

黄世源, 李翠平, 王赞军, 高见, 郭卫英. 2020. 重庆垫江 $M_s4.4$ 地震: 一个可能发生在浅地表的地震. 地震学报, 42(1): 34-43. doi: 10.11939/jass.20190094.

Huang S Y, Li C P, Wang Z J, Gao J, Guo W Y. 2020. Dianjiang, Chongqing, $M_s4.4$ earthquake: A possible shallow surface earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 42(1): 34-43. doi: 10.11939/jass.20190094.

重庆垫江 $M_s4.4$ 地震: 一个可能 发生在浅地表的地震*

黄世源[†] 李翠平 王赞军 高 见 郭卫英

(中国重庆 401147 重庆市地震局)

摘要 为更好地认识 2016 年 8 月 11 日重庆垫江 $M_s4.4$ 地震的发震成因, 本文首先分析了近场地震台站记录到的该地震产生的短周期面波(Rg)强频散现象, 该现象表明本次地震具有明显的浅震特征. 然后采用 CAP 方法反演了该地震的震源机制解和震源深度, 结果显示本次地震是走向为近 EW 向的逆冲型地震, 矩震级为 $M_w4.1$, 最佳震源深度为 1—2 km. 在此基础上, 结合现场震害、烈度等震线长轴方位和地质剖面图等资料, 分析认为在区域应力集中加载作用下, 震源区沉积盖层内部的软弱地层产生挤压变形, 导致地层内斜交的裂隙发生切层失稳滑动, 从而诱发了垫江 $M_s4.4$ 地震, 同时排除了震源区 NE 走向的黄钦垭口地表断层为发震构造的可能.

关键词 重庆垫江 $M_s4.4$ 地震 震源深度 震源机制解 地震成因

doi: 10.11939/jass.20190094 中图分类号: P315.3⁺3 文献标识码: A

Dianjiang, Chongqing, $M_s4.4$ earthquake: A possible shallow surface earthquake

Huang Shiyuan[†] Li Cuiping Wang Zanjun Gao Jian Guo Weiyang

(Chongqing Earthquake Agency, Chongqing 401147, China)

Abstract: In order to better explore the causes of the $M_s4.4$ earthquake occurred on August 11 2016, in Dianjiang, Chongqing, this paper analyzes the strong dispersion of Rayleigh surface wave, and the phenomenon suggests that this earthquake has obvious shallow-source earthquake characteristics. Then, we obtained the focal mechanism and focal depth of the earthquake with CAP method. The results show that the earthquake is a thrust event with strike of nearly EW-trending, the moment magnitude is $M_w4.1$ and the estimated focal depth is 1–2 km. Finally, from the comprehensive research on mechanism solution, earthquake field damages, the isoseismal curve major axis direction and the geological section, we conclude that the Dianjiang $M_s4.4$ earthquake is caused by the slip of oblique fractures in the interlayers resulted from compressive deformations of soft strata in sedimentary covers under the concentrated loading of the regional stress field, excluding the possibility of the NE-trending Huangqinyakou fault as the seismogenic structure of the Dianjiang $M_s4.4$ earthquake.

* 基金项目 地震科技星火计划项目(XH18037Y)和重庆市地震局科技创新团队项目共同资助.

收稿日期 2019-05-23 收到初稿, 2019-07-30 决定采用修改稿.

[†] 通信作者 e-mail: hsy_email@126.com



Key words: Dianjiang, Chongqing, $M_s4.4$ earthquake; focal depth; focal mechanism solution; seismogenesis

引言

据中国地震台网(2016)测定,2016年8月11日11时49分重庆市垫江县(30.27°N , 107.38°E)发生 $M_s4.4$ 地震,震源深度 10 km. 此次地震的震中处于重庆地区弱震少震区,而该地区历史上未发生过 $M5.0$ 以上地震,最大震级地震为 1878 年 $M4.0$ 地震. 该地震发生后,重庆市地震局现场工作队赶赴受灾地区,考察该地震的震害特点和破坏范围,并结合现场震害情况、震源机制解和波形特征进行了初步分析,认为垫江 $M_s4.4$ 地震的震源深度与中国地震台网测定结果有所差别.

考虑到 CAP (cut and paste) 方法(Zhao, Helmberger, 1994; Zhu, Helmberger, 1996)是确定地震震源机制解和震源深度的可靠方法之一,近年来被广泛运用(洪德全等, 2013; 吕坚等, 2013; 杨文等, 2018),本文拟采用该方法反演垫江 $M_s4.4$ 地震的震源机制解和深度,并结合近场地震台站记录的短周期面波(Rg)波形特征、现场震害调查、烈度分布和地质剖面图等资料,深入探讨本次地震的发震成因,以期对鲜有地震活动的垫江地区提供科学参考依据.

1 震源机制解和深度反演

1.1 观测数据

由于地壳速度结构存在横向不均匀性,且横向不均匀性随震中距的增大而增大,相应震中距的地震台观测到的地震震相的复杂性也会相应地增强,所以,在采用地震波形反演地震震源机制解时,应尽可能采用震中距 200 km 范围内台站所观测到的地震波形数据(吕坚等, 2013; 王小龙等, 2015). 本文采用中国地震台网(2016)测定的垫江 $M_s4.4$ 地震震中(30.27°N , 107.38°E),选取震中距 200 km 范围内的 10 个台站(图 1)记录到的清晰的宽频带地震波形,并基于赵珠和张润生(1987)所获取的川东地区速度结构模型结果(图 2)反演震源机制解.

1.2 计算方法

在 CAP 反演过程中,首先预处理地震波形,截取波形长为 400 s,以 0.08 s 间隔重采样,然后对所选取的波形数据逐一去除仪器响应而后旋转至径向、切向和垂直向,再将分成的 Pn1 和面波两部分分别用 0.05—0.2 Hz 和 0.05—0.10 Hz 频带进行带通滤波,并将计算的理论地震图采用该频带滤波. 这样,参与拟合的台站的波形均有法向分量 Pn1、垂直向分量和面波三分量的信息,将理论波形与观测波形进行拟合,在全空间格点搜索震源参数. 本

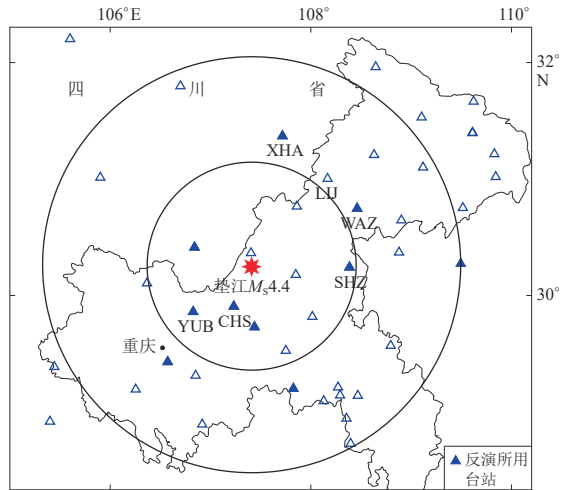


图 1 垫江 $M_s4.4$ 地震震中及台站分布
(有名称标注的台站上出现了 Rg 波)

Fig. 1 Location of the epicenter of Dianjiang $M_s4.4$ earthquake and distribution of seismic stations where Rg wave appeared at the stations labeled with name

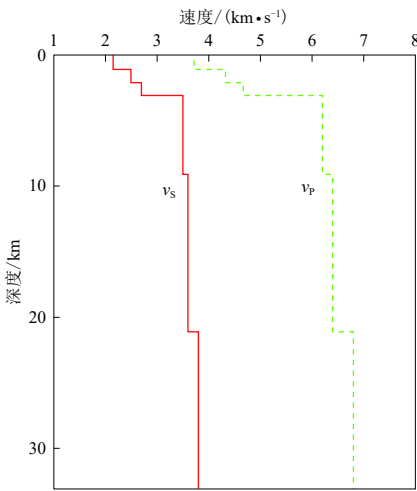


图 2 研究区地壳速度模型
(引自赵珠, 张润生, 1987)

Fig. 2 The crustal velocity model used for the studied region (after Zhao, Zhang, 1987)

用频率-波数法计算的理论地震图能较好地拟合实际观测图像, 绝对振幅值也吻合得很好, 且此次反演所获震源机制解在不同深度上的变化基本一致. 此次 CAP 方法拟合过程中, 波形吻合度高, 参与反演的台站基本处于 200—500 m 海拔范围内, 台站高程远小于速度模型及其计算方法等造成的 1—2 km 的误差值, 震源深度变化也非常稳定. 即使在不同区域的速度结构存在较大差异时, CAP 方法也能反演得到较为可靠的地震矩心深度(韦生吉等, 2009; 洪德全等, 2013). 因此, 此次反演得到的垫江地震矩心深度较传统定位方法测定的震源深度值更为可靠(宋美琴等, 2012; 谢祖军等, 2012; 蔡一川, 程静馥, 2015).

另外, 本文还与采用震中附近 27 个台站记录的 P 波初动求解的震源机制解结果进行对比, 结果列于表 1, 可见: 其发震节面、错动类型与 CAP 方法计算的结果基本一致, 也显示为近 EW 走向的逆冲性质, 矛盾比为 0.083(黄世源等, 2017). 此次垫江 $M_s4.4$ 地震为孤立型, 震后未记录到余震活动, 且震中区域地质构造行迹不明显, 因此不能准确地确定发震节面.

本文采用 CAP 方法得到的垫江地震震源深度与中国地震台网(2016)测定的 10 km 深度相

文计算了 0—5 km 深度内不同震中距台站的格林函数, 得到此深度范围内各震源机制解及相应误差. 最后对比不同深度的反演结果, 当理论波形与实际波形的拟合误差最小时所对应的即为最佳的震源机制解和震源深度.

1.3 结果分析

图 3 给出了采用 CAP 全波形方法反演得到的垫江 $M_s4.4$ 地震在 0—2 km 震源深度上的震源机制解和拟合误差值, 可见: 随深度的变化, 震源机制解反演结果非常稳定, 深度在 0.8 km 左右的震源机制解拟合误差值最小, 波形拟合最佳. 反演得到的矩震级为 $M_w4.1$, 震源机制解节面走向近 EW 向, 表明该地震为逆冲型. 图 4 为震源深度为 0.8 km 时的波形拟合图像, 可见: 10 个台站记录的 50 个震相中, 理论地震波形与实际观测波形相关系数大于 0.80 的有 47 个, 占 94%; 相关系数高于 0.90 有 39 个, 占 78%. 结果表明, 在不同方位角台站上, 利

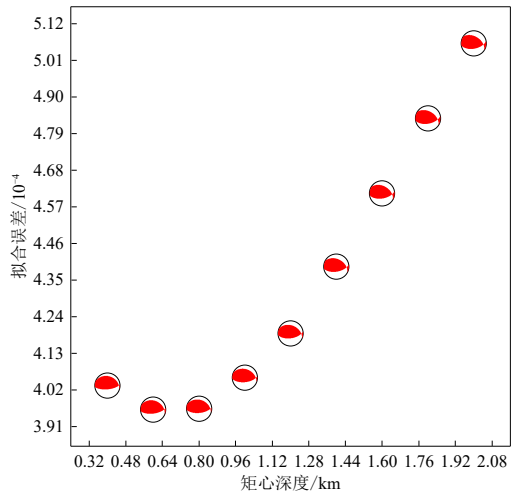


图 3 震源机制解随矩心深度的变化及相应拟合误差

Fig. 3 Variation of the focal mechanism solution with centroid depth and their erros

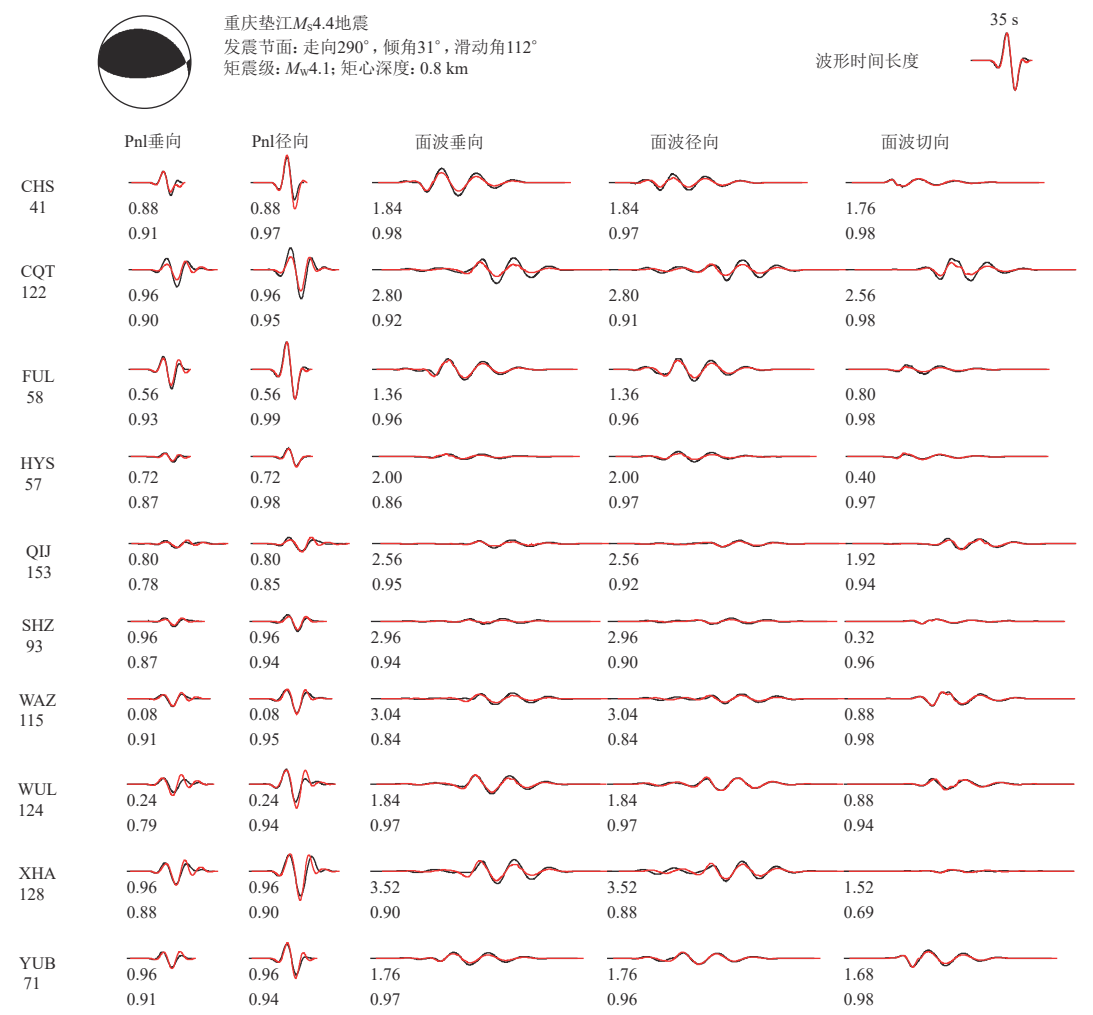


图 4 震源机制解以及理论地震图(红线)与观测地震图(黑线)对比

最左侧一列给出了台站的名称及其震中距(单位: km); 地震波形下面第一行数字为理论地震图
相对观测地震图的时移(单位: s), 第二行数字为二者的相关系数

Fig. 4 The focal mechanism inversion result and comparison of synthetic waveforms (red lines) with observed ones (black lines)

The left column is the name of the stations and its epicentral distance (unit in km). The first-row numbers beneath the seismograms are the time shifts (unit in s), and the second row numbers are their cross-correlation coefficient

表 1 基于 CAP 方法和 P 波初动方法反演所得垫江 $M_s4.4$ 地震的震源机制解参数
Table 1 Parameters of focal mechanism solution of Dianjiang $M_s4.4$ earthquake
based on CAP method and P-wave first motion method

来源	方法	节面 I			节面 II			P轴		T轴		N轴	
		走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$
本文	CAP	290	31	112	85	61	77	184	15	323	70	200	59
黄世源等(2017)	P波初动	311	41	139	74	64	56	188	13	298	57	90	30

差较大,即使考虑到速度模型及其计算方法等误差,也可以认为垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震的震源深度非常浅,为 1—2 km,应是发生在地壳沉积层内的一次极浅地震事件.

2 波形特征分析

Kafka (1990) 和 Saikia 等 (1990) 的研究表明,在震中距处于 50—125 km 范围内时,可以时常在地震波形图上观测到浅震或者爆破的周期处于 0.4—2.5 s 范围内的短周期面波(Rg),在这个频率范围内 Rg 波释放的能量主要集中在 2—3 km 深度附近的地壳浅部,当震源深度大于 4 km 后,在该频率范围内则难以观测到清晰的 Rg 波.

垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震发生后,震中距处于 46—128 km 范围内的台站中有 5 个记录到了清晰的大振幅的 Rg 震相,如图 5 所示.因 LIJ 和 WAZ 两个台站的震中距均为 116 km,导致两台站接收到的波形重叠,故图 6 中未画出 WAZ 台波形.从图 5 可见:以垂直分量最强,周期约为 1—2 s,持续约 14—25 s.图 1 标示了出现 Rg 波的台站分布位置.垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震的波形特征显示, S 波振幅明显大于 P 波振幅,明显有别于人工爆破波形,激发的 Rg 波振幅较体波发育,具有明显的频散现象,这可能是由于四川盆地浅层速度较低、短周期面波滞后于长周期面波到达所致(罗艳等, 2011).虽然目前通过记录的 Rg 波观测数据较难得出准确的深度位置,但是 Rg 波的振幅较 Pg 和 Sg 等体波更加依赖于震源深度,因此发育的 Rg 波仍可作为判定浅震的指标之一(Bath, 1975; 罗艳等, 2011).垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震在周边台站激发了很强的 Rg 波及显著的频散现象,表明研究区域浅部速度较低,震源非常浅,应该至少浅于 3 km.

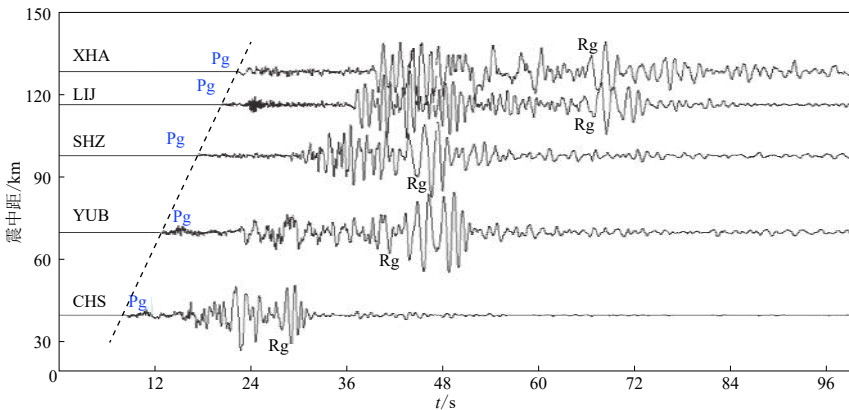


图 5 台站垂直分量波形记录

Fig. 5 The vertical component waveform of station

3 现场震害调查

在现场震害调查过程中发现,尽管垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震的震级不高,但极震区烈度达到 V 度强, V 度烈度区的等震线呈近 EW 向的长椭圆形,长轴为 19 km,短轴为 11 km,面积约 165 km² (图 6).震中部分房屋出现了墙体裂缝、错位和裂缝扩张等现象,甚至部分房屋出现了砖墙、灶台垮塌和墙体开裂等现象^①.尽管地震的震害严重程度与房屋结构、地层构造等方面

^① 重庆市地震局, 2016. 重庆垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震烈度调查与科考报告. 10—11.

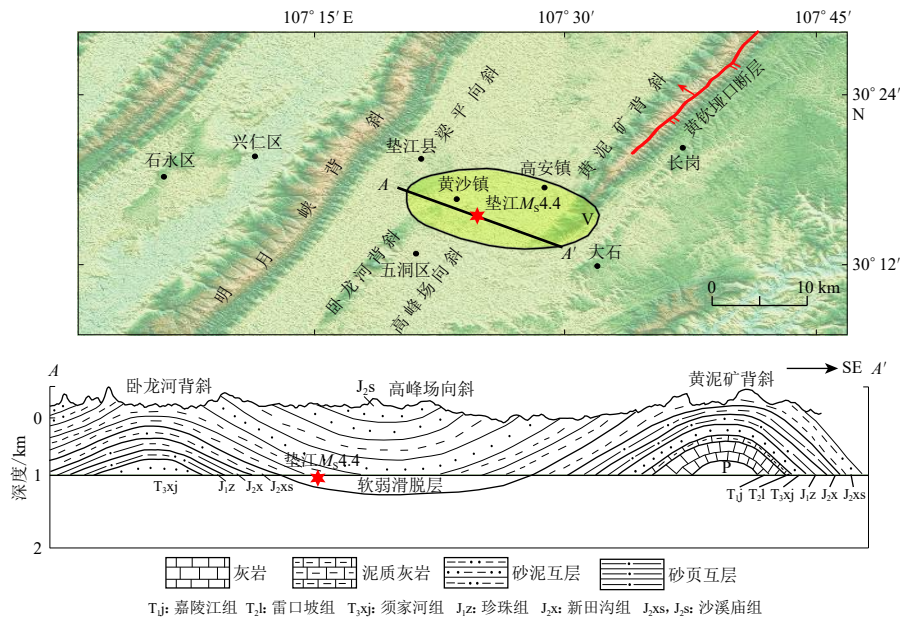


图 6 垫江 $M_S4.4$ 地震震中地质构造和烈度分布(a)及沿 AA' 的地质剖面图(b)^①
Fig. 6 Geological structure and intensity distribution (a) of the epicenter of Dianjiang $M_S4.4$ earthquake as well as geological section along AA' (b)

有关, 但对于一个震源深度在 10 km 以内的 $M_S4.4$ 地震造成的震害来说明显偏重. 据震中多数居民反映, 本次地震在震中区听到巨大地声, 如楼房轰然倒塌之声, 感觉上、下振动数秒. 然而, 一般在浅的沉积岩附近或者在基岩露出地表、表土层很薄的靠山地区, 地震触发后才容易听见地声(Stierman, 1980; 丁丹等, 2010). 因此本文认为, 垫江 $M_S4.4$ 地震应发生在浅地表附近, 这样与现场调查的宏观现象(震区震害偏重、听到巨大地声和明显震感)才更为相符.

4 震源深度与发震成因探讨

4.1 震中地质构造

据现有资料和地震现场考察结果, 垫江 $M_S4.4$ 地震地处四川盆地东部, 属川东弧形构造带的组成部分. 震区位于川东华蓥山和七曜山—金佛山两条基底断裂所夹持的垫江凹陷带中, 地表构造简单, 以构造地貌为主. 区内构造行迹以一系列 NE 向的狭长背斜和宽缓向斜相间排列为主, 包括卧龙河背斜以及与之斜列的黄泥矿背斜、高峰场向斜、梁平向斜和明月峡背斜(四川省地质矿产局, 1991). 该区域背斜轴部地层主要为三叠系须家河组(T_3Xj)、雷口坡组(T_2l)和嘉陵江组(T_1j), 向斜出露侏罗系中统沙溪庙组(J_2s , J_2xs)、新田沟组(J_2x)和下统地层珍珠组(J_1z), 地层发育齐全. 全新世区域构造活动较弱, 震中 30 km 范围内只发育有黄泥矿背斜轴部的黄钦垭口断层, 该断层为 NE 走向、NW 倾向的逆断层且在第四纪以来未活动过(图 6).

^① 四川省地质局 107 地质队, 1975. 垫江幅 1:20 万区域地质调查报告.

4.2 发震成因探讨

垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震距离黄钦垭口断层约 20 km, 若据此判定为本次地震的主要发震构造, 显然与 CAP 方法所得震源机制解中发震节面近 EW 向的结果不相符. 考虑到本次地震强度较低, 在地表未形成地表破裂, 震后也无余震活动, 为孤立型地震, 因此只能根据等震线长轴衰减方向, 并综合震源机制解等结果来推断垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震的发震构造. 据现场调查, 垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震烈度为 V 度, 等震线长轴近 EW 方向展布, 反映出引起地震灾害的地震动沿 EW 向衰减较 NS 向慢的特征. 根据等震线长轴衰减方向与震源机制节面走向一致, 而衰减较慢的方向一般与发震断层走向或破裂扩展方向一致的特征(张肇诚, 1988; 徐锡伟等, 2014), 可以判定垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震的发震节面为近 EW 走向. 因此可以排除 NE 走向的黄钦垭口断层为垫江地震发震构造的可能.

四川盆地刚柔相间的沉积盖层与刚性的结晶基底组成的二元结构, 由于水平挤压作用导致的构造变形主要发生在沉积盖层内部, 其沉积盖层厚度约为 3—7 km, 其下为隐伏结晶基底单层结构, 同时在沉积盖层的软弱夹层中形成不同深度的地层界面(罗艳等, 2011). 垫江幅 1:20 万区域地质调查报告^①的深度剖面显示, 此次垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震位于卧龙河背斜 NE 端的右翼和高峰场向斜左翼的侏罗纪中统上沙溪庙组(J_2s)中(图 6b), 以巨厚泥岩和紫红色粉砂岩为显著特点, 其沉积厚度约 1.6 km(丁仁杰, 李克昌, 2004); 此次反演的垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震震源位于上沙溪庙组(J_2s)的软弱滑脱层内, 总体走向近 EW, 倾向 NNE, 倾角为 10° — 20° . 李本亮等(2001)关于研究区不同岩性地层的样品的单轴岩石力学实验结果表明, 中侏罗统沙溪庙组红色泥岩(J_2s)相对其下伏地层具有单轴抗压强度、抗张强度和抗剪强度低、弹性模量小和泊松比大的特征, 属于极易发生层间滑动的软弱地层. 同样被认为是易发生滑脱的软弱地层巴东组砂泥岩在 2017 年发生了湖北巴东 $M_{\text{S}}4.3$ 地震(颜丹平等, 2008), 李井冈等(2018)基于震源机制解和地震定位结果的分析表明, 除了三峡库水卸荷产生的裂隙扩张作用外, 软弱地层发生软化泥化使得岩体发生顺层或切层的失稳滑动也是巴东 $M_{\text{S}}4.3$ 地震的重要成因.

综上, 垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震位于卧龙河背斜 NE 端的右翼和高峰场向斜左翼的侏罗纪中统上沙溪庙组(J_2s)中, 震源机制解为走向近 EW 向的逆冲型地震, 节面 I 倾角为 31° , 节面 II 倾角为 61° , 深度约 1—2 km, 排除了 NE 走向的黄钦垭口断层为发震构造的可能. 此次地震震源深度位于上沙溪庙组(J_2s)的软弱滑脱层内, 在区域应力集中作用下使得震中区褶皱构造的应力应变状态变得较为复杂, 软弱滑脱层内发育的裂隙在挤压变形过程中, 导致地层内斜交的裂隙发生了切层失稳滑动, 而不是产生与软弱滑脱层倾角一致的顺层滑动, 这可能是此次震源机制解倾角与滑脱面倾角不一致的原因.

5 讨论与结论

垫江 $M_{\text{S}}4.4$ 地震的震源机制解结果显示发震节面为近 EW 向, 与烈度等震线长轴衰减方向一致. 综合 CAP 方法拟合的最佳震源深度以及近震记录的 Rg 波、现场震害特征和地质剖面的分析结果表明, 地震震源深度可能在 1—2 km 范围内, 该地震是一次发生在浅地表的地震. 此次地震可能是在区域应力的集中增强作用下, 沉积盖层内软弱层的滑脱面受到挤压变

^① 四川省地质局 107 地质队, 1975. 垫江幅 1:20 万区域地质调查报告.

形, 在一些特殊的构造部位发生应力调整, 产生切层滑动, 而不是沿震源区已有地表断层产生.

垫江地区的地层由刚性的结晶基底和沉积其上的刚柔相间的沉积盖层组成. 据地震反射测线深度剖面资料, 垫江地区浅于 3 km 的岩层为中生代沉积岩石, 地层平稳且沉积层连续, 无断层出露. 虽然有一些震源极浅的地震发生在沉积层中, 但基本都是位于古生代沉积岩石之中, 而一次发生在中生代沉积盖层浅部的 $M4.0$ 地震实属罕见 (Rogers, Malkiel, 1979; Horton *et al*, 2005; 罗艳等, 2011).

据现场调查结果, 垫江 $M_s4.4$ 地震震中附近存在天然气井开采. 该地震发生后, 有研究人员认为此次地震的成因可能与当地油气井大量开采有关, 如重庆荣昌和四川自贡、宜宾等地天然气集中开采区与中、小地震丛集活动在时空关系上高度一致 (Lei *et al*, 2011; 张致伟等, 2012). 但是, 自油气井开采以来, 垫江地震震区鲜有微、小地震活动. 此次虽未收集到采气等具体数据进行详细分析, 但是地震波形特征显示, 垫江 $M_s4.4$ 地震波形的 S 波振幅发育, 震源机制解结果显示为逆冲型, 明显有别于气爆或重力塌陷型地震. 且经现场收集的资料显示, 垫江地区油气井均为低压气井^①. 因此, 垫江地震与当地天然气的开采作业是否存在一定关系, 尚需日后深入研究.

中国地震局地球物理研究所国家数字测震台网数据备份中心和四川省地震局为本研究提供了地震波形数据, 审稿老师提出了宝贵意见和建议, 作者在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- 蔡一川, 程静馥. 2015. 四川长宁地区 $M_L4.0$ 以上地震震源机制解及震源深度反演 [J]. 地震地磁观测与研究, 36(6): 14–18.
- Cai Y C, Cheng J F. 2015. Inversion of focal mechanism and focal depth of the earthquakes more than $M_L4.0$ in Changning, Sichuan Province [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 36(6): 14–18 (in Chinese).
- 丁丹, 倪四道, 田晓峰, 敬少群. 2010. 地震相关的声音现场研究进展 [J]. 华南地震, 30(2): 46–53.
- Ding D, Ni S D, Tian X F, Jing S Q. 2010. Progress in research on earthquake-related sounds [J]. *South China of Seismology*, 30(2): 46–53 (in Chinese).
- 丁仁杰, 李克昌. 2004. 重庆地震研究暨《重庆 1:50 万地震构造图》[M]. 北京: 地震出版社: 1–20.
- Ding R J, Li K C. 2004. *Research of Earthquakes in Chongqing and Chongqing 1:500 000 Seismic Structure Map* [M]. Beijing: Seismological Press: 1–20 (in Chinese).
- 洪德全, 王行舟, 倪红玉, 李锋. 2013. 多种方法研究 2012 年 7 月 20 日江苏高邮 $M_s4.9$ 级地震震源机制解和震源深度 [J]. 地球物理学报, 28(4): 1757–1765.
- Hong D Q, Wang X Z, Ni H Y, Li F. 2013. Focal mechanism and focal depth of July 20, 2012 Jiangsu Gaoyou $M_s4.9$ earthquake [J]. *Progress in Geophysics*, 28(4): 1757–1765 (in Chinese).
- 黄世源, 王宏超, 秦娟, 高见. 2017. 2016 年 8 月 11 日重庆垫江 $M_s4.4$ 级地震特征分析 [J]. 四川地震, (2): 1–5.
- Huang S Y, Wang H C, Qin J, Gao J. 2017. The principal features analysis of Dianjiang $M_s4.4$ earthquake on 11 August 2016 in Chongqing [J]. *Earthquake Research in Sichuan*, (2): 1–5 (in Chinese).
- 李本亮, 孙岩, 朱文斌, 郭继春, 温世红. 2001. 川东地区层滑参数系统研究 [J]. 西南石油学院学报, 23(1): 29–33.
- Li B L, Sun Y, Zhu W B, Guo J C, Wen S H. 2001. Study on the layer-slip parameter systems in the eastern Sichuan [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 23(1): 29–33 (in Chinese).

^① 重庆气矿. 2016. 垫江采输气作业区生产情况报告.

- 李井冈, 张丽芬, 廖武林, 赵艳南, 魏贵春, 杨捷, 陈玮. 2018. 褶皱构造中的地震: 2017年三峡库区巴东 $M_{\text{L}}4.3$ 地震序列成因讨论[J]. *地球物理学报*, **61**(9): 3701–3712.
- Li J G, Zhang L F, Liao W L, Zhao Y N, Wei G C, Yang J, Chen W. 2018. Earthquakes in the fold strcture: The genesis of the $M_{\text{L}}4.3$ earthquake sequence in the Three Gorges Reservoir area in 2017[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **61**(9): 3701–3712 (in Chinese).
- 吕坚, 郑秀芬, 肖健, 谢祖军, 曾新福, 黎斌, 董菲菲. 2013. 2012年9月7日云南彝良 $M_{\text{S}}5.7$ 、 $M_{\text{S}}5.6$ 地震震源破裂特征与发震构造研究[J]. *地球物理学报*, **56**(8): 2645–2654.
- Lü J, Zheng X F, Xiao J, Xie Z J, Zeng X F, Li B, Dong F F. 2013. Rupture characteristics and seismogenic structures of the $M_{\text{S}}5.7$ and $M_{\text{S}}5.6$ Yiliang earthquakes of Sep. 7, 2012[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(8): 2645–2654 (in Chinese).
- 罗艳, 倪四道, 曾祥方, 谢军, 陈颢, 龙锋. 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[J]. *科学通报*, **56**(2): 147–152.
- Luo Y, Ni S D, Zeng X F, Xie J, Chen Y, Long F. 2011. The $M_{\text{S}}5.0$ Suining-Tongnan (China) earthquake of 31 January 2010: A destructive earthquake occurring in sedimentary cover[J]. *Chinese Science Bulletin*, **56**(6): 521–525.
- 四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 7–263.
- Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. *Regional Geology of Sichuan Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 7–263 (in Chinese).
- 宋美琴, 李斌, 吕芳, 刘素珍, 王秀文, 梁向军. 2012. 2010年1月24日山西河津—万荣 $M_{\text{S}}4.8$ 地震特征[J]. *地震地磁观测与研究*, **33**(1): 18–22.
- Song M Q, Li B, Lü F, Liu S Z, Wang X W, Liang X J. 2012. Characteristics of Hejin-Wanrong $M_{\text{S}}4.8$ earthquake on January 24, 2010[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **33**(1): 18–22 (in Chinese).
- 王小龙, 雷兴林, 勾宪斌, 郭欣, 余国政. 2015. 用CAP方法研究重庆荣昌2014年2月23日 $M_{\text{L}}3.8$ 地震震源机制[J]. *中国地震*, **31**(2): 290–296.
- Wang X L, Lei X L, Gou X B, Guo X, Yu G Z. 2015. Focal mechanism solution of the February 23, 2014, $M_{\text{L}}3.8$ Rongchang earthquake with the CAP (Cut and Paste) method[J]. *Earthquake Research in China*, **31**(2): 290–296 (in Chinese).
- 韦生吉, 倪四道, 崇加军, 郑勇, 陈颢. 2009. 2003年8月16日赤峰地震: 一个可能发生在下地壳的地震[J]. *地球物理学报*, **52**(1): 111–119.
- Wei S J, Ni S D, Chong J J, Zheng Y, Chen Y. 2009. The 16 August 2003 Chifeng earthquake: Is it a lower crust earthquake?[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(1): 111–119 (in Chinese).
- 谢祖军, 郑勇, 倪四道, 熊熊, 王行舟, 张炳. 2012. 2011年1月19日安庆 $M_{\text{L}}4.8$ 地震的震源机制解和深度研究[J]. *地球物理学报*, **55**(5): 1624–1634.
- Xie Z J, Zheng Y, Ni S D, Xiong X, Wang X Z, Zhang B. 2012. Focal mechanism and focal depth of the 19 January 2011 Anqing earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(5): 1623–1634 (in Chinese).
- 徐锡伟, 江国焰, 于贵华, 吴熙彦, 张建国, 李西. 2014. 鲁甸6.5级地震发震断层判定及其构造属性讨论[J]. *地球物理学报*, **57**(9): 3060–3068.
- Xu X W, Jiang G Y, Yu G H, Wu X Y, Zhang J G, Li X. 2014. Discussion on seismogenic fault of the Ludian $M_{\text{S}}6.5$ earthquake and its tectonic attribution[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(9): 3060–3068 (in Chinese).
- 颜丹平, 金哲龙, 张维宸, 刘少峰. 2008. 川渝湘鄂薄皮构造带多层剥离滑脱系的岩石力学性质及其对构造变形样式的控制[J]. *地质通报*, **27**(10): 1687–1697.
- Yan D P, Jin Z L, Zhang W C, Liu S F. 2008. Rock mechanical characteristics of the multi-layer detachment fault system and their controls on the structural deformation style of the Sichuan-Chongqing-Hunan-Hubei thin-skinned belt, south Gansu, China[J]. *Geological Bulletin of China*, **27**(10): 1687–1697 (in Chinese).
- 杨文, 程佳, 姚琪, 崔仁胜, 龙海云, 韩颜颜. 2018. 2016年新疆呼图壁6.2级地震发震构造[J]. *地震地质*, **40**(5): 1100–1114.
- Yang W, Cheng J, Yao Q, Cui R S, Long H Y, Han Y Y. 2018. The preliminary study on the seismogenic structure of the Huitubi $M_{\text{S}}6.2$ earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **40**(5): 1100–1114 (in Chinese).

- 张肇诚. 1988. 中国震例(1966—1975)[M]. 北京: 地震出版社: 222.
- Zhang Z C. 1988. *Earthquake Cases in China* (1966–1975)[M]. Beijing: Seismological Press: 222 (in Chinese).
- 张致伟, 程万正, 梁明剑, 王晓山, 龙锋, 许艳, 陈文康, 王世元. 2012. 四川自贡—隆昌地区注水诱发地震研究[J]. *地球物理学报*, **55**(5): 1635–1645.
- Zhang Z W, Cheng W Z, Liang M J, Wang X S, Long F, Xu Y, Chen W K, Wang S Y. 2012. Study on earthquakes induced by water injection in Zigong-Longchang area, Sichuan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(5): 1635–1645 (in Chinese).
- 赵珠, 张润生. 1987. 四川地区地壳上地幔速度结构的初步研究[J]. *地震学报*, **9**(2): 154–166.
- Zhao Z, Zhang R S. 1987. Primary study of crustal and upper mantle velocity structure of Sichuan Province[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **9**(2): 154–166 (in Chinese).
- 中国地震台网中心. 2016. 重庆垫江县发生 4.4 级地震[EB/OL]. [2019-01-05]. <https://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/rdbd/5217530/index.html>.
- China Earthquake Networks Center. 2016. An earthquake with $M_s4.4$ occurred in Dianjiang, Chongqing[EB/OL]. [2019-01-05]. <https://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/rdbd/5217530/index.html> (in Chinese).
- Båth M. 1975. Short-period Rayleigh waves from near-surface events[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **10**(4): 369–376.
- Horton S P, Kim W Y, Withers M. 2005. The 6 June 2003 Bardwell, Kentucky, earthquake sequence: Evidence for a locally perturbed stress field in the Mississippi embayment[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(2): 431–445.
- Kafka A L. 1990. Rg as a depth discriminant for earthquakes and explosions: A case study in New England[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **80**: 373–394.
- Lei X L, Yu G Z, Ma S L, Wen X Z, Wang Q. 2011. Earthquakes induced by water injection at ~3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China[J]. *J Geophys Res*, **113**(B10).
- Rogers A M, Malkiel A. 1979. A study of earthquakes in the Permian basin of Texas-New Mexico[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **69**(3): 843–865.
- Saikia C K, Kafka A L, Gnewuch S C, McTigue J W. 1990. Shear velocity and intrinsic Q structure of the shallow crust in southeastern New England from Rg wave dispersion[J]. *J Geophys Res*, **95**(B6): 8527–8541.
- Stierman D J. 1980. Earthquake sounds and animal cues; some field observations[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **70**(2): 639–643.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(1): 91–104.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(5): 1634–1641.