

2011 年 10 月 12 日北京市石景山区 $M_L 2.1$ 地震 近场加速度记录初步分析^①

赵雯佳¹, 徐 平², 林向东², 白立新²

((1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 北京市地震局, 北京 100080))

摘 要:根据近场强震台加速度记录对 2011 年 10 月 12 日北京市石景山区 $M_L 2.1$ 地震的加速度影响场进行了计算分析。同时使用了首都圈宽频带数字台站记录数据通过 P 波初动格点尝试法解算出该地震的震源机制解, 并与加速度影响场进行对比研究。结果表明, 此次地震加速度影响场水平向加速度高于垂直向; 水平向峰值加速度分布区和加速度影响场高低速度过渡区总体呈 EW 向或 NEE 向分布, 与震源机制解结果的两个节面走向较为一致; 加速度衰减 NS 向快于 EW 向。本文研究结果可为强震或较大地震发生后快速判定震害影响场提供参考依据。

关键词: 峰值加速度; 加速度动态分布; 震源机制解; 震害影响场; 北京地区

中图分类号: P315.914 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2013)01-0183-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0183

Near-field Acceleration Records and Preliminary Analysis of $M_L 2.1$ Shijingshan District Earthquake on Oct. 12, 2011, Beijing

ZHAO Wen-jia¹, XU Ping², LIN Xiang-dong², BAI Li-xin²

((1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Earthquake Administration of Beijing, Beijing 100080, China))

Abstract: An earthquake with a magnitude (M_L) of 2.1 occurred at 16:40 UTC, October 12, 2011, in the Shijingshan district in Beijing with an epicenter at 39.95°N , 116.16°E . Eleven near-field strong motion stations, located less than 20 km from the epicenter, clearly recorded temporal variation of acceleration during the earthquake. The largest value of peak ground acceleration in the east-west (EW) and north-south (NS) components, 22.528 gal and 30.989 gal, respectively, were both recorded by station LSG, which is situated approximately 5.6 km from epicenter. The largest value of peak ground acceleration in the vertical component was 12.797 gal, recorded by station CCS at an epicenter distance of 2.2 km. We synthesized the horizontal component by EW and NS records and used Generic Mapping Tools (GMT) software to mesh and illustrate the influence of horizontal and vertical acceleration on the field contour map. The results show that generally, the value of the NS component is larger than that of the EW component, and the horizontal component is larger than the vertical. Moreover, the acceleration distribution and influence field contour map of the horizontal component shows that peak ground acceleration in the southern area is a low value and that in the northern area is high. In addition, the two regions are divided by a transition zone that strikes near east-west (EW) or NEE. We obtained the

① 收稿日期: 2011-10-12; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013013

基金项目: 国家科技支撑计划“汶川断裂带科学钻探”

作者简介: 赵雯佳(1987—), 女(汉族), 北京人, 硕士研究生, 主要从事地震学和地壳各向异性方向的研究. 电子邮件: katezha4897@gmail.com

average peak ground value of three components at 1 s intervals from station records after the earthquake occurred, which we synthesized into horizontal and vertical components to illustrate temporal variations in the map produced by GMT. After analyzing the average value records and temporal variation map, we detected that the decay in the NS direction is faster than that in the EW direction and that decay is faster in the vertical component than that in the horizontal component. Excepting the near-field strong motion stations, 23 Capital Circle broadband digital seismic stations recorded digital waveform data during the earthquake. We interpreted initial P-wave polarity from these records and employed grid-point test method to obtain the Focal Mechanism Solution of the event. Results indicate normal faulting dominant in the Beijing-Tianjin area. The best double couple solution of the event is 295° , 39° and -74° for strike, dip and rake angel, respectively; those of the other nodal plane are 96° , 53° , and -102° with a 13% inconsistency ratio. By combining these results with the acceleration analysis results, we determined that the strike of the second nodal plane with a larger dip angel is near the EW direction, which is consistent with the strike of acceleration transition zone. In addition, the microepicenter of the event does not coincide with the macroepicenter. These findings indicate that the nodal plane of strike 96° , dip 53° , and rake -102° may coincide with the seismogenic fault. Although the work in this study is a preliminary analysis for acceleration records and seismic digital waveform data, the results can provide a reference for quick determination of earthquake influence field and hazard assessment following a large earthquake and are highly significant for earthquake emergency response and disaster relief.

Key words: Peak ground acceleration ; Dynamic acceleration distribution ; Focal mechanism solution ; Earthquake influence field; Beijing area

0 引言

据中国数字地震台网测定,2011 年 10 月 12 日北京市石景山区(39.95°N , 116.16°E)发生了一次 $M_L 2.1$ 地震,震源深度约 6.2 km。此次地震发生在北京市区内,尽管震级较小,震动持续时间较短,但有感范围较大,曾受到广泛关注。

如何快速地利用有限的的数据得到震后应急灾害损失评估一直是地震研究的重要课题。在地震过后能够很快得到的地震参数是震中位置和震级,但地震造成的损失分布并非仅由这两个参数决定^[1],还要受宏观震中和微观震中的差异、烈度衰减模型和局部场地条件等因素的影响^[2]。近年来,众多学者选择分析强震台加速度记录对这个问题进行探讨^[3-7],并在地震烈度分布、峰值加速度衰减和近场条件等方面的研究中取得了很大进展。陈琳等^[2]将福建省区域离散化为若干网格,并提出一种基于地震动峰值加速度的烈度计算和地震灾害评估方法;赖敏等^[8]通过极震区强震加速度台记录推断出 2007 年 3 月 5 日攀枝花 $M_L 3.5$ 地震为逆冲走滑性型地震,并总结出各地区“综合烈度”的计算方法;卞真付等^[9]利用首都圈强震台网加速度记录对河北文

安地震进行分析,认为仪器记录的峰值加速度衰减特征可以反映地震的宏观特征和当地的地质构造特征。W. Suzuki 等^[10]也使用近源强震记录得到了 2008 年日本岩手-宫城内陆地地震的破裂过程。因此,利用近场强震台数据进行加速度影响场分析对于研究震害特征、场地响应、地震过程等具有重要意义。

本文研究的震例尽管震级较小,但震中位于北京市中心位置,首都圈台网和强震台网的大多数台站都清晰地记录到地震数据,且所使用的台站间距较小,分布在震中距 2 km 到 34 km 的范围内,是难得的近震记录资料,因此开展相关的研究和讨论,为今后强震或较大地震发生后快速响应和评定震害影响场提供参考依据。

1 资料选取和处理

1.1 资料选取

本研究中所采用的加速度数据来自于首都圈强震动台网。尽管震级较小,但仍有 11 个强震台清晰地记录下了地震数据。强震台所使用的仪器采样频率为 200 Hz。表 1 为强震台站的基本信息和相应

的峰值加速度情况。

由表 1 可见,记录此震例的强震台震中距均较小,最远仅 33.7 km,最近为 2.2 km,且台站之间的间隔也较小,分布较为密集。最大 EW 向峰值加速度出现在 LSG 台,为 22.528 gal;最大 NS 向峰值加

速度出现在 LSG 台,为 30.989 gal;最大垂直向峰值加速度出现在 CCS 台,为 12.797 gal。总体来看,NS 向峰值加速度普遍大于 EW 向,水平向普遍大于垂直向。

表 1 强震台基本信息和峰值加速度

Table 1 Information and Peak Ground Acceleration of Strong Motion Stations

台站代码	经度/°E	纬度/°N	震中距/km	EW 向峰值 加速度/gal	NS 向峰值 加速度/gal	垂直向峰值 加速度/gal
SJZ	116.34	40.22	33.7	3.472	23.008	12.797
DSY	116.19	39.91	5.1	20.708	14.706	6.598
DBW	116.27	40.03	12.9	10.73	4.573	3.395
FHL	116.09	40.10	17.7	10.472	14.464	5.803
HSY	116.16	39.81	15.5	1.727	1.794	2.975
JGH	116.26	39.91	9.6	4.046	3.882	3.645
LSG	116.20	39.91	5.6	22.528	30.989	7.146
QHY	116.11	39.91	6.2	3.441	2.008	3.208
CCS	116.16	39.93	2.2	11.613	12.32	11.545
XSJ	116.2	39.99	5.6	10.454	13.116	4.965
XYD	116.33	40.04	17.6	2.339	2.107	1.524

本文所使用的用于计算震源机制解的数据来自首都圈地震台网的 140 个数字地震台站。由于设备检修和信号传输等原因,共有 23 个宽频带台的地震波形较为清晰,初动较为明显,因此使用这 23 个台的波形计算震源机制解。

1.2 数据处理

本文将表 1 的强震台峰值加速度记录数据矢量合成为水平向峰值加速度以及垂直向峰值加速度,使用 GMT 软件进行格点拟合,获取了峰值加速度影响场分布图(图 1)。

本文还获取了加速度动态影响场的分布过程,以便更清晰地体现水平、垂直向加速度记录在值的大小、持续时间和衰减等方面的特征。记录仪器的频率为 200 Hz。首先将加速度预处理,合成为水平向(EW 和 NS 向矢量合成)以及垂直向两个分量,同时为减小因噪音和干扰造成高低值异常点对结果的影响,将 1 s 内所有记录到的加速度值取平均值,再以 1 s 为单位,用 GMT 软件进行格点拟合并绘出等值线。每秒的加速度影响场见图 2 所示。

2 结果分析

2.1 加速度记录分析

根据近场加速度记录数据可以看出,2011 年 10 月 12 日北京市石景山区 M_L 地震最大水平向加速度为 LSG 台的 NS 向,记录值为 30.989 gal,最大垂直向加速度为 SJZ 台,记录值为 12.797 gal。从总体上看,垂直向记录小于水平向记录。根据文献^[9]

的研究结果可知,以往的地震记录中,水平向峰值加速度普遍大于垂直向,因此这个结果符合一般规律。仅有 HSY 台为例外,这可能是由于近场场地条件而产生的结果。地震后的震感记录中,明显感受到地震的人群主要集中在石景山区和海淀区,这与加速度影响场的结果基本吻合。合成水平向加速度影响场分布表明(图 1(a)),此次地震的加速度震中北部高于南部区域,且界限较为清晰,分界线呈 NEE 向分布,合成水平峰值加速度点与微观震中相距约 5.6 km,峰值加速度点附近影响场分布呈近 EW 向分布;垂直向影响场与合成水平向相类似,呈南强北弱分布,但微观震中和峰值加速度点基本重合。

2.2 加速度动态影响场分析

图 2 中每一行的两张图分别代表地震之后同一秒钟水平向和垂直向加速度分布情况。从图 2 的整体趋势可以看出,水平向的加速度普遍大于垂直向,另外,垂直向加速度衰减快于合成水平向。垂直向的各台站在地震发生后第 3 秒时(图(b)4)平均加速度值就下降到 2 gal 以下,而水平向在地震发生的第 5 秒及第 6 秒内(图(a)5 及(a)6)仍有部分台站的平均加速度在 2 gal 以上。

2.3 震源机制分析

北京地区地壳厚度由东南到西北部呈逐渐变厚的趋势^[12]。同时北京地区新生代构造活动强烈^[13]。地壳浅表断裂构造十分发育,近 EW 向,NEE—NE 向,NNE—NS 向和 NW 向或 NWW 向断裂纵横交错,断续展布,既有正断层,又有逆断层^[14]。

文献[15]的结论表明,北京地区最大主应力方位为 NEE 向,最小主应力方位为 NNW 向。近年在北京地区所发生的中小地震中,以正断层性质的地震为主,约占地震总量的 70%^[16]。

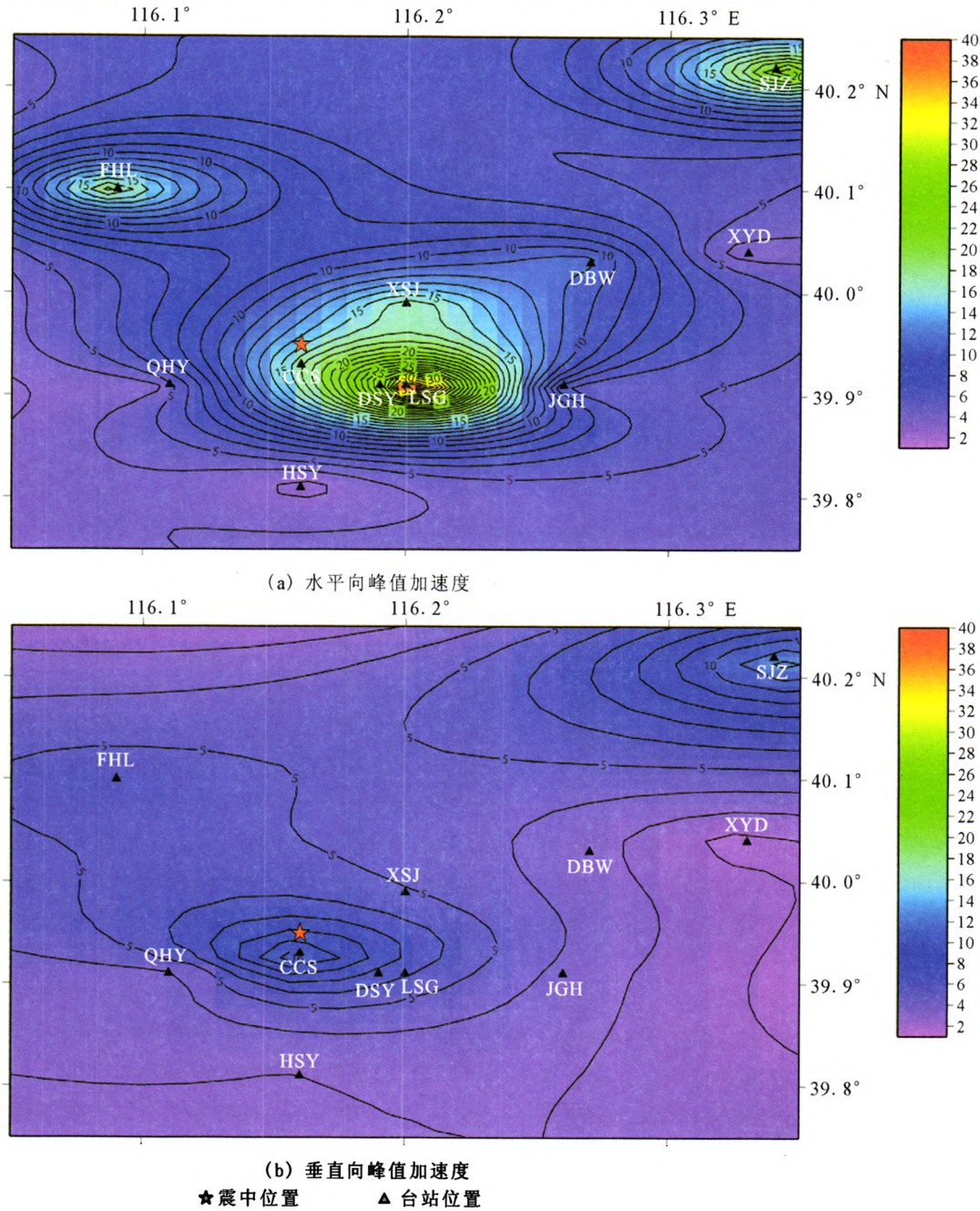


图 1 峰值加速度影响场分布

Fig. 1 Distribution of peak acceleration influence field.

本文获得首都圈 23 个宽频带台站的地震波形记录,资料较为充分。由于 P 波初动符号物理图像明确,是稳定的地震波信息,因此可以较好地确定震源机制解^[17],所以用 P 波初动求解震源机制解是当今地震学界公认的求取震源机制解的有效途径之一^[18]。

本文使用许忠淮等^[19]提出的求 P 波震源机制解的格点尝试法解算此次地震的震源机制解。胡幸

平等^[18]曾用此方法对汶川地震及其强余震震源进行分析,并与哈佛大学公布的汶川主震和 8 个强余震的快速矩张量解及其最佳双力偶解进行对比,结果显示总体上两者的结果较为一致。由此可见用 P 波资料进行格点尝试法求解震源机制比较可靠。

本文依据读取的 P 波初动数据,选取最小矛盾符号比 φ 和 φ 加 5% 之间的所有解求平均解作为最终结果。所得到的震源机制解如图 3 所示,表 2 为

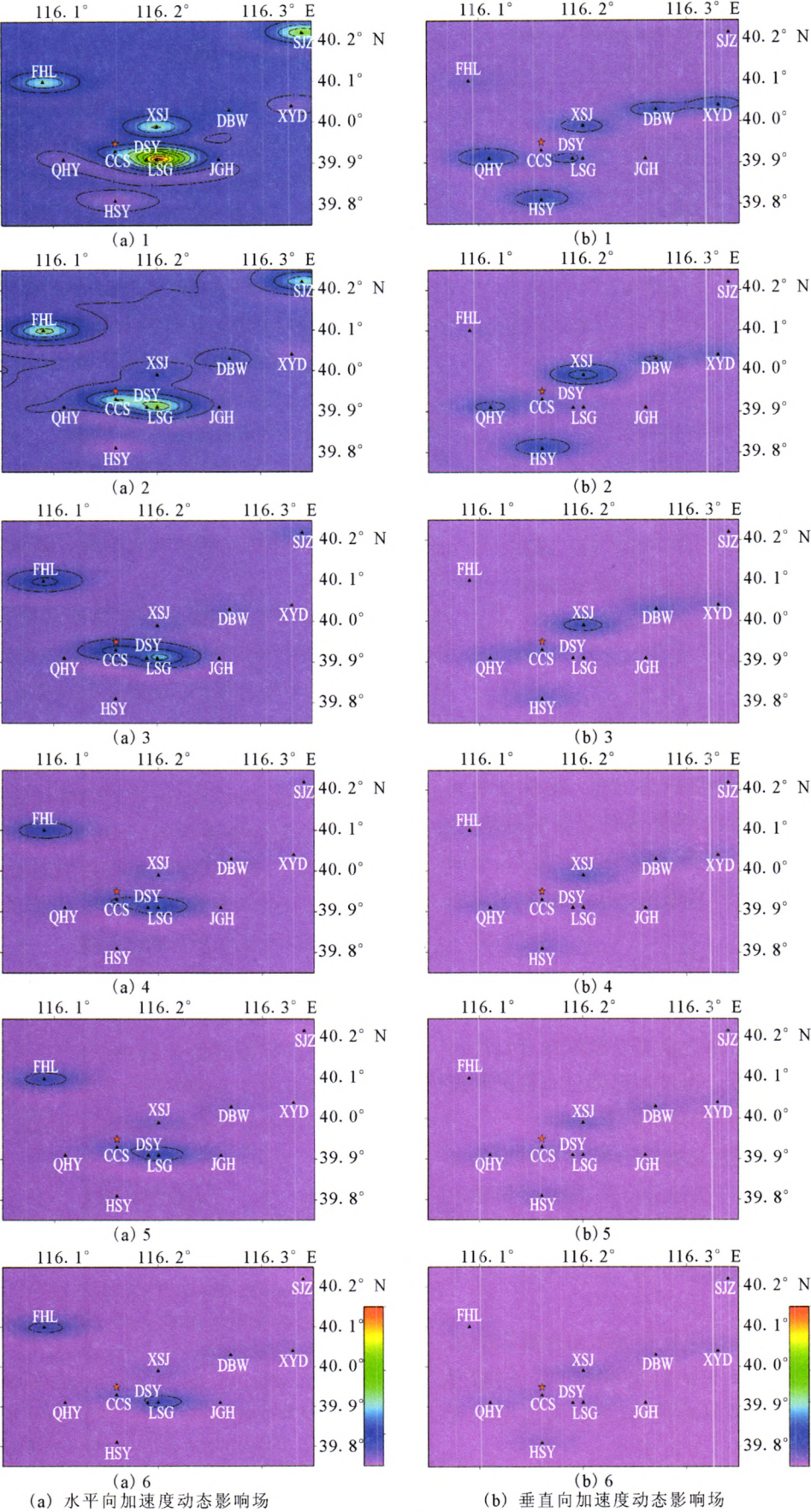


图 2 每秒加速度动态影响场的分布

Fig. 2 Dynamic distribution of acceleration influence field for each second.

表 2 震源机制解结果

Table 2 Results of Focal Mechanism Solution

节面	走向/°	倾角/°	滑动角/°	矛盾比/%
节面 I	295	39	-74	13
节面 II	96	53	-102	13

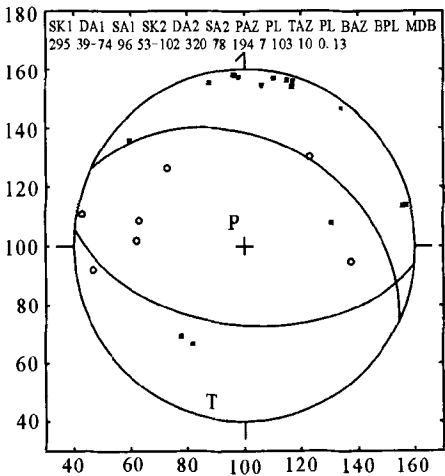


图 3 格点尝试法求得的震源机制解

Fig. 3 Focal Mechanism Solution calculated by grid point test method.

解算结果。

参与计算的台站对震中的包围性较好,计算出的结果矛盾比为 13%,结果较为可靠。解算结果表明,此次地震为北京地区较为多发的正断性质错动,带有一定的走滑性质。节面 I 呈 SEE 向展布,节面 II 近 EW 向展布,节面 II 的倾角大于节面 I,主压应力方向为 NNW。

2.4 综合分析

此次 2.1 级地震尽管震级较小,但近场区有较多强震动台站和测震台站记录可以较好地进行加速度分析和震源机制解算。通过加速度分布情况和震源机制解的结果,可以初步得出以下认识:

(1) 此次地震加速度影响场分布水平向加速度普遍高于垂直向,符合以往记录结果,同时水平峰值加速度分布点与震感调查结果是一致的。峰值加速度点(或宏观震中)与微观震中并未完全吻合,偏差约 5.6 km。

(2) 水平向峰值加速度分布区和加速度影响场高低速度过渡区总体呈 EW 向或 NEE 向。同时通过动态影响场的情况可以看出,水平向加速度的衰减速度要慢于垂直向。

(3) 震源机制解的结果中,两个节面走向近 EW 向,可以发现其走向与加速度影响场高低速度过渡区总体较为一致,这个结果对判定地震过程具

有参考意义。

3 初步结论与讨论

2011 年 10 月 12 日北京市石景山区 $M_L2.1$ 地震是一次北京地区较为多发的具有走滑正断层性质的地震,结合加速度影响场高低速度过渡区分布特征分析,其优势破裂面可能是高倾角的节面 II,节面走向为近 EW。

本文所得到的震源机制解的结果与加速度影响场高低速度过渡区分布具有较好的一致性。然而,记录到该地震的强震台中距较近,记录较为清晰,但台站的方位角还存有比较大的间隔,导致震中东南部 and 震中北部区域数据有所缺失。从某种程度上表明,如果强震动台分布较为密集和合理的话,其影响场计算分析可能更为精确,由此不但可以快速判定灾害分布特征,还可以为地震过程研究提供参考依据。

地震定位和加速度影响场的结果分析认为,此次地震的微观震中与加速度峰值点(或宏观震中)存在空间偏差是合理的,表明震中投影点和错动出露点的位置是不一致的。

尽管记录此次地震的强震台中距较小,台间距较近,但由于地震加速度影响场计算的近场记录偏少,且空间分布不均匀,研究对象震级偏小,其结果可能具有一定片面性,尤其在加速度低值分布区存在有高点异常分布,还有待对仪器工作状况及场地条件进行深入的分析 and 研究。

本研究工作还是初步的。随着地震观测条件的逐步改善和强震监测能力的增强,利用地震加速度记录数据进行影响场分析,可为灾害评估和地震应急快速响应等方面提供科学依据。近场地震加速度记录数据深入研究具有科学和实用前景。

[参考文献]

[1] Wu Y M, Shin T C, Tsai Y B. Near Real-Time Mapping of Peak Ground Acceleration and Peak Ground Velocity Following a Strong Earthquake[J]. BSSA, 91(5):1218-1228.

[2] 陈琳,张明,董奕,等. 索基于地震动峰值加速度的地震灾害评估方法[J]. 高原地震, 2011, 23(3): 67-70.

Chen L, Zhang M, Dong Y, et al. The Method of Earthquake Hazard Estimation Based on Peak Acceleration of Ground Motion[J]. Plateau Earthquake Research, 2011, 23(3): 67-70.

[3] 卢大伟,姚凯,闵祥仪,等. 兰州观象台存放台阵汶川 $M_s8.0$ 强震动记录分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 171-176.

Lu D W, Yao K, Min X Y, et al. Strong Motion Records of Paking Array in Lanzhou Earth Observatory for Wenchuan

- $M_S8.0$ Earthquake and Preliminary Analysis[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011,33(2):171-176.
- [4] 刘旭宙,张元生,周民都,等.汶川 $M_S8.0$ 地震兰州烈度速报强震动记录与初步分析[J]. *西北地震学报*, 2010,32(4):376-380.
- Liu X Z, Zhang Y S, Zhou M D et al. Strong Ground Motion Records of Wenchuan $M_S8.0$ Earthquake from the Seismic Intensity Rapid Reporting Stations in Lanzhou and Its Preliminary Analysis[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2010,32(4):376-380.
- [5] 闵祥仪,姚凯,何新社. 2003年10月25日甘肃民乐—山丹 $M_S6.1$ 地震强震近场记录和分析[J]. *西北地震学报*, 2003,25(4):289-292.
- Min X Y, Yao K, He X S. Strong Motion Records and Preliminary Analysis for Minle—Shandan $M_S6.1$ Earthquake on Oct. 25, 2003, Gansu Province[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2003, 25(4):289-292.
- [6] 乔震元,刘本玉,张远富.汶川8.0级地震峰值地震动特性研究[J]. *西北地震学报*, 2011,33(1):92-95.
- Qiao Z Y, Liu B Y, Zhang Y F. Research on the Peak Ground Motion Characteristics of Wenchuan $M_S8.0$ Earthquake[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011,33(1):92-95.
- [7] 姚凯,孙崇绍,朱珊珊,等. 2008年汶川地震后的三次强余震地表峰值加速度衰减场研究[J]. *西北地震学报*, 2012,34(1):99-104.
- Yao K, Sun C S, Zhu S S, et al. Study on PGA Attenuation of Three Strong Aftershocks of 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2012,34(1):99-104.
- [8] 赖敏,余桦,孙玮,等. 2007年3月5日攀枝花3.5级地震强震近场记录初步分析[J]. *四川地震*, 2008,3:24-30.
- Lai M, Yu H, Sun W, et al. Near-field Strong Acceleration Records and Preliminary Analysis of Panzhihua $M_L3.5$ Earthquake on 5 March 2007, Sichuan Province[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, 2008,3:24-30.
- [9] 卞真付,姚兰予,郭巍,等.河北文安5.1级地震首都圈实时强震动台网加速度记录分析[J]. *地震研究*, 2009, 32(2):145-150.
- Bian Z F, Yao L Y, Guo W, et al. The Acceleration Records Analysis of the $M5.1$ Wen'an Hebei Earthquake Recorded by the Capital Real-time Digital Strong Motion Network [J]. *Journal of Seismological Research*, 2009, 32(2):145-150.
- [10] W Suzuki, S Aoi, H sekiguchi. Rupture Process of the 2008 Iwate—Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake Derived from Near-source Strong-motion Recors[J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2010, 100(1):256-266.
- [11] 李恒,李井冈,王墩,等. 竖直与水平向地震动加速度峰值比统计特征分析[J]. *地震研究*, 2010, 33(2):195-199.
- Li H, Li J G, Wang D, et al. Analysis of Statistic Characteristics of Peak Ratios in Vertical and Horizontal Ground Motion Acceleration [J]. *Journal of Seismological Research*, 2010, 33(2):195-199.
- [12] 罗艳,崇加军,倪四道,等.首都圈地区莫霍面起伏及沉积层厚度[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(4):1135-1145.
- Luo Y, Chong J J, Ni S D, et al. Moho Depth and Sedimentary Thickness in Capital Region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008,51(4):1135-1145.
- [13] 刘保金,胡平,等.北京平原西北部地壳浅部结构和隐伏活动断裂——由地震反射剖面揭示[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(8):2015-2025.
- Liu B J, Hu P, Chen Y, et al. The Crustal Shallow Structures and Buried Active Faults Revealed by Seismic Reflection Profiles in Northwestern Area of Beijing Plain[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009,52(8):2015-2025.
- [14] 任清芳,张成科,张先康,等.八达岭及周缘地区壳幔结构与潜在震源探讨[J]. *西北地震学报*, 1997,19(3):56-62.
- Ren Q F, Zhang C K, Zhang X K, et al. Discussion on Structure of Crust and Upper Mantle and Potential Focal Region in Badaling and Its Neighborhood [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1997,19(3):56-62.
- [15] 武敏捷,林向东,徐平.华北北部地区震源机制解及构造应力场特征分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(5):39-43.
- Wu M J, Lin X D, Xu P. Analysis of Focal Mechanism and Tectonic Stress Field Features in Northern Part of North China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(5):39-43.
- [16] 兰从欣,邢成起,苗春兰,等.近年首都圈地区中小地震震源机制解及其特征分析[J]. *华北地震科学*, 2005,23(4):21-25.
- Ren Q F, Zhang C K, Zhang X K, et al. Discussion on Structure of Crust and Upper Mantle and Potential Focal Region in Badaling and Its Neighborhood [J]. *North China Earthquake Sciences*, 1997,19(3):56-62.
- [17] 俞春泉,陶开,崔效锋,等.用格点尝试法求解P波初动震源机制解及解的质量评价[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(5):1402-1411.
- Yu C Q, Tao K, Cui X F. P-wave First-motion Focal Mechanism Solutions and Their Quality Evaluation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009,52(5):1402-1411.
- [18] 胡幸平,俞春泉,陶开,等.利用P波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(6):1711-1718.
- Hu X P, Yu C Q, Tao K, et al. Focal Mechanism Solutions of Wenchuan Earthquake and Its Strong Aftershocks Obtained from Initial P wave Polarity Analysis [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008,51(6):1711-1718.
- [19] 许忠淮,阎明,赵仲和.京津塘张地区小地震的平均释放应力场的方向特征[J]. *地震学报*, 1979,1(2):52-58.
- Xu Z H, Yan M, Zhao Z H. Evaluation of the Direction of Tectonic Stress in North China from Recorded Data of A Large Number of Small earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1983,5(3):268-279.