



## 2012 年江苏高邮、宝应交界 $M_s4.9$ 地震发震断层参数测定<sup>①</sup>

倪红玉<sup>1,2</sup>, 郑海刚<sup>1</sup>, 刘泽民<sup>1</sup>, 李军辉<sup>1,2</sup>

(1.安徽省地震局, 安徽 合肥 230031; 2.蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 安徽 蒙城 233500)

**摘要:**基于一维单侧有限移动震源模式,根据地震波传播过程中的多普勒效应,分别利用 P 波和 S 波拐角频率的方位变化,反演 2012 年 7 月 20 日江苏高邮、宝应交界  $M_s4.9$  地震的发震断层面参数。P 波和 S 波拐角频率的反演结果一致显示:本次地震的断层面破裂方向为  $232^\circ$  左右,破裂面呈 NE-SW 向;地震马赫数  $v/c$  为 0.2 左右,平均破裂速度小于 S 波速度,破裂长度较短,为  $0.2\sim 0.3$  km 左右。破裂面方位与震源机制解、宏观烈度调查和余震精定位的研究结果具有一致性,结合震区周边的地质构造背景,分析认为滁河断裂很可能是高邮、宝应交界  $M_s4.9$  地震的发震构造。

**关键词:** 断层面参数; 拐角频率; 多普勒效应; 滁河断裂

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0260-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0260

## Determination of Fault Plane Parameters of the 2012 Gaoyou—Baoying $M_s4.9$ Earthquake in Jiangsu Province

NI Hong-yu<sup>1,2</sup>, ZHENG Hai-gang<sup>1</sup>, LIU Ze-min<sup>1</sup>, LI Jun-hui<sup>1,2</sup>

(1. Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China;  
2. Mengcheng National Geophysical Observatory, Mengcheng, Anhui 233500, China)

**Abstract:** Based on a 1D finite moving source model propagating unilaterally with uniform velocity, the rupture transmission in one direction is superior to that in other directions. According to the Doppler Effect in the earthquake rupture process, the seismic wave frequency received by earthquake stations changes in different directions and thus, we can use the directional change of the corner frequency of the P or S waves to obtain the source parameters of the fault plane. In this article, the azimuth of rupture propagation direction and source parameters of the fault plane of the July 20, 2012,  $M_s4.9$  earthquake at the boundary zone of Gaoyou and Baoying in Jiangsu Province are obtained using the directional change of the corner frequency of the P and S waves, respectively. The azimuth angle of the fault plane for this earthquake was determined to be  $232^\circ$  by the P waves and  $233.5^\circ$  by the S waves, the seismic Mach number ( $v/c$ ) was about 0.18 by the P waves and 0.23 by the S waves, and the fault length was about 0.26 km by the P waves and 0.18 km by the S waves. The result inverted by the corner frequency of the P and S waves is consistent, which shows that the azimuth angle of the fault plane for this earthquake was about  $232^\circ$ . Because of the lack of a near-station record at an azimuth of  $49^\circ$ , the inversion method is based on a 1D finite moving source model propagating unilaterally with uniform velocity. Therefore, the result of a rupture azimuth of  $232^\circ$  cannot represent a rupture propagating in the direction from NE to SW; it only indicates that the rupture surfaces were aligned in that direction. The seismic Mach number was about 0.2, which shows that the rupture velocity was smaller than the S wave velocity, and the fault length was about  $0.2\sim 0.3$  km. Many scholars have studied the seismogenic structure of the earthquake on July 20, 2012, using a variety of methods such as focal mechanism solutions, field seismic intensity in-

① 收稿日期: 2014-05-09

基金项目: 中国地震局 2014 年震情跟踪定向工作任务(2014020113); 安徽地震科研基金青年项目(20130704)

作者简介: 倪红玉(1982-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事构造应力场反演和地震预报研究工作. E-mail: hyni@mail.ustc.edu.cn

vestigations, and relocation for aftershocks; however, the results have not been the same. The results of focal mechanism solutions show that the strike angle of one fault plane is  $14^\circ \sim 28^\circ$  in the NNE direction, whereas the strike angle of the other is in the NW direction. Analysis shows that the fault plane might be in the NNE direction; however, the results of both field seismic intensity investigations and relocation for aftershocks show the fault plane might be in the NE direction. Our result show that the fault plane is aligned NE-SW, which is in accordance with the field seismic intensity investigations and relocation for aftershocks. The result inverted by the corner frequency of the P and S waves is consistent, showing a rupture azimuth with NE-SW alignment, which indicates that this method is meaningful in the fitting of the azimuth angle of an earthquake fault plane. Combined with regional geological structural data, we suggest that the Chuhe fault is likely to be the seismogenic structure of the  $M_s4.9$  earthquake at the boundary zone of Gaoyou and Baoying.

**Key words:** parameters of fault plane; corner frequency; Doppler effect; Chuhe river fault

## 0 引言

2012 年 7 月 20 日 20 点 11 分在江苏省高邮市与宝应县交界发生  $M_s4.9$  地震,这是 1990 年常熟  $M_s5.1$  地震以来江苏省陆地上发生的最大地震,也是华东地区近年来发生的较大地震。本次地震有感范围较大,江苏全省普遍有感,周边省、市部分地区有感,其中高邮、宝应、兴化、金湖、建湖、涟水等地地震感强烈,极震区烈度达 VI 度。地震造成部分建筑物倒塌,1 人死亡,3 人受伤<sup>[1]</sup>,引起社会各界的高度关注。地震发生后,众多学者对其发震构造的认识存在不同的观点。

地震破裂方向及其破裂特征研究是地震学中的重要内容之一,对深入认识地震的孕育发生过程以及地震预测研究都具有科学意义。对于中强地震,目前一般是根据震源机制结合余震总体分布走向、野外地震地表破裂带展布或等震线长轴方向推测震时主破裂面的破裂方向。而对于中小地震,特别是在缺乏地质构造信息和余震震中分布的情况下,仅靠震源机制很难确定发震断层面。

近年来多位学者根据地震的多普勒效应,如利用 P 波初动半周期<sup>[2]</sup>、震源时间函数的宽度或强度来确定中小地震断层破裂参数<sup>[3-7]</sup>。上述方法通常是基于 P 波资料,一般情况下,近震的 S 波信号比 P 波信号强,容易分辨。怎样利用 S 波来确定发震断层面是一个值得研究的问题。陈学忠等<sup>[8]</sup>提出一种利用 S 波来确定发震断层面的方法:在单侧破裂并具有均一破裂速度的一维震源模型下,破裂在单方向的传播优于其他方向,由于地震波传播过程中的多普勒效应,台站接收到的地震波频率存在方向性变化,因而可以利用 P 波或 S 波拐角频率的方向性变化特征来反演地震的发震断层参数<sup>[9-12]</sup>。本文利用该方法测定 2012 年 7 月 20 日江苏高邮、宝应交界  $M_s4.9$  地震的震源破裂参数,并结合地震地质条件、震源机制解、宏观烈度调查和余震精定位等探讨其发震构造。

## 1 发震断层面参数测定方法

### 1.1 拐角频率的测定

在近震源条件下,震源距  $r$  较小,可以忽略地壳介质非弹性衰减的影响。这时可以采用 Brune 模型<sup>[13]</sup>,通过对地震位移谱和速度谱进行积分的方法直接求得拐角频率<sup>[8]</sup>。

一般情况下数字地震台网记录的是速度,记为  $V(t)$ ,经傅里叶变换后可求得地震波的速度谱  $V(f)$ ,再经积分后可得位移谱  $D(f)$ <sup>[14]</sup>,则有

$$S_D = 2 \int D(f)^2 df = \frac{1}{4} \Omega_0^2 (2\pi f_0) \quad (1)$$

$$S_V = 2 \int V(f)^2 df = \frac{1}{4} \Omega_0^2 (2\pi f_0)^3 \quad (2)$$

拐角频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S_V}{S_D}} \quad (3)$$

### 1.2 利用拐角频率确定发震断层面参数

由于地震破裂时所产生的地震波频率存在方向性变化,从而引起拐角频率的方向性,因此可以利用 P 波或 S 波拐角频率的方向性变化来确定地震破裂面<sup>[3-7]</sup>。在一维有限移动震源模型下,单侧破裂的震源断层产生的地震波远场位移频谱为<sup>[15-16]</sup>

$$|U(\omega)| = \frac{m_0 |\Re|}{4\pi\rho c^3 R} \left| \frac{\sin(X)}{X} \right| |\omega G(\omega)| \quad (4)$$

式(4)中  $G(\omega)$  为震源时间函数  $g(t)$  的频谱;  $X = \omega T_s = \frac{\omega L}{2} \left( \frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{c} \right)$ , 其中  $\theta = \varphi_0 - \varphi$ ,  $\varphi_0$  为破裂方向的方位角,  $\varphi$  为台站方位角,  $L$  为断层破裂长度,  $v$  为破裂速度;  $c$  为波速;  $\Re$  为辐射因子;  $m_0$  为标量地震矩。

若震源时间函数  $g(t)$  取单位阶跃函数  $H(t)$  时<sup>[15]</sup>,

$$|U(\omega)| = \frac{m_0 |\Re|}{4\pi\rho c^3 R} \left| \frac{\sin(X)}{X} \right| = \begin{cases} \frac{m_0 |\Re|}{4\pi\rho c^3 R} & (\text{当 } \omega \rightarrow 0 \text{ 时}) \\ \frac{m_0 |\Re|}{4\pi\rho c^3 R} \cdot \frac{1}{X} & (\text{当 } \omega \text{ 足够大时}) \end{cases} \quad (5)$$

当  $\omega$  取拐角频率  $\omega_0$  时,地震波远场辐射谱为零频谱值,那么  $1/X = 1$ , 即  $\omega_0 T_0 = 1$ , 则

$$T_0 = \frac{1}{\omega_0} = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{c} \right) \quad (6)$$

进一步可写成

$$T_0 = a - b \cos\theta = a - b \cos(\varphi_0 - \varphi) \quad (7)$$

式中  $a = \frac{L}{2v}$ ;  $b = \frac{L}{2c}$ 。

设有  $N$  个台站, 台站的方位角为  $\varphi_i (i=1, 2, 3, \dots, N)$ , 拐角频率的倒数为  $T_{0i} (i=1, 2, 3, \dots, N)$ 。式(7)中  $T_{0i}$  与  $\cos(\varphi_0 - \varphi_i)$  的线性相关系数  $r$  为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中  $x_i = \cos(\varphi_0 - \varphi_i)$ ;  $y_i = T_{0i}$ 。根据相关系数方法, 当  $r$  取最小值时, 对应的  $\varphi_0$  为断层破裂传播方向。

已知断层破裂传播方向  $\varphi_0$ , 可以利用最小二乘法拟合式(7), 得到系数  $a$  和  $b$ , 从而求得地震马赫数  $v/c$ , 即破裂速度与波速的比值。

$$\frac{v}{c} = \frac{b}{a} \quad (9)$$

## 2 资料选取和计算结果

### 2.1 资料的选取

高邮、宝应交界  $M_s 4.9$  地震发生在江苏中部 ( $33.05^\circ \text{N}$ ,  $119.55^\circ \text{E}$ ), 震源深度为  $9 \sim 10 \text{ km}$  [17]。江苏台网和安徽台网的台站基本可以记录到较好的地震波形, 山东台网、浙江台网和江西台网的个别台站可以记录到清晰的地震波形。为了满足研究的需要, 本文收集了江苏、安徽、山东、浙江和江西 5 个台网的数字化地震波形资料。为了能真实反映拐角频率在各个方向的差异, 从而提高拟合计算的精确度, 要求震中周围台站均匀分布, 并且为了忽略非弹性衰减的影响, 要求震源距  $r$  较小, 因此从上述 5 个台网中选取震中距在  $145 \text{ km}$  以内的 14 个台站的波形资料, 如图 1 和表 1 所示。由于资料限制缺少方位角在  $49^\circ$  以内的近台记录, 所选台站方位角范围为  $49^\circ \sim 342^\circ$ , 跨度达  $293^\circ$ , 基本能反映地震波频率随方位的变化, 可以保证测定结果的可靠性。

### 2.2 拐角频率计算结果

将波形数据进行去倾处理, 然后进行傅氏变换, 再积分后得到观测位移谱, 图 2 为宝应台、兴化台记录到的该次地震的 P 波和 S 波的观测位移谱。本文用上述方法得到 14 个台站 P 波和 S 波的震源谱拐角频率以及各台站的位置参数(表 1)及各台站的拐角频率与台站方位角的关系(图 3)。

分别将  $\varphi_0 = 232^\circ, 233.5^\circ$  代入式(7), 通过最小二乘法拟合得到地震马赫数和破裂长度(表 2)。计算破裂长度时, 根据 Crust2.0 地壳速度模型, 震源深度  $9 \sim 10 \text{ km}$  处 P 波波速为  $6.1 \text{ km/s}$ , S 波波速为  $3.52 \text{ km/s}$ 。

综上所述, 本文根据地震破裂过程中的多普勒效应, 利用多台 P 波和 S 波的拐角频率推算了 2012 年 7 月 20 日江苏高邮、宝应交界  $M_s 4.9$  地震的震源破裂参数, 分别得到破裂方位角为  $\varphi_0 = 232^\circ, 233.5^\circ$ , 两者基本一致。表明本次地震的破裂面呈 NE-SW 向, 破裂速度小于 S 波速度, 破裂长度较短, 为  $0.2 \sim 0.3 \text{ km}$ 。

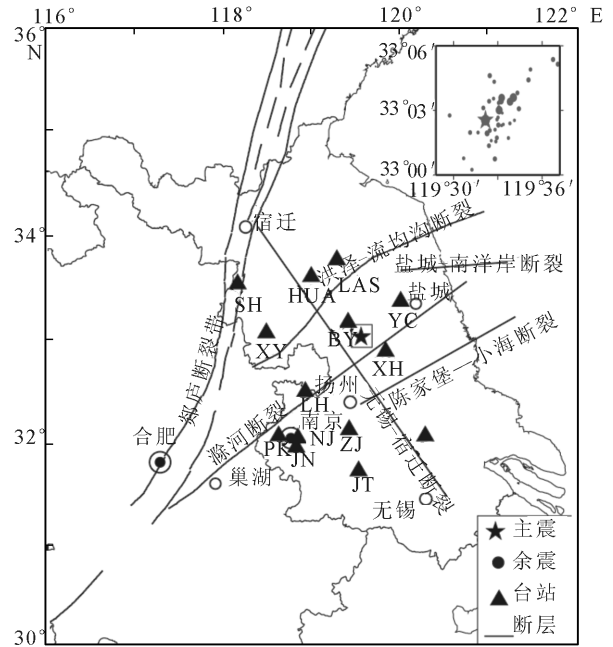


图 1 高邮、宝应交界  $M_s 4.9$  地震震中附近断裂和所选台站分布

Fig.1 Distribution of the faults around epicenter of Gaoyou-Baoying  $M_s 4.9$  earthquake and chosen stations

表 1 台站基本要素和震源谱拐角频率

Table 1 Basic parameter and corner frequency of source spectrum of stations

台站 代码	位置		震中 距/km	方位角 / $^\circ$	拐角频率/Hz	
	纬度/ $^\circ$	经度/ $^\circ$			P 波	S 波
BY (宝应)	33.26	119.27	20.44	316.02	1.25	1.28
XH (兴化)	32.89	119.85	30.85	122.48	1.18	1.12
YC (盐城)	33.37	120.02	56.46	48.64	1.40	1.33
HUA (淮安)	33.62	119.01	83.08	320.27	1.62	1.19
LH (六合)	32.50	118.93	83.90	225.07	2.10	2.23
LAS (涟水)	33.77	119.29	85.88	342.32	2.17	1.43
XY (盱眙)	33.07	118.49	100.45	272.19	1.20	1.04
ZJ (镇江)	32.13	119.43	101.25	187.42	2.38	1.59
JJ (靖江)	32.07	120.30	127.08	147.41	1.33	1.11
NJ2 (南京)	32.05	118.85	128.14	211.70	1.57	1.54
JN (江宁)	31.96	118.84	137.70	210.22	1.43	1.27
PK (浦口)	32.07	118.63	138.20	219.50	1.69	1.21
SH (泗洪)	33.54	118.16	142.73	293.37	1.21	1.08
JT (金坛)	31.73	119.54	144.95	181.12	1.40	1.03

表 2 高邮、宝应交界  $M_s 4.9$  地震断层参数

Table 2 Rupture parameters of Gaoyou-Baoying  $M_s 4.9$  earthquake

项目	破裂方位角/ $^\circ$	地震马赫数	破裂长度/km
P 波	232	0.18	0.26
S 波	233.5	0.23	0.18

## 3 破裂参数的对比分析

(1) 与震源机制解的对比

收集了多位学者采用不同方法计算的 2012 年 7 月 20

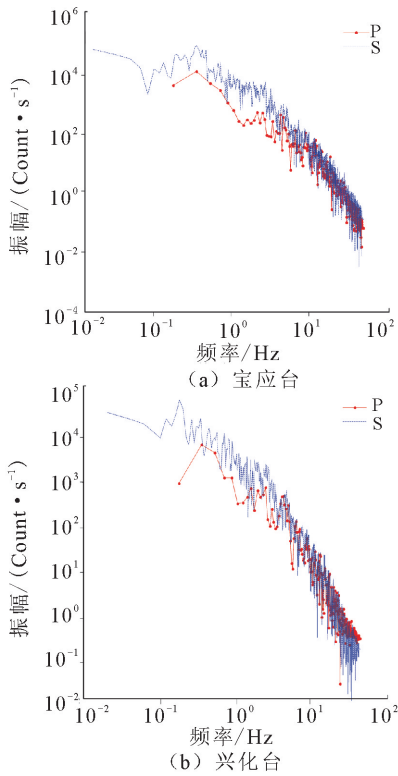


图 2 宝应台、兴化台记录到的高邮、宝应交界  $M_s4.9$  地震的 P 波和 S 波的位移谱

Fig.2 The displacement spectrums of P wave and S wave of Gaoyou—Baoying  $M_s4.9$  earthquake recorded by BY and XH station

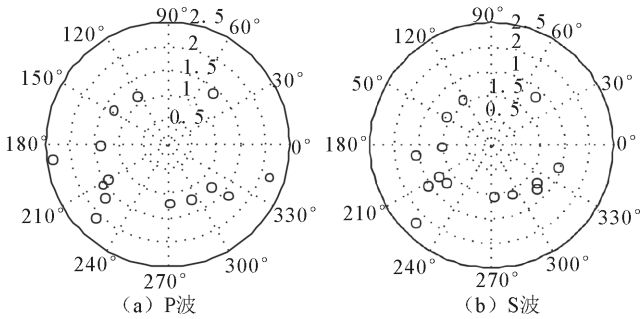
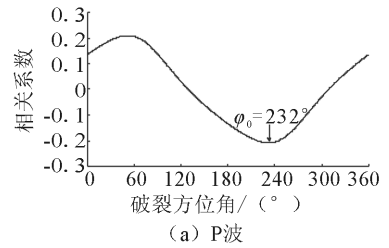


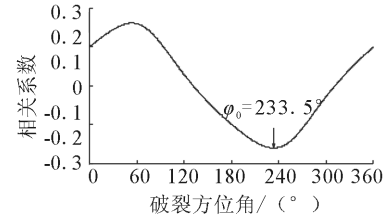
图 3 台站拐角频率和方位角的关系 (径向数字为拐角频率,空心圆圈的角度为台站方位角)

Fig.3 The relation between corner frequency and azimuth angle of seismic stations (Radial digit represents the corner frequency, hollow circle represents the azimuth angle of station)

日江苏高邮、宝应交界  $M_s4.9$  地震的震源机制解 (表 3), 其结果基本一致, 显示该地震为走滑型地震, 压应力主轴为 NEE 向, 张应力主轴为 NNW 向, 与华北地区的应力场方向较为一致<sup>[19]</sup>, 表明本次地震受华北区域应力场的控制。两组节面走向分别为节面 I: NNE 向 ( $14^\circ \sim 28^\circ$ )、节面 II: NWW 向 ( $107^\circ \sim 122^\circ$ )。本文的反演结果为破裂方位角  $232^\circ$  左右, 呈 NE-SW 向, 与震源机制解节面 II NWW 向的走向相差较大, 相对于节面 I NNE 向的走向东偏  $30^\circ$  左右。



(a) P波



(b) S波

图 4 拟合的相关系数随破裂方位角的变化

Fig.4 Variation of the fitted correlation coefficient with the rupture azimuth angle

(2) 与现场调查和余震精定位结果对比

据刘建达等根据地震现场调查划分的地震烈度等震线图<sup>[1]</sup>, 本次地震极震区的烈度为 VI 度, 呈椭圆形, 长轴呈 NE 向, 水平夹角为  $45^\circ \sim 60^\circ$ ; 图 1 中右上角框图为“双差”精定位后的余震序列分布<sup>[20]</sup>, 显示余震沿 NE 向展布。本文反演的破裂方位角为  $232^\circ$  左右, 破裂面沿 NE-SW 向, 与现场考察和余震精定位结果较为一致, 均表明本次地震的发震断层沿 NE 向展布。

(3) 可能发震构造分析

震源区位于扬子陆块区扬子陆块之下扬子 (苏皖) 前陆盆地上, 地质构造简单, 断裂发育较少, 主要以盆地的隐伏断裂为主。除周边的郟城—庐江深大断裂带<sup>[21]</sup>、洪泽—流均沟断裂和陈家堡—小海断裂外, 影响该地区的主要断裂有: 滁河断裂、宿迁—洪泽断裂 (无锡—宿迁断裂) 和盐城—南洋岸断裂 (图 1), 其中震中附近的断裂有无锡—宿迁断裂和滁河断裂。无锡—宿迁断裂北起邳县, 穿越郟庐断裂带, 经宿迁、洪泽、高邮、镇江、常州延伸至无锡以南, 总体走向 SE-NW。该断裂带切穿其他方向的构造, 反映了最新活动构造特征<sup>[22]</sup>; 滁河断裂是由地球物理异常揭示出来的一条深大断裂带, 从安徽庐江, 经巢湖, 沿滁河, 过江苏盐城一带, 向东进入黄海, 断裂总体走向  $NE50^\circ \sim 60^\circ$ , 该断裂白垩纪之后活动变弱, 新构造时期再次活动, 现代小震沿此断裂线性分布明显<sup>[23-24]</sup>。滁河断裂位于震中东南侧约 8 km 处, 总体走向  $NE50^\circ \sim 60^\circ$ , 与反演的破裂面方向较为吻合。本文利用多台 P 波和 S 波的拐角频率的方向性拟合出破裂面沿 NE-SW 向, 结合震源机制解、余震精定位、现场调查和震区周边的地质构造背景等分析认为滁河断裂很可能是 2012 年 7 月 20 日江苏高邮、宝应交界  $M_s4.9$  地震的发震构造。

4 结论与讨论

(1) 本文分别利用多台 P 波和 S 波拐角频率的多普勒效应, 反演得到高邮、宝应交界  $M_s4.9$  地震的发震断层面参

数。反演结果一致显示,本次地震的破裂方向为  $232^\circ$  左右,速度小于 S 波速度,破裂长度较短,为  $0.2\sim 0.3$  km。破裂面呈 NE-SW 向;地震马赫数  $v/c$  为 0.2 左右,平均破裂

表 3 高邮、宝应交界  $M_s4.9$  地震的震源机制解Fig.3 The focal mechanisms of Gaoyou—Baoying  $M_s4.9$  earthquake

序号	研究小组	节面 I			节面 II		
		走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$
1	洪德全等 <sup>[17]</sup> CAP 法	17	72	175	109	85	18
2	洪德全等 <sup>[17]</sup> Snoko 法	197	79	147	294	57	13
3	孙业君等 <sup>[18]</sup> Snoko 法	208	80	151	302	62	11
4	孙业君等 <sup>[18]</sup> TMDT 法	194	75	155	291	66	17

(2) 高邮、宝应交界  $M_s4.9$  地震发生后,众多学者通过多种方法探讨了其发震构造,但观点不尽相同<sup>[1,17-18,20]</sup>,其中震源机制解反演结果表明 NNE 向的节面可能为发震断层面,而宏观烈度调查和余震精定位结果显示发震断层面可能呈 NE 向。本文利用多台 P 波和 S 波拐角频率的多普勒效应,反演得到本次地震的破裂面呈 NE-SW 向,与宏观烈度调查和余震精定位的研究结果一致,相对震源机制解确定的节面 I NNE 向的走向东偏  $30^\circ$  左右。结合震区周边的地质构造背景,分析认为滁河断裂很可能是高邮、宝应交界  $M_s4.9$  地震的发震构造。

(3) 利用拐角频率的多普勒效应测定中小地震破裂参数的误差,除了与观测台站的分布和记录的波形质量有关外,简化的模型也有可能造成一些偏差。由于该方法是建立在震源时间函数为阶跃函数、介质均匀、单侧破裂模型的基础上,对于震源时间函数过于复杂和双侧破裂的情况还无法处理。为保证反演结果的可信度,应尽量与震源机制解、余震分布和宏观烈度调查等其它结果进行对比验证。由于反演时缺少方位角在  $49^\circ$  以内的近台记录,且反演方法是基于单侧破裂模型,因此本文反演得到的  $232^\circ$  的破裂方位角并不能表示破裂从 NE 向 WS 方向传播,仅能表明破裂面呈 NE-SW 向。

致谢:本研究得到中国地震局地球物理研究所陈学忠、李艳娥和江苏省地震局孙业君的帮助,在此表示衷心的感谢。

### 参考文献(References)

- [1] 刘建达,杨伟林,李丽梅,等.江苏高邮—宝应交界 4.9 级地震震害分析[J].中国地震,2012,28(4):402-414.  
LIU Jian-da, YANG Wei-lin, LI Li-mei, et al. Damage Survey and Analysis on Earthquake ( $M_s=4.9$ ) at the Boundary Zone of Gaoyou and Baoying, Jiangsu Province[J]. Earthquake Research in China, 2012, 28(4): 402-414. (in Chinese)
- [2] 卓钰如,李文香.用多普勒效应研究中小地震的破裂面和破裂传播速度[J].地震学报,1982,4(1):14-26.  
ZHUO Yu-ru, LI Wen-xiang. Study on the Rapture Surface and Rapture Propagation Speed of Moderate and Small Earthquakes Using Doppler Effect[J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 1982, 4(1): 14-26. (in Chinese)
- [3] Frankel A, Fletcher J, Vernon F, et al. Rupture Characteristics

and Tomographic Source Imaging of  $M_3$  Earthquakes Near Anza, Southern California [J]. J. Geophys. Res., 1986, 91: 12633-12650.

- [4] Badaww A, Abdel-Fattah A K. Source Parameters and Fault plane Determinations of the 28th Dec., 1999 Northern Cairo Earthquake[J]. Tectonophysics, 2001, 334(1-2): 63-77.
- [5] Abdel-Fattah A K. An Approach to Investigate Earthquake Rupture Processes[J]. Acta Geophysica Polonica, 2003, 51(3): 257-269.
- [6] 许向彤,陈运泰,王培德.1995年7月20日怀来盆地  $M_L=4.1$  地震的破裂过程[J].地震学报,1999,21(6):570-582.  
XU Xiang-tong, CHEN Yun-tai, WANG Pei-de. Pupture Process of the  $M_L=4.1$  Earthquake in Huailai Basin on July 20, 1995[J]. Acta Seismologica Sinica, 1999, 21(6): 570-582. (in Chinese)
- [7] 许向彤,陈运泰,王培德.1995年7月20日怀来盆地  $M_L=4.1$  地震序列参数的精确测定[J].地震学报,2001,23(3):225-238.  
XU Xiang-tong, CHEN Yun-tai, WANG Pei-de. Precise Determination of Focal Parameter of the  $M_L=4.1$  Earthquake in Huailai Basin on July 20, 1995 [J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(3): 225-238. (in Chinese)
- [8] 陈学忠,王琼,刘冬英.1995年河北沙城  $M_L4.1$  地震发震断层参数测定[J].地震,2005,25(2):69-74.  
CHEN Xue-zhong, WANG Qiong, LIU Dong-ying. Fault Plane Determination for the 1995  $M_L4.1$  Shacheng Earthquake, Hua-bei Province[J]. Earthquake, 2005, 25(2): 69-74. (in Chinese)
- [9] 刘泽民,张军,沈小七,等.安徽两次中等地震发震断层参数确定[J].华南地震,2008,28(3):89-94.  
LIU Ze-min, ZHANG Jun, SHEN Xiao-qi, et al. Determination of Fault Plane Parameters of Two Medium Earthquakes in Anhui[J]. South China Journal of Seismolog, 2008, 28(3): 89-94. (in Chinese)
- [10] 阮祥,程万正.云南鲁甸 3 次  $M_s \geq 5.0$  地震破裂参数的研究[J].地震学报,2008,30(1):97-102.  
RUAN Xiang, CHENG Wan-zheng. Rupture Parameters of Three Ludian, Yunnan,  $M_s \geq 5.0$  Earthquakes [J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 30(1): 97-102. (in Chinese)
- [11] 陈学忠,吕坚,王慧敏.2005年11月26日江西九江—瑞昌  $M_s5.7$  地震序列的破裂过程研究[J].地震,2008,28(1):100-106.  
CHEN Xue-zhong, Lvjian, WANG Hui-min. Investigation on

- Rupture Process of the Jiujiang—Ruichang  $M_s 5.7$  Earthquake Sequence of November 26, 2005[J]. *Earthquake*, 2008, 28(1): 100-106. (in Chinese)
- [12] 李艳娥, 郭祥云, 王恒信, 等. 2011 年 5 月 20 日山东安丘  $M_L 3.7$  地震发震断层参数测定[J]. *地震*, 2012, 32(3): 52-58.  
LI Yan-e, GUO Xiang-yun, WANG Heng-xin, et al. Fault Plane Determination for the 2011  $M_L 3.7$  Anqiu Earthquake, Shandong Province[J]. *Earthquake*, 2012, 32(3): 52-58. (in Chinese)
- [13] Andrews D J. Objective Determination of Source Parameters and Similarity of Earthquakes of Different Size[C]//Das S, Boatwright J, Scholz C H. *Earthquake Source Mechanics* Washington DC: AGU, 1986, 259-267.
- [14] 王鹏, 郑建常, 赵金花. 胶东半岛地区震源谱参数研究[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(2): 360-365.  
WANG Peng, ZHEN Jian-chang, ZHAO Jin-hua. Status of Seismic Source Spectral Parameters in the Jiaodong Peninsula [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(2): 360-365. (in Chinese)
- [15] 徐果明, 周惠兰. *地震学原理*[M]. 北京: 科学出版社, 1982, 397-400.  
XU Guo-min, ZHOU Hui-lan. *Elements of Seismology*[M]. Beijing: Science Press, 1982, 397-400. (in Chinese)
- [16] Ben-Menhaem A. Radiation of Seismic Body Waves From a Finite Moving Source in the Earth[J]. *J Geophys Res*, 1962, 67: 345-350.
- [17] 洪德全, 王行舟, 倪红玉, 等. 多种数字地震学方法研究 2012 年 7 月 20 日江苏高邮  $M_s 4.9$  级地震震源机制解和震源深度[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(4): 1757-1765.  
HONG De-quan, WANG Xing-zhou, NI Hong-yu, et al. Focal Mechanism and Focal Depth of July 20, 2012 Jiangsu Gaoyou  $M_s 4.9$  Earthquake[J]. *Progress in Geophys*, 2013, 28(4): 1757-1765. (in Chinese)
- [18] 孙业君, 王俊, 黄耘. 2012 年 7 月 20 日江苏高邮—宝应  $M 4.9$  地震震源机制解[J]. *防灾减灾工程学报*, 2012, 32(4): 521-522.  
SUN Ye-jun, WANG Jun, HUANG Yun. Focal Mechanism Solution of  $M 4.9$  Earthquake for 20 July 2012 Gaoyou—Baoying, Jiangsu Province[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2012, 32(4): 521-522. (in Chinese)
- [19] 李钦祖, 靳雅敏, 于新昌. 华北地区的震源机制与地壳应力场[J]. *地震学报*, 1982, 4(1): 55-61.  
LI Qin-zu, JIN Ya-min, YU Xin-chang. Focal Mechanism Solution and Crust Stress Field of North China Region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1982, 4(1): 55-61. (in Chinese)
- [20] 刘佳敏, 任焯, 尹欣欣. 江苏宝应 4.9 级地震序列双差定位处理[J]. *地震地磁观测与研究*, 2013, 34(3): 22-24.  
LIU Jia-min, REN Ye, Yin Xin-xin. Relocation of the Earthquake Sequence of  $M 4.9$  Which Happened in Baoying County, Jiangsu Province With the Double Difference Location Method [J]. *Seismological Andgeomagnetic Observation and Research*, 2013, 34(3): 22-24. (in Chinese)
- [21] 倪红玉, 刘泽民, 何康. 郟庐断裂带安徽段中小地震震源机制及现代应力场特征[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(3): 677-683.  
NI Hong-yu, LIU Ze-min, HE Kang. Study on Focal Mechanisms of Moderate-small Earthquakes and Characteristics of Recent Tectonic Stress Field in the Anhui Sector of Tanlu Fault Zone[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(3): 677-683. (in Chinese)
- [22] 王斌, 周健, 梁雪萍. 江苏盐城附近及邻近海域地震活动分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2008, 10(3): 56-60.  
WANG Bin, ZHOU Jian, LIANG Xue-ping. Analysis on Seismic Activity Near Yancheng and Neighboring Sea Area[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2008, 10(3): 56-60. (in Chinese)
- [23] 宋传中, 朱光, 王道轩, 等. 苏皖境内滁河断裂的演化与大地构造背景[J]. *中国区域地质*, 2000, 19(4): 367-374.  
SONG Chuang-zhong, ZHU Guang, WANG Dao-xuan, et al. Evolution of the Chuhe Fault in Jiangsu and Anhui and Tectonic Setting[J]. *Regional Geology of China*, 2000, 19(4): 367-374. (in Chinese)
- [24] 张恩立, 张寅生, 郑树杰, 等. 郟庐断裂带皖东段与滁河断裂构造及地震活动相关性研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2004, 24(2): 202-209.  
ZHANG en-li, ZHANG Yin-sheng, ZHEN Shu-jie, et al. Correlation of Tectonics and Seismicity in Tancheng—Lujiang Fault Zone in East Anhui and Chuhe Fault[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2004, 24(2): 202-209. (in Chinese)