的结果为研究构造演化提供了一些间接证据.

考察北华北(渤海湾)盆地和燕山造山带的岩石圈结构(图 5(a, b), 6(h, i)), 发现其与南华北盆地和北黄海有显著差别, 表现为地壳速度低, 岩石圈地幔较厚(下至约 130 km)且上下速度较均匀的特征, 反映岩石圈地幔曾受到比较彻底的扰动(如软流圈物质上升到 Moho 面附近或下地壳拆沉). 这种结构大致类似于藏北羌塘地区的速度结构, 可称之为碰撞型, 而上述南华北和东海的结构称为弧后型. 关于岩石圈速度结构与构造演化历史的关系, 需要多学科的深入研究和论证, 但在此我们不妨推测, 北华北盆地和燕山地区中生代岩石圈减薄的动力作用主要来自北部缝合带持续的碰撞, 而且岩石圈拆沉可能起了重要作用. 华北地区的成像结果比较倾向于支持张宏福等^[20, 21]关于华北岩石圈减薄的动力作用的论述, 华北南部主要受到扬子板块俯冲的影响, 北部受北方碰撞带的影响, 太平洋板块的俯冲造成了附加的热/化学效应, 但不足以抹去南北结构的差异.

3.2.2 南黄海

从图 4c, 5(c, d) 和 6(f, g) 可见南黄海具有较厚岩石圈, 属于下扬子地块. 在速度图像上其北界大别—临津江结合带和南界江绍—沃川结合带^[1]都是

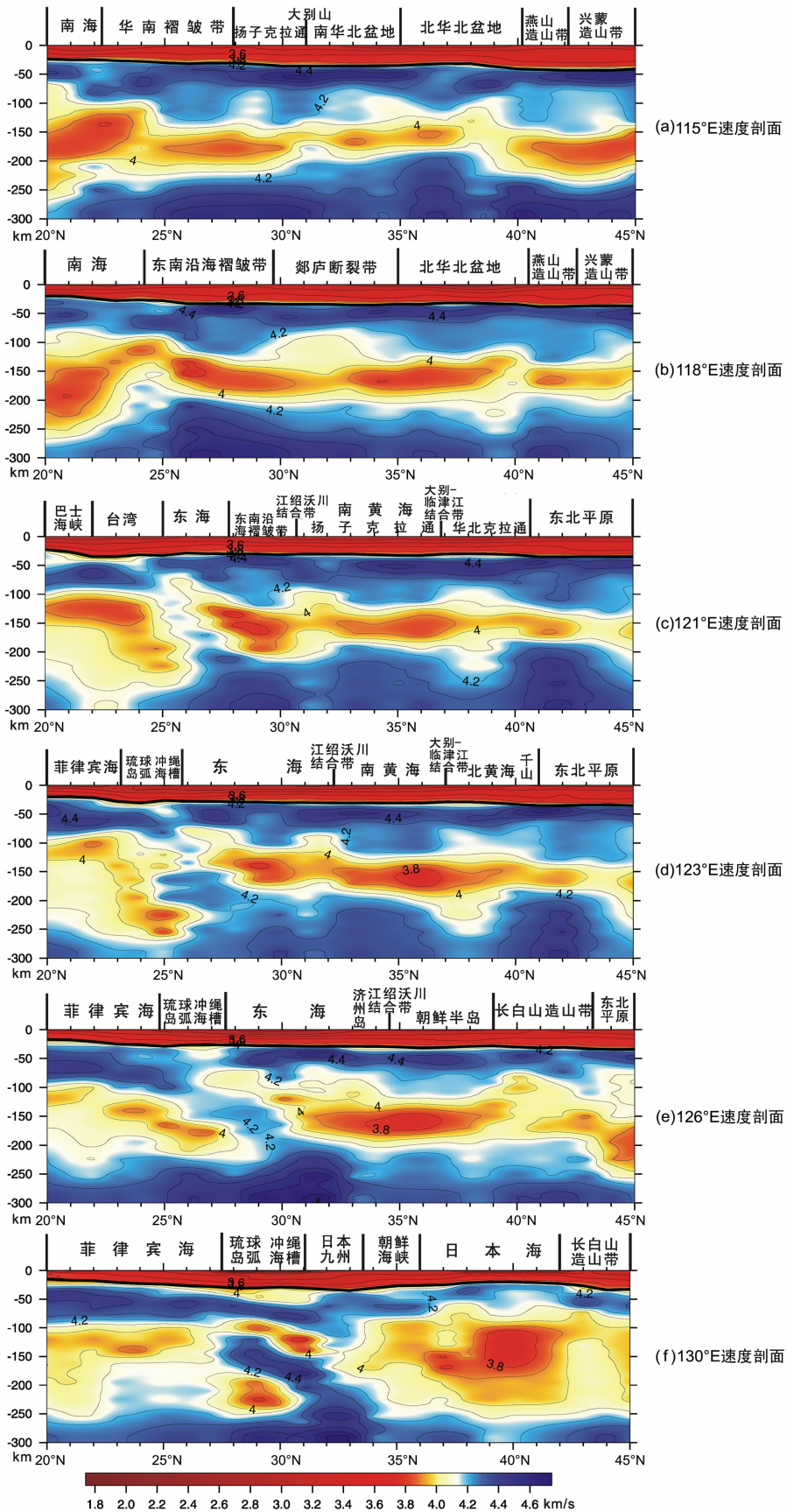


图 5 沿经度方向的速度剖面(纵坐标为深度,横坐标为纬度)

Fig. 5 Shear wave velocity profiles along longitude(Ordinate is depth, abscissa is latitude)

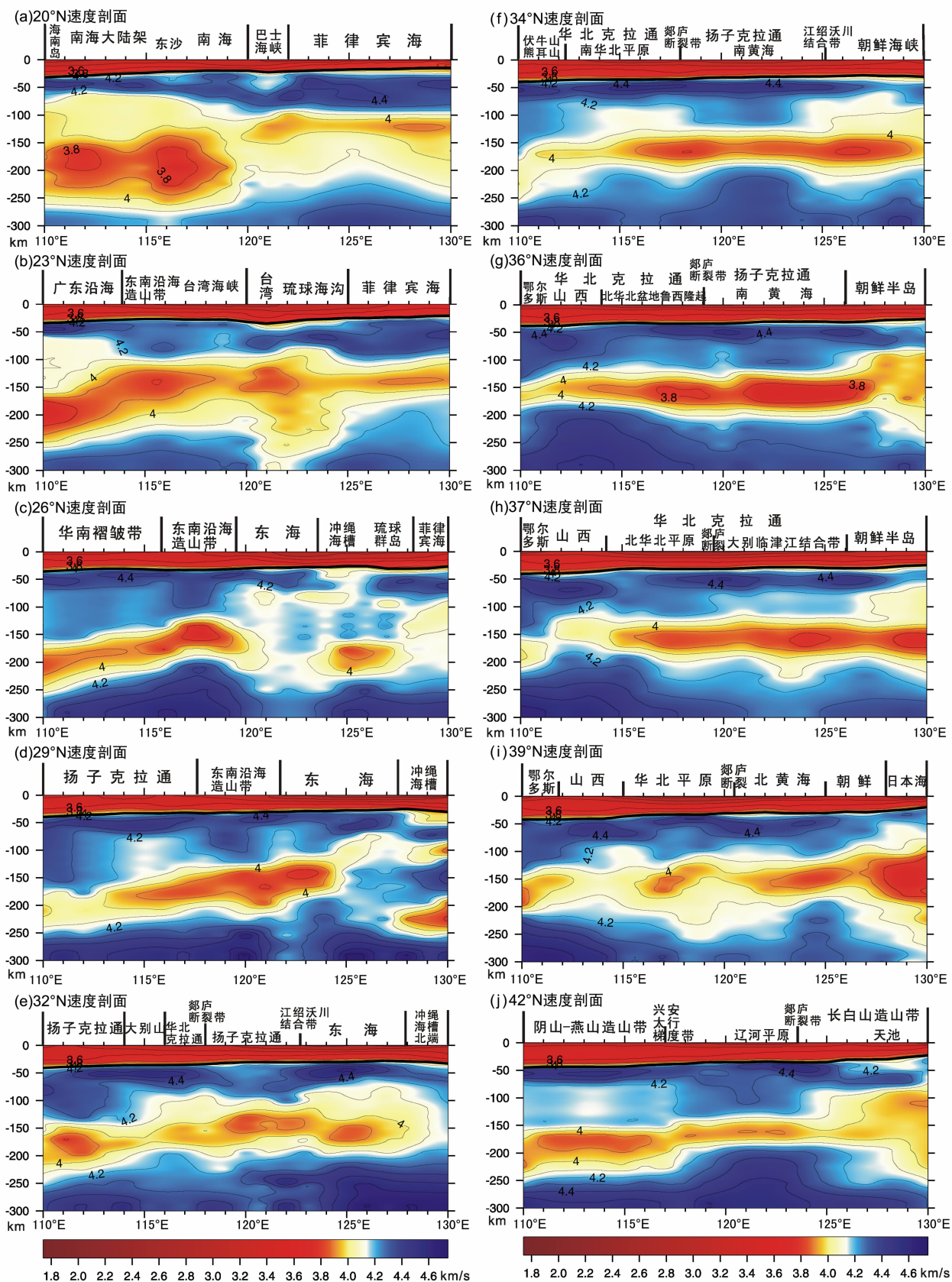


图 6 沿纬度方向的速度剖面(纵坐标为深度,横坐标为经度)

Fig. 6 Shear wave velocity profiles along latitude(Ordinate is depth, abscissa is longitude)

显著的岩石圈分界. 关于海域中一些地块的构造属性和边界的走向还存在不同的看法. 一些人认为大别—苏鲁碰撞带向东延伸穿过朝鲜半岛中部, 朝鲜南北分属于华北和扬子地块^[22~25]. 而郝天珧等根据综合的地球物理研究认为大别—苏鲁碰撞带向东延伸至朝鲜半岛西缘断裂, 继而到半岛南端, 因此朝鲜半岛都属于华北地块^[3,5].

(3) 大别—临津江结合带

扬子向北俯冲在南北黄海间造成了岩石圈地幔结构的显著差异, 但这一现象仅见于 125°E 以西, 在朝鲜半岛西缘上地幔顶部存在一条 NS 向的相对高速带将黄海与朝鲜隔开 (图 4c). 郝天珧等^[3,5,6,26]的研究着重讨论了朝鲜半岛西缘的断裂带. 图 6(g, h) 表明, 从东西方向看, 黄海和朝鲜半岛岩石圈下部有显著差别, 而朝鲜半岛南北方向的结构差异并不大 (图 5e). 这一些现象似乎支持郝天珧等的观点, 即基本上整个朝鲜半岛都属于中朝地块. 但本文在这方面给出的证据是微弱的, 因为同样有可能的是, 华北和扬子之间的碰撞俯冲在朝鲜半岛的规模和强度较小, 面波研究的分辨率不足以检出其效应, 尤为重要的是太平洋板块俯冲和日本海张裂对朝鲜半岛的岩石圈结构有决定性的影响, 这在图 3, 4b, 4c 的等值线走向上表现得很明显, 从而可能抹去了南北方向的岩石圈结构差异.

(4) 江绍—沃川结合带

江山—绍兴断裂带是下扬子地块和华南地块的分界, 两侧的构造活动具有明显差异, 直到晚三叠世后南北两侧的沉积环境和构造形态才趋统一; 白垩纪发生强烈拉张, 沿断裂带形成一系列盆地和岩浆活动^[27]. 图 4c 显示江绍断裂是一条上地幔低速带, 在垂直速度剖面上 (图 5(a~c)) 表现为岩石圈的减薄带. 在海域中, 江绍—沃川结合带 (图 1) 也是一条岩石圈分界 (图 4c, 5d), 其西北侧的南黄海 (扬子地块) 岩石圈较厚而东南侧的东海 (华南地块?) 较薄. 其他地球物理研究也已表明南黄海和东海之间存在深达上地幔的分界^[2].

(5) 下扬子苏皖地区

在东部海域中, 南黄海具有相对高速的岩石圈 (图 4c), 说明其保留了较多克拉通或地台的性质. 但是郯庐断裂以东的苏皖地区虽然同属下扬子地块, 却显示出显著低速的岩石圈地幔. 据吴根耀等的研究^[28], 下扬子地块在古特提斯演化阶段可能是独立于华北和扬子克拉通的地块. 苏鲁超高压变质带主形成期较大别超高压变质带要晚 10~20 Ma; 晚

侏罗—白垩世时苏鲁洋壳向南东方向俯冲到苏皖地块之下, 最终导致下扬子与华北地块的拼合^[29]. 据此可以解释郯庐断裂以东苏皖地区岩石圈的低速, 是由于苏鲁洋壳俯冲的热/化学效应, 与北黄海等地的情形类似.

3.2.3 东海

东海大陆架和陆坡具有大陆型地壳和岩石圈. 地壳厚度向南东方向逐渐减小 (图 3), 岩石圈也呈现向冲绳海槽方向显著减薄的趋势, 软流圈低速层从大陆地区向东有抬升或增厚的趋势, 但岩石圈中的速度并没有明显的降低 (图 5(d, e), 6(c~e)). 这些现象说明岩石圈减薄很可能是由于板块俯冲在弧后地区的热/化学效应自下而上的侵蚀所造成. 东海地区岩石圈结构的整体形态与高德章等^[4]用其他地球物理手段得到的结果相符.

冲绳海槽和琉球岛弧地区的最大特征是地壳和岩石圈上地幔的显著低速 (图 4(b, c)). 在多数垂直剖面中可以分辨出俯冲到冲绳海槽下方的菲律宾板片的大致形态 (如图 5(d~f)), 并清晰看到板片上方上地幔的低速情况, 为冲绳海槽的弧后扩张机制提供了深部地球物理证据^[30].

浙闽沿海造山带和东海的上地幔结构之间存在比较急剧的变化, 与下扬子地块相比也有显著差异 (图 4c, 6(c~d)). Zhang et al.^[31]利用地震测深资料的研究也表明从扬子地块到华夏地块, 上地幔顶部的 P 和 S 波速度都迅速增大. 我们的成像结果表明浙闽沿海的武夷地块 (或称华夏地块)^[32] 是华南造山带中一个特殊地块, 具有相对较厚的高速岩石圈, 可能代表目前残存的华夏古陆.

3.2.4 南海东北部

以台湾海峡 (大致 23°N) 为界, 以北是受菲律宾海俯冲影响的构造域, 以南是南海构造域. 在沿 20°N 纬度的速度图像上 (图 6a), 南海东北部岩石圈厚度约 80 km 左右, 南海和日本海扩张的开始和终止时间相近, 二者的速度结构比较相似, 但与稳定的西菲律宾海盆有显著差异. 向西 (南海陆架) 和向东 (巴林塘海峡) 地壳厚度变大, 但岩石圈厚度向西减小, 可能与南海扩张时期的拉伸和现今印支地区软流圈上涌有关. 巴林塘海峡之下有岩石圈双向俯冲的迹象, 但面波的分辨率不足以给出俯冲板片的图像. 菲律宾海岩石圈厚度约 100 km, 速度较高, 显示古老洋盆的特征. 台湾岛下方 (尤其东部) 地壳增厚 (图 3), 岩石圈厚约 100 km, 岩石圈上地幔 (特别是顶部) 速度较低 (图 5c, 6b).

4 结 论

本文通过面波层析成像得到了中国东部海域及邻近大陆地区的岩石圈/软流圈 S 波速度结构图像,给出了主要构造单元的区划及其结构特征,并讨论了速度结构与现今构造活动及已往构造演化历史的关系.主要结论如下:

(1)研究区内地壳厚度总体上呈现自北西向东南或自西向东减薄的趋势.中下地壳的平均速度与地震活动存在比较显著的关系,强震基本都发生在低速区内或高低速的过渡区.太行山以东地壳内存在北西向低速带,其中张家口—渤海地震带下方的低速带最为显著.这些北西向低速带与北东向大断裂可能构成共轭的地壳薄弱带,对现今地壳形变可能有重要影响.

(2)东部海域划分成北黄海、南黄海、东海、和冲绳海槽等 4 个构造块体,各自具有鲜明的岩石圈/软流圈速度特征.北黄海具有较薄较高速的岩石圈,其结构与南华北地区类似,可能反映出中生代特提斯洋壳向北俯冲造成岩石圈减薄的遗留影响.与之相对比,北华北地区具有低速的地壳和较厚的岩石圈,岩石圈地幔速度偏低且上下比较均匀,有可能与中生代沿北方缝合带持续的碰撞作用有关.

(3)在海域中南黄海具有相对较厚的岩石圈,较多地保存了下扬子岩石圈的特征.在下扬子与华北地块的拼合过程中,北边的洋壳向华北地块之下俯冲,而西边的苏鲁洋壳有可能俯冲到下扬子地块之下,有可能是造成北黄海和苏皖地区上地幔低速特征的原因.在 125°E 以东的朝鲜半岛地区未发现这一拼合过程的遗迹.一种可能是整个朝鲜半岛都是华北(中朝)地块的一部分;但也有可能是太平洋板块俯冲和日本海张开引起的强烈热/化学作用完全改造了朝鲜半岛的岩石圈上地幔,因而抹去了以往构造运动的痕迹.

(4)东海地区的地壳厚度向冲绳海槽方向减小,特别是岩石圈厚度显著减小,软流圈规模变大,反映出菲律宾海板块俯冲在弧后广大地区都有影响.冲绳海槽地区可见俯冲的菲律宾海板片以及板片上方显著低速的地壳和上地幔,为冲绳海槽的弧后扩张机制提供了证据.

参考文献(References)

[1] 刘光鼎主编. 中国海区及邻域地质地球物理系列图集. 北

京: 科学出版社, 1992

Liu G D ed. Geological and Geophysical Maps of China Sea and Adjacent Regions (in Chinese). Beijing: Science Press, 1992

[2] 王谦身, 刘建华, 郝天珺等. 南黄海南部与东东北部之间的深部构造. 地球物理学进展, 2003, **18**(2): 276~282

Wang Q S, Liu J H, Hao T Y, et al. Deep tectonics between South Yellow Sea and North East China Sea. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2003, **18**(2): 276~282

[3] 郝天珺, 刘建华, Suh Mancheol 等. 黄海及其邻区深部结构特点与地质演化. 地球物理学报, 2003, **46**(6): 803~808

Hao T Y, Liu J H, Suh M, et al. Deep structure characteristics and geological evolution of the Yellow Sea and its adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(6): 803~808

[4] 高德章, 赵金海, 薄玉玲等. 东海及邻近地区岩石圈三维结构研究. 地质科学, 2006, **41**(1): 10~26

Gao D Z, Zhao J H, Bo Y L, et al. A study on lithosphere 3D structure in the East China Sea and adjacent regions. *Chinese J. Geology* (in Chinese), 2006, **41**(1): 10~26

[5] 胥 颐, 刘建华, 郝天珺等. 中国东部海域及邻区岩石层地幔的 P 波速度结构与构造分析. 地球物理学报, 2006, **49**(4): 1053~1061

Xu Y, Liu J H, Hao T Y, et al. P wave velocity structure and tectonics analysis of lithospheric mantle in eastern China seas and adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(4): 1053~1061

[6] 胥 颐, 李志伟, 刘劲松等. 黄海及其邻近地区的 Pn 波速度与各向异性. 地球物理学报, 2008, **51**(5): 1444~1450

Xu Y, Li Z W, Liu J S, et al. Pn wave velocity and anisotropy in the Yellow Sea and adjacent region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5): 1444~1450

[7] 裴建新, 韩 波, 张训华. 小波分析与解析延拓方法相结合研究东海深部构造. 海洋地质与第四纪地质, 2007, **27**(6): 55~59

Pei J X, Han B, Zhang X H. Research on deep structures of East China Sea by combining upward continuation and wavelet analysis methods. *Marine Geology and Quaternary Geology* (in Chinese), 2007, **27**(6): 55~59

[8] Wang Z, Huang R, Huang J, et al. P-wave velocity and gradient images beneath the Okinawa Trough. *Tectonophysics*, 2008, **455**: 1~13

[9] 杨金玉, 徐世浙, 余海龙等. 视密度反演在东海及邻区重力异常解释中的应用. 地球物理学报, 2008, **51**(6): 1909~1916

Yang J Y, Xu S Z, Yu H L, et al. Application of apparent density inversion method in the East China Sea and adjacent area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(6): 1909~1916

[10] 滕吉文, 张中杰, 胡家富等. 中国东南大陆及陆缘地带的瑞利波频散与剪切波三维速度结构. 地球物理学报, 2001, **44**(5): 663~677

Teng J W, Zhang Z J, Hu J H, et al. The Rayleigh wave dispersion and three dimensional velocity structure in continent and its margin of southeast China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(5): 663~677

[11] 郑月军, 黄忠贤, 刘福田等. 中国东部海域地壳上地幔瑞利波

- 速度结构研究. 地球物理学报, 2000, **43**(4):480~487
- Zheng Y J, Huang Z X, Liu F T, et al. Rayleigh wave velocity and structure of the crust and upper mantle beneath the seas in eastern China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(4):480~487
- [12] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林等. 东亚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 J S, Cao J M, Cai X L, 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
- [13] 彭艳菊, 黄忠贤, 苏伟. 中国边缘海岩石层层面波层析成像. 见:李家彪, 高抒主编. 中国边缘海岩石层结构与动力过程. 北京:海洋出版社, 2003. 8~14
- Peng Y J, Huang Z X, Su W. Surface wave tomography of the lithosphere in marginal seas of China. In: Li J B, Gao S eds. *Lithosphere Structure and Dynamic Process in China Marginal Sea*. Beijing: Ocean Press, 2003. 8~14
- [14] Huang Z, Su W, Peng Y, et al. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions. *J. Geophys. Res.* 108 (B2), 2073, doi: 10.1029/2001JB001696, 2003
- [15] Huang Z, Peng Y, Luo Y, et al. Azimuthal anisotropy of Rayleigh waves in East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L15617, doi:10.1029/2004GL020399, 2004
- [16] Constable S C, Parker R L, Constable C G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 1987, **52**:289~300
- [17] 陈学波, 张景发, 唐荣余等. 中国及外围地区莫霍面深度分布图. 北京:地震出版社, 2001
- Chen X B, Zhang J F, Tang R Y, et al. *Map of Moho Depths in China and Adjacent Areas*. Beijing: Seismological Press, 2001
- [18] 徐杰, 马宗晋, 陈国光等. 中国大陆东部新构造期北西向断裂带的初步探讨. 地学前缘, 2003, **10**(特刊):193~198
- Xu J, Ma Z J, Chen G G, et al. NW-trending active fault zones of the eastern Chinese continent in neotectonic time. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2003, **10** (Special Issue):193~198
- [19] Menzies M, Xu Y, Zhang H, et al. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. *Lithos*, 2007, **96**:1~21
- [20] 张宏福, 周新华, 范蔚茗等. 华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及其形成机理. 岩石学报, 2005, **21**(4):1271~1280
- Zhang H F, Zhou X H, Fan W M, et al. Nature, composition, enrichment processes and its mechanism of the Mesozoic lithospheric mantle beneath the southeastern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2005, **21**(4):1271~1280
- [21] Zhang H F, Sun M, Zhou M F, et al. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. *Geol. Mag.*, 2004, **141**: 55 ~ 62, doi: 10.1017/S0016756803008331
- [22] 蔡乾忠. 中国东部与朝鲜大地构造单元对应划分. 海洋地质与第四纪地质, 1995, **15**(1):7~24
- Cai Q Z. Corresponding division of the geotectonic units of eastern China and Korea. *Marine Geology and Quaternary Geology* (in Chinese), 1995, **15**(1):7~24
- [23] Jeon H, Cho M, Kim H, et al. Early Archean to Middle Jurassic evolution of the Korean Peninsula and its correlation with Chinese cratons; SHRIMP U-Pb zircon age constraints. *Journal of Geology*, 2007, **115**:525~539
- [24] Oh C W, Kim S W, Choi S G, et al. First finding of eclogite facies metamorphic event in South Korea and its correlation with the Dabie-Sulu collision belt in China. *Journal of Geology* (in Chinese), 2005, **113**:226~232
- [25] Peng P, Zhai M G, Guo J H, et al. Petrogenesis of Triassic post-collisional syenite plutons in the Sino-Korean craton: an example from North Korea. *Geol. Mag.* 2008, **145**(5):637~647
- [26] 郝天珧, SUH Mancheol, 刘建华等. 黄海深部结构与中朝—扬子块体结合带在海区位置的地球物理研究. 地学前缘, 2004, **11**(3):51~61
- Hao T Y, SUH Mancheol, Liu J H, et al. Deep structure and boundary belt position between Sino-Korean and Yangtze blocks in Yellow Sea. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2004, **11**(3):51~61
- [27] 余心起, 吴淦国, 舒良树等. 白垩纪时期赣杭构造带的伸展作用. 地学前缘, 2006, **13**(3):31~43
- Yu X Q, Wu G G, Shu L S, et al. The Cretaceous tectonism of the Gan-Hang tectonic belt, southeastern China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2006, **13**(3):31~43
- [28] 吴根耀, 陈焕疆, 马力等. 苏皖地块—特提斯演化阶段独立的构造单元. 古地理学报, 2002, **4**(2):77~87
- Wu G Y, Chen H J, Ma L, et al. Su-Wan block: an independent tectonic unit during period of Tethyan evolution. *J. Palaeogeography* (in Chinese), 2002, **4**(2):77~87
- [29] 叶舟, 马力, 梁兴等. 下扬子独立地块与中生代改造型残留盆地. 地质科学, 2006, **41**(1):81~101
- Ye Z, Ma L, Liang X, et al. The independent Lower Yangtze block and Mesozoic reformed residual basins. *Chinese J. Geology* (in Chinese), 2006, **41**(1):81~101
- [30] 吴自银, 王小波, 金翔龙等. 冲绳海槽弧后扩张证据及关键问题探讨. 海洋地质与第四纪地质, 2004, **24**(3):67~76
- Wu Z Y, Wang X B, Jin X L, et al. The evidences of the backarc spreading and discussion on the key issues in the Okinawa Trough. *Marine Geology and Quaternary Geology* (in Chinese), 2004, **24**(3):67~76
- [31] Zhang Z, Badal J, Li Y, et al. Crust-upper mantle seismic velocity structure across Southeastern China. *Tectonophysics*, 2005, **395**:137~157
- [32] 王清晨, 蔡立国. 中国南方显生宙大地构造演化简史. 地质学报, 2007, **81**(8):1025~1040
- Wang Q C, Cai L G. Phanerozoic tectonic evolution of South China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2007, **81**(8):1025~1040