

2016 年青海门源 M_s 6.4 地震震源机制 与震源深度计算^{*}

李启雷¹, 李玉丽¹, 马 丽², 罗自浩²

(1. 青海省地震局, 青海 西宁 810001; 2. 青海省地震局 湟源地震台, 青海 湟源 812100)

摘要: 采用 CAP 方法, 反演了 2016 年 1 月 21 日门源 M_s 6.4 地震震源机制, 分析了震源机制解随震源深度的变化关系。计算结果显示, 门源 M_s 6.4 地震的发震断层是逆冲型断层, 最佳矩心深度为 11 km。为比较还反演了 2013 年 9 月 20 日门源 5.1 级地震的震源机制, 两次地震的断层走向和倾角基本一致。为进一步验证震源深度计算结果的可靠性, 利用滑动窗互相关技术提取 sPn 震相, 通过计算 sPn 与 Pn 的到时差计算震源深度, 得出的震源深度为 15.2 km。校正深度震相法因震相识别精度和速度模型影响会产生 10% ~ 15% 的误差后, 结果与 CAP 方法比较接近。

关键词: 门源 M_s 6.4 地震; CAP 方法; 震源机制; 震源深度; sPn 震相

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)增刊 1-0055-07

0 引言

2016 年 1 月 21 日 1 时 13 分, 在青海省海北州门源县 (37.68°N, 101.62°E) 发生 M_s 6.4 地震。青海省全境、甘肃省兰州市、武威市、张掖市、金昌市等地均有不同程度震感。地震造成 10 人轻伤, 600 户房屋受损。截至 5 月 30 日, 该次地震共发生余震 2 013 次, 最大余震 3.9 级。中国地震台网中心 (2016) 测定的主震的震源深度为 10 km, 哈佛大学 (2016) 通过快速震源机制解给出的震源深度为 13.9 km, 两者相差很大。震源深度作为震源的重要参数, 对其精确测定很有意义。因此, 为了确定 2016 年门源 M_s 6.4 地震的震源深度和发震机制, 了解震源区的受力状况, 本文使用了 CAP (Cut and Paste) 方法反演了此次地震的震源机制解。为进行对比, 还利用滑动窗互相关技术提取 sPn 震相, 通过计算 sPn 与 Pn 的到时差求取震源深度。

1 CAP 方法简介

CAP 方法是赵连社和 Helmberg 基于双力偶源的假设下提出的一个新的震源反演方法。该方法

将宽频带地震记录分解成体波 (Pnl) 和面波 (Snl) 两部分, 并赋予不同的权重, 在全球参数空间范围内利用格点搜索的方法反演地震震源机制, 对不同的波段数据分别做互相关, 得到不同深度上的震源机制和误差。当误差为极小值时对应的断层面解即为最佳震源机制解。

该方法可以同时反演地震的震源机制以及矩震级大小, 它的一大优势是反演结果对速度模型和地壳横向变化的依赖性相对较小, 对台站数量和方位角分布的要求较低。

2 数据和模型选取

2.1 台站与数据选取

青海数字遥测地震台网现在共有 89 个地震台站, 其中国家级数字台站 9 个、区域数字台站 30 个、企业台站 2 个、邻省台网台站 24 个 (图 1)。因为各台站仪器的放大倍数不一, 所以在利用 CAP 方法反演震源机制前需要去除仪器响应。门源 M_s 6.4 地震震中位于青海省海北州门源县, 距离甘肃省张掖市肃南县 5 km。加入甘肃地震台网的一些台站可以对地震震中形成较好的包围, 但是由于青海地震台网与甘肃地震台网台站在零极点采用、灵敏度设置及仪器响应级数等方面都存

^{*} 收稿日期: 2016-08-23.

基金项目: 中国地震局“三结合”课题 (152902) 资助。

在差异,造成甘肃多数台站数据无法使用,所以本文只使用了甘肃地震台网 QTS、HZZ 两个台站。青海省内选取震中距在 50 ~ 400 km 范围内的共 10 个台站进行研究。

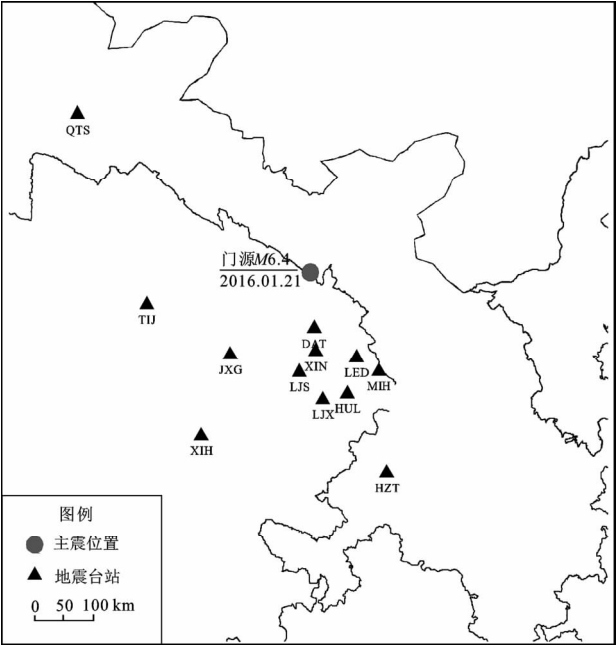


图 1 震中和本研究所选台站分布图
Fig. 1 Distribution map of epicenter of Menyuan $M_s6.4$ earthquake and selected stations in the study

2.2 地壳速度模型的选取

鉴于目前对青藏高原东北缘地壳速度结构的研究相对薄弱,本文采用 CRUST 2.0 全球地壳速度及密度模型进行格林函数计算 (Gabi *et al*, 2012),以进一步检验研究结果的有效性与可靠性。CRUST 2.0 是 CRUST 1.0 的升级版,提供了 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 分辨率的地壳速度结构,其分辨精度与结果更加可靠。

表 1 CRUST2.0 全球地壳速度模型

Tab. 1 Global CRUST2.0 crustal velocity model

层号	厚度/km	$V_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_s/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
1	3.5	3.81	1.94
2	0	3.9	2.1
3	13	6.2	3.6
4	12	6.4	3.6
5	12	6.8	3.8
6	0	8.2	4.7

3 反演结果与数据分析

本文计算得到的 2016 年 1 月 21 日青海门源 $M_s6.4$ 地震震源机制解为:节面 I 走向 157° ,倾角 34° ,滑动角 91° ;节面 II 走向 336° ,倾角为 56° ,滑动角 89° ;矩震级 $M_w5.72$;地震类型为逆冲断层。图 2 为震源机制解反演结果。表 2 为本文与中国地震台网中心 (CENC)、中国地震局地球物理研究所 (IGP - CEA) 与哈佛大学 (Harvard) 等国内外研究机构给出的本次地震震源机制解参数,本文所得结果与以上 3 个研究机构计算值接近。

图 3 为本次门源地震的波形拟合图,其中红实线表示理论地震图,黑线表示实际观测地震,波形下方的数字分别表示理论地震图相对观测地震图的相对移动时间和二者的相关系数,波形左侧的文字分别为台站名与震中距。8 个台站体波部分和面波部分共 40 个震相,相关系数平均值为 0.71,相关系数 0.6 以上 (含 0.6) 的震相有 32 个,占全部相关系数的 80%,属于强度相关。反演结果显示,理论地震图与观测地震图吻合得较好 (胡朝忠等, 2016)。

表 2 震源机制解的结果对比

Tab. 2 Comparison of the results of focal mechanism solutions

结果来源	节面 I/ ($^{\circ}$)			节面 II/ ($^{\circ}$)			P 轴/ ($^{\circ}$)		T 轴/ ($^{\circ}$)		B 轴/ ($^{\circ}$)	
	方向	倾角	滑动角	方向	倾角	滑动角	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角
本文	157	34	91	336	56	89	336.2	0.6	66.3	11.0	243.3	79.0
CENC	143	35	80	335	56	97	60	10	270	78	151	6
IGP - CEA	141	38	79	335	53	98	59	7	281	80	150	7
Harvard	134	43	68	343	51	109	59	4	315	75	150	15

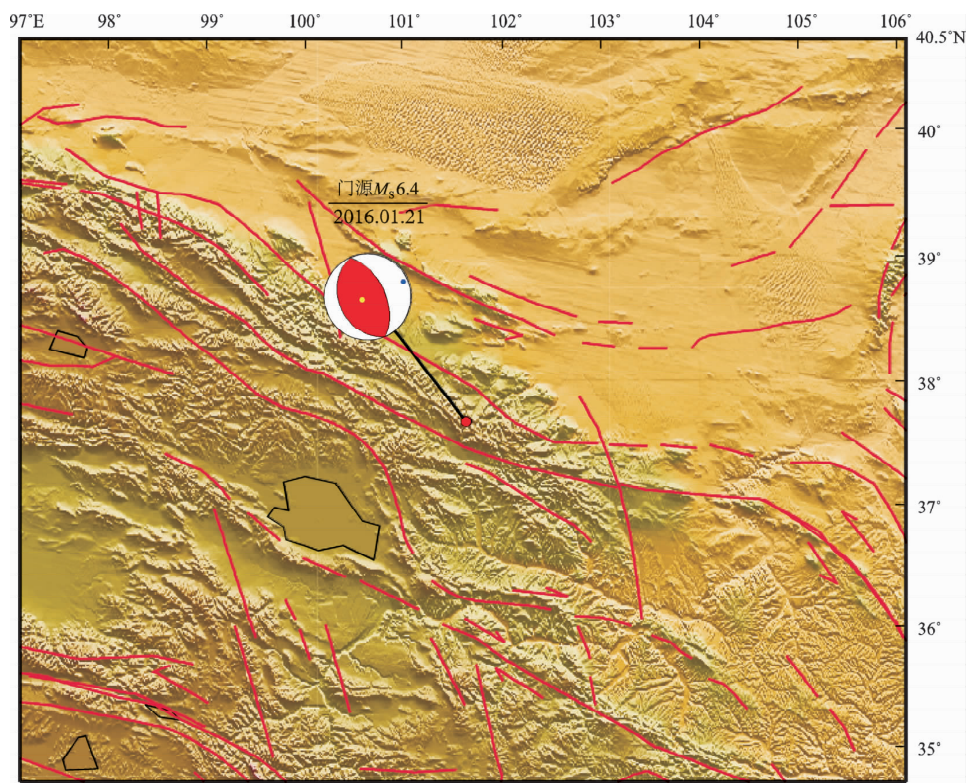


图 2 2016 年 1 月 21 日门源 $M_s6.4$ 地震的震源机制解反演结果
Fig. 2 Inversion results of the focal mechanism solution of the Qinghai Menyuan $M_s6.4$ earthquake on Jan. 21, 2016

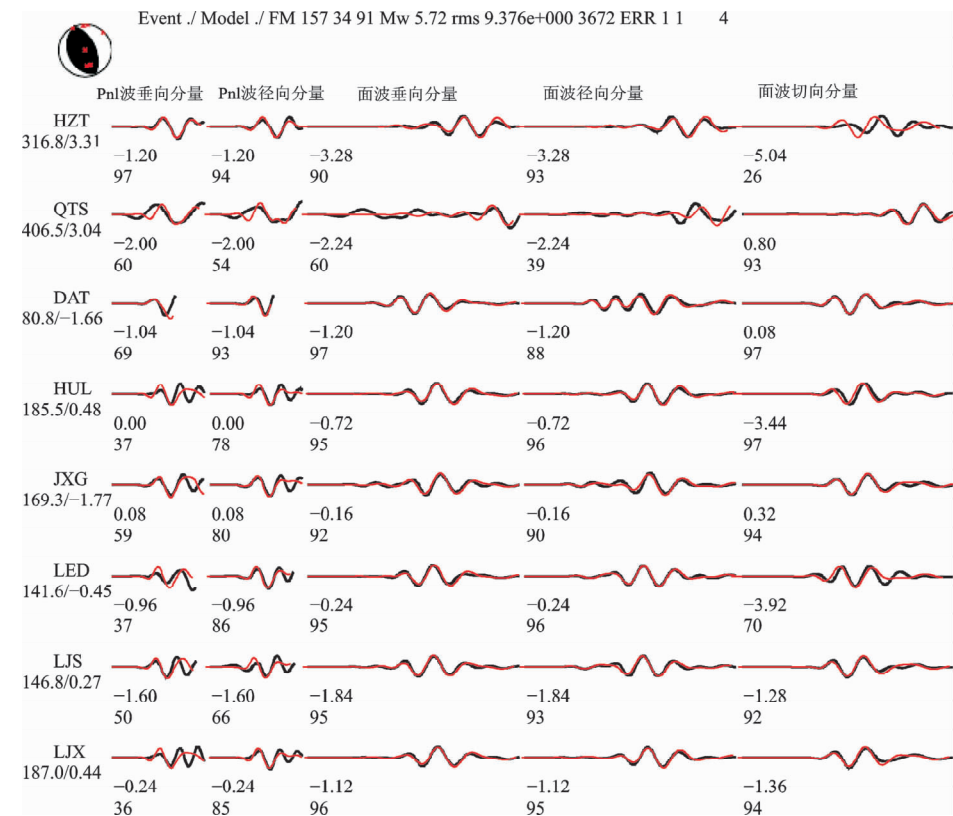


图 3 波形拟合图
Fig. 3 Waveform fitting diagram

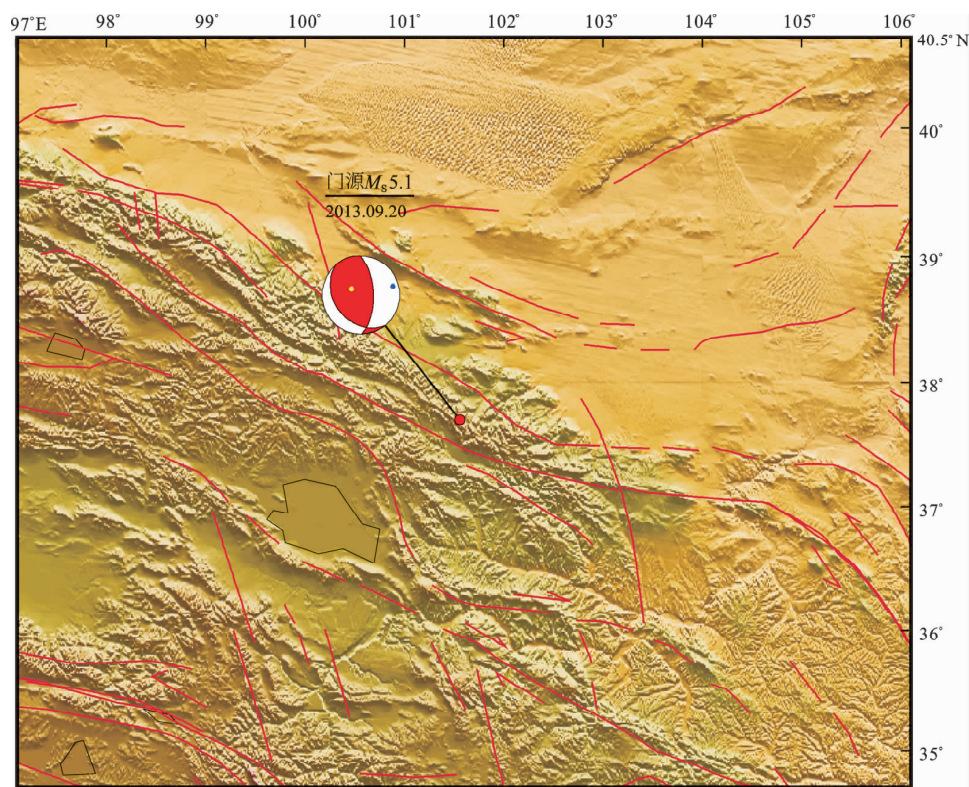


图 5 2013 年 9 月 20 日青海门源 $M_s 5.1$ 地震的震源机制解反演结果

Fig. 5 Inversion of the focal mechanism solution of the Qinghai Menyuan $M_s 5.1$ earthquake on Sep. 20, 2013

长内的波形进行互相关计算。然后 16 个台站数据进行两两组对, 计算出 120 条互相关系数, 经过叠加、归一化后得到 Pn 与 sPn 震相的相关系数 (图 6)。

从图 6 中可以看到 2 个明显的波峰, 峰值相关系数分别为 1.0、0.91, 这 2 个波峰分别代表通过波形互相关技术找到的 Pn、sPn 震相, 由此计算出 Pn 与 sPn 的到时差为 5.98 s, 进而计算出震源深度为 16.6 km。但是, 从图中可以看出, 由于 sPn 震相起始较弱, 而波形互相关法总是寻找相关系数最大处标注 sPn 震相, 故存在读取误差, 需要手工校正。通过分析, sPn 震相的位置需向前移动约 0.5 s, 校正后 Pn 与 sPn 的到时差为 5.48 s, 震源深度约为 15.2 km。据 Ma (2010) 研究结果, 地壳模型误差引起的震源深度误差约为 10%, 所以这次地震震源深度的校正值约为 1.5 km。

6 结论与讨论

本文使用青海和甘肃台网的宽频带台站数字记录, 利用 CAP 方法反演了 2016 年 1 月 21 日门源 $M_s 6.4$ 地震的震源机制和震源深度, 反演结果显示该次地震为逆冲断层, 震源深度为 11 km, 属

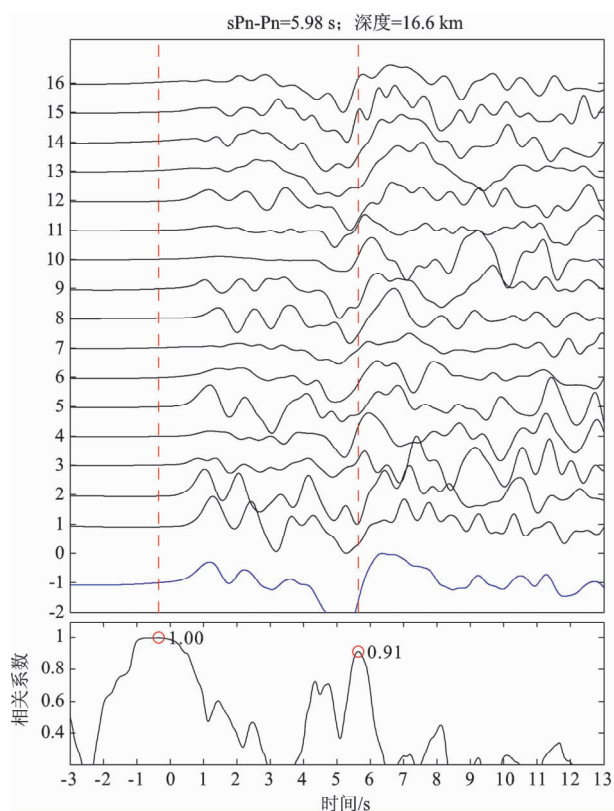


图 6 波形与相关系数图

Fig. 6 Waveforms and correlation coefficients

浅源地震。为方便比较,采用滑动窗互相关技术提取 sPn 震相,通过计算 sPn 与 Pn 的到时差求的震源深度约 15.2 km。

(1) CAP 方法反演结果显示,本次地震走向为 157° ,发震断层是近南北走向、逆冲型断层,这与中国地震局地震预测研究所现场房屋震害调查结论相符。这说明快速准确产出震源机制解可以为震后减灾提供具有价值的指导意见。另外,反演还获取了误差及震源机制解与震源深度的变化关系图,从图中可以看出震源机制解几乎不随深度变化,矩震级随震源深度增加呈现出逐渐变小的趋势。通过与哈佛大学作出的震源机制解比较,本次计算出的矩震级和震源深度都比哈佛大学的结果要小,这与徐志国等(2007)和美国哈佛大学快速震源机制解对比结果一致。

(2) 通过比较,发现本文计算的震源机制解与 2013 年 9 月 20 日 5.1 级地震的震源机制解基本一致,台站分布的不理想并未显著影响反演结果。这两次地震的断层走向和倾角差别很小,滑动角相差较大,可能是因为断层的上、下盘相对运动发生了变化。

(3) 本文利用深度震相到时差法计算出的震源深度要明显大于 CAP 方法计算的深度。一方面因为本次地震深度震相不发育,且 sPn 震相一般周期较大,导致程序在寻找 sPn 震相位置时定位在实际震相的后面,使得计算出的 sPn 与 Pn 到时差变大,进而计算出的震源深度值也随之变大;另一方面由于有关青藏高原东北缘速度模型的相关研究较少,可能采用的速度模型与实际的速度模型相差较大,使得在计算深度时有 10% ~ 15% 的误差;另外,震相读取精度也会引起计算误差。

本文使用的震源机制解反演软件 SEIS_CAP 由中国地震局地震预测研究所陈阳等以 CAP 方法和

软件为核心开发,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- 蔡杏辉,邵平荣. 2011. 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,1(1):25-28.
- 房明山,杜安陆,董孝平等. 1995. 用 sPn 震相测定近震震源深度[J]. 地震地磁观测与研究,16(5):13-18.
- 哈佛大学. 2016. 美国哈佛大学(HRV)快速震源机制解[DB/OL]. (2016-01-28)[2016-08-23]. http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data/hrv_qcmt.jsp.
- 胡朝忠,杨攀新,李智敏等. 2016. 2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震的发震机制探讨[J]. 地球物理学报,59(5):1637-1646.
- 李春燕,徐辉. 2015. 2014 年阿拉善块体西缘两次中强地震震源机制解[J]. 地震工程学报,37(4):1129-1131.
- 龙锋,张永久,闻学泽等. 2010. 2008 年 8 月 30 日攀枝花—会理 6.1 级地震序列 $M_L \geq 4.0$ 事件的震源机制解[J]. 地球物理学报,53(12):2852-2860.
- 冉慧敏,上官文明. 2013. 2013 年 1 月 29 日哈萨克斯坦 $M_s 6.1$ 地震序列的震源机制解分析[J]. 内陆学报,27(3):242-250.
- 谢祖军,郑勇,倪四道等. 2012. 2011 年 1 月 19 日安庆 $M_L 4.8$ 地震的震源机制解和深度研究[J]. 地球物理学报,55(5):1624-1634.
- 徐纪人,姚立珣,汪进等. 1986. 1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级地震及其强余震的震源机制解[J]. 西北地震学报,8(4):82-84.
- 徐志国,刘瑞风,任泉等. 2007. 中国地震台网中心与美国哈佛大学快速震源机制解的对比[J]. 地震地磁观测与研究,28(4):1-6.
- 赵凌云,邓津,陈俊华等. 2010. 基于 CAP 方法的震源机制研究[J]. 长江科学院院报,27(5):81-84.
- 中国地震台网中心. 2016. 地震速报数据[DB/OL]. (2016-01-21)[2016-08-23]. <http://www.csndmc.ac.cn/newweb/index.jsp>.
- Gabi L, Guy M, Christine R. 2012. CRUST 2.0, A New Global Crustal Model at 2x2 Degrees[CP/OL]. (2012-08)[2016-08-23]. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>.
- Ma S T. 2010. Focal depth determination for moderate and small earthquakes by modeling regional depth phases sPg, sPmP, and sPn[J]. BSSA,100(3):1073-1088.
- Salkia C K. 2000. A method for path calibrati - on using regional and teleseismic broadband seismograms; application to the 21 May 1997 Jabalpur, India earthquakes ($M_w 5.8$) [J]. Seismology,79(9):1301-1315.

Calculation of Focal Mechanism and Source Depth of Qinghai Menyuan $M_s6.4$ Earthquake in 2016

LI Qilei¹, LI Yuli¹, MA Li², LUO Zihao²

(1. *Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China*)

(2. *Huangyuan Seismic Station, Earthquake Administration of Qinghai Province, Huangyuan 812100, Qinghai, China*)

Abstract

By using the CAP (cut and paste) method, we inversed the focal mechanism solution of Menyuan $M_s6.4$ earthquake on Jan. 21, 2016, and analyzed its variation relationship with the source depth. The calculation results show that the seismogenic fault of the earthquake is a thrust type fault, and the optimum moment depth is 11 km. We also inverse the focal mechanism solution of Menyuan $M_s5.1$ earthquake on Sep. 20, 2013 and find that the strikes and dip angles of two Menyuan earthquakes are basically the same. In order to verify the reliability of the calculation results of the focal depth, we extract the sPn phase by the sliding window cross-correlation technology. Then we obtain the focal depth is 15.2 km by calculating the arrival time difference between sPn and Pn phases. However, because of the accuracy of phase identification and speed model of focal depth-phase method could induce the error of 10% ~ 15%, the focal depth is close to the results calculated by the CAP method after correction.

Key words: Menyuan $M_s6.4$ earthquake; CAP method; focal mechanism; source depth; sPn phase