

王小龙、雷兴林、勾宪斌等, 2015, 用 CAP 方法研究重庆荣昌 2014 年 2 月 23 日 M_L 3.8 地震震源机制, 中国地震, 31 (2), 290 ~ 296。

用 CAP 方法研究重庆荣昌 2014 年 2 月 23 日 M_L 3.8 地震震源机制

王小龙¹⁾ 雷兴林²⁾ 勾宪斌¹⁾ 郭欣¹⁾ 余国政¹⁾

1) 重庆市地震局, 重庆市渝北区红黄路 339 号 401137

2) 日本地质调查所, 筑波 305 - 8567

摘要 利用 CAP (cut-and-paste) 法反演 2014 年 2 月 23 日重庆荣昌 M_L 3.8 地震震源机制, 得到 M_w 震级为 3.04, 节面 I 走向 46° 、倾角 44° 、滑动角 74° , 节面 II 走向 247° 、倾角 48° 、滑动角 104° , P 轴方位 147.25° 、仰角 -2.09° , T 轴方位 46° 、仰角 -78.76° , 表明该地震是带走滑分量的逆冲型地震。CAP 测定的这次 M_L 3.8 地震的震源深度为 3km, 在油气的储层内, 震源机制解中节面 II 走向、倾角与震中附近的一条深度为 1700m 以下走向为 SW230° 倾向 NW, 倾角约 45° 的“腹底”逆断层基本一致。震中位于荣昌天然气田, 附近有儿口废水回注深井, 曾发生大量的注水诱发地震。本次地震亦有可能是区域主应力场的作用下, 注水后岩石的孔隙压发生变化触发了盆地盖层内“腹底”断层活动的结果。

关键词: 荣昌地震 CAP 方法 震源机制

[文章编号] 1001-4683 (2015) 02-0290-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

荣昌地处四川、重庆两地接壤处, 位于四川盆地东缘。构造上位于川东断裂褶皱带华蓥山系的西南段, 属于川中穹窿和川东断褶带 2 个构造单元的分界部位 (图 1)。川中穹窿地层近水平, 变形微弱, 以鼻状或短穹隆状背斜构造为特点。川东断裂褶皱带变形强烈, 以狭长的背斜和宽缓的向斜大致等间距平行展布为特点, 是典型的侏罗山式隔档式褶皱。背斜成山, 向斜为谷, 地表断裂与背斜构造具有伴生现象, 且大多位于背斜的轴部或陡翼 (四川省地质矿产局, 1991)。该区地震活动性原本很弱, 历史上无 5 级以上地震的记载。但有研究认为自 20 世纪 80 年代末期开始, 随着工业部门将天然采气过程产生的污水通过几口深度 2 ~ 3km 的废井回灌, 荣昌地区注水地震活动性显著提高, 已发生数十次 4 级以上地震, 包括几个 5 级地震, 成为重庆市辖区内地震活动最强的地区之一 (Lei et al, 2008)。

[收稿日期] 2014-11-10; [修定日期] 2014-12-31

[项目类别] 中国地震局星火计划 (XH14042)、重庆市科技计划项目 (cstc2013ggB0011、cstc2014jccx A0028、cstc2014yykf A0234) 联合资助

[作者简介] 王小龙, 男, 1977 年生, 固体地球物理学硕士, 重庆市地震局高级工程师, 主要从事地震监测预测与地壳结构研究。E-mail: eqwxl@mail.ustc.edu.cn

震源机制解,又称断层面解,是用地球物理学方法判别断层类型和地震发生机制的一种方法。地震发生后,通过对不同的地震台站所接受到的地震波信号进行数学分析,即可求出其震源机制解。震源机制解不仅有助于更好掌握震源性质、破裂过程、解释孕震机理及震区构造力学环境,而且能为震后救援、余震预测、震后评估提供及时准确的数据。随着宽频带数字地震台网的普及,Zhao 等(1994)提出 CAP(cut-and-paste)方法。该方法将地震波分成面波和体波部分,分别对这些截取的震相利用相关性方法进行拟合,对各自的震相按照最大的相关性系数进行比较,从而解决了由于地震波速度模型不准确导致的不同震相到时差异产生的拟合偏差,因此有效减小了地壳结构模型对反演的影响。同时,由于采用近震拟合,不但可以提高信噪比和反演精度,还能降低对台站数量和方位角分布的要求。该方法一经提出,国内外研究人员就对部分区域内的中地震开展了震源机制解研究,并获得一些很有意义的结果。本文根据重庆区域台网及邻近省份台网记录的宽频带波形数据,利用 CAP 方法对 2014 年 2 月 23 日重庆荣昌 $M_L 3.8$ 地震的震源机制和震源深度进行了反演。

1 资料选取

在通常情况下,区域速度结构的横向不均匀性随着震中距增加而增大,区域地震台站记录到的震相复杂性也随着震中距增大而增大。因此,在利用区域地震波形反演中强地震的震源机制解时,较多地采用震中距 250km 范围内的台站记录(吕坚等,2013)。在本研究中,采用中国地震台网统一地震目录中重庆荣昌地震的震级为 $M_L 3.8$,地震震中位置为 29.442°N 、 105.591°E 。我们选取震中周边 9 个台站的宽带数字地震记录进行震源机制反演,这些台站能够较好地包围震中(图 1)。地震所在区域荣昌的速度结构模型,目前也有较为可靠的研究成果(图 2)(王小龙等,2012),我们采用该模型和频率-波数法(F-K 方法)计算理论地震图。由于地震的矩心深度反映了地震发生时能量释放最大区域的震源深度,对研究地表破坏的成因比起始破裂深度更具参考意义,因此我们采用 CAP 方法对 2014 年 2 月 23 日重庆荣昌 $M_L 3.8$ 地震的矩心深度和震源机制解进行反演研究。

2 方法

对挑选出的宽频带数据先去除仪器响应,旋转至大圆路径得到径向、切向和垂向的速度记录,再分成 Pnl 和面波两个部分,并将 Pnl 部分用带宽为 0.05 ~ 0.2 Hz、面波部分用带宽为 0.05 ~ 0.10 Hz 的带通滤波器进行滤波。采用相同的滤波范围对计算得到的理论地震图进行滤波处理。选择这样的分析频率范围,既可以滤掉长周期地脉动和由速度积分得到位移造成的长周期漂移,也可以有效避免介质细结构所带来的影响,既可得到恰当的标量地震矩,也能较充分地反映地震波携带的震源信息(吕坚等,2013)。经过上述处理后,参与波形拟合的每一个台站都有 Z 分量、R 分量的 Pnl 震相和 3 个分量的面波震相资料供反演拟和分析。我们计算了 1 ~ 10km 间 10 个深度下的各台站格林函数,对断层走向、倾角、滑动角以 5° 间隔搜索不同震源深度的最佳双力偶解,然后对比不同深度反演误差,得到最佳震源深度和双力偶解。

3 结果分析

图 3(a) 给出了反演方差和震源机制解随不同深度值的变化,可见震源深度在 3km 左右

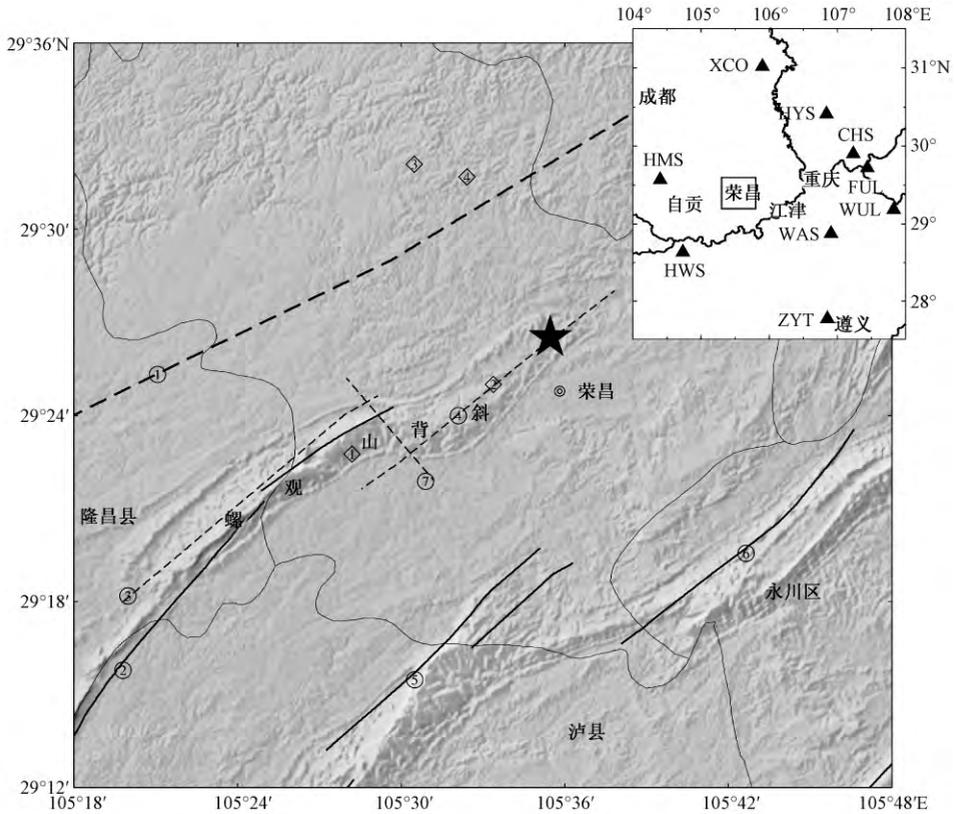


图 1 荣昌及邻近地区地质构造及反演所用资料台站分布图

- ① 釜山基底断裂; ② 燕子岩断层; ③ 螺观山北翼隐伏断层; ④ 螺观山南翼隐伏断层; ⑤ 双河断层; ⑥ 月琴坝断层;
⑦ 广顺横断层; 1~4 为 □~□ 号注水井; 五角星为震中位置; 右上角小图中黑三角为所用台站

时震源机制解的反演方差达到极小值。由此可见,此次地震震源深度为 3km 左右,考虑到速度模型本身的误差,应该有一定的误差。此次地震震源机制解的节面 I 走向 46° 、倾角 44° 、滑动角 74° ,节面 II 走向 247° 、倾角 48° 、滑动角 104° ,P 轴方位 147.25° 、仰角 -2.09° ,T 轴方位 46° 、仰角 -78.76° ,表明该地震是带走滑分量的逆冲型地震(图 3(b))。图 4 给出了相应的波形拟合情况,可见总体上拟合效果较好,本次地震反演得到的震级为 $M_w 3.04$ 。本结果与重庆地震局预报中心利用 P 波初动方法得到的结果基本一致,表明我们的 CAP 震源机制解结果是可靠的。

4 发震构造探讨

据丁仁杰等(2001)的研究可知,荣昌 $M_L 3.8$ 地震所在的螺观山背斜呈 $NE50^\circ$ 展布,在广顺至半边街一线被 $NW320^\circ$ 走向的断层右行水平扭错(图 1)。背斜轴部地震出露 $NE60^\circ$ 走向的燕子岩逆断层,断层面倾南东,倾角 $30^\circ \sim 40^\circ$,长约 10km,断层构造岩经热释光(TL)年代测定为距今 22.4 万年。震中附近未发现地表断层,但据石油深孔钻探证实,在 1700m 深度存在一条 $SW50^\circ$ 倾向北西,倾角约 45° 的“腹底”逆断层。这次 $M_L 3.8$ 地震震源深度为

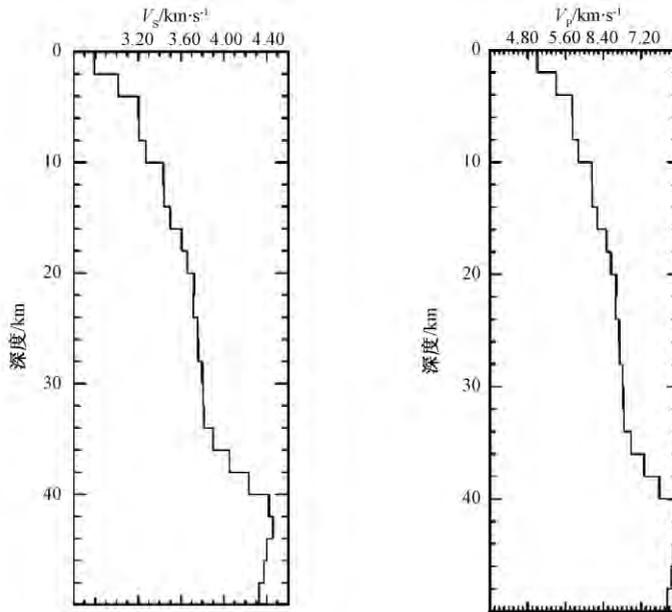


图 2 荣昌台下方的地壳速度模型 (据王小龙等,2012)

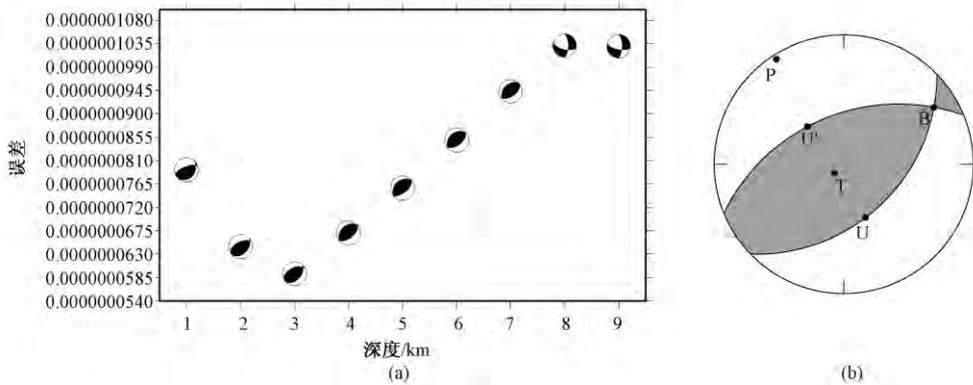


图 3 反演方差和震源机制解随不同深度的变化 (a) 及震源机制反演结果 (b)

3km, 在油气的储层盖层内, 对应地层为二叠系储层, 与自贡黄家场气田注水诱发地震序列的多数地震震源位置类似 (Lei et al, 2013) (图 5)。震源机制解中节面 II 与该“腹底”逆断层基本一致。故节面 II 是地震的主破裂面, 其走向和力学性质与震中地区 NE 向活动断裂基本一致。从图 1 可知, 螺观山背斜上有 2 口注水井, 这些注水井深达 2km 左右, 直接钻入该背斜深部的储气层。注水使该井附近的隐伏断层面的摩擦强度降低, 产生较大的应力降, 从而产生诱发地震。另外一方面, 由于四川盆地构造方向性强, 在 NW 或 SE 压应力场作用下, 形成了一系列 NE 向展布的构造带, 这些构造带与龙门山构造带大致平行。特别是在喜山期以来, 受 NWW 向挤压, 具有强烈的右行水平方向的运动力学特征, 也是形成重庆地区几近平行发育褶皱构造的主要构造成因。这次地震 P 轴方位 147.25° 、仰角 -2.09° , T 轴方

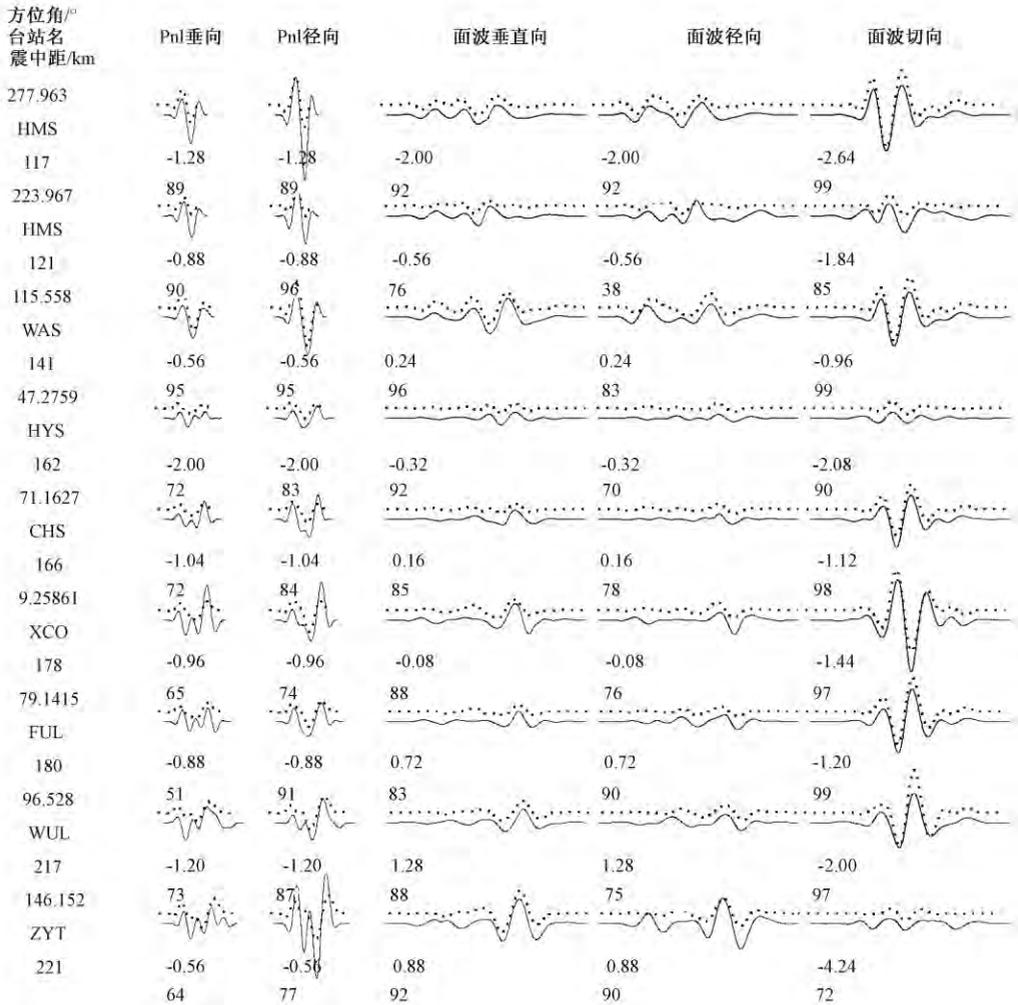


图4 2014年荣昌 M_L 3.8地震反演实际波形与理论波形对比

虚线为理论波形,实线为实际波形,波形下方数字分别为互相关系数百分比(%)和对应时间偏移(s)

位 46° 、仰角 -78.76° 与区域应力场一致。《中国震例》(1997~1999)中有资料表明(陈棋福等,2003),1997年8月13日荣昌5.2级地震的震源机制与本次地震的震源机制几乎一致。综上所述,该地震有可能是在区域主应力场的作用下,注水导致的孔隙压增加所触发的盖层内“腹底”断层活动的结果。

5 结论

本文利用2014年2月23日重庆荣昌 M_L 3.8地震的近震宽频带波形,用CAP方法反演了该地震震源机制解,得到的最佳双力偶解表明这是一次以逆冲为主兼具走滑分量的地震,节面II的走向 247° 、倾角 48° 、滑动角 104° ,与震中附近的一条深度为1700m走向为 $NE50^{\circ}$

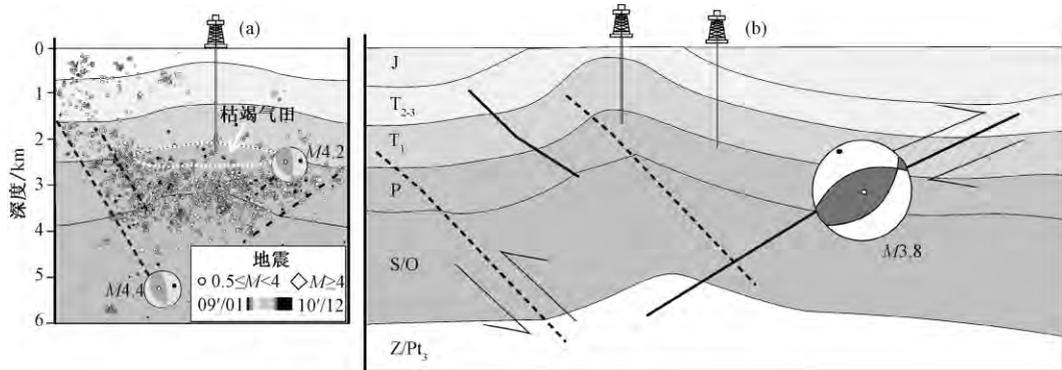


图 5 (a) 自贡黄家场气田注水诱发地震序列(据 Lei et al, 2013); (b) 2014 年荣昌 M_L 3.8 级地震的震源在相应简易地质剖面上的投影(地质剖面与相应背斜的轴垂直)

倾向 NW, 倾角约 45° 的“腹底”逆断层基本一致。震源深度为 3km 左右, 在油气储层盖层内发生的地震, 有可能是在区域主应力场的作用下, 注水后岩石的孔隙压发生变化触发了盖层内“腹底”断层活动所致。

参考文献

- 陈棋福、郑大林、高荣胜, 2003, 中国震例(1997~1999), 北京: 地震出版社。
- 丁仁杰、李克昌, 2004, 重庆地震研究, 北京: 地震出版社。
- 吕坚、郑秀芬、肖健等, 2013, 2012 年 9 月 7 日云南彝良 M_s 5.7、 M_s 5.6 地震震源破裂特征与发震构造研究, 地球物理学报, **56**(8), 2645~2654, doi: 10.6038/cjg20130814。
- 四川省地质矿产局, 1991, 四川省区域地质志, 北京: 地质出版社。
- 王小龙、马胜利、雷兴林等, 2012, 重庆荣昌诱发地震区精细速度结构及 2010 年 M_L 5.1 地震序列精确定位, 地震地质, **34**(2), 348~358。
- Lei X L, Yu G Z, Ma S L, et al, 2008, Earthquakes induced by water injection at ~3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China, *Journal of Geophysical Research*, **113**, B10310.
- Lei X L, Ma S L, Chen W K, et al, 2013, A detailed view of the injection-induced seismicity in a natural gas reservoir in Zigong, southwestern Sichuan Basin, China, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**(8), 4296~4311.
- Zhao L S, Helmberger D V, 1994, Source estimation from broadband regional seismograms, *Bull Seis Soc Amer*, **84**(1), 91~104.

Focal mechanism solution of the February 23, 2014, M_L 3.8 Rongchang earthquake with the CAP (Cut and Paste) method

Wang Xiaolong¹⁾ Lei Xinglin²⁾ Gou Xianbin¹⁾ Guo Xin¹⁾ Yu Guozheng¹⁾

1) Earthquake Administration of Chongqing Municipality, Chongqing 401137, China

2) Geological Survey of Japan AIST, Tsukuba 305 ~ 8567, Japan

Abstract A M_L 3.8 earthquake occurred on February 23, 2014, in Rongchang County, which is located at the southern edge of the Sichuan Basin in the border area between Sichuan and Chongqing. This paper presents results of the focal mechanism solution of this earthquake using the CAP (Cut and Paste) method based on broadband seismograms recorded by regional seismic stations in the Chongqing area. Our results showed that the moment magnitude and focal depth are M_w 3.09, and ~ 3 km, respectively. The hypocenter of this earthquake is located close to a buried fault in the Luoguangshan anticline. Oil prospecting and deep drilling data indicate that this buried fault is a thrust fault, striking SW230°, dipping NW45°, and ~ 1.7 km deep. There are some injection wells within the anticline, and significant injection – induced earthquakes were observed during the periods of injection of waste water into the deep formations through those wells. One nodal plane of the best double couple solution of the M_L 3.8 earthquake shows strike 247°, dip 48°, and rake 104° (46°, 44°, 74° for another nodal plane), in agreement with the geometry of the buried fault. Therefore, we conclude that the M_L 3.8 Rongchang earthquake occurred as a result of fault slip along the buried reverse fault reactivated water injection under the compressive stress regime in the area.

Key words: Rongchang gas field Cut and Paste method Focal mechanism