

# 2006年文安地震孕育、发生的应力场动态图像\*

王晓山, 刁桂苓, 冯向东, 赵英萍

(河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 利用数字地震记录反演了河北地区  $M_L \geq 2.0$  地震的震源机制解, 通过对震源机制解各参数的统计分析, 发现应力轴的优势取向和华北构造应力场完全吻合, 反映它们受到大区域动力因素的制约。进行震源机制解一致性参数计算, 并对一致性参数进行空间平面插值, 得到了2006年文安地震前震源机制解一致性参数空间动态的变化特征。文安地震前在震源区附近出现了大范围的一致性参数低值区域, 并且低值区域面积随时间增长逐渐扩大, 这可能是中强震前的一种具有动力学意义的前兆现象。

**关键词:** 震源机制解; 一致性参数; 空间插值; 文安地震

**中图分类号:** P315.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2011)03-0266-05

## 0 引言

研究表明, 强震活动受到构造应力场的制约, 一般情况下震源机制与应力场的方向是吻合的(李钦祖等, 1982)。运用大量中小地震震源机制解既可以描述震源区应力场状态, 也能够探讨大范围构造应力场的作用, 从动力成因和运动过程两方面分析大震区数十年来应力场演化、不同阶段的特征。前苏联学者 Sadovsky 等(1972)报道过加尔姆地区中强地震前一年半到两年时间内, 小震P轴取向由紊乱趋于一致。陈颙(1980)根据海城前震序列的研究, 提出用震源机制的一致性作为判别前震的新参数; 刁桂苓和于新昌(1980, 1982)发现在唐山7.8级地震和北京延庆5.4级地震前, 由震区附近小震P波初动资料得到的综合断层面解矛盾符号占全部符号的比例降低的现象; 刁桂苓等(1994)通过分析夏威夷 Kaoiki 地区的震源机制变化, 提出考虑震源区应力场的改变进行地震预报的思路。刁桂苓等(2004)对大同地震序列, 赵英萍等(2004)对张北地震序列震源机制一致性参数进行时间扫描发现, 在强余震前一致性参数都出现低值异常。美国南加州地区两个  $M > 7.0$  大震(Landers 和 Hector Mine 地震)前, 该区小震震源机制存在趋于主震震源机制的现象(万永革, 2008)。张致伟等(2010)反

演汶川地震序列829个震源机制, 发现余震区南、北段的震源机制解一致性参数随时间变化总体平稳。

2006年7月4日11时56分, 在河北文安( $38^{\circ}53.85'N$ ,  $116^{\circ}16.88'E$ )发生5.1级地震, 震源深度19.3 km(刁桂苓等, 2006)。文安地震发生在河北平原强震构造带上, 从公元777年至1977年该构造带内发生6级以上强震19次(中国地震局震害防御司, 1995, 1999)。在强震构造带的河间至宁河之间, 是6级以上地震缺失时间最长的一段, 能量释放最不充分, 文安位于缺震段的中南部。文安地震前, 2001年10月~2006年6月形成  $M_L \geq 1.5$  小震空区, 计算该空区边缘区域  $M_L \geq 2.0$  地震视应力, 发现在2004年出现明显的视应力升高过程(陈学忠, 李艳娥, 2007); 地震波速比在文安和唐山附近地区出现正常一降低一恢复一发震的异常演变过程(王林瑛等, 2008)。本文利用平面插值的方法对文安地震前后震源机制解一致性参数进行平面插值扫描, 讨论地震前后一致性参数空间动态的变化特征, 提取有预测意义的信息。

## 1 资料数据和计算方法

本研究利用河北省遥测台网记录的河北及邻

\* 收稿日期: 2010-11-23.

基金项目: 中国地震局地震行业科研专项(200808053), 山东省自然科学基金项目(Y2005E02)和河北省科技支撑计划(09276904D)共同资助。

区  $M_L \geq 2.0$  地震的数字化波形数据，并补充周边省份波形数据，震源位置取自中国地震台网中心汇编 C01 目录，震源机制计算采用梁尚鸿等（1984）提出的利用区域地震台网的垂直向  $\bar{P}$ 、 $\bar{S}$  最大振幅比资料测定小震震源参数的方法。胡新亮等（2004）利用首都圈记录到的数字化波形反演震源机制，并与格点尝试法得到的震源机制进行比较，二者基本一致，证实了该方法的可靠性。付虹等（2009）通过对云南地区 19 个地震的实际对比分析，发现 P 波和 S 波最大振幅比值与地震的记录形式无关，与振幅的绝对大小无关，与震级大小也基本无关。

为了保证单个震源机制解的稳定性，参与计算的台站数目一般要求 6 个以上，而且在震中周围均匀分布，震中距控制在 150 km 之内，避免出现  $P_n$  和  $P_{11}$  混淆的情况；记录振幅要求大于 0.5 mm，而且不能限幅。从图 1 中的台网分布来看，上述条件是容易达到的。反演计算采用的速度结构模型（表 1）综合了人工地震测深和天然地震层析成像的结果（孙若昧，刘福田，1995；张成科，张先康，1997；王椿镛等，1993）。计算得到从 2002 年 1 月~2008 年 4 月河北及邻区的震源机制解共 673 个，覆盖了  $113.0^\circ \sim 119.0^\circ \text{ E}$ ， $36.0^\circ \sim 42.0^\circ \text{ N}$  的范围（图 1）。

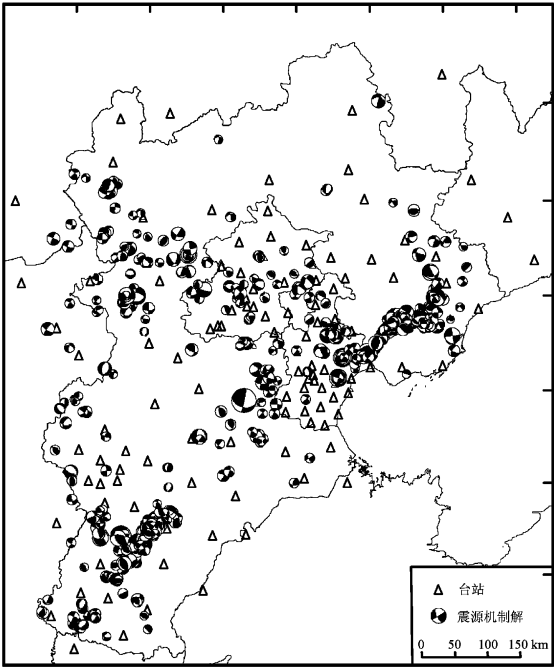


图 1 震源机制解和台站分布

Fig. 1 Distribution of focal mechanism and stations

表 1 反演计算采用的速度结构模型  
Tab. 1 Velocity structure model in  
focal mechanism inversion

P 波波速/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	每层厚度/km
4. 60	5. 0
5. 38	5. 0
6. 10	5. 0
6. 50	5. 0
6. 80	5. 0
7. 20	5. 0
7. 60	6. 0

一个区域的应力场可分为区域构造应力场和震源应力场。区域构造应力场主要反映整个区域内的应力状态，对区域构造应力场主要研究是否存在一个较为稳定的空间取向，认为这个稳定的空间取向对中强地震的发生起控制作用；震源应力场反映震源区附近短时间内的应力场变化、扰动，通过研究地震震源应力场取向的变化，就能发现构造运动的情况及强震的前兆信息。如果背景构造应力场的空间方向由 3 个相互正交的应力主轴  $\sigma_1$ ， $\sigma_2$ ， $\sigma_3$  表示，震源机制的取向由 3 个相互正交的应力轴  $P$ 、 $B$ 、 $T$  表示（图 2），那么就可以定义震源机制和构造应力场的一致性参数（王俊国，刁桂苓，2005）： $a = \alpha + \beta + \gamma$ ，其中： $\alpha = \angle \sigma_1 P$ ， $\beta = \angle \sigma_2 B$ ， $\gamma = \angle \sigma_3 T$ 。一致性参数的最大值为  $270^\circ$ ，最小值为  $0^\circ$ ，它反映了单个震源机制解的力轴与平均应力张量的差异程度，强震前孕震区内大量中小地震的震源机制一致性参数反映了孕震区内地震震源应力场与构造区域应力场的关系。

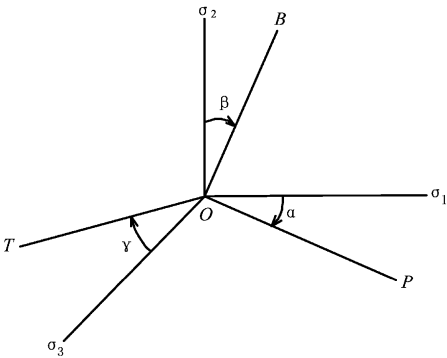


图 2 应力场 3 个主轴和震源机制 3 个应力轴夹角示意  
Fig. 2 Included angles for 3 principal axes ( $\sigma_1$ ， $\sigma_2$  and  $\sigma_3$ ) of tectonic stress field and 3 principal stress axes ( $P$ ， $T$  and  $B$ ) of focal mechanism

## 2 计算结果

对震源机制解的各个参数,以  $10^\circ$  间隔绘制归一频数分布(图 3, 4)。由于地震较小,无法区分断层面和辅助面,故将 2 个节面等同看待,合并计算。其中图 3a 是节面走向,其大体呈各个方位均匀分布,在 NNE—SSW 和 NNW—SEE 方向,稍显优势,而这 2 个方向恰恰是华北强震的 2 个破裂方向。图 3b 为节面滑动角,它以走向滑动为主,尤其右旋走滑最多;其次属于斜向滑动;倾向滑动最少,但是正断层和逆断层都独立存在。图 3c 是节面倾角,它接近直立的高倾角最多,倾斜其次,几乎没有近水平的节面。图 4a 是  $P$  轴的方位,它在 NEE—EW 向存在显著优势取向;图 4b 是  $T$  轴方位,它在 NNW—SN 向存在显著优势取向,和水平面的夹角(图 4d, e)则接近水平,呈稍稍翘起的形态。 $N$  轴和水平面的夹角(图 4f)呈倾斜向直立靠拢。即便是大量中小地震的震源机制解,应力轴的优势取向和华北构造应力场完全吻合,反映它们同样受到大区域动力因素的制约。但是它们 also 具有很强的随机性和局部特征,如破裂方向近乎均匀地散布在各个方位。因此我们可以利用这种双重性质,考察中小地震受控于区域构造应力场的强弱。

对于河北及邻区的构造应力场,我们采用李钦祖等(1982)的研究结果,确定出应力主轴  $\sigma_{1az} = 70^\circ$ ,  $\sigma_{1pl} = 0^\circ$ ;  $\sigma_{2az} = 160^\circ$ ,  $\sigma_{2pl} = 0^\circ$ ;  $\sigma_{3az} = 0^\circ$ ,  $\sigma_{3pl} = 90^\circ$ 。我们对 673 个震源机制解在三维空间进行一致性参数计算,利用 MapInfo 软件中的专题地图(Thematic Map)功能,对震源机制一致性参数进行平面插值作图,插值采用不规则三角网插值 TIN 方法。TIN 中的节点是测量点本身,它尊重实际测量值。由于震中位置是不规则的,在变化较大或者需要详细信息的地区, TIN 可以使用更高的精度。栅格大小为 5 km,距离 120 km。作图采用时间窗长 2 年,步长 1 年进行滑动。由于文安地震发生于 2006 年 7 月 4 日,计算震前震源机制解一致性参数的时间范围从 2004 年 7 月至 2006 年 6 月,滑动步长 2 年,以保证足够的样本数。图 5 中蓝色区域表示震源机制解一致性参数较小,到 2003 年底(图 5a),在文安地震震中附近发生几

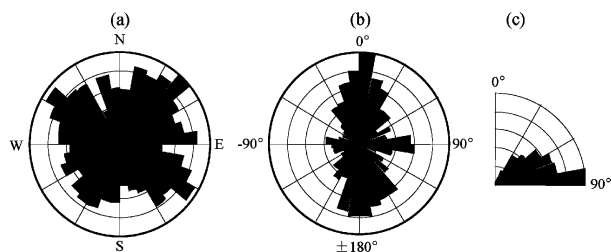


图 3 震源机制节面参数归一频数分布图  
(a) 节面走向; (b) 节面滑动角; (c) 节面倾角  
Fig. 3 Normalized frequency distribution for nodal plane parameters  
(a) Strike of the nodal plane; (b) Slip of the nodal plane; (c) Dip of the nodal plane

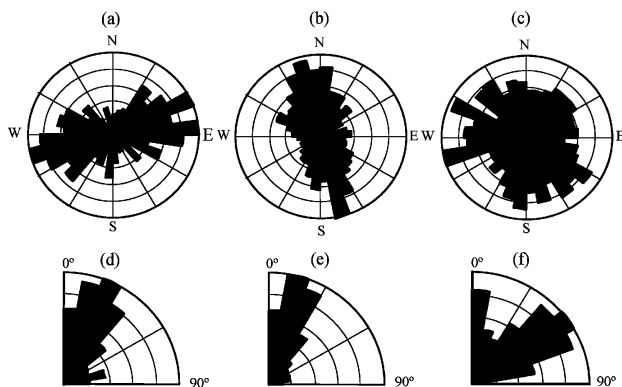


图 4 震源机制力轴参数归一频数分布图  
(a)  $P$  轴方位角; (b)  $T$  轴方位角; (c)  $N$  轴方位角;  
(d)  $P$  轴倾角; (e)  $T$  轴倾角; (f)  $N$  轴倾角  
Fig. 4 Normalized frequency distribution for stress axes parameters of focal mechanisms  
(a) Azimuth of  $P$  axis; (b) Azimuth of  $T$  axis;  
(c) Azimuth of  $N$  axis; (d) Dip of  $P$  axis;  
(e) Dip of  $T$  axis; (f) Dip of  $N$  axis

次小震,一致性参数显示小范围低值;到 2004 年底(图 5b),低值区范围有所扩大,并向 SW 方向发展;到 2005 年底(图 5c),低值区在原来范围的基础上向 NE 方向发展,异常区域面积持续增大;到文安地震前(图 5d),形成了一个  $4^\circ \times 1^\circ$  的不规则异常区域。异常梯度带沿河北平原地震带展布,而文安地震发生在异常区域的边缘,这个现象可能包含一定的构造意义,即该地震受到 NNE 向河北平原地震带的控制。震后到 2008 年 4 月震源机制解一致性参数平面插值图中没有出现文安地震前的大范围低值区(图 5e),而在文安地震后河北地区 5 级以上地震活动持续平静。

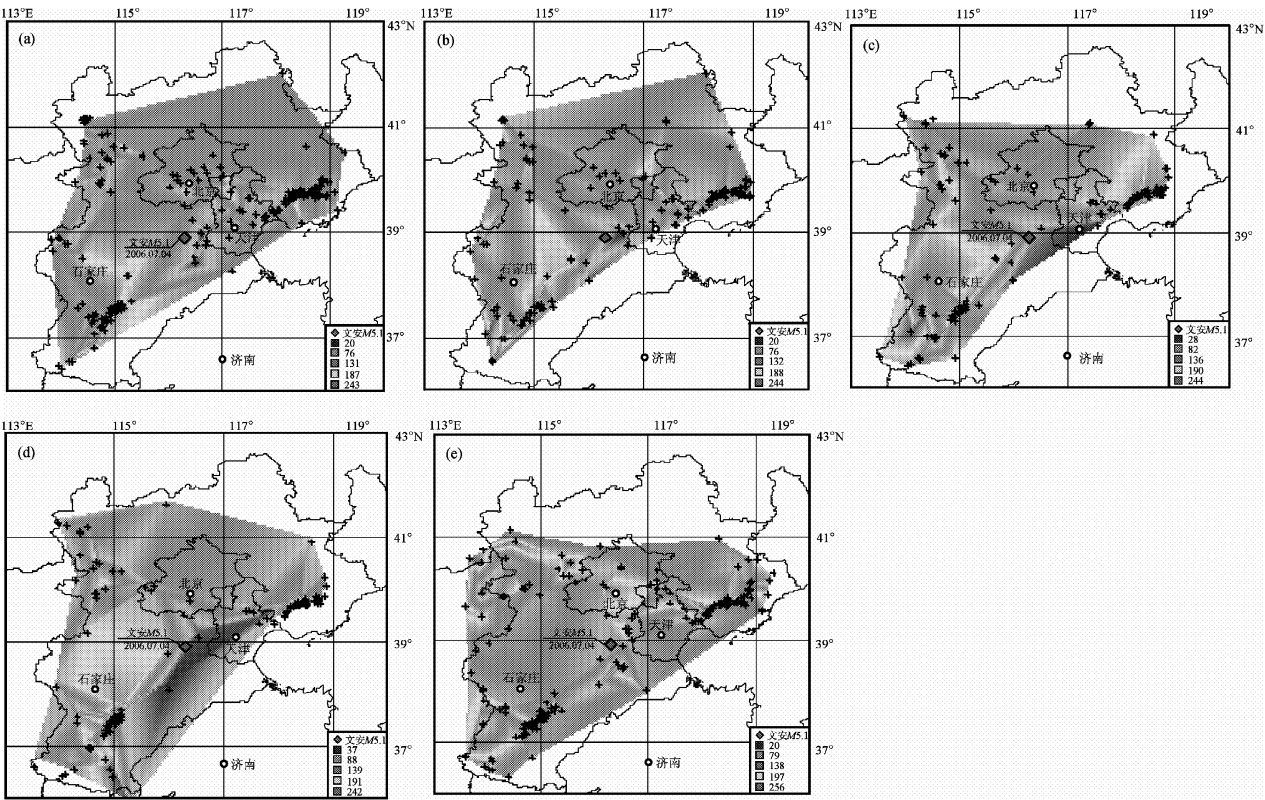


图5  $M_L \geq 2.0$  地震震源机制解一致性参数空间插值图

(a) 2002-01-01 ~ 2003-12-31 (273 个); (b) 2003-01-01 ~ 2004-12-31 (154 个); (c) 2004-01-01 ~ 2005-12-31 (161 个); (d) . 2004-07-01 ~ 2006-06-30 (151 个); (e) 2006-07-05 ~ 2008-04-30 (208 个)

Fig. 5 Spatial interpolation of consistent parameter of focal mechanisms for  $M_L \geq 2.0$  earthquakes

4 讨论与结论

我们求取小震震源机制的参数目的往往不是为了单一地得到某个中小地震的震源机制参数，而是在求取大量中小地震震源机制解的基础上，用统计的方法提取具有平均意义的信息和统计特征的变化。通过计算文安地震前后震源机制解一致性参数并对其进行平面插值，得到地震前在震源区附近出现了大范围的一致性参数低值区域，并有随时间增长低值区域面积逐渐扩大的现象。这可能是中强震前的一种前兆现象。

大量中小地震的震源机制的一致性判断地震危险性的一个有用的判据。任何一个地震序列都有发生、发展、衰退的过程，前震或在震群中最大地震发生之前，震源机制解一致性则表明孕震区域受到构造应力场控制，并且低值区逐步扩大，表明构造应力存在持续增强的过程（陈颙，1980）。震后大范围低值异常不复存在，表明区域

进入应力松弛状态。以往利用震源一致性对地震危险性进行判断都只讨论了时间进程上的变化，本文利用平面插值的方法对震源机制解一致性参数进行了空间动态扫描，对未来中强地震的发震地点判定提供了一些参考依据，然而由于地震活动发生的随机性和空间不均匀性，可能导致地震在某个阶段某个地点过于集中，对平面插值的可靠性造成一定的干扰。虽然地震震源机制解的统计平均与构造应力方向并不完全一致，但大震之前小震震源机制趋近区域构造应力场的现象在一定程度上代表了区域应力场方向集中于产生主震破裂的应力方向上。若研究地震之前震源周围小震震源机制与构造应力场的一致性参数，或许可能得到地震孕育过程的某些信息。

参考文献：

陈学忠,李艳娥. 2007. 2006 年 7 月 4 日河北文安  $M_s 5.1$  地震前震中周围地区小震视应力随时间的变化[J]. 中国地震,23(4):327-336.

- 陈颢. 1980. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数[J]. 地球物理学报, 2(3): 39–47.
- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1994. 强震前后震源区应力场变化一例[J]. 地震学报, 16(1): 64–69.
- 刁桂苓, 于新昌. 1980. 唐山地震前后京、津、唐、张地区的综合断层面解[J]. 西北地震学报, 2(3): 39–47.
- 刁桂苓, 张四昌, 孙佩卿, 等. 2006. 2006 年 7 月 4 日文安 5.1 级地震[J]. 地震地质, 28(3): 497–502.
- 刁桂苓, 赵英萍, 噶永清, 等. 2004. 大同晚期强余震前震源机制解的一致性特征[J]. 内陆地震, 18(3): 202–206.
- 刁桂苓, 于新昌. 1982. 海坨山地震前综合断层面解矛盾比的变化[J]. 地震, (5): 16–17.
- 付虹, 王绍晋, 龙晓帆, 等. 2009. 利用数字化速度波形和仿真位移波形资料求解震源机制解的比较[J]. 地震研究, 32(1): 18–24.
- 胡新亮, 刁桂苓, 马瑾, 等. 2004. 利用数字地震记录的 P、S 振幅比资料测定小震震源机制解的可靠性分析[J]. 地震地质, 26(2): 347–354.
- 李钦祖, 靳雅敏, 于新昌. 1982. 华北地区的震源机制与地壳应力场[J]. 地震学报, 4(1): 55–61.
- 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镒, 等. 1984. 利用区域地震台网 P、S 振幅比资料测定小震震源参数[J]. 地球物理学报, 27(3): 247–257.
- 孙若昧, 刘福田. 1995. 京津唐地区地壳结构与强震的发生: I. P 波速度结构[J]. 地球物理学报, 38(5): 599–607.
- 万永革. 2008. 美国 Landers 地震和 Hector Mine 地震前震源机制与主震机制一致性现象的研究[J]. 中国地震, 24(3): 216–225.
- 王椿镛, 王贵美. 1993. 用深地震反射方法研究邢台地震区地壳细结构[J]. 地球物理学报, 1993, 36(4): 445–452.
- 王俊国, 刁桂苓. 2005. 千岛岛弧地震前哈佛大学矩心矩张量(CMT)解一致性的预测意义[J]. 地震学报, 27(2): 178–183.
- 王林瑛, 郭永霞, 刘芳, 等. 2008. 文安地震前后首都圈分区波速比时变特征[J]. 地震学报, 30(3): 240–253.
- 张成科, 张先康. 1997. 文安—蔚县—察右中旗剖面地壳上地幔速度结构与构造研究[J]. 华北地震科学, 15(3): 18–28.
- 张致伟, 张永久, 程万正, 等. 2010. 汶川 8.0 级地震序列的小震震源机制及应力场特征[J]. 地震研究, 33(1): 43–49.
- 赵英萍, 刁桂苓, 高景春, 等. 2004. 张北强余震前震源机制解的一致性特征[J]. 华北地震科学, 22(1): 1–4.
- 中国地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪~公元 1911 年)[M]. 北京: 地震出版社.
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录(公元 1912~公元 1990 年)[M]. 北京: 科学技术出版社.
- Sadovsky M A, Nersesova I L, Nigmatullaev S K, *et al.* 1972. The processes preceding strong earthquakes in some regions of middle Asia [J]. Tectonophysics, 14(3–4): 295–307.

## Dynamic Images of Stress Field during Genesis and Occurrence of the 2006 Wen'an Earthquake

WANG Xiao-shan, DIAO Gui-ling, FENG Xiang-dong, ZHAO Ying-ping  
(Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

### Abstract

Through digital seismic waveform data, the focal-mechanism solutions of the  $M_L \geq 2.0$  earthquakes in Hebei region are inverted. The analysis of the solutions shows that the dominant orientation of stress axial is completely consistent with that of the tectonic stress field of North China. This phenomenon indicates that the focal-mechanism solutions are restricted by the dynamic factors in a large-scale area. The consistent parameters of the focal mechanism solutions are calculated and spatially interpolated and their characteristics of spatial dynamic variation before the 2006,  $M_5.1$ , Wen'an Earthquake are got. The result showed that a larger area with the low value of the consistent-parameters appeared around the focal region before the Wen'an Earthquake, and it expanded gradually along with time. This phenomenon might be a dynamic precursor of the medium-strong earthquake.

**Key words:** focal-mechanism solution; consistent parameter; spatial interpolation; Wen'an earthquake