第35卷 第3期 地 震 工 程 学 报 Vol. 35 No. 3
2013年9月 CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL Sept., 2013

采用 sPn 震相确定甘肃岷县 $M>4.0$ 地震震源深度①

魏娅玲，蔡一川，苏金蓉
(四川省地震局，四川 成都 610041)

摘要：通过对甘肃岷县2013年7月3个 $M>4.0$ 地震震相的细致分析，认为在震中距大于250 km时四川数字地震台网部分台站可记录到较为清晰的 sPn 震相。采用 sPn 和 Pn 震相确定震源深度的方法分别对岷县3个地震的震源深度进行了重新计算，得到了较为精确的地震震源深度。

关键词：**sPn** 震相；震相特征；震源深度；震中距；走时差

中图分类号：P315.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－0844(2013)03－0438－05

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2013.03.0438

Calculation of the Focal Depth of $M>4.0$ Earthquakes in Minxian, Gansu, Based on sPn Seismic Phases

WEI Ya-ling, CAI Yi-chuan, SU Jin-rong
(*Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*)

Abstract: Earthquake focal depth is an important parameter for research on seismology, the structural study of earthquakes, seismic hazard assessment, and earthquake event recognition. As a basic seismic parameter of time and space, earthquake focal depth affecting the size of the earthquake disaster and is one of the most difficult parameters to measure accurately because its determination is related to source process fault structures and stress fields. Stations layouts are sparse in our country; therefore, the velocity model generally used to determine earthquake focal depth. The China Earthquake Networks Center detected a magnitude 6.6 earthquake in Dingxi City, Gansu Province, on July 22, 2013, at 7:45 Beijing time in the border area between Minxian and Zhangxian with a focal depth of approximately 20km. The epicenter was approximately 15 km from Minxian, 45 km from Zhangxian, 120 km from Dingxi City, and 170 km from Lanzhou City. As of July 30, 2013, 1066 aftershocks were recorded, nine of which were greater than magnitude 3.0.

According to the analysis, the seismic phases of three $M>4.0$ earthquakes occurred in Gansu Minxian in July 2013. The Sichan digital seismograph network recorded relatively clear sPn seismic phases of more than 250 km in the area near the epicenter. In this study, sPn and Pn seismic phase methods were used to calculate the seismic depth. The focal depths of the three Minxian earthquakes were recalculated to obtain a more accurate earthquake focal depth. The earthquake focal depth is an important focal shock parameter. Because the method of using more than one pair of sPn and Pn seismic phases to calculate the seismic depth was adopted in this study, the main error source is the seismic phase and the Earth's crust model error; therefore, identification of sPn and Pn is crucial. By recalculating the focal depth of the three Minxian $M>4.0$ earth-

① **收稿日期**：2013-08-20
基金项目：国家自然科学基金重大项目(41090292)
作者简介：魏娅玲(1979－)，女，工程师，从事地震监测大震速报工作. E－mail:sctwsbs@163.com

quakes, it is concluded that focal depth of the M 6.6 principal earthquake was 15.4 km, the focal depth of the M 5.6 aftershock was 9.6 km, and the focal depth of the M 4.1 aftershock was 9.2 km. The focal depth of the two aftershocks is obvious shallow; these results show that the rupture process of the M 6.6 principal earthquake was from deep to shallow regions. An accurate focal depth was obtained by deep seismic phases to provide basic data for earthquake prediction and earthquake hazard analysis.

Key words: sPn seismic phases; characteristics of seismic phases; focal depth; epicentral distance; travel-time difference

0　引言

对于地震学研究、地震构造研究、地震危险性评估和地震事件识别来说，地震震源深度是一个重要参数[1]，它的准确测定关系到对震源过程、断层构造和应力场作用等一系列问题的正确认识。震源深度既是影响地震灾害大小的因素，又是目前最难准确测定的参数之一。目前由于我国绝大多数台网布局稀疏，速度模型又不够精准，如果采用常规方法，即使采用直达 P 波来测定震源深度也无法得出精确结果。

20 世纪 50 年代苏联学者提出在近震中可观测到 sPn 震相，之后曾给出双层地壳模型近震的 sPn－Pn 走时方程[2]。80 年代随着世界数字记录观测台网的发展，国外学者采用理论地震图和数字模拟记录比较方法可清晰分辨出 sPn 和 pPn 波，从而有助于提高测定近震震源深度和定位精度。对于震中距小于 1 000 km 的地震，波形记录中 sPn 震相并不少见，中国地震学者采用 sPn 震相准确测定了中国区域的多个地震的震源深度[2-4]。如今，四川数字地震台网已具有一定规模的台站，具备分辨 sPn 波计算震源深度的能力。本文通过对甘肃岷县地震的震相分析，利用 sPn 震相重新测定岷县 2013 年 7 月 3 个 $M>4.0$ 地震的震源深度，并进行一些探索。

1　sPn 震相基本特征和震源深度公式

震相 sPn 是测定近距离($\Delta<1\ 000$ km)浅源地震震源深度值比较实用的震相。设震源不在地表($h\neq0$)，为了简化描述设地壳为单层，sPn 波射线传播路径如图 1 所示。

当地震发生在地壳内时，原生横波的 SV 成分在地表震中附近反射转换为 P 波；转换后的 P 波入射到莫霍面时，当入射角为临界角时，又形成 Pn 波，由于此时的 Pn 波是 S 波转换而来，故记为 sPn 波。其基本特征是：sPn 波的振幅通常比 Pn 波强，虽然其动力学特征保持横波性质(即振幅和周期均大于纵波 Pn)，但最终以纵波形式出现在地震记录上，所以垂直分向显示比较清晰。若初动清楚可见的话，sPn 波与 Pn 波反向，周期一般比 Pn 长，出现在 Pn 与 Pg 震相之间，sPn 与 Pn 波到时差仅随震源深度增加而增加。同时要特别注意 sPn 与 P* 波的混淆，一般 P* 比 sPn 振幅弱，周期也较短。

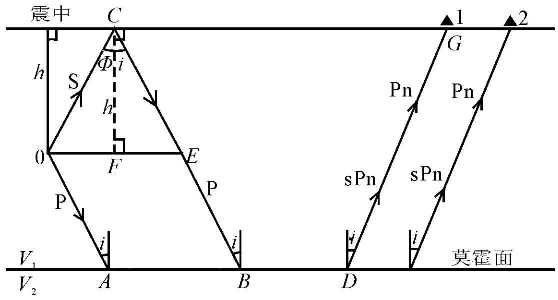

图 1　单层地壳模型 sPn 传播路径

Fig. 1　The sPn propagation path in the crust model with single layer

根据图 1 可以推断出地震震源深度为 $h=K\cdot\Delta t$，其中 $K=\dfrac{\sqrt{V_2^2-V_{S1}^2}}{V_{S1}\cdot V_2}+\dfrac{\sqrt{V_2^2-V_1^2}}{V_1\cdot V_2}$，$\Delta t$ 为 sPn 与 Pn 之间的走时差；h 为地震震源深度；在固定地壳模型下 K 便是一个常数。可知，sPn 与 Pn 之间的走时差与震中距无关，与震源深度成正比。因此利用 sPn 与 Pn 之间的走时差可获得地震震源深度。根据甘肃地区地震波走时差的地壳模型[5]可知：$V_1=6.09$ km/s，$V_{S1}=3.56$ km/s，$V_2=8.17$ km/s，则 $K=2.757$，震源在地壳内的深度 $h=2.76\ \Delta t$。

2　sPn 震相在甘肃岷县地震分析中的应用

据中国地震台网中心测定，北京时间 2013 年 07 月 22 日 07 时 45 分，在甘肃省定西市岷县、漳县交界(北纬 34.5°，东经 104.2°)发生 6.6 级地震，震源深度约 20 km。震中距岷县约 15 km。截至 7 月 30 日 08 时，甘肃岷县漳县 6.6 级地震共记录到余震 1 066 次，其中 3.0 级以上余震 9 次，包括 5.0～5.9 级 1 次，4.0～4.9 级 1 次，3.0～3.9 级 7 次。

本文通过对 $M6.6$ 主震和 2 个 $M>4.0$ 较大余震震相的细致分析，得出在震中距大于 250 km 时，四川数字地震台网部分台站可记录到较为清晰的 sPn 震相。

（1）7 月 22 日 07 时 45 分，甘肃岷县发生 $M6.6$ 主震，甘肃台网速报的地震震源深度为 6 km，四川台网速报的地震震源深度为 20 km，两个台网速报的震源深度差竟达 14 km。图 2(a)是此次地震的震相分析图，其中四川蒙顶山、高县、安岳、美姑等台站的 sPn 震相较清晰，由这些台站计算得到的震源深

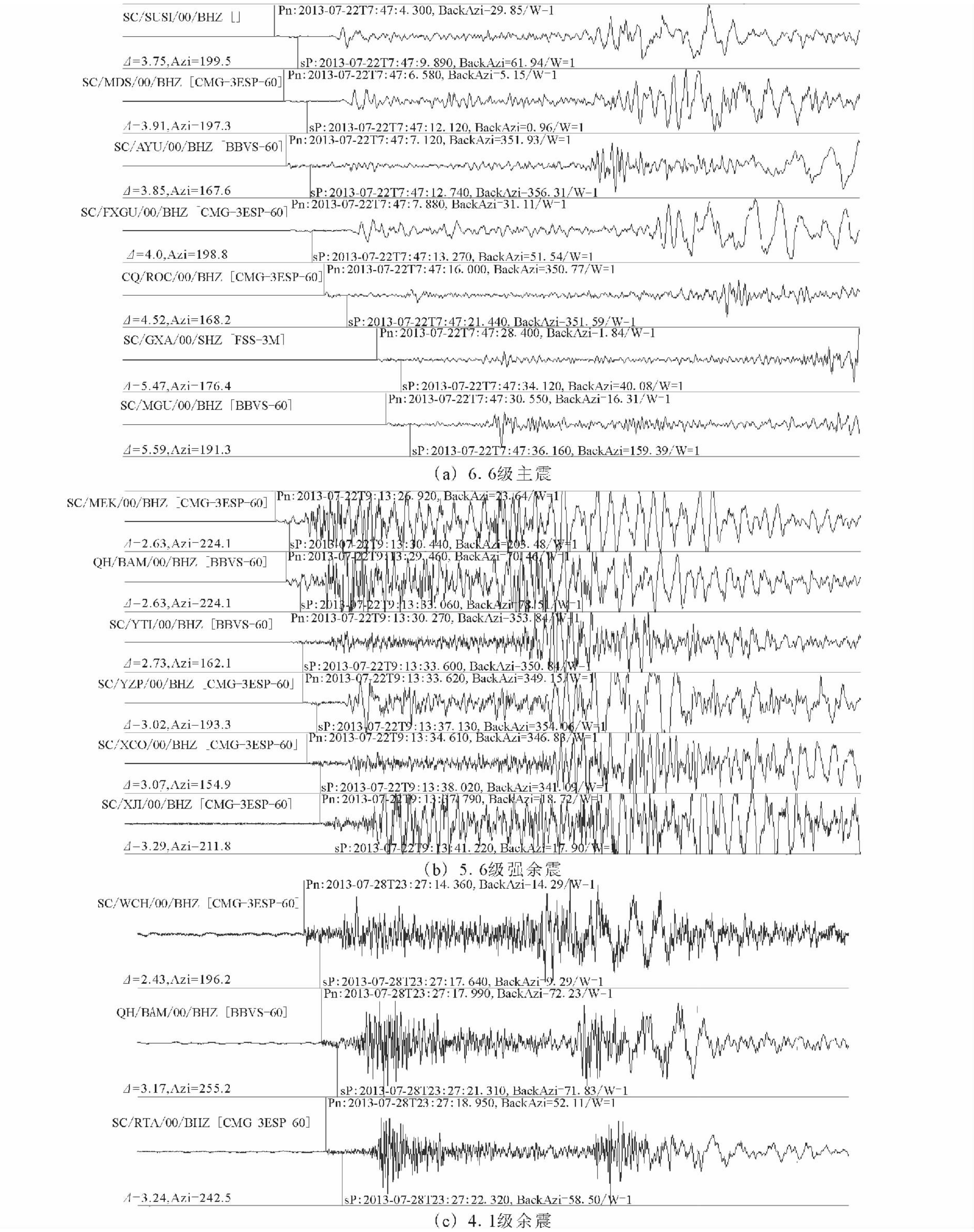

图 2 四川台网部分台站记录岷县 6.6 级地震及其强余震的 sPn 震相

Fig. 2 The sPn seismic phases recorded by stations in Sichuan province for the Minxian $M6.6$ earthquake and its some strong aftershocks

表 1　利用部分四川台站 sPn 震相重新测定岷县 *M*6.6 地震及其强余震的震源深度

Table 1　The focal depths of Minxian *M*6.6 earthquake and its some strong aftershockw based on the sPn seismic phases recorded by some stations in Sichuan province

地震	记录台站	震中距/(°)	T_{Pn}	T_{sPn}	$T_{sPn}-T_{Pn}$/s	h/km
*M*6.6 主震	SC/SUSI	4.4	07:47:04.30	07:47:09.89	5.59	15.4
	SC/MDS	4.56	07:47:06.58	07:47:12.12	5.54	15.3
	SC/AYU	4.57	07:47:07.12	07:47:12.74	5.62	15.5
	SC/FXGU	4.64	07:47:07.88	07:47:13.27	5.49	15.1
	CQ/ROC	5.25	07:47:16.00	07:47:21.44	5.44	15.0
	SC/GXA	6.19	07:47:28.40	07:47:34.12	5.72	15.8
	SC/MGU	6.27	07:47:30.55	07:47:36.16	5.69	15.7
	均值				5.57	15.4
*M*5.6 余震	SC/MEK	2.63	09:13:26.92	09:13:30.44	3.52	9.7
	QH/BAM	3.17	09:13:29.46	09:13:33.06	3.6	9.9
	SC/YTI	2.73	09:13:30.27	09:13:33.65	3.38	9.3
	SC/YZP	3.02	09:13:33.62	09:13:37.13	3.51	9.7
	SC/XCO	3.07	09:13:34.61	09:13:38.02	3.41	9.4
	SC/XJI	3.29	09:13:37.79	09:13:41.22	3.43	9.5
	均值				3.48	9.6
*M*4.1 余震	SC/WCH	2.43	23:27:14.36	23:27:17.64	3.28	9.1
	QH/BAM	3.17	23:27:17.99	23:27:21.31	3.32	9.2
	SC/RTA	3.24	23:27:18.95	23:27:22.32	3.37	9.3
	均值				3.32	9.2

度平均值为 15.4 km(表 1)。

(2) 7 月 22 日 09 时 12 分发生 *M*5.6 最大余震,甘肃台网速报的地震震源深度为 6 km,四川台网速报的地震震源深度为 9 km,震源深度差为 3 km。图 2(b)是此次地震的震相分析图,其中四川马尔康、盐亭、油榨坪、西充等台站的 sPn 震相较清晰,由这些台站计算得到的震源深度平均值为 9.6 km(表 1)

(3) 7 月 28 日 23 时 26 分发生 *M*4.1 余震,甘肃台网速报的地震震源深度为 6 km,四川台网速报的地震震源深度为 18 km,震源深度差为 12 km。图 2(c)相分析图,其中四川汶川、壤塘等台站的 sPn 震相较清晰,由此计算得到的震源深度为 9.2 km(表 1)

由上述可知:甘肃地震台网速报的这 3 个地震震源深度均是 6 km,主、余震震源深度未发生改变(即震源区域破裂过程没有发生变化);四川地震台网速报的这 3 个地震震源深度分别是 20 km、9 km、18 km,震源区域破裂过程发生了变化(先由深至浅,再由浅至深)。

本文通过对上述 3 个地震震源深度的重新计算,得到了比较精确的震源深度值,可以看出主震之后两次较大余震的震源深度明显变浅,这说明甘肃岷县 *M*6.6 地震震源区域破裂过程只是由深至浅的。由此可知:如果某一地区发生较大地震时,就可以通过本文中所介绍的方法对震后一段时间内深度 sPn 震相进行分析,并精确地计算出震源区余震的震源深度,这对余震活动性分析和快速判定地震的破坏程度都是很有必要的。利用此方法可以较精确确定地震的震源深度,比起常规方法[6-8],由于本方法采用了地表反射震相,增加了对深度的分辨率,因此具有独特的优势。

3　结论

(1) 本文运用多台 sPn－Pn 平均到时差方法来测定地震震源深度,其误差主要来源于震相识别的误差和地壳模型的误差,因此正确识别 sPn 与 Pn 震相是至关重要的。

(2) 在震中距大于 250 km 时,四川数字地震台网部分台站可记录到较为清晰的 sPn 震相。通过对甘肃岷县 2013 年 7 月 3 个 $M>4.0$ 地震震源深度的重新确定,得出 *M*6.6 主震的震源深度为 15.4 km,7 月 22 日 *M*5.6 最大余震的震源深度为 9.6 km,7 月 28 日 *M*4.1 余震的震源深度为 9.2 km,这两次较大余震震源深度较主震明显变浅,说明甘肃岷县 *M*6.6 地震震源区域破裂过程是由深至浅的。

(3) 利用深度震相获得较为精确的震源深度,可以为地震活动性分析及相对应的地震预测指标(如 b 值分析,p 值分析等)提供更为精确的指标,从而对地震预测和地震危险性分析提供基础资料。

参考文献(References)

[1] **马淑田,译.用模拟区域深度震相 sPg、sPmP 和 sPn 确定中小地震的震源深度**[J].**世界地震丛译**,2010,(6):51-73.
MA Shu-tian, translate. Focal Depth Determination for Moderate and Small Earthquahes by Modeling Regional Depth Phases sPg, sPmP, and sPn[J]. Translated World Seismology, 2010, (6):51-73.(in Chinese)

[2] **房明山,杜安陆,董孝平,等.用 sPn 震相测定震源深度**[J].**地震地磁观测与研究**,1995,16(5):13-18.
FANG Ming-shan, DU An-lu, DONG Xiao-ping, et al. Determination of Focal Depth with the sPn Phase[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1995, 16(5): 13-18.(in Chinese)

[3] **高立新,刘芳,赵蒙生,等.用 sPn 震相计算震源深度的初步分析与应用**[J].**西北地震学报**,2007,29(3):213-217.
GAO Li-xin, LIU Fang, ZHAO Meng-sheng et al. Primary Analysis on the Seismic Source Depth Determination Using sPn Phase and Its Application[J]. Northweastern Seismological Journal, 2007, 29(3):213-217.(in Chinese)

[4] **吴微微,苏金蓉,魏娅玲.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.
WU Wei-wei, SU Jin-rong, WEI Ya-ling. The Summarization of Research and Application of Determination of Focal Depth with the sPn Phase[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2012, 33(5):88-92.(in Chinese)

[5] **尹欣欣,陈继锋,刘佳敏.甘肃地区 sPn 震相研究及其震源深度计算**[J].**高原地震**,2013,25(1):31-34.
YIN Xin-xin, CHEN Ji-feng, LIU Jia-min. Study on the sPn Phase and Calculation of the Focal Depth in Gansu Province [J]. Plateau Earthquake Research, 2013, 25(1):31-34.(in Chinese)

[6] **万永革,李清河,李鸿吉,等.用遗传算法确定三维横向不均匀介质中的近震震源位置**[J].**西北地震学报**,1997,l9(2):7-14.
WAN Yong-ge, LI Qing-he, LI Hong-ji, et al. Hypocentral Locations of the near Earthquakes in 3-d Lateral Heterogeneous Medium Determined by Using the Genetic Algorithms[J]. Northwestern Seismological Journal, 1997, l9(2): 7-14.(in Chinese)

[7] **张 辉,王熠熙.2012 年 5 月 3 日金塔—阿拉善盟 5.4 级地震震源机制解**[J].**西北地震学报**,2012,34(2):205-206.
ZHANG Hui, WANG Yi-xi. Focal Mechanism of the Jintan—Alashanmeng *M*5.4 Earthquake on May 3, 2012[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2):205-206.(in Chinese)

[8] **李永红,胡新亮,许萍,等.以双差定位方法对郯城 级地震震中附近现代小震重新定位**[J].**西北地震学报**,2011,33(1):71-75.
LI Yong-hong, HU Xin-liang, XU Ping, et al. Relocation of Modern Small Earthquakes near the Epicenter of Tancheng Earthquake Using the Double Difference Earthquake Location Algorithm[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1):71-75.(in Chinese)