

苏鲁地区剪切波速度结构研究及与地震关系探讨

张学民^{1,2}, 刁桂苓², 束沛一³, 王卫民³, 周翠英⁴, 赵英萍²

(1. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 河北省地震局, 河北石家庄 050021;
3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 4. 山东省地震局, 山东济南 250014)

摘要:利用S波纯波形拟合法以及T函数法反演了苏鲁地区壳幔剪切波速度结构, 并利用长周期P波T函数反演得到了连云港和莱阳台下方800 km深度的速度结构。结果显示:(1)苏鲁地区大部分台站地壳表层及上地壳浅部速度偏高, 分别对应高压、超高压物质和古老基底出露地区;(2)沿郯庐断裂带分布的台站均显示明显低速层, 并具有北浅南深的特点;(3)连云港和莱阳台超深度反演结果显示两台均在150 km深度下出现高速层, 反映扬子板块的俯冲深度为100 km以下, 俯冲板片厚度在100 km以上;板片剥离下沉深度甚至达到300 km或者更深;(4)地震深度分布与低速层关系密切, 沿郯庐断裂和烟台—五莲断裂的中小地震震源深度都比较深, 有的甚至达到地壳的底部, 反映这两条断裂目前切割深度都比较大, 而且地幔物质相对比较活跃。

关键词:苏鲁地区;剪切波速度结构;低速层;T函数

中图分类号:P315.2; P313.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0844(2005)02-0101-08

Study on Shear Wave Velocity Structure beneath Jiangsu and Shandong Province and Its Relationship to Earthquakes

ZHANG Xue-min^{1,2}, DIAO Gui-ling², SHU Pei-yi³,
WANG Wei-min³, ZHOU Cui-ying⁴, ZHAO Ying-ping²

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;

4. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: Using pure S waveform fitting and T function method, the shear wave velocity structures in crust and upper mantle under seismic stations in Jiangsu and Shandong province are obtained. By employing T function method on long-period P wave records, S wave velocity structures about 800 km deep are also inversed under Lianyungang and Laiyang stations. The results show that: (1) the majority of stations in Jiangsu and Shandong province are located on where the shallow crust with high velocity, which is corresponding to the area with outcropping high-pressure and ultrahigh-pressure materials, and outcropping paleo-basement, respectively; (2) stations along Tancheng—Lujiang Fault present low velocity layers underneath, and the low velocity layer is deeper at south segment than that at north segment of the fault; (3) Great depth inversions under Lianyungang and Laiyang stations show that below the depth of 150 km both exhibits high velocity layer, which demonstrates that underthrust Yangtzi plate is under the depth of 100 km, with thickness of 100 km, and delaminated slab can reach 300 km or deeper; (4) depth of

收稿日期:2004-07-12

基金项目:河北省地震局硕博联合基金资助。

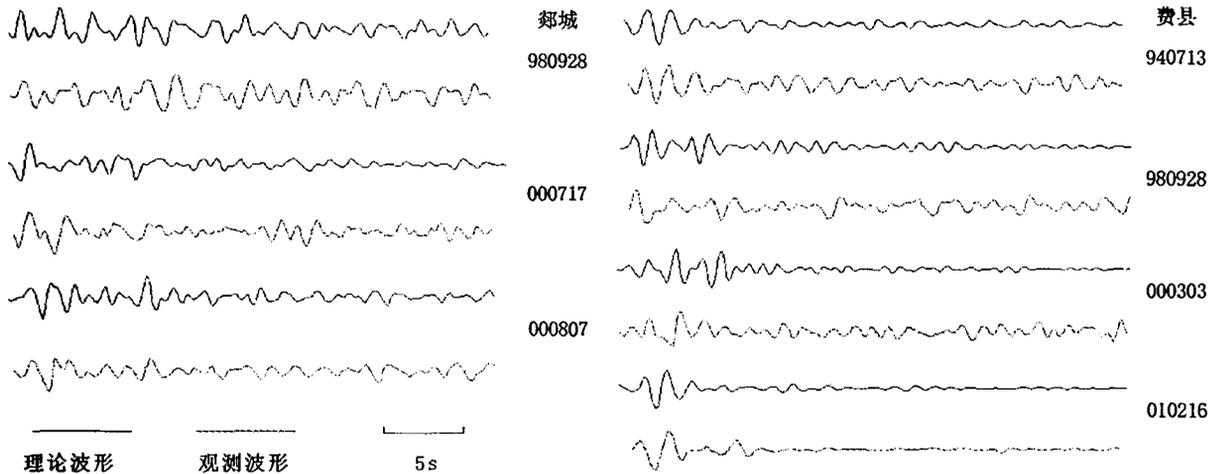
作者简介:张学民(1969—),女(汉族),人,在职博士生,主要从事壳幔速度结构反演及地震电磁分析预报。

样数; N_m 为需要拟合的模型参量的个数。

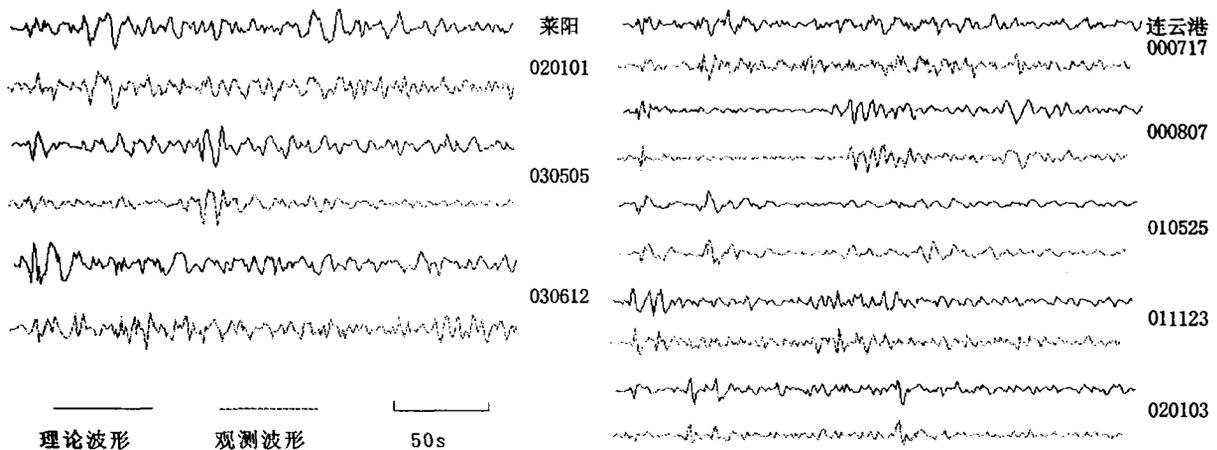
快速模拟退火法是非线性反演方法中比较常用的一种, 本文采用柯西分布搜索模型, 可以保证在搜索的初始阶段模型分布范围比较广泛, 不致落入局部极小值点。随着温度的降低, 搜索围绕误差越来越小的模型周围进行细致搜索, 可以保证最后结果的精度。

选择研究区域的已有成果作为反演的初始模型。将之上下分别取 0.5 km/s 作为模型的约束限制, 以减小搜索范围, 降低工作量。即便如此, 搜索模型仍在 10 000 次以上, 因此可以保证模型的可靠性。对于莫霍界面深度处, 层厚减小到 1 km, 并将上下限制放宽, 以获得合理的莫霍界面深度。反演过程中同时引进光滑约束因子, 避免层间速度出现

过大的突跳, 即将层间速度差作为权系数, 同时累加在目标函数中。该约束条件避开莫霍界面。为保证搜索模型的广泛性和可靠性, 在每个台站至少取 3 个以上的震例进行拟合, 并保证理论波形与实际观测波形的相关系数大于 0.8。波形的长短选取只影响反演模型地幔深度的结果, 对地壳模型没有太大影响。图 2(a) 给出了郯城和费县台的短周期波形拟合结果, 可以看到几个震例都拟合的较好, 所得模型平均误差在 0.1 km/s 左右。为防止单一地震得到的速度模型偏离真实模型, 所以利用多个震例来共同约束。从图 2 中也可以看到, 不同方位的地震记录波形之间存在比较大的差异, 如果简单只取其一, 结果必然会出现较大偏差。



(a) 短周期S波垂直拟合结果



(b) 长周期P波径向拟合结果

图 2 拟合波形与观测波形

Fig. 2 Comparison between the fitting wave form and record waveform ((a)Short-period vertical S wave; (b)Long-period radial P wave)).

2 剪切波速度结构反演结果分析

使用 32 s 长度的深源远震 S 波波列,反演地震台下 100 km 左右壳幔 S 波速度结构。挑选震源深度大于 100 km 的地震,以保证记录波形不受震源上方介质结构的影响,又保证了入射台站下方均匀介质底部的人射角比较小。对于近垂直入射台下的纯 S 波,地表记录到的地震波形包含了震源发射后经地幔、地壳传播中层状介质的多次转换和反射叠加,波形变化携带着台站下介质结构信息,这是本文反演台下横波速度结构的理论基础^[8]。

表 1 地震参数表

日期	$\lambda_E/^\circ$	$\varphi_N/^\circ$	深度/km	M_b
1994-07-13	127.77	-7.53	159	6.8
1998-09-28	112.41	-8.19	151	6.7
1999-11-11	100.32	1.28	211	6.2
2000-01-19	70.38	36.37	206	6.0
2000-03-03	128.49	-7.32	141	6.4
2000-05-12	70.66	35.97	107	6.3
2000-06-14	127.72	4.54	89	6.3
2000-07-17	70.92	36.28	141	6.6
2000-08-07	123.36	-7.02	648	6.5
2001-02-16	117.49	-7.16	521	6.1
2001-05-25	110.18	-7.87	143	6.3
2001-09-18	127.74	-7.51	131	6.0
2001-11-23	71.51	36.39	106	6.1
2002-01-01	125.65	6.30	138	6.3
2002-01-03	70.69	36.09	129	6.2
2002-03-19	129.90	-6.49	148	6.1
2002-05-26	127.24	1.83	109	5.9
2003-03-29	70.58	35.98	114	5.9
2003-05-05	127.35	0.22	123	6.4
2003-06-12	154.76	-5.99	186	6.3
2003-10-17	154.15	-5.47	133	6.4
2004-04-05	71.03	36.51	187	6.6

本文所使用的震例参数见表 1。模拟记录多为短周期 DD-1 仪器,扫描后进行数字化采样处理,把两个水平方向的记录合成到台站与震源组成的大圆弧上作为径向记录,垂直向记录保持不变。通过拟合 S 波波形的垂向记录,共反演得到了苏鲁地区 15 个台站的剪切波速度结构资料(图 3),另外长岛和荣成台用 T 函数反演 P 波波形得到。

苏鲁地区地壳厚度普遍小于 35 km,其介质分布特征是:郯庐断裂东部是出露的高压、超高压物质,西部则是抬升后的元古代结晶基底,都属于比较高速的物质。山东省大部分台站下方上地壳都存在高速层,正好对应了这种特性。

江苏省北部的 4 个台站中,灌云与新沂速度结构比较相似,除了在中地壳出现一个明显的高速层,

其他层位速度分布比较平稳,没有明显的起伏;连云港与赣榆比较相似,在中地壳连续出现多个低速层,而上下地壳速度结构比较平稳。日照位于其北部,其地壳速度整体高于其他台站,速度层之间起伏变化不大。杨文采等在该区域的深反射地震结果显示^[11]:日照北部的超高压变质带内地下 5 km 以上为含橄榄岩和大理岩的片麻岩,5~7 km 是超高压物质岩片,速度最高值达到 $V_p = 6.8$ km/s,与日照台反演的上地壳的速度结构基本一致。之下十几公里速度都低于上面的高速层位,直到 19 km 以下速度升高为 6.9 km/s,地壳底部是速度为 7.6 km/s 的高速薄层。日照台反演虽然也有一个厚度较大的层位,但在 23 km 左右速度下降有一低速层出现,之后快速恢复,地壳底部 S 波速度达到 4.35 km/s,与石门地区相当。日照台处于活动断裂边缘,是超高压变质带北段与南段被切割拉断的区域,我们得到的总体速度变化与杨文采等比较一致,其下地壳比较复杂可能是受到断层作用的影响。

卢造郎等利用层析成像得到了渤海及其邻近地区的速度^[12],在山东半岛一带,在 3 km 深度烟台地区速度最高, V_p 为 6.2 km/s;14 km 深度处,烟台地区速度低于地壳顶部,与其他台附近相当,为 5.6 km/s;25 km 界面处,烟台由高速 6.8 km/s 下降到 6.0 km/s,长岛台附近速度由 6.2 下降到 6.0 km/s,荣成变化不大;34 km 基本都达到了地幔顶部速度。我们的结果显示烟台台高低速起伏变化最大,而上地壳低速层比较明显,25 km 处的高速层也基本吻合;荣成台速度最为稳定,无论是 14 km 还是 25 km 深度都没有高低速层变化;长岛台比较突出的是 23 km 以下深度的低速层。结果与前人一致。

郯城、新沂、莒南、沂水,莒县台沿郯庐断裂依次分布。其中郯城与莒南台在上、下地壳都出现明显的低速,中地壳表现为相对高速。新沂台速度变化幅度没有上述两台明显,但与郯城台类似之处是上地壳底部存在一个低速层,一直到地壳底部速度都没有达到与其他台站相似的水平,可能反映该台下方介质破碎程度比较强烈。该台位于郯庐断裂的西支中,与其他 3 个台站不属于同一条断裂。1980 年国家地震局地球物理勘探大队跨郯庐带的人工地震探测结果显示^[13],郯庐断裂上地壳速度等值线向上隆起,隆起点逐渐东移,上地壳底部存在速度间断面,其下为中层地壳的低速层,在下地壳底部有一个向下凸出的低速异常区,其厚度要超过 6 km。这与

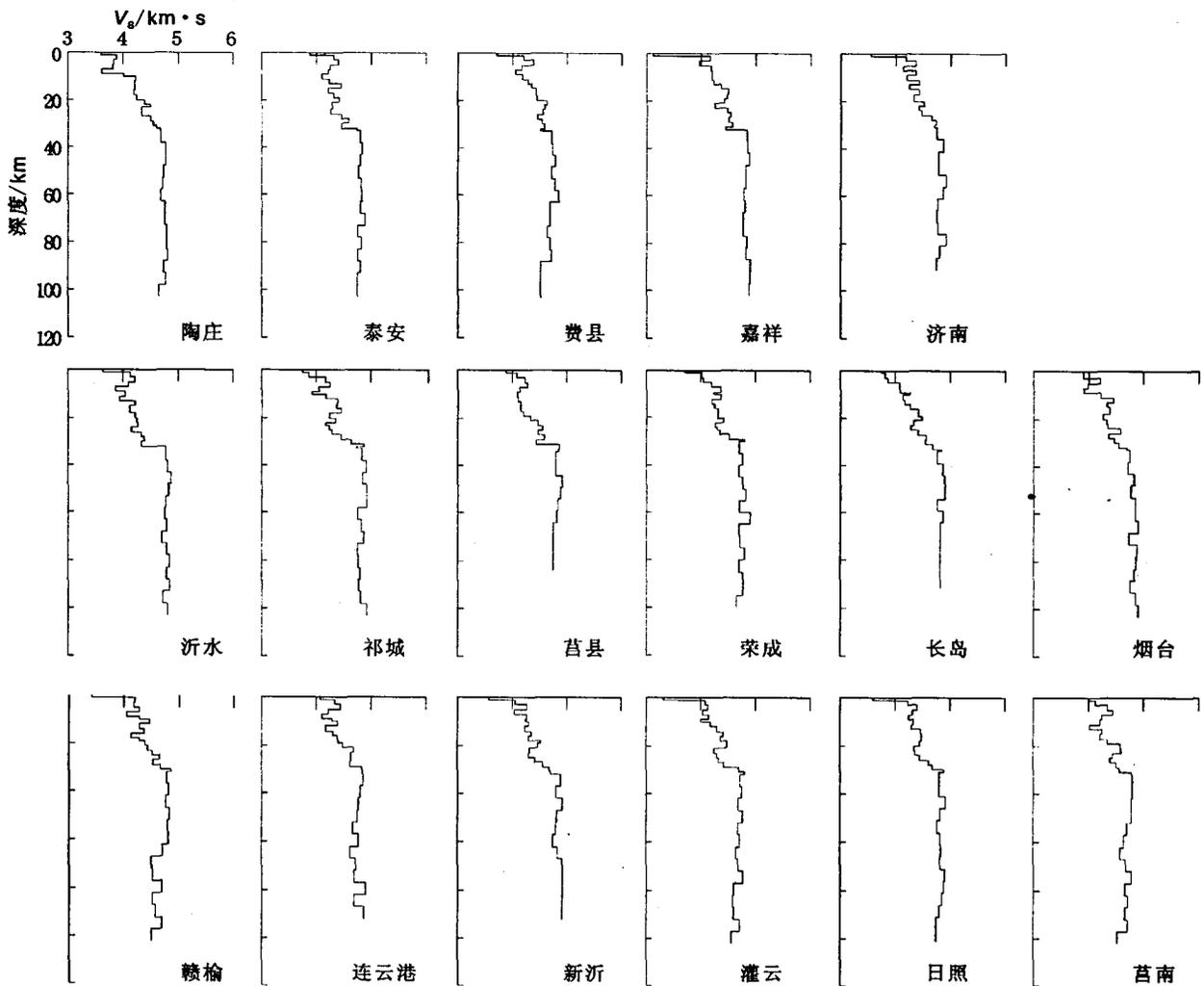


图 3 苏鲁地区各台下方壳幔剪切波速度结构

Fig. 3 Shear wave velocity structures of crust and mantle beneath stations in Jiangsu and Shandong provinces.

郯城台及莒南台的速度结构非常吻合, 上地壳顶部的高速层以及中下地壳低速层的埋深与厚度都是相当的。不同之处是我们的低速层速度更低, 一来可能是地区不同速度结构本身存在一定差异, 二来我们研究结果反映 S 波对于地下低速层敏感性要高于 P 波^[8-9]。北部的莒县、沂水台附近速度结构差异比较大。沂水台位于郯庐带的西支, 其活动强度本身就比东边的断裂低。沿郯庐断裂带有中、新生代的火山岩分布, 郯庐断裂是地幔物质上涌的通道, 其速度结构复杂性应与不同地区断裂活动强度有关。

济南和泰安台相距比较近, 但其速度结构存在明显的差异。济南台下方整个地壳高低速层起伏变化, 而泰安台上地壳呈现明显高速, 中下地壳相间一些低速层。费县、陶庄、嘉祥台速度结构比较相似, 是所有台站中速度结构最稳定的, 中地壳整个速度结构稳定上升。陶庄整个上地壳速度都比较低, 而且在上地壳

底部出现一个明显低速层, 之后一直很稳定; 费县台在下地壳出现低速层, 且伴随上地幔顶部低值。根据刘长铨等的结果^[13], 费县—泗水及其以西地区在中下地壳均出现多个低速层, 而且地壳底部的低速层是最突出的。我们在西部的几个台在下地壳也都不同程度的显示了一定厚度的低速层。

从以上的分析对比中可以清楚的看到, 我们的计算结果与前人的研究大部分都能吻合, 反映反演结果是可靠的。同时可以看到, 越是精细的研究结果越能与我们的结果较好的对应, 这可能与我们的结果集中于单一台站, 相当于一个深测井, 而且速度分层比较细密的缘故。有些地区存在的差异, 可能 S 波反演与 P 波反演结果本身就会不同, 这在层析成像结果中也有类似的显示^[14]。

苏鲁地区也是扬子板块俯冲消减的地区, 为了对深部介质有所了解, 我们选取了使用 FBS-3 宽频带

数字记录仪的连云港台和莱阳台作为反演的对象(其他台站是短周期记录,不适宜做大深度的反演)。首先利用仿真原理将之转换成波形记录周期相对较长的 DK-1 位移记录,然后截取 256 s 长度的波形,反演台站下方 800 km 左右深度的速度结构。因为 S 波位于 P 波序列之后,各种后续震相夹杂其中,难以提取长时间的纯 S 波波形,所以我们使用 P 波波形进行反演。虽然整个波形记录中包含了 pP、sP 等震相,但由于这些震相与 P 波具有相同的入射角及传播特征,而且把垂直向波形作为全波形输入,理论波形中完全可以计算和包含这些震相,得到完整的波形结果。P 波在透射过程中在各速度界面产生相关的 PS 转换波,因此其径向记录携带了大量地下构造信息,利用上面介绍的 T 函数法来计算理论波形与实际观测波形进行对比,搜索最佳拟合模型作为台下的速度结构,其中 $V_p = 1.8 V_s$ 。因波形记录周期大,反演层位厚度设为 20~30 km。理论及观测径向记录波形参见图 2(b),多个震例的波形记录都得到了比较好的拟合。

反演结果显示(图 4),连云港台下方地幔顶部速度稳定,并保持有微弱降低趋势,在 180~300 km 深度出现明显高速层。该台位于超高压物质出露地区,也就是俯冲物质折返出露地区,180 km 以下出现的高速层可能就是同步于地表出露所拆离下沉的物质,从而在地幔中形成相对高速体。另外 740~780 km 深度处出现了另一个明显的高速层,厚度在 50 km 左右。与上面的高速层的 S 波速度对比,它们相对于其上下层位的速度相对量是近似的,因此有可能是拆离后的板片继续下沉后的残余体,随着深度的增加板片上下界面熔融,与周围介质融合,板片厚度减小,但板片内部温度相对其周围介质仍然偏低,呈现相对高速的特征。当然这还有待其他资料的验证。

莱阳台位于烟台—五莲断裂附近(图 1),也是扬子板块俯冲的边缘地带。其长周期的速度结构与连云港类似,台下方在 150~240 km 深度出现高速层,埋深比连云港浅,厚度也较小,速度值与连云港台非常相近,但上下低速层均没有连云港明显,说明其在地幔介质中停留时间相对较短,边界介质刚性仍然较强。再往深部直到 800 km 没有再出现比较明显的高速层。推断 150 km 深度的高速体应该是扬子板块的俯冲物质。根据徐佩芬等^[15]的地震层析成像结果,在烟台—五莲断裂带西侧 110~150 km 深度为低速物质,在 150~250 km 深度处存在明显高速物质,认为 110~150 km 是板块断离的深度,而下伏的

高速层就是向北俯冲的扬子板块。这与我们的结果是一致的。

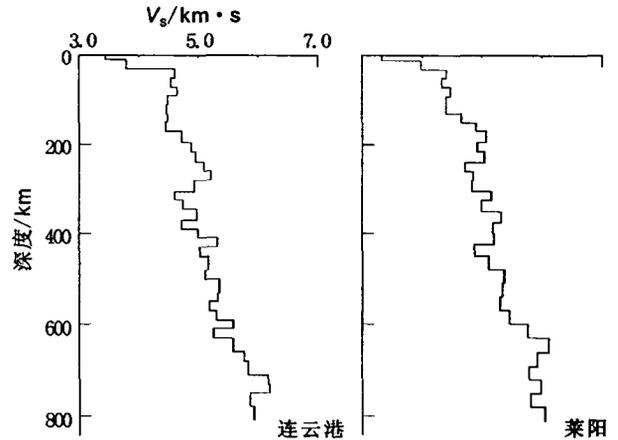


图 4 连云港、莱阳超深度速度结构

Fig. 4 Deep velocity structures beneath Lianyungang and Laiyang station.

综合这两个台的资料来看,扬子板块在华北板块下的俯冲、断离、拆沉现象是无庸置疑的,其俯冲深度在 100 km 以下。相对连云港台,莱阳台位于俯冲块体的前沿,因此其板片深度明显浅于连云港台,而且整个高速块体速度分布比较均匀。而连云港地区是俯冲板块断离的地区,俯冲下去的介质在此拆沉进入热地幔。据此两个台站来看,无论是俯冲边缘还是较远的断离区,断离残留板片在地幔中其底界面深度均未超过 300 km,而顶界面均在 200 km 以上。如果断离板片的上部折返地表,或者在地幔上涌过程中残留板片上行,其温压条件都难以达到 300 km 以下深度的,对于目前一些关于研究区域内的矿物可能来自 300~400 km 深度的报道^[16],我们的速度反演结果为这些矿物的形成机制提供了一定的制约条件。至于深处 700 km 以下的残片,可能是拆沉的扬子俯冲板片,更可能是其他古老板片的残余,其介质成分等还有待更多资料的佐证。

3 速度结构与地震关系探讨

1668 年郯城与莒县之间发生了一次 M8.5 地震,反映了郯庐断裂带巨大的活动能量。本次我们沿郯庐断裂带共得到了沂水、莒县、莒南、郯城和新沂 5 个台的数据,其中郯城和莒南台地下存在两个明显的低速层,分别位于上地壳底部和下地壳内;沂水只在上地壳、新沂只下地壳出现低速层;而莒县整个中地壳虽然很稳定,但处在相对低速中。下地壳物质速度降低一般与地幔活动有关,说明研究区内郯庐断裂的南段地幔介质的活跃程度明显高于北段,这与该段正

好位于扬子板块向北俯冲, 拆离、超高压物质回返的活动特性是一致的。

沿郯庐断裂带分布的现代中小地震成很好的线性(图 5(a)), 与断裂的走向一致为 NNE 向。郯城台以南地震相对比北段少, 发震深度分散在 5~25 km; 郯城台以北地震相对较为密集, 深度也集中在 15~25 km 的范围内; 再向北到 35.6 度以北地区地震数目减少, 深度也要浅得多, 基本上都在 20 km 以内。中小地震的频繁发生说明郯城周围仍是应力积累的场, 由于整个断裂带在多次活动中导致介质的破碎程度较高, 所以比较难以积累更大的能量。仅就易震层位而言, 郯城地区的地震大多位于上下两个低速层所夹持的高速层内, 而北段地震基本位于莒县台脆性的上中地壳内。该区域地壳厚度都在 35 km 左右, 所以地震分布相对是比较深的, 反映郯庐断裂切割深度较大, 深部介质活动比较活跃。

苏鲁地区另一条地震分布带是位于渤海边缘的烟台—长岛区域, 长岛附近地震尤其集中。地震深度分布剖面显示(图 5(b)), 长岛地区地震相对较浅, 集

中在 5~15 km 范围内; 而东部地区地震相对较深, 可达 25 km 左右。对照其速度结构, 长岛台速度分布相对较均匀, 只在 22 km 深度出现 1 个低速层, 也就是说地震全部位于上面的高速层内, 以脆性的上地壳破裂为主。而东部的烟台在上地壳底部出现低速层后, 又出现一个高速层, 整个中下地壳处在相对低速中; 最东部的荣成台是上地壳底部出现高速层, 中下地壳处在相对低速中。这两个台站本身周围地震很少, 其相邻地区的地震易震层有一部分发生在相对稳定的中下地壳内。投影在烟台台附近的地震有几个深度达到 33 km 左右, 虽然地震定位存在一定的误差, 但仍说明有一些较深的地震发生。烟台台下地壳只出现了一个相对高速层, 其他层位的速度相对是比较正常的, 不过烟台—五莲断裂经过该区, 而且烟台下方地幔顶部的速度相比其他台站相对低一些, 可能反映该台下地幔顶部存在局部熔融物质, 从而对下地壳介质造成一定的影响, 而使得地震深度随之加大。

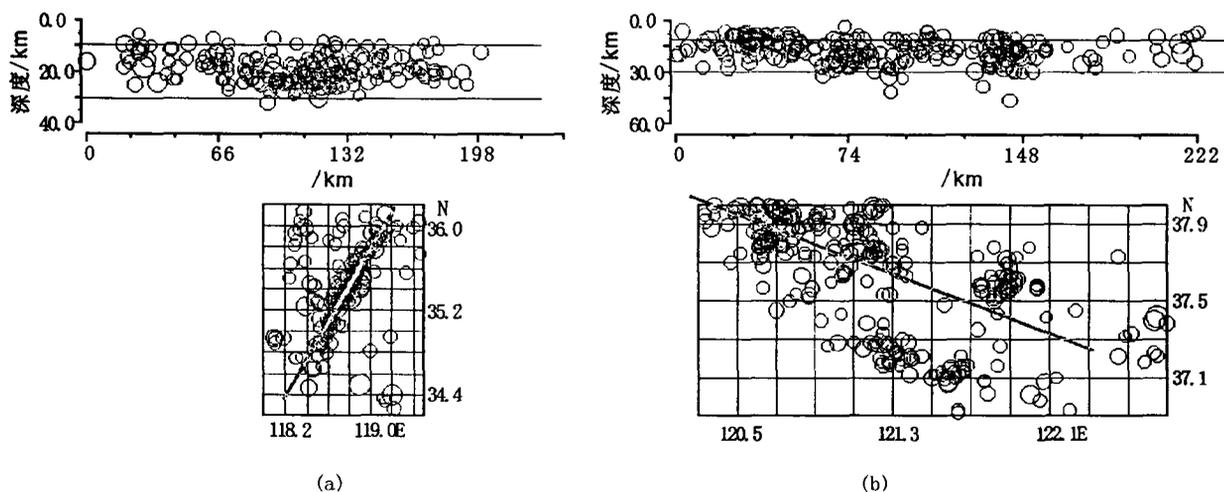


图 5 苏鲁地区地震空间分布图(上图的横坐标即下图的直线, 所有地震均投影在直线剖面)

Fig. 5 Spatial distribution of earthquakes in Jiangsu-Shandong area (X-axis in upper diagram represents the lines of the lower diagram, and all of earthquakes are projected on the profile).

4 结论

本文利用纯 S 波波波形反演和 T 函数方法分别得到了苏鲁地区 17 个台站下方 100 km 的壳幔精细速度结构和 2 个地震台下方 800 km 深度的地幔速度结构, 结果显示如下几个特点:

(1) 大多数台站上地壳速度偏高, 在苏鲁东部高压、超高压物质出露区的部分台站甚至达到 3.8 km/s, 地幔顶部速度相对较高, 显示有高速物质存在;

(2) 连云港和莱阳台 150 km 深度下均出现高速层, 反映扬子板块的俯冲深度可达 250 km 左右, 拆离下沉深度甚至达到 300 km 或者更深;

(3) 沿郯庐断裂分布台站均显示明显低速层分布(其中郯城台有 2 个明显的低速层), 并具有南深北浅的特点, 反映南段地幔活动要强于北段;

(4) 地震深度分布与低速层关系密切, 沿郯庐断裂和烟台—五莲断裂的地震深度都比较深, 已经达到

地壳的底部,反映这两条断裂目前切割深度都比较大,而且地幔物质相对比较活动。

[参考文献]

- [1] Wang X, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogites from the Dabie mountains in central China[J]. *Geology*, 1989, 17: 1085-1088.
- [2] Xu S, Okay A I, Ji S, et al. Diamond from metamorphic rocks and its implication for tectonic setting[J]. *Science*, 1992, 256: 80-82.
- [3] Ye kai, Hirajima T, Ishiwatari A, et al. The discovery of intergranular coesite in eclogite of Yangkou, Qingdao and its significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(15): 1407-1408.
- [4] 金振民,金淑燕,高山,等. 大别山超高压岩石形成深度局限于100~150km吗?——针状含钛铬铁矿的发现及其动力学意义的思考[J]. *科学通报*, 1998, 43(7): 767~770.
- [5] 刘福田,徐佩芬,刘劲松,等. 大陆深俯冲带的地壳速度结构—东大别造山带深地震宽角反射/折射研究[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(3): 366-372.
- [6] 杨文采,余长青. 根据地球物理资料分析大别—苏鲁超高压变质带演化的运动学与动力学[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(3): 346-359.
- [7] 王椿镛,张先康,陈步云,等. 大别造山带的地壳结构研究[J]. *中国科学(D)*, 1997, 27: 221-226.
- [8] 张学民. 利用S波波形拟合反演台站下方剪切波速度结构的方法研究[D]. 合肥:中国科技大学地球物理与空间科学系, 2001.
- [9] Zhang X M, Shu P Y, Li Y M, et al. A study on transversal wave velocity structure under seismic station by inputting pure S wave[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(1): 67-75.
- [10] 纪晨,姚振兴. 用于地球物理反演的均匀设计优化算法[J]. *地球物理学报*, 1996, 39(2): 233-242.
- [11] 杨文采,程振炎,陈国九,等. 苏鲁超高压变质带北部地球物理调查(I)—深反射地震[J]. *地球物理学报*, 1999, 42(1): 41-51.
- [12] 卢造郎,蒋秀琴,白云,等. 胶辽渤海地区地壳上地幔结构特征与介质的横向非均匀性[J]. *华北地震科学*, 1999, 17(2): 43-51.
- [13] 刘昌铨,刘光夏,杜官恒. 郯庐古裂谷中段地壳结构的初步研究—二维动力学射线追踪方法的解释结果[J]. *华北地震科学*, 1987, 5(2): 1-12.
- [14] 孙若昧,赵燕来,吴丹. 京津唐地区地壳结构与强震的发生—II. S波速度结构[J]. *地球物理学报*, 1996, 39(3): 347-355.
- [15] 徐佩芬,孙若昧,刘福田,等. 扬子板块俯冲、断离的地震层析成像证据[J]. *科学通报*, 1999, 44(15): 1658-1661.