

# 利用合成地震图 研究东北地区壳幔介质结构

姚殿义 于利民 李钦祖

(中国石家庄 050021 河北省地震局)

束沛镒 李幼铭

(中国北京 100101 中国科学院地球物理研究所)

## 摘要

本文采用计算合成地震图与分布在东北地区的 11 个地震台记录的深源远震波形对比分析的方法,研究该区壳幔结构.结果表明,东北地区地下 100km 以上壳幔介质为分层结构,并存在有低速层.莫霍界面较清晰,地壳厚度在 31.8—35.8km 之间.

关键词 合成地震图;深源远震波形;东北介质结构

## 一、引言

东北地区地质构造复杂,矿产资源丰富,地震活动亦较频繁.中国东部的深大断裂带——郯庐断裂带北段贯穿本区.自有地震记载以来,发生  $M_s \geq 6$  地震 20 多次.该区东部为深源地震分布区.因此,研究东北地区壳幔介质结构具有重要意义.近十几年来,不少学者对东北地区的深部地壳构造进行研究<sup>[1]</sup>,但采用的方法主要是重力、工程爆破、大地电磁测深等.也有的学者利用分布在 5—18km 深度上的天然近地震作走时曲线,求地壳模型.该方法一般得到二层或三层的简单分层模型.

本文利用深源远震资料,用进一步改进的 Delta 矩阵分解形式的直接算法<sup>[2, 3]</sup>,通过调整地壳模型计算合成地震图,与深源远震记录波形对比分析,确定记录台站下方的介质模型,选择分布在东北地区的 11 个地震台站求得结果,从而研究该区壳幔介质结构.

## 二、资料和计算方法

文中资料取自以沈阳为中心的东北地区 11 个地震台实测记录.图 1 示出了台站分布情况.表 1 是台站经纬度及代码.深源远震参数和地震台记录代码列于表 2.这些地震的震中距基本上在 30°—90° 之间(见图 2).之所以这样选择,是因为频率在 0.2—10Hz 间

1989年3月27日收到本文初稿,1990年4月6日决定采用.

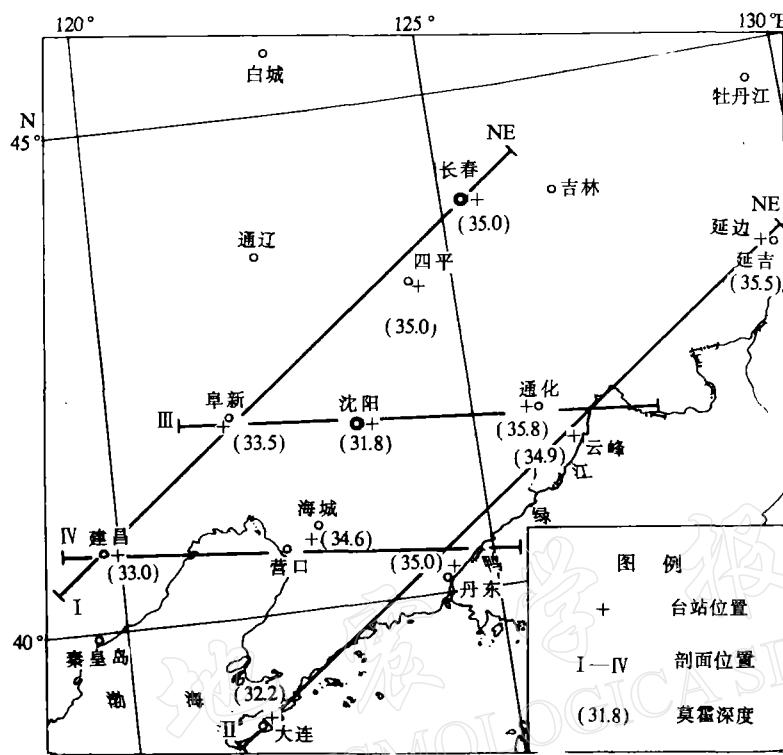


图1 东北地区台站分布及剖面位置

表1 台站位置和记录代码

台名	长春	四平	沈阳	阜新	建昌	营口	延边	云峰	通化	丹东	大连
代码	CHC	SP	SHY	FX	JCH	YK	YB	YF	TH	DD	DL
北纬	43°48'	43°13'	41°50'	42°03'	40°50'	40°41'	43°00'	41°22'	41°42'	40°11'	38°54'
东经	125°27'	124°34'	123°35'	123°36'	123°36'	123°36'	129°29'	126°31'	126°00'	124°25'	121°38'

表2 地震参数和记录代码

序号	发震时刻		震中位置		深度 (km)	震级	记录代码
	(年·月·日)	(时·分)	$\lambda$ (°)	$\varphi$ (°)			
1	1981.3.22	06-52	146.8E	5.3S	207	5.4	DD-1
2	1983.2.26	06-03	147.2E	5.3S	238	5.6	SP2, TH3
3	1983.8.07	06-37	130.4E	6.5S	175	5.8	CHC1
4	1984.1.17	10-09	117.6E	7.9S	288	5.7	CHC2, SP1, YB1, YF1, DL1, DD2, YK1
5	1984.1.27	21-01	70.9E	36.4N	178	6.0	TH1
6	1984.2.17	01-18	70.9E	36.8N	223	5.8	YF2, YB2
7	1984.2.18	00-32	130.1E	6.7S	175	5.8	TH2, DL2, YK2
8	1984.4.01	17-59	125.0E	5.8S	596	5.5	SHY1, FX1
9	1984.4.14	06-05	148.2E	5.7S	172	5.5	SP3
10	1984.4.17	22-16	126.8E	6.6S	445	5.3	YB3, FX2
11	1984.8.22	17-07	148.2E	5.7S	160	5.3	YK3

续表 2

序号	发震时刻		震中位置		深度 (km)	震级	记录代码
	(年·月·日)	(时·分)	$\lambda$ (°)	$\varphi$ (°)			
12	1984.9.16	18·23	117·6E	7·1S	630	5·6	SHY2, JCH1
13	1984.9.27	09·24	128·6E	6·4S	340	5·2	JCH2
14	1985.5.19	16·50	124·2E	3·4N	382	5·8	JCH3

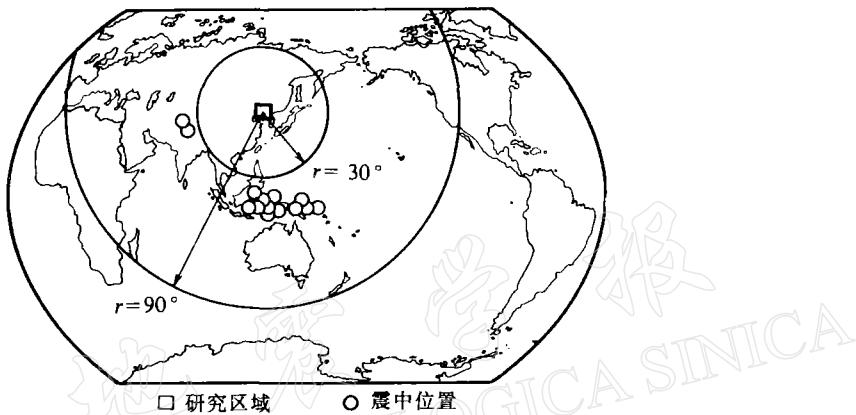


图 2 研究区域和震中分布示意图

的地震波,经远距离传播后,其直达波与面波在观测记录上是完全分离的. 地震体波的传播途径不触及核幔边界. 表2中所列地震深度在160—630km,使其直达P波和经震源所在地区地表反射的PP波发生波型转换的SP波在观测记录上亦是分离的.

因此,台站所记录到这类地震的波形,前数十秒的应是直达P波,这一段波形观测记录,并不带有震源区以上的地壳及上地幔构造效应的影响.

显然,若选用已知震源参数的深源远震的记录,运用标准地球模型的地幔传输性质,以及已知短周期记录仪器的脉冲响应,该记录波形形态则可直接反映到达记录台站时的区域介质性质,从而可对台站区域介质结构进行研究. 关于震源时间函数的选取,记录波形数字化及预处理的具体方法,文献[3, 4]已作了详细叙述.

根据文献[2],计算位错点源地表位移经向分量和垂直分量公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} U(\omega) = R_u(\omega, \gamma) \frac{M_0}{2\pi\rho_s} F(\omega) \cdot G(R) \sum_{i=0}^2 A_i(\lambda, \delta, \theta) \cdot P_i \\ W(\omega) = R_w(\omega, \gamma) \frac{M_0}{2\pi\rho_s} F(\omega) \cdot G(R) \sum_{i=0}^2 A_i(\lambda, \delta, \theta) \cdot P_i \end{array} \right. \quad (1)$$

并且

$$\left\{ \begin{array}{l} R_u = +K \frac{H_{33}}{\hat{H}_{22}} \\ R_w = -K \frac{H_{31}}{\hat{H}_{22}} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中  $\mathbf{H} = \mathbf{M}_{n+1}^{-1} \mathbf{K}_{n+1}$  为 Haskell 矩阵 ( $\mathbf{K}_{n+1}$  是地表与第  $n$  层界面间应力位移矢量的传播矩阵), 其 2 阶子式即 Delta 矩阵, 记  $\hat{\mathbf{H}}$ , 有

$$\hat{\mathbf{H}}_{22} = H_{11}H_{33} - H_{31}H_{13}$$

(1) 式中

$$A_0(\lambda, \delta, \theta) = \frac{1}{2} \sin 2\delta \sin \lambda$$

$$A_1(\lambda, \delta, \theta) = \cos \delta \cos \lambda \cos \theta + \cos 2\delta \sin \lambda \sin \theta$$

$$A_2(\lambda, \delta, \theta) = \frac{1}{2} \sin 2\delta \sin \lambda \cos 2\theta - \sin \delta \cos \lambda \sin 2\theta$$

$$P_0 = \frac{2 - 3 \sin^2 \gamma}{\alpha_s^2}$$

$$P_1 = \frac{\sin 2\gamma}{\alpha_s^2}$$

$$P_2 = \frac{\sin^2 \gamma}{\alpha_s^2}$$

上式中的  $\gamma$  为深源远震直达 P 波离源角,  $\lambda, \delta, \theta_s$  为位错源几何参数, 如图 3 所示. 图中  $\theta = \theta_r - \theta_s$ .  $\theta_r$  为台站方位角,  $\theta_s$  为断层走向方位角,  $\mathbf{U}$  是位错矢量,  $B_{s,m}$  为位错源的震源

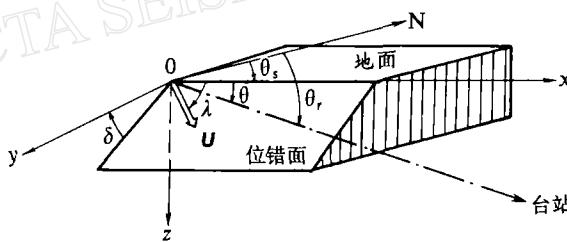


图 3 位错源几何参数

系数,  $\alpha_s$  为第  $s$  层介质中 P 波垂直波数,  $F(\omega)$  是震源脉冲的谱,  $G(R)$  为几何扩散因子, 括号内的  $R$  为震源矩. 对于 J-B 模型, 震中距为  $\Delta$  时, 按文献[5] P 波射线参数为

$$P = 0.1 - 0.0006667 \Delta$$

实际有效的几何扩散因子  $G(R)$  为

$$G(R) = (12.34 - 0.1577 \Delta + 7.071 \times 10^{-4} \Delta^2) \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$$

由(1)式计算得  $U(\omega), W(\omega)$  后作反傅氏变换, 得到时间域的波形  $u(t), w(t)$  后再经适当内插以提高采样率, 最后与仪器的脉冲响应褶积, 可获得能与实际记录对比分析的合成地震图.

### 三、东北地区各台站下方介质结构

以前文公式, 我们在 UNIVAC-1100 机上用 FORTRAN 语言计算合成地震图. 首先

选取近年来人们关于东北地区的介质模型研究结果为初始模型数据,计算合成地震图;然后与观测图波形对比,取之拟合较好者;再对其模型数据加以调整,逐步进行下去,直到认为计算图形与记录图形特别相象,达到可接受的时候,就停止计算.取这个“可接受模型”为该台站地下壳幔介质结构模型.

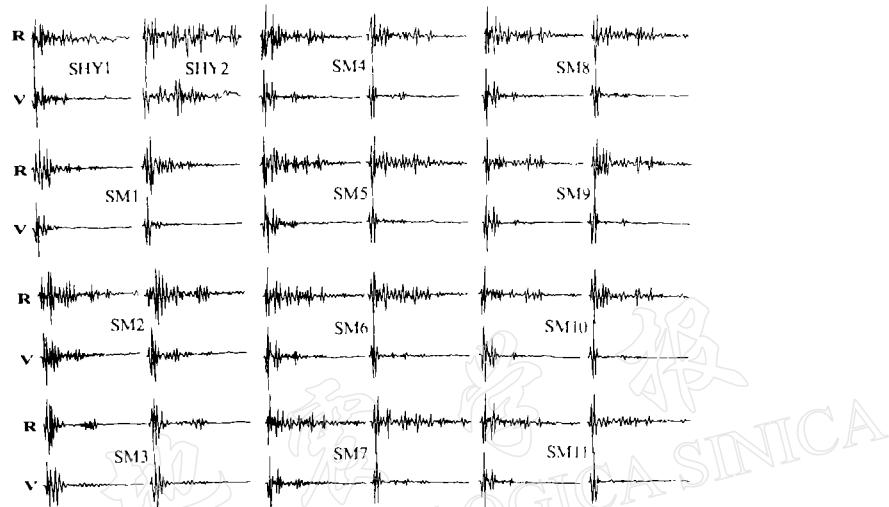


图4 沈阳台记录波形与合成地震图的对比. R为径向分量, V为垂直分量

图4以沈阳台为例,示出上述过程中的部分对比图形.图中左上方为沈阳台于1984年4月1日及9月16日记录的两次分别为5.5级、5.6级(见表2)地震波形图,代号分别为SHY1, SHY2.当然,为便于与理论计算的合成地震图进行对比及计算机处理,我们先将记录波形离散化,然后作坐标变换,求得与台站柱坐标对应的各分量的波形.图中R为径向分量,V为垂直分量. SM1—SM3是初始模型计算得到的合成地震图波形.可见,SM2的形状与观测图已有某些相象,故调整SM2模型数据,计算得到SM4—SM7波形.显然,SM7波形与观测波形极为相象,我们确定SM7为“可接受模型”.事实上,在得到模型SM7之前,已调整设置了数十个模型(沈阳台计算43次,见表3).

表3 各台模型设置数目及记录代码

台站代码	模型数量	台站代码	模型数量	台站代码	模型数量
CHC1—2	9	JCH1—3	33	TH1—3	43
SP1—3	9	YK1—3	66	DD1—2	41
SHY1—2	43	YB1—3	41	DL1—2	39
FX1—2	9	YF1—2	42		

图4中SM8—SM11是将SM7模型数据改动,观察计算波形变化实验.很明显,这些波形与观测波形比较结果远不如“可接受模型”SM7为佳.因此,认为上述计算得到的“可接受模型”是比较稳定可信及反映沈阳台站下方壳幔介质结构的模型.

同理,也得到了长春、四平、阜新、建昌、营口、延边、云峰、通化、丹东、大连等台站地下介质“可接受模型”.对比情况示于图5.表4为上述11个台“可接受模型”的数据.在

表 4 介质模型参数

	<i>H</i>	4.00	11.0	16.0	21.5	30.0	35.0	45.0	60.0	80.0	95.0	125
	<i>D</i>	4.00	7.00	5.00	5.50	8.50	5.00	10.0	15.0	20.0	15.0	30.0
M1	<i>v<sub>p</sub></i>	4.98	5.66	6.10	5.95	6.95	6.30	7.85	7.95	7.70	8.00	8.20
	<i>v<sub>s</sub></i>	2.88	3.26	3.52	3.44	4.01	3.64	4.53	4.59	4.45	4.62	4.73
	<i>ρ</i>	2.14	2.40	2.56	2.51	2.88	2.64	3.23	3.26	3.17	3.28	3.36
	<i>H</i>	3.80	11.3	15.3	19.3	27.8	31.8	41.8	56.8	76.8	91.8	121
M2	<i>D</i>	3.80	7.50	4.00	4.00	8.50	4.00	10.0	15.0	20.0	15.0	30.0
	<i>v<sub>p</sub></i>	5.00	5.70	6.10	5.85	6.95	6.30	7.85	7.95	7.55	8.00	8.20
	<i>v<sub>s</sub></i>	2.89	3.29	3.52	3.38	4.01	3.64	4.53	4.59	4.36	4.62	4.73
	<i>ρ</i>	2.15	2.41	2.56	2.47	2.88	2.64	3.23	3.26	3.11	3.28	3.36
M3	<i>H</i>	3.50	11.0	16.0	20.0	27.5	33.5	42.5	54.5	72.5	87.5	117
	<i>D</i>	3.50	7.50	5.00	4.00	7.50	6.00	9.00	12.0	18.0	15.0	30.0
	<i>v<sub>p</sub></i>	5.20	5.95	6.30	6.00	6.95	6.35	7.86	7.98	7.60	7.80	8.10
	<i>v<sub>s</sub></i>	3.00	3.44	3.63	3.46	4.01	3.67	4.54	4.61	4.39	4.50	4.68
M4	<i>ρ</i>	2.22	2.51	2.64	2.52	2.88	2.66	3.23	3.27	3.13	3.21	3.32
	<i>H</i>	3.00	9.50	15.5	19.0	27.0	33.0	41.0	53.0	73.0	93.0	123
	<i>D</i>	3.00	6.50	6.00	3.50	8.00	6.00	8.00	12.0	20.0	20.0	30.0
	<i>v<sub>p</sub></i>	5.00	5.68	6.30	5.95	6.95	6.35	7.80	7.95	7.65	7.85	8.20
M5	<i>v<sub>s</sub></i>	2.89	3.28	3.65	3.44	4.01	3.67	4.50	4.59	4.42	4.53	4.73
	<i>ρ</i>	2.15	2.40	2.52	2.51	2.88	2.68	3.21	3.26	3.15	3.23	3.36
	<i>H</i>	3.50	11.0	15.6	22.1	29.6	34.6	44.6	59.6	79.6	94.6	124
	<i>D</i>	3.50	7.50	4.60	6.50	7.50	5.00	10.0	15.0	20.0	15.0	30.0
M6	<i>v<sub>p</sub></i>	4.88	5.50	6.00	5.75	6.85	6.45	7.85	7.95	7.55	8.00	8.20
	<i>v<sub>s</sub></i>	2.82	3.18	3.46	3.32	3.95	3.72	4.53	4.59	4.36	4.62	4.73
	<i>ρ</i>	2.10	2.34	2.52	2.43	2.85	2.70	3.23	3.26	3.11	3.28	3.36
	<i>H</i>	3.50	11.0	17.0	21.0	29.0	35.5	43.5	53.5	68.5	88.5	118
M7	<i>D</i>	3.50	7.50	6.00	4.00	8.00	6.50	8.00	10.0	15.0	20.0	30.0
	<i>v<sub>p</sub></i>	4.80	5.68	6.35	5.70	6.95	6.10	7.60	7.95	7.70	7.60	8.20
	<i>v<sub>s</sub></i>	2.77	3.28	3.67	3.29	4.01	3.52	4.39	4.59	4.45	4.39	4.73
	<i>ρ</i>	2.07	2.40	2.66	2.41	2.88	2.56	3.13	3.26	3.17	3.13	3.36
M8	<i>H</i>	2.90	8.40	14.9	19.4	28.4	34.9	44.9	59.9	79.9	97.9	128
	<i>D</i>	2.90	5.50	6.50	4.50	9.00	6.50	10.0	15.0	20.0	18.0	30.0
	<i>v<sub>p</sub></i>	4.95	5.60	6.50	5.85	6.95	6.60	7.85	7.95	7.60	7.85	8.20
	<i>v<sub>s</sub></i>	2.86	3.23	3.75	3.38	4.01	3.81	4.53	4.59	4.39	4.53	4.73
M8	<i>ρ</i>	2.13	2.42	2.71	2.47	2.88	2.75	3.23	3.26	3.13	3.23	3.36
	<i>H</i>	2.80	7.80	14.8	19.8	27.8	35.8	45.8	65.8	80.8	90.8	120
	<i>D</i>	2.80	5.00	7.00	5.00	8.00	8.00	10.0	20.0	15.0	10.0	30.0
	<i>v<sub>p</sub></i>	4.80	5.70	6.60	5.75	7.00	6.50	7.85	7.90	7.60	8.00	8.10
M8	<i>v<sub>s</sub></i>	2.77	3.29	3.81	3.32	4.04	3.75	4.53	4.56	4.39	4.62	4.68
	<i>ρ</i>	2.07	2.41	2.75	2.43	2.90	2.71	3.23	3.24	3.13	3.28	3.32

续表 4

	<i>H</i>	3.00	9.00	16.0	21.5	30.0	35.0	45.0	60.0	80.0	95.0	125
	<i>D</i>	3.00	6.00	7.00	5.50	8.50	5.00	10.0	15.0	20.0	15.0	30.0
M9	$v_p$	4.98	5.56	6.30	5.60	6.95	6.30	7.85	7.95	7.70	8.00	82.0
	$v_s$	2.88	3.21	3.69	3.23	4.01	3.64	4.53	4.59	4.45	4.62	4.73
	$\rho$	2.14	2.36	2.52	2.42	2.88	2.64	3.23	3.26	3.17	3.28	3.36
	<i>H</i>	3.20	9.20	16.2	20.2	27.2	32.2	40.2	55.2	75.2	90.2	120
M10	<i>D</i>	3.20	6.00	7.00	4.00	7.00	5.00	8.00	15.0	20.0	15.0	30.0
	$v_p$	4.90	5.50	6.40	5.60	7.00	6.10	7.80	7.95	7.65	7.85	8.10
	$v_s$	2.83	3.18	3.70	3.23	4.04	3.52	4.50	4.59	4.42	4.53	4.68
	$\rho$	2.11	2.34	2.68	2.42	2.90	2.56	3.21	3.26	3.15	3.23	3.32

表 4 中, *D* 为各层厚度(单位: km), *H* 为各层深度(单位: km),  $v_p$  为各层内纵波速度(单位: km/s),  $v_s$  为各层内横波速度(单位: km/s),  $\rho$  为每层介质平均密度(单位:  $10^3 \times \text{kg/m}^3$ ). 长春台和四平台站的模型是一样的, 即 M1.

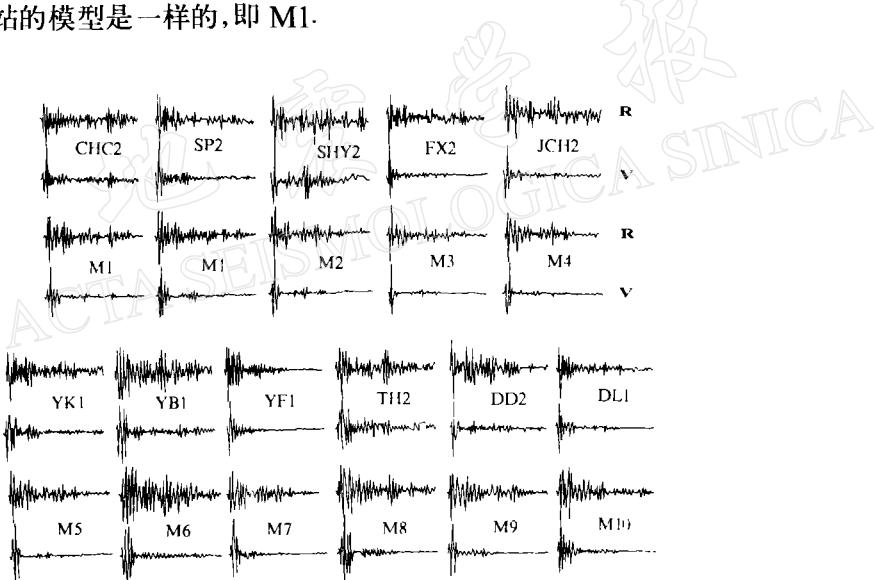


图 5 东北各台站观测图与合成图的比较. R 为径向分量, V 为垂直分量

#### 四、东北地区壳幔介质结构结果

根据表 4 东北地区 11 个地震台“可接受模型”结果, 按图 1 中各测线组成剖面图示于图 6. 图中 I, II, III, IV 对应前文图 1 中的各测线, 横轴数字代表波速, 纵轴数字代表深度. 我们看到, 东北地区地下 100km 以上地壳和上地幔(简称壳幔)介质为分层结构, 地壳基本上是高、低速层相间的. 莫霍界面(M 面)在 31.8—35.8km 之间较为清晰. 东北地区地壳厚度由南往北大体上呈逐渐加厚趋势, 这与文献[1] 结果相近. 不过, 沈阳区域地壳相对较薄, 为 31.8km, 在该区上地幔形成凸形. 由于这个地区正位于郯庐大断裂带上, 地壳结构出现一定程度的差异是可能的.

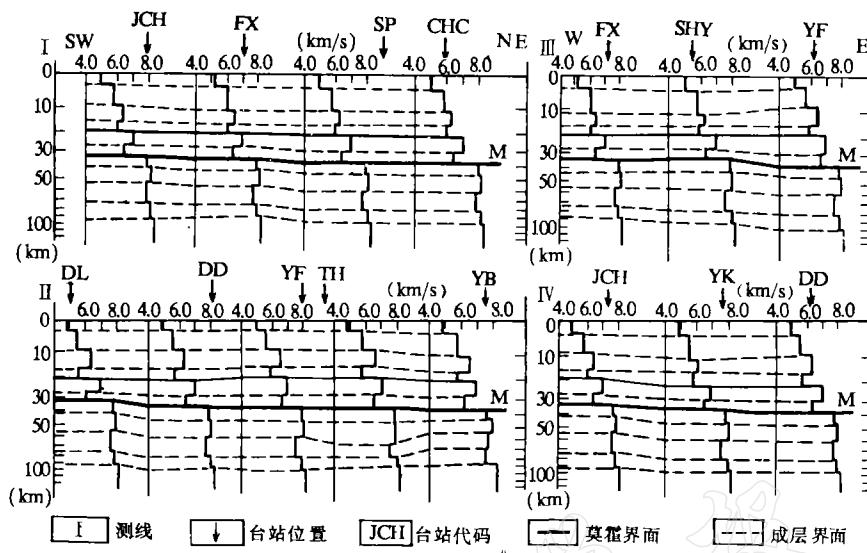


图 6 东北地区壳幔介质结构剖面图

本工作是国家地震局资助项目的一部分。

### 参考文献

- [1] 国家地震局《深部物探成果》编写组, 1986. 中国地壳上地幔地球物理探测成果. 地震出版社, 北京. 198—231.
- [2] 李幼铭、朱培定、梁尚鸿、束沛镒, 1983. 层状介质中地震 P-SV 波广义透射系数的计算. 地球物理学报, **26**, 增刊, 661—667.
- [3] 朱培定、李幼铭, 1985. 利用深源远震记录波形研究台站区域的介质结构. 地球物理学报, **28**, 16—25.
- [4] 朱培定、李幼铭、张立敏、梁尚鸿、束沛镒, 1985. 利用深源远震记录波形研究新疆准噶尔盆地边缘台站区域的介质分层结构. 西北地震学报, **7**, 46—58.
- [5] Langston, C. A. and Helmberger, D. V., 1975. A procedure for modeling shallow sources. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **42**, 117—130.

# A STUDY OF CRUST AND UPPER MANTLE STRUCTURE IN THE NORTHEASTERN REGION OF CHINA BY MEANS OF SYNTHETIC SEISMOGRAMS

Dianyi Yao, Limin Yu and Qinzu Li

(Seismological Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Peiyi Shu and Youming Li

(Institute of Geophysics, Academia Sinica, Beijing 100101, China)

## Abstract

In this paper, structure models of the crust and upper mantle beneath each station have been obtained by way of fitting synthetic seismograms with P waveforms of deep focus teleseismic records from the 11 stations in the Northeastern Region of China. We have studied the structure in the region based on those models. Our results show that the medium of the crust and upper mantle is a layered structure with alternate high and low velocity layers within about 100 km under the region. The crustal thickness is about 31.8—35.8 km.