

2011年7月威海地震序列的地震构造背景及烈度调查*

杜桂林¹, 曲均浩², 葛孚刚², 崔居全³, 荆强³, 赵永宇⁴

(1. 威海市地震局, 山东 威海 264200; 2. 山东省地震局, 山东 济南 250014;
3. 荣成地震台, 山东 荣成 264300; 4. 潍坊市地震局, 山东 潍坊 261041)

摘要:通过开展野外调查、震源深度校核、震源机制解反演等多项工作, 综合研究了2011年7月威海地震序列。利用P波初动方法反演震群震源机制解, 结果表明本次震群的破裂方式均为走滑型, 节面I(走向北东向)是最可能的破裂面。结合已有的研究成果, 初步推断震群的发生受北东向断裂的控制。通过识别地震波形的Pn震相和sPn震相, 计算得到地震震源深度, 推测本次地震发生在上地壳。由于震源深度较浅, 地震烈度调查工作表明震中最大烈度能达到V度。

关键词:威海; 烈度调查; 震源深度; 震源机制解; 地震构造背景

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2013)02-0185-07

0 引言

2011年7月26~28日在威海市环翠区发生5次 $M_L > 1.0$ 地震序列, 其中有3次大于3.0级, 最大震级为3.5级。地震发生后, 地震序列类型的判定是震后政府、社会、公众最关注的问题, 也是地震分析预报工作的一项重要内容。部分大地震之前会有前震出现(Lin, 2009), Abercrombie 和 Mori (1996)通过统计分析, 在美国西部地区, 有50%的大震会有前震发生, 朱传镇和王琳瑛(1996)发现在我国约有40%的 $M \geq 5.5$ 浅源地震有前震。地震震源机制解分析是当前快速判定前兆震群的一种行之有效的方法(陈颢, 1978; 倪四道等, 2010; 付虹等, 2011)。

在地震参数中, 震源深度对于研究深度范围内的应力状态、地震活动性分析和震害预测等具有非常重要的意义(张国民等, 2002; 高原, 周蕙兰, 1997)。但是, 震源深度是一个不易计算的参数, 很难对其进行约束, 目前主要的方法有sPn与Pn震相之间的到时差(张瑞青等, 2008; 房明山等, 1995; 王登伟, 2011; 洪星等, 2006a)、sPL震相(崇加军等, 2010)、

CAP方法等(Zheng *et al.*, 2009, 2010; 吕坚等, 2008; 谢祖军等, 2012; 宋美琴等, 2012; 韦生吉等, 2009)。

由于我国缺乏足够的强震观测资料, 目前地震动衰减关系的研究主要采用的是转化方法, 利用既有的地震动衰减和烈度衰减资料, 在震级相同的条件下, 利用烈度与地震动参数的换算关系求得地震动衰减规律, 而历史地震等震线资料和地震烈度调查为研究地震动衰减关系提供最原始的数据(胡聿贤, 张敏政, 1984; 赵风新等, 2009; 鄢家全等, 2009; 吕坚等, 2009)。

笔者利用P波初动方法分析了威海地震序列震源机制特征, 探讨其发震构造, 通过识别此次震群的sPn震相, 重新确定了3.5级地震的震源深度, 在此基础上进一步分析了2011年7月27日威海市环翠区3.5级地震的宏观烈度分布。

1 地震地质背景

威海市辖区及邻近海域历史上发生的最大地震为1948年5月23日西北海域6级地震, 此次地震导致威海市区房屋多处坍塌, 据统计, 市内房

* 收稿日期: 2012-06-05.

基金项目: 威海市科技发展计划项目(2008GGA000003)资助.

屋损坏约八千余间, 砸伤六十余人, 砸死 2 人, 其他资财损失及市外部分房屋损坏不计其数 (山东省地震局, 2009)。

从区域范围内来看, 威海市位于胶东半岛东部, 地震活动性受蓬莱—威海断裂带、郯庐断裂带和牟平—即墨断裂带等影响 (图 1)。威海市城区北西向的神道口断裂和近东西向的城南河断裂

为蓬莱—威海断裂带的南东段, 北西段 (长岛—烟台段) 为晚更新世活动段, 南东段 (烟台—威海段) 为中更新世活动段 (王志才等, 2006)。而北东向的断裂为牟平—即墨断裂带向北的延伸。威海市辖区内的断裂以早中更新世活动断裂及前第四纪活动断裂为主, 未发现全新世和晚更新世活动断裂 (王华林, 1998)。

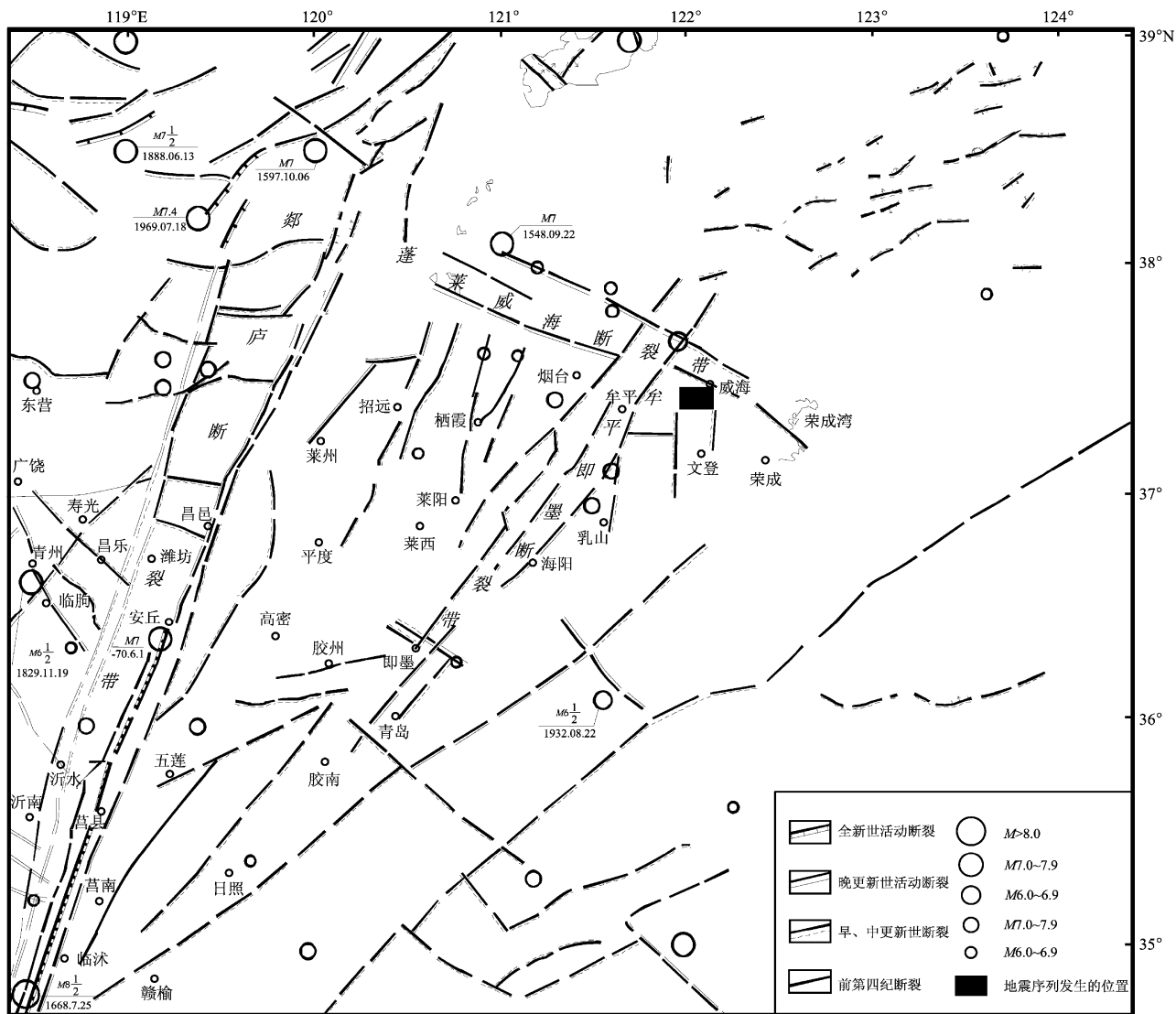


图 1 研究区构造背景图 (修改自晁洪太等 (1997))

Fig. 1 Tectonic setting map of the study area (modified from Chao *et al* (1997))

2 震源机制解

据山东省地震台网测定, 此次有感地震序列的地震参数如表 1 所示。判断前震的方法有多种 (陈颢, 1978; 倪四道等, 2010; 付虹等, 2011;

王林瑛, 2005; 李丽, 陈颢, 2009), 利用震源参数的一致性来判别一个地震序列是前震序列还是常规震群是一种可行的方法 (陈颢, 1978; 倪四道等, 2010)。而研究震源机制解的方法有利用 P 波和 S 波的初动和振幅比法 (刘杰等, 2004; Snoke *et al*, 1984)、P 波初动方法以及 CAP 方法

等 (Zheng *et al.*, 2009, 2010; 吕坚等, 2008; 谢祖军等, 2012; 宋美琴等, 2012), 笔者利用 P 波初动方法反演 4 次 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解 (陆远忠等, 2002), 反演结果如图 2 和表 2 所示。

表 1 2011 年 7 月威海地震序列的地震参数

Tab. 1 Seismic parameters of Weihai earthquake sequence on Jul, 2007

地震 序号	日期 年-月-日	发震时间 时:分:秒	北纬 /(°)	东经 /(°)	震级 M_L	深度 /km
1	2011-07-26	19:08:07	37.40	122.11	3.3	4
2	2011-07-26	20:19:28	37.40	122.12	3.1	9
3	2011-07-27	01:57:39	37.40	122.08	1.3	5
4	2011-07-27	07:19:40	37.41	122.07	3.5	9
5	2011-07-28	17:48:40	37.42	122.08	2.0	8

表 2 2011 年 7 月威海地震序列的震源机制解参数

Tab. 2 Focal mechanism solution parameters of Weihai earthquake sequence on Jul, 2007

地震 编号	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴	
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	倾角	方位	倾角
1	33°	69°	-22°	295°	70°	-157°	254°	30°	345°	1°
2	227°	62°	-144°	119°	59°	-33°	84°	44°	352°	2°
4	215°	86°	-167°	124°	77°	-4°	81°	12°	349°	6°
5	219°	81°	-169°	127°	79°	-10°	83°	15°	353°	1°

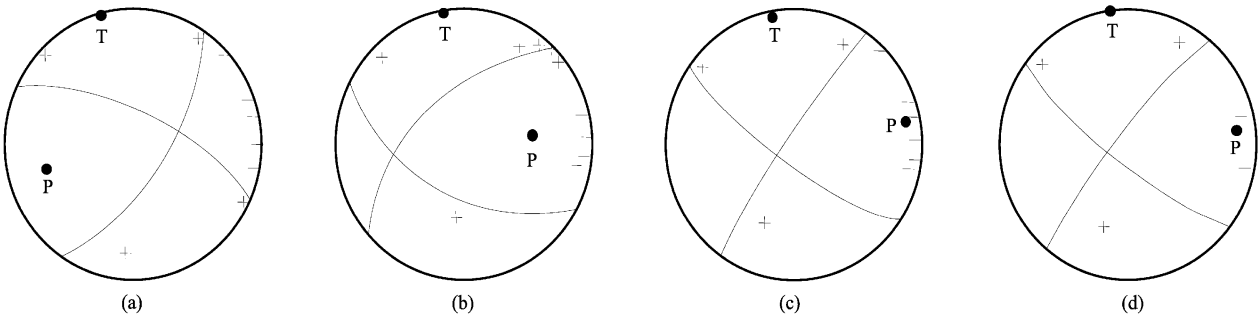


图 2 2011 年 7 月威海地震序列的震源机制解

(a)7月26日3.3级地震;(b)7月26日3.1级地震;(c)7月27日3.5级地震;(d)7月28日2.0级地震

Fig. 2 Focal mechanism solution of Weihai earthquake sequence on Jul, 2007

(a) M3.3 earthquake on Jul. 26; (b) M3.1 earthquake on Jul. 26; (c) M3.5 earthquake on Jul. 27; (d) M2.0 earthquake on Jul. 28

3 发震构造

笔者通过震源机制解和宏观考察的成果, 结合威海已经开展的地震地质调查工作, 探讨此次地震发生的地质构造条件。此次 3.5 级地震等震线长轴方向和震源机制解的优势破裂方向为北东向 (图 1)。王华林 (1998) 在本地区开展的地质构造资料研究表明, 震中区附近有北东向高家庄—王家乔断裂及长峰—阮家口断裂通过。高家庄—王家乔断裂从高家庄起向西南经岳家庄南金子岭、王家河南、梅家沟南, 止于王家乔东, 全长 6 km, 断裂走向 70°, 倾向北西, 倾角 70°左右, 断裂的活动性质以右旋走滑为主, 兼逆冲, 从活动时代

反演结果表明, 这几次地震的破裂方式均为走滑型, 两组破裂面中节面 I 为北东向, 节面 II 为北西向。结合已有的资料, 推测节面 I 是最可能的破裂面。

上来看, 该断裂为前第四纪断裂。长峰—阮家口断裂自长峰开始, 向西南延伸经宅库南, 到达阮家口南侧尖灭, 总长 4.5 km, 总体走向 60°, 倾向南东, 倾角 60°, 向东北隐伏于第四系之下, 断裂对地貌有一定的控制作用, 西北侧为长条状低丘, 东南侧为低平谷地, 该断裂为走滑断裂, 断裂的最新活动时代是早、中更新世。

由于本次地震序列的样本较少, 无法利用小震分布和区域应力场来反演断层面参数 (万永革等, 2008), 结合震源机制解和已有的地震地质资料, 我们初步推断本次地震序列的发震断层为高家庄—王家乔断裂及长峰—阮家口断裂。从区域范围来看 (图 3), 地震序列的发生受即墨—牟平断裂带的向北延伸的影响 (周本刚等, 2002)。

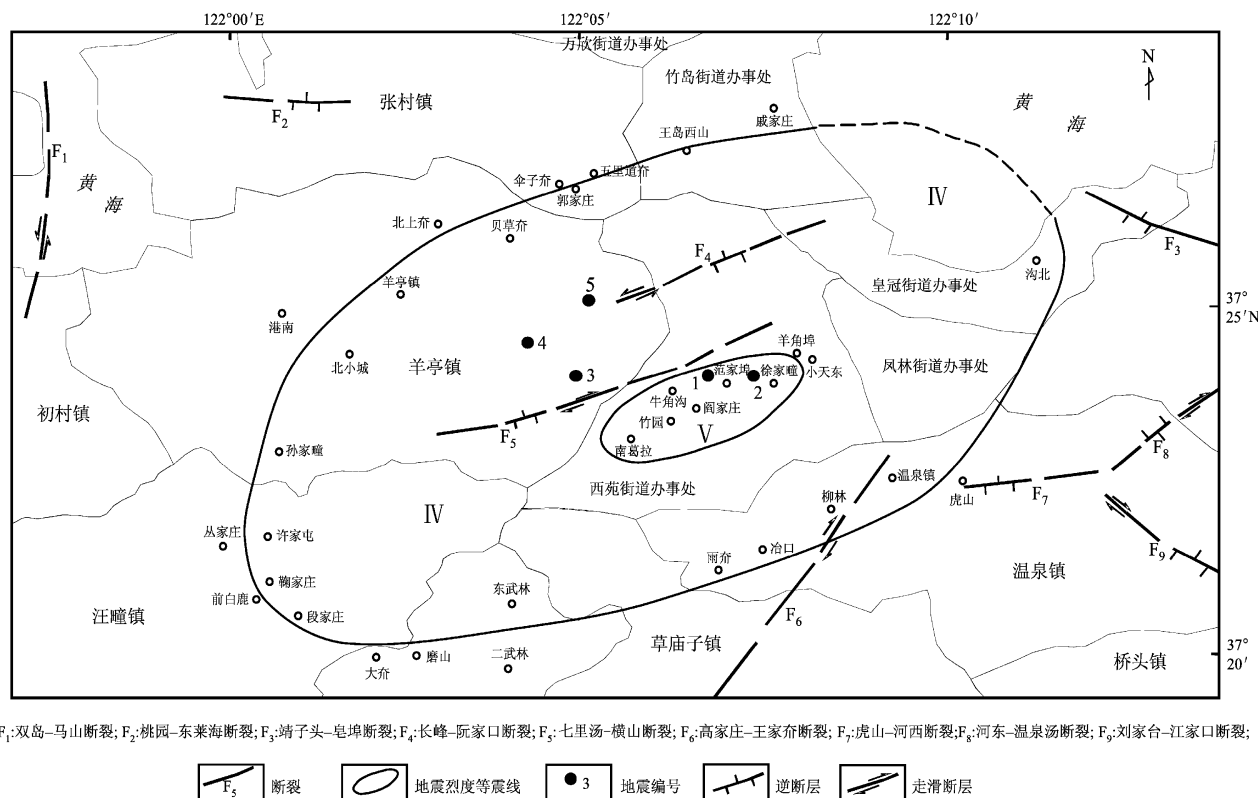


图3 2011年7月27日威海 \$M_L 3.5\$ 地震震中及烈度等震线
Fig.3 Distribution of epicenters and intensity isoseismal of Weihai
\$M_L 3.5\$ earthquake on Jul. 27, 2011

4 震源深度测定

震源深度是一个非常重要的参数，对于研究孕震机理、板块运动和壳幔构造等具有非常重要的意义（张国民等，2002；高原，周惠兰，1997）。震源深度越浅，地震破坏性越大，因此，准确计算震源深度有助于正确评估地震灾害造成的损失。笔者采用 sPn 与 Pn 波走时差测定近震震源深度（张瑞青等，2008；房明山等，1995；王登伟，2011；洪星等，2006a），对于华北地区而言，当 $\Delta t < 5.93$ s ($\Delta t = T_{sPn} - T_{Pn}$) 时，震源位于上地壳内，震源深度（高立新等，2007）为

$$h = 2.56\Delta t, \quad (1)$$

当 $5.93 \text{ s} \leq \Delta t < 11.7 \text{ s}$ 时，震源在下地壳内，其震源深度（高立新等，2007）为

$$h = 15 + 3.11(\Delta t - 5.93) = 3.11\Delta t - 3.44. \quad (2)$$

sPn 波震相的观测范围一般在震中距小于 1 000 km 内，sPn 波震相的主要特征有：sPn 波的振幅和周期通常比 Pn 波大，在初动清楚的情况下，sPn 与 Pn 波初动方向相反。从走时特征来看，sPn 震相出现在 Pg 之前、Pn 之后（王登伟等，2011）。对于同一地震，sPn 与 Pn 的走时差与震中距无关，通常为—常量，因此，可以用多个地震台站的数据来测定 sPn 与 Pn 的走时差。

通过分析北隍城台和长岛台 2011 年 7 月 27 日 3.5 级地震波形的 Pn 震相和 sPn 震相（图 4），计算得到 Δt 为 3.6 ~ 3.8 s，根据式（1），计算得到震源深度为 9.2 ~ 9.7 km。

由于式（1）是整个华北地区的单一公式，具有较大的不确定性，而洪星等（2006b）、张瑞青等（2008）利用基于一维 n 层地壳模型下 sPn 与 Pn 之间的到时差公式克服了这种不确定性，公式表达式为

$$\Delta t = h \times K_i + \sum_{j=1}^{i-1} [H_j \times (K_n \times K_j)] \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

其中, $K_i = \frac{\sqrt{V_{pm}^2 - V_{si}^2}}{V_{si} \times V_{pm}} + \frac{\sqrt{V_{pm}^2 - V_{pi}^2}}{V_{pi} \times V_{pm}}$, h 为震源深度。

假设震源发生在第 i 层地壳模型中, H_i 为 i 层地壳的厚度, V_{pm} 为莫霍界面的 P 波速度, V_{pi} 和 V_{si} 分别是第 i 层地壳的 P 波和 S 波速度 (洪星等, 2006b; 张瑞青等, 2008)。利用威海附近地区人工地震测深研究结果得到的地壳模型 (张碧秀等, 1996), 结合 Zheng 等 (2011) 的黄海的地壳速度结果, 上地壳 P 波速度约为 6.1 km/s, 厚度 12 km; 中地壳 P 波速度约为 6.3 km/s, 厚度 13 km; 下地壳 P 波速度为 7.4 km/s, 厚度 5 km; 上地幔 P 波速度为 7.9 km/s。假定 V_p/V_s 的速度比为 1.732, 可得到相应的 S 波速度。利用式 (3) 对震源深度进行精确计算, 计算结果为 10.0 ~ 10.6 km。计算结果与用华北地区的经验公式计算的结果相近, 从而验证了该经验公式在本地区震源深度的计算中是可靠的。可见, 此次地震位于上地壳, 这与地震烈度调查中, 出现地声和轻微破坏现象相一致。

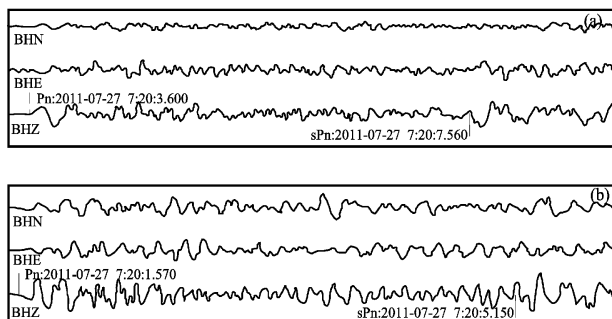


图4 2011年7月27日 $M_L 3.5$ 级地震

部分台站数字地震记录

(a) 北隍城台; (b) 长岛台

Fig. 4 Digital seismic recording of Weihai $M_L 3.5$ earthquake recorded by some stations on Jul. 27, 2011

(a) Beihuangcheng Station; (b) Changdao Station

5 地震烈度调查

地震烈度分析是研究地震动衰减关系的基础 (胡聿贤等, 1984; 赵凤新等, 2009; 鄢家全等, 2009; 吕坚等, 2009), 也可以用来探讨发震机理

(郑文俊等, 2005)。此次地震序列发生后, 7月27~29日, 威海市地震局和环翠区科技局有关人员组成了环翠区 3.5 级地震烈度考察组, 先后对 55 个村庄进行了实地地震烈度考察, 填写地震烈度考察表 77 张, 调查户数 200 余户, 访问当地人员 400 余人次, 抽样村庄采取访问和实地调查相结合的方式, 填写地震烈度考察表, 确定抽样村庄的地震烈度, 将抽样村庄的地震烈度标绘在地图上 (图3), 如图3所示, 圈定 V 度与 IV 度的烈度等震线。

5.1 V 度区

V 度区长轴方向大约为 $N60^\circ E$, 长 4 km, 主要包括阎家庄、徐家疃、范家埠、竹园、南葛拉、牛角沟 6 个村庄。其中阎家庄村建筑物破坏相对最严重, 个别老旧房屋出现横裂缝, 裂缝达 0.3 cm, 房屋受到轻微损坏。门窗屋架作响, 人感觉上下震动明显, 室内人员仓惶出逃, 室外人员普遍有感, 普遍听到地声。

5.2 IV 度区

IV 度区长轴方向大约为 $N60^\circ E$, 长轴方向长 20 km 左右, 短轴方向长 10 km, 长短轴比约为 2:1。IV 度区南西方向至东武林、北东方向至望岛、西至南小城、东至沟北村。门窗作响, 悬挂物明显晃动, 器皿作响, 室内大多数人有感、室外部分有感, 人感觉以水平晃动为主。

5.3 有感范围

通过电话了解威海市区、崮山、草庙子、蔺山、汪疃、温泉、初村等镇多数有感, 此次地震有感范围较大。

6 结论

震源机制解的研究表明, 威海地震序列的破裂方式均为走滑型, 节面 I 为北东向, 节面 II 为北西向, 推测节面 I (走向北东向) 是最可能的破裂面。根据本次研究结果和目前已有的资料, 初步推断发震断层为北东向的高家庄—王家夼断裂及长峰—阮家口断裂。通过分析本次 3.5 级地震的多个台站的地震波形的 Pn 震相和 sPn 震相, 计算得到震源深度为 9.2 ~ 9.7 km, 且位于上地壳。通过地震烈度调查, 圈定 V 度与 IV 度的烈度等震线, 其长轴方向大约 $N60^\circ E$ 。

山东省地震局郑建常博士在震源机制解分析方面进行了指导,中科院地质与地球物理研究所赵连锋副研究员对文章的修改提出了建设性的意见,中国地震局地球物理研究所朱涛博士、张瑞青博士、潘佳铁博士在地壳速度结构分析方面提供了大力帮助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 晃洪太,王琦,李家灵,等. 1997. 山东省地震构造图、山东省新构造图及说明书(1:100 万)[M]. 济南:山东省地图出版社
- 陈颢. 1978. 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,21(2):140-159.
- 崇加军,倪四道,曾祥方. 2010. sPL,一个近距离确定震源深度的震相[J]. 地球物理学报,53(11):2 620-2 630.
- 房明山,杜安陆,董孝平,等. 1995. 用 sPn 震相测定近震震源深度[J]. 地震地磁观测与研究,16(5):13-18.
- 付虹,王绍晋,李丽,等. 2011. 滇中地区震源机制一致性参数时空分布与强震活动[J]. 地震研究,34(2):113-118.
- 高立新,刘芳,赵蒙生,等. 2007. 用 sPn 震相计算震源深度的初步分析与应用[J]. 西北地震学报,29(3):213-217.
- 高原,周蕙兰. 1997. 测定震源深度的意义的初步讨论[J]. 中国地震,13(4):321-329.
- 洪星,杨贵,林仙坎,等. 2006a. sPn 震相的多台同时测定法[J]. 地震地磁观测与研究,27(3):77-80.
- 洪星,叶雯燕,邵平荣,等. 2006b. 台湾海峡南部一次 5.0 级地震的 sPn 震相分析[J]. 地震地磁观测与研究,27(1):26-30.
- 胡聿贤,张敏政. 1984. 缺乏强震观测资料地区地震动参数的估算方法[J]. 地震工程与工程振动,4(1):1-11.
- 李丽,陈颢. 2009. 2009 年 4 月 6 日意大利拉奎拉地震的前震及其预测意义[J]. 中国地震,25(2):151-158.
- 刘杰,郑斯华,康英,等. 2004. 利用 P 波和 S 波的初动和振幅比计算中小地震的震源机制解 E[J]. 地震,24(1):19-26.
- 陆远忠,李胜乐,邓志辉,等. 2002. 基于 GIS 的地震分析预报系统[M]. 成都:成都地图出版社,117-119.
- 吕坚,俞言祥,高建华,等. 2009. 江西及邻区地震烈度衰减关系研究[J]. 地震研究,32(3):269-274.
- 吕坚,郑勇,倪四道,等. 2008. 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,51(1):158-164.
- 倪四道,王伟涛,李丽. 2010. 2010 年 4 月 14 日玉树地震:一个有前震的破坏性地震[J]. 中国科学:地球科学,40(5):535-537.
- 山东省地震局. 2009. 20 世纪山东十大地震[M]. 北京:地震出版社.
- 宋美琴,郑勇,李斌,等. 2012. 2010 年 1 月 24 日山西河津—万荣 $M_s 4.8$ 地震的震源机制解与发震构造探讨[J]. 地震学报,34(1):111-117.
- 万永革,沈正康,刁桂苓,等. 2008. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J]. 地球物理学报,51(3):793-804.
- 王登伟. 2011. 用 sPn 与 Pn 波走时差测定近震震源深度的方法[J]. 地震,31(1):12-19.
- 王华林. 1998. 活动断裂探测与地震区划——以威海地区为例[M]. 北京:地震出版社.
- 王林瑛,陈佩燕,吴忠良,等. 2005. 前震特征及其识别研究[J]. 地震学报,27(2):171-177.
- 王志才,邓起东,晃洪太,等. 2006. 山东半岛北部近海海域北西向蓬莱—威海断裂带的声波探测[J]. 地球物理学报,49(4):1 092-1 101.
- 韦生吉,倪四道,崇加军,等. 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):112-119.
- 谢祖军,郑勇,倪四道,等. 2012. 2011 年 1 月 19 日安庆 $M_L 4.8$ 地震的震源机制解和深度研究[J]. 地球物理学报,55(5):1624-1634.
- 鄢家全,谢明富,吴名彬,等. 2009. 工程场地影响烈度调查[J]. 震灾防御技术,4(1):103-109.
- 张碧秀,汤永安,夏铁军,等. 1996. 聊城—荣城地壳二维速度结构——初探“泰山震”之谜[J]. 中国地震,12(2):141-146.
- 张国民,汪素云,李丽,等. 2002. 中国大陆地震震源深度及其构造含义[J]. 科学通报,47(9):663-668.
- 张瑞青,吴庆举,李永华,等. 2008. 汶川中强余震震源深度的确定及其意义[J]. 中国科学:地球科学,38(10):1 234-1 241.
- 赵凤新,王海江,张郁山. 2009. 用于核工程地震安全性评价的中小地震水平向加速度反应谱衰减关系研究[J]. 中国地震,25(3):274-281.
- 郑文俊,何文贵,赵广坤,等. 2005. 2003 年甘肃民乐—山丹 6.1,5.8 级地震发震构造及发震机制探讨[J]. 地震研究,28(2):133-140.
- 周本刚,冉勇康,环文林,等. 2002. 山东海阳断裂东石兰沟段晚更新世以来地表断错特征与最大潜在地震估计[J]. 地震地质,24(2):159-166.
- 朱传镇,王琳瑛. 1996. 前震活动特征及其识别的研究(I)[J]. 地球物理学报,39(1):80-88.
- Abercrombie R E, Mori J. 1996. Occurrence patterns of foreshocks to large earthquakes in the western United States[J]. Nature, 381: 303-307.
- Lin C H. 2009. Foreshock characteristics in Taiwan: Potential earthquake warning[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 34(5): 655-662.
- Snoke J A, Munsey J W, Teague A G, et al. 1984. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data[J]. Earthquake Notes, 55(3): 15.
- Zheng Y, Ma H S, Lu J, et al. 2009. Source mechanism of strong aftershocks ($M_s \geq 5.6$) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics[J]. Sci China Ser D - Earth Sci, 52(6): 739-753.
- Zheng Y Ni S D, Xie Z J, et al. 2010. Strong aftershocks in the northern segment of the Wenchuan earthquake rupture zone and their seismotectonic implications[J]. Earth Planet Space, 62(11): 881-886.
- Zheng Y, Shen W S, Zhou L Q, et al. 2011. Crust and uppermost mantle beneath the North China Craton, northeastern China, and the Sea of Japan from ambient noise tomography[J]. JGR, 116(B12), doi: 10.1029/2011JB008637.

Seismic Tectonic Setting and Intensity Investigation of Weihai Earthquake Sequence On Jul. , 2011

DU Gui-lin¹, QU Jun-hao², GE Fu-gang², CUI Ju-quan³, JING Qiang³, ZHAO Yong-yu⁴

(1. *Earthquake Administration of Weihai Municipality, Weihai 264200, Shandong, China*)

(2. *Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China*)

(3. *Rongcheng Seismic Station, Earthquake Administration of Shandong Province, Rongcheng 264300, Shandong, China*)

(4. *Earthquake Administration of Weifang Municipality, Weifang 261041, Shandong, China*)

Abstract

Through the field investigation, focal depth checking and focal mechanism solutions inversion etc. , we conducted a comprehensive research on the Weihai earthquake sequence on Jul. , 2011, and then inversed the focal mechanism solutions of earthquake sequence by P-wave first motion method. The results show that source rupture mode of Weihai earthquake sequence is strike-slip, the nodal plane I (NE striking) maybe the fracture surface, and the occurrence of earthquake swarm is controlled by the fault in NE direction. Through identifying the Pn phase and sPn phase of the $M_L 3.5$ earthquake, we calculated its focal depth and deduced it occurred in the upper crust. Because the focal depth is shallow, the seismic intensity investigation shows that the maximum seismic intensity in epicenter area reached V-degree.

Key words: Weihai City; seismic intensity investigation; focal depth; focal mechanism solutions; seismotectonic setting