

我国东南地区 π_g 波的频散特征

谭爱娜 杨导声 刘 畅 王晓东

付建武 余亚华

(浙江省地震局)

摘 要

本文利用1987年8月在江西省寻乌发生的三次5.0级以上地震的记录资料,讨论了我国东南地区 π_g 波的传播特征。结果表明: π_g 波的初至波速为6.00km/s,与Press的结果相近; π_g 波有明显的频散特征,其卓越周期为0.6—0.8秒,较多表现为正常频散,同时也有少量表现为反常频散;由 π_g 波的波数及波峰的水平合成矢量得到的振幅辐射图象,基本上与弱非均匀介质辐射图象相近; π_g 波各波数水平到时与垂直到时存在明显的到时差。

一、引 言

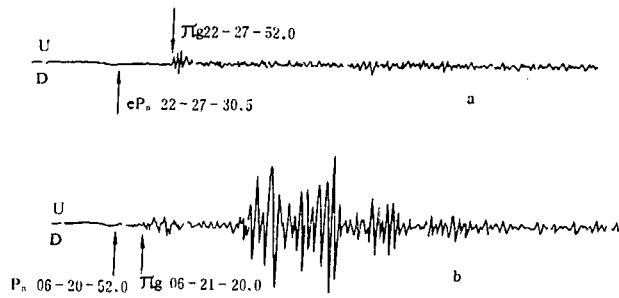
对纵导波的早期研究^[1-3]认为,纵导波的产生与地壳内低速层的存在有关。近年来Aki^[4]认为,纵波频散的产生除了与地壳分层结构有关外,还与层内介质的不均匀性有密切的关系。

我国的一些地震记录中也有 π_g 波显示,尤其是在我国东南部地区发生的地震,该区台网可以记录到较多的清晰可辨认的纵导波,如 π_g 波、 P_L 波等。深入研究 π_g 波及其它纵导波的传播特征,对研究我国东南部地区的地壳结构有一定的意义。

本文利用1987年8月在江西省寻乌发生的三次5.0级以上地震的DD-1短周期地震仪的记录,研究 π_g 波的传播特征。

二、我国一些地震的纵波频散现象

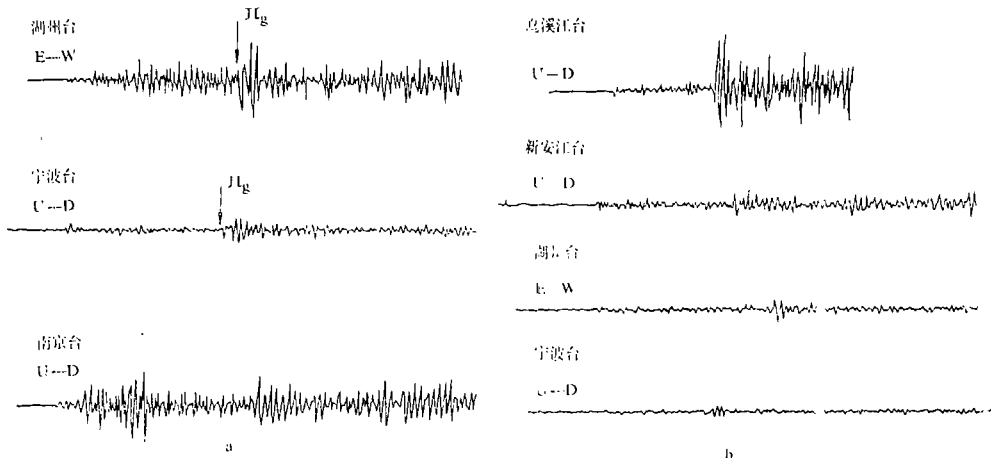
所谓纵波频散,是指地震产生的纵波在介质中传播时,由于介质的不均匀等因素的影响而产生的纵波的散射现象,在地震图中表现为P波段出现明显的波列特征。图1a给出了1982年四川甘孜4.2级地震的SK地震仪的记录,图1b给出了1980年6月1日甘肃肃北5.6级地震的SK地震仪的记录。

图1 π_g 波典型记录图

a. 1982年3月24日四川甘孜4.2级地震 b. 1980年6月1日甘肃肃北5.6级地震

Fig. 1 Typical records of the π_g wave

一般由于 π_g 波振幅小, 出现不甚规则而不易分辨。而我国东部台网记录的该区域内发生的地震, 其 π_g 波一般较清晰。图2给出了江西寻乌二次地震的记录图, 图中 π_g 波显示较明显。

图2 江西寻乌二次地震的 π_g 波记录图

a. 1987年8月2日5.0级地震 b. 1987年8月15日5.0级地震

Fig. 2 Records of the π_g wave of two earthquakes in Xunwu, Jiangxi Province

由图2可以看出, π_g 波波列持续3—5周。在本文所使用的资料中, π_g 波出现的最小震中距 $\Delta = 4.66^\circ$, 最大震中距 $\Delta = 7.6^\circ$ 。一般来说, π_g 波的垂直分量记录要较两个水平分量清晰, 波列明显。震中距较小的台站, 如在乌溪江地震台($\Delta = 4.66^\circ$)记录中, π_g 波几乎与 \bar{P} 波同时到达, 但有明显的 π_g 波波列存在(图2b)。在宁波台记录中, 初至 π_g 波到达之前, 有一明显的大波动, 而无明显的波列特征, 其走时又与 \bar{P} 波相符。因而可利用 π_g 波的波列特征, 同时利用初至 π_g 波之前 \bar{P} 波的存在来辨认 π_g 波。

三、我国东部地区 π_g 波的传播特征

为了研究我国东部地区 π_g 波的传播特性, 本文利用1987年8月2日、3日、15日在江

西省寻乌发生的三次 $M_L > 5.0$ 级地震的记录资料(图 2)研究 π_g 波的传播特征。在研究中选用震中方位相近的新安江台、乌溪江台、湖州台(震中方位差 $\Delta\alpha < 3^\circ$)及宁波台、南京台(震中方位差 $\Delta\alpha < 20^\circ$)的 DD-1 短周期地震仪记录,图 3 给出各台站位置及震中的分布。地震参数、台站位置及各台震中方位角见表 1、2。其中地震参数的选取根据国家地震局 1987 年 8 月月报数据。

1. π_g 波的初至速度 V_{π_g}

$$V_{\pi_g} = \frac{\Delta_1}{T_{\pi_g}}, \text{ 式中}$$

Δ_1 为该台震中距, T_{π_g} 为 π_g 波走时, $T_{\pi_g} = t_{\pi_g} - t_0$, 其中 t_{π_g} 为 π_g 波的初至到时, t_0 为地震的发震时刻。

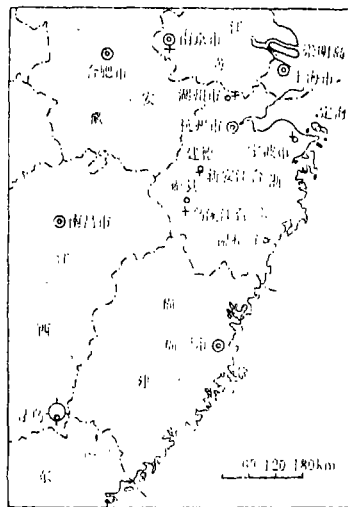


图 3 震中和台站分布图

Fig. 3 Distribution of epicentres and stations

表 1 震源参数表

发震日期 年月日	发震时刻 时 分 秒	震中位置		震级 M_L	震源深度 h
		ϕ_0	λ_0		
1987 8 2	17 07 34.9	25°02'	115°36'	5.8	19
1987 8 8	07 19 12.5	25°02'	115°36'	5.3	19
1987 8 15	00 59 33.3	25°04'	115°36'	5.2	

表 2 各台震中方位角

台站	台站位置		震中距		震中方位角		仪器型号
	ϕ_0	λ_0	度	km	α'	$\alpha = 180^\circ + \alpha'$	
乌溪江	28°42'00''.0	118°49'00''.0	4.66	513	38°.78	218°.78	DD-1
新安江	29°26'53''.0	119°16'12''.0	5.49	610	37°.32	217°.32	DD-1
湖州	30°50'34''.2	120°15'42''.0	7.12	792	36°.45	216°.45	DD-1
宁波	29°53'03''.0	121°31'12''.0	7.20	801	43°.18	228°.18	DD-1
南京	32°02'06''.0	118°51'16''.0	7.56	841	23°.01	203°.01	DD-1

表 3 列出了测得的 V_{π_g} 值。由表 3 可以看出,江西寻乌地震的 π_g 波的初至速度 V_{π_g} 为 5.80 - 6.18 km/s, 取其平均值为 6.00 km/s, 与 Press 和 Gutenberg 所测得的结果相近。

2. π_g 波的频散特征

表 4 给出了用峰谷法^[5]测得的每个波峰和波谷的到时。图 4 为各台测得的三次地震的 π_g 波到时和波数图, 图中分别给出了实测值和拟合值。拟合相关系数 r 均在 0.98 以上, 以 $\gamma = 0.99$ 居多, 标准离差一般在 ± 0.18 左右, 最大达 ± 0.30 , 最小为 ± 0.03 。

表 3

$V\pi_g$ 数据表

发震日期	台站	震中距 Δ (km)	$t\pi_g$	$T\pi_g$	$V\pi_g$ (km/s)
1987年8月2日	新安江	610	17-09-18.2	103.3	5.91
1987年8月2日	湖州	792	17-09-45.8	130.9	6.05
1987年8月2日	宁波	801	17-09-49.3	134.4	5.96
1987年8月2日	南京	841	17-09-50.9	136.0	6.18
1987年8月3日	新安江	610	07-20-53.1	100.6	6.08
1987年8月3日	湖州	792	07-21-23.4	130.9	6.05
1987年8月15日	乌溪江	518	01-01-20.3	87.0	5.96
1987年8月15日	新安江	610	01-01-37.9	104.6	5.80
1987年8月15日	湖州	792	01-02-03.9	130.6	6.06
1987年8月15日	宁波	801	01-02-07.6	134.3	5.96

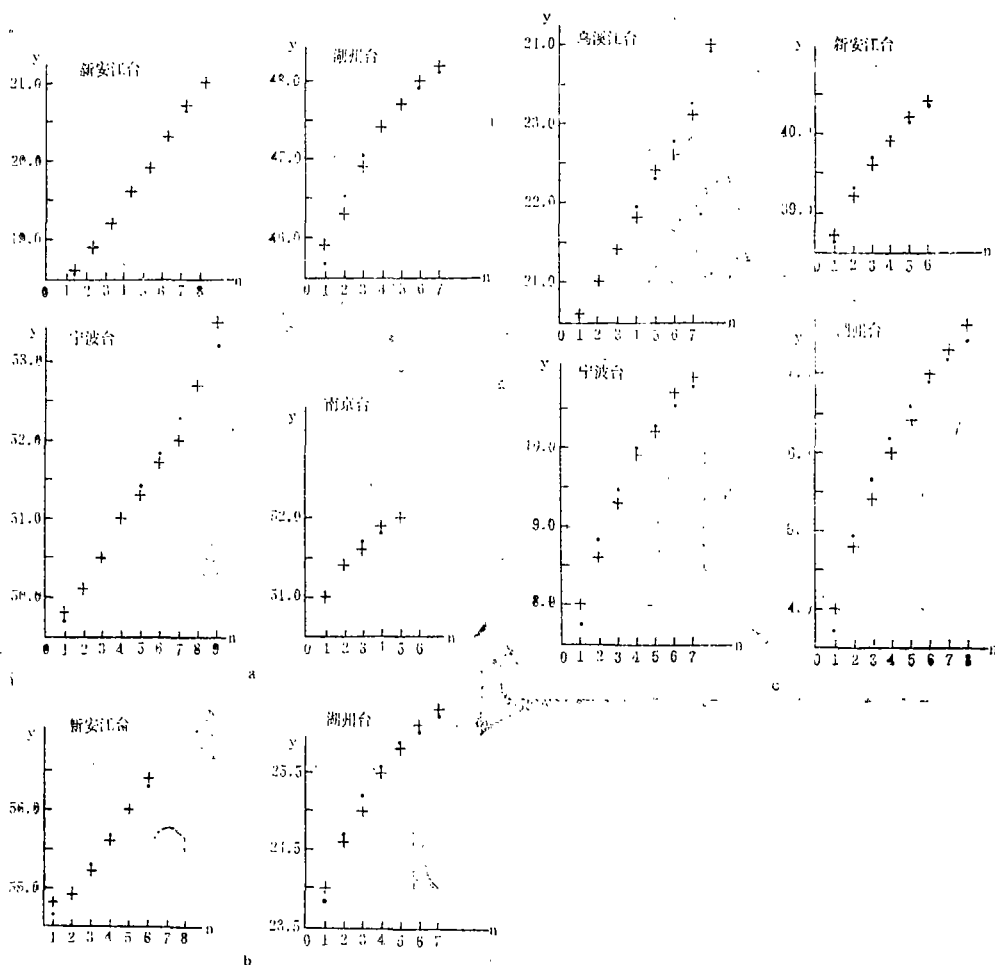
表 4

编 号	地震台	参 量	时 间	$n(x)$									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
01 8月2日	新安江台	y	17-09	18.6	18.9	19.2	19.6	19.9	20.3	20.7	21.0		
		\hat{y}		18.57	18.90	19.24	19.58	19.93	20.29	20.65	21.02		
		$T/2$		0.3287	0.3364	0.3406	0.3466	0.3528	0.3591	0.3656	0.3720		
		$T\pi_g$		103.7	104.0	104.3	104.7	105.0	105.4	105.8	106.1		
		U_T		5.88	5.87	5.85	5.83	5.80	5.78	5.77	5.75		
02 8月2日	湖州台	y	17-09	45.9	46.3	46.9	47.4	47.7	48.0	48.4			
		\hat{y}		45.68	46.54	47.05	47.41	47.69	47.92	48.11			
		$T/2$		1.247	0.6233	0.4153	0.3116	0.2493	0.2078	0.1781			
		$T\pi_g$		130.8	131.6	132.2	132.5	132.8	133.0	133.2			
		U_T		6.06	6.02	5.99	5.98	5.96	5.95	5.95			
03 8月2日	宁波台	y	17-09	49.8	50.1	50.5	51.0	51.3	51.7	52.0	52.7	53.5	
		\hat{y}		49.67	50.09	50.52	50.95	51.39	51.82	52.27	52.72	53.17	
		$T/2$		0.4216	0.4254	0.4293	0.4333	0.4372	0.4413	0.4453	0.4494	0.4535	
		$T\pi_g$		135.8	136.4	136.8	137.2	137.7	138.1	138.6	139.0	139.5	
		U_T		5.90	5.88	5.85	5.84	5.82	5.80	5.78	5.77	5.74	
04 8月2日	南京台	y	17-09	51.0	51.4	51.6	51.9	52.0					
		\hat{y}		50.98	51.41	51.67	51.85	51.99					
		$T/2$		0.6294	0.3147	0.2098	0.1574	0.1259					
		$T\pi_g$		136.1	136.5	136.8	137.0	137.1					
		U_T		6.18	6.16	6.15	6.14	6.13					

续表 4

编 号	地震台	参 量	时 间	n (x)											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
05 8月8日	新安江台	y	07—20	54.8	54.9	55.2	55.6	56.0	56.4						
		\hat{y}		54.65	54.98	55.3	55.65	55.98	56.32						
		T/2		0.3289	0.3309	0.3329	0.3349	0.3369	0.3389						
		$T\pi_g$		102.2	102.5	102.8	103.2	103.5	103.8						
		U_T		5.97	5.95	5.93	5.91	5.89	5.88						
06 8月8日	湖州台	y	07—20	24.0	24.6	25.0	25.5	25.8	26.1	26.3					
		\hat{y}		23.84	24.70	25.21	25.57	25.85	26.07	26.27					
		T/2		1.249	0.6246	0.4164	0.3123	0.2498	0.2082	0.1784					
		$T\pi_g$		130.5	130.8	131.9	132.3	132.6	132.8	133.0					
		U_T		6.07	6.06	6.00	5.99	5.97	5.96	5.95					
07 8月15日	乌溪江台	y	01—01	20.6	21.0	21.4	21.8	22.4	22.6	23.1	24.0				
		\hat{y}		20.56	20.98	21.41	21.85	22.31	22.78	23.26	23.95				
		T/2		0.4145	0.4260	0.4378	0.4500	0.4626	0.4753	0.4884	0.5020				
		$T\pi_g$		87.26	87.68	88.11	88.55	89.01	89.48	89.96	90.45				
		U_T		5.94	5.91	5.88	5.85	5.82	5.79	5.76	5.73				
08 8月15日	新安江台	y	01—01	38.7	39.2	39.6	39.9	40.2	40.4						
		\hat{y}		38.62	39.28	39.69	39.94	40.16	40.33						
		T/2		0.9561	0.4780	0.3187	0.2390	0.1912	0.1594						
		$T\pi_g$		105.3	106.0	106.4	106.6	106.9	107.0						
		U_T		5.80	5.76	5.79	5.72	5.71	5.68						
09 8月15日	湖州台	y	01—02	4.0	4.8	5.4	6.0	6.4	7.0	7.3	7.6				
		\hat{y}		3.71	4.94	5.66	6.17	6.59	6.89	7.16	7.40				
		T/2		1.77	0.886	0.591	0.443	0.354	0.295	0.253	0.222				
		$T\pi_g$		129.8	131.0	132.1	132.3	132.7	133.0	133.3	133.5				
		U_T		6.10	6.04	6.00	5.99	5.97	5.96	5.94	5.93				
10 8月15日	宁波台	y	01—02	8.0	8.6	9.3	9.9	10.2	10.7	10.9					
		\hat{y}		7.76	8.84	9.47	9.92	10.26	10.55	10.79					
		T/2		1.55	0.777	0.518	0.388	0.311	0.269	0.222					
		$T\pi_g$		134.5	135.5	136.2	136.6	137.0	137.2	137.5					
		U_T		5.96	5.91	5.88	5.86	5.85	5.84	5.83					

由图 4 各台拟合曲线求出各时刻斜率即为该时刻的半周期（见表 4），並由此作出频散曲线（见图 5）。在正常频散情况下， π_g 波到时及周期变化较大， T_{n+1} 约为 2 秒， T_{n-1} 约

图4 π_g 波到时和波数图

a. 1987年8月2日地震 b. 1987年8月8日地震 c. 1987年8月15日地震

Fig. 4 Patterns of the π_g wave arrival time and wave number

为0.3秒，其最大振幅对应的卓越周期为0.6—0.8秒，而对于反常频散，其周期变化则不大，周期随到时变化的差仅为0.1秒，卓越周期相差不大，约为0.7—0.8秒。

3. π_g 波的群速度 $U(T)$

由群速度公式 $U_1(T) = \Delta_i / T\pi_{g_1}(T)$ 求得不同周期的群速度值(表4)， U_{1T} 变化范围为5.68—6.18km/秒。由表4可以看出，波列中群速度 U_{1T} 极值所对应的波数振幅，不是该波列的最大振幅，即波列中最大振幅不一定是埃利相。这一结果与对某些面波的研究结果是一致的。

4. π_g 波的振幅辐射图象

使用各波数垂直向周期作为相应的水平向波数的周期，并作出地动位移水平合成矢量图(图6)。图6中各点即为各波数水平合成矢量值，数字表示波数，实线为各台站的震中方位线。图6表明各点基本在各台的震中方位线附近，而在与震中方位线成 90° 方位上则没有。

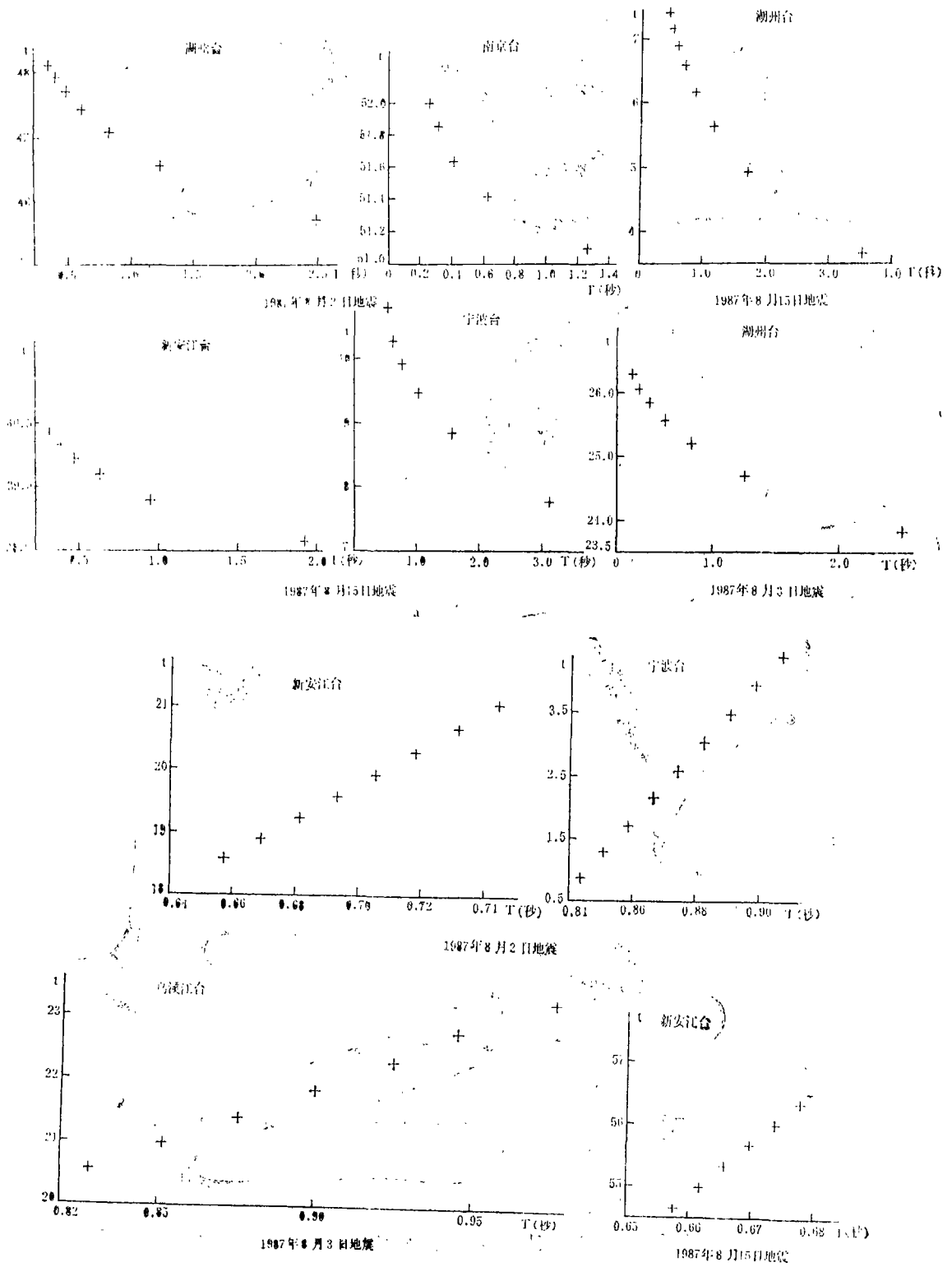


图 5 π_g 波的频散曲线

a. 正常频散曲线 b. 反常频散曲线

Fig. 5 Dispersive curve of the π_g wave.

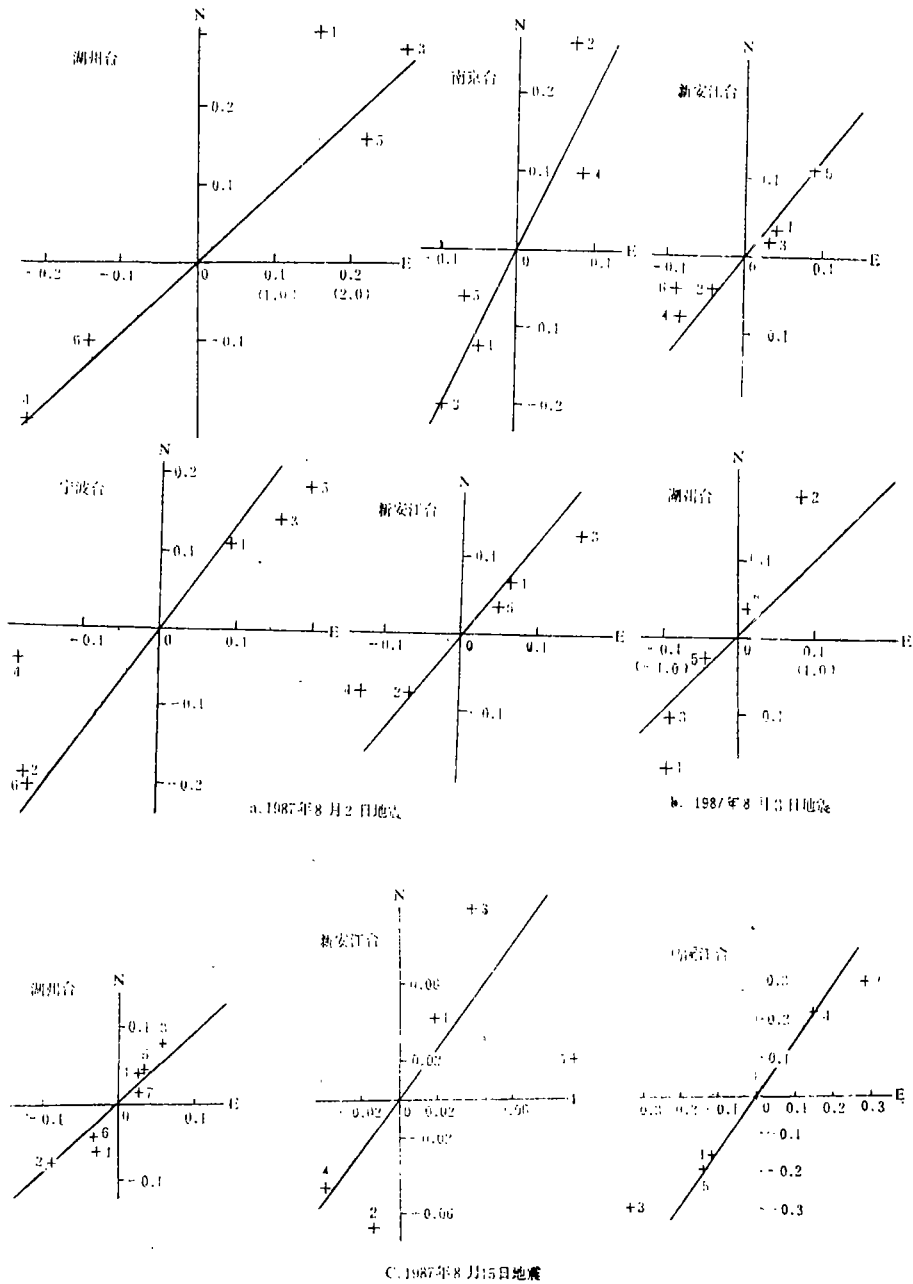


图6 π_g 波水平振幅合成矢量图

Fig. 6 Composite vector of horizontal component amplitude of the π_g wave

5. π_g 波水平与垂直分量的相移

图2表明 π_g 波主要在垂直方向上较明显, 而两水平分量记录较弱。为研究水平与垂直分量到时的差异, 选取记录较清晰且可进行波数追踪的记录, 将水平和垂直分量各波数到时列入表5中。由表中可以看到, 湖州台的1987年8月3日5.3级地震的记录, 以及湖州台、新安江台的1987年8月15日5.2级地震的记录中水平与垂直向波列到时且有差异, 但仍在其

量图读数误差范围之内。而乌溪江台的1987年8月2日5.8级地震记录中，波数1的东西向与垂直向记录到时差达0.3秒。湖州台的1987年8月2日地震记录中，东西向与垂直向各波数到时明显存在差异，其时差 $\Delta t = 0.3 - 0.5$ 秒，这显然是不能用读数误差来解释的。该记录中两分向到时差还表明，水平向的波数1与垂直向波数2到时相吻合，其余各波数也同样存在此特点。因此1987年8月2日湖州台的地震记录表明， π_g 波的两分向相位差为 $\frac{\pi}{2}$ ，其余记录因存在量图误差而不能得到满意的结论。

表 5

编号	台 站	波 列	波 数 (ni)						
			n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7
2	湖州台	E-W	17-09-45.9	-46.2	-46.7	-47.1	-47.6	-48.0	
		U-D	17-09-45.4	-45.9	-46.3	-46.7	-47.2		
8	宁波台	E-W	17-09-49.4	-50.0	-50.5	-50.1	-51.2	-51.6	-52.1
		U-D	17-09-49.7	-50.0	-50.5	-50.9	-51.3	-51.6	-52.1
6	湖州台	N-S	07-20-22.9	-23.6	-24.1	-24.6	-25.1		
		U-D	07-20-23.0	-23.7	-24.3	-24.6	-25.1		
8	新安江台	E-W	01-01-38.6	-39.1	-39.5	-39.9	-40.2		
		U-D	01-01-38.4	-39.0	-39.5	-39.9	-40.2		
9	湖州台	E-W	01-02- 3.9	- 4.8	- 5.3	- 6.1	- 6.3	- 7.0	
		U-D	01-02- 4.0	- 4.7	- 5.2	- 6.2	- 6.4	- 7.2	

四、讨论与结论

1. 一般认为， π_g 波是地壳低速层内不均匀P波迭加而生成的纵导波，本文研究证实了这一认识。由于低速层内波速低于其上层或下层，当地震原生纵波入射角达到临界角时，会产生全反射，即折射，上下层地震射线沿低速层界面传播。当原生波入射角大于临界角时，所产生的折射波一方面沿界面传播，同时也沿与界面垂直的方向衰减。这种沿某一方向传播，而沿另一方向衰减的波称为不均匀波。 π_g 波就是这种不均匀P波在低速度层内迭加而生成的纵导波，因而 π_g 波具有不均匀P波的特性。

设S为不均匀P波的波振幅，则波矢量可写为：

$$S(\alpha p, 0, -i\sqrt{\alpha^2 p^2 - 1}) e^{-w\sqrt{p^2 - \frac{1}{\alpha^2}} z} e^{-iw(px-t)}$$

其中p为地震射线参数， $p = \frac{\sin i}{\alpha}$ ， α 为纵波波速，i为地震射线入射角，取x方向为界面的延伸方向，z方向为界面垂直方向。可以看出水平和垂直分向必存在一相位差，且其相位差等于 $\pi/2$ 。因此不均匀P波的一个重要特性是产生水平和垂直向的相移。本文的研究结果证实了上述结论。

π_s 波水平和垂直向相移的存在,还有待更多的实测资料来证实。对 π_s 波水平和垂直向相移的研究,将会深化对 π_s 波的生成机制的认识。

2. AK₁[4]在研究非均匀介质地震波时,假设地球内散射波是由原生波和非均匀介质相互作用而产生的,由于介质的非均匀性比较弱(可称为弱非均匀介质),因此散射波仍遵循不受扰介质的波动方程,此时散射源与外加体力等效。

在弱非均匀介质中,当P波沿x方向入射时,由于速度(α)及弹性常数(λ, μ)梯度的扰动,使远场P波、S波的振幅产生辐射图象(见图7)。由图7可见,速度 α 和弹性系数 μ 的不均匀性的作用像一个单力或力偶,使远场散射P波振幅辐射基本沿震中方位线或其相反方向。

本文实测 π_s 波振幅辐射图(见图6)与图7中由于速度 α 或弹性系数 μ 的扰动而产生的散射P波图案是相似的。由此我们认为 π_s 波的产生与介质的弱非均匀性有关。

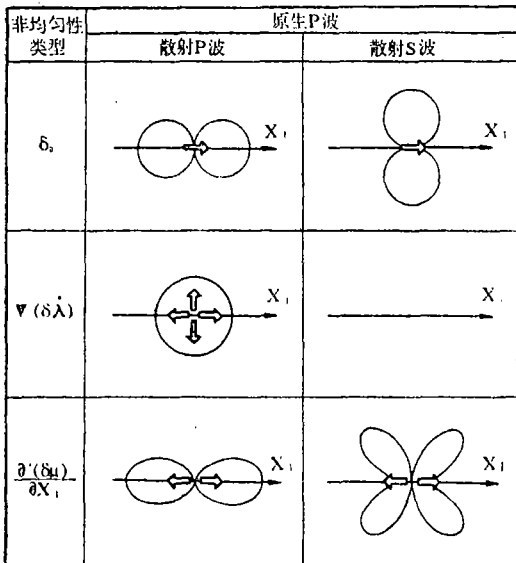


图7 当P波沿x方向入射时,由三种局部非均匀性散射形成的远场P波和S波辐射图案
Fig. 7 Radiation pattern by three kinds of local heterogeneity scattered distant field of the p and s wave when incident P wave is x_1 direction

3. 本文的研究表明, π_s 波的频散特征是明显的, 其群速度是可以测得的。若选取合适的记录, 也可以测得相速度 $C(T)$ 。对 π_s 波频散的研究, 为测定地壳介质参数提供了一条新的途径。

4. π_s 波一般在震中距 $5^\circ-10^\circ$ 范围内记录较明显。中国东南各省地震较少, 利用小震尾波测定介质品质因子的方法在该地区内显然是不适用的。由于 π_s 波在该地区记录明显, 因此利用 π_s 波测定介质的衰减参数的方法, 对于测定该区的介质参数具有特殊意义。

5. 中国东部许多台的地震图上有 π_s 波的清晰记录, 表明在本文讨论的地震波传播路径内的广大地区的地壳中部存在着比较连续的低速层。

本研究得到肖志江同志、何鸣同志及李于民同志的大力协助, 特此致谢。

(本文1988年11月20日收到)

参 考 文 献

[1] Press, F. and Ewing, Earthquake surface wave and crustal structure, Geolsoc. Am. Spec. Papers, Vol. 62, 51-60, 1955.
 [2] Gutenberg, B., Channel waves in the earth's crust, Geophysics, Vol. 20, 283-294, 1955.
 [3] Båth, M., A continental channel wave, guided by the intermediate layer in the crust, Geobos.

Para.e. ayce., Vol.38, 19—31, 1957.

〔4〕安艺敬一、P. G. 理查兹，定量地震学理论和方法，李钦祖、邹其嘉等译，地震出版社，1986.

〔5〕付淑芳、刘宝城、李文艺，地震学教程，地震出版社，1980.

DISPERSION CHARACTERISTIC OF THE π_g WAVE IN SOUTHEASTERN CHINA

Tan Aina, Yang Daosheng, Liu Chang, Fu Jianwu,
Yu Yahua, Wang Xiaodong
(*Seismological Bureau of Zhejiang Province*)

Abstract

Using the data of the three earthquakes ($M_L > 5.0$) which occurred in Xunwu, Jiangxi Province in August 1987, we have discussed a travel characteristics of the π_g wave in Southeastern China. The results show that: The first velocity is 6.0km/s, it is close to Press's results; the π_g wave has shown normal dispersion, and a few are no-normal dispersion; its paramount period is 0.6-0.8 second. Using the composite amplitude of horizontal component of the π_g wave, we have obtained the radiation pattern of the π_g wave, it is basically close to radiation pattern in weak heterogeneous medium. There is the D value of time of incidence (Phase Shift) between horizontal time and vertical time of the π_g wave number.