

基于 CAP 方法的 2013 湖北巴东 5.1 级地震 震源机制与发震构造研究^①

赵凌云^{1,2}, 张 辉³, 陈俊华^{1,2}, 申学林^{1,2}, 魏贵春^{1,2}

(1.湖北省地震局,湖北 武汉 430071; 2.中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室),湖北 武汉 430071;
3.甘肃省地震局,甘肃 兰州 730000)

摘要:利用湖北与重庆区域台网共 9 个台的宽频带数字地震记录,采用 CAP 法(Cut and Paste Method)反演了湖北巴东 2013 年 12 月 16 日 M_s 5.1 地震震源机制解,其最佳双力偶解为节面 I:走向 166° ,倾角 82° ,滑动角 41° ;节面 II:走向 69° ,倾角 49° ,滑动角 169° ;最佳震源深度主要集中在 5.5 km 附近。分析认为此次地震的发震断层为带有逆冲成分的走滑性质断层,主压应力 P 轴近 EW 向,主张应力轴近 NS 向。余震序列主要呈 EW 分布,少部分呈 NS 方向分布,较大余震的发震破裂滑动类型以正走滑型的居多,其次为逆倾滑型及逆走滑型。结合 7 次较大余震的机制解判断,近 EW 向节面为发震断层。

关键词:巴东地震;震源机制解;CAP 法(Cut and Paste Method);地震构造

中图分类号:P315.332

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2014)04-1014-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.1014

Focal Mechanism Solutions and Seismogenic Structure of the Badong M_s 5.1 Earthquake of 2013 Using the CAP Method

ZHAO Ling-yun^{1,2}, ZHANG Hui³, CHEN Jun-hua^{1,2}, SHEN Xue-lin^{1,2}, WEI Gui-chun^{1,2}

(1.Earthquake Administration of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430071, China;

2.Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan, Hubei 430071, China;

3.Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Using the records of nine stations in the Hubei and Chongqing Regional Seismic Network, we obtained the focal mechanisms of the Badong M_s 5.1 earthquake in 2013 using the “Cut and Paste” (CAP) method. Our results show that the best double couple solution of the M_s 5.1 event is 166° , 79° , and -22° for strike, dip, and rake angles respectively; the strike, dip, and rake angles of the other nodal plane are 298° , 68° , and -168° , respectively, and the optimum focus depth is 5.5 km. The results show that the earthquakes mechanism was a thrust along strike-slip faults, with the principal stress P axis mainly in the EW direction and the lord tension T shaft mainly in the NS direction. The focal mechanisms of the biggest aftershocks are mostly normal dip-slips, and the aftershock sequence mainly propagated along the EW direction, with a few propagating along the NS direction. Therefore, we infer that the seismogenic structure of the M_s 5.1 earthquake and aftershocks was the EW strike portion of the Daqiao fault.

Key words: Badong earthquake; focal mechanism; CAP method(Cut and Paste Method); seismogenic structure

① 收稿日期:2014-04-15

基金项目:中国长江三峡工程开发总公司专项基金(SXSN/2377);中国地震局地震研究所所长基金(IS201246114)

作者简介:赵凌云(1981—),女(汉族),山西五寨人,工程师,主要从事地震活动性方面的研究.E-mail:aolingyun002@126.com

0 引言

2013 年 12 月 16 日 13 时 04 分在湖北巴东发生 5.1 级地震,这是继 1979 年 5 月 22 日秭归回龙观 5.1 级地震之后,相隔近 34 年巴东地区发生的又一次较大地震。震源深度 5 km,极震区烈度达到Ⅶ°,等震线长轴呈近 EW—NNW 走向展布,长轴长约 3.9 km,短轴长约 2.4 km,面积约 7.7 km²^[1]。主震之后震中区附近记录到一系列余震,截止到 2014 年 2 月 10 日共记录到 M_L0 以上余震 481 次,其中:M_L0~1.9 地震 436 次,M_L2~2.9 地震 41 次,M_L3~3.9 地震 4 次。最大余震为 2014 年 1 月 20 日 20 时 10 分巴东东瀼口 M_L3.6,位于主震 M5.1 的 NW 向 2.4 km 处,另外 3 次 M_L3 以上余震均发生在主震西部^[2]。

震中区及其周边区域地质构造复杂,主要分布以 NE 向的高桥断裂及 NEE 向的周家山—牛口断裂为主,其次为近 EW 向的大坪断裂及马鹿池断裂。高桥断裂全长 40 km,断裂总体走向 NE 45°~60°,倾向 SE,倾角 50°~65°。断裂破碎带一般宽 50~100 m,局部可达 650 m,构造变形强烈,各类构造岩均较发育。断裂活动兼有左旋走滑和逆冲运动的性质^[2-5]。大坪断裂长约 7 km,走向 EW,倾向 S,倾角 60°~70°。地表切割三叠系巴东组地层,东段和西段相对落差约 700 m。断裂具有清晰的线性影像,但断层两侧(上下盘)山原期地貌面没有明显差异,因此判定断裂线性影像属构造岩和破裂带被侵蚀、溶蚀所致,属前第四纪断裂^[3]。由于本次地震发生在高桥断裂与周家山—牛口断裂之间,现场考察认为发震构造为 EW 向大坪断裂可能性较大。

随着区域数字化地震计的改造,获取了大量高质量宽频地震数据,地震学者^[5-11]建立和发展了“CAP”(Cut and Paste)方法,将宽频带地震记录分成 Pnl 和面波两个部分进行反演并允许他们相对浮动,在适当的时间变化范围内,搜索出合成地震图和观测地震图全局差异最小的震源机制解。该方法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,而且相对提高了 Pnl 的权重,对地震深度有比较好的约束。本文利用湖北和重庆区域台网宽频带数字地震波形记录,采用“CAP”反演此次 5.1 级地震的震源机制解,并结合区域地质背景和地震序列的分布结果讨论此次地震的可能发震机理。

1 观测资料和地壳模型选取

1.1 观测台站分布

选用湖北、重庆地震台网的 9 个台站(见表 1,

图 1)。在 0.05~20 Hz 的频率范围内这 9 个台站仪器的幅频特性曲线都是平直的,能较好地获得台站信息资料。

表 1 选取台站基本情况

Table 1 Coordinates of stations used in the study				
台站名称	台名代码	纬度/(°)	经度/(°)	高程/m
房县	FXI	31.938	110.72	815
南漳	NZH	31.39	111.616	393
商周	SHZ	33.51	109.87	836
襄樊	XF	32.00	112.04	115
丹江	DJI	32.55	111.53	122
万州	WAZ	30.75	108.46	200
钟祥	ZHX	31.17	112.73	64
郢西	YXI	32.98	110.43	285
荆门	JME	31.12	112.17	152

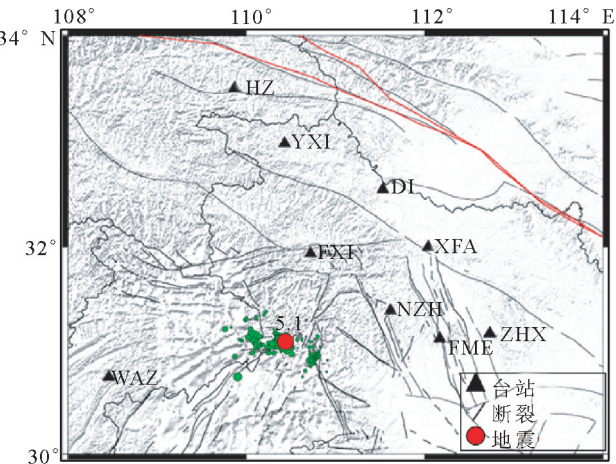


图 1 地震震中与台站分布图

Fig.1 Distribution of seismic epicenters and stations

1.2 地壳速度模型的选取

研究区的速度结构(表 2)采用陈学波^[13]等对三峡地区模型的研究成果,选取走时残差最小的地壳模型,从地表到 40 km 深度处分为 8 层,建立初始模型计算理论格林函数^[1]。

表 2 湖北三峡地区地壳速度模型

Table 2 Crustal velocity model under the study area				
序号	深度/km	P 波速度/(km·s ⁻¹)	S 波速度/(km·s ⁻¹)	V _p /V _s
1	0.0~4.0	5.04	2.99	1.71
2	4.0~6.0	5.40	3.00	1.85
3	6.0~10.0	5.76	3.32	1.74
4	10.0~16.0	5.88	3.35	1.76
5	16.0~20.0	6.16	3.51	1.70
6	20.0~25.0	6.54	3.70	1.73
7	25.0~35.0	6.83	3.90	1.64
8	35.0~40.0	7.47	4.27	1.76

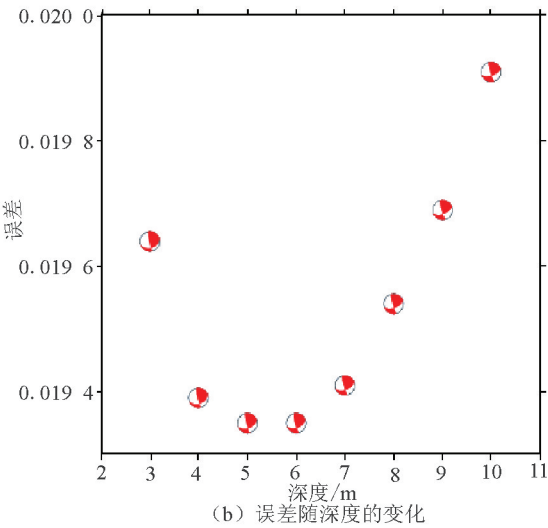
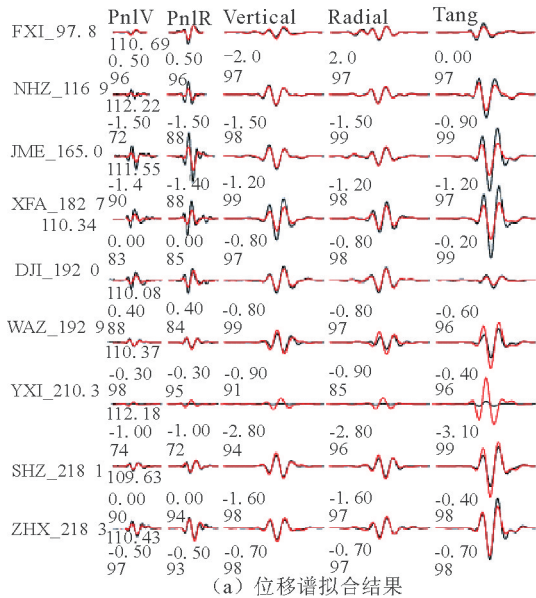
2 计算结果与分析

本文利用 CAP 方法计算湖北巴东 M_s 5.1 地震的震源机制。在反演过程中,将理论波形与旋转后的观测波形滤波后得到 Pnl 部分(0.05~0.2 Hz)和 Snl 部分(0.02~0.05 Hz)进行拟合^[12-14],全空间中进行格点搜索震源参数。搜索得到不同深度上的震源机制和误差,调整震源参数,使得波形能够较好的吻合观测数据,得到最佳的震源机制解。

2.1 震源深度

震源深度始终是一个很难确定的参数,往往地震目录中给定的深度可能与实际深度存在较大的差异。通过 F-K 方法计算基于上述速度模型和不同震中距的格林函数时,震源深度对理论地震图的形式

态将产生直接影响,并在一定程度上影响震源机制的反演结果。为减小震源深度误差对震源机制反演结果的影响,反演过程中采用格点法对震源深度进行了搜索,以波形拟合误差最小的震源深度和相应的震源机制解作为最佳拟合结果。图 2 是 2013 年 12 月 16 日地震事件的例子,图 2(a)是震源深度在 5.5 km 附近时的位移谱拟合结果;图 2(b)是误差随着深度的分布,可以看出震源深度的变化对拟合误差具有明显的影响,但在最佳深度附近的震源机制变化不大。根据误差最小判定,本次地震事件的最佳震源深度为 5.5 km,波形拟合为最好,最符合实际震源机制结果。



红色为理论图;黑色为观测值;左边是台站名和相应的震中距(单位:km);每行波形下面是相应分量的时间频移量(单位:s)及互相关值

图 2 CAP 方法计算的 2013-12-16 地震事件的震源机制解的位移谱拟合结果和误差随深度变化

Fig.2 The fit results of displace spectra (a) and the error variation with depth (b) for the focal mechanism solution of eathquake on Dec.16,2013,using CAP method

比较地震观测报告中给出的震源深度(表 3 中 H1)和震源机制反演过程中根据波形拟合得到的最佳震源深度(H2),发现两者定位深度比较接近,说明此本次地震最佳震源深度主要集中在 5.5 km 范围左右。

2.2 结果分析

本文计算了 2013 年 12 月 16 日湖北巴东 5.1 级地震的震源参数与相应的震源机制解(如表 3 所示)。根据表中地震的两个断层面以及 P 轴、T 轴和 B 轴方向,分析得到最佳震源深度主要集中在分布

在 5.5 km 附近。分析认为此次地震带有逆冲成分的走滑性质断层,主压应力 P 轴近 EW 向,主张应力轴近 NS 向。其最大余震为 2014 年 1 月 20 分震中附近位置 3.0 级地震。余震序列主要呈 EW 分布,少部分呈 NS 方向分布;后续较大余震的发震破裂滑动类型以正走滑型的居多,其次为逆倾滑型及逆走滑型,结合 7 次较大余震的机制解判断,近 EW 向节面为发震断层。因此推断认为巴东地震发震构造可能为 EW 大坪断裂(图 1)。

表 3 湖北巴东 $M_{\text{S}}5.1$ 地震的震源机制解

Table 3 Focal mechanism solution result of the $M_{\text{S}}5.1$ earthquake

震中位置		震级 / M_{S}	H1 /km	H2 /km	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴	
经度	经度				走向	倾向	滑动角	走向	倾向	滑动角	方位	仰角	方位	仰角	方位	仰角
/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)				/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)	/($^{\circ}$)
31.1	110.5	5.1	5.0	5.5	166	82	41	69	49	169	291	21	175	48	36	34

3 结论与讨论

三峡水库蓄水之前,根据刘锁旺等^[3]的研究成果,巴东地区的现代地壳构造应力场主要继承了新生代应力场的特征,主压应力轴走向为 NNE-SSW 方向;NNW 和 NNE 走向的两组断裂分别显示为右旋走滑和左旋走滑活动;震源错动性质为:NNW 向的节面以右旋走滑为主;NE 向的节面则以左旋走滑为主。

本文利用 CAP 方法反演巴东 $M_{\text{S}}5.1$ 地震序列的震源机制解结果显示,最佳震源深度主要集中分布在 5.5 km 附近,最佳双力偶解为节面 I 走向 166° ,倾角 82° ,滑动角 41° ;节面 II 走向 69° ,倾角 49° ,滑动角 169° ;分析认为,此次地震为带有逆冲成分的走滑性质断层,主压应力 P 轴近 EW 向,主张应力轴近 NS 向。后续较大余震的发震破裂滑动类型以正走滑型的居多,其次为逆倾滑型及逆走滑型。根据 7 次地震的机制解判断^[2],近东西向节面为发震断层。且余震序列主要呈 EW 分布,少部分呈 NS 方向分布,进一步说明发震断裂为 EW 向大坪断裂的可能。

本次地震序列较大地震的主压应力轴走向和震源错动性质与蓄水之前巴东区域的构造应力场背景有近似性,巴东 $M5.1$ 地震活动可能与震中区域 NE 向的高桥断裂及近 EW 向的大坪断裂的区域的构造应力调整有关。

震中区位于地层较为破碎的岩溶发育地区,地下暗河发育。上述 2 条断裂在研究区中的产状较陡,破碎带较宽并切割不同时代地层和构造单元,地下水通过断裂带附近或岩溶区已有的岩石裂隙流动或渗入,裂隙水对断层结构面和软层“破碎带浸泡”软化或腐蚀,使其强度降低,甚至使原本的弱透水岩层逐渐转变为透水岩层,同时带走软弱面间的充填物,使裂隙层面失稳发生破坏或滑动,从而诱发地震^[16]。本次巴东 $M5.1$ 地震事件的发震时间处于三峡水库高水位运行期,因此推测巴东 $M5.1$ 地震活动可能是水库高水位蓄水(高应力条件下)引发的岩溶发育地区在库水作用下因构造应力调整引起裂隙(层面)滑动的水库构造地震。

参考文献(References)

[1] 陈俊华,甘家思,李胜乐,等.湖北巴东东瀼口地区地震活动特征研究[J].大地测量与地球动力学,2006,27(3):97-104.
CHEN Jun-hua,GAN Jia-si,LI Sheng-le,et al.Seismic Activity Characteristics in Dongrangkou Area,Badong Country of Hubei Province[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2006,27(3):97-104.(in Chinese)

[2] 陈俊华,陈正公,蒋玲霞,等.巴东 5.1 级地震事件初步研究[J].大地测量与动力学,2014,34(3):11-13.
CHEN Jun-hua CHEN Zheng-song,JIANG Ling-xia,et al.On-causes of Badong $M_{\text{S}}5.1$ Earthquake[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2014,34(3):11-13. (in Chinese)

[3] 刘锁旺,甘家思,薛宏交.长江三峡地区的构造应力场与地震活动[J].地震地质,1983,,5(1):29-41.
LIU Suo-wang, GAN Jia-si, XUE Hong-jiao. Tectonic Stress Field and Seismicity in the Three Gorge Region on the Changjiang River[J].Seismology and Geology,1983,5(1):29-41.(in Chinese)

[4] 程万正.高烈度区的水库地震问题[J].国际地震动态,2013(4):10-18.
CHENG Wan-zheng.The Reservoir Lnduced Earthquake Problem in the High Intensity Area[J].Recent Developments in World Seismology, 2013(4):10-18.(in Chinese)

[5] Helmberger D V,Engen G R.Modeling the Long-period Body Waves From Shallow Earthquakes at Regional Ranges[J].Bull Seism Soc Am,1980,70:1699-1714.

[6] Zhao L S,Helmberger D V.Source Estimation From Broad-band Regional Seismograms[J].Bull Seis Soc Amer,1994,84(1):91-104.

[7] Zhu L,Helmberger D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms[J].Bull Seism Soc Am,1996,86:1634-1641.

[8] Zhu L,Tan Y,Helmberger D V,et al.Calibration of the Tibetan Plateau Using Regional Seismic Waveforms[J].Pageoph, 2006,163:1193-1213.

[9] Tan Y,Zhu L,Helmberger D V,et al.Locating and Modeling Regional Earthquakes with Two Stations[J].J Geophys Res, 2006,111(B01):306-314.

[10] Zhu,Rivera.A Note on the Dynamic and Static Displacements From a Point Source in Multilayered Media[J].Geophys J Int,2002,148:619-627.

[11] 洪德全,王行舟,韩立波,等.用 CAP 方法研究安庆 4.8 级地震震源机制[J].中国地震,2011,27(2):207-214.
HONG De-quan,WANG Xing-zhou,HAN Li-bo,et al.Focal

Mechanism Solution of the 2011 M_s 4.8 Anqing Earthquake Determined from the CAP Method[J].Earthquake Research in China,2011,27(2):207-214.(in Chinese)

[12] 张爱民,李强,双差定位法在三峡库区地震定位中的应用[J].大地测量与地球动力学,2006,26(3):73-77.
ZHANG Ai-min,LI Qiang.Application of Double Difference Location Method to Earthquake in Three Gorges Reservoir area[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2006,26(3):73-77.(in Chinese)

[13] 吕坚,郑勇,倪四道,等.2005 年 11 月 26 日九江—瑞昌 M_s 5.7、 M_s 4.8 地震的震源机制解与发震构造研究[J].地球物理学报,2008,51(1):158-164.
LV Jian,ZHENG Yong,Ni Si-dao,et al.Focal Mechanisms and Seismogenic Structures of the M_s 5.7 and M_s 4.8 Jiujiang—Ruichang Earthquakes of Nov.26,2005[J].Chinese Journal of Geophysics,2008,51(1):158-164.(in Chinese)

[14] 张爱萍,倪四道,杨晓勇,等.2004 年东乌珠穆沁旗地震震源参数研究[J].地震,2008,28(3):61-68.
ZHANG Ai-ping,NI Si-dao,YANG Xiao-yong,et al.Source Parameters of 2004 Xilin Gol League Earthquake[J].Earthquake,2008,28(3):61-68.(in Chinese)

[15] 黄建平,倪四道,傅容珊,等.综合近震及远震波形反演 2006 文安地震(M_w 5.1)的震源机制解[J].地球物理学报,2009,52(1):120-130.
HUANG Jian-ping,NI Si-dao,FU Rong-shan,et al.Source Mechanism of the 2006 M_w 5.1 Wenan Earthquake Determined from a Joint Inversion of Local and Teleseismic Broad-band Waveform Data[J].Chinese Journal of Geophysics,2009,52(1):120-130.(in Chinese)

[16] 许崇宝,钱进,孙立新.岩溶裂隙发育带地震解释方法研究[J].工程地球物理学报,2008,5(2):148-151.
XU Chong-bao,Qian Jin,SUN Li-xin.Research on Seismic Interpretation Method of Karst-Fractured Zone[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2008,5(2):148-151.(in Chinese)

[17] 董兴朋,彭愿,吴阿丹.震源破裂过程反演方法研究现状及展望[J].华南地震,2012,32(2):72-77.
DONG Xing-ping,PENG Yuan,WU A-dan.Status and Prospect of Inversion Study on Source Rupture Process[J].South China Journal of Seismology,2012,32(2):72-77.(in Chinese)

更正说明

更正 1:

《地震工程学报》2014 年第 36 卷第 3 期第 434 页的“基于黏弹性边界的地下隧道非线性地震响应分析模型”一文作者发现有若干错误,其中有两处错误对本文内容有重大影响,现修改如下:

(1) 6.2 节中的“ $B/a=2.5、3、4、5、6、7、8、9$ 和 10 ”改为“ $B/a=3$ ”;

(2) 图 6 中两图左侧纵坐标的“主拉应力”改为“主压应力”。

更正 2:

《地震工程学报》2014 年第 36 卷第 3 期第 746 页作者单位英文地址有误:原 Dalian,Shenyang 更正为 Dalian,Liaoning。

更正 3:

《地震工程学报》2014 年第 36 卷第 3 期第 549 页“近海风机单桩基础桩周土应力特征分析”一文基金项目有误:原“国国家科技部地震行业专项(201408020—03);中央级公益性研究所基本科研业务费专项(2013B03);水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放研究基金资助课题(sklhse—2014—D—01);国家 973 计划(2014CB047006)”,更正为“水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放研究基金资助课题(sklhse—2014—D—01);国家 973 计划(2014CB047006)”两项。