

海城和唐山区域深部 结构及其与大震类型的关系*

姚殿义 于利民 李钦祖

(河北省地震局)

束沛镒 李幼铭

(中国科学院地球物理研究所)

摘 要

本文采用Haskell矩阵及改进的Delta矩阵分解形式的快速算法,通过调整介质模型,计算综合地震图,并与深源远震记录波形对比,获得了海城和唐山区域介质结构参数。从介质结构角度,对两震区的发震背景进行了讨论,指出:两区域深部介质层结构均有不同程度的起伏,可能是应力场易集聚区大震发生的背景条件之一;而两区域在介质起伏部位,各层内速度等细节上的差异,又可能是两大震发震方式不同的一个可能原因。

关键词 深部结构 大震类型 Haskell矩阵 Delta矩阵

一、引 言

1975年2月4日海城 $M_s7.3$ 级和1976年7月28日唐山 $M_s7.8$ 级地震,时间只隔一年多,距离不过4百余公里,它们的破坏之大,影响之广是世人瞩目的;而它们的成因及不同的发震方式(一个有前震,一个前震不明显)是多年来地震工作者一直在探讨的重要课题之一。该课题的研究将在大震预报方面有重要作用。

本文首先计算综合地震图,然后与实际观测波形对比,确定两区域介质结构,以此为基础,试图探讨大震的发震背景及可能成因。

二、资料和方法

本工作中,海城区域取5个地震台资料,唐山区域取4个地震台资料。地震台位置示于图1。选取深远地震时,一般取震中距 Δ 为 $30^\circ\sim 90^\circ$,这样,使地震射线最低点不至触及核幔界面;又可减少上地幔 20° 间断面和低速层对波形的干扰,足够的震源深度可保证始端30秒波形记录不受源上方介质结构的影响,这样到达地壳底层的源函数可由垂直向记录始端波形通过偏振滤波截取。因此,不断地修改试验介质模型,就可得到相应的综合地震图,再与观测波形相对比,从中筛选出符合较好者作为最终“可接受模型”。地震台代码和地震参数分别列于表1和表2。

* 本工作是国家地震局科技司资助项目的一部分

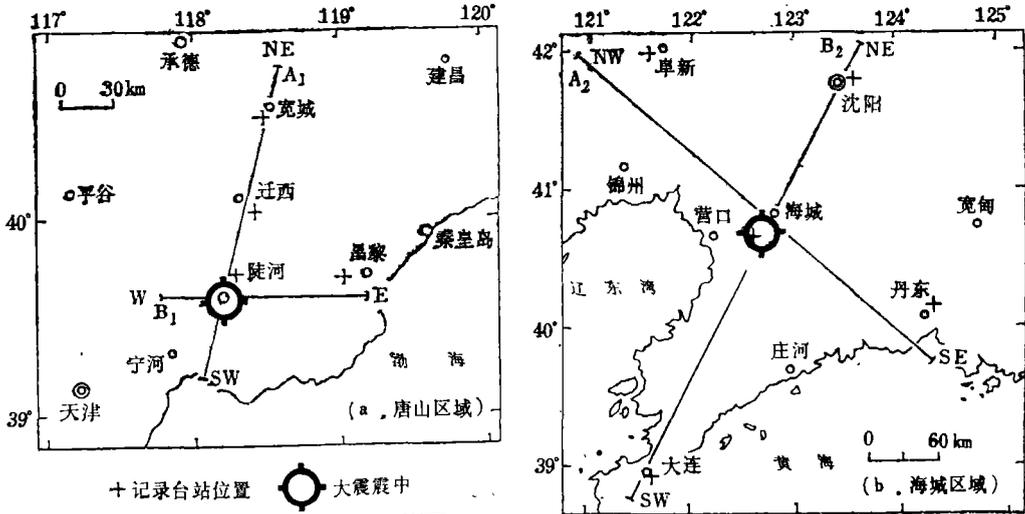


图1 海城和唐山区域地震台位置及剖面分布

表1 台站参数和代码

台名	营口	沈阳	丹东	大连	阜新	陡河	迁西	宽城	昌黎
代码	yk	SHY	DD	DL	FX	DH	QX	KCH	CHL
北纬	40.68°	41.83	40.19°	38.91°	42.05°	39.75°	40.05°	40.59°	39.77
东经	122.69°	123.58°	124.42°	121.63°	121.60°	118.30°	118.39°	118.48°	119.10

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 (Ms)	记录代码
1	1981.3.22.06—52	146.8°E 5.3°S	207	5.9	DDL
2	1983.9.12.23—42	71.1E 36.6N	204	6.3	DH
3	1983.9.16.12—21	123.0E 0.2S	255	5.0	KCH
4	1984.1.17.10—09	117.6E 7.9S	288	5.7	YK1, DD2, DL1, CHL
5	1984.1.27.21—01	10.9E 36.4N	178	6.0	QX
6	1984.2.18.00—32	130.1E 6.7S	175	5.8	YK2, DL2
7	1984.4.1.17—59	125.0E 5.8S	596	5.5	SHY1, FX1
8	1984.4.17.22—16	126.8E 6.6S	445	5.3	FX2
9	1984.8.22.17—07	148.2E 5.7S	160	5.3	YK3
10	1984.9.16.18—23	117.6E 7.1S	630	5.6	SHY3

三、理论计算

计算工作主要在UNIVAC1100计算机上进行。并采用改进的Delta矩阵分解形式的直接算法^[1]。分两步进行。

1、地表位移响应的计算

设区域性结构模型是一组层状、均匀、各向同性和完全弹性介质。其中第m层以上为地壳部分，第n界面是区域介质结构的底边界。因此，当取第n层界面下底部p波入射及地表自由面条件时， $\phi_{n+1}^- = 0, x_{n+1}^- = 0, z = 0, x = 0$ ，并有

$$\begin{Bmatrix} \phi^- \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = M_{n+1}^{-1} K_{n, 1} \begin{Bmatrix} R_u/K \\ 0 \\ R_w/K \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{1}$$

式中 $k_{n, 1}$ 是地表与第n界面间应力位移矢量的传播矩阵。

令 $H = M_{n+1}^{-1} k_{n, 1}$ ，由(1)式可得地表水平位移和垂直位移表达式

$$\left. \begin{aligned} R_u &= K \frac{H_{33}}{\hat{H}_{22}} \phi_{n+1}^- \\ R_w &= K \frac{H_{31}}{\hat{H}_{22}} \phi_{n+1}^- \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

式中H是Haskell矩阵，其二阶子式即Delte矩阵，记 \hat{H} ，并且：

$$\hat{H}_{22} = \begin{vmatrix} H_{11} & H_{13} \\ H_{31} & H_{33} \end{vmatrix} \tag{3}$$

2、综合地震图计算

对位错点源，地表位移径向分量和垂直分量的频率域表示式是^[2]

$$\left. \begin{aligned} U(\omega) &= \sum_{m=0}^2 \int_0^\infty \frac{B_{s, 2, m}}{a_s} R_u e^{-a_s z_s} J_m(K_r) e^{im\theta} K dk \\ W(\omega) &= \sum_{m=0}^2 \int_0^\infty \frac{B_{s, 2, m}}{a_s} R_w e^{-a_s z_s} J_m(K_r) e^{im\theta} k dk \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

(4)式简化后得到远场近似解表示式：

$$\left. \begin{aligned} U(\omega) &= R_u(\omega, r) \frac{M_0}{2\pi\rho_s} F(\omega) \cdot G(R) \sum_{i=0}^2 A_i(\lambda, \delta, \theta) \cdot P_i \\ W(\omega) &= R_w(\omega, r) \frac{M_0}{2\pi\rho_s} F(\omega) \cdot G(R) \sum_{i=0}^2 A_i(\lambda, \delta, \theta) \cdot P_i \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中 $A \cdot (\lambda, \delta, \theta) = \frac{1}{2} \sin 2\delta \sin \lambda$

$$A_1(\lambda, \delta, \theta) = \cos\delta\cos\lambda\cos\theta + \cos2\delta\sin\lambda\sin\theta$$

$$A_2(\lambda, \delta, \theta) = \frac{1}{2}\sin2\delta\sin\lambda\cos2\theta - \sin\delta\cos\lambda\sin2\theta$$

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

$$P_1 = \frac{\sin2r}{\alpha_s^2}$$

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

(6)

式中 λ, δ, θ 为位错点源几何参数, 且 $\theta = \theta_r - \theta_s$, θ_r 为台站方位角, θ_s 为断层走向方位

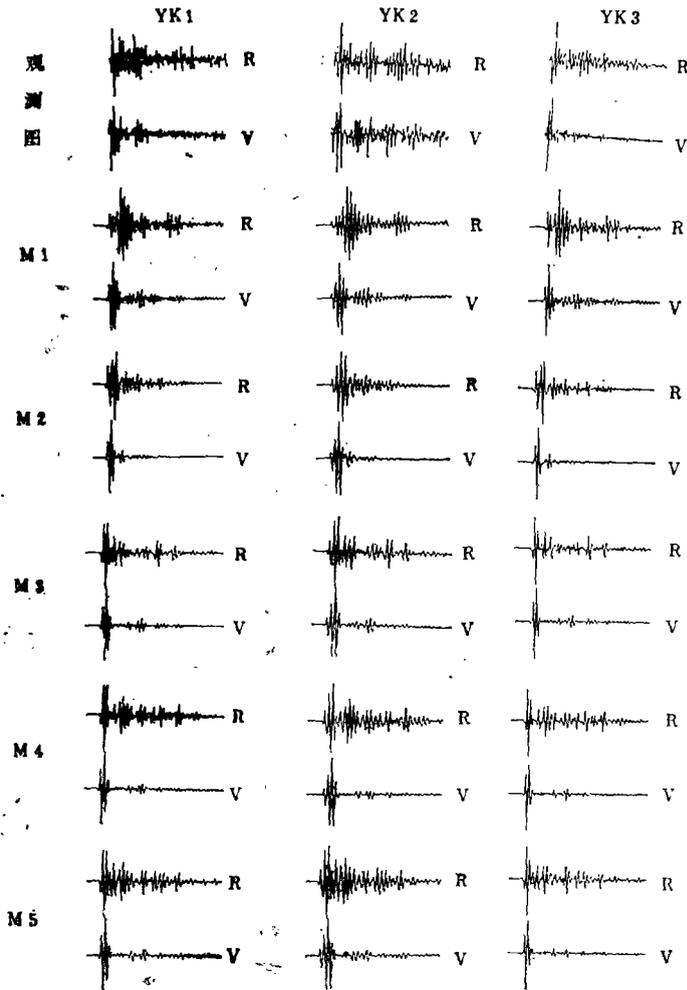


图2 营口地震台观测图与综合图的对比

角, r 为深源远震直达 P 波离源角, $B_{s,m}$ 为位错点源的震源系数, α_s 为第 s 层介质中 P 波垂直波数, $F(\omega)$ 是震源脉冲的谱, 对于 J—B 模型, 震中距为 Δ 时, P 波射线参数为:

$$P = 0.1 - 1.0906667 \Delta$$

$G(R)$ 为几何扩散因子, 括号内的 R 为震源矩, 实际有效的几何扩散因子 $G(R)$ 表达式:

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

因此, 采用上述 (4) ~ (6) 式可得综合地震图。

四、海城和唐山区域介质结构

我们首先用近些年人们在这两个区域用爆破等方法研究介质结构得到的结果为初始模型。依次设数十个模型逐步计算调整, 与观测图对比, 最终取符合较好的为“可接受模型”。另外, 还对“可接受模型”加以调试分析, 使结果更具“可接受”性。为节省篇幅, 主要以营口台为例。

图2是营口地震台观测图与综合地震图的比较结果。图中, 营口台记录了三个地震, 即三个地震观测图, 代码分别为 YK1、YK2 和 YK3 (见表2)。这些观测波形是为便于与理论计算得到的综合地震图比较, 先将记录波形离散化, 然后依坐标变换, 求得与台站柱坐标对应的各分量的波形, 并把水平向的南北、东西向合成为统一的径向。这里 R 为径向, V 为垂直向。 M_1 是近年一些研究者在海城地区工作结果模型数据 (见表3) 所计算的综合地震图波形。我们看到, 这组波形与观测波形对照差别较明显。因此, 再设模型 $M_2 \sim M_5$ 。显然, M_5 的波形与观测波形极为相似, 所以我们确定 M_5 为营口台之下介质“可接受模型”。为直观, 我们以速度为横轴, 深度为纵轴, 将所有模型数据画成模型结构示于图3。

表3 介质模型参数

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
M1	H	3.60	16.07	18.33	22.62	28.14	31.44	32.74	42.71			
	D	3.00	13.67	2.29	4.26	5.52	3.30	1.30	10.60			
	Vp	4.00	6.48	3.66	5.30	2.29	6.38	6.57	7.80			
	Vs	2.50	3.74	3.50	3.06	4.21	3.68	3.79	4.50			
		1.77	2.71	2.55	2.26	3.01	2.67	2.74	3.21			
M2	H	2.00	9.25	23.36	25.66	30.79	32.21	42.21				
	D	2.00	7.25	14.11	2.30	5.13	1.42	10.00				
	Vp	4.00	5.48	6.86	6.75	6.33	6.88	7.80				
	Vs	2.31	3.16	3.95	3.90	3.65	3.97	4.50				
		1.77	2.33	2.85	2.81	2.65	2.86	3.21				
M3	H	3.50	9.50	14.50	20.00	28.50	33.50	43.50	58.50	78.50	93.50	123.50
	D	3.50	6.00	5.00	5.50	8.50	5.00	10.00	15.00	20.00	15.00	30.00
	Vp	4.98	5.66	6.10	5.95	6.95	6.30	7.85	7.95	7.70	8.00	8.20
	Vs	2.88	3.27	3.52	3.44	4.01	3.04	4.53	4.59	4.45	4.62	4.37
		2.14	2.49	2.56	2.51	2.88	2.64	3.23	3.26	3.17	3.28	3.36

续表3

M4	H	4.00	11.90	16.00	21.50	30.00	35.00	45.00	60.00	80.00	95.00	125.00
	D	4.00	7.00	5.00	5.50	8.50	5.00	10.00	15.00	20.00	15.00	30.00
	V _p	4.98	5.40	6.00	5.75	6.85	6.30	7.85	7.95	7.65	8.00	8.20
	V _s	2.88	3.12	3.46	3.32	3.95	3.64	4.53	4.59	4.42	4.62	4.73
		2.14	2.30	2.52	2.43	2.85	2.64	3.23	3.26	3.15	3.28	3.33
M5	H	3.50	11.00	15.60	22.00	29.60	34.60	44.60	59.60	79.60	91.60	121.60
	D	3.50	7.50	4.60	6.50	7.50	5.00	10.00	15.00	20.00	15.00	30.00
	V _p	4.88	5.50	6.00	5.75	6.85	6.45	7.85	7.95	7.55	8.00	8.20
	V _s	2.82	3.18	3.46	3.32	3.95	3.72	4.63	4.59	4.36	4.62	4.73
		2.10	2.34	2.52	2.43	2.85	2.70	3.23	3.26	3.11	3.28	3.33
M6	H	3.80	11.30	15.30	19.30	27.80	31.80	41.80	56.80	76.80	91.80	121.80
	D	3.80	7.50	4.00	4.00	8.50	4.00	10.00	15.00	20.00	15.00	30.00
	V _p	5.00	5.70	6.10	5.85	6.95	6.30	7.85	7.95	7.55	8.00	8.20
	V _s	2.89	3.29	3.52	3.38	4.01	3.64	4.53	4.59	4.36	4.62	4.73
		2.15	2.41	2.56	2.47	2.88	2.64	3.23	3.26	3.11	3.28	3.33
M7	H	3.00	9.00	16.00	21.50	30.00	35.00	45.00	60.00	80.00	95.00	125.00
	D	3.00	6.00	7.00	5.50	8.50	5.00	10.00	15.00	20.00	15.00	30.00
	V _p	4.93	5.56	6.30	5.65	6.95	6.30	7.85	7.95	7.70	8.00	8.20
	V _s	2.88	3.21	3.64	3.26	4.01	3.64	4.53	4.53	4.45	4.62	4.73
		2.14	2.36	2.64	2.39	2.88	2.64	3.22	3.26	3.17	3.28	3.36
M8	H	3.20	9.20	16.20	20.20	27.20	32.20	40.20	55.20	75.20	90.20	120.20
	D	3.20	6.00	7.00	7.00	7.00	5.00	8.00	15.00	20.00	15.00	30.00
	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	4.63
		2.11	2.34	2.68	2.37	2.90	2.56	3.21	3.26	3.15	3.23	3.32
M9	H	3.50	11.00	16.00	20.00	27.50	33.50	42.50	54.50	72.50	87.50	117.50
	D	3.50	7.50	5.00	4.00	7.50	6.00	9.00	12.00	18.00	15.00	30.00
	V _p	5.20	5.95	6.30	6.00	6.95	6.35	7.86	7.98	7.60	7.80	8.10
	V _s	3.00	3.44	3.64	3.46	4.01	3.67	4.54	4.61	4.39	4.50	4.68
		2.22	2.51	2.64	2.52	2.75	2.66	3.23	3.27	3.13	3.20	3.32
M10	H	3.00	18.00	23.00	28.00	33.00	38.00	58.00	78.00	93.00		
	D	3.00	15.00	5.00	5.00	5.00	5.00	20.00	20.00	15.00		
	V _p	4.52	6.42	6.83	6.75	7.06	7.40	7.98	8.25	7.60		
	V _s	2.61	3.71	3.94	3.90	4.08	4.27	4.61	4.76	4.39		
		1.96	2.68	2.85	2.81	2.93	3.06	3.27	3.38	3.13		
M11	H	3.00	18.00	23.00	28.00	33.00	38.00	53.00	68.00	78.00	88.00	
	D	3.00	15.00	5.00	5.00	5.00	5.00	15.00	15.00	10.00	10.00	
	V _p	4.52	5.88	6.83	5.80	7.06	7.40	7.93	8.25	7.60	7.40	
	V _s	2.61	3.39	3.94	3.35	4.03	4.27	4.61	4.76	4.39	4.27	
		1.96	2.48	2.81	2.45	2.93	3.06	3.27	3.38	3.13	3.03	

续表3

M12 H	3.00	18.00	23.00	28.00	34.00	40.00	60.00	81.00	95.00	110.00
D	3.00	15.00	5.00	5.00	6.50	6.00	21.00	21.00	15.00	15.00
Vp	4.52	5.68	6.30	5.50	7.00	7.40	7.98	8.25	7.60	7.40
Vs	2.61	3.28	3.64	3.18	4.03	4.57	4.61	4.76	4.39	4.27
	1.96	2.40	2.64	2.31	2.93	3.06	3.27	3.38	3.13	3.06
M13 H	3.00	18.00	23.00	28.00	33.00	38.00	53.00	68.00	78.00	88.00
D	3.00	15.00	5.00	5.00	5.00	5.00	15.00	15.00	10.00	10.00
Vp	4.52	6.42	6.83	6.75	7.66	7.40	7.98	8.25	7.60	7.10
Vs	2.61	3.71	3.94	3.90	4.03	4.27	4.61	4.76	4.39	4.27
	1.96	2.68	2.81	2.81	2.93	3.06	3.27	3.38	3.13	3.06
M14 H	3.50	11.00	15.60	22.10	29.60	44.60	59.60	79.60	94.60	121.60
D	3.50	7.50	4.00	6.50	7.50	15.00	15.00	20.00	15.00	30.00
Vp	4.88	5.50	6.00	5.75	6.85	7.38	7.95	7.55	8.00	8.20
Vs	2.82	3.18	3.45	3.32	3.95	4.26	4.59	4.36	4.62	4.73
	2.10	2.34	2.52	2.43	2.85	3.05	3.23	3.11	3.23	3.33
M15 H	11.00	15.60	22.10	29.60	31.60	44.60	59.60	79.60	91.60	121.60
D	11.00	4.60	6.50	7.50	5.00	10.00	15.00	20.00	15.00	30.00
Vp	5.30	6.00	5.75	6.85	6.45	7.85	7.95	7.55	8.00	8.20
Vs	3.06	3.46	3.32	3.95	3.72	4.38	4.59	4.33	4.62	4.73
	2.26	2.52	2.43	2.85	2.70	3.23	3.26	3.11	3.23	3.35
M16 H	22.10	34.60	59.60	79.60	12.60					
D	22.10	12.50	25.00	20.00	5.00					
Vp	5.58	6.59	7.91	7.55	8.13					
Vs	3.22	3.86	4.57	4.33	4.69					
	2.37	2.79	3.25	3.11	3.33					
M17 H	15.60	34.60	79.60	124.60						
D	15.60	19.00	45.00	45.00						
Vp	5.51	6.37	7.75	6.13						
Vs	3.18	3.68	4.47	4.69						
	2.34	2.66	3.19	3.33						

同理，也得到了沈阳、丹东、大连、阜新、陡河、迁西和宽城台等地下介质结构的“可接受模型”。波形对比示于图4的 $M_6 \sim M_{12}$ 。我们看到，这些可接受模型是高低速层相间的结构。

那么，增大层内速度或减少层数或平滑等对模型计算结果会有什么影响呢？图5是以营口台为例，改变模型参数实验结果与观测图比较情况（相应模型见图3中 $M_{14} \sim M_{17}$ ）。由表可见，这些波形与观测波形都出现不同程度的差异。因此，改变后的模型计算得到的图形与观测波形比较结果远不如营口台“可接受模型” M_5 为佳。我们认为，上述所计算得到的“可接受模型”是比较可靠、可信的结果。

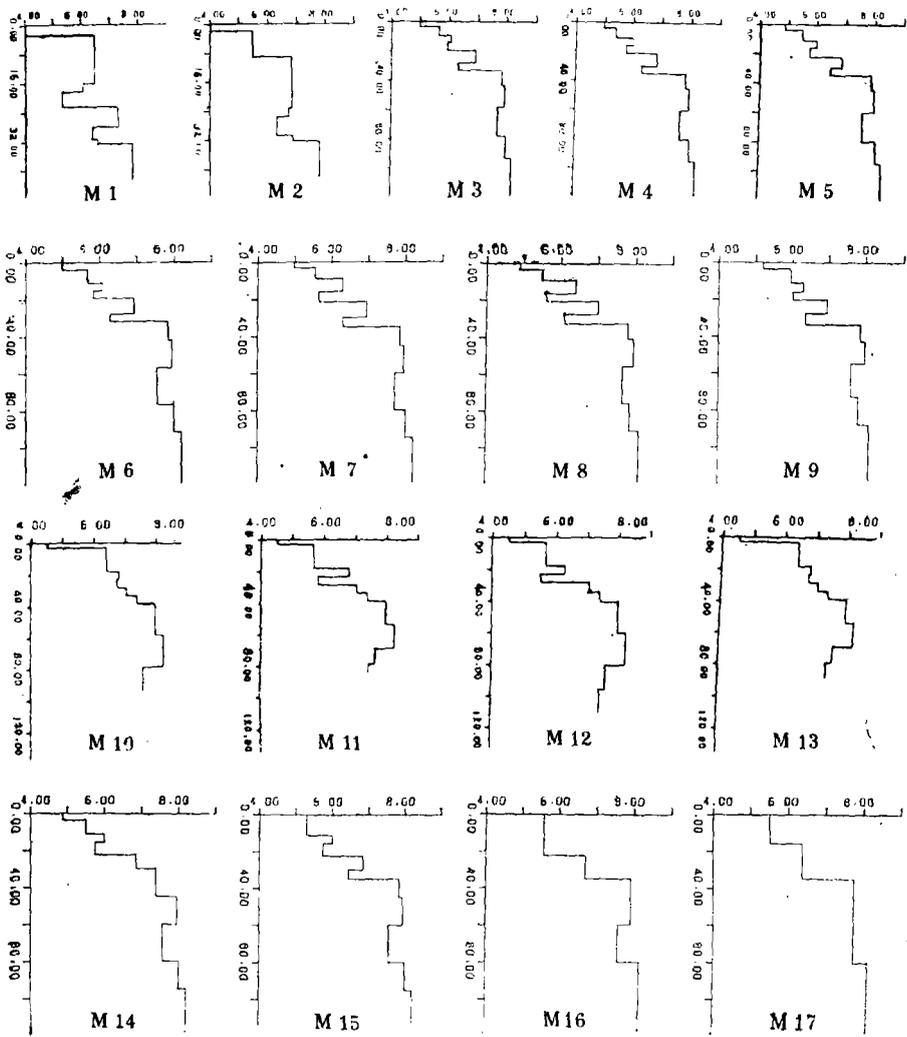


图3 介质结构模型图

注：图中横坐标为介质速度 (km/s)；纵坐标为深度 (km)

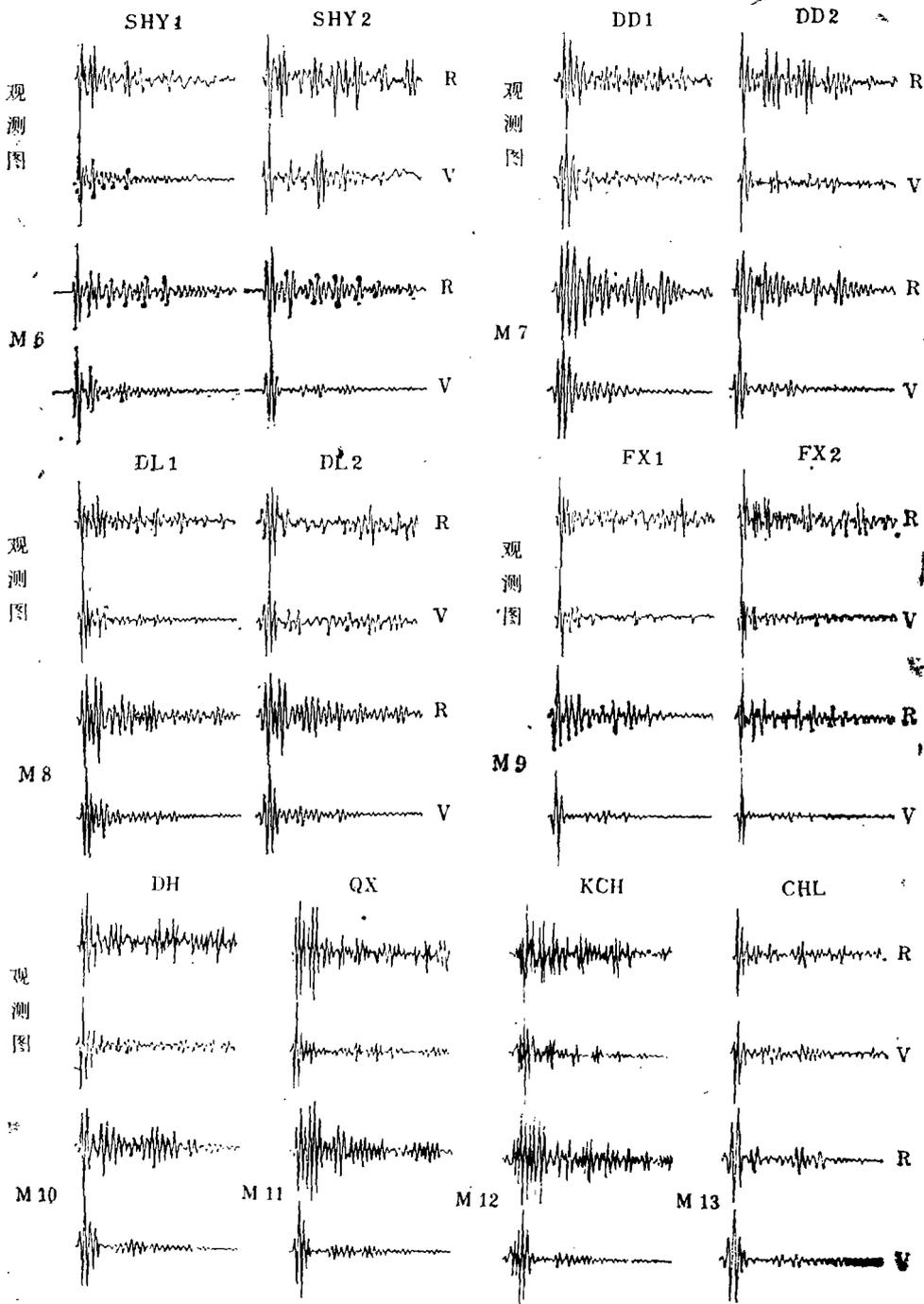


图4 沈阳、丹东、大连、阜新、陡河、迁西、宽城、
昌黎台观测波形与综合地震图的比较

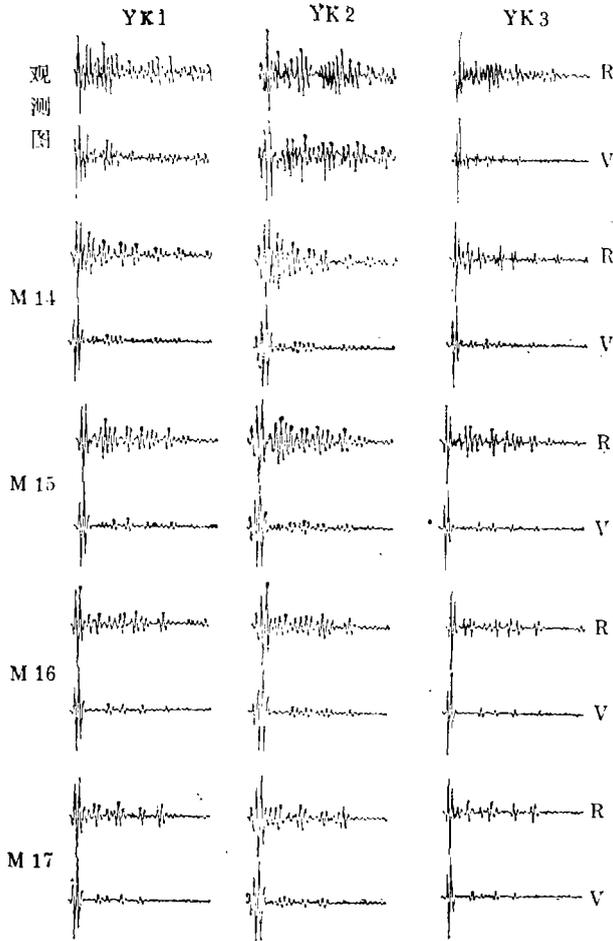


图5 改变模型参数实验

五、海城和唐山大震成因探讨

我们把前面得到的海城和唐山区域介质结构模型，按图1中各测线组成剖面图（图6）。图中空心圆为大震震源位置。从图中我们可得到三点启示。

1、海城和唐山震区深部介质均为高、低速成层相间结构，深部介质亦有不同程度的起伏变形。这种深部介质层具有起伏形变，可能是高应力易于集聚区域，造成发生大震的背景条件，从而导致大震发生。

2、海城地震震源位于12公里深处，震源附近地壳以上介质层就有明显起伏变形。这表明该部位介质可能较破碎，易于释放能量。因此，这可能是7.3级主震前有小震及前兆震群发生的原因之一。而唐山地震，震源（深度11km）位于厚度较大（7.5km）的第二层内，这与海城地震环境有所不同。

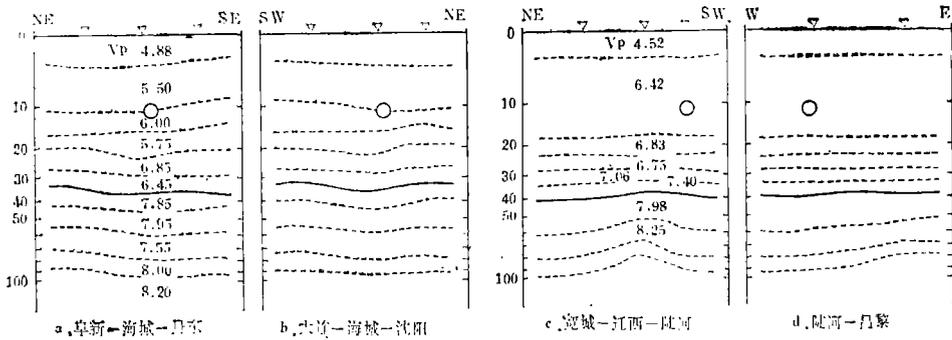


图6 大震区深部介质结构剖面示意图

3、海城地震震源所处位置，附近介质P波速度较低（5.50~6.00 km/s），而唐山地震震源位于6.42 km/s介质处，速度较高，这意味着，前者介质刚性弱于后者，可能是海城地震有前震而唐山地震前震不明显的又一原因。

另外，从地质构造考虑，唐山地震处菱形断裂构造之间，而海城地震位于断裂纵横交错之点。这些可能又是后者有前震的一个因素。

工作中，作者曾与杨理华、王泽皋等付研究员进行过有益的讨论。在此一并致谢！

（1988年1月13日收到初稿）

参 考 文 献

- [1] 李幼铭等，层状介质中地震P—SV波广义透射系数计算，地球物理学报，26，增刊，1983。
 [2] 朱培定，李幼铭，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，28，1，985。

THE DEEP STRUCTURES AND THE TYPES OF THE EARTHQUAKES OCCURRED IN HAICHENG AND TANGSHAN AREA

Yao Dianyì Yu Limin Li Qinzu
 (Seismological Bureau of Hebei Province)
 Shu Peiyi Li Youming
 (Institute of Geophysics, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, the deep structures beneath Haicheng and Tangshan area have been obtained by the way of fitting synthetic seismograms with P waveforms of the deep focus teleseismic records. From these results, the types of the earthquakes occurred have been discussed for two area. We have proposed that there are the accidented deep layer structure in two earthquake area. These may be why the different earthquakes in Haicheng and Tangshan area have occurred,