

CAP方法反演2014年山东乳山M4.2、M4.0地震震源机制解^①

曲均浩^{1,2}, 刘瑞峰², 李金³, 李永红², 张芹², 李铂², 吴丹彤²

(1.中国地震局地质研究所,北京 100029; 2.山东省地震局,山东 济南 250014;

3.新疆省地震局,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:选用山东数字地震台网波形资料,利用CAP方法反演乳山2014年1月7日M4.2及4月4日M4.0地震震源机制解。反演结果显示,两次地震均在矩心深度为6 km处获得最佳震源机制解,其节面参数基本一致,属于近走滑型地震。震中附近流动台站的震源距计算表明地震序列震源深度应略小于7 km,与CAP方法反演结果具有一致性,表明地震的主体破裂发生在上地壳。

关键词:乳山地震; CAP方法; 震源机制; 震源深度

中图分类号: P315.332

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-1076-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.1076

Inversion of the Focal Mechanisms of the 2014 M4.2 and M4.0 Earthquakes in Rushan, Shandong Using the CAP Method

QU Jun-hao^{1,2}, LIU Rui-feng², LI Jin³, LI Yong-hong², ZHANG Qin², LI Bo², WU Dan-tong²

(1. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;

2. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China;

3. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: There have been many intensive small earthquakes since the M3.8 earthquake occurred in Rushan, Shandong on October 1, 2013. Two earthquakes (M4.2 and M4.0) occurred separately on January 7 and April 4, 2014. There have never been so many earthquakes in Rushan. A focal mechanism describes the nature and source rupture process and is an important foundation to understand the stress state of the source region, earthquake faults, and for analyzing the causes of a seismic event. Therefore, seismic interpretation and post-earthquake seismogenic stress distribution mechanisms play very important roles in determining earthquake focal mechanisms. In this study, using waveforms from the Shandong Seismological Network and comparing the synthetic and the observed seismograms, the focal mechanism of the Rushan M4.2 and M4.0 earthquakes in 2014 are inverted using the CAP (Cut and paste) method. The results show that the two earthquakes get their best focal mechanism at 6 km depth, and that the parameters of the nodal planes are similar, belonging to the strike-slip type. At a depth of 6 km, the correlation coefficients of 40 phases of the M4.2 earthquake greater than 0.7 that were recorded by eight stations are 37, which accounts for 93%. The correlation coefficients greater than 0.9 are 28, accounting for about 70%. Similarly, at a depth of 6 km, the correlation coefficients of 40 phases of the M4.0 earthquake that were recorded by the eight stations are all greater than 0.7 and the correlation coefficients greater

① 收稿日期: 2014-07-11

基金项目: 山东省地震局年度震情跟踪专项经费

作者简介: 曲均浩(1981—), 男, 工程师, 在读博士生, 主要从事数字地震学应用及地震序列研究. E-mail: gisqjh@126.com

than 0.9 are 31, accounting for about 78%. Therefore, the synthetic seismograms of the two earthquakes fit the observed seismograms well demonstrating that the inversion results are credible. The focal mechanism shows that the moment magnitude of the M4.2 earthquake was $M_w=4.3$; one nodal plane has a strike of 290° , rake of 84° , and dip of 22° and the other nodal plane has a strike of 189° , rake of 68° , and dip of 174° . The moment magnitude of the M4.0 earthquake is $M_w=4.2$, one nodal plane has a strike of 289° , rake of 90° , and dip of 27° and the other nodal plane has a strike of 199° , rake of 63° , and a dip of 180° . The hypocentral distance was calculated by the mobile seismic station near the epicenter. The results show that the focal depth is slightly less than 7 km, which is consistent with the inversion results of the CAP method, and therefore, the main rupture of the earthquake was in the upper crust. The parameters of the Rushan fault nearest to the epicenter (strike of 10° normal fault) are not consistent with the focal mechanisms of the two earthquakes, which show that the Rushan fault is not the seismic fault and that the seismic faults may be concealed faults.

Key words: Rushan earthquake; CAP method; focal mechanism; focal depth

0 引言

2013 年 10 月 1 日 12 点 7 分在山东乳山 ($36.83^\circ\text{N}; 121.70^\circ\text{E}$) 发生 $M_L 3.8$ 地震, 之后小地震密集发生, 连续不断(图 1)。据山东数字地震台网测定, 截止到 2014 年 4 月 30 日共记录地震 4 507 次(其中包括单台定位结果), 其中 $M_L 1.0\sim 1.9$ 地震 502 次, $M_L 2.0\sim 2.9$ 地震 82 次, $M_L 3.0\sim 3.9$ 地震 10 次, $M_L 4.0$ 以上地震 2 次, 分别是 2014 年 1 月 7 日 22 时 24 分的 M4.2($M_L 4.7$) 地震和 4 月 4 日 00 时 12 分的 M4.0($M_L 4.5$) 地震。

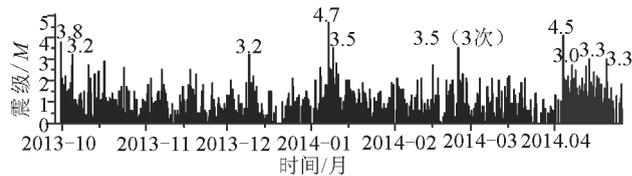


图 1 乳山地震序列 M-t 图

Fig.1 M-t plot of Rushan earthquake sequence

地震的震源机制对于研究地震发生的力学过程、地震孕震机理的解释及震后应力分布具有十分重要的意义。在地震震源机制的求解中, P 波初动法是目前最常用的方法。但 P 波初动法的 2 个缺点容易导致震源机制反演结果的不稳定性^[1-2]: (1) P 波初动法需要大量方位角和震中距分布较好的台站; (2) 节面附近很难判断 P 波初动的极性。相比于 P 波初动法, 利用波形反演求解震源机制的方法可以有效克服上述问题, 使求解结果更加稳定、可靠。近几年, Zhao 和 Helmberger 等^[1]提出的 CAP (Cut and Paste) 波形反演方法求取震源机制解在国

内外已经得到了广泛应用^[3-8]。Zhao 等^[1]通过分割波形记录为 Pnl (P 波及其后续震相) 和 Snl (S 波或面波) 部分, 分别赋予不同的权重, 利用格点搜索的方法对地震震源机制进行反演。Zhu 等^[2]进一步改进了该方法, 通过去除归一化振幅并使用距离比例系数使得反演结果更加稳定。

1 资料与求解

CAP 方法反演震源机制解主要通过对比给出定震源机制解的理论波形与实际观测波形, 拟合残差最小的机制解为最终反演结果。在给定速度模型下采用频率-波数法^[9] (F-K 方法) 计算各个台站位置的格林函数, 由震源函数及格林函数合成理论波形, 因而反演过程中越可靠的速度模型得到的反演结果越可靠。本文参考利用层析成像技术得到的渤海湾盆地地壳速度模型^[10-11]及 crust2.0 确定本文速度模型, 如表 1 所示。将原始的速度记录扣除仪器响应、积分到位移, 再将位移记录从 UD-NS-EW 分量旋转成 Z-R-T 分量, 分成 Pnl 和 Sn 两部分, 将 Pnl 部分经带宽为 0.04~0.2 Hz、Snl 部分经带宽为 0.02~0.1 Hz 的 4 阶 Butterworth 带通滤波器滤波。滤波即可以滤掉长周期的地脉动和由积分造成的长周期飘移, 减少地壳精细结构和噪声带来的影响, 又可以充分保留地震波携带的震源信息。根据 Pnl 和 Snl 部分的波形特点, 设置两者相对权重为 2:1, 充分利用两者的振幅比对震源深度及机制解的更好约束。理论计算图采用 F-K 方法^[9], 根据传播矩阵计算地震的位移场分布, 得到各种频率下的体波和面波波形。经上述处理, 得到每个台 Pnl 部分

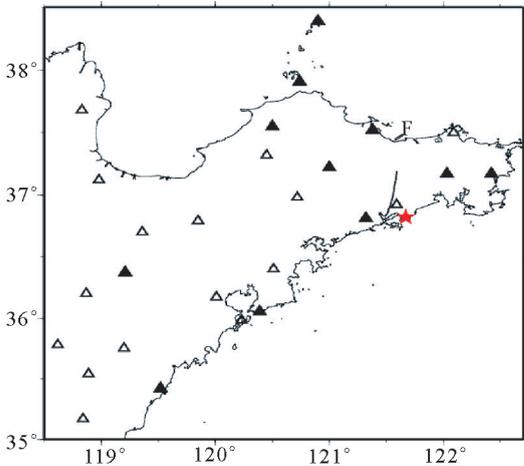
的垂向分量、径向分量和 Snl 部分的 3 个分量。

表 1 地壳速度模型

Table 1 Crustal velocity mode

深度/km	$V_P/(km \cdot s^{-1})$	V_P/V_S
0	4.0	
5	6.10	
10	6.20	
20	6.40	1.73
30	6.78	
40	8.20	

乳山地震序列震中位于乳山市白沙滩附近海域,其东侧、南侧没有测震台站,西侧震中距在 80~150 km 范围内的平度、潍坊、海化、即墨等台站为短周期台站(图 2),无法用于 CAP 方法的反演计算。为获得稳定可靠的震源机制解,本文筛选出震中距在 30~250 km 范围内 11 个相对包围震中较好的宽频带台站,尽量避免台站分布局限性造成的反演结果不稳定,其分布情况如图 2。



(△为参与精确定位的台站;▲为参与精确定位及震源机制反演的台站;F为乳山断裂)

图 2 乳山序列发生位置(★)和台站分布

Fig.2 Epicenters of Ruzhan earthquake sequence and seismic stations

2 结果与讨论

图 3 显示了乳山 $M_{4.2}$ 地震震源机制随不同震源深度的变化,纵轴为该理论模拟波形与实际观测波形的最小二乘拟合残差。每个深度反演得到的震源机制的两个节面参数基本相同,反演结果稳定。根据拟合残差,震源矩心深度在 6 km 时震源机制反演方差达到极小值。由于 RCH 台 Snl 部分切向分量、CHD 台 Snl 部分径向分量相关系数较低(图 4),尝试不断调整滤波频率,拟合效果仍然较

差,实际反演过程删除此 2 个震相。

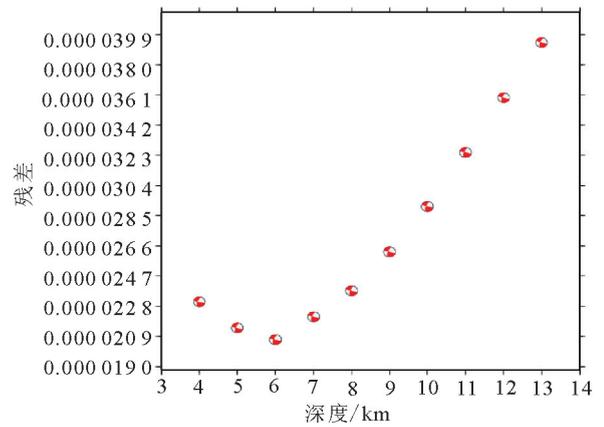


图 3 1月7日 $M_{4.2}$ 地震 CAP 反演拟合残差与震源机制随深度的变化

Fig.3 Changes of the fitting residual and focal mechanism with the depth using CAP to inverse the $M_{4.2}$ earthquake of January 7

图 4 显示了 6 km 处理论合成波形与实测波形拟合情况。8 个台站记录的 40 个震相中相关系数大于 0.7 的震相有 37 个,约占 93%;相关系数大于 0.9 的有 28 个,约占 70%。总体上理论地震图与观测地震图拟合较好,反演结果可信,反演方差为 $2.08e-5$ 。该深度对应的双力偶解为最佳震源机制解,其结果为矩震级 $M_w = 4.3$,节面 I:走向 290° ,倾角 84° ,滑动角 22° ;节面 II:走向 198° ,倾角 68° ,滑动角 174° 。

图 5 给出了乳山 $M_{4.0}$ 地震反演方差和震源机制解随不同深度变化的取值情况,可见震源矩心深度同样在 6 km 处震源机制解的反演方差达到极小值,且每个深度反演得到震源机制节面参数基本相同,反演结果稳定。

理论合成波形与实测波形拟合情况如图 6,8 个台站记录的 40 个震相相关系数全部大于 0.7;相关系数大于 0.9 的有 31 个,约占 78%。总体上理论地震图与观测地震图拟合较好,反演结果可信,反演方差为 $2.78e-5$ 。该深度对应的双力偶解为最佳震源机制解,其结果为矩震级 $M_w = 4.2$,节面 I:走向 289° ,倾角 90° ,滑动角 27° ;节面 II:走向 199° ,倾角 63° ,滑动角 180° 。

本文用 CAP 方法反演了 $M_{4.2}$ 、 $M_{4.0}$ 地震震源机制解,参与反演台站的方位角有较好的分布,对于较为理想的拟合效果起到一定的贡献。震源深度的拟合反演结果显示两次地震的最佳震源深度均是 6 km,与山东台网中心给出的两次地震震源深度

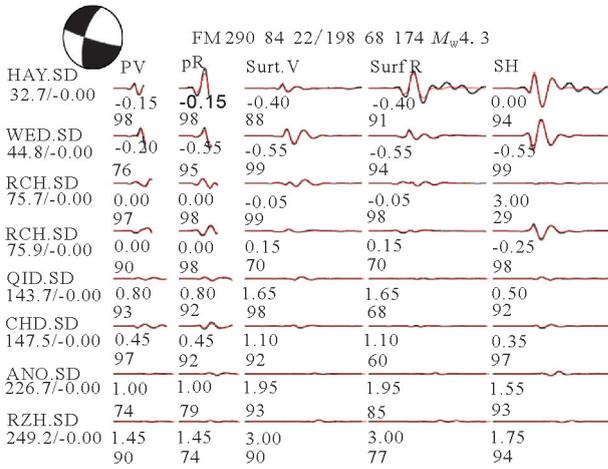


图 4 1 月 7 日 M4.2 地震 CAP 方法反演的震源机制解、理论地震图和观测地震图对比(红线是理论地震图,黑线是观测地震图;波形下第 1 行数字为理论地震图相对观测地震图的移动时间 s,第 2 行数字为二者的相关系数 %)

Fig.4 Focal mechanism of the M4.2 earthquake on January 7 and comparison between the synthetic and the observed seismograms (The red curves are theoretical seismograms, and the black curves are observation seismograms; the numbers below the waveform curves are the time shifts(first line)and cross-correlation coefficient in percent(second line))

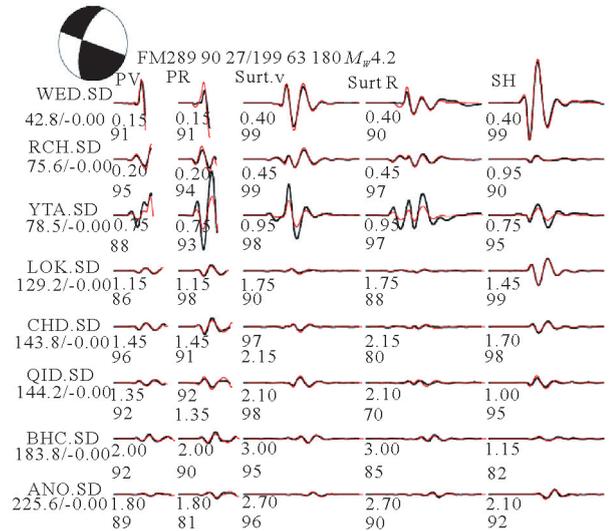


图 6 4 月 4 日 M4.0 地震 CAP 方法反演的震源机制解、理论地震图和观测地震图对比(红线是理论地震图,黑线是观测地震图;波形下第 1 行数字为理论地震图相对观测地震图的移动时间 s,第 2 行数字为二者的相关系数 %)

Fig.6 Focal mechanism of the M4.0 earthquake on April 4 and comparison between the synthetic and the observed seismograms (The red curves are theoretical seismograms, and the black curves are observation seismograms; the numbers below the waveform curves are the time shifts (first line) and cross-correlation coefficient in percent (second line))

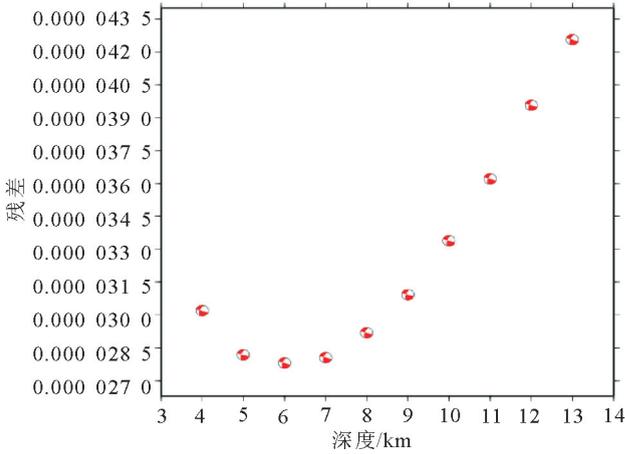


图 5 4 月 4 日 M4.0 地震 CAP 反演拟合残差与震源机制随深度的变化

Fig.5 Changes of the fitting residual and focal mechanism with the depth using CAP to inverse the M4.0 earthquake of April 4

7 km、5 km 比较接近。另外,根据震源距公式

$$D = V_{\phi} * \Delta t \tag{1}$$

其中 V_{ϕ} 为虚波速度,取 $8.5^{[12-14]}$; Δt 为某一台站记录的地震 S 波与 P 波到时差。本文根据震后在震

中附近位置架设的流动台记录到的余震波形资料,其 Δt 平均约为 0.82 s,据此推测流动台与震源之间震源距约为 7 km。震后流动台位置 ($36.84^{\circ}N$, $121.68^{\circ}E$) 与山东台网定位的 M4.2 ($36.82^{\circ}N$, $121.67^{\circ}E$)、M4.0 ($36.83^{\circ}N$, $121.67^{\circ}E$) 地震震中位置相近,由此可以粗略推测该地震序列震源深度应略小于 7 km,与 CAP 方法反演结果具有一致性,表明地震的主体破裂发生在上地壳。

M4.2、M4.0 两次地震震源机制解的两个节面参数基本一致,属于走滑型地震。离震中最近的乳山断裂产状及性质(走向 10° ,正断层)^[15-16]与两次地震震源机制解参数均不吻合,表明乳山断裂应该不是本次地震序列的发震断层,其发震断层可能为隐伏断层,详细论证另文叙述。

3 结论

本文选用山东宽频带数字地震仪的近震波形数据,采用 CAP 方法反演了乳山 2014 年 1 月 7 日 M4.2 级及 4 月 4 日 M4.0 地震震源机制解,其结果如下:

(1) 根据拟合残差, $M_{4.2}$ 、 $M_{4.0}$ 两次地震均在矩心深度为 6 km 时震源机制解反演方差达到极小值, 波形相关系数绝大部分大于 0.7, 其绝对振幅大小也较为相似, 表明反演结果可靠。

(2) CAP 方法反演得到的 $M_{4.2}$ 地震最佳震源机制解结果为矩震级 $M_w = 4.3$, 节面 I: 走向 290° , 倾角 84° , 滑动角 22° ; 节面 II: 走向 198° , 倾角 68° , 滑动角 174° 。 $M_{4.0}$ 地震最佳震源机制解结果为矩震级 $M_w = 4.2$, 节面 I: 走向 289° , 倾角 90° , 滑动角 27° ; 节面 II: 走向 199° , 倾角 63° , 滑动角 180° 。两次地震震源机制解结果基本一致, 地震属于近走滑型。

(3) 震中附近流动台站的震源距计算表明地震序列震源深度应略小于 7 km, 与 CAP 方法反演结果具有一致性, 表明地震的主体破裂发生在上地壳。

致谢: 曾祥方博士、韩立波博士在程序运行方面对本文提供了帮助, 审稿专家对本文提出了有意的意见和建议, 在此表示谢意!

参考文献 (References)

[1] Zhao L S, Helmberger D V. Source Estimation from Broadband Regional Seismograms[J]. Bull Seis Soc Amer, 1994, 84(1): 91-104.

[2] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms[J]. Bull Seism Soc Amer, 1996, 86(5): 1634-1641.

[3] 郑勇, 马宏生, 吕坚, 等. 汶川地震强余震 ($M_s \geq 5.6$) 的震源机制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学: D 辑 (地球科学), 2009, 39(4): 413-426.

Zheng Y, Ma H S, Lü J, et al. Source Mechanism of Strong Aftershock of ($M_s \geq 5.6$) of Wenchuan Earthquake and the Implication for Seismotectonic[J]. Sci China: Ser D, 2009, 39(4): 413-426. (in Chinese)

[4] 韦生吉, 倪四道, 崇加军, 等. 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, 2009, 52(1): 111-119.

Wei S J, Ni S D, Chong J J, et al. The 16 August 2003 Chifeng Earthquake: Is it a Lower Crust Earthquake? [J]. Chinese J Geophys, 2009, 52(1): 111-119. (in Chinese)

[5] 韩立波, 蒋长胜, 包丰. 2010 年河南太康 $M_{4.6}$ 地震序列震源参数的精确定位[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2973-2981.

HAN Li-bo, JIANG Chang-sheng, Bao Feng. Source Parameter Determination of 2010 Taikang $M_{4.6}$ Earthquake Sequences [J]. Chinese J Geophys, 2012, 55(9): 2973-2981. (in Chinese)

[6] 洪德全, 王行舟, 倪红玉, 等. 多种方法研究 2012 年 7 月 20 日江苏高邮 $M_{4.9}$ 地震震源机制解深度[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 1757-1765.

Hong D Q, Wang X Z, Ni H Y, et al. Focal Mechanism and Focal Depth of July 20, 2012 Jiangsu Gaoyou $M_{4.9}$ Earthquake [J]. Progress in Geophys, 2013, 28(4): 1757-1765. (in Chinese)

[7] 宋美琴, 李华明, 韩立波, 等. 用 CAP 方法反演 2010 年 6 月 5

日山西阳曲 $M_{4.6}$ 地震震源机制解[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 692-697.

Song M Q, Li H Y, Han L B, et al. Focal Mechanism of the $M_{4.6}$ Yangqu Earthquake of June 5 [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 692-697. (in Chinese)

[8] 李晓峰, 裴惠娟, 徐辉, 等. 2013 年 7 月 22 日岷县漳县 6.6 级地震震源机制解[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 459-462.

Li X F, Pei H J, Xu H, et al. Focal Mechanism of the Minxian-Zhangxian $M_{6.6}$ Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 459-462. (in Chinese)

[9] Zhu L P, Rivera L A. A Note on the Dynamic and Static Displacements from a Point Source in Multilayered Media [J]. Geophys J Int, 2002, 148: 619-627.

[10] 张岭, 刘劲松, 郑天珧, 等. 利用 Ground-Truth 资料和 Messy GA 方法反演渤海湾盆地及其邻区地壳 P 波速度模型[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 186-197.

Zhang L, Liu J S, Zheng T Y, et al. Inverse Crustal P-wave Velocity Model of Bohai Bay Basin and its Adjacent Area by Using Messy GA with Ground-truth Data [J]. Progress in Geophys, 2005, 20(1): 186-97. (in Chinese)

[11] 李霞, 刘希强, 李亚军, 等. 山东及邻区地震的重新定位及其与活动构造的关系[J]. 中国地震, 2012, 28(4): 381-392.

Li X, Liu X Q, Li Y J, et al. Relocation of Earthquake in Shandong and its Neighboring Areas in China and Relationship Between Their Tectonics [J]. Earthquake Research in China, 2012, 28(4): 381-392. (in Chinese)

[12] 顾瑾萍, 郑建常, 张永仙. 华北三维虚波速度地震异常分析[J]. 地震, 2005, 25(4): 58-64.

Gu J P, Zheng J C, Zhang Y X. Three Dimension Velocity Imaging of Seismic Pseudo Wave in North China with Seismic Anomaly [J]. Earthquake, 2005, 25(4): 58-64. (in Chinese)

[13] 刘洪瑞, 肖凤莲. 泰安地区近震波速及地壳厚度的测定[J]. 地震地磁观测与研究, 1992, 13(4): 25-29.

Liu H R, Xiao F L. Survey of Near Earthquake Wave Velocity and Thickness of the Earth's Crust Around Tai'an Area [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1992, 13(4): 25-29. (in Chinese)

[14] 魏光兴, 季同仁, 杨家岭. 渤海地区地震基本参数的校订[J]. 地震研究, 1983, 6(2): 179-188.

Wei G X, Ji T R, Yang J L. A Revision of Basal Parameters for Earthquakes in the Bohai Sea Area [J]. Journal of Seismological Research, 1992, 13(4): 25-29. (in Chinese)

[15] 宋明春, 王来明. 对胶南造山带基础地质问题的新认识[J]. 中国区域地质, 2000, 19(1): 1-6.

Song M C, Wang L M. The Latest Understandings of Fundamental Geology of Jiaonan Orogenic Belt [J]. Regional Geology of China, 2000, 19(1): 1-6. (in Chinese)

[16] 孔庆友, 邹国强. 山东省矿产资源储量报告编制指南[M]. 济南: 山东省地图出版社, 2010, 274-280.

Kong Q Y, Zou G Q. Preparation Guidelines of Shandong Province Mineral Resources Reserves Report [M]. Jinan: Map Publishing House of Shandong Province, 2010: 274-280. (in Chinese)