

苏浙皖地区地壳结构的初步研究

姚虹 滕吉文 孙克忠 程立芳

(中国科学院地球物理研究所)

胡小幸

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文使用江苏、浙江和安徽等省部分地震台站记录的江、浙地区工业爆炸资料,进行了该地区地壳与上地幔顶部的反射波和折射波震相论证。利用广义线性反演,获得该地区的主要地壳结构。结果表明,这一地带为多层地壳结构,地壳厚度平均为33公里左右。

一、引 言

利用人工爆破激发的弹性波研究地震波速变化及地壳结构,由于起爆时刻和爆破点空间位置均可精确测定,现已成为进行地壳深部探测工作的重要手段。但是,通常在采用时距曲线法研究地壳结构时,要求爆破点与接收点呈规则分布,构成剖面,尤其是折射方法,需要布置长距离测线,花费的人力、物力较大。针对上述情况,这次在苏浙皖地区我们试用原有地震台记录到的人工爆破资料进行地壳结构的研究。原有地震台分布离散,无规则,但我们基于在一定地区的范围内,地壳起伏变化不大,假设地壳内的各层界面为相互平行的平面,界面速度在横向是均匀的各向同性的,将各个观测台的位置以爆破点为圆心,转动一定角度,按震中距离地投影到一条直线上(选择台站分布较多的方向),虚构成一条测线。最后得出的地壳结构的速度和厚度模型是该地区的平均结果。

当然,一般地震台的资料存在着时间服务不统一,记录图质量不高等问题,而且台站间隔较大,给分析工作带来许多困难。但是,经过这次工作,从得出的结果来看,正确分析震相是个关键,本文主要利用原有地震台可见记录得到的人工地震资料同样可以得出地壳的多层结构模型。

二、分析与结果

本文使用浙江寿昌工业爆破和科学院地球物理研究所在安徽马鞍山进行的两次人工爆破

的天然地震台可见记录。

1. 爆破点与观测系统

爆破点与接收点分布见图1，爆破点情况见表1，各炮点起爆时间精度均可达1/100秒。

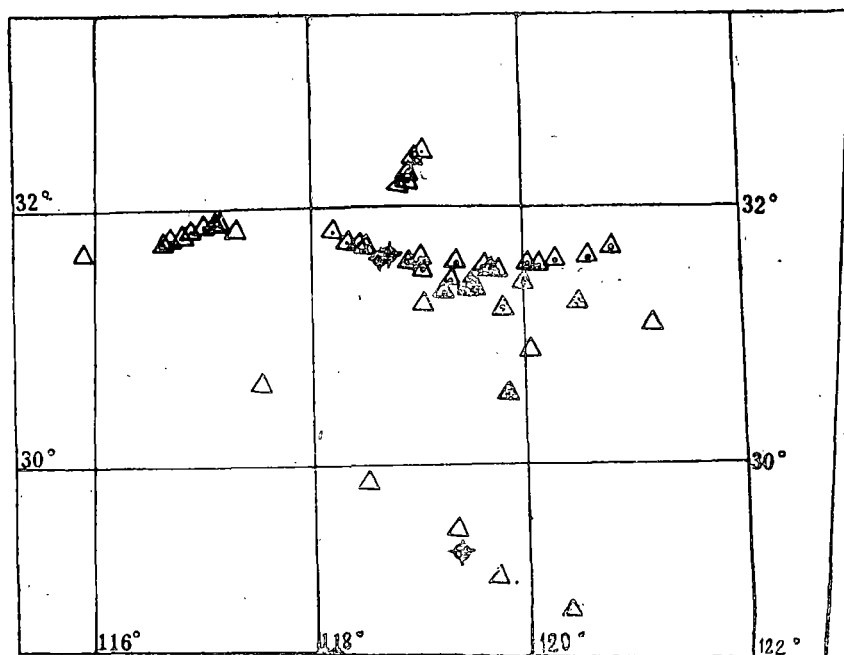


图1 爆破点及测点分布图

Fig. 1 A distribution demolition point and obseration point

表1

Table 1 Demolition point

爆点编号	爆破点	爆破点方位	起爆时间(北京时间)	炸药吨位	备 注
01	寿 昌	$\lambda = 119^{\circ}18'28.8''$ $\varphi = 29^{\circ}23'31.2''$	1974年4月28日 14-00-00.16	26.7	铍锦岩石炸药一次起爆
02	马鞍山	$\lambda = 118^{\circ}36'31''$ $\varphi = 31^{\circ}39'09''$	1981年3月19日 12-00-04.30	7.2	TNT炸药一次起爆
03	马鞍山	$\lambda = 118^{\circ}36'50''$ $\varphi = 31^{\circ}39'11''$	1981年4月4日 12-00-06.58	6.5	TNT炸药一次起爆

三次爆破均用天然地震台的熏烟记录。寿昌爆破的接收点是分布在苏浙皖及邻近省的部分地震台，距爆破点较近台站（ $\Delta < 150$ 公里）的纸速从240~325毫米/分，距爆点较远台站（ $\Delta > 150$ 公里）的纸速在180毫米/分左右，时间精度一般小于1/10秒；马鞍山爆破的接收点是江苏省地震局为此而布置的地震台网，纸速均为240毫米/分，大部分观测点有中央台授时记录，时间精度在1/20秒范围内，另外由于台网布局不完善，出现某些空白地段，给追踪震相带来困难。

寿昌爆破因没有各接收点的高程资料，故参考本区地貌特征对所有接收点均作30米高程校正，马鞍山两炮则作了详细高程校正。

接收点与炮点之间的距离根据布伦震中距公式给出：

$$\Delta = 111.199 \left[(\varphi - \varphi')^2 + (\lambda - \lambda')^2 \cos^2 \left(\frac{\varphi + \varphi'}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \text{ (公里)}$$

其中 λ 、 φ 和 λ' 、 φ' 分别为接收点和爆破点的地理经纬度。

01爆破取寿昌至金寨方向为Ⅰ测线方向,大致呈北西向,其余离散台站均投影到此线上,测线长300多公里;02、03爆破分别取马鞍山—六安,马鞍山—常熟为Ⅱ、Ⅲ测线,两测线均为东西向,横贯苏、皖两省,各长约200公里。

2. 资料分析

(1) 寿昌爆破

纸速较快,尽可能地提取了较多的信息,其折合走时曲线见图2。

(Ⅰ)直达波 P_0 。在距爆破点最近的新安江台($\Delta = 10.41$ 公里)记录为初至震相,震相清楚。由于地表介质的吸收, P_0 衰减很快,传播距离较短。

(Ⅱ)折射波 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 (P_n) 根据测线的布局,有些台的 P_1 、 P_2 、 P_3 只能在续至区接收到,而不同地震台的记录纸速和放大倍数不一致,所以完全依据振幅、周期的特征直接从记录图上对比,追踪同一震相比较困难。我们采取的方法是:利用折射波震相周期较大的特点在记录图上的一系列震相中找出各种可能的折射波震相,然后根据折射波的运动学特征及一定的地壳厚度的约束[1、2],通过观测理论与实际的走时曲线的矛盾和求出的地壳厚度不合理,再进一步确认震相,经过多次地反复校正,最后确定出 P_1 、 P_2 、 P_3 震相和走时。

在震中距 $\Delta > 183$ 公里,记到 P_4 震相(因台距从112~183公里无台站),且线性较好。

(Ⅲ)反射波 P_1^0 、 P_2^0 、 P_3^0 、 P_4^0 由于观测台站较少,加之在续至区内,反射波相对于折射波要难于判读,但它毕竟还有反射波的特征,周期小、在临界点附近振幅大, P_1^0 、 P_2^0 辨认震相数量较少, P_3^0 、 P_4^0 震相较好。

(2) 马鞍山—六安

(Ⅰ)直达波 P_0 。在 $\Delta \leq 20.01$ 公里的前2个台内均是初至震相、震相清楚。

(Ⅱ)折射波 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 因记录仪放大倍数较低,震相不易辨认,初动较弱,其折合走时曲线见图6,由于台站布局不理想,该测线反射波不易分辨,只有少数几个台站分析出 P_4^0 反射波,故该测线只做折射波(见图4—1, 4—2, 4—3)。根据折射波理论,在无低速层或高速层的情况下,一般来说每层界面的折射波都应有一段初至区,当接收点比较密集时,所接收到的初动震相依次为各层界面的折射波,在走时曲线上表现为各层折射波的曲线斜率不同,从 P_1 到 P_4 依次减小,这意味着速度加大,在走时图上该测线的初动表现出成层性尚好。

(3) 马鞍山—常熟

(Ⅰ)Ⅰ直达波 P_0 。该震相只在 $\Delta = 6.69$ 公里的第一个台上表现为初至震相。

(Ⅱ) P_1 、 P_3 、 P_4 震相 $\Delta = 36.75$ 公里的第二个台上初至震相振幅小而圆滑且周期很

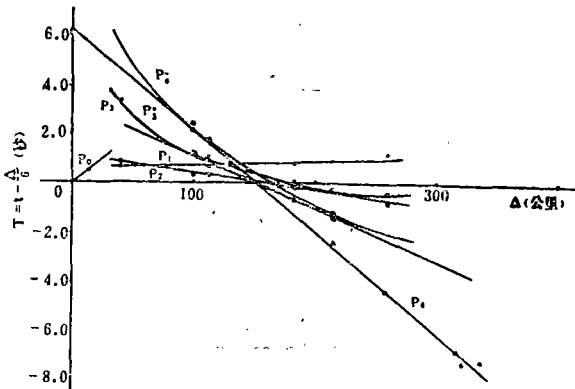


图2 折合走时曲线(寿昌)

Fig.2 Convert into travel-time curve

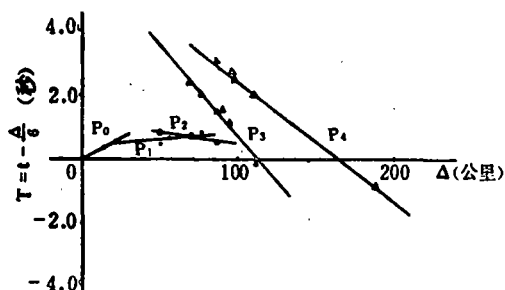


图3 测线折合走时曲线
(马鞍山—六安)

Fig. 3 Convert observation line into travel-time curve
(Maanshan-Liuan)

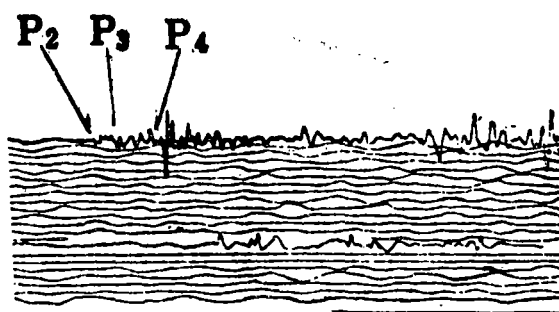


图4—2 溧阳 $\Delta = 86.11$ 公里

Fig. 4—2 Liyang $\Delta = 86.11$ km

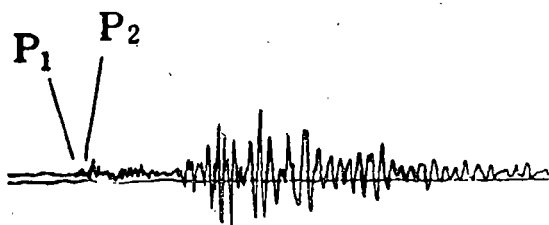


图4—1 南京 $\Delta = 50.09$ 公里

Fig. 4—1 Nanjing $\Delta = 50.09$ km

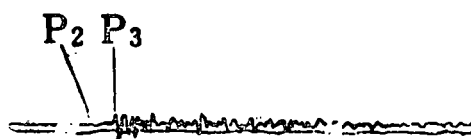


图4—3 六合 $\Delta = 94.96$ 公里

Fig. 4—3 Liuhe $\Delta = 94.96$ km

大，该震相即为 P_1 震相，这条测线的初动走时在 $\Delta = 36.75 \sim 124.54$ 公里的距离中，上下跳动，线性不好，且斜率差异很小，所以将此段距离上的初动震相称作同一震相，以 P_1 示之，本测线上 P_3 、 P_4 震相较清楚。

(Ⅲ) P_1^0 、 P_2^0 、 P_3^0 反射波 P_3^0 较弱不易分辨， P_2^0 、 P_4^0 较好，其折合走时曲线见图5，其它各种震相图见图6—1，6—2，6—3。

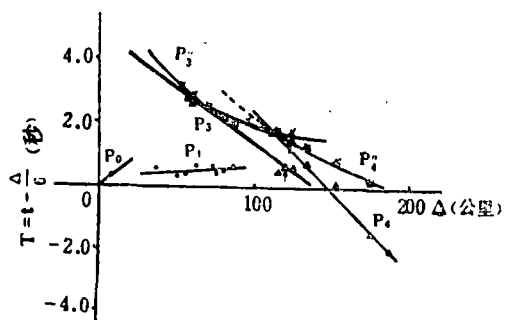


图5 测线折合走时曲线(马鞍山—常熟)

Fig. 5 Convert observation line into travel-time curve (Maanshan-Changshu)

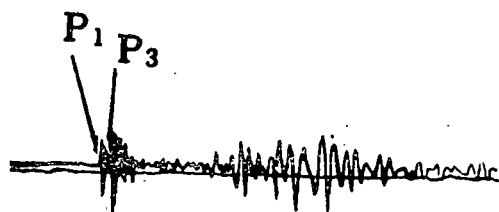


图6—1 南京 $\Delta = 50.37$ 公里

Fig. 6—1 Nanjing $\Delta = 50.37$ km

3. 速度分布与地壳模型

(1) 用折射波方法

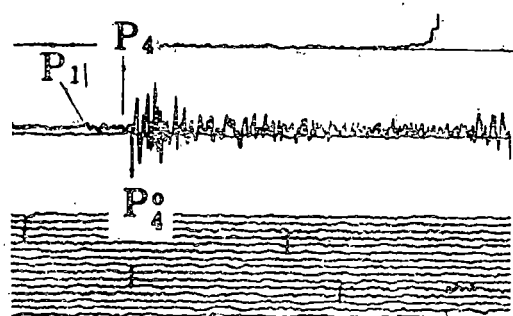
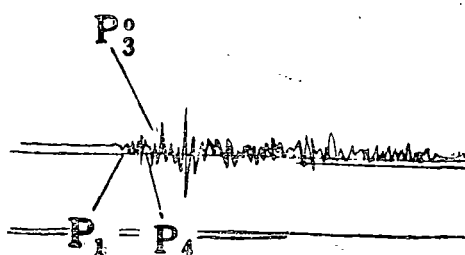
图 6—2 善卷公社 $\Delta = 114.09$ 公里图 6—3 南山林场 $\Delta = 124.54$ 公里

Fig. 6—2 Shanjuan $\Delta = 114.09\text{km}$ Fig. 6—3 Nanshan tree farm $\Delta = 124.54\text{km}$

设地壳介质为均匀水平状结构, 走时与震中距呈线性关系, 时距曲线为一直线, 斜率与各层界面速度有关。

用最小二乘法对各种震相的观测走时作曲线拟合, 分别得出相应的理论走时曲线。在理论走时曲线被确定的同时, 速度分布也就求出。

(2) 广义线性反演^[3, 4, 5]

当我们分辨出折射波和反射波时, 假定地壳是由层状均匀的介质组成, 则

$$A\Delta X = \Delta T$$

其中 ΔX 是地壳模型参数的校正矢量阵

ΔT 是地震波理论到时间与相应的实际观测到时间之差组成的矢量阵

A 是与理论到时间函数对特定地壳模型参数偏微商有关的矩阵, 它在初始地壳模型参数 X^0 取值。

利用特征值的分解原则, A 的广义逆可表示为:

$$H = VA^{-1}U^T$$

校正矢量 $\hat{\Delta X} = H\Delta T$

把校正矢量 $\hat{\Delta X}$ 再加入到初始模型参数 X^0 上做为新的初始模型, 重复上述计算, 直到观测和理论到时间之差达到允许的小量为止。

协方差矩阵可表示为:

$$\text{COV}^2(X) = 6^2 VA^{-2}V^T$$

通过广义线性反演技术, 得到相应的各层介质中波传播的层速度和层厚度。列表于下:

表 2 测线 I (寿昌)
Tabel 3 Observation line I
(Shouchang)

震相	层速度(公里/秒)	层厚度(公里)	ΣH_j (公里)
P_0	4.92 ± 0.02	2.3	2.3
P_1	5.90 ± 0.03	5.0	7.3
P_2	6.32 ± 0.03	15.3	22.6
P_3	7.00 ± 0.04	11.0	33.6
P_4	8.00 ± 0.04		

表 3 测线 II (马鞍山—六安)
Table 3 Observation line II
(Maanshan—Liuan)

震相	层速度(公里/秒)	层厚度(公里)	ΣH_j (公里)
P_0	5.28 ± 0.05	2.8	2.8
P_1	5.88 ± 0.09	3.4	6.2
P_2	6.09 ± 0.15	15.2	21.4
P_3	7.04 ± 0.14	12.3	33.7
P_4	8.04 ± 0.12		

表4 测线Ⅰ（马鞍山—常熟）
Table 4 Observation lineⅠ
(Maansnan—Changshu)

震相	层速度(公里/秒)	层厚度(公里)	ΣH_j (公里)
P_0	4.78 ± 0.03	1.7	1.7
P_1	5.94 ± 0.07	20.6	22.3
P_3	7.08 ± 0.09	10.2	32.5
P_4	8.09 ± 0.17		

由上述分别得出浙西北、皖南、浙中及苏南三大地区的平均地壳结构模型。

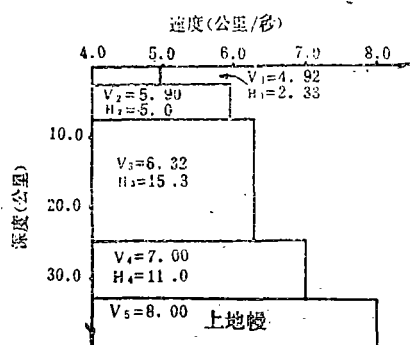


图7 测线速度剖面模型（寿昌）
Fig.7 The section modal of observation time speed in Shouchang

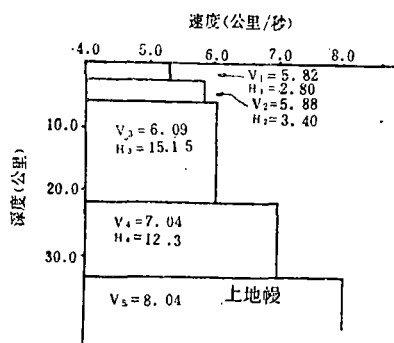


图8 测线速度剖面模型（马鞍山—六安）
Fig.8 The section modal of observation time speed in Maanshan-Liuan

4. 对模型解释

浙江寿昌和安徽马鞍山的爆破资料分析

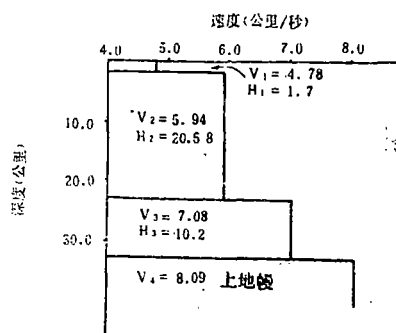


图9 测线速度剖面模型（马鞍山—常熟）
Fig.9 The section modal of observation time speed in Maanshan-Changshu

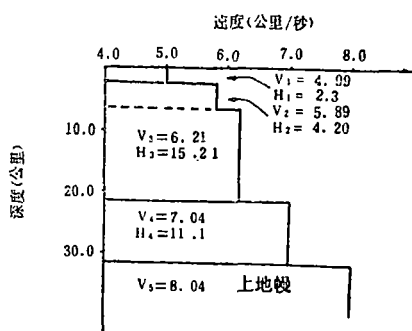


图10 东部地区地壳上地幔顶部综合速度剖面模型

Fig.10 Section modal of synthetical speed at ear thupper mantle term in Eastern area

结果表明，苏浙皖地区具有多层地壳结构（见图10）。

第一层平均层速度 $\bar{V}_1 = 4.99 \pm 0.03$ 公里/秒，平均层厚度 $\bar{H}_1 = 2.3$ 公里，地质上称作松散覆盖层，层内物质是新生代以来的内陆湖盆沉积^[5]，皖、浙地区主要为陆相，江苏地区则以河—湖相居多，可能由于岩性不同造成速度差异。

第二层，不同剖面差异较大。I、Ⅱ剖面的平均层速度 $\bar{V}_2 = 5.89 \pm 0.06$ 公里/秒，平均层厚度 $\bar{H}_2 = 4.2$ 公里，是由震旦系变质火山岩的结晶基底和沉积在上古生代至中生代海相层碳酸盐岩、灰岩物质组成的沉积

层。浙西北地区震旦系岩层中夹巨厚中性火山岩物质〔6〕,造成这个地区本层较厚。

第三层, I II 剖面平均层速度 $\bar{V}_3 = 6.21 \pm 0.09$ 公里/秒, 平均层厚度 $\bar{H}_3 = 15.2$ 公里, 反映了花岗岩和火山凝灰岩性质, 即所谓花岗岩层, 两区内此层厚度较稳定。第三层底部界面在全区平均厚度为 22.1 公里。

值得注意的是 III 剖面的第二层与第三层的界面未能反映出来, 详细讨论于后。

第四层, 平均层速度 $\bar{V}_4 = 7.04 \pm 0.09$ 公里/秒, 平均层厚度 $\bar{H}_4 = 11.2$ 公里, 由基性和超基性玄武岩构成, 反映了地壳下层介质的性质。

整个探测区的莫霍面深度约 33.3 公里, 莫霍面上覆盖介质平均速度为 6.41 ± 0.06 公里/秒。

三、问题讨论

为什么马鞍山—常熟测线只求出三层地壳模型?

马鞍山—常熟测线上, 震中距为 36.75~124.54 公里的测点观测到的初至波走时在时距图上表现线性关系不好, 无明显斜率变化, 而且走时都偏小, 且不易分出 P_1 、 P_2 两种震相, 该区只求出了三层地壳模型, 与其它测线对比似缺失了沉积层。

从地质上来看, 江苏、浙江、安徽三省的沉积基底构造同属震旦系早期形成的扬子准地台, 并接受了后来各期的沉积建造, 且地质探测结果表明此地区各系沉积都很完整。从震旦系到中生代的沉积主要是海相碳酸岩类和碎屑岩, 浅海相砂页岩, 灰岩, 海陆交互相碎屑岩等, 与浙皖地区同期的沉积物质大体相同, 所以若得出江苏地区缺失沉积层的结论是解释不通的。

但为什么此地区的沉积层未能反映出来?

一种可能, III 测线上震中距在 36.75~124.54 公里的测点恰恰分布在穿过苏南地区的两个北东向主要断裂带周围 (茅山断裂、溧阳断裂), 由于断裂内岩石破碎, 影响地震波传播速度, 所以震相走时的线性规律被破坏, P_1 、 P_2 震相交错在一起, 不易分辨, 但是从断裂程度来看, 又不可能产生这么大的影响, 故这只能是部分原因。

另外, 从构造历史上看, 苏南地区在燕山运动时期曾经历巨烈的岩浆活动作用〔6、7〕, 中酸性及酸性花岗岩物质广泛侵入震旦系—晚侏罗系的岩层中, 且变质作用不很强烈, 这样造成沉积层下层物质的岩性与下面花岗岩层中物质不仅有侵入, 使物质成份有了代入代出的变化, 未能构成明显的速度界面, 使其两层介质的速度斜率差别不大, 同时下层花岗岩物质的侵入也使沉积层相对地变“薄”, 两层介质速度直线在 T 轴上的截距相近, 所以 P_1 、 P_2 震相不易分辨。III 测线恰好穿过大块燕山运动晚期形成的火山岩盆地, 加上断裂的影响及观测系统的误差, 使得 P_1 、 P_2 震相未能辨认清楚, 实际上第 III 测线也应具有四层地壳结构。由于我们缺乏钻探手段和地质资料, 结论只能是个推断。

四、莫霍面的问题

由于爆破的接收点均为单枝排列, 没有构成相遇系统, 故无法反映地壳界面的起伏, 因限于条件这里用近似的方法〔8〕, 利用 P_4 、 P_3 波求出本地区莫霍面的大致的面貌。

设莫霍面为平面, 莫霍面上覆盖介质单层均匀, 平均速度为 U , 上地幔顶部平均速度

V, 折射波走时方程:

$$t_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{V} + H_i \frac{\sqrt{V^2 - U^2}}{VU} + H_j \frac{\sqrt{V^2 - U^2}}{VU}$$

其中 t_{ij} 是第 i 个爆炸点与第 j 个接收点之间 P_4 的走时, H_i 与 H_j 分别是 i 点与 j 点的地壳厚度。上式还可写成

$$t_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{V} + t_{0i} + t_{0j}$$

$$t_{0i} = H_i \frac{\sqrt{V^2 - U^2}}{VU}$$

$$t_{0j} = H_j \frac{\sqrt{V^2 - U^2}}{VU}$$

t_{0i} 、 t_{0j} 分别表示地震波以速度 $\frac{VU}{\sqrt{V^2 - U^2}}$, 由地壳顶面传播到地壳底面的时间, 算作 i 点和 j 点的时间项。显然, 当界面为平面时, $H_i = H_j$ 、 $t_{0i} = t_{0j}$ 。

若地壳不是平面, Δ_{ij} 与 Δ_{ij} 的变化将引起走时 t_{ij} 发生变化, 但当倾角不大时, 倾斜时的与震中距 Δ 相应的界面长度 Δ' 与 Δ 之差, 远小于由此而引起的测点下界面深度的变化, 即 $|\Delta' - \Delta| \ll |H' - H|$, Δ 愈大, 其趋势愈明显, 于是我们近似地把走时 t_{ij} 的改变原因仅归结于测点下界面深度的不同, 从而得出 j 点的地壳深度。

$$H_j = \left[t_{ij} - \frac{\Delta_{ij}}{V} - t_{0i} \right] \frac{VU}{\sqrt{V^2 - U^2}}$$

对于某一炮点的观测点 t_{0i} 相同, $t_{0i} = H_i \frac{\sqrt{V^2 - U^2}}{VU}$ 。由于无近距离的深度反射波资料, 这里取 H_i 为平均地壳深度。

同时, 根据反射波走时公式也求得反射点即 $\Delta/2$ 处地壳深度。

$$H = \frac{1}{2} \sqrt{V^2 t^2 - \Delta^2}$$

在上述不严格的近似条件下, 求出部分测点的地壳深度(见图11—1、1—2、11—3)。

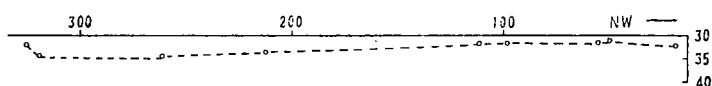


图11—1 寿昌—金寨区域地壳深度

Fig.11—1 Earth's crust depth in Shouchang-Jinzhai area

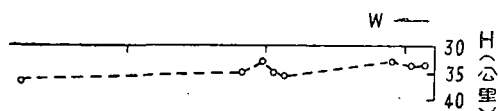


图11—2 马鞍山—六安区域地壳深度
Fig.11—2 Earth's crust depth in
Maanshan-Liuan area

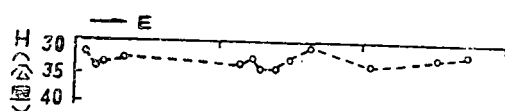


图11—3 马鞍山—常熟区域地壳深度
Fig.11—3 Earth's crust depth in
Maanshan-Changshu area

由上图看出, 本区地壳莫霍面起伏相当平缓, 总的趋势是略向西倾。另外重力方法测量

也表明本区布伽异常值大部分为正值,自东向西布伽值由+15到+5、是一个西倾的隆起区。而在南北向则略有北深南浅的趋势。

从 P_4 走时曲线上也可看到这一结果,寿昌~金寨测线上 P_4 从 $\Delta = 168$ 公里开始变为初始波,马鞍山—六安测线 P_4 从 $\Delta = 150$ 公里成为初至波,而马鞍山—常熟测线 P_4 从 $\Delta = 140$ 公里为初至波,由折射波的特点,证明本区地壳莫霍面确有东浅西深,南浅北深的倾斜趋势存在。

作者对江苏省地震局的大力支持,在地质方面与郝天珢同志共同讨论,在此表示谢意。

(本文1983年5月11日收到)

参 考 文 献

- [1] 宋仲和、谭承业,用瑞雷和乐夫面波群速度确定我国地壳厚度,地球物理学报, Vol.14, №3, 1965.
- [2] 宋仲和、何志桐、徐果明,我国大陆表面沉积层的研究,地球物理学报 Vol.14, №3, 1965.
- [3] 刘福田,地球物理学中的反演问题,石油物探, Vol.20, №3, 1981.
- [4] Wiggins, R. A, The general linear inverse problem: Implication of surface wave and free oscillations for earth structure, Rev Geophy Space phys., Vol.10, pp251—285, 1972.
- [5] Brailg. w, Inversion of Crustal Seismic refraction and Reflectoni data, J.G.R, Vol.78, No.32, pp7738—7744, 1973.
- [6] 中国地质科学院,中华人民共和国地图集, 1973.

A PRELIMINARY STUDY ON THE CRUSTAL STRUCTURE IN JIANGSU, ZHEJIANG, ANHUI REGION

Yao Hong, Teng Jiwen, Sun Kezhong Cheng Lifang

(Institute of Geophysics, Academia sinica)

Hu Xiao Xing

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract

In this paper, the reflection and refraction phases of the earth crust and uppermost mantle in Jiangsu-Zhejiang region are proved by using the explosive data of this region recorded by some seismic stations in Jiangsu, Zhejiang, Anhui provinces etc. And its main earth crustal structure has been obtained by the generalized linear inversion method.

Finally, the results indicated that this region is multi-layer crustal structvre and its average thickness about 33km.