

# 基于地震波反演研究南天山中西段的震源深度<sup>1</sup>

张志斌 朱浩清 李艳永

(新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011)

**摘要** 南天山中西段位于塔里木块体与西昆仑之间, 地震频发。本文利用基于波形反演的 CAP 方法对南天山中西段地震震源深度进行了反演, 得到的震源深度与用到时定位得到的震源深度进行了对比, 发现用到时定位得到的震源深度整体偏浅。同时, 南天山中段山前地区震源深度比南天山中段中部地区震源深度浅, 南天山由西往东呈现震源深度变浅的趋势。南天山中西段震源深度整体分布在 15—23km, 有明显的地震活动深度下界。

**关键词:** 震源深度 CAP 方法 南天山中西段

## 引言

地震的发震时间、空间位置、震级是描述地震的基本参数 (中国地震局监测预报司, 2007), 而地震的空间位置包含水平位置和垂直深度; 大部分观测台站主要分布在水平位置上, 垂直方位分布很少; 在三维空间内观测台站不可能包围震源, 因此精确测定地震的震源深度成为地震定位的难点。但是震源深度又是地震学家最为关注的参数之一, 精确测定震源深度对研究地震的孕育机理、地震救灾、地壳深部构造和大陆动力学等方面都有重要的意义 (罗艳等, 2013)。震源参数的精确测定受多方面的影响, 如台网密度、台站分布和地壳速度结构的准确性等都会影响震源参数的精确测定, 所以存在一定的不确定性。为了将这种不确定性降低到最低, 本文选择震源深度测定精度相对高的地震事件, 舍弃了测定精度较低的地震事件, 试图更加真实地反映南天山中西段的震源深度分布。

新疆地处印度板块向亚欧板块俯冲的前缘地带, 地域辽阔, 占国土面积的六分之一, 地震活动频发; 而新疆测震台站的空间分布相对全国而言较稀疏, 往往在地震定位过程中测震台站没有对震源深度形成很好的约束。南天山中西段位于帕米尔高原、塔里木盆地及天山褶皱带等 3 个构造单元的衔接带, 印度板块向欧亚板块碰撞挤压造成了很多逆断层, 刚性的塔

**1 基金项目** 地震科技星火计划青年项目 (XH13028Y) 和中国地震局 2015 年度测震台网青年骨干培养专项 (20150429) 共同资助

**[收稿日期]** 2015-05-25

**[作者简介]** 张志斌, 男, 生于 1988 年。2011 年毕业于中国地质大学 (武汉) 地球物理系, 助理级工程师。主要从事测震台网地震监测与系统维护工作。E-mail: 306920839@qq.com

里木盆地向天山下的汇聚、俯冲导致地震频发,构造发育,地壳结构复杂(艾力夏提·玉山等,2014)。因此,精确测定南天山中西段震源深度,对南天山地区活动地块的下部边界、地壳的发震层厚度、地震成因及地震危险性分析可提供重要的基础资料。

## 1 资料与方法

本文选取南天山中西段(39.64°—41.03°N, 74.0°—79.65°E)作为研究区域,选取从2010年1月到2014年8月所有 $M_S3.0$ 以上地震,舍弃较小的地震事件,试图通过精确测定震源深度的地震样本进行统计平均,给出研究区域地震构造的平均深度,并分析其成因。所选取的地震占到同时期新疆全境 $M_S3.0$ 以上地震的六分之一,可充分体现研究区域地质构造活动活跃,地震频发。

新疆台网自“十五”测震网络完成后,日常地震编目与速报均采用广东省地震局研发的MSDP地震交互分析处理软件进行日常的业务工作,受限于新疆区域大、地壳结构复杂、南北天山地质结构差异大等特点,至今还没有适合新疆地区的速度结构。地震定位始终采用最原始的3400走时表,结合单纯型或Locsat定位方法进行地震定位。在运用单纯型或Locsat定位方法进行地震定位时,又受限于定位方法的算法和所采用的走时表,震源深度都集中在10km左右的范围内,因此部分地震学专家对此曾提出过异议。故本研究对南天山中西段 $M_S>3.0$ 地震震源深度进行精确研究时,得出的基于波形反演方法的震源深度,对比了用走时方法得到的震源深度,以期得到震源深度的分布状态,为以后的地震定位和地震灾害评估提供重要的参数。

在稀疏台网下对震源深度测定是一个难点,其研究方法分为基于走时和基于波形两大类。利用地震波中包含的各种震相的偏震、震幅、频谱以及全波形信息都可以确定震源深度,从而得到较高精度的结果。比较常用的方法有深度震相法(任克新等,2004)、面波与体波振幅比法(罗艳等,2011)、P波偏振和尾波强度等(罗艳等,2013)。针对不同的震级、震中距范围和不同的波形质量,可以选择不同的方法。本研究区域地壳结构复杂,台站分布相对稀疏,大多数地震深度震相无法识别;然而随着地震学家对震源机制理论和方法的研究日渐深入,利用地震波形进行反演震源机制解,即使在台网相对稀疏、数据资料相对有限的情况下,也能得到较可靠的结果(张辉等,2012; Thio 等, 1995)。南天山中西段台站分布相对稀疏,区域地质构造复杂,故本文采用近年来国际上发展较完善的“剪切-粘贴方法”(Cat and Paste)进行计算。

## 2 方法原理

CAP (Cat and Paste)方法是由Zhao and Helmberger在1994年提出的,并在1996年进行了改进,主要思想是将区域范围观测波形分解成Pnl, SH波和面波部分进行分别拟合,移动每个部分的波形,使其吻合最好(Zhao等,1994; Zhu等,1996a; 1996b)。

对于双力偶点源模型,同样将自有表面距震源 $r$ 处的位移分别表示为3个单位矩张量(1个直立纯走滑、1个直立纯逆断层、1个45°的斜滑断层)产生的位移。理论地震图可用下式表示:

$$s(t) = M_0 \sum_{i=1}^3 A_i(\theta - \phi_i, \delta, \lambda) G_i(h, t) \quad (1)$$

式中, $M_0$ 为标量地震矩; $G_i$ 为格林函数; $A_i$ 为震源辐射花样信息; $\theta$ 为台站方位角; $\phi_i$ 、 $\delta$ 、

$\lambda$  分别代表断层的走向、倾角和滑动角。

最后当观测与理论地震波形拟合达到最佳时，从反演结果可直接得到断层面解：走向、倾角、滑动角。

CAP 方法具有如下优点：①所需台站少、反演结果对速度模型和地壳结构横向变化依赖性相对较小；②综合利用了近震中的体波、面波信息，约束全面；③分别对 Pnl 和面波赋以不同权重，充分利用 Pnl 和面波的振幅比，对地震深度及机制解有更好的约束；④引入距离影响因子，避免反演主要受近台记录影响；⑤在误差定义中使用绝对振幅而不是归一化振幅，能更好地识别震相的节面，避免振幅归一化带来的其他局部最小值解，能够获取更准确的机制解。

### 3 数据处理

本文选取 2010 年 1 月到 2014 年 8 月南天山中西段所有  $M_S > 3.0$  地震进行震源机制解计算。使用了新疆测震区域台网的宽频带数字地震波形记录，在综合考虑震中方位角的覆盖以及资料信噪比的要求下，对每个地震选取周边 10 个左右的宽频带地震计的数据进行处理，对挑选出的宽频带数据首先去除地震计的仪器响应；积分得到位移记录；旋转至大圆路径得到径向、切向和垂向的位移记录(冉慧敏等, 2013)；再对 Pnl 部分和面波部分分别进行滤波，其中 Pnl 部分使用 0.02—0.15Hz 的滤波频带，面波部分使用 0.03—0.1Hz 的 4 阶 Butterworth 带通滤波器滤波 (Tan 等, 2006)，同时，对理论地震图进行相同的频带滤波，然后进行拟合。台站分布如图 1 所示。

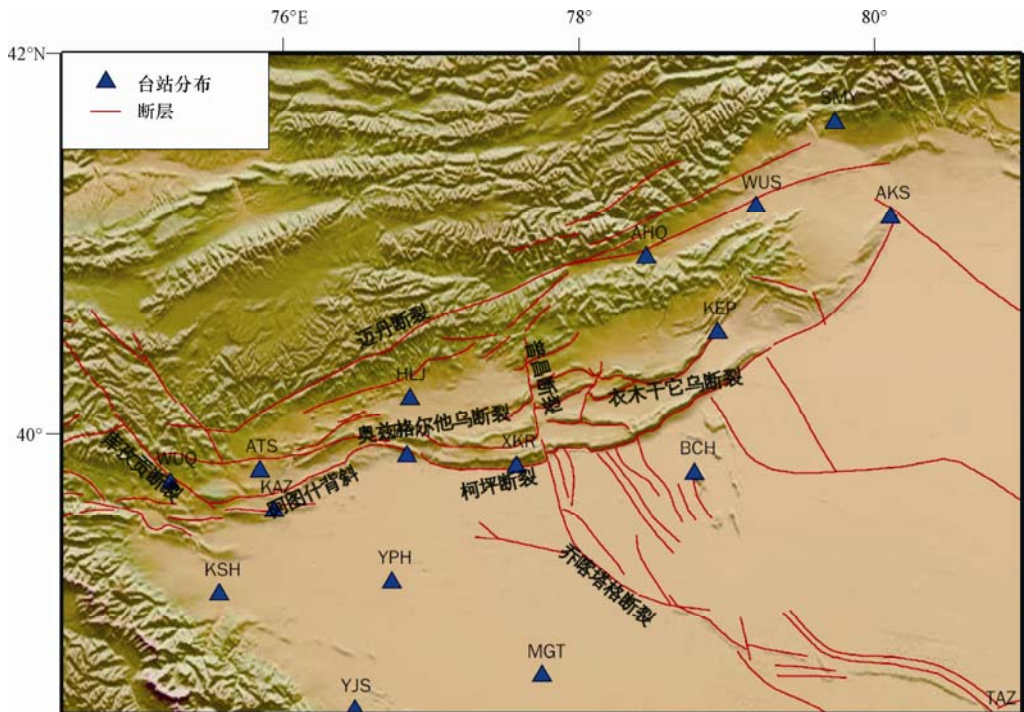


图 1 南天山中西段台站分布图

Fig. 1 Distribution of monitoring stations in west-middle section of south Tianshan

对于理论地震图的计算，采用了频率-波数法计算各种情况下的格林函数 (Dreger

等, 1993)。采用 Crust2.0 速度结构模型, 计算格林函数。Crust2.0 将本研究区域分为 5 个部分, 每部分经度或纬度之间相差  $2^\circ$ , 每个部分的速度结构有稍微的差别, 这样可得到研究区一维速度结构模型 (见表 1)。震源区地壳厚度为 50—60km, 平均厚度为 54km。

表 1 南天山中西段地壳速度模型

Table 1 Crustal velocity structure of west-middle section of south Tianshan

RO:E76°N40°			PJ:E78°N40°			PD:E80°N40°			R4: E78°N42°			PE:E74°N40°		
层厚	$V_p$	$V_s$	层厚	$V_p$	$V_s$	层厚	$V_p$	$V_s$	层厚	$V_p$	$V_s$	层厚	$V_p$	$V_s$
0.5	2.5	1.2	1.0	2.5	1.2	1.0	2.5	1.2	0	2.5	1.2	0	2.5	1.2
0.5	4.0	2.1	3.5	4.1	2.1	1.0	4.0	2.1	0	4.0	2.1	0	4.0	2.1
18	6.0	3.5	20.5	6.1	3.5	20	6.1	3.5	19	6.0	3.5	20	6.0	3.5
20	6.4	3.7	20	6.3	3.6	20	6.3	3.6	18	6.4	3.7	20	6.4	3.7
21	7.1	3.9	10	7.2	4.0	8	7.2	4.0	18	7.1	3.9	20	7.1	3.9
0	8.0	4.6	0	8.0	4.6	0	8.0	4.6	0	8.0	4.6	0	8.0	4.6

注: 表中厚度单位为 km; 速度单位 km/s。

#### 4 震源机制解及深度反演

根据公式 (1) 给出的计算方法, 由误差目标函数在参数的全空间范围内搜索最佳震源机制解及震源深度。反演过程中在保持原始数据不做改动的情况下, 为了保持研究结果真实可靠, 去除了地震记录信号有干扰、背景噪声大和记录台站太少等因素影响震源机制解可靠性的地震记录。2010 年 1 月到 2014 年 8 月研究区共发生了 104 个  $M_S > 3.0$  地震, 去除信噪比差的地震记录后, 总共有 62 个地震可以满足信噪比的要求。表 2 给出了剔除个别信噪比差的地震后, 自 2010 年以来本区  $M_S > 3.0$  地震的震源机制解及矩心深度, 所得到的震源深度反演误差都控制在小于  $0.1e+02$ , 反演结果是可靠的。

表 2 南天山中西段  $M_S > 3.0$  地震震源机制解及矩心深度

Table 2 Focal mechanism and moment depth of earthquakes ( $M_S > 3.0$ ) in west-middle section of south Tianshan

编号	发震日期 (年-月-日)	发震时间 (时-分-秒)	震中位置		震级 ( $M_S$ )	震源深度 (km)	震源机制解			矩心深度 (km)
			经度 ( $^\circ E$ )	纬度 ( $^\circ N$ )			走向 ( $^\circ$ )	倾角 ( $^\circ$ )	滑动角 ( $^\circ$ )	
1	2010-02-19	02:32:17	78.66	40.46	4.0	12.67	293	23	126	13.0
2	2010-04-15	08:55:49	76.56	40.11	4.05	16.0	223	61	12	10.5
3	2010-05-20	17:31:01	76.97	39.97	3.19	7.25	20	80	167	8.0
4	2010-05-23	11:02:17	78.28	40.02	4.22	7.16	295	43	164	10.0
5	2010-05-27	18:01:00	78.29	40.03	3.73	6.64	137	80	-13	19.0
6	2010-05-30	14:15:59	77.13	40.17	3.78	6.41	317	15	142	14.0
7	2010-06-10	14:38:02	74.70	39.89	5.24	8.72	284	60	87	26.0

续表

编号	发震日期 (年-月-日)	发震时间 (时-分-秒)	震中位置		震级 ( $M_s$ )	震源深度 (km)	震源机制解			矩心深度 (km)
			经度 (°E)	纬度 (°N)			走向 (°)	倾角 (°)	滑动角 (°)	
8	2010-08-02	00:46:55	77.38	39.95	3.36	4.2	343	54	-3	11.0
9	2010-08-21	07:19:48	74.83	40.01	3.75	6.82	256	80	-4	16.5
10	2010-11-16	01:48:31	76.89	40.41	3.63	9.86	97	22	-122	33.0
11	2010-12-06	22:46:58	76.46	40.36	3.35	11.14	0	80	-19	15.0
12	2011-03-17	23:34:30	79.09	40.38	4.49	5.83	234	37	82	6.0
13	2011-05-27	20:01:35	75.38	39.78	3.37	10.0	282	21	120	16.0
14	2011-08-11	18:06:28	77.19	39.85	5.53	9.73	285	40	114	10.0
15	2011-08-19	10:49:37	77.16	39.92	3.18	9.98	264	38	150	10.0
16	2011-09-08	08:15:50	75.36	39.91	3.40	7.47	305	13	-44	14.0
17	2011-10-25	16:42:00	77.74	40.60	3.15	10.0	101	80	-13	20.0
18	2012-01-03	15:39:56	77.34	39.94	3.81	9.18	65	80	44	16.0
19	2012-02-06	10:16:53	75.76	39.75	3.3	6.93	346	66	47	10.0
20	2012-03-10	21:00:16	77.29	40.30	3.14	3.47	344	17	156	12.0
21	2012-03-20	14:24:46	75.74	40.16	3.41	9.99	116	80	-3	12.5
22	2012-03-23	23:17:24	77.33	40.20	3.35	5.14	340	43	158	14.0
23	2012-04-03	23:45:07	75.21	39.95	3.16	5.7	220	36	154	11.0
24	2012-04-11	13:59:57	75.06	39.95	3.47	7.78	225	80	164	8.0
25	2012-04-13	14:47:57	75.20	39.94	3.65	6.57	0	16	-160	24.1
26	2012-04-18	22:47:58	77.16	39.94	4.04	7.12	275	36	147	17.0
27	2012-05-24	04:55:26	77.20	40.03	3.25	10.75	260	64	44	20.0
28	2012-05-26	23:21:21	77.84	40.10	3.48	7.95	76	18	-57	15.0
29	2012-06-01	20:32:21	74.93	39.78	5.11	9.66	123	55	29	30.0
30	2012-06-14	11:08:08	78.06	40.30	3.46	9.26	203	62	34	16.0
31	2012-08-01	17:52:19	75.50	39.73	4.89	7.29	284	23	136	29.5
32	2012-08-01	18:14:22	75.45	39.70	3.08	6.18	326	16	160	31.0
33	2012-08-11	17:34:19	78.17	39.97	5.03	7.90	35	54	-13	24.0
34	2012-08-11	17:56:39	78.11	39.96	3.41	9.94	315	80	136	26.0
35	2012-10-25	15:05:49	78.36	39.94	3.55	2.0	139	62	134	30.0
36	2012-10-26	09:52:55	75.80	40.08	3.58	10.05	280	80	165	35
37	2012-11-04	22:31:41	75.22	39.99	3.28	8.37	56	80	14	8.0
38	2012-12-16	18:29:31	77.91	40.04	4.67	6.67	315	14	-180	12.0
39	2012-12-30	23:30:42	75.39	39.95	3.09	8.8	117	80	-167	20.0
40	2013-01-13	04:50:59	78.21	40.32	3.4	1.7	0	80	-19	15.0
41	2013-01-26	23:41:13	77.35	39.91	4.1	6.1	275	65	26	15.0
42	2013-02-18	21:00:28	77.80	40.15	4.44	8.06	60	80	79	12.0
43	2013-02-18	21:33:46	77.75	40.15	3.28	9.28	239	80	-166	15.0

续表

编号	发震日期 (年-月-日)	发震时间 (时-分-秒)	震中位置		震级 ( $M_S$ )	震源深度 (km)	震源机制解			矩心深度 (km)
			经度 ( $^{\circ}E$ )	纬度 ( $^{\circ}N$ )			走向 ( $^{\circ}$ )	倾角 ( $^{\circ}$ )	滑动角 ( $^{\circ}$ )	
44	2013-02-19	05:24:11	77.74	40.10	4.44	8.14	62	80	165	13.0
45	2013-03-11	11:01:37	77.47	40.19	5.21	8.15	339	80	20	19.0
46	2013-04-11	02:56:20	77.86	40.93	3.13	7.97	281	80	-166	17.0
47	2013-06-04	22:35:25	74.76	39.89	3.8	8.26	298	21	141	39.4
48	2013-08-03	16:15:20	78.73	41.02	3.61	7.2	322	60	35	16.0
49	2013-08-04	00:49:14	78.09	40.01	3.53	8.36	272	62	-102	12.0
50	2013-11-04	16:04:36	75.52	39.79	4.14	3.81	327	40	153	58.0
51	2013-12-07	03:37:16	78.92	40.43	3.43	13.09	346	40	-142	16.0
52	2013-12-09	09:43:51	77.24	40.31	3.02	9.17	142	66	21	23.0
53	2013-12-14	14:33:22	75.68	39.64	3.26	10.0	0	80	-180	28.6
54	2014-04-05	07:54:32	77.36	40.39	3.02	8.08	281	80	13	18.0
55	2014-04-10	22:46:17	77.41	40.36	3.27	8.38	184	80	-180	13.0
56	2014-05-01	15:28:37	77.25	40.45	3.47	7.17	119	48	152	21.0
57	2014-05-05	04:23:30	77.64	40.62	4.8	8.81	257	25	63	15.0
58	2014-05-07	03:26:48	75.50	39.75	3.37	7.7	321	17	159	22.5
59	2014-05-20	22:26:46	77.61	40.63	3.34	5.91	62	56	-161	32.0
60	2014-06-21	03:35:55	75.98	40.16	4.16	6.86	122	40	-180	22.0
61	2014-07-17	12:12:25	77.24	40.54	3.17	10.92	124	80	-44	21.0
62	2014-08-13	16:17:31	78.74	41.03	3.52	9.46	261	25	98	17.0

注：表中震源深度取自地震目录，由单纯型或 Locsat 给出，震源机制解给出的是节面 1 的解，矩心深度由 CAP 方法算出。

表 2 中给出了研究区 62 次地震的震源机制解及矩心深度，从表 2 中可以看出，研究区主要以走滑型和走滑兼逆断层型地震为主，其中走滑兼逆断层型地震占了 48%。同时，结合研究区的地质构造主要分布有柯坪断裂、普昌断裂、奥兹格尔他乌断裂、阿图什背斜等一系列走滑断层、逆断层和逆冲断层，由震源机制解结合这些地质资料分析地震的发震断层。以 2011 年 8 月 11 日 18 点 06 分阿图什  $M_S5.5$  地震为例，地震发生在柯坪断裂带附近，分析震源机制解，可得到其中一个截面的走向、倾角和滑动角分别为： $74^{\circ}$ 、 $54^{\circ}$ 、 $71^{\circ}$ ；再结合《新疆通志·地震志》（新疆维吾尔自治区地方志编纂委员会，2002）中有关柯坪断裂的描述，断层走向 NEE 向，断层倾角  $40^{\circ}$ — $60^{\circ}$ ，属于左行走滑逆断层，此次地震受控于柯坪断裂，是由柯坪断裂引起的，矩心深度 10km。图 2—图 5 分别选出了研究区 62 次地震中的 4 次地震的波形拟合结果。

图 2 为 2011 年 8 月 19 日新疆阿图什  $M_S3.2$  地震；图 3 为 2012 年 6 月 1 日新疆乌恰  $M_S5.1$  地震；图 4 为 2012 年 8 月 11 日新疆阿图什  $M_S5.0$  地震；图 5 为 2014 年 5 月 5 日新疆阿合奇  $M_S4.8$  地震；理论地震图为红实线，观测地震图为黑实线，波形左侧为台站名及台站的方位角，波形下面第一行数字为理论地震图相对观测地震图移动时间 (S)，第二行数字为二者的

相关系数。

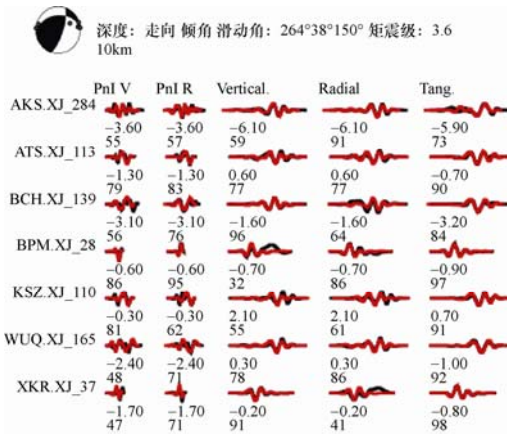


图2 CAP方法反演地震波形拟合结果图

Fig.2 The fitting result of seismic waveform of Atushi  $M_{5.3.2}$  earthquake by CAP method

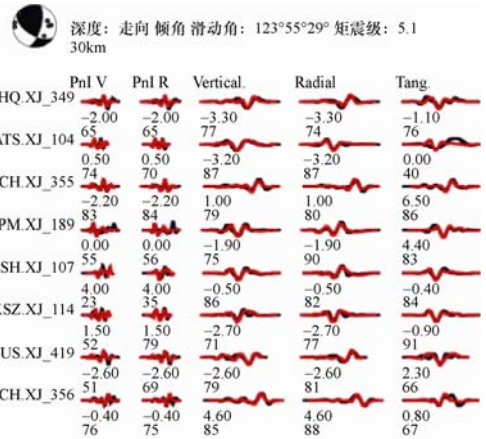


图3 CAP方法反演地震波形拟合结果图

Fig.3 The fitting result of seismic waveform of Wujia  $M_{5.1}$  earthquake by CAP method

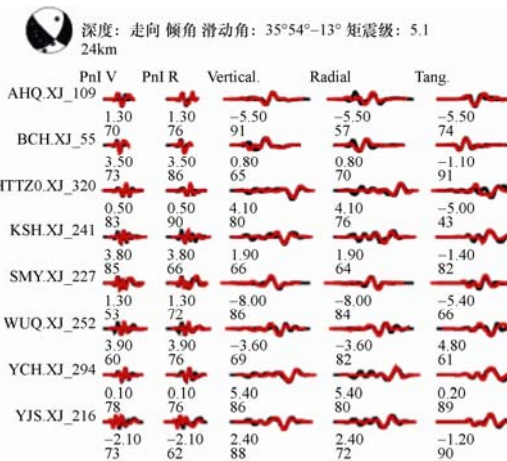


图4 CAP方法反演地震波形拟合结果图

Fig.4 The fitting result of seismic waveform of Atushi  $M_{5.0}$  earthquake by CAP method

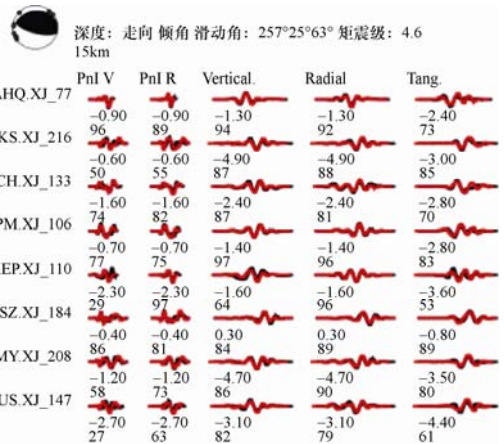


图5 CAP方法反演地震波形拟合结果图

Fig.5 The fitting result of seismic waveform of Aheqi  $M_{5.4.8}$  earthquake by CAP method

不同方法测定出的震源深度有不同的含义，大致可以分为两种：破裂起始点深度和破裂质心深度（罗艳等，2013）。其中，破裂起始点深度一般是通过到时由定位方法得到；而破裂质心深度对应的则是波形最大能量到时。由CAP方法得到的震源深度是基于波形反演方法，实质上是反映了地震矩张量密度分布的某种质心深度。但是两者深度的差异与破裂方向和震级有关，对于 $M_{5.4.0}$ 左右的地震两者差异不大，而对于 $M_{5.6.0}$ 以上的地震，两者差异可能达到5km左右，因此对于 $M_{5.6.0}$ 以上的地震需要考虑震源尺度的影响。而本文研究的地震多为 $M_{5.4.0}$ 左右的地震，最大的为 $M_{5.5}$ 地震，因此本研究可以忽略震源尺度的影响。对比由CAP方法计算出来的矩心深度和由地震目录给出的

破裂起始点震源深度,可发现由单纯型或者 Locsat 定出的研究区的深度整体偏浅,都分布在 10km 左右的范围内,最深的才 13.09km,这与张国民等(2002)研究的本区震源深度平均为  $(23\pm 10)$  km 结果相差甚远。从矩心深度分析,震源深度变化域比较广,最浅的为 8km,最深的达到 58km,震源深度 20km 左右的范围内分布居多,为了更直观的分析研究区地震震源深度的变化,对研究区的地震深度按照深浅进行了颜色区分,图 6 为震源深度分布图。

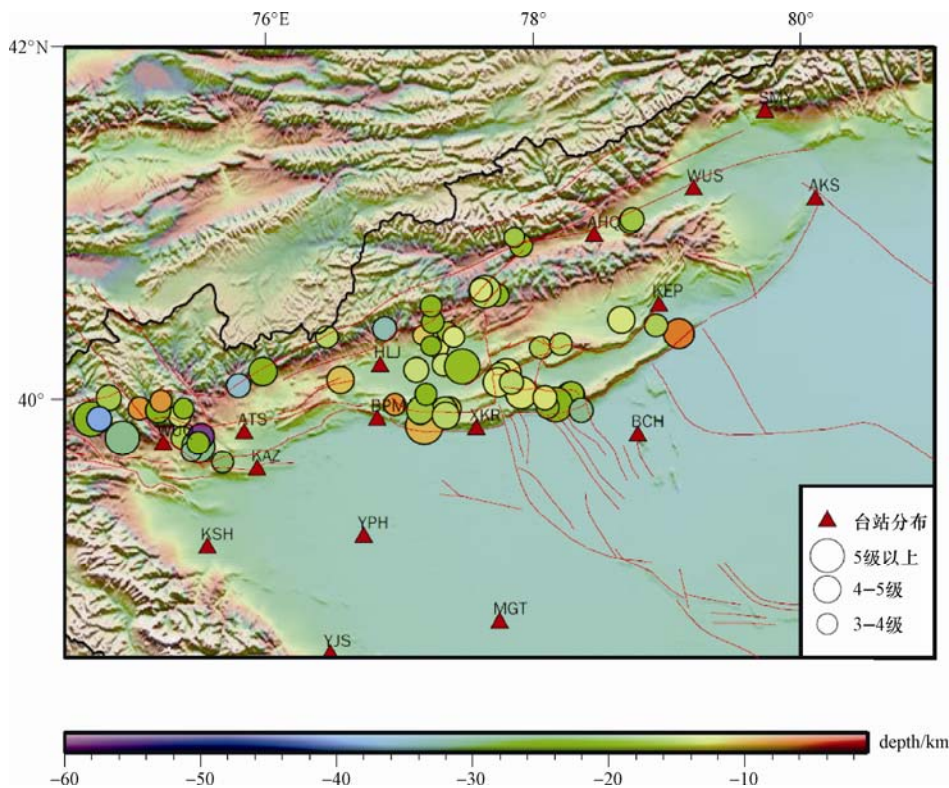


图 6 震源深度分布图

Fig. 6 Depth distribution of the earthquakes

从图 6 中震源深度的分布可以看出,在南天山中段前缘与塔里木盆地的接触地带,震源深度大部分集中分布在 12km 左右,且在山前地带地震活动活跃,震源深度较浅。在阿图什台左侧,即塔里木盆地西南端和西天山交汇处,震源深度集中分布在 30km 左右,最深的有 58km,相比南天山中西段其他区域,属于震源深度较深的区域。从所属区域研究看,该区域正好处于帕米尔高原北侧,也是喜马拉雅碰撞带的西端点,造成这一区域震源深度较深可能与印度板块向欧亚板块碰撞形成的深度构造环境条件有关(于湘伟等,2010)。在巴楚台左上方,塔里木盆地和南天山中段接触地带,震源深度在 20km 以上,不符合南天山中段山前震源深度的整体分布。对其震源机制解进行分析,其结果列于表 3,可发现其与《新疆通志·地震志》(新疆维吾尔自治区地方志编纂委员会,2002)中柯坪断裂带的描述不符,故不是由柯坪断裂带所引起的。分析表 3 中节面 I 和节面 II,发现其节面 II 走向都为 NNW,倾角都大于  $60^\circ$ ,不属于南天山地区主要的构造方向,而属于塔里木块体内的构造方向,结合田勤俭



等(2006)有关南天山及塔里木北缘构造带的研究,塔里木块体俯冲到天山推覆体下部,并在俯冲体的根部逐渐形成高角度断裂,这可以解释表3中的地震倾角都在 $60^\circ$ 以上,且震源深度都达到20km以上,即研究区地震受控于塔里木块体俯冲到天山块体下部分,造成震源深度较受柯坪断裂带所控震源深度较深,且倾角较大。

表3 巴楚台左侧区域震源机制解结果

Table 3 Focal mechanism solution of earthquake records from Bachu station

编号	发震日期 (年-月-日)	发震时间 (时-分-秒)	震中位置( $^\circ$ )		震级 ( $M_s$ )	节面 I ( $^\circ$ )			节面 II ( $^\circ$ )			震源深度 (km)
			北纬	东经		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	
1	2012-08-11	17:34:19	78.17	39.97	5.0	37	58	-15	135	77	-147	24
2	2012-08-11	17:56:39	78.11	39.96	3.4	54	46	13	315	80	136	26
3	2012-10-25	15:05:49	78.36	39.94	3.5	254	50	37	139	62	134	30
4	2010-05-27	18:01:00	78.29	40.03	3.7	229	77	-169	137	80	-13	19

在图6中南天山中段前缘向中部震源深度逐渐加深,震源深度集中分布在15—25km左右,多为逆冲型,构造走向主要为NEE向,根据熊小松等(2011)的研究结果显示,天山的地壳厚度存在西厚东薄,由两侧盆地向天山造山带加厚的趋势。同时由接收函数的结果显示,南天山地区平均地壳厚度为52km(Li等,2004),这与本文所用的Crust2.0研究区地壳厚度基本相同。南天山西段到南天山中段呈现震源深度变浅的趋势,从大地动力学角度分析,南天山西段处在喜马拉雅碰撞带的西端点,该区震源深度较深与印度板块向欧亚板块碰撞提供的动力作用有关,由西段向中段延伸,动力作用依次在减弱,震源深度也依次变浅。

## 5 结论

(1) 利用近震全波形CAP方法得到的震源深度从8km到58km的范围内均有分布,而用到时定位得到的震源深度都分布在10km左右的范围内。用近震全波形CAP反演得到的震源深度比地震目录给出的深度也深。南天山中西段地震震源深度整体上呈现西段深,中段浅的变化过程,根据于湘伟等(2010)的研究,南天山自西向东地壳厚度呈现逐渐变浅的趋势,震源深度也呈现出自西向东变浅的趋势,本文得到的结果吻合了这一趋势,理想地反映了南天山地区地壳厚度变化。南天山中西段整体平均震源深度在15—23km,其中,在南天山、西昆仑和塔里木盆地结合部位震源深度比平均震源深度深,依据张国民等(2002)及马杏垣(1989)的研究,新疆西南部(包含南天山中西段)地区的震源平均深度在11—31km,近震全波形CAP方法得到的结果与他们给出的结果基本相一致。

(2) 南天山中西段地区,一方面受到印度板块向北的推挤作用(马宗晋等,1988),另一方面受到塔里木块体向下的俯冲作用,为研究区地震提供了主要的动力源。同时使该地区形成多以近东西向断裂和近南北的普昌断裂,研究区发生的地震多受控于这些断裂带,地震多以走滑和逆冲为主。由张国民等(2002)关于地震活动深度下界D的定义,南天山中西段地区有明显的震源下界,为40km深度。

(3) 南天山中西段地区震源深度分布特征反应了地震活动的动力环境及地震构造分布,

震源深度的分布特征能否作为研究区内地震危险性评价等一系列问题研究的切入口,值得后期更深入的研究。

致谢:感谢匿名审稿专家对本文修改提出的宝贵意见。

## 参考文献

- 艾力夏提·玉山,刘代芹,李杰等,2014.新疆南天山地区重力场动态变化特征研究.内陆地震, **28** (2): 176—181.
- 罗艳,曾祥方,倪四道,2013.震源深度测定方法研究进展.地球物理学进展, **28** (5): 2309—2321.
- 罗艳,倪四道,曾祥方等,2011.一个发生在沉积盖层里的破坏性地震:2010年1月31日四川遂宁-重庆潼南地震.科技通报, **56** (2): 147—152.
- 马杏垣,1989.中国岩石圈动力学地图集.北京:中国地图出版社.
- 马宗晋,张家声,汪一鹏,1988.青藏高原三维变形运动学的时段划分和新构造分区.地质学报, **72** (3): 212—226.
- 冉慧敏,上官文明,2013.2013年1月29日哈萨克斯坦  $M_S6.1$  地震序列的震源机制解分析.内陆地震, **27** (3): 242—250.
- 任克新,邹立晔,刘瑞丰等,2004.用 sPn 计算内蒙地震的震源深度.地震地磁观测与研究, **25** (3): 24—31.
- 田勤俭,丁国瑜,郝平,2006.南天山及塔里木北缘构造带西段地震构造研究.地震地质, **28** (2): 213—222.
- 新疆维吾尔自治区地方志编纂委员会编,2002.新疆通志·地震志.乌鲁木齐:新疆人民出版社.
- 熊小松,高锐,李秋生等,2011.天山造山带的深部结构.地球物理学进展, **26** (6): 1906—1914.
- 于湘伟,雷建设等,2010.西南天山地区的地震重定位与活动性分析.中国科学院研究生院学报, **27** (3): 351—354.
- 张国民,汪素云,李丽等,2002.中国大陆地震震源深度及其构造含义.科学通报, **47** (9): 663—668.
- 张辉,徐辉,王熠熙,2012.基于地震波反演的地震震源深度研究.华南地震, **32** (4): 30—36.
- 中国地震局监测预报司,2007.地震学与地震观测.北京:地震出版社.
- Dreger D.S., Helmberger D.V., 1993. Determination of source parameters at regional distance with three component sparse network data. *J. Geophys. Res.*, **98**: 8107—8125.
- Li Y., Liu Q.Y., Chen J.H. et al., 2004. Teleseismic imaging of subducting lithosphere and Moho offsets beneath western Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, **221** (1-4): 117—330.
- Tan Ying, Zhu L.P., Helmberger D.V. et al., 2006. Locating and modeling regional earthquakes with two stations. *J. Geophys. Res.*, **11** (B01): 306—314.
- Thio H.K., Kanamori H., 1995. Moment-tensor inversions for local earthquakes using surface waves recorded at TERRA scope. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **85** (4): 1021—1038.
- Zhao L.S., Helmberger D.V., 1994. Source estimation from broadband regional seismograms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**: 91—104.
- Zhu L., Helmberger D.V., 1996a. Advancements in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *BSSA*, **86**: 1634—1641.
- Zhu L., Helmberger D.V., 1996b. Intermediate depth earthquakes beneath the India-Tibet collision zone. *Geophys. Res. Lett.*, **23**: 435—438.

## **Study on Focal Depth from Seismic Inversion in the Western-Middle Section of Southern Tianshan**

Zhang Zhibin, Zhu Haoqing and Li Yanyong

(Earthquake Administration of Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

**Abstract** The west-middle section of south Tianshan mountain, located between tarim block and west Kunlun, is an earthquake-prone area. By using waveform inversion method of CAP we carried out inversion of the earthquake focal depth in west-middle section of south Tianshan. We compared focal depth with base on the positioning, and found that focal depth we obtained is relatively shallower. Meanwhile the focal depth of the Piedmont region of south Tianshan is shallower than the central region of south Tianshan. The south Tianshan from west to east shows the tendency of focal depth becoming shallow. In west-middle section of south Tianshan focal depth distribution is in 15-23 km overall. There exists a remarkable depth limit to the earthquake activity.

**Key words:** The focal depth; The method of CAP; In west-middle section of south Tianshan mountain