

# 古雷—石城地区地壳与上地幔 地震波速度结构及莫霍面特征\*

边银菊<sup>1)</sup> 刘宝诚<sup>2)</sup> 廖其林<sup>3)</sup>

**提 要** 本文是1986年古雷—石城剖面及嵩口—宜城剖面深地震测深资料的初步研究结果。

对古雷—石城的纵剖面资料,分析了震相特征,共识别出五个波组: $P_0$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 及 $P_4$ ( $P_4^s$ )。通过对波的走时反演、正演拟合和理论地震图方法等计算,得到了该区地壳与上地幔结构模型。

古雷—石城地区地壳具有多层结构,并可划分为上、中、下三层,古雷炮点给出的厚度分别为1.0 km、15.7 km、12.8 km,地壳平均速度为6.29 km/s,深度为29.5 km,上地幔顶面 $P_4$ 波速度为7.83 km/s。石城炮点给出厚度分别为1.8 km、18.3 km、12.4 km,地壳平均速度为6.29 km/s,深度为32.4 km,上地幔顶面 $P_4$ 速度为8.00 km/s。

在中地壳下部存在一低速层,其厚度为2.8 km,速度为5.85 km/s。根据其它研究结果,初步判断低速层介质是半熔融物质组成。

测区内横向变化比较强烈,从东向西有长乐—诏安、政和—海丰和邵武—河源三个大断裂穿过该区,并且都深切至莫霍面;在漳州盆地之下莫霍面隆起约3 km,戴云山区下莫霍面凹陷近2 km;永安—梅州莫霍面隆起接近3 km。莫霍面分布显示出从东南向西北逐渐加深。

宜城—连城—嵩口非纵剖面显示了莫霍面在两处有明显断错,错距约2 km。表明昭武—河源断裂是切割莫霍面的深大断裂。

**关键词** 地壳与上地幔结构 地震波速度结构 M界面特征 福建省 古雷—石城剖面

## 1 前 言

由于太平洋板块向西俯冲和印度洋板块与欧亚板块的强烈碰撞,促使中国陆缘地带大地构造格局发生强烈变异和改造,构成了我国岩石圈的复杂结构和多种形态。福建省地处

\*. 本课题得到地震联合基金资助。本文1992年3月2日收稿,6月28日审定录用

1) 北京大学地球物理系硕士研究生,现在国家地震局地球物理所八室工作

2) 北京大学地球物理系

3) 福建省地震局

我国东南沿海，为菲律宾海板块向欧亚板块俯冲—碰撞带，以及板缘过渡带，地质构造复杂，地震活动频繁。为研究中国华南地区地壳与上地幔的结构性质及深部作用过程与地震的关系，1986年组织了人工爆破地震测深工程。本文给出了资料初步解释的成果。

## 2 地质构造背景及剖面布设

### 2.1 地质构造背景

测区主要受到北东向和北西向断裂控制，东西向构造带也与北东向断裂斜接。

北东向断裂主要有：长乐—诏安断裂、政和—海丰断裂和邵武—河源断裂。其中，长乐—诏安断裂带是我国东南大陆边缘地区一条规模巨大的超壳型深断裂，位于福建省东侧。政和—海丰断裂带位于福建省中部，有些地质学家认为政和—海丰断裂是一条古的俯冲带，其两侧由不同的地质构造单元构成。邵武—河源断裂带位于福建省西侧。

北西向断裂主要有闽江断裂、湄洲湾断裂、晋江断裂、九龙江断裂、韩江断裂。它们近于平行排列与北北东—北东向构造共同组成菱形破裂网格。

东西向构造主要有：南靖—漳州—厦门构造亚带、莆田—漳平—武平构造亚带、清流—尤溪—连江构造亚带。

### 2.2 剖面布设

本文所研究的深地震测深观测系统见图1。共有二条人工地震测深剖面：古雷—古城相遇纵剖面及非纵剖面，嵩口—宣城非纵剖面。各爆破点参数见表1。野外使用CBY型和MCD型磁带模拟地震仪，采用垂直向单分量记录，测点距为1~10 km，炮检距为40~270 km，炮点、测点坐标在1/50000地形图上读取。

表1. 爆破点参数

Tab. 1 Parameter of shot points

剖面名称	爆破点	$\lambda_E$ (° ' ")	$\varphi_N$ (° ' ")	TNT (kg)	爆炸方式	起爆时间 (年月日 h m s)
古雷—石城 (纵剖面)	古雷	117 35 30	23 43 5.0	1550	海上爆破,水深 26 m	1986 12 17 00 03 5.224
	石城	116 21 18.01	26 13 45.4	1000	单深井爆破,井深)50 m	1986 12 11 24 00 6.146
古雷—石城 (非纵剖面)	永安	117 19 35	26 03 42	1500	钻井组合,平均井深 24 m	1986 12 16 24 00 4.490
	大田	117 43 05	25 46 42	1500	洞室爆炸	1986 12 17 01 00 5.988
嵩口—宣城 (非纵剖面)	宁都	116 00 25.6	26 23 23.1	1500	单深井爆炸,井深)50 m	1986 12 6 24 00 6.750

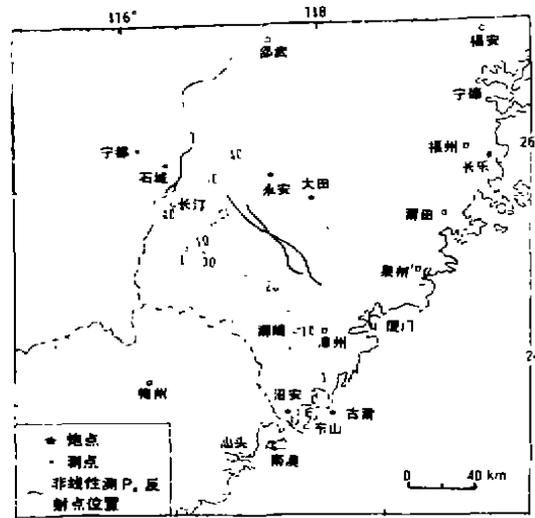


图1 古雷—石城，嵩口—宣城剖面测点分布图

Fig. 1 Distribution of profile station at Gulei—Shicheng and Songkou—Yicheng

### 3 震相特征分析

野外资料经 A/D 转换处理, 在计算机上绘成折合速度为 6.0 km/s 记录剖面图 (图 2a—b) 根据各波组的运动学和动力学特征<sup>[1,2,3]</sup>, 可以识别到 5 组震相:  $P_1$ 、 $P_2^0$ 、 $P_3^0$ 、 $P_4^0$ 、 $P_5$  ( $P_5^0$ )。

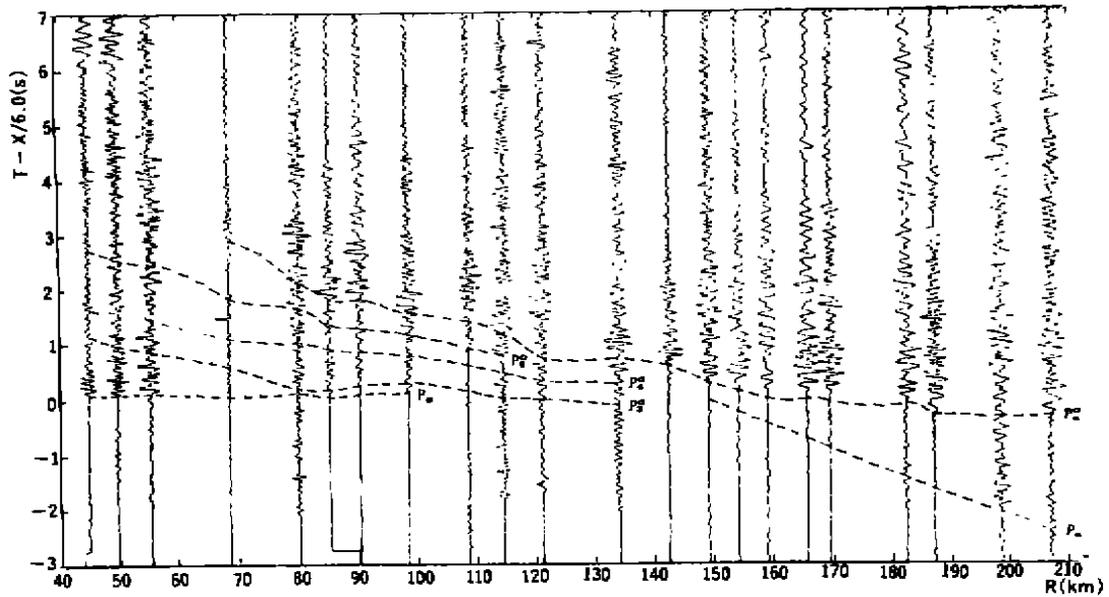


图 2-a 古雷炮记录剖面

Fig. 2-a Record section of Gulei shot

$P_1$  震相: 为结晶基底首波或弱梯度层回折波, 在  $X=40\sim 100$  km 范围内可连续追踪。在这范围中它以初至震相出现, 起始尖锐, 为该区一优势波。古雷炮的  $P_1$  在  $X=105$  km 后被  $P_2^0$  置换, 石城炮可连续追踪到 120 km, 时距曲线线性关系很好, 平均视速度古雷炮为 6.02 km/s, 石城炮为 6.04 km/s。

$P_2^0$  震相: 为壳内某界面的反射波, 实际上为中地壳低速层顶面的反射波。在  $X=45\sim 135$  km 范围内可连续追踪到它的踪迹。平均速度为 6.17 km/s。

$P_3^0$  震相: 为壳内某界反射波, 也是中地壳低速层底面反射波。在  $X=40\sim 135$  km 范围内可连续追踪到它的踪迹, 平均速度为 6.13 km/s, 比  $P_2^0$  略小, 由此可获得  $P_2^0$  界面至  $P_3^0$  界面是低速层。

$P_4^0$  震相: 为下地壳玄武岩层内某界面反射波。该震相只能在续至区内追踪, 受干扰, 震相显得不稳定。古雷炮在  $X=45\sim 115$  km 范围内该震相可连续追踪, 石城炮因干扰较大没有识别到  $P_4^0$ , 平均速度为 6.22 km/s。

$P_5$  ( $P_5^0$ ) 震相: 为莫霍界面的首波和反射波。时距曲线在  $X=80\sim 90$  km 两波相切,  $P_5$  在  $X=140$  km 以后出现并成为初至波—首波。 $P_5$  波平均视速度古雷炮为 7.97 km/s, 石城炮

为  $7.94 \text{ km/s}$ 。 $P_0^0$  震相最清楚，能量最强，在  $X=60 \text{ km}$  以外可以连续追踪，在  $X=80\sim 110 \text{ km}$  进入临界（或亚临界）区。能量达到最大值。 $P_0^0$  波的平均速度古雷炮为  $6.32 \text{ km/s}$ ，石城炮为  $6.31 \text{ km/s}$ 。

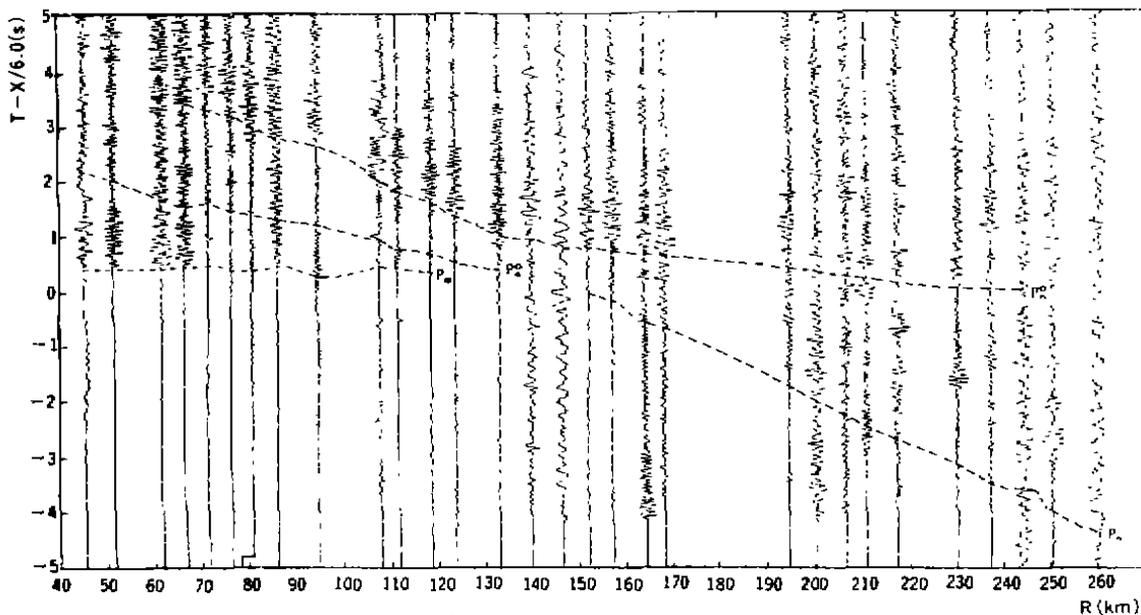


图 2-b 石城炮记录剖面

Fig. 2-b Record section of Shicheng shot

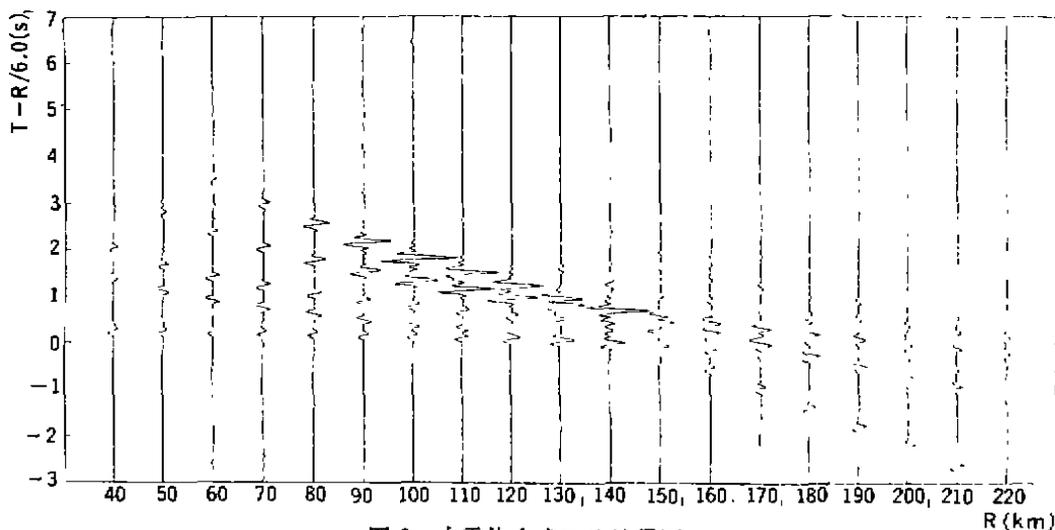


图 3 古雷炮合成理论地震图

Fig. 3 Theoretical seismogram of Gulei shots

## 4 资料处理及结果

首先根据走时资料，采用水平均匀层结构，应用最小二乘法对折射波和反射波进行一维反演计算，求出速度分布。然后根据水平层状介质中地震体波的理论走时计算，进行走

时正演拟合, 得到初始速度模型。最后用理论地震图方法不断修改初始模型, 方法的主要内容是用理论地震图与实测地震记录图进行波组对比(图3), 这样可以得到较准确的各炮点水平速度模型和参数(图4, 表2)。最后用折射波法和反射波法进行界面构制。结果表明:

古雷—石城地区地壳具有多层结构, 并可划分为上、中、下三层。古雷—古城剖面的古雷炮点得到上地壳速度为 5.52 km/s, 厚度为 0.99 km; 中地壳层速度为 6.10 km/s, 层厚度为 15.70 km; 下地壳层速度为 6.61 km/s, 层厚度为 12.85 km。整个地壳平均速度为 6.29 km/s, 深度为 29.54 km, 上地幔顶面  $P_n$  速度为 7.83 km/s。古雷—石城剖面的石城炮点得到上地壳速度为 5.09 km/s, 厚度为 1.77 km; 中地壳层速度为 6.20 km/s, 层厚度为 18.28 km; 下地壳层速度 6.65 km/s, 层厚度为 12.35 km; 整个地壳平均速度为 6.29 km/s, 深度为 32.40 km, 上地幔顶面  $P_n$  速度为 8.00 km/s。在福建沿海地带埋深约 14 km 左右存在一低速层结构, 低速层厚度为 2.8 km, 速度为 5.85 km/s。根据其它研究结果, 初步判断低速层介质是由半熔融物质组成, 在漳州盆地下面可能还存在着“岩浆囊”。低速层分布与温泉分布基本一致, 在本区的漳州盆地及华安、漳平一带有大量温泉出露地表。福建地区地壳厚度变化明显。古雷炮得到地壳厚度为 29.5 km, 石城炮得到地壳厚度为 32.4 km, 莫霍面埋深是东南往西北下倾。莫霍面  $P_n$  波速度略有不同。古雷炮为 7.8 km/s, 石城炮为 8.0 km/s, 从沿海向内陆  $P_n$  波速度有逐渐加大的趋势。

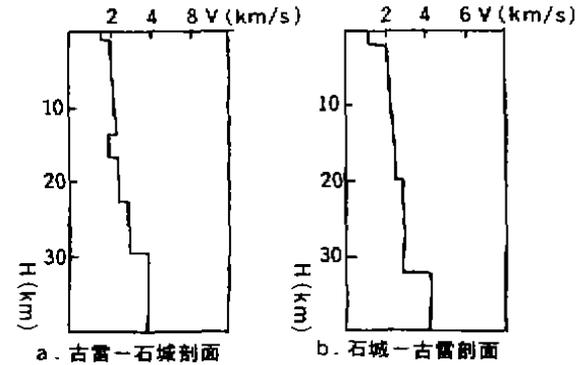


图4 古雷—石城地区地震波速度模型

Fig. 4 Mode of seismic-wave velocity at Gulei-Shicheng area

表2. 古雷—石城剖面地壳速度结构参数

Tab. 2 Parameter of crustal velocity structure at Gulei-Shicheng profile

层号	古雷炮				石城炮			
	界面深度 $V(\text{km/s})$	地层厚度 $H(\text{km})$	盖层平均速 $\lambda(\text{km})$	层速度 度 $V(\text{km/s})$	界面深度 $V(\text{km/s})$	地层厚度 $H(\text{km})$	盖层平均速 $\lambda(\text{km})$	层速度 度 $V(\text{km/s})$
1	0.99	0.99	5.52	5.49~5.55	1.77	1.77	5.09	5.09~5.10
2	13.89	12.90	6.11	6.02~6.30	/	/	/	/
3	16.69	2.80	6.06	5.85	20.05	18.28	6.08	6.00~6.40
4	22.74	6.05	6.13	6.34	/	/	/	/
5	29.54	6.80	6.29	6.85~6.90	32.40	12.35	6.29	6.64~6.66
H: 29.54			$V_{pn}$ : 7.80~7.85		H: 34.40		$V_{pn}$ : 8.00	

根据资料解释结果, 还确定出几条 NE 向断裂:

- 长乐—诏安断裂: 深切至莫霍面, 断距约为 2 km, 浅部反映更为显著, 在记录剖面图上走进有明显错动。该断裂带地震活动频繁, 且发生过 8 级地震, 并多次发生 7 级

以上的地震。

- b. 政和一海丰断裂：在莫霍面断距约为 2 km，在非纵剖面上也有所反映（后面详述），在记录剖面图上看到走时有错动。该断裂带地震活动频度低，强度小，漳州—华安是发生过中强地震的地区。
- c. 邵武—河源断裂：在莫霍面反映不明显，切割到  $P_1$  波的反射界面，断距约为 2 km，从记录剖面图上看到，石城炮  $P_1$  在 70 km 左右走时发生错动，70~80 km 地震波能量变弱，80 km 后能量恢复。该断裂带在历史上发生过多次中强震，而且近期内仍有活动。

另外，在漳州盆地之下莫霍面隆起约 3 km；戴云山区下莫霍面凹陷近 2 km；永安—梅州莫霍面有抬升趋势，但由于玳瑁山的影响，莫霍面很快凹陷；崇安—武平断裂有可能在朋口附近经过；从朋口向石城方向莫霍面有所抬升。从总体上看，莫霍面起伏为东浅（29.5 km）西深（约 32.5 km），从东向西莫霍面逐渐加深。

## 5 非纵测线的处理及结果

### 5.1 非纵测线的处理。<sup>[4]</sup>

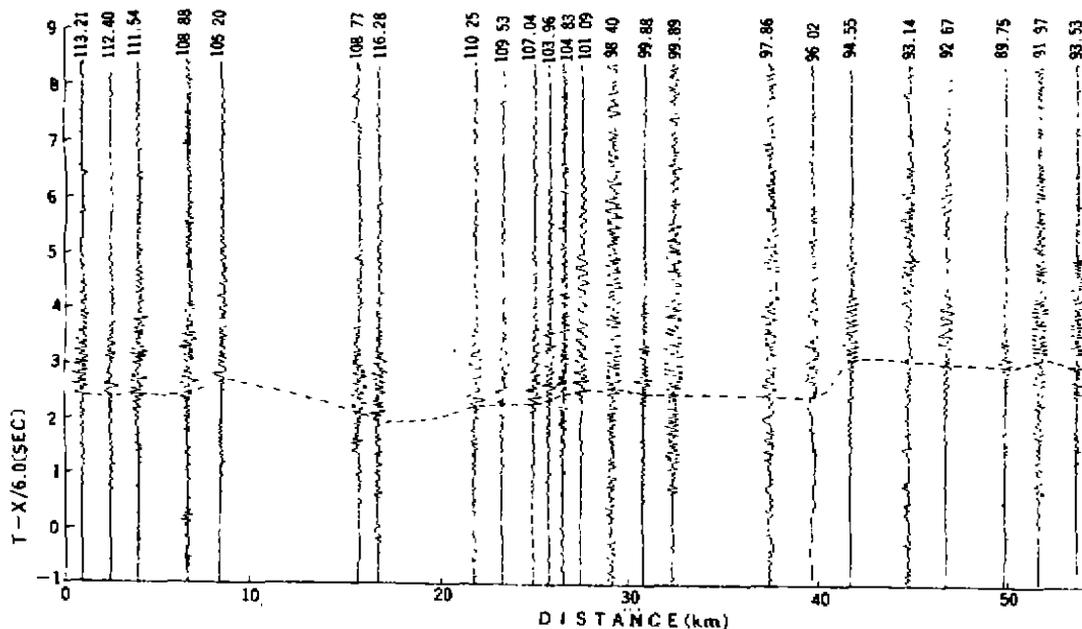


图 5-a 宁都炮记录剖面图

Fig. 5-a Record section of Ningdu shot

非纵测线的布设主要是用来研究该测区莫霍面的情况的，所以选择那些有莫霍面反射波的记录来编制记录剖面图。其中包括宁都炮点，宣城—连城—嵩口测线的记录，炮检距为 90~115 km；大田、永安炮点古雷—龙岩—石城测线的记录，其炮检距分别为 90~209 km 和 109~183 km。

为了直观起见，必须把这些记录排成记录剖面的形式。为此，首先把每一个台站的记录图归位到实际反射点去。可取径向距离中点 (X/2) 为反射点在地面投影点的位置，这样的假设显然只是近似的。然后，再把反射点投影到一条通过这些点的平均直线或折线上去。最后投影点的相对位置便可作为剖面图的横坐标。需要注意的是，在跨越主要构造单元时，

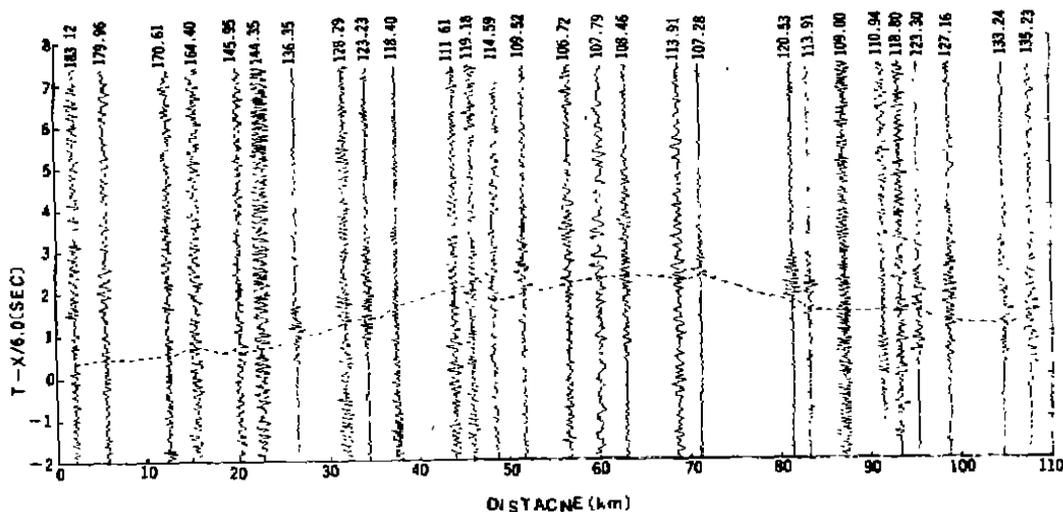


图 5-b 大田炮记录剖面图

Fig. 5-b Record section of Datian shot

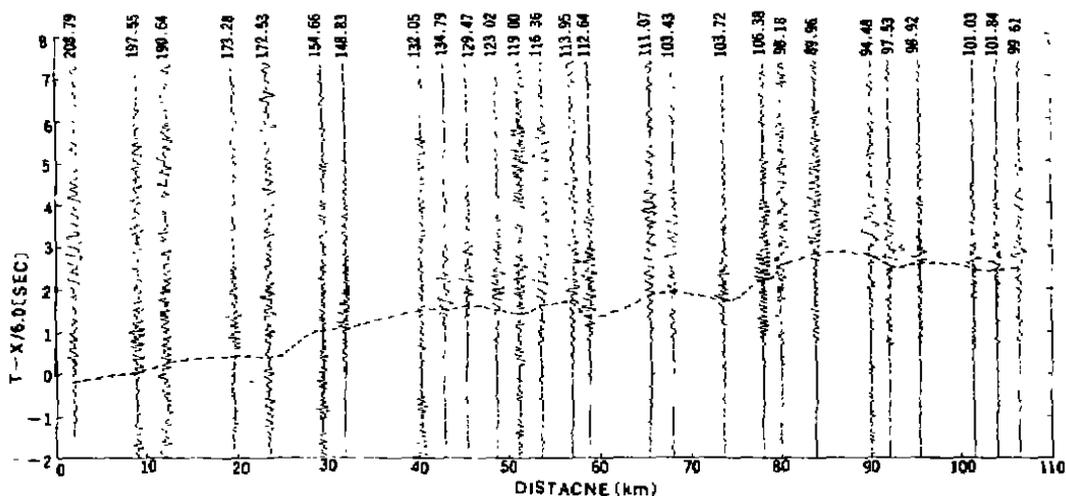


图 5-c 永安炮记录剖面图

Fig. 5-c Record section of Yongan shot

不要把实际投影点投影到边界的另一边去，处理的办法是在这些关键部位参考点位图、地形图来确定反射点的位置。有了各反射点（或其投影点）位置后，即可绘制宁都、大田、永安三炮的记录剖面图（图 5a—c），从剖面图可识别到莫霍面反射波  $P_0$ 。

由于古雷—连城—石城测线高程从 5 m 到 680 m，所以应考虑高程校正，把测点、炮点均校正到高为 300 的基准面上。高程校正的公式为<sup>[5]</sup>：

$$\Delta T = [ (1/V_{沉积})^2 - (1/V)^2 ]^{1/2} \cdot h_{高程}$$

其中， $V_{沉积}$ 为沉积层速度。根据《江西永平爆破观测和我国东南地区深部构造初步研究》一文，所得地表覆盖层速度为 4.92 km/s，这主要是中新世以来的沉积层—红层。闽西大部分地区都是红层覆盖区，所以可取  $V_{沉积} = 4.92$  km/s。 $V$ 为壳下顶层速度，即莫霍界面的速度。福建地区为 7.95~8.05 km/s，为计算方便，取为 8.00 km/s。 $h_{高程}$ 为炮点及测点标准高差之和。

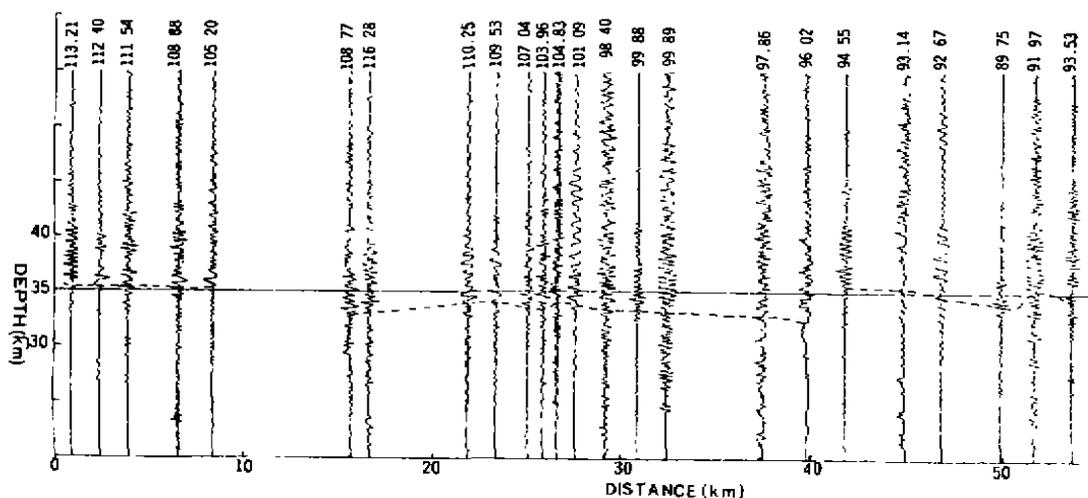


图 6 宁都炮深度剖面图

Fig. 6 Depth profile of Ningdu shot

单层均匀介质中，反射波在反射点处界面深度为：

$$H_1 = 1/2[V^2 T_1^2 - X_{12}]^{1/2}$$

式中， $V$ 为莫霍界面以上覆盖层平均速度。考虑到古雷、石城炮求得的结果，大田、永安炮的莫霍面计算中取为 6.29 km/s。参考《江西永平爆破观测和我国东南地区深部构造初步研究》一文，宁都炮莫霍面计算中取为 6.28 km/s。这样可计算出各反射点莫霍面深度。为直观地反映莫霍面形态，设计了深剖面图。图 6 为宁都炮深度剖面图。

## 5.2 结果

宜城—连城—嵩口剖面显示莫霍面深度在 33~35 km 之间。莫霍面在两处有明显断错，错距约 2 km 左右。认为是邵武—河源断裂在这两处经过该剖面，从而深切至莫霍面，使之出现断错。除这两处断错外，沿构造面莫霍面起伏不大，比较平缓，深度约 33.5 km。

古雷—龙岩—石城剖面显示莫霍面深度范围为 29~34 km，在华安附近莫霍面有近 4

km 的断错。根据地质构造来看,政和一海丰断裂在该处穿过该剖面,造成断错戴云山下莫霍面凹陷约 2 km,永安—梅州莫霍面隆起近 3 km。从赖坊向灵地北西方向莫霍面平缓加深。总体上看,从沿海向内陆莫霍面有加深趋势。

致谢:本文在完成过程中,得到了福建省地震局的王振明、邱陶兴等同志的大力帮助,在此表示感谢!

### 参 考 文 献

- 1 曾融生. 固体地球物理学导论. 科学出版社, 1984.
- 2 廖其林, 等. 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, 1998, 31 (3).
- 3 廖其林, 等. 福建长乐—诏安断裂带地壳上地幔结构与地热远景的初步探讨. 海洋学报, 1989, 11 (8).
- 4 熊绍柏, 滕吉文, 尹周勋. 西藏高原地区的地壳厚度和莫霍界面的起伏. 地球物理学报, 1985, 28 (增刊 I).
- 5 张少泉, 林楚贞, 安昌强. 北京地区莫霍界面形状的初步研究. 地震学报, 1981, 3 (4).



## 欢迎订阅《华南地震》杂志

《华南地震》是广东省地震局主办,《华南地震》编辑委员会编辑,广东科技出版社出版的地震学及有关学科的学术性刊物(季刊),向国内外公开发行。

一、本刊宗旨:发展学术、交流经验、传播信息;促进地震学与相关科学的结合;促进大华南地区及全国地震科研、测报、防抗事业的发展;为我国四化建设服务。

二、刊登内容:地震学、地震地质、地震前兆、地震观测技术、工程地震、结构抗震、诱发地震(含水库地震)、和地震科技管理与决策等方面的科技论文、研究报告,适量刊登科技简讯及港、澳、台地区和东南地区的优秀文章。从 1992 年第 3 期起开设防震抗震专题学术讲座。

三、读者对象:(1)从事地震科研、测报、防震工作的科技人员和管理人员;(2)地质、环保、国土、水电、基建等政府事业部门的防震减灾专业的技术人员和管理人员;(3)大专院校有关专业的教师和学生。

四、订阅办法:国内订购处:广州市先烈中路 81 号大院《华南地震》编辑部(邮政编码 510070),全年 4 期,每期定价 3.5 元,全年 16 元(含邮费)。国外订购处:中国出版对外贸易总公司(北京 782 信箱)。

《华南地震》编辑部

# CHARACTERISTICS OF SEISMIC VELOCITY STRUCTURE OF THE CRUST AND UPPER MANTLE AND MOHO DISCONTINUITY IN GULEI—SHICHENG AREA

Bian Yinju<sup>1</sup>, Liu Baocheng<sup>2</sup> and Liao Qilin<sup>3</sup>

## Abstract

This paper describes the result of preliminary study on the deep seismic sounding data along the Gulei—Shicheng profile and the Songkou—Yicheng profile. After analysis the phase characteristics in the data along the Gulei—Shicheng profile, five waves are distinguished, namely,  $P_1$ ,  $P_1^1$ ,  $P_1^0$ ,  $P_1^2$  and  $P_n$  ( $P_n^0$ ). After calculation of wave traveltimes by inversion, direct fitting and on theoretical seismogram, a structural model of upper mantle in the area is constructed.

The structure of the crust in Gulei—Shicheng area is multilayer. It can be distinguished into three layers, the upper, middle and lower. Their thickness under the Gulei shot point is 1.0 km, 15.7 km and 12.8 km, respectively. The average velocity of the crust is 6.29 km/s, the depth is 29.5 km,  $P_n$  wave velocity of the top surface of upper mantle is 7.83 km/s. The thickness under the Shicheng shot point is 1.8 km, 18.3 km and 12.4 km, respectively. The average velocity of the crust is 6.29 m/s, the depth is 32.4 km and  $P_n$  wave velocity of the top surface of upper mantle is 8.00 km/s. According to other results, we infer preliminarily that a low-velocity zone composed of semi-molten materials exists in the lower part of the middle crust.

In the studied area the lateral variation in velocity is stronger. Three major faults, Changle—Zhaoan, Zhenghe—Haifeng and Shaowu—Heyuan faults from east to west, pass through this area and cut deeply down to the Moho discontinuity. Moho discontinuity swells up 3.0 beneath the Zhangzhou basin, depresses near 2.0 in the Daiyunshan area, and again swells up nearly 3 km in Yongan—Meizhou area. The depth of Moho discontinuity gradually increases from southeast to northwest.

Along the non-longitudinal Yicheng—Liancheng—Songkou profile, the Moho discontinuity is obviously offset at two sites with amplitude about 2.0 km. It indicates that the Shaowu—Heyuan fault is a deep fault cutting the Moho discontinuity.

**Key words:** Crust and upper mantle, Seismic velocity structure wave, Moho discontinuity, Fujian province, Gulei—Shicheng profile

- 
1. Institute of Geophysics, SSB
  2. Geophysical Department of Beijing University
  3. Seismological Bureau of Fujian Province