

彭利媚, 魏娅玲. 由 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制解推断四川理县-黑水断裂构造特征[J]. 华南地震, 2016, 36 (3): 9-16. [PENG Limei, WEI Yaling. Tectonic Characteristics of Lixian-Heishui Fault Inferred by the Focal Mechanism Solution of the Earthquakes with $M_L \geq 4.0$ in Sichuan[J]. South China Journal of Seismology, 2016, 36(3): 9-16.]

由 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制解 推断四川理县-黑水断裂构造特征

彭利媚¹, 魏娅玲²

(1. 海南省地震局, 海口 572900; 2. 四川省地震局, 成都 610041)

摘要: 基于四川台网宽频带数字地震波形资料和 CAP 波形反演方法, 提取了四川理县-黑水地区 2008 年 1 月至 2014 年 12 月 10 个 $M_L \geq 4.0$ 中等强度地震的震源机制解。结果显示: 10 个中等强度地震震源机制解节面分布主要集中在北西-南东和北东-南西两个优势分布方向。据众多学者研究结果推断, 北西-南东向展布的节面为发震断层; 理县-黑水断裂大致沿北 47° 西(近北西向)展布, 属高倾角陡峭断裂, 主倾向南西; 压应力(P 轴)呈近东西水平挤压特征, 与断层面斜交, 以左旋走滑运动为主; 张应力(T 轴)呈近南北水平撕裂特征; 中等强度地震的震源主压应力方向与青藏地块东部地区主压应变率方向比较一致, 说明理县-黑水断裂主要是受区域应力场控制的一个区域性构造左旋走滑断裂。

关键词: 发震断层; 震源机制解; CAP 方法; 波形互相关系数; 断层类型

中图分类号: P315.33 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2016) 03-0009-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.03.002

Tectonic Characteristics of Lixian-Heishui Fault Inferred by the Focal Mechanism Solution of the Earthquakes with $M_L \geq 4.0$ in Sichuan

PENG Limei¹, WEI Yaling²

(1. Earthquake Administration of Hainan Province, Haikou 572900, China;

2. Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on broadband digital seismic waveform recorded by Sichuan earthquake network and CAP waveform inversion method, the paper obtained the focal mechanism solutions of the ten moderately strong earthquakes with $M_L \geq 4.0$ from January 2008 to December 2014 in region of Sichuan Lixian-Heishui. The results show that: the nodal plane of the focal mechanism solutions of ten moderately strong earthquakes mainly concentrated in two dominance distribution directions (NW-SE and NE-SW), and according to many scholars'

收稿日期: 2015-10-02

基金项目: 中国地震局测震台网青年骨干培养专项(20140320)

作者简介: 彭利媚 (1978-), 女, 工程师, 从事地震监测及编目工作。

E-mail: 623294290@qq.com

通信作者: 魏娅玲 (1979-), 女, 高级工程师, 从事大震速报工作。

E-mail: sctwsbs@163.com

research results inference, NW-SE trending section is earthquake fault plane; Lixian-Heishui fault is mainly distributed along $N47^{\circ}W$ (near north west), which belongs to high dip angle steep fault with dipping to SW; compressive stress (P axis) presents nearly EW horizontal extrusion features, and inclines with fault plane with taking the left lateral strike slip movement; tensile stress (T axis) presents nearly NS horizontal tearing features. The orientation of principal compressive stress of moderately strong earthquakes is consistent with the orientation of the principal compressive strain rate of eastern part of the Qinghai-Tibet block, which indicates that Lixian-Heishui fault is mainly controlled by regional stress field and is left lateral strike slip fault.

Keywords: Seismogenic fault; Focal mechanism solution; CAP method; Waveform correlation coefficient to each other; Fault type

0 引言

地震震源机制解直观地反映了地震破裂的几何特征和运动学特征,是研究区域构造应力的基础,因此震源机制解一直是地震工作者们关心的重要参数^[1]。区域性宽频带地震波形资料中包含了丰富的地震震源和区域地壳信息,利用宽频带波形资料研究区域性地震震源机制解有助于了解震源区应力状态和发震断层构造特征,也是理解地震孕育过程的重要途径。

2008 年汶川 8.0 级地震发生后,国内众多学者研究了汶川地震余震的精确定位、空间分布、震源机制解等^[2-8],认为余震序列主要分布在龙门山断裂带的中、北段,沿三条主断裂带展布;同时,小鱼洞-理县-黑水的北西向余震分支也是目前各个研究结果中普遍存在的现象。据地质调查^[9-10]已证实小鱼洞断裂的存在,该断裂南东起于彭州市通济场西南侧附近,北西止于彭州市小鱼洞镇后坝村附近,大体呈北西-南东向展布。继而向西的理县-黑水地震分支条带的存在^[4,7-8]也预示着有一条沿该地震带延伸的隐伏断裂,我们将其称为理县-黑水断裂;而汶川地震前、后,研究区域并没有

发现出露地表的断裂带(或地震带)存在,因此很有必要对其分支条带上的中等强度地震震源机制解进行研究分析。为了深入了解这一断裂带地震震源的发震机制,本文选用目前使用较为广泛的 CAP^[11-12]方法和四川台网宽频带地震波形资料,反演计算了四川理县-黑水地区 $M_L \geq 4.0$ 中等强度地震震源机制解和最佳震源深度,并根据地震震源机制解的空间分布,对理县-黑水断裂带的发震断层展布特征进行了初步分析。

1 数据和模型

1.1 台站和资料的选取

据中国地震台网中心统一地震目录统计,2008 年 5 月至 2014 年 12 月四川理县-黑水地区共发生 $M_L \geq 4.0$ 地震 10 个(见表 1)。理县地区发生 8 次,最大震级为 M_s 5.9;黑水地区发生 2 次,最大震级为 M_L 4.8;这些中等强度地震为研究该地区地震活动构造和应力场提供了重要信息。这些地震发生前,震中区域附近 250 km 范围内正常运行的固定台站有 30 个,2010 年灾后重建 8 个,在 0.05~20 Hz 的频率范围内,这些台站仪器的幅频

表 1 四川理县-黑水 $M_L \geq 4.0$ 地震目录

Table 1 The catalog of the earthquakes with $M_L \geq 4.0$ in Lixian-Heishui

编号	时间/年-月-日	发震时刻/h:min:s	纬度/ $^{\circ}$	经度/ $^{\circ}$	深度/km	震级	地点
1	2008-05-16	13:25:47.00	31.310	103.450	14	M_s 5.9	理县
2	2008-07-14	00:13:11.90	31.483	103.217	9	M_L 4.1	理县
3	2008-08-04	17:19:07.90	31.533	103.167	1	M_L 4.2	理县
4	2008-11-14	11:27:04.67	31.961	103.001	0	M_L 4.8	黑水
5	2008-12-23	08:33:16.84	31.328	103.140	13	M_L 4.6	理县
6	2012-04-05	06:32:49.60	31.990	103.060	7	M_L 4.1	黑水
7	2013-01-27	13:06:44.30	31.520	103.260	16	M_L 4.8	理县
8	2013-08-08	02:51:42.66	31.691	103.184	21	M_s 4.7	理县
9	2013-10-29	06:08:52.30	31.690	103.190	6	M_L 4.2	理县
10	2014-04-11	10:31:00.30	31.690	103.180	17	M_s 4.6	理县

特性曲线都是平直的, 获得了较好的宽频带仪器记录波形, 为研究地震震源性质提供了重要的资料。经过台站选择, 最终选用了 $40\text{ km} \leq \Delta \leq 250\text{ km}$ 、P 波初动明显、波形连续且信噪比相对较高的台站进行波形反演计算。地震震中与所选台站分布如图 1 所示, 从图中可以看出, 所选台站对

研究区域地震震中具有较强的控制能力。

1.2 方法和速度模型

本文利用 CAP 波形反演方法求取理县-黑水 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制及震源深度, 具体方法参见相关文献 [5,11-14]。该方法将宽频带数字地震波形记

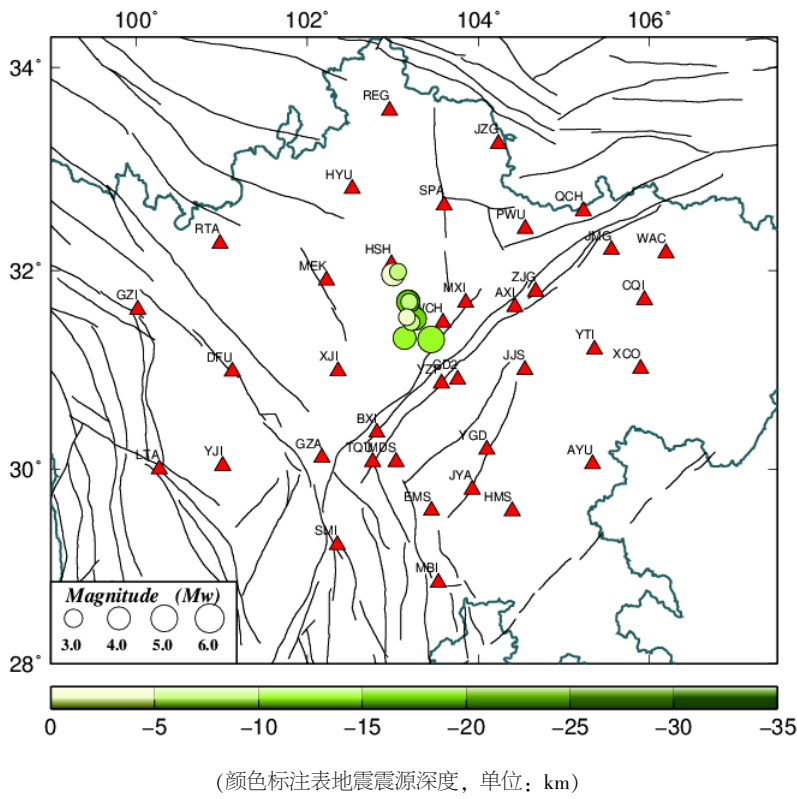


图 1 震中及参加反演的台站分布

Fig.1 The distribution of epicenters and inversion stations

录分为体波 Pnl 与面波两部分, 分别对 Pnl 波、面波进行带通滤波, 并计算其理论地震波形与观测波形之间的误差函数, 通过网格搜索, 获取给定参数空间中误差函数达到最小的最佳解。本文计算时, 体波 Pnl 与面波截取波形窗长分别设置为 30 s 与 60 s, 其带通滤波频带宽度分别为 0.05~0.2 Hz、0.05~0.1 Hz。与其他求解震源机制解的方法相比, CAP 方法弥补了利用 P 波初动求解震源机制解受台站数量限制的缺陷, 其优点体现在反演震源机制解时使用的是近震宽频带波形资料, 反演结果对地壳横向变化不敏感、对速度模型依赖性相对较小等, 保证了反演结果的稳定性。本研究中, 我们选用了林向东等的速度模型^[15]进行地震波反演, 这一模型是根据川西地区人工地震测深剖面 and 波形拟合结果, 并做适当调整后建立的速度模型(见图 2)。

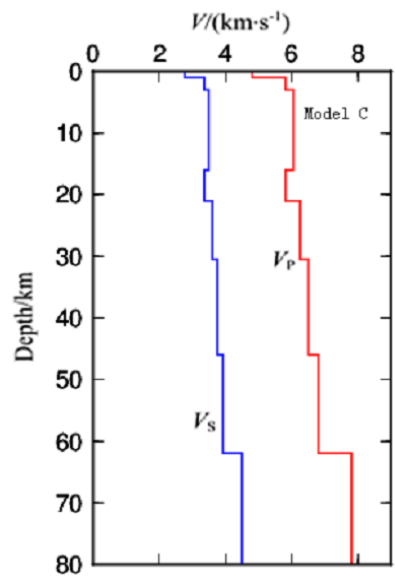


图 2 地震波反演的速度模型

Fig.2 The velocity models inverted by seismic waveform

2 反演结果及分析

2.1 震源机制解

我们采用CAP方法和图2速度模型进行地震波反演计算,获得了研究区域内的10个 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制解和最佳震源深度。为了保证反演结果的稳定,我们尽量保证参加反演计算的台站四方位包围震中、且各台站的波形拟合互相关系数要大于60%。通过反演计算获得的地震波形拟合图和最佳深度误差拟合图得知,参加反演计算的10个 $M_L \geq 4.0$ 地震的波形拟合效果均比较理想,震源机制解结果是稳定、可靠的,表2列出了地震震源机制解详细参数和最佳震源深度值,地震序号与表1的相同。

图3(a)和图4分别是2008年5月16日理县 M_s 5.9地震震源深度拟合误差和地震波形拟合图。从图3(a)可以看出,震源机制解反演结果在2~20 km震源深度范围内均稳定,震源深度在13 km处获得最小深度拟合误差;以13 km为最佳震源深度计算出的理论波形均能较好地与实际记录波形匹配(图中红线表示理论波形,黑线表示实际记录波形),10个台站的波形拟合互相关系数均大于62%,波形拟合效果理想,且结果稳定、可靠(见图4)。其中,节面I的解:走向为 147° ,倾角为 81° ,滑动角为 -31° ,节面II的解:走向为 242° ,倾角为 59° ,滑动角为 -170° ,矩震级为 $M_w=5.4$ 。该地震震源机制解反演结果与郑勇等^[9]的研究结果一致。

表 2 四川理县-黑水 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制反演结果
Table 2 The inversion results of the earthquakes with $M_L \geq 4.0$ in Lixian-Heishui

编号	震级/ M_w	深度/ km	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴	
			走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	方位/ $^\circ$	仰角/ $^\circ$	方位/ $^\circ$	仰角/ $^\circ$	方位/ $^\circ$	仰角/ $^\circ$
1	5.4	13	147	81	-31	242	59	-170	100	28	198	15	313	58
2	3.7	12	134	73	-11	227	79	-163	92	20	360	5	258	70
3	3.7	11	140	78	-13	233	77	-168	96	18	187	1	278	72
4	4.6	11	311	72	7	219	83	162	266	8	174	18	292	72
5	4.1	13	145	80	-15	238	75	-170	101	18	192	3	273	68
6	3.7	9	301	74	10	208	80	164	255	4	164	18	219	61
7	4.1	9	137	75	-15	231	75	-164	94	22	4	0	198	74
8	4.3	10	129	61	0	39	90	151	88	20	350	20	235	65
9	3.7	9	123	74	4	32	86	164	79	8	347	14	18	71
10	4.5	8	121	67	-10	215	81	-157	80	23	346	9	358	71

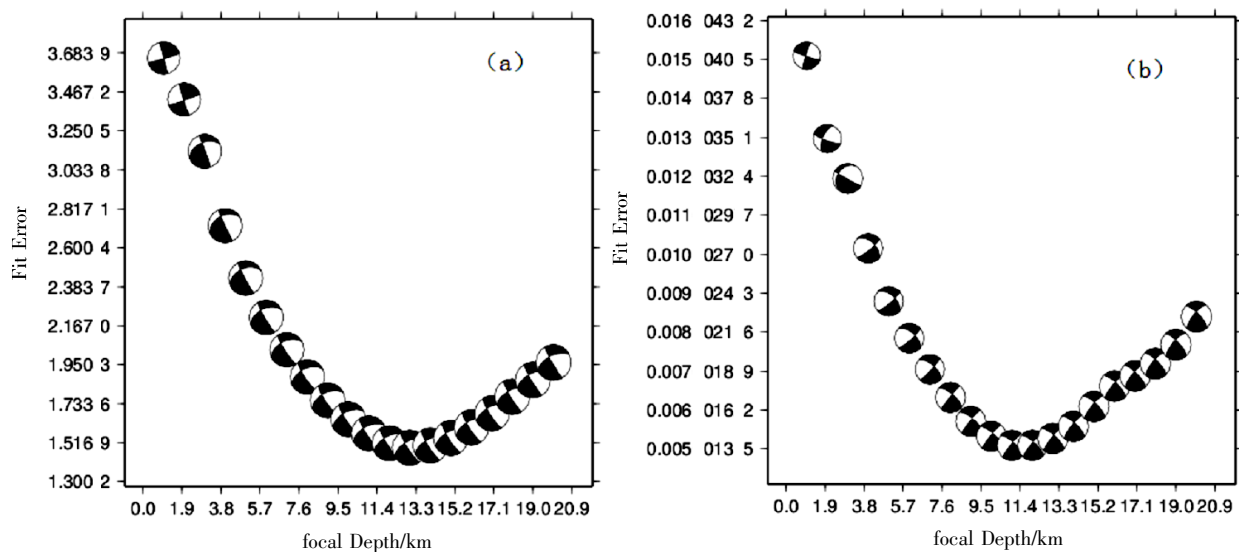


图 3 地震震源深度拟合误差
Fig.3 The fitting error of earthquake focal depth

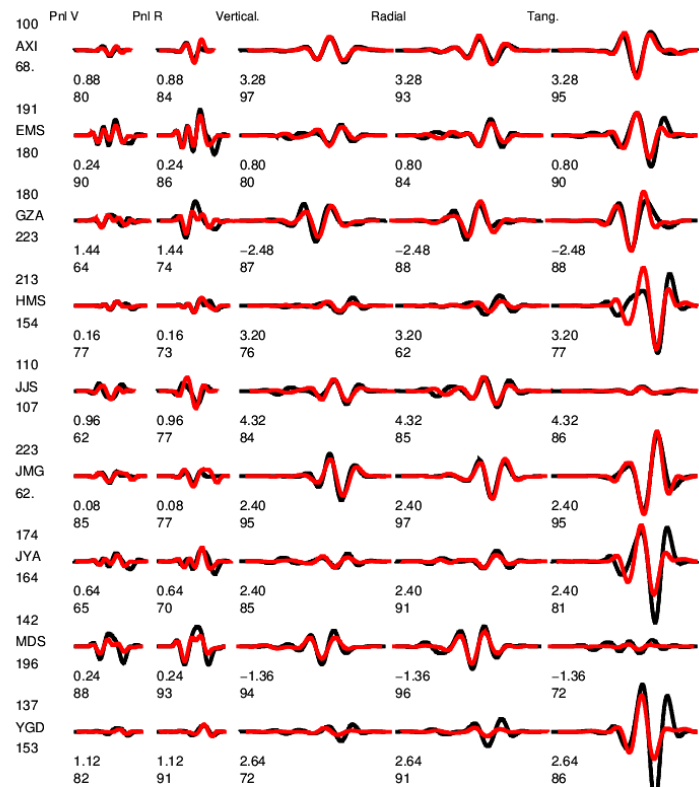


图 4 理县 M_s 5.9 地震波形拟合图

Fig.4 The fitting figure of seismic waveform of the M_s 5.9 earthquake in Lixian

图 3(b)和图 5 分别是我们得到的 2008 年 11 月 14 日黑水 M_L 4.8 地震震源深度拟合误差和地震波形拟合图。从图 3(b)可以看出，震源机制反演结果在 4~20 km 震源深度范围内均稳定，震源深度在 11 km 处获得最小深度拟合误差；以 11 km 为最佳震源深度计算出的理论波形均能较好地与实际记

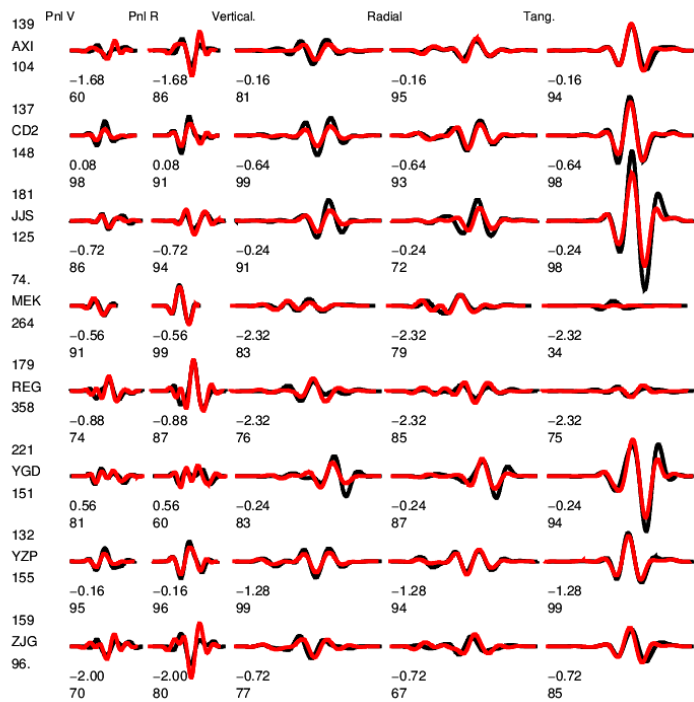


图 5 黑水 M_L 4.8 地震波形拟合图

Fig.5 The fitting figure of seismic waveform of the M_L 4.8 earthquake in Heishui

录波形匹配, 8 个台站的波形拟合互相关系数均大于 60%, 波形拟合效果理想, 且结果稳定、可靠 (见图 5)。其中, 节面 I 的解为: 走向 311° , 倾角 72° , 滑动角 7° , 节面 II 的解为: 走向 219° , 倾角 83° , 滑动角 162° , 矩震级 $M_w=4.6$ 。

2.2 结果分析

在地震破裂面未达到地表的情况下, 地震震中分布是判断断裂带分布的主要依据。上述国内众多学者研究结果推断, 理县-黑水断裂断面是沿北西向展布的; 且从图 1 和图 6 也可以看出其

断裂带的大致分布方向, 图 6 显出的地震震源机制解节面分布主要集中在北西-南东和北东-南西两个优势分布方向。由此可知, 表 2 中 10 个地震震源机制解的节面 I 应为发震断层面, 其走向空间分布见图 7(a), 断层面走向的优势分布方向为南东, 主要倾向南西; 节面 II 应为辅助面, 其走向空间分布见图 7(b), 辅助面走向的优势分布方向为南西西。根据 Zoback 等的断层分类原则^[16]对表 2 中地震震源机制解结果进行分类, 理县-黑水 10 个 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解类型均属于走滑断层。

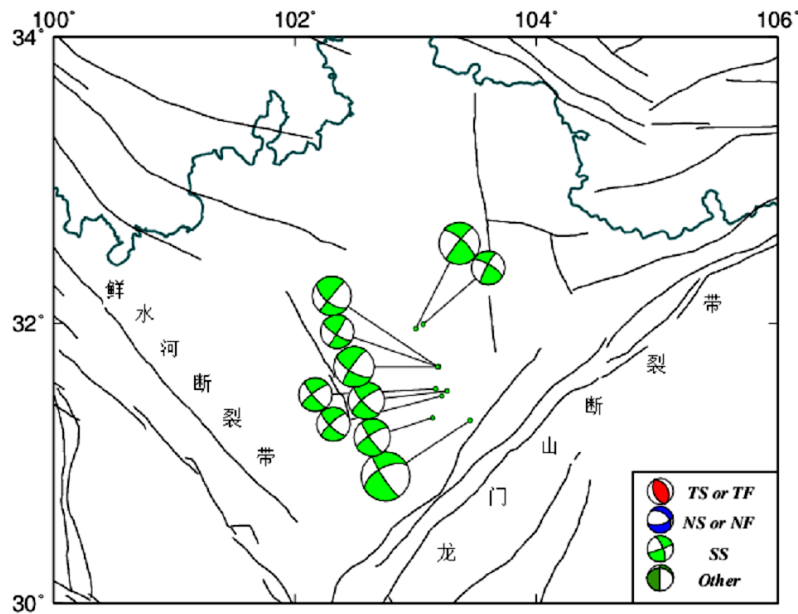


图 6 理县-黑水 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制解空间分布

Fig.6 The spatial distribution of the focal mechanism solution of the earthquakes with $M_L \geq 4.0$ in Lixian-Heishui

根据发震断层面机制解结果及其空间分布进行分析, 总体上说, 断层面分布范围沿北 $33^\circ \sim 58^\circ$ 西 (平均约北 47° 西, 近北西向) 展布; 倾角范围为 $61^\circ \sim 82^\circ$ (平均约 75°), 属高倾角陡峭断裂, 倾向南西, 南西盘为上盘, 北东盘为下盘; 滑动角范围为 $-31^\circ \sim 10^\circ$ (平均约 -7°), 呈现出一定的正倾滑分量, 西南盘为下降盘; 压应力 (P 轴) 方位为 $80^\circ \sim 100^\circ$ (平均约 89°), 呈现近东西水平挤压特征, 与断层面斜交 (见图 8), 其仰角范围为 $5^\circ \sim 28^\circ$ (平均约为 17°), 水平滑动分量大于垂直滑动分量, 以左旋走滑运动为主; 张应力 (T 轴) 方位平均约为北 2° 西, 呈现近南北水平撕裂特征。因此说明理县-黑水断裂带发震断层面大致沿近北西方向展布, 以高角度的左旋走滑运动为主, 略具一定正倾滑分量作用的性质。

根据上述研究结果和地质调查^[9-10]得知, 理县-黑水断裂位于小鱼洞-理县-黑水北西向地震条带的北西段, 小鱼洞断裂位于小鱼洞-理县-黑水北西向地震条带的东南段, 且两者的断层面产状较为一致, 可以推断出两者为同一断裂。另外, 理县-黑水 10 个 $M_L \geq 4.0$ 地震震源主压应力呈近东西挤压的特征, 与武艳强等^[17]用 GPS 数据得到的近年来青藏地块东部地区主压应变率为近东西向的结论一致, 从而说明小鱼洞-理县-黑水断裂主要是受区域应力场控制的一个区域性构造左旋走滑断裂。

3 结语

本文基于四川台网宽频带数字地震波形资料

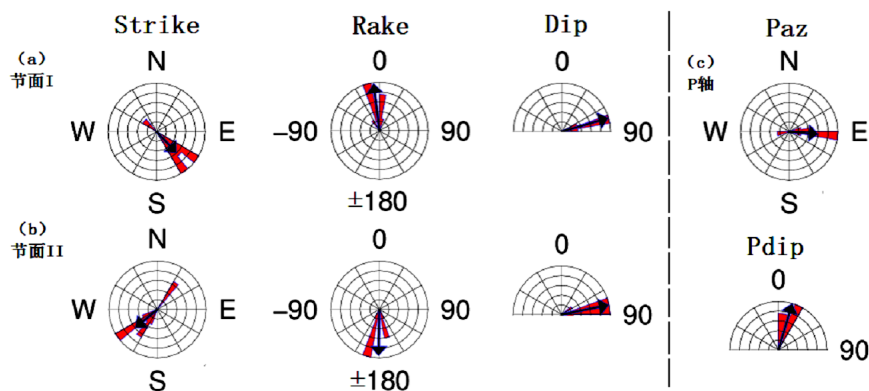
图7 理县-黑水 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制解节面及其 P 轴空间分布

Fig.7 The nodal plane and P axis distribution of the focal mechanism solutions of the earthquakes with $M_L \geq 4.0$ in Lixian-Heishui

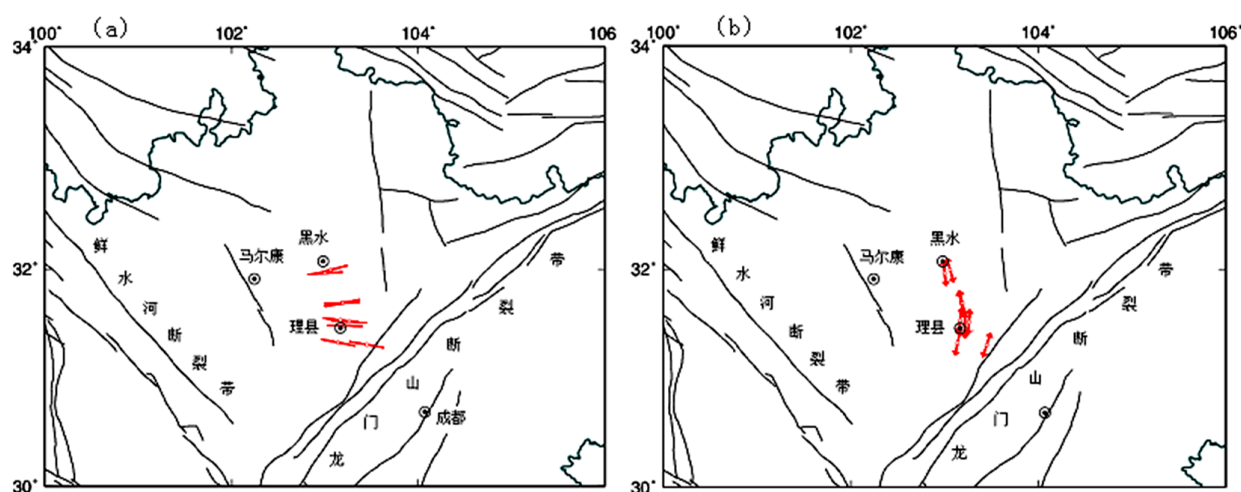
图8 理县-黑水 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制解应力空间分布 (左图 P 轴, 右图 T 轴)

Fig.8 The stress distribution of the focal mechanism solutions of the earthquakes with $M_L \geq 4.0$ in Lixian-Heishui

和 CAP 波形反演方法, 求取了四川理县-黑水地区 2008 年 1 月至 2014 年 12 月 10 个 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解, 分析了震源机制解空间分布特征, 并对发震断层的几何产状及断裂与区域应力场的关系进行了初步探讨。综上所述, 得出以下几点结论:

(1) 10 个中等强度地震震源机制解节面分布主要集中在北西-南东和北东-南西两个优势分布方向。据众多学者研究结果推断, 北西-南东向展布的节面为发震断层面。

(2) 理县-黑水断裂大致沿北 47° 西 (近北西向) 展布, 属高倾角陡峭断裂, 主倾向南西。

(3) 压应力(P 轴)呈近东西水平挤压特征, 与断层面斜交, 以左旋走滑运动为主; 张应力(T 轴)呈近南北水平撕裂特征。

(4) 中等强度地震的震源主压应力方向与青

藏地块东部地区主压应变率方向比较一致, 说明理县-黑水断裂主要是受区域应力场控制的一个区域性构造左旋走滑断裂。

致谢: 四川省地震局魏娅玲高级工程师给予大力的帮助和指导。

参考文献:

- [1] 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32 (12): 1 020-1 030.
- [2] 吕坚, 苏金蓉, 靳玉科, 等. 汶川 M_s 8.0 级地震余震序列重新定位及其发震构造初探[J]. 地震地质, 2008, 30 (4): 917-925.
- [3] 王勤彩, 陈章立, 郑斯华. 汶川大地震余震序列震源机制的空间分段特征[J]. 科学通报, 2009, 54 (16): 2 348-2 354.

- [4] 陈九辉, 刘启元, 李顺成, 等. 汶川 8.0 地震余震序列重新定位及其地震构造研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52 (2): 390–397.
- [5] 郑勇, 马宏生, 吕坚, 等. 汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39 (4): 413–426.
- [6] 张勇, 许力生, 陈运泰. 2008 年汶川大地震震源机制的时空变化. 地球物理学报, 2009, 52 (2): 379–389.
- [7] 刘巧霞, 朱介寿, 曹俊兴, 等. 汶川 M_s 8.0 级地震余震序列重新定位及其空间分段特征[J]. 第四纪研究, 2010, 30 (4): 736–744.
- [8] 易桂喜, 龙锋, 张致伟. 汶川 M_s 8.0 地震余震震源机制时空分布特征[J]. 地球物理学报, 2012, 55 (4): 1213–1227.
- [9] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地质科学, 2008, 30 (3): 598–629.
- [10] 李勇, 黄润秋, A.L.Densmore, 等. 龙门山小鱼洞破裂在汶川地震中的地表破裂及地质意义[J]. 第四纪研究, 2009, 29 (3): 502–511.
- [11] Zhao L S, Helmberger D V. Source estimation from broadband regional seismograms [J]. Bull Seis Soc Amer, 1994, 84: 91–104.
- [12] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. Bull Seis Soc Amer, 1996, 86: 1 634–1 641.
- [13] 陈长云, 贺建明. 西秦岭北缘断裂分段变形特征分析[J]. 大地测量与动力学, 2016, 36 (9): 784–788.
- [14] 陈长云. 张家口–渤海断裂带分段运动变形特征分析[J]. 地震, 2016, 36 (1): 1–11.
- [15] 林向东, 葛洪魁, 徐平, 等. 近场全波形反演: 芦山 7.0 级地震及余震矩张量解[J]. 地球物理学报, 2013, 56 (12): 4 037–4 047.
- [16] Zoback M L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The world stress map project [J]. J. Geophys. Res., 1992, 97 (B8): 11703–11728.
- [17] 武艳强, 江在森, 闫伟, 等. 中国大陆应力、应变率场方向特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32 (1): 5–9.