

福建沿海地区地壳S波速度结构 和泊松比分布特征

邱陶兴 廖其林 王振明 杨成林

(福建省地震局地震研究所)

摘要 本文根据福建沿海地区人工地震测深剖面的单分量地震记录,对S波信息进行开发研究,通过对地震记录重新采样,数学处理与分析,获得了该区地壳S波速度模型。结果表明,福建沿海地区的地壳与上地幔S波速度结构可分为三层,即上地壳、中地壳和下地壳;在中地壳普遍发育一层速度为3.4—3.5km/s的低速层,厚度约3—4km,MOHO面深度,泉州以北最浅,仅为28km,宁德以南最深,为32km。

结合P波速度模型,我们获得了该区地壳平均泊松(Poisson)比模型。漳州盆地和福州盆地平均泊松比值表现出异常高值,而泉州、渔溪地槽的平均泊松比为相对低值,结果显示,泊松比值的大小与断裂交汇区,特别是地壳异常区具有良好的对应关系。

关键词 福建沿海 地壳与上地幔 S波速度结构 泊松比模型

一、引言

长期以来,人工地震测深资料的研究,着重于分析P波信息,导出地壳与上地幔P波速度结构模型。随着地球科学研究工作的不断深入,越来越多的科学家认识到,仅仅从地震测深资料中利用P波信息的方法不足以解决有关地壳介质的更精细的研究。地震资料中同时有S波信息,它所包含的有关震源及波传播路径上的介质信息比单纯用P波的信息量多得多。S波的研究在认识大陆地壳演化,地球动力学,地震成因,震源区介质条件,介质各向异性,区域应力场等方面都起着重要作用。通过对P波、S波的研究,我们可以知道,地壳内介质的组成,介质孔隙度的大小,应力调整区的介质状态, V_p/V_s 波速比,地壳内泊松(Poisson)比分布,以及震源区的深部泊松比特征,介质各向异性及孕震过程中S波的分裂过程等。在天然地震资料处理中,已对S波进行了大量的研究,从而对震源机制的了解以及地震预报起到了重要作用,而对人工地震测深资料中S波的研究相对比较少,这主要是由于,一方面是S波资料的缺乏,其次,S波记录的信噪比受众多因素的影响,作为激发源的爆炸源不易产生S波,S波在介质内传播比P波衰减快得多,S波处于续至波段,受P波尾波的影响,还有沉积层内的多次反射波以及P—S转换波的影响等,以致震相识别困难,高质量的S波记录难以获得。近几年国外对人工地震测深中的S波进行了大量的研究。B. KULBINGER 等人(1986年)^[1]利用垂直向单分量地震仪记录到的高质量S波,对FENNOLORA地区的S波速度结构进行初步解释。Z. EL-Isa等人(1987年)^[2]根据人工地震测深资料研究了约旦(Jordan)的横波速度结构。对S波研究比较深入的是W. Steven 等人(1988)^[3],他们利用在德国西

南部获得的宽角压缩波和剪切波资料, 获得了该区的二维S波速度模型和二维泊松比模型以及地壳岩性成分的解释。在国内这方面的研究则几乎未见报道。

本文利用1982—1985年在福建省相继开展的人工地震测深工作所获得的资料进行S波开发性研究。这些资料的P波信号经解释, 廖其林等人已作了较深入的研究^{[4]、[5]、[6]、[7]}, 结果表明, 福州——泉州——汕头地区具有大陆地壳向海洋地壳过渡的边缘地区结构特征, 地壳平均P波速度为 6.30km/s , MOHO面速度为 7.00km/s , 地壳厚度 30km , 由三层结构组成, 厚度分别为 3km 、 15km 和 12km , 在中地壳存在一层速度为 $5.5\text{—}5.90\text{km/s}$, 厚度为 $3.0\text{—}4.0\text{km}$ 的低速层, 低速层分布与温泉出露有密切的关系。本文结合他们的研究成果, 利用现有资料, 从单分量的地震记录中提取出S波信息, 分析各炮的S波速度结构, 进而导出地壳波速比及泊松比分布特征, 最后对这些结果作综合解释。

二、测区地质构造背景和观测系统

我国华南沿海地区地处欧亚板块东南缘, 受欧亚板块, 太平洋板块, 和印度洋板块的相互

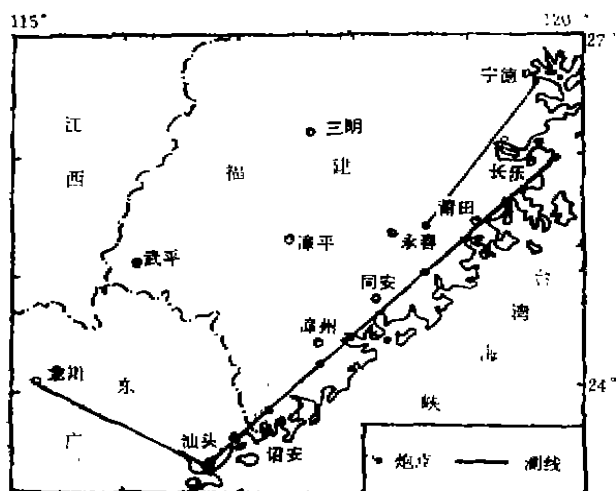


图1 测区炮点、观测点分布图

Fig. 1 The distribution map of explosion and observation point

作用, 使得该区地质构造复杂, 地震活动频繁, 该区历史上曾发生过8.0级强震和6.0级中强震, 近年来, 5级左右地震时有发生。该区主要受北东向和北西向断裂带控制, 构成网状大地构造格局, 北东向断裂带主要有滨海断裂带, 长乐——诏安断裂带, 政和——海丰断裂带和邵武——河源断裂带, 北西向断裂主要分布有闽江断裂, 湄州湾断裂, 晋江断裂, 九龙江断裂和韩江断裂。根据测区地质构造背景, 本区布置了多条测线, 我们选用了其中的三条来研究福建沿海地区的S波速度结构, 即汕头——龙川测线, 长 197km , 北东向为汕头——泉州——长乐测线, 长 495km , 为主测线, 以及永春——福州——宁德测线, 长 190km , 测点分布如图1所示, 炮点参数及观测点参数参见文献^{[4]、[5]}。

三、波震相分析

三条地震测深剖面的资料, 即剖面I, 汕头——泉州——长乐, 为主剖面; 剖面II, 汕头——兴宁——龙川; 以及剖面III 宁德——永春。其中, 汕头炮, 汕头——龙川测线, 汕头——泉州测线, 泉州炮, 泉州——长乐测线, 渔溪炮北西测线, 长乐炮北西测线, 以及宁德——永春测线等获得了S波记录, 而龙海炮, 诏安炮, 永春炮, 没能激发出良好的S波信号。

在这些记录中, 尽管中间层S波震相不清, 但来自MOHO面的 S_m^0 反射波还是可以辨认的。其次, 所有地震记录中, 由于受噪声的干扰, 都未能识别到 S_0 震相。

依据S波的运动学与动力学特征,参考P波记录中的震相分析,从S波记录剖面中,可以识别出的主要震相有: S_0 波, S_1^0 波, S_2^0 波, S_m^0 波等,(图2,3,4)

S_0 为测区内相当于基岩面或结晶基底的首波或弱梯度迥折波,一般在10—60km可连续追踪,但各炮记录差异极大,其中,宁德炮记录,长乐炮记录,泉州炮记录尤为清楚,而渔溪炮北西向测线记录则仅在10—40km间可见,且能量小。有趣的是,该炮北东向测线记录的 S_0 不仅能量大,且初至清楚,这可能反应了该炮附近两侧介质的差异,特别是基岩面的破碎程度的不同,同时与震源激发S波的方向性有关。

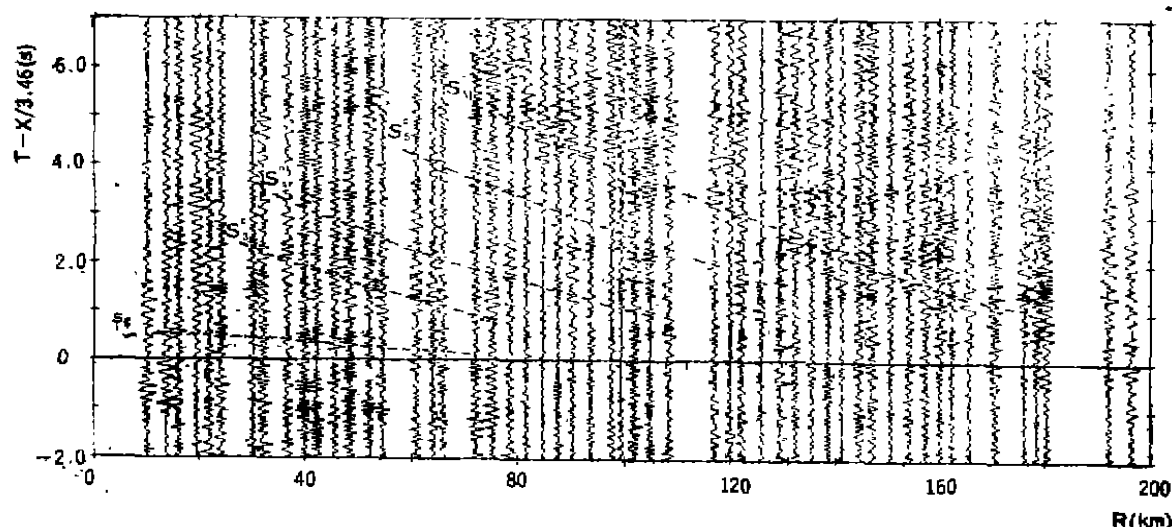


图2 汕头—龙川测线(北西向)S波记录剖面

Fig. 2 The S wave record section of Shantou—longchuan line

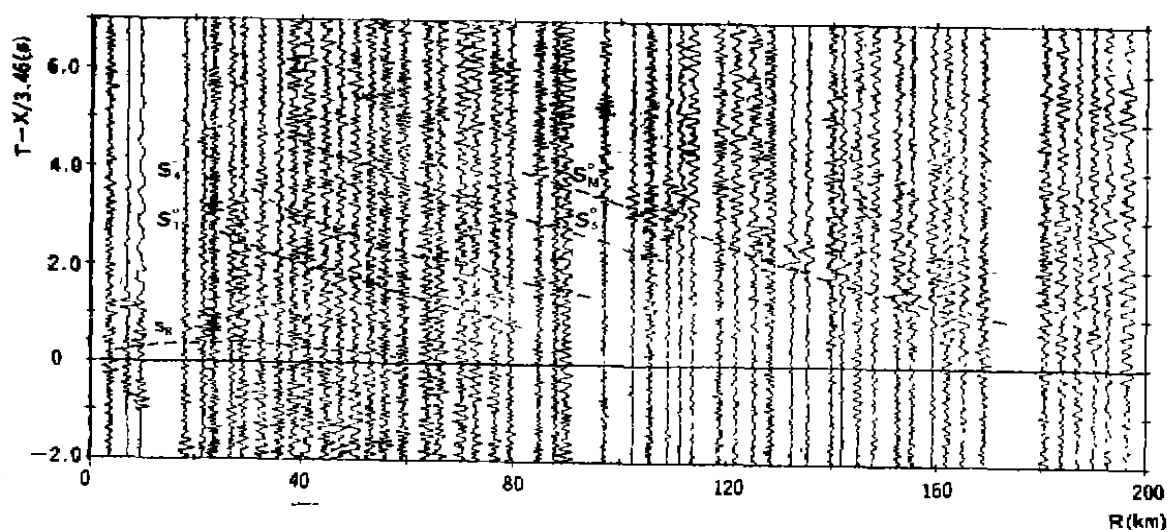


图3 汕头—泉州测线(北东向)S波记录剖面

Fig. 3 The S wave record section of shantou—quanzhou line

S_3^0 波 为壳内某界面的反射波,在各炮记录中均可观测到,出现范围在30—80km,依据P波震相分析,相应的可解释为是来自地壳内低速层顶界面的反射波。

S_2^0 波 相对于 S_3^0 能量弱些,在各炮记录剖面中的出现范围是40—90km、记录中的时距曲线与 S_3^0 近乎平行,利用最小二乘法依据实际到时计算出来的 S_2^0 的平均速度比 S_3^0 的平均速度小,界面埋深比 S_3^0 深2—4km,是来自中地壳低速层底部的反射波。

S_1^0 波 为下地壳玄武岩内某界面(相当于C界面)的反射波。该反射波的出现范围,各炮记差异大:汕头炮北东测线在30—90km出现,且能量强;泉州炮出现在60—100km,其中80—100km间能量弱;长乐炮出现不稳定,但在50—100km之间仍可追踪;渔溪炮记录剖面中根本无法识别到 S_1^0 。这些现象可能说明该区下地壳横向变化乃至纵向变化都相当激烈。

S_m^0 波 为MOHO面反射波,是所有记录中,能量最强的一个震相,即使中间层震相没法识别的龙海炮,诏安炮,永春炮, S_m^0 也出现很好,其中尤以泉州炮震相最为清楚,且连续性好,而长乐炮,渔溪炮,宁德炮能量弱些。泉州炮记录剖中,距炮点100km附近的南北两侧的MOHO面反射波存在近0.5s的到时差,预示着一个深大断裂的存在。从频谱分析可知,龙海炮记录,汕头炮北西测线,汕头炮北东测线记录 S_m^0 频谱低,而诏安炮,泉州炮,渔溪炮,长乐炮,宁德炮等记录剖面中的频谱相对高些。以上的分析表明,莫霍面纵横介质变化激烈,且以泉州为界,东西向介质存在差异。

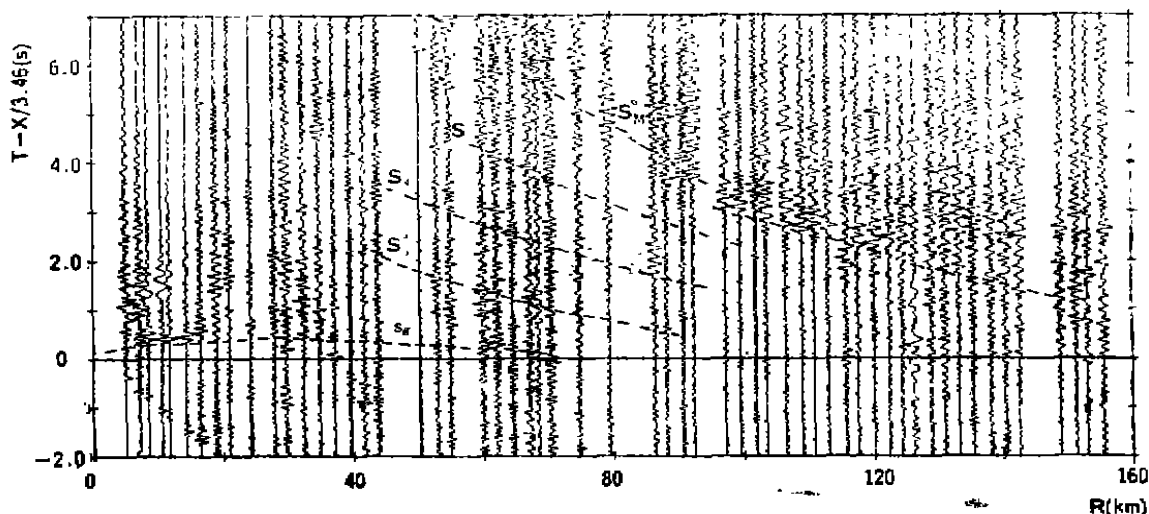


图4 泉州——长乐测线S波记录剖面

Fig. 4 The S wave record section of quanzhou—changle line

四、资料处理方法

假设地壳平均泊松(Poisson)比是0.25,那么纵波与横波速度之比 $V_p/V_s=1.732$,

故S波的记录剖面以3.46km/s的折合速度绘制,时间轴因子与P波记录剖面的相同,而没有进行压缩。剖面中的各道S波记录均进行归一化处理,为消除高频干扰,突出S波信号,对地震记录进行1—15Hz的带通滤波处理,为了导出地壳S波速度结构,根据S波的运动学和动力学特征,首先准确识别震相,利用最小二乘法反演计算出S波的初始模型,对初始模型的合理性进行解释,对所识别的震相进行必要的修正并读取各震相的较准确初至数据,然后进行一维射线追踪,反复修改模型,逐层调整S波的速度,并对S波界面深度作相应的修改,使正演走时与S波实际到时一致,最后得到一维地壳S波速度结构模型。

有了S波速度结构,结合P波速度模型,进而导出地壳与上地幔泊松比(σ)模型,从而可以确定波通过区域的介质物性。 σ 与 V_P 和 V_S 的关系可简单表示为

$$\sigma = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{V_P^2}{V_S^2} - 1 \right)^{-1} \right] \quad (1)$$

σ 与 V_P 和 V_S 的关系式,实际上是在理想条件下,即假设均匀各向同性的理想介质导出的,这种假设虽然不完全具有真实性,但同实际介质具有很大的近似性,而且有了这种假设前提,则使问题的讨论得以大大的简化。从理论上可知^{[8]、[9]}, σ 值的范围一定在0—0.5之间,地壳与上地幔介质, σ 值通常在0.05(非常坚硬的介质)—0.45(松软不胶结的介质),对于液体,则 σ 值为0。本文利用 V_P 与 V_S 与泊松比 σ 的关系导出了福建沿海地区地壳平均泊松比模型。

五、讨论与结论

1. 地壳与上地幔S波速度模型

利用快速射线追踪法,我们得到了各炮一维S波速度模型,如图5所示,参数如表1所

表1 各炮S波一维速度参数

Tab. 1 The Parameter of one-dimensional velocity of S wave in each shot

	汕头炮 (NW)	汕头炮 (NE)	泉州炮 (NE)	渔溪炮 (SW)	长乐炮 (SW)	宁德炮 (SW)
	V_s d	V_s d	V_s d	V_s d	V_s d	V_s d
1	3.21 0.23	3.10 0.22	3.20 0.95	3.20 0.35	3.15—3.21 0.15	3.20 0.30
2	3.22—3.55 4.70	3.25—3.27 5.00	3.33—3.50 2.50	3.33—3.50 4.00	3.30—3.46 3.10	3.30—3.54 4.87
3	3.66 8.60	3.63 8.00	3.56 9.50	3.65 9.00	3.58—3.59 9.00	3.55—3.71 10.8
4	3.23 2.50	3.44 3.00	3.51 4.50	3.46 3.20	3.48 4.80	3.50 3.25
5	3.63 7.50	3.69 6.00	3.66 6.00	3.85 15.0	3.68 7.00	3.65—3.67 6.40
6	3.81 7.00	3.78 7.70	3.87 4.70	—	3.90 7.00	3.73—3.75 —6.10

示。结果表明, 该区地壳S波速度模型可分三层结构, 即上地壳、中地壳和下地壳。其中令人感兴趣的是, 与P波速度模型一样, 中地壳S波速度也存在着低速层。

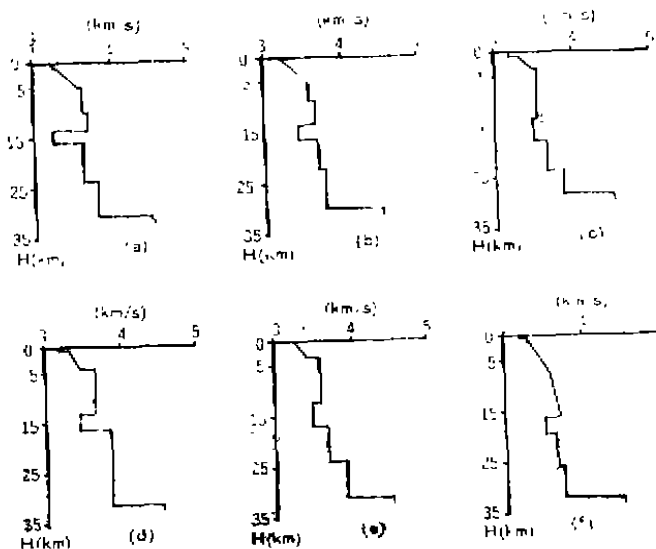


图5 S波速度模型

(a) 汕头炮(北西向); (b) 汕头炮(北东向);
(c) 泉州炮; (d) 渔溪炮; (e) 长乐炮; (f) 宁德炮;

Fig. 5 S velocity model (a) Shantou shot (NW—direction); (c) Shantou shot (NE—direction); (c) Quanzhou shot; (d) Yuxi shot; (e) Changle shot; (f) ningde shot

也达 0.05km/s 。

(3) 下地壳: S_0 界面将下地壳分成上下两部分, 与P波分析的结果相近, 下地壳的上半部分比较稳定, 从汕头至宁德, 层速度都变化不大, 在 3.7km/s 左右, 下半部分则变化激烈, 速度变化区间为 3.78km/s — 3.90km/s , MOHO面的埋深泉州以北最浅, 仅为 28km , 汕头附近次之, 为 30km , 宁德以南则可达 32km 。

2. 泊松(Poisson)比模型

结合P波速度模型, 我们获得了福建沿海地区地壳平均泊松比模型(表2)。从表中可知, 汕头炮北西测线的平均泊松比值低于正常值、仅为 0.243 、而汕头炮北东测线为 0.271 , 诏安炮南西测线为 0.267 , 汕头北西测线的地壳平均泊松比值偏低可能与MOHO界面的起伏有关。通过漳州盆地的龙海炮北东测线的地壳平均泊松比值, 高达 0.285 , 漳州盆地既是北东, 北西和东西向断裂带交汇区, 特别是一个地热高值区, 11 — 14km 深处存在一层低速—高导层, 被认为是上地幔物质上涌迁至的部分熔融体, 这一地区的泊松比高值, 显然反映了该区的特殊性。有意思的是, 与漳州地段相比, 泉州至渔溪地段, 地壳平均泊松比值明显偏低, 泉州炮北东测线降至正常值以下, 为 0.233 , 渔溪炮南西测线则更低, 仅为 0.212 , 反映

(1) 上地壳: 上地壳横向变化激烈, 层厚度在 2.5 — 5km 变化。该层最厚的是汕头炮北东测线达 5km , 最薄的是泉州炮附近, 仅为 3km 左右, 速度呈现梯度变化; 纵向速度变化最大的是汕头炮北西测线, 从 3.22km/s 递增至 3.55km/s , 而该炮北东测线又化最小, 在 3.25 — 3.27km/s 之间。这说明汕头炮上地壳s波速度北东测线与北西测线存在一定的差异。其它各炮速度相近, 基本上在 3.33 — 3.50km/s 范围。

(2) 中地壳: 地层厚度相对稳定, 大致在 11 — 14km 之间变化, 其中尤以泉州炮(北东测线)最厚, 达 14km , 层速度在 3.56 — 3.66km/s 之间变化。中地壳的下部, s波记录中也反映出低速层的存在, 低速层的厚度在 3 — 4km , 层速度在 3.4 — 3.5km/s 之间变化。低速层速度与上下界面的速度差最大可达 0.2km/s , 最小的

表2 各地平均泊松比参数

Tab. 2 The parameter of average Poisson's ratio in each shot

汕头炮 (NW)	汕头炮 (NE)	诏安炮 (SW)	龙海炮 (NE)	泉州炮 (NE)	渔溪炮 (SW)	长乐炮 (SW)	宁德炮 (SW)	永春炮 (NE)
0.243	0.271	0.267	0.285	0.233	0.212	0.265	0.287	0.296

了泉州附近存在南北构造分带。这与其它地球物理场反映的是一致的。渔溪以北的长乐炮其平均泊松比值又高于正常值为0.265, 特别是穿过福州盆地和德化地带的 宁德—永春测线, 地壳平均泊松比就更高, 宁德炮为0.287而永春炮则为0.296, 为全区最高值。从其它地球物理场可知: 福州盆地为北东向和北西向断裂交汇区, 中地壳存在着一层低速——高导——低Q的高温部分熔融物质, 而德化——安溪——永春区, 是北东向福鼎——陆丰断裂与北西向晋江断裂的交汇区, 同时也是地热导常带。显然, 宁德、永春地段的高泊松比值与该区的断裂, 特别是地热分布有密切的联系。

3. 结论

(1) 在适当的激发条件下, 人工地震测深中的单分量垂直地震记录, 可以获得良好的S波信息, 这些S波信息是由爆炸源直接激发产生的。

(2) 福建沿海地区的地壳S波速度结构可分三层, 即上地壳, 中地壳和下地壳, 其中汕头以北与汕头以东存在明显速度差异, 中地壳普遍存在一层低速层, 整个地区的MOHO面深度, 以泉州为最浅, 宁德, 永春为最深, 汕头至龙川次之。

(3) 地壳平均泊松(Poisson)比高值区与断裂交汇区, 特别是地热区高值具有良好的对应关系。测线通过温泉出露地带和断裂交汇区的龙海, 宁德, 永春炮的平均泊松比出现异常高值, 而泉州, 渔溪地带出现相对低值, 表明泉州附近存在南北分带。此外, 汕头——龙川测线的平均泊松比值也表现出相对低值, 这可能与该区的MOHO面向北西倾斜有关。

参 考 文 献

- [1] Kullinger B., and C. —E. lund, A preliminary interbretation of S—wave travel-times from Fennolora data, Tectonobhysics, 126, 375—388, 1986.
- [2] Z. EL—Isa, J. Mechie and Prodehl, Shear velocity structure of Jordan from explosion seismic data, Geophys. J. R. astr. Soc, 90, 265—281, 1987.
- [3] W. steven Holbrook, Dirk Gajewski, Anton Krammer, and Claus Prodehl, An interpretation of wide—angle compressional and shear wave datain southwest Germany: possion's ratio and petrological implications, Journal of geophysical reserach, 93, 12081—12106, 1988.
- [4] 廖其林、王振明、王屏路、余兆康、黄向荣, 中国华南沿海地区地壳与上地幔速度结构特征, 科学通报, 1987, 12, 933—935.
- [5] 廖其林、王振明、王屏路、余兆康、吴宁远、刘宝诚, 福州——泉州——汕头地区地壳结构的爆炸地震研究, 地球物理学报, 1988, 31, 270—280.

- [6] 廖其林、王杰明、邱陶兴、袁定强、王洪涛、吴宁远、刘宝诚, 福州盆地及其周围地区地壳深部结构与构造的初步研究, 地球物理学报, 1990, 33, (2), 163—173.
- [7] 章惠芳, 中国东南沿海地区泉州爆破深地震探测资料的再解释, 中国地震, 1988, 4 (2), 96—105.
- [8] 郭自强编著, 固体中的波, 地震出版社, 1982.
- [9] 长春地质学院等合编, 地震勘探——原理和方法, 地质出版社, 1980.

THE S WAVE VELOCITY STRUCTURE AND POISSON'S RATIO DISTRIBUTION CHARACTERISTIC IN FUJIAN COASTAL AREA

Qiu Taoxing, Liao Qilin, Wang Zhenming and Yang Changlin

(Institute of Seismological Bureau of Fujian Province)

[Abstract] Based on the D. S. S data obtained from Fujian coastal area, the S wave velocity model is gained by sampling analog tape recore, digital dealing and the analysis. The result shows that the S velocity structure of the crustal in Fujian coastal area is composed of three layers, that is the upper-crust, mid-crust and lower-crust. In the mid-crust, there is a low velocity layer with 3—4 km thick and with the velocity 3.4—3.6 km/s. The Moho depth in Quinzhou area is in the most shallow, which is only 28 km, but that in Ningde is in the deepest, which is 32 km.

Combined with P velocity model, the average poisson's ratio of the crust in this area are obtained. The poisson's ratio in zhangzhou and Fuzhou basins shows abnormally high value, however, whose in Quizhou and Yuxi area show relatively low value. The results indicate that the poisson's ratio has corresponding relations with the local faults area, especially with geothermal area.

[Key words] Fujian coastal; Crust and upper mantle; Velocity structure of S wave; Poisson's ratio model