

由长周期地震面波研究华南地区 地壳和上地幔三维构造*

傅竹武 庄 真 吕梓龄 胡家富

(中国昆明 650091 云南大学地球科学系)

宋仲和 陈国英 安昌强 陈立华

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

摘 要

利用中国 27 个地震基准台和世界标准地震台网 WWSSN 西南亚 3 个台站记录的中国大陆及邻近地区 79 个地震共 238 条路径的长周期面波资料,应用适配滤波频时分析技术和改进的分格频散反演方法,得到该地区 117 个 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 斜方格的纯路径群速度频散值,进而反演得到华南地区深至 170km 左右的三维 S 波速度构造。

结果表明:华南地区各一级构造单元之间有明显差异,一级单元内的次级构造单元也有一定差异。东部地壳较薄,由东往西逐渐变厚,厚度为 30—13km 左右。地壳中 S 波平均速度,东北部最低,西部最高,约为 3.48—3.68km/s,在大范围内未发现明显的地壳低速层。华南大部分地区存在上地幔低速层,低速层起始深度为 75—106km 左右,低速层中 S 波最小速度约为 4.28—4.38km/s。尽管华南大部分地区存在上地幔低速层,但各主要层位分界明显,层面平缓,在较大尺度地下构造横向变化较小,除西部褶皱区、东南沿海断裂系等边缘区域为构造活动区外,华南主体的地壳上地幔构造仍属于较稳定的大陆块体构造。

关键词 分格频散反演;瑞利波;群速度频散;上地幔低速层;三维构造

1. 引 言

本世纪 50 年代以来,利用地震面波的频散现象来研究地球层状构造的工作迅速发展起来,近年来人们进一步把注意力集中到揭示地下构造横向不均匀性的研究中,着力进行三维构造的研究(Mitchell and Yu, 1980;曾融生,1979;冯锐等,1981;陈国英和曾融生,1985;孙克忠和滕吉文,1985)。中国大陆是一个多地震区域,地处三大板块的交汇和边缘地带,对中国大陆构造的研究是一项重要的基础工作。冯锐等(1981)利用地震面波频散资

* 国家自然科学基金会资助课题。

1990 年 11 月 5 日收到本文初稿,1992 年 7 月 18 日决定采用。

料,反演得到中国大陆 5 个构造差异较大的块体地壳结构的层状模型,但未能进一步揭示块体内部更小单元的横向不均匀性.

为了对中国大陆地下构造的横向不均匀性作更精细的揭示,我们采用了近年来发展起来的适配滤波频时分析技术(Feng and Teng, 1983a)和改进的分格频散反演方法(Feng and Teng, 1983b;庄真、邓大量,1987),对大量长周期面波资料进行了处理和计算,经分格频散反演后得到中国大陆及邻近地区的 147 个分格的瑞利波、勒夫波纯路径频散值.本文用华南地区 11 个分格的瑞利波纯路径频散值进行构造反演,得到该地区深至 170km 左右的三维 S 波速度构造.将本文结果与中国其它几个地区构造反演的结果综合起来,就可得到中国大陆地壳和上地幔三维构造的全貌.

2. 资料处理

本研究使用了北京、昆明等国内 27 个地震基准台 1980,1983—1987 等 6 年的 763 长周期地震仪记录和世界标准地震台网 WWSSN 西南亚 3 个台站(伊斯兰堡、喀布尔、新德里)1980 年记录的部分面波资料.选取的地震事件为 79 个,地震震级在 5 级以上,震源深度在 50km 以内,238 条大圆路径覆盖了中国及其邻近地区,对中国东南部的覆盖,甚为稠密.

为了对中国大陆地下构造的横向不均匀性作较细致的研究,我们对研究区域作了尽可能小的分格化处理,将地震波路径所覆盖的中国大陆及其邻域划分成 147 个 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 的斜方格.在分格频散反演时只选用了 10—105s 周期范围内的群速度频散值,周期 105s 的波,其波长约为 400km,与 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 斜方格的线度相近,可见,划分成 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 的方格,是保证对各个分格有足够分辨率的前提下最小的分格;因之所以划分成斜方格,是考虑使纵分格线基本平行于南北带轴线,便于更准确地揭示南北带的复杂构造,探索南北带与其东、西相邻部分的构造异同.

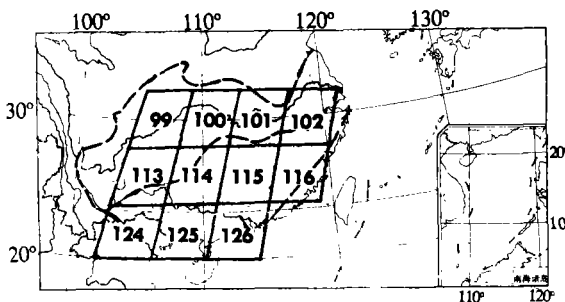


图 1 华南地区的分格标号及地质分区

①成都;②重庆;③宜昌;④武汉;⑤杭州;⑥昆明;⑦贵阳;
⑧桂林;⑨衡阳;⑩南平;⑪福州;⑫南宁;⑬广州;⑭汕头

频散值.为准确计,仅取 10.45—105.00s 周期范围内 26 个中心周期的纯路径频散值进行构造反演,其中 99,100,101,102,113,114,115,116,124,125,126 等 11 个斜方格即本文

在资料处理时,先用数字化仪对选取的地震面波资料进行采样,并内插成 1 点/秒的数字记录,经仪器校正、三分向记录合成、快速富氏变换,得到波谱.再采用均等显示滤波(Dziewonski *et al.*, 1969; Nyman and Landisman, 1977)和最佳带宽滤波(Cara, 1973)技术提取出 238 条波路径在 10.45—105.00s 周期范围内 26 个中心周期的混合路径群速度频散值.应用分格频散反演方法,从 238 条路径的混合频散数据中提取出 147 个分格的纯路径群速度

所研究的华南地区(见图 1). 我们参照了(Feng and Teng, 1983b)对欧亚大陆分格反演的结果, 对华南分片给出几个不同的初始模型, 层数定为 16 层. 构造反演中, 将 v_s 作为反演时的唯一变量. 我们以 11 个分格瑞利波的纯路径频散值作为构造反演的观测值, 对每一个分格, 反复调整模型, 直至 26 个周期的群速度理论值对观测值的拟合误差均小于群速度标准离差时为止.

通过计算得到: 选用的 26 个中心周期的瑞利波群速度标准离差的平均值为 0.122km/s , 取华南任意一分格, 例如 114 号分格, 可算出其 26 个周期的群速度平均值为 3.39km/s , 上述两值相除, 比值为 3.6% , 此即分格频散反演中的相对误差.

文中还给出理论模型与观测数据的拟合误差, 还是以 114 号分格为例, 114 号分格 26 个周期的拟合误差的平均值为 0.013km/s , 而 26 个周期群速度的标准离差的平均值为 0.122km/s , 前者比后者小一个数量级, 可见拟合是比较好的. 华南 11 个分格构造反演拟合误差的平均值(见表 1)均比标准离差平均值小很多. 构造反演中群速度理论频散曲线与观测值的拟合情况还可以由图 3 看到, 图中光滑曲线是群速度理论频散曲线, “○”是群速度观测值, 短竖线是各周期的群速度标准离差值.

表 1 华南地区构造反演的拟合误差

华南地区分格值											华南地区 平均值
99	100	101	102	113	114	115	116	124	125	126	
0.038	0.022	0.019	0.018	0.023	0.013	0.016	0.026	0.026	0.021	0.032	0.023

注: 表中的值为 26 个周期拟合误差的平均值(单位: km/s), 26 个周期群速度标准离差的平均值为 0.122km/s .

我们还绘制了华南 11 个分格 S 波速度模型的分辨率核曲线, 本文仅任选了其中一个分格的图(见图 2). 分辨率核曲线可以看作是一种加权函数, 每层的曲线反映了该层信息的主要来源. 此图反映出从 10km 至 50km 深度范围内分辨率都相当好, 直至 160km , 尚有一定的分辨率, 至 185km 以下, 分辨率已不好了, 表明可信的反演深度为 170km 左右. 本文所给结果, S 波速度误差为 $\pm 0.1\text{km/s}$, 厚度和深度误差, 随深度增加逐渐加大, 地壳中为 $\pm 2\text{km}$, 到 150km 深处约为 $\pm 12\text{km}$.

3. 结 果

华南地区共有 11 个分格, 北起北纬 32° 度线, 即长江以北一线, 西起四川宜宾至云南曲靖一线, 南、东至边缘海. 这个地区包括 3 个较大的地质构造单元(黄汲清等, 1980): 扬子准地台、华南褶皱系、东南沿海褶皱系(见图 1), 跨中国东南部 13 省、区: 四川东部、贵州、

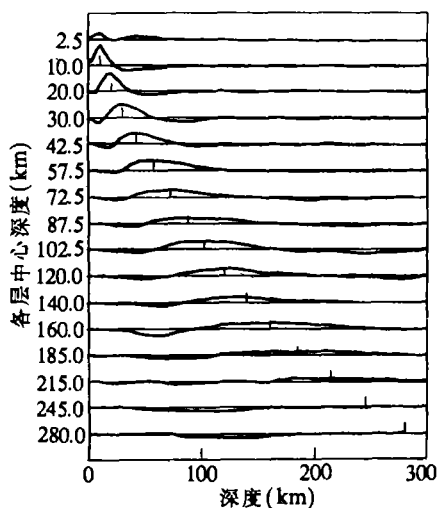


图 2 模型分辨率核曲线
(115 号分格)

云南东部少量地区、湖北大部、湖南、广西、广东、安徽南部、江苏南部、上海、浙江大部、江西、福建等. 这个范围, 已包括西南和华东的部分地区, 因此本文所指的华南地区应视为大华南地区. 据华南 11 个分格的构造反演结果, 以表列出每一分格的层厚度、层中心深度、以及各深度对应的 S 波速度(见表 2). 同时还将结果绘制成每一分格 S 波速度构造图, 因篇幅所限, 本文仅选用了其中 6 个分格的图(见图 3). 对反演得到的数据进行统计, 提取出华南构造的主要特征量, 列于表 3. 图 4 则是华南地区西-东走向和北-南走向纵剖面的 S 波速度分布图. 上述图表, 提供了华南地区详细的三维构造模型.

表 2 华南地区各分格构造反演结果

层厚 (km)	深度 (km)	v_s (km/s)	层厚 (km)	深度 (km)	v_s (km/s)	层厚 (km)	深度 (km)	v_s (km/s)		
		99			113			101	114	115
5	2.5	3.02	5	2.5	2.99	5	2.5	2.90	3.01	2.89
10	10.0	3.40	10	10.0	3.44	10	10.0	3.35	3.58	3.42
10	20.0	3.76	10	20.0	3.72	10	20.0	3.69	3.59	3.88
16	33.0	3.95	18	34.0	3.99	10	30.0	3.93	3.92	3.96
15	48.5	4.26	15	50.5	4.42	15	42.5	4.33	4.36	4.46
15	63.5	4.30	15	65.5	4.50	15	57.5	4.46	4.49	4.62
15	78.5	4.45	15	80.5	4.37	15	72.5	4.59	4.53	4.68
15	93.5	4.57	15	95.5	4.32	15	87.5	4.55	4.38	4.44
15	108.5	4.51	15	110.5	4.28	15	102.5	4.49	4.34	4.33
15	123.5	4.42	15	125.5	4.38	20	120.0	4.52	4.41	4.38
20	141.0	4.36	15	140.5	4.46	20	140.0	4.52	4.50	4.44
20	161.0	4.48	20	158.0	4.57	20	160.0	4.61	4.60	4.59
30	186.0	4.56	30	183.0	4.63	30	185.0	4.65	4.66	4.64
30	216.0	4.65	30	213.0	4.64	30	215.0	4.65	4.65	4.65
30	246.0	4.65	30	243.0	4.66	30	245.0	4.65	4.66	4.66
40	281.0	4.67	40	278.0	4.69	40	280.0	4.67	4.68	4.68
301	451.5	4.80	298	447.0	4.80	300	450.0	4.80	4.80	4.80

层厚 (km)	深度 (km)	v_s (km/s)		层厚 (km)	深度 (km)	v_s (km/s)			层厚 (km)	深度 (km)	v_s (km/s)
		100	124			102	116	125			126
5	2.5	2.94	2.99	5	2.5	2.88	2.82	2.81	5	2.5	2.84
10	10.0	3.42	3.46	8	9.0	3.28	3.31	3.36	8	9.0	3.40
10	20.0	3.71	3.87	10	18.0	3.63	3.87	3.71	7	16.5	3.72
13	31.5	3.88	3.93	10	28.0	3.80	3.92	3.86	10	25.0	3.81
15	45.5	4.28	4.35	15	40.5	4.30	4.38	4.35	15	37.5	4.27
15	60.5	4.40	4.49	15	55.5	4.47	4.62	4.50	15	52.5	4.50
15	75.5	4.48	4.44	15	70.5	4.48	4.54	4.49	15	67.5	4.45
15	90.5	4.41	4.38	15	85.5	4.44	4.38	4.38	15	82.5	4.34
15	105.5	4.41	4.36	15	100.5	4.48	4.31	4.38	15	97.5	4.36
15	120.5	4.43	4.37	20	118.0	4.54	4.34	4.41	15	112.5	4.35
20	138.0	4.48	4.42	20	138.0	4.56	4.40	4.46	20	130.0	4.40
20	158.0	4.58	4.52	20	158.0	4.60	4.51	4.59	20	150.0	4.54
30	183.0	4.63	4.62	30	183.0	4.65	4.63	4.64	30	175.0	4.64
30	213.0	4.64	4.63	30	213.0	4.64	4.64	4.65	30	205.0	4.66
30	243.0	4.66	4.65	30	243.0	4.65	4.66	4.66	40	240.0	4.67
40	278.0	4.68	4.68	40	278.0	4.68	4.69	4.68	40	280.0	4.69
298	447.0	4.80	4.80	298	447.0	4.80	4.80	4.80	300	450.0	4.80

表 3 华南地区构造特征

		华 南 地 区 分 格 值											华 南 平均值
地	厚 度(km)	99	100	101	102	113	114	115	116	124	125	126	
壳	\bar{v}_s (km/s)	3.66	3.59	3.55	3.48	3.68	3.60	3.63	3.59	3.67	3.53	3.52	3.59
上顶	厚 度(km)	65	45	45	45	35	45	50	45	40	45	45	46
地	v_{smax} (km/s)	4.57	4.48	4.59	4.48	4.50	4.53	4.68	4.62	4.49	4.50	4.50	4.54
幔盖	\bar{v}_s (km/s)	4.40	4.39	4.46	4.42	4.45	4.46	4.57	4.51	4.43	4.45	4.41	4.45
上低	起始深度(km)	106	无	无	无	78	80	80	78	78	78	75	82
	下界深度(km)	171	明	明	明	153	150	155	158	155	153	150	156
地速	厚 度(km)	65	显	显	显	75	70	75	80	77	75	75	74
	v_{smin} (km/s)	4.36	低	低	低	4.28	4.34	4.33	4.31	4.36	4.38	4.35	4.34
幔层	v_{smin} 对应深度	141	速	速	速	110	102	102	100	105	100	105	108
	\bar{v}_s (km/s)	4.43	层	层	层	4.38	4.41	4.41	4.38	4.40	4.42	4.39	4.40

结果表明：各构造单元之间有明显差异，主要表现在上地幔。华南地壳厚度变化趋势与地表形态大体呈镜像关系：东部地壳较薄，由东往西逐渐变厚，地壳厚度在 30—43km 之间，壳内 S 波平均速度为 3.48—3.68km/s 左右，横向变化率较小。用于反演的瑞利波最小周期为 10.45s，这个周期对薄层构造的分辨率不够高，因此不可能对地壳作更细的分层。在此前提下，未发现明显的地壳低速层，壳内 S 波速度沿垂直向呈正梯度变化。根据反演结果，考虑各构造单元不同的地质背景（黄汲清等，1980），可以看出以下主要特点：

（1）扬子准地台的中部和东部（100,101,102 号分格），地壳厚度与壳内 S 波平均速度由东往西都逐渐增大，厚度为 33—38km，S 波平均速度为 3.48—3.59km/s，变化平缓。上地幔未发现明显的低速层，不同深度 S 波速度横向变化率均较小。扬子准地台是晚元古代末扬子旋回形成的地台，沉积盖层发育良好，全区大部分为陆相沉积，所得结果证实了该区是一个比较稳定的次级块体。

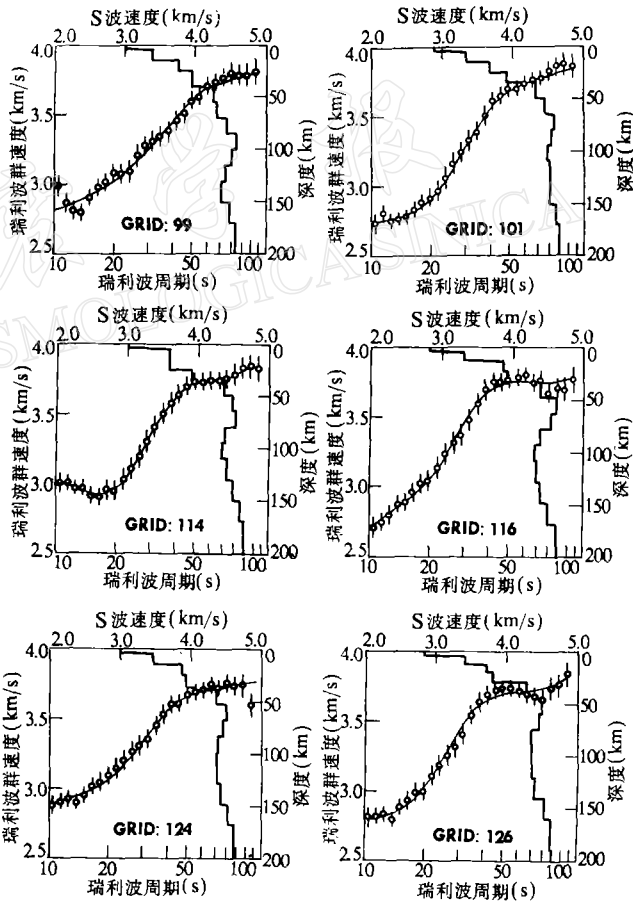


图 3 构造反演的群速度频散拟合情况与 S 波速度构造模型
(99,101,114,116,124,126 分格)
(○)——群速度观测值，短竖线——观测值标准离差，光滑曲线——理论频散曲线

(2) 扬子准地台的西部(113 号分格, 滇黔褶皱区)和西北部(99 号分格, 四川台拗, 即川中、川东拗陷盆地), 地壳较华南其它区域厚, 为 41—43km, 壳内 S 波平均速度明显高于华南其它区域, 为 3.66—3.68km/s. 上地幔顶盖下发现明显的低速层, 但埋深存在显著差异. 滇黔褶皱区低速层埋深较浅, 约 78km, 层厚约 75km, 层内 S 波最小速度较小, 约为 4.28km/s; 四川台拗低速层埋深较深, 约 106km, 层厚约 65km, 层内 S 波最小速度较大, 约为 4.36km/s. 与前者相比, 低速层整体深 20 余 km, 且稍薄. 考虑到晚三迭世以来该区所经历 3 次大构造运动及其所处的构造应力场使其经历了强烈的改造, 可以认为, 3 次大构造运动和印支板块强大的水平挤压力是使滇黔褶皱区隆起、四川台拗陷陷, 壳厚度增大、波速增高的主要原因. 反演结果揭示了滇黔褶皱区强地震活动区的深部构造背景; 四川台拗的低速层埋深较深, 其活动性低于滇黔褶皱区, 地震较少.

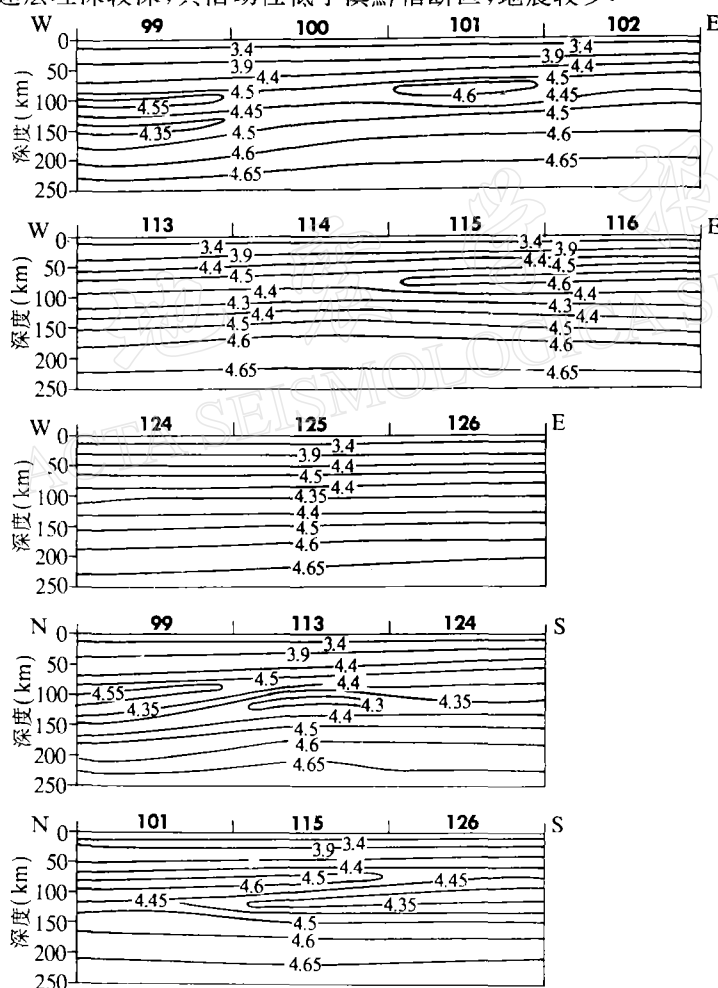


图 1 S 波速度纵剖面

(3) 华南褶皱系(114, 115, 124, 125, 126 号分格)地壳厚度由东往西在 30—38km 之间, 壳内 S 波平均速度为 3.52—3.67km/s. 上地幔顶盖下有明显低速层, 埋深为 75—80km, 层厚 70—77km, 层内 S 波最小速度为 4.33—4.38km/s, 不同深度处横向变化率均

较小. 华南褶皱系是一个晚加里东地槽褶皱系, 志留纪末的晚加里东运动使其转化为地台, 并与扬子准地台合并, 晚三迭世以来的 3 次大构造运动以及大陆边缘活动带的发展又使之受到改造, 沉积盖层全面褶皱. 与其北部的扬子准地台相比, 活动性要高于前者, 但由于它的层位分界明显, 层面平缓, 各层厚度与速度横向变化率较小, 横向变化率随深度加深呈减小的趋势, 尽管存在上地幔低速层, 仍属于相对稳定的块体.

(4) 东南沿海褶皱系(116 号分格的一部分)地壳厚度约 33 km, 壳中 S 波平均速度约为 3.59 km/s. 上地幔有低速层, 埋深约 78 km, 层厚约 80 km, 层中 S 波最小速度约为 4.31 km/s. 该区具有大陆地壳向海洋地壳过渡边缘地区的构造特征, 位于滨太平洋断裂体系中, 壳内深断裂发育, 为强地震活动区, 幔内热物质容易通过深断裂上涌, 使壳内热流值增高, 这一点已由观测所证实, 该区有可供广泛利用的地热资源(熊绍柏等, 1991).

本文结果揭示出: 华南的三大构造单元之间有明显差异, 单元内的次级构造单元也有一定差异, 全区大范围内存在明显的上地幔低速层, 在不同深度不同层位存在横向不均匀性; 然而除西部褶皱区、东南沿海断裂系这些边缘区域为构造活动区、频发地震外, 华南主体地壳上地幔构造仍属于较稳定的大陆块体构造.

4. 讨 论

各类地球物理现象(地震、火山、地热等)的深部构造背景受到越来越多的关注(刘福田等, 1989), 本文的结果有助于我们更深入地研究华南地区的深部构造. 为了进一步验证本文的结果, 与其他研究者用不同方法所作的部分结果作一对比:

(1) 冯锐等(1981)利用地震面波频散资料进行反演, 得到中国 5 个大陆块体的地壳结构层状模型, 其中华南块体的平均地壳模型是: 分为 4 层, 总厚度为 39.2 km, 按加权平均算出地壳 S 波平均速度约为 3.60 km/s. 本文反演结果为: 华南全区地壳也分为 4 层, 平均厚度为 36 km 左右, S 波平均速度约为 3.59 km/s. 两者相比, 本文地壳略薄, 壳内 S 波速度值非常接近.

(2) 朱成男(1982)依据云贵地区布格重力异常资料, 计算得出该区等厚度图, 给出了以云南小江断裂为界东西两部分地壳构造模式. 其东部地区(包括滇东、贵州大部分及广西一部分)地壳由东南向西北逐渐变厚, 由 40 km 增加到 50 km 左右, 平均为 45 km. 这一区域大体对应本文 113 号分格, 此分格反演结果, 地壳平均厚度约为 43 km. 二者比较接近.

(3) 王金星(1981)根据重力观测资料, 得出浙江省莫霍面形态基本轮廓: 莫霍面深度总的变化趋势是东北部浅、西南部深, 从西北向东南呈拗隆相间的特点; 莫霍面等深度线最浅处为 34 km, 最深处为 39 km, 取其算术平均值约为 36.5 km. 这一区域主要位于 102 号分格, 此分格地壳平均厚度约为 33 km.

(4) 廖其林等(1988)根据 1982 和 1985 年福州-泉州-汕头地区人工爆炸地震测深资料得到的该区地壳上地幔速度结构模型表明: 该区具有大陆地壳向海洋地壳过渡的边缘地区结构特征, 地壳厚度为 30 km, 壳内 P 波平均速度为 6.30 km/s, 莫霍面下 P 波速度为

7.90km/s. 这条测线沿东南沿海线布设,斜跨 116 号分格的部分地区,116 号分格的反演结果是:地壳厚度约为 33km,壳内 S 波平均速度约为 3.59km/s,上地幔顶盖 S 波平均速度约为 4.51km/s,若按 $v_P/v_S=1.73$ 将 S 波速度折算为 P 波速度,则分别为 6.21km/s 和 7.80km/s. 两者相比,本文地壳厚度略大,壳内速度和莫霍面下速度略小,但差异不大.

(5) 江西永平铜矿千吨级工业爆破观测(国家地震局科技监测司,1988)获得宁德—永平—信阳和杭州—永平—赣州两条近直交剖面的地震测深资料,求得本区综合速度模型. 结果表明:该区莫霍面起伏平缓,地壳平均厚度为 32.5km,壳内 P 波平均速度为 6.28km/s,上地幔顶部 P 波速度平均为 8.03km/s. 上述测区经过 101,102,115,116 号分格,这 4 个分格的对应值是:地壳平均厚度约为 34km,壳内 S 波平均速度约为 3.56km/s,上地幔顶部 S 波平均速度约为 4.49km/s,按上述波速比折算为 P 波速度,分别为 6.16km/s 和 7.77km/s. 两者相比,地壳厚度相差不大,壳内平均速度相差也不太大,上地幔顶部速度本文的偏小.

(6) 广西柳州太阳村水泥厂工业爆破的地壳测深资料(国家地震局科技监测司,1988)得到的广西东部地壳速度结构表明:该区地壳呈南薄北厚的趋势,地壳平均厚度为 32.2km,壳内 P 波平均速度为 6.16km/s,上地幔顶部 P 波速度为 8.11km/s. 这一测区经过 114,125 号分格,本文结果是:地壳平均厚度约为 34km,壳内 S 波平均速度约为 3.57km/s,上地幔顶盖 S 波平均速度约为 4.46km/s,折算为 P 波速度,分别为 6.18km/s 和 7.27km/s. 本文地壳略厚,但差异不大,地壳平均速度十分接近,上地幔顶部速度偏小.

从上述对比可以看出:本文用长周期面波资料经分格频散反演得到的地壳上地幔三维速度构造模型,与用其它方法得到的结果相比,地壳部分差异不大,上地幔顶部速度有一定差异,与上述 5,6 两点中所述工业爆破结果对比,上地幔顶部速度相差在 0.26—0.39km/s 之间,其原因可能是:1) 工业爆破得到的结果是沿测线的,本文的结果是斜方格面积内的平均值,区域并未完全对应;2) 两者给出的是不同物理类型的波速,折算时选取波速比 $v_P/v_S=1.73$ 不可能严格符合每一地区的实际;3) 由于地球物理反问题的多解性,模型的选取和调整方式的不同,也可能产生一定差异;4) 不论用何种地球物理方法进行地下构造反演,都存在对深部的分辨率不如浅部的问题,所得结果浅部(地壳)对应较好,深部有一定差异正反映了这一特点. 揭示地球内部横向不均匀性的工作吸引了众多的研究者,所用的不同方法均有其长处与局限性,对不同方法所得结果进行对比和分析,有助于获得关于地球内部构造更全面更深入的认识,上述对比从一个方面验证了本文的结果.

参 考 文 献

- 陈国英、曾融生,1985. 用地震面波频散研究喜马拉雅山与西藏高原岩石圈构造的差异. 地球物理学报,28,增刊 I, 161—173.
- 冯锐、朱介寿、丁韞玉、陈国英、何正勤、杨树彬、周海南、孙克忠,1981. 利用地震面波研究中国地壳结构. 地震学报,3, 335—350.
- 国家地震局科技监测司,1988. 中国大陆深部构造的研究与进展,140—153,246—252. 地质出版社,北京.
- 黄汉清、任纪舜、姜春发、张正坤、秦德余,1980. 中国大地构造及其演化,35—38,61—62,86—88,96—97,105—118. 科学出版社,北京.

- 刘福田、曲克信、吴华、李强、刘建华、胡戈, 1989. 中国大陆及其邻近地区的地震层析成象. *地球物理学报*, **32**, 281—291.
- 廖其林、王振明、王屏路、余兆康、吴宁远、刘宝诚, 1988. 福州-泉州-汕头地区地壳结构的爆炸研究. *地球物理学报*, **31**, 270—280.
- 孙克忠、滕吉文, 1985. 由长周期地震面波研究西藏高原地区的地壳和上地幔的速度分布. *地球物理学报*, **28**, 增刊 I, 43—53.
- 宋仲和、安昌强、陈立华、仇志荣, 1986. 中国大陆和边缘海的上地幔 P 波速度结构. *地震学报*, **8**, 263—273.
- 王金星, 1981. 浙江省莫霍面形态及其地质意义的初步认识. *物探与化探*, **5**, 2, 86—92.
- 王凯、姚振兴, 1991. 华南上地幔 P 波速度结构. *地球物理学报*, **34**, 309—317.
- 熊绍柏、金东敏、孙克忠、邹以生、樊叙邦、杜小刚, 1991. 福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征. *地球物理学报*, **34**, 55—63.
- 朱成男, 1982. 云贵地区重力地壳构造模式. *地壳形变与地震*, **1**, 32—37.
- 曾融生, 1979. 中国深部构造研究的进展. *地球物理学报*, **22**, 336—345.
- 庄真、邓大量, 1987. 勒夫波群速度频散与太平洋地壳及上地幔三维构造. *地球物理学报*, **30**, 246—259.
- Cara, M., 1973. Filtering of dispersed wavetrans. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **33**, 65—80.
- Dziewonski, A., Bloch, S. and Landisman, M., 1969. A technique for the analysis of transient seismic signals. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **59**, 1, 427—444.
- Feng, C. C. and Teng, T. L., 1983a. An error analysis of frequency-time analysis. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **73**, 143—155.
- Feng, C. C. and Teng, T. L., 1983b. Three-dimensional crust and upper mantle structure of the Eurasian continent. *J. Geophys. Res.*, **88**, B3, 2261—2272.
- Mitchell, B. J. and Yu, G. K., 1980. Surface wave dispersion, regionalized velocity models, and anisotropy of the Pacific crust and upper mantle. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **63**, 497—514.
- Nyman, D. C. and Landisman, M., 1977. The display-equalized filter for frequency-time analysis. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **67**, 393—404.