

吴国瑞, 杨选, 姜喜娇, 等. 用 sPn 震相计算广东地区地震震源深度[J]. 华南地震, 2018, 38 (S1): 74–80. [WU Guorui, YANG Xuan, JIANG Xijiao, et al. Focal Depth Determination of Earthquakes in Guangdong Area by sPn Phase [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(S1): 74–80]

用 sPn 震相计算广东地区地震震源深度

吴国瑞, 杨 选, 姜喜娇, 黄柳芳

(广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 通过对广东台网记录到的三个典型地震的震相分析, 依据 sPn 震相所具有的特征, 可以在震中距 1.5 至 7 度之间, 识别出 sPn 震相; 利用 sPn 和 Pn 震相的到时差计算出三个地震的震源深度, 并与广东台网用其他方法给出的震源深度进行比对。结果表明: sPn 和 Pn 震相的到时差计算震源深度的方法简单易行, 且准确度较高。

关键词: sPn 震相; 震源深度; 震相识别

中图分类号: P315.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)S1-0074-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.S1.012

Focal Depth Determination of Earthquakes in Guangdong Area by sPn Phase

WU Guorui, YANG Xuan, JIANG Xijiao, HUANG Liufang

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

Abstract: According to the characteristics of sPn phase, the paper analyzed the waveforms of three typical earthquakes recorded by Guangdong Seismic Network and identified sPn phases at a distance range of 1.5 to 7 degree. The focal depths of these earthquakes are determined by using the arrival-time differences between sPn and Pn phases and then compared with focal depths calculated by other methods. The result shows that this focal depth determination method by sPn phase is simple and easy to implement and of high accuracy.

Keywords: sPn phase; Focal depth; Phase identification

收稿日期: 2018-03-28

基金项目: 中国地震局监测、预测、科研三结合课题 (161901) 资助

作者简介: 吴国瑞(1984-), 女, 工程师, 主要从事地震监测工作。

E-mail: 645229773@qq.com.

0 引言

地震震源深度是地震学研究中的核心问题之一,准确确定地震震源深度对于评估地震灾害,确定地震成因和动力学环境、判断余震发展趋势和危险性以及核爆监测等多方面具有非常重要的意义,然而地震震源深度定位一直是国际地震学界一个难题。近年来,国内地震学家广泛开展了这方面的研究工作。并取得了很多重要研究成果。通过研究用 sPn 与 Pn 波走时差测定近震震源深度的方法,多次证明 sPn 与 Pn 波的走时差与震中距无关,只与区域地壳模型和震源深度有关。对于国内一般强度的地震,如果震中距小于 1 000 km,波形记录中 sPn 震相很多。sPn 可以不受地震三要素约束而独立测定,并具有方便、快捷、准确的优点。

本文利用广东数字测震台网波形记录资料,根据 sPn 震相计算出 2012 年 2 月 16 日广东东源 M_L 5.2 地震、2013 年 12 月 6 日广东高州 M_L 4.2 地震、2013 年 12 月 5 日广东南海海域 M_L 3.6 地震的震源深度。

1 sPn 震相的识别及 sPn-Pn 走时方程

1.1 sPn 震相的识别

sPn 波是指发生在地壳内的地震产生的 S 波入射到地表经地面反射时,其中 SV 成分会转换为 P 波,之后转换 P 波入射到莫霍面,当入射角为临界角时,在地幔顶部沿着 M 界面向前滑行,形成 Pn 波。sPn 是 S 波转换而来,其动力学特征上具有纵波性质又保持横波性质,因此地震记录上两个水平分量和垂直分量通常很清晰,并且振幅和周期均大于纵波。

1.2 sPn-Pn 走时方程

以下讨论华南地壳模型下 sPn 的运动学特征,据范玉兰等 1990 年的研究,华南地壳模型可采用双层平均地壳模型来近似代替。其参数为: $H_1=21.4$ km, $V_{p1}=6.01$ km/s, $V_{s1}=3.55$ km/s; $H_2=11.0$ km, $V_{p2}=6.88$ km/s, $V_{s2}=3.93$ km/s; $H=32.4$ km, $V_{pn}=7.98$ km/s, $V_{sn}=4.58$ km/s。震源的位置存在两种情况:

一种是震源在上地壳内,射线路径如图 1, sPn-Pn 的走时差方程可表达为:

$$T_{sP_n} - T_{P_n} = \frac{OE}{V_{S_1}} + \frac{EJ}{V_{P_1}} + \frac{JB}{V_{P_2}} + \frac{BD}{V_{P_n}} + \frac{DK}{V_{P_2}} + \frac{KS}{V_{P_1}} - \left(\frac{OG}{V_{P_1}} + \frac{GA}{V_{P_2}} + \frac{AB}{V_{P_n}} + \frac{BD}{V_{P_n}} + \frac{DK}{V_{P_2}} + \frac{KS}{V_{P_1}} \right)$$

$$\rightarrow h = \frac{(T_{sP_n} - T_{P_n})}{\frac{\sqrt{V_{P_n}^2 - V_{S_1}^2}}{V_{S_1} V_{P_n}} + \frac{\sqrt{V_{P_n}^2 - V_{P_1}^2}}{V_{P_1} V_{P_n}}} = 2.7644(T_{sP_n} - T_{P_n})$$

另一种是震中在下地壳内,射线路径如图 2。 sPn-Pn 的走时差方程可表达为:

$$T_{sP_n} - T_{P_n} = \frac{OG}{V_{S_2}} + \frac{GE}{V_{S_1}} + \frac{EJ}{V_{P_1}} + \frac{JB}{V_{P_2}} + \frac{BD}{V_{P_n}} + \frac{DK}{V_{P_2}} + \frac{KS}{V_{P_1}} - \left(\frac{OA}{V_{P_2}} + \frac{AB}{V_{P_n}} + \frac{BD}{V_{P_n}} + \frac{DK}{V_{P_2}} + \frac{KS}{V_{P_1}} \right)$$

$$h = H_1 + h_1 = H_1 + \frac{(T_{sP_n} - T_{P_n})}{\frac{\sqrt{V_{P_n}^2 - V_{S_2}^2}}{V_{S_2} V_{P_n}} + \frac{\sqrt{V_{P_n}^2 - V_{P_2}^2}}{V_{P_2} V_{P_n}}} - H_1 \left(\frac{\frac{\sqrt{V_{P_n}^2 - V_{S_1}^2}}{V_{S_1} V_{P_n}} + \frac{\sqrt{V_{P_n}^2 - V_{P_1}^2}}{V_{P_1} V_{P_n}}}{\frac{\sqrt{V_{P_n}^2 - V_{S_2}^2}}{V_{S_2} V_{P_n}} + \frac{\sqrt{V_{P_n}^2 - V_{P_2}^2}}{V_{P_2} V_{P_n}}} \right)$$

$$= 3.3887(T_{sP_n} - T_{P_n}) - 1.2258H_1 + H_1 = 3.3887(T_{sP_n} - T_{P_n}) - 0.2258H_1 = 3.3887(T_{sP_n} - T_{P_n}) - 4.8321$$

从式(1)、式(2)、式(3)可以看出, sPn 与 Pn 的走时差随震源深度增大而增大,与震中距无关,因此利用这一重要性质,只需准确识别 Pn 和 sPn 震相就可以快速计算出震源深度。

2 sPn 震相在实际观测资料中的测定与应用

2.1 广东测震台网简介

广东台网“十五”期间建设的地震台 44 个

12.69 km, 平均为 11.55 km。

东源 M_L 5.2 级地震 15 个台的震源深度计算结果中, 震源深度最浅的是福建永定先施台, 震源深度最深的是江西宜春台, 为了使计算出的震源深度更加准确, 取这 15 个台计算出的震源深度的平均值为 11.55 km。

表 1 利用 sPn 震相测定的广东东源 5.2 级地震深度
Table 1 Focal depth of Dongyuan M 5.2 earthquake determined by sPn phase

序号	台站代码	Δ/km	$T_{\text{sPn}}/T_{\text{Pn}}$	$A_{\text{sPn}}/A_{\text{Pn}}$	$T_{\text{sPn-Pn}}$	h/km
1	JX\HUC	230.1	1.22	0.57	3.91	10.81
2	FJ\YDXS	235.6	1.38	2.18	3.76	10.39
3	JX\WAA	275.3	0.42	2.35	3.95	10.92
4	FJ\HAHF	332.1	0.49	1.37	4.22	11.67
5	HI\YOZ	386.1	0.61	0.87	3.91	10.81
6	GD\GAZ	409.6	0.08	2.37	4.21	11.64
7	JX\YIC	433.9	1.15	2.81	4.59	12.69
8	GD\SHD	449.3	1.70	3.14	4.22	11.67
9	GD\HEJ	457.9	1.70	2.67	4.34	12.00
10	FJ\SWDT	485.6	0.89	3.02	4.19	11.58
11	GD\ZHJ	504.7	1.30	0.53	4.44	12.27
12	FJ\PTNR	525.9	0.28	3.45	4.12	11.39
13	GD\LZO	5.18°	1.05	1.14	4.48	12.38
14	JX\HCS	5.94°	0.39	1.41	4.14	11.44
15	HI\CHM	5.98°	0.63	1.06	4.20	11.61
	平均值		0.89	1.93	4.18	11.55

表 2 利用 sPn 震相测定的广东南澳海域 3.6 级地震深度
Table 2 Focal depth of Nanao Coast M 3.6 earthquake determined by sPn phase

序号	台站代码	Δ/km	$T_{\text{sPn}}/T_{\text{Pn}}$	$A_{\text{sPn}}/A_{\text{Pn}}$	$T_{\text{sPn-Pn}}$	h/km
1	FJ\YDXS	166.4	3.43	15.36	8.87	24.52
2	FJ\HAHF	183.3	1.43	3.07	8.56	23.66
3	FJ\HAJF	240.1	1.19	0.06	7.13	19.71
4	GD\DFH	272.1	2.23	2.75	7.83	21.65
5	GD\GUL	274.5	1.73	0.27	8.01	22.14
6	GD\HEP	275.1	3.25	2.47	7.88	21.78
7	GD\BLT	280.1	2.46	1.66	8.29	22.92
8	GD\XFJ	280.9	2.50	0.55	8.15	22.53
9	GD\XIG	283.8	2.86	1.18	8.34	23.06
10	GD\ZHX	285.1	1.88	0.92	8.46	23.39
11	GD\HYJ	287.6	2.09	0.84	8.38	23.17
12	GD\DOX	291.8	1.53	0.47	8.56	23.66
13	GD\DOY	294.8	3.25	0.65	8.84	24.44
14	FJ\PTNR	295.2	1.69	2.18	8.09	22.36
15	JX\HUC	297.4	1.33	4.62	7.90	21.84
16	GD\HUZ	302.5	1.91	1.94	8.44	23.33
17	JX\GAZ	363.1	1.92	2.16	8.00	22.12
18	GD\SHG	419.6	1.05	0.64	8.20	22.67
19	GD\XNH	454.0	0.93	0.70	8.48	23.44
20	GD\ZHQ	495.2	1.09	0.46	7.67	21.20
	平均值	302.13	1.99	2.15	8.20	22.68

2.2.2 2013 年 12 月 5 日 广东南澳海域 M_L 3.6 地震

此次利用 20 个台的 sPn 地震波形记录, 根据 sPn 波震相的判别依据, 得出 sPn 对比 Pn 的特征数据及震源深度结果见表 3。

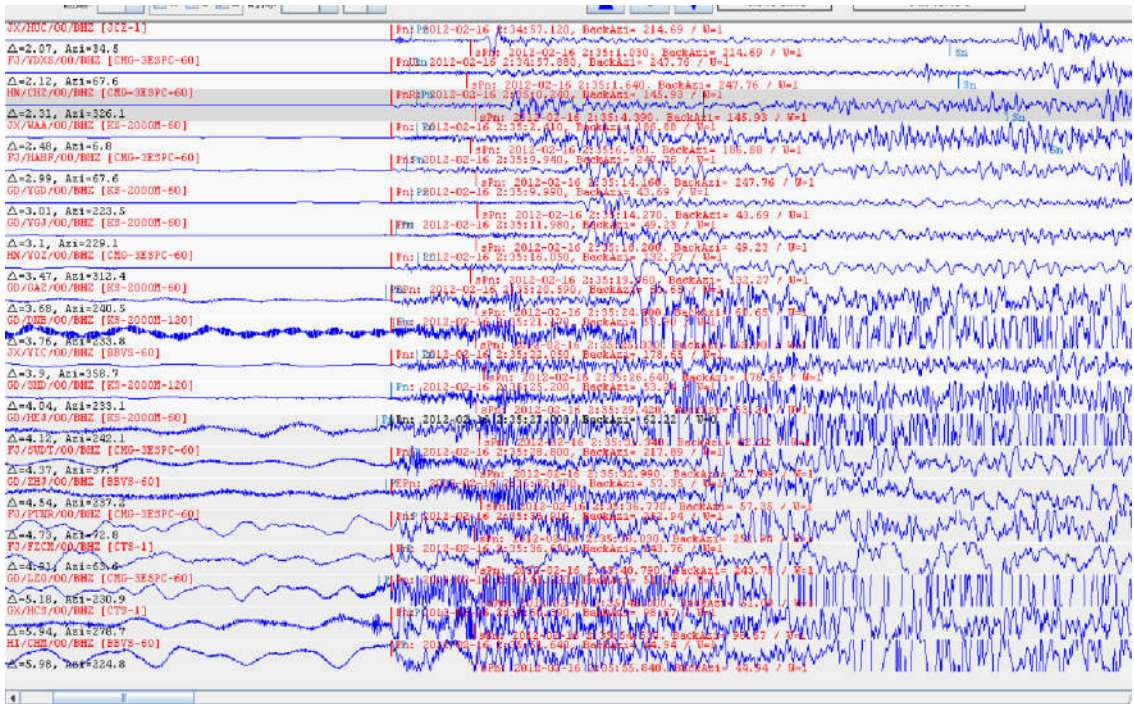


图 4 广东台网部分台站记录的广东东源 5.2 级地震 sPn 震相

Fig.4 The sPn phase of Dongyuan *M* 5.2 earthquake recorded by part of Guangdong seismic stations

表 3 利用 sPn 震相测定的广东高州 4.2 级地震深度

Table 3 Focal depth of Gaozhou *M* 4.2 earthquake determined by sPn phase

序号	台站代码	Δ/km	$T_{\text{sPn}}/T_{\text{Pn}}$	$A_{\text{sPn}}/A_{\text{Pn}}$	$T_{\text{sPn-Pn}}$	h/km
1	GD\HUI	245.4	0.93	1.11	3.15	8.71
2	GD\HUD	271.6	1.56	0.89	3.60	9.95
3	GD\QIX	295.3	3.80	0.83	3.54	9.79
4	HINCHM	305.1	1.39	1.33	4.32	11.94
5	GD\YND	323.8	1.33	1.38	4.36	12.05
6	GX\XZS	377.1	2.39	1.10	4.36	12.05
7	GD\LIP	280.1	6.08	1.62	4.59	12.69
8	GD\SHW	452.9	5.80	1.57	4.42	12.22
9	GD\ZIJ	458.2	2.42	1.45	4.29	11.86
10	GD\NAX	461.4	4.06	1.18	4.34	12.00
11	JX\LON	482.5	2.26	1.79	4.16	11.50
12	GD\FES	5.06°	3.50	1.87	4.34	12.00
13	GD\JIY	5.14°	3.73	1.71	4.30	11.89
14	GD\SHI	5.32°	3.00	1.63	4.28	11.83
15	JX\HUC	5.54°	3.73	1.70	4.38	12.11
16	GD\RAP	5.58°	5.50	1.76	4.29	11.86
	平均值		3.22	1.43	4.17	11.53

图 5 是选用 20 个台的波形记录。地震中 sPn 与 Pn 的周期比记录最小的是新会台，记录最大的是福建永定先施台，平均值为 1.99。振幅比记录最小的是福建惠安净峰台，记录最大的是福建永定先施台，平均值为 2.15。通过表 3 中 sPn 与 Pn 周期比和振幅比数据可以反映出纵波和横波动力学特征的差别。各台站的到时差从 7.13~8.84 s，

平均为 8.20 s。对应的震源深度从 19.71~24.52 km，平均为 22.68 km。广东南澳海域 *M_L* 3.6 级地震 20 个台的震源深度计算结果中，震源深度最浅的是福建惠安净峰台，为 19.71 km，最深的是福建永定先施台，为 24.52 km，为使计算出的震源深度更加准确，取这 20 个台计算出的震源深度的平均值为 22.68 km。

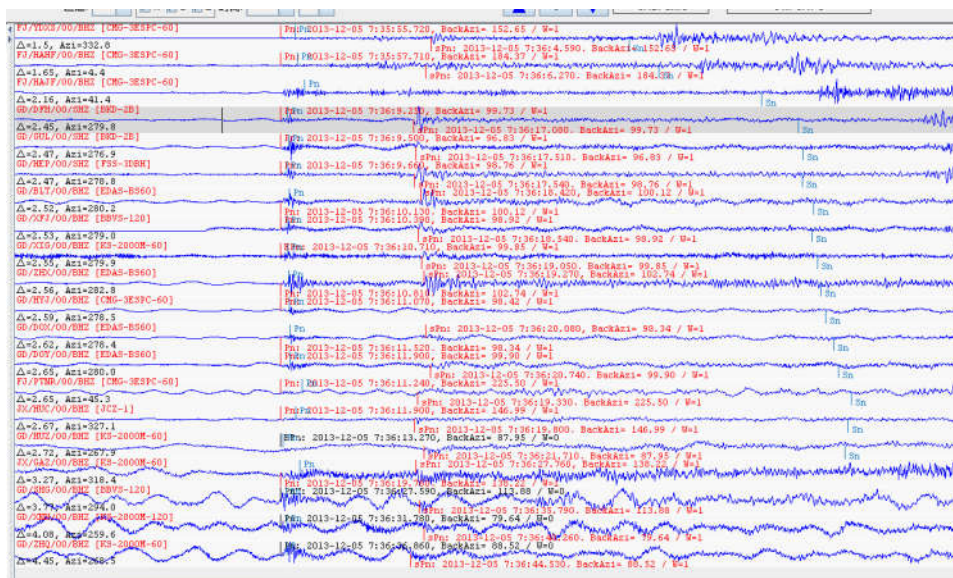


图5 广东台网部分台站记录的广东南海海域3.6级地震 sPn 震相

Fig.5 The sPn phase of Naoao Coast M 3.6 earthquake recorded by part of Guangdong seismic stations

2.2.3 2013年12月6日广东高州 M_L 4.2 地震

此次利用16个台的 sPn 地震波形记录, 根据 sPn 波震相的判别依据, 得出 sPn 对比 Pn 的特征数据及震源深度结果见表3。图6是选用16个台的波形记录。地震中 sPn 与 Pn 的周期比记录最小的是怀集台, 记录最大的是连平台, 平均值为3.22。振幅比记录最小的是清新台, 记录最大的是丰顺台, 平均值为1.43。通过表2中 sPn 与 Pn 周

期比和振幅比数据可以反映出纵波和横波动力学特征的差别。各台站的到时差从3.15~4.59 s, 平均为4.17 s。对应的震源深度从8.71~12.69 km, 平均为11.53 km。广东高州 M_L 4.2级地震16个台的震源深度计算结果中, 震源深度最浅的是怀集台, 为8.71 km, 最深的是连平台, 为12.69 km, 为使计算出的震源深度更加准确, 取这16个台计算出的震源深度的平均值为11.53 km。

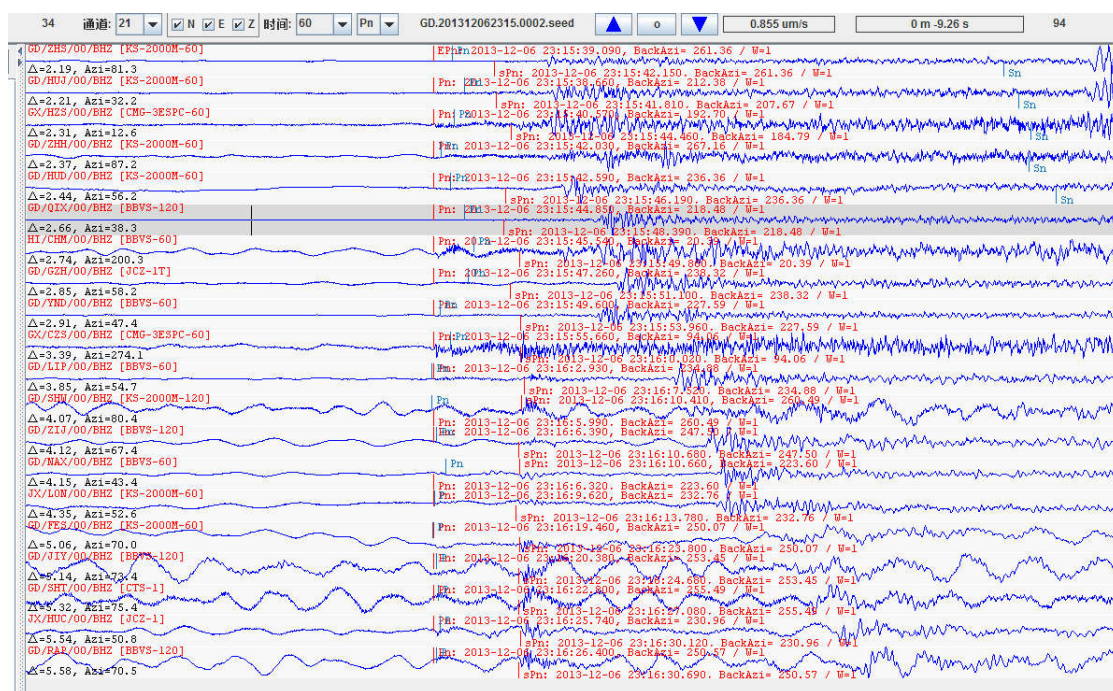


图6 广东台网部分台站记录的广东高州4.2级地震 sPn 震相

Fig.6 The sPn phase of Gaozhou M 4.2 earthquake recorded by part of Guangdong seismic stations

2.3 结果对比

通过对3个地震分析处理,发现到时差在各台的差别大小,主要取决于分析 Pn 和 sPn 的初相位到达时刻的准确性;因为 Pn 和 sPn 同属于首波性质,初始振幅一般情况下都非常弱,以至于不太明显,所以读取到时差会有一个周期的相差,会

使震源深度的计算结果存在±3 km 的误差。如果台站的到时差精度高,偏差趋于零,所求的震源深度误差将最小。

通过对广东地区 3 个地震震源深度的重新计算分析,与国家台网、广东台网、福建台网计算的结果进行比较(表 4),若 sPn 震相清晰且分析准确,测得的震源深度是比较可靠的。

表 4 震源深度结果与中国地震台网中心结果对比
Table 4 Comparison of the focal depths determination result with CENC

发震日期	发震时刻	震级/ M_L	震中位置	sPn-Pn 法 震源深度/km	广东台网震源 深度/km	国家地震台网震 源深度/km
2012-02-16	02:34:23	5.2	广东东源	10	13	13
2013-12-05	07:35:31	3.6	广东南澳海域	22.7	19	21
2013-12-06	23:15:04	4.2	广东高州	11.5	13	14

3 结语

(1) 通过对广东地区 3 个地震的分析,在 200~900 km 之间能记录到清晰的 sPn 震相。

(2) 本次主要通过 sPn-Pn 平均到时差方法来测定,其误差主要来源于震相识别的误差和地壳模型的误差,因此 sPn 震相至关重要;广东地震台站记录的 sPn 震相的基本特征:因为 sPn 的原生波是 S 波,所以两水平分向常常比较清晰, sPn 波的振幅通常比 Pn 波强,若初动清楚可见, sPn 波与 Pn 波相反,周期一般 sPn 波比 Pn 波长,出现在 Pn 与 Pg 震相震相之间, sPn 波与 Pn 到时差仅随震源深度增加而增加。但特别容易与 P* 波混淆,一般 P* 比 sPn 振幅弱,周期也较短。

(3) 通过用 sPn-Pn 方法获得的 3 个 M_L 3.0 级以上地震的深度与广东台网编目使用 Hyposat 方法比较发现两者相差不大,这可能是对于较大地震编目录入时使用了较多的深度震相 PmP 和 SmS 以及 Pn 和 Sn 有关。在分析计算地震震源深度中,部分台站偏差达到 1 s 以上,这直接造成震源深度偏差超过 3 km,因此正确识别 sPn 与 Pn 震相是至关重要的。

(4) sPn-Pn 计算得到的深度标准差较小,并且与广东地震台网计算结果有很好的一致性,表明了这种方法的可行性。在数字测震台网中,能够观测到清晰的 Pn 与 sPn 震相,只需要台站能清楚记录 2 个以上 sPn 震相,就能得出该地震的大致震源深度;若有多台记录到 sPn 震相,取多台平均值作为最终结果就更为可靠了,这种方法简洁、

实用,可以将该方法用于日常观测分析中应用。

根据多个地震多台综合分析结果得出,利用 sPn 震相计算的震源深度与广东台网、国家台网中心、周边省份测出的震源深度基本符合。

参考文献:

[1] 范玉兰,林纪曾,胡瑞贺,等.华南地区近震走时表的研制[J]. 华南地震.1990,10(2):1-16.

[2] 中国科学院地球物理研究所. 近震分析[M]. 北京:地震出版社,1997.

[3] 修济刚,李友博,译. 宽频带数字地震学观测与研究[M]. 北京:海洋出版社,1988.

[4] 蔡杏辉,邵平荣.中国台湾地区地震 sPn 震相分析及其震源深度计算[J]. 山西地震,2011(1):25-28

[5] 王登伟.用 sPn 与 Pn 波走时差测定近震震源深度的方法[J]. 地震,2011,31(1):12-19.

[6] 吴微微,苏金蓉,魏娅玲,等. sPn 震相计算近震震源深度研究[J]. 地震地磁观测与研究,2012,33(5):88-92.