

岩石圈下部的速度结构

曾融生 胡鸿翔 高世玉

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

我们分析了中国华北平原以及沙特阿拉伯深地震测深的记录,发现 P_n 可以连续追踪到 500 公里以上,中间并无间断现象,而且在接收距离 350—500 公里之间, P_n 后面有一到两个很强的续至震相,它们的速度与 P_n 相似,而能量比 P_n 更强。经与沉积层中薄层的野外实验结果以及室内超声波模型实验的结果相比较,我们得到这样的结论: 岩石圈下部存在一至数个高速薄层,其厚度不超过一公里。地幔顶部物质的正常速度可能比薄层略低。岩石圈中薄层的存在对于岩石圈的演化过程具有重要的意义。

自地壳底面到软流圈顶面之间的介质称为岩石圈下部。有关岩石圈下部的速度结构,过去主要是根据初至波 P_n 震相的走时得来的。通常认为, P_n 是地壳底面的首波。由于随接收距离的增大, P_n 走时的视速度变化很小,因此过去认为整个岩石圈下部的速度可能是均匀的。但是,如果岩石圈下部的介质存在微小的速度梯度,它所产生的迴折波,其走时与地壳底面的首波相似,很难分辨。

根据北京台网所得的天然地震走时如图 1 所示。走时曲线 A、C、D 分别表示不同方位所得的结果。接收距离 Δ 在 160—500 公里之间,初至波 P_n 的视速度变化很小,平均视速度值为 7.84 公里/秒^[1]。 Δ 约为 500 公里时,初至波的能量突然衰减,而且到时移后,说明它受到低速层的影响。 $\Delta > 800$ 公里后,初至波的视速度明显增大。它们是自低速层以下的介质迴折到地面上的 P 波,如图 2 所示。

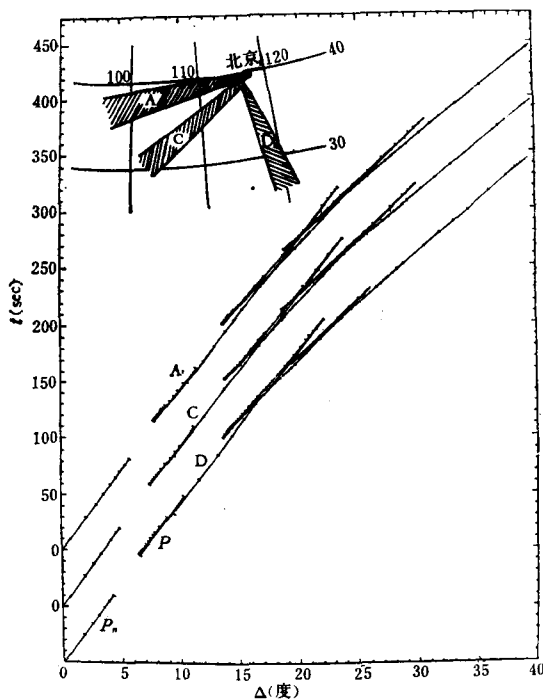


图 1 北京台网所得的走时

由天然地震数据反演上地幔的速度分布,其结果如图 3 和表 1 所示。在深度为

60—130 公里之间,有速度逆转现象. 岩石圈下部只有 25 公里厚,纵波速度随深度的变化很小,其梯度不会超过 0.004 公里/秒.

根据地面爆破所得北京地区的 P_n 速度平均为 8.0 公里/秒,它比天然地震所得的 P_n

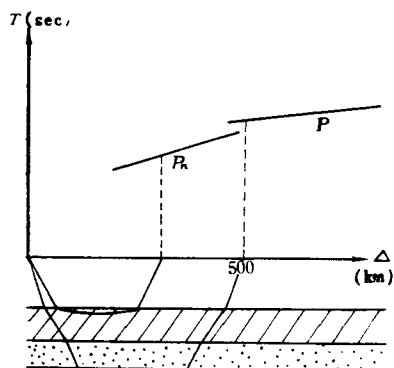


图 2 P_n 和 P 射线的途径
(--- 低速层 ZZZ 莫霍界面)

速度 7.8 公里/秒略高. 这种差别虽然不大,但是似乎不能归因于天然地震数据的准确度较差所引起的.

欧洲地区也有类似现象^[2]. 爆破所得的 P_n 速度为 8.1 公里/秒,它比天然地震所得的 P_n 速度 7.9 公里/秒稍高.

近几年来,不少地区进行了深地震测深工作,有些剖面的长度可达 500 公里以上,由此可以得到更详细的岩石圈下部结构.

图 4 和图 5 分别为法国和英国的 P_n 和 P_1 走时^[3,4],图 6 为原作者所得的岩石圈下部速度结构.

在英国所得的走时中, Δ 为 300 公里处, P_n 突然终止,而且初至波走时移后,说明在莫霍

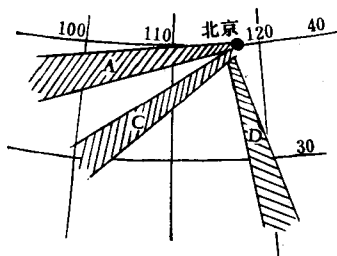
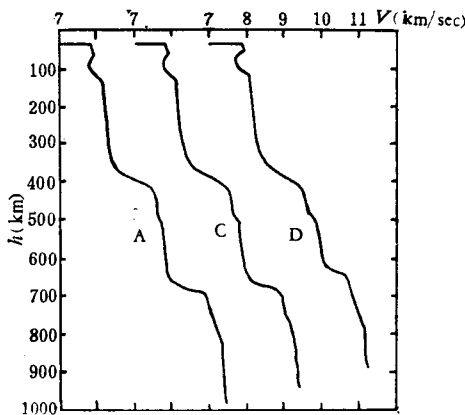


图 3 华北平原的上地幔结构



界面以下应有低速层存在. 相似的情况在 Δ 为 500 公里和 600 公里处又相继出现,因此莫霍界面以下可能存在多个低速层.

在德国南部^[5] 莱茵河地堑外围地区, P_n 和 P_1 的速度很高,分别为 8.4 公里/秒和 8.5 公里/秒(见图 7). 莱茵河地堑处的 P_n 和 P_1 的速度更高,竟达 8.8 公里/秒(见图 8).

值得提出,由于低速层的参数不确定,原作者所得的速度结构并非单值的解答.

根据上述的结果,在岩石圈下部,不仅垂向的速度梯度很大,而且邻近地区的速度横向变化也十分剧烈. 为了解释这种现象, K. Fuchs 曾经提出,岩石圈下部的物质必须具有很大的各向异性^[6].

本文我们给出中国华北以及沙特阿拉伯两个地区的 P_n 和 P_1 走时曲线. 1978 年美国地质调查所与沙特阿拉伯石油矿产资源部合作,在沙特阿拉伯进行了深地震测深^[7],最大剖面长度约为 500 公里. 1980 年在美国犹他州公园城开会时,许多学者对此剖面资料进

表 1

A		B		C	
深度(公里)	速度(公里/秒)	深度(公里)	速度(公里/秒)	深度(公里)	速度(公里/秒)
35	7.84	35	7.84	35	7.84
66	7.94	60	7.93	56	7.92
95	7.79	85	7.78	85	7.67
134	8.15	100	7.84	100	7.81
176	8.2	130	8.14	120	8.08
205	8.21	175	8.16	150	8.1
233	8.24	208	8.18	181	8.12
260	8.27	251	8.22	209	8.15
300	8.32	290	8.26	237.2	8.17
340	8.41	320	8.34	263.4	8.2
376	8.58	340	8.4	296.4	8.26
390	8.88	357	8.49	320.4	8.33
400	9.09	370	8.65	344.0	8.45
420	9.44	380	8.83	360	8.6
430	9.53	400	9.16	380	8.9
460	9.59	420	9.47	392	9.11
495	9.64	430	9.52	400	9.25
500	9.7	450	9.55	420	9.5
517	9.76	490	9.62	430	9.55
548	9.8	495	9.69	450	9.58
580	9.83	530	9.78	480	9.67
620	9.89	580	9.84	490	9.78
660	10.01	610	9.89	516	9.85
670	10.1	640	9.96	541	9.91
680	10.58	660	10.1	579	10.0
690	10.86	670	10.58	614	10.11
700	10.92	680	10.83	630	10.4
730	11.02	710	10.96	640	10.6
760	11.1	750	11.07	660	10.71
800	11.22	800	11.21	690	10.81
850	11.31	850	11.31	727	10.92
900	11.34	900	11.34	760	11.06
950	11.38	930	11.38	780	11.13
1000	11.46			800	11.15
				820	11.17
				840	11.18
				860	11.19
				890	11.23

行了解释,但是很少有人注意到岩石圈下部的构造。1981年在中国华北平原进行了深地震测深,最大剖面长度也达450公里。图9和图10分别表示华北平原和沙特阿拉伯的记录剖面和走时图。这两个地区相距甚远,而且它们之间的地质构造毫无联系,但是它们的 P_n 和 P_t 性质却十分相似。它们的记录和走时的共同特点是:

- (1) 初至 P_n 可以连续追踪到 Δ 为450公里以上,没有发现 P_n 有移后现象;

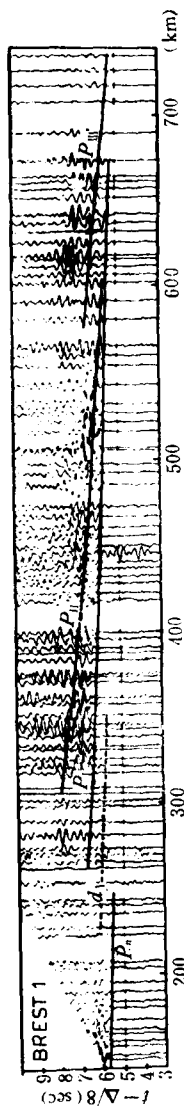


图 4 法国的记录剖面 and 走时图

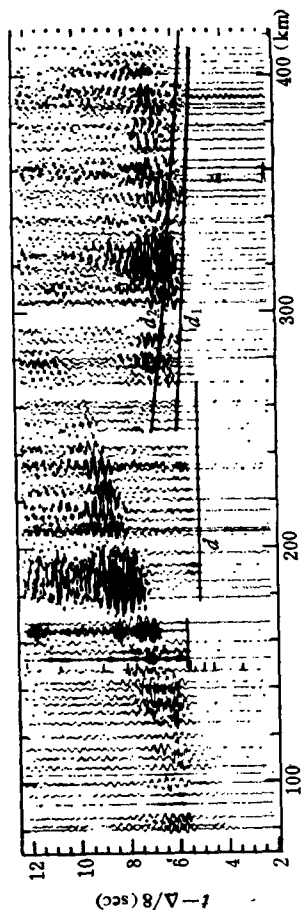


图 5 英国的记录剖面 and 走时图

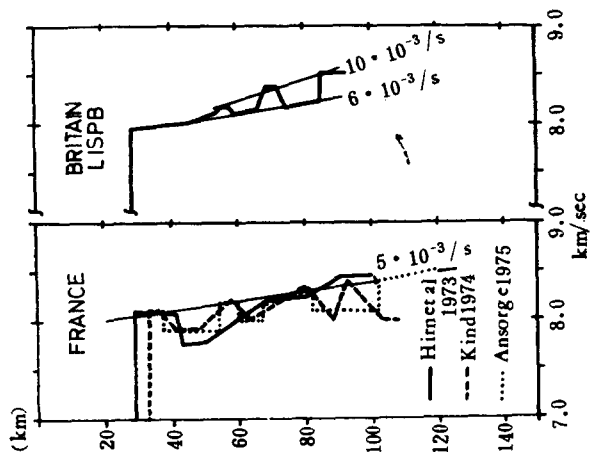


图 6 法国和英国的岩石圈速度分布

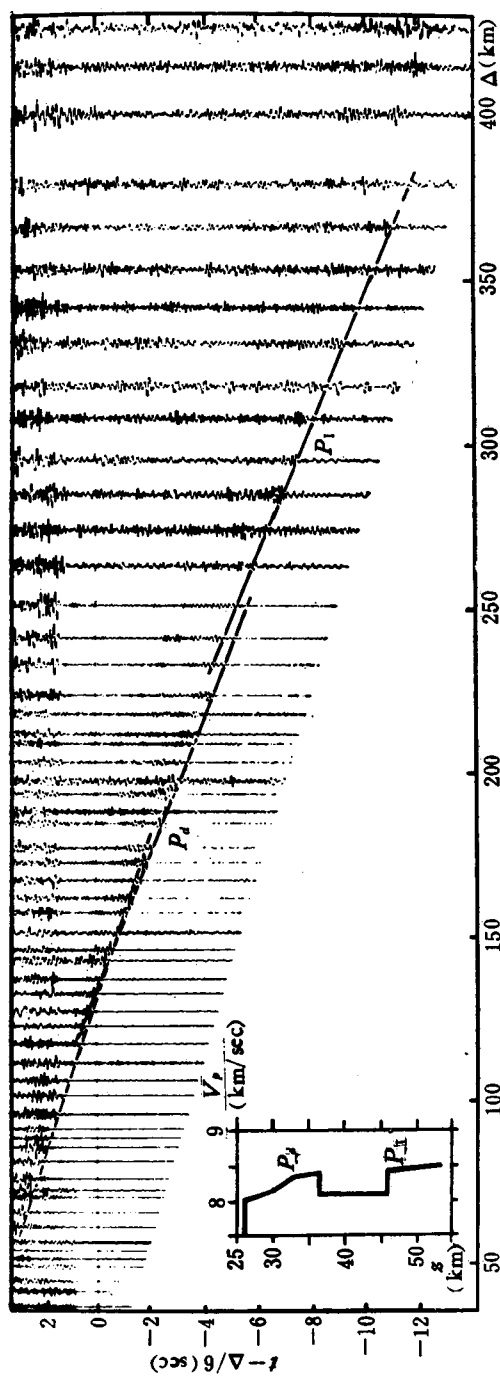


图 7 莱茵河外围地区的记录剖面 and 走时图

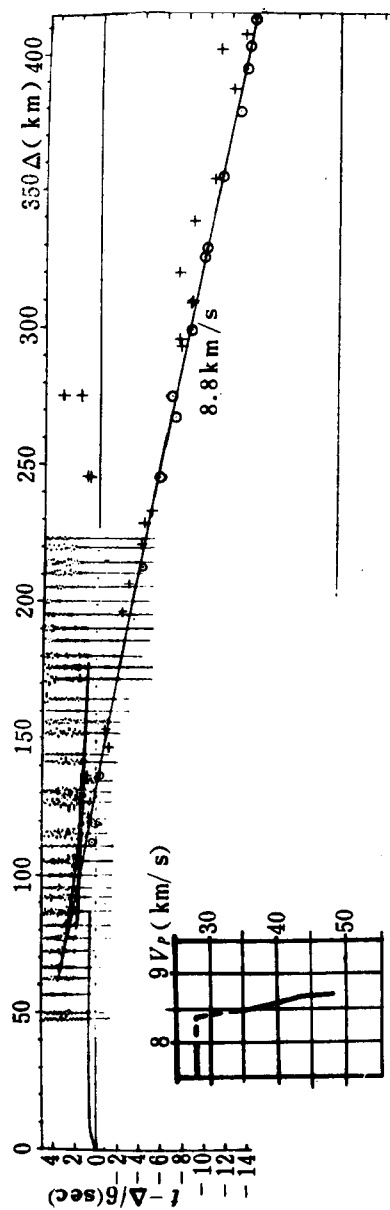


图 8 莱茵河地堑的记录剖面 and 走时图

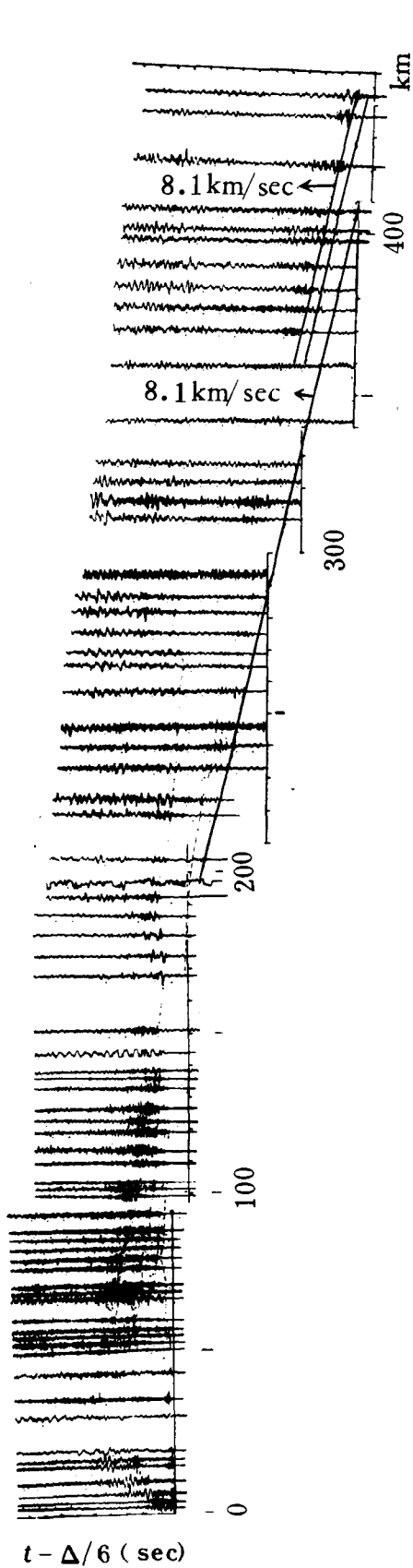


图9 华北平原的记录剖面 and 走时图

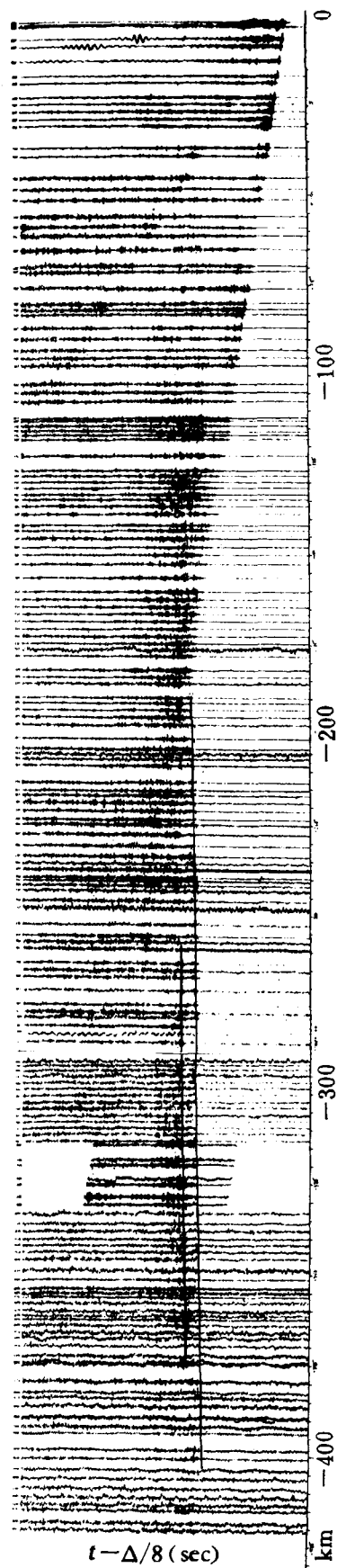


图10 沙特阿拉伯的记录剖面 and 走时图

(2) 在 $\Delta > 350$ 公里时, P_n 之后有一至两个续至震相 P_I 、 P_{II} , 其视速度与初至波 P_n 相似, 而振幅较 P_n 更大。

按照通常厚层的地震波理论, 在下垫介质的地震波速度和上面地层的速度相似时, 其首波能量应当很弱, 因此不能产生像 P_I 、 P_{II} 这样的强震相。但是在有薄层存在时, 情况就不相同, 它可以产生像 P_I 这样的强震相。

关于地震波穿透薄层的理论问题, 已有一些作者讨论过^[8], 但是薄层所产生的首波理论问题, 尚没有看到完满的解答^[9]。虽然如此, 在用地震方法勘探很浅的沉积层构造时, 常有这样的经验, 一组厚度小于相应波长的高速薄层, 可以产生相当强的首波^[10]。这些薄层首波的性质与本文所讨论的 P_I 、 P_{II} 很相似。苏联地震学者曾经在野外对沉积层中的薄层进行就地的试验, 得到一些很有说服力的结果^[11]。

图 11 为一些沉积层中薄层所产生的首波。其上图中的 t_a 、中图中的 t_n 以及下图中的 t_d 均为薄层首波。

薄层首波的强度决定于: 高速薄层与其周围介质速度的比值 V_1/V_2 , 薄层厚度与相应波长的比值 h/λ 。

图 12 为在苏联波罗的海邻近地区的一个浅层的垂向速度剖面 and 地震记录。地层中含有一组高速薄层。 t_1 、 $t'_1 \cdots$ 为地表附近石灰岩中的高速薄层; t_5 为基岩面; $t_2 \cdots t_4$ 为石灰岩与基岩面之间的含沙泥岩中的高速薄层。在石灰岩不太厚的情况下, 相应于 $t_2 \cdots t_4$ 等薄层的首波可以在记录中明显看到。

在厚层的情况下, 由于上覆介质中有更高速度的地层存在, $t_2 \cdots t_4$ 的首波将会受到屏蔽; 但是在薄层的情况下, 只要 h/λ 很小, 屏蔽作用将失去效力。被屏蔽薄层的首波, 其强度不仅决定于被屏蔽薄层本身的参数, 而且与覆盖层中更高速度的屏蔽薄层数目和参数有关。如果覆盖层中的屏蔽薄层与其周围介质的速度差别不大, 被屏蔽层的首波可以很强, 如图 13 所示。其中 t_1 为覆盖层中屏蔽层的首波, t_{II} 为被屏蔽薄层的首波。

综上所述, 可以看到, 中国华北平原和沙特阿拉伯深地震测深所得的 P_n 、 $P_I \cdots$ 等震相的走时和振幅与沉积层中存在一组高速薄层所产生的首波情况十分相似。如果 P_n 、 P_I 为岩石圈下部薄层的首波, 其速度均为 8.1 公里/秒, 并假定薄层周围介质的正常速度为

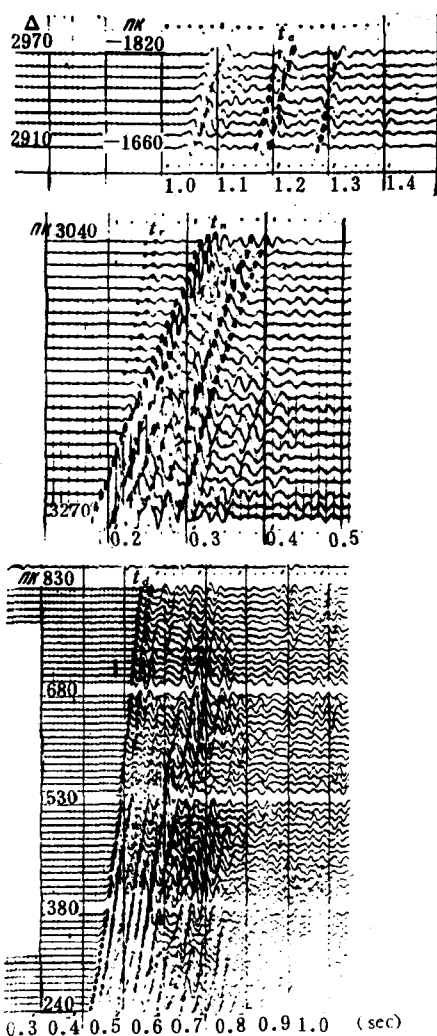


图 11 高速薄层首波的记录

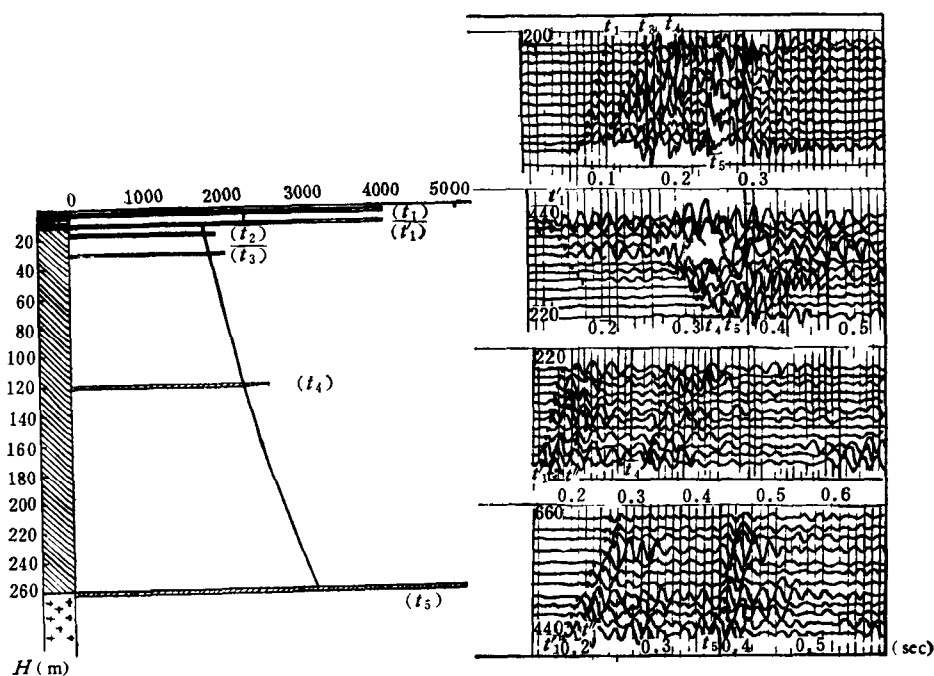


图 12 一组高速薄层的首波记录

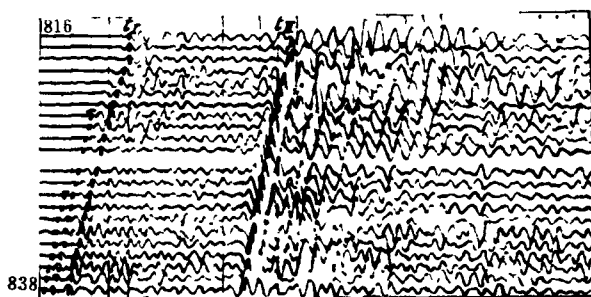


图 13 被屏蔽薄层的首波记录

7.8 公里/秒，则华北平原和沙特阿拉伯岩石圈下部速度结构的示意图如图 14a 所示。同样，欧洲的 P_n 、 P_1 ...等震相也可以用薄层来解释，其速度结构示意图如图 14b 所示。不同地区所得 P_n 、 P_1 的不同走时以及不同速度可能只表示岩石圈下部高速薄层参数的差异，而不同地区的岩石圈下部，其正常介质的速度差别也许并不大。

我们正在实验室中进行超声波二维模型试验，观察薄层的现象。初步的结果表明，岩石圈下部存在高速薄层可以很好地解释记录中的 P_n 、 P_1 ...波组的现象。

K. Fuchs 曾经注意到，在地震记录中出现过由上地幔薄层 ($h/\lambda < 1/4$) 所产生的横球面波^[12]，但是他并没有用薄层来解释深地震测深记录中的 P_n 、 P_1 、 P_{II} 等震相。

岩石圈下部可能存在高速薄层的概念也由于我们在华北平原唐山地区发现地壳上部存在高速薄层的现象而受到启发。图 15 表示唐山地区深地震测深所得的剖面记录和地壳构造。 P_1 、 P_2 震相为浅层的首波，它们的视速度分别为 6.5 公里/秒和 6.6 公里/秒；界

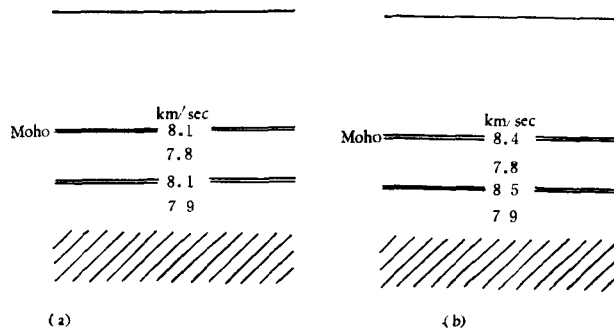


图 14 岩石圈下部速度构造示意图

(a) 中国华北平原和沙特阿拉伯 (b) 欧洲

面的深度为 3—10 公里左右。 P_4 包含莫霍界面的反射波以及在莫霍界面上方速度梯度层的迴折波。 P_3 包含地壳内另一界面的反射波以及在它上方速度梯度层的迴折波。自 P_3 迴折波反演所得的结果，在深度 16 公里处，介质的速度为 6.0—6.1 公里/秒。显而易见，根据厚层的射线理论，不能解释这种现象， P_1 、 P_2 只能是地壳上部薄层的首波。

不仅大陆的岩石圈下部可能存在高速薄层，有迹象表明，海洋的岩石圈下部同样可能存在高速薄层。

夏威夷水声台阵曾经观测到，在北太平洋地区，高频的(12—15 赫兹) P_n 和 S_n 可以在距离震中 3000 公里以外的地方接收到^[14]。类似的现象也在中太平洋和南太平洋中存在^[15]。 P_n 和 S_n 初始震相的视速度分别为 7.8—8.3 公里/秒和 4.8 公里/秒，而 P_n 和 S_n 波组中最强震相的视速度分别为 7.6 公里/秒和 4.5 公里/秒。

关于海洋中高频 P_n 和 S_n 震相的性质，可有不同的解释。有些人认为，它是成层介质的高谐面波^[16—19]。但是 P_n 和 S_n 的传播如此有效，似乎不能不假定在地幔顶部存在一个

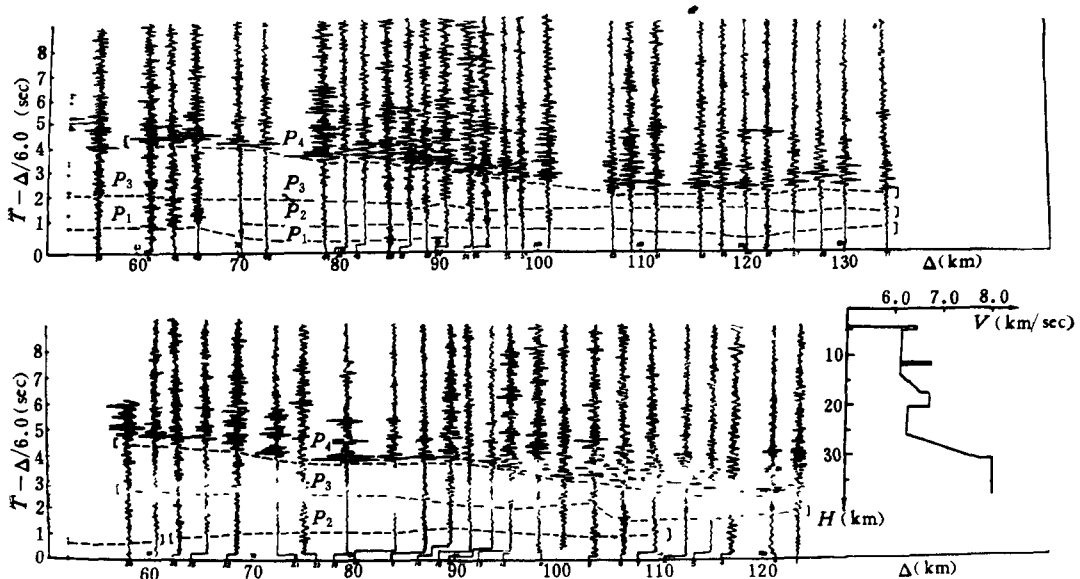


图 15 唐山的剖面记录图和地壳构造

很好的波导,而且这个波导的性质随不同方位的变化很大,因此用简谐模 (Normal mode) 来解释颇为困难. 由于 P_n 和 S_n 的频率高,岩石圈下部的波导不会很厚,因此海洋岩石圈下部存在高速薄层可能是解释海洋高频 P_n 和 S_n 的最好机制.

岩石圈的上部和下部存在高速薄层的现象,对于岩石圈的演化有重要意义. 不同地区所观测到地壳内的速度梯度数值,通常比正常温度压力所产生的速度梯度大得多. 一种比较合理的解释是,地壳中速度梯度层的产生是由于下部物质逐渐向上部迁移,因此矿物的成份随深度而异. 我们可以设想,由于另一种迁移的机制,某一深度的物质可以在某一地质时期,通过某些地质通道,向上移迁到浅得多的地方,因此出现高速薄层的现象.

参 考 文 献

- [1] 赵珠,华北地区上地幔速度结构,地球物理学报, Vol.26, No. 4, 341—354, 1983.
- [2] Jeffreys, H., Revision of travel times, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, Vol. 11, 5—12, 1966.
- [3] Hirn, A. et al., Long range profiles in western Europe: II Fine structure of the lower lithosphere in France (Southern Bestagne), *J. Geophys.*, Vol. 39, 363—384, 1973.
- [4] Faber, Sonja and David Bamford, Lithospheric structure contrasts across the Caledonides of Northern Britain, *Tectonophysics*, Vol. 56(1/2), 17—30, 1979.
- [5] Ansorge, J. et al., Structure of the uppermost mantle from long range seismic observations in southern Germany and the Rhinegraben area, *Tectonophysics*, Vol. 56, 31—48, 1979.
- [6] Fuchs, K., Structure, physical properties and lateral heterogeneities of the subcrustal lithosphere from long range deep seismic sounding observations on continent, *Tectonophysics*, Vol. 56, 1—15, 1979.
- [7] Blank, H. R. et al., Seismic Refraction Profile, Kingdom of Saudi Arabia, USGS Project 254, 1979.
- [8] Brekovskikh, L., *Waves in Layered Media*, P. 275, 297, Academic Press, New York, 1980.
- [9] Cerveny, V. and Ravi Ravindra, *Theory of Seismic Head Waves*, University of Toronto Press, Britain, 1971.
- [10] Берзон, И. С. и Другие, Динамические Характеристики Сейсмические Волн в Реальных Средах, Москва, 1962.
- [11] Берзон И. С., Сейсморазведка Тонкослоистых Сред, Москва, 1976.
- [12] Fuchs, K. and K. Schulz, Tunnelling of low-frequency waves through the subcrustal lithosphere, *J. Geophys.*, Vol. 42, 175—190, 1976.
- [13] 曾融生等,唐山地壳构造及大陆地震成因的探讨(待发表), 1983.
- [14] Walker, D. A., Spectral analysis of high frequency P_n and S_n phases observed at great distances in the southern Pacific, *Science*, Vol. 199(4335), 1333, 1978.
- [15] Talandier, J. and M. Bouchon, Propagation of high frequency P_n waves at great distances in the Central and South Pacific and its implication for the structure of the lower lithosphere, *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, (B10), 5613—5619, 1979.
- [16] Nakanishi, K. K. et al., Interpretation of S_n on a continental structure, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, Vol. 47, 211—223, 1976.
- [17] Stephens, C. and B. L. Isacks, Toward an understanding of S_n : Normal modes of Love waves in an oceanic structure *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 67, 69—78, 1977.
- [18] Montovani, E. et al., Teleseismic S_n : a guided wave in the mantle, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, Vol. 51, 709—726, 1977.
- [19] Kansel, E. G. et al., Oceanic S_n , *Geophys. J. R. astr. Soc.*, Vol. 50, 407—439, 1977.

