

赵韬, 赵曦, 王莹, 李少睿, 惠少兴, 王杰民. 2016. 区域台网地震矩张量快速反演系统研究. 地震学报, 38(6): 889-897. doi:10.11939/jass.2016.06.008.

Zhao T, Zhao X, Wang Y, Li S R, Hui S X, Wang J M. 2016. Study on the fast seismic moment tensor inversion system using regional seismic network data. *Acta Seismologica Sinica*, 38(6): 889-897. doi:10.11939/jass.2016.06.008.

区域台网地震矩张量快速反演系统研究^{*}

赵 韬^{1,2),†} 赵 曦²⁾ 王 莹²⁾
李少睿²⁾ 惠少兴²⁾ 王杰民^{1,3)}

1) 中国合肥 230026 中国科学技术大学地球和空间科学学院
2) 中国西安 710068 陕西省地震局
3) 中国济南 250014 山东省地震局

摘要 基于美国内华达大学地震实验室的矩张量反演程序, 采用 JAVA 和 HTML 语言, 研发了一套近实时全波形矩张量快速反演系统, 用于区域台网地震矩张量的快速产出. 该系统由区域地震速报系统触发, 能自动实现中等强度地震矩张量的快速反演, 同时也包含人机交互模块, 可进行人工校正, 最终以网页形式对外服务. 本文将系统运行以来成功反演的结果与 USGS 和中国地震局地球物理研究所的计算结果进行对比, 验证了该系统的可靠性.

关键词 区域台网 地震矩张量 快速反演 全波形 JAVA

doi:10.11939/jass.2016.06.008 中图分类号: P315.61 文献标志码: A

Study on the fast seismic moment tensor inversion system using regional seismic network data

Zhao Tao^{1,2),†} Zhao Xi²⁾ Wang Ying²⁾ Li Shaorui²⁾
Hui Shaoxing²⁾ Wang Jiemin^{1,3)}

1) School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, China

2) Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China

3) Earthquake Administration of Shandong Province, Ji'nan 250041, China

Abstract: Seismic moment tensor is an important part of seismology study, which supplies indispensable information for earthquake research. Fast acquisition of seismic moment tensor solution could be the key of post-earthquake relief and tendency determination. Based on the moment tensor inversion package from Nevada Seismology Laboratory, using JAVA and HTML language, we developed a near real-time full waveform moment tensor inversion system, which could fast output seismic moment tensor. Triggered by the Earthquakes Instant Messenger (EQIM), the system could inverse seismic moment tensor of

* 基金项目 测震台网青年骨干培养专项(20160524)和陕西省地震局启航与创新基金课题(201603)共同资助.

收稿日期 2016-05-06 收到初稿, 2016-08-13 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: zhaotaowy@163.com



moderate earthquakes automatically, also could be corrected manually, and offer web services in the end. Comparison has been made between our results and published ones by USGS and Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, verifying the reliability of this system.

Key words: regional seismic network; seismic moment tensor inversion; fast inversion; full waveform; JAVA

引言

地震矩张量在地震学领域有着重要和广泛的应用,例如用于研究区域应力场、地震成因、震源过程和海啸成因等(赵翠萍等, 2008; 吴微微等, 2014; Hou, Xu, 2015)。震后快速准确地得到地震矩张量对地震本身的研究、地震灾害的快速评估、震后趋势判定和地震应急救援等方面都具有重要的意义(Pasyanos *et al*, 1996)。

目前,对于全球较大地震($M_w \geq 5.0$),美国哈佛大学的全球矩心矩张量(global centroid moment tensor, 简写为 GCMT)项目组、美国地质调查局(USGS)、东京大学和中国地震局地球物理研究所等机构能够利用全球台网地震记录或大范围的全国台网记录,在震后较短时间内(一般为2小时)给出快速矩张量目录。此外,赵旭等(2014)使用最新构建的虚拟全球地震台,开发了基于W震相技术的全球强震($M_w \geq 6.5$)矩心矩张量自动反演系统,该系统能够实现在震后25—40分钟内自动准确测定全球 $M_w \geq 6.5$ 地震的矩心矩张量。但是,这些研究都利用震中距大于几千千米的远震波形进行分析,同时要求地震具有足够的能量。

20世纪80年代以来,随着测震台网密度的不断提高,高增益、大动态范围的宽频带数字地震仪被广泛应用于地震监测,使用数字化区域宽频带地震波形在区域范围内(震中距<1000 km)获取震源机制的工作得到了很大的发展,并形成了目前常用的两种地震矩张量反演方法: TDMT_INT(time domain seismic moment tensor inversion)方法(Dreger, Helmberger, 1993; Romanowicz *et al*, 1993; Benmenahem, 1995)和CAP(cut and paste)方法(Zhao, Helmberger, 1994; Nábělek, Xia, 1995; Randall *et al*, 1995; Zhu, Helmberger, 1996)。很多研究人员已利用这两种方法,基于区域宽频带地震波形记录,求解了国内部分中等强度地震的矩张量(谢祖军等, 2012; 陈继峰, 2015; 康清清等, 2015)和强震的中强余震矩张量(吕坚等, 2008)。

近年来,随着区域台网建设的快速发展和地震矩张量的深入应用,实现区域地震矩张量的自动反演已成为必然的发展趋势。日本国家地球科学与防灾研究所(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 简写为 NIED)利用区域台网实现了地震矩张量的近实时自动反演(Fukuyama *et al*, 1998; Fukuyama, Dreger, 2000; Kubo *et al*, 2002),瑞士地震研究所(Swiss Seismological Service, 简写为 SED)、安达卢西亚地理学会(Instituto Andaluz de Geofísica, 简写为 IAG)和西班牙国家地理学会(Instituto Geográfico Nacional, 简写为 IGN)等机构也已开展了例行的震源矩张量反演(Daniel *et al*, 2003; Bernardi *et al*, 2004; Rueda, Mezcua, 2005)。邱毅等(2014)在 Dreger 和 Helmberger(1993)提出的矩张量反演程序的基础上,建立了一套区域中等强度地震的矩张量快速自动反演系统,并对台湾和福建地区的中等强度地震矩张量进行了自动求解。

本文拟结合全国地震自动速报系统, 建立基于区域台网宽频带地震记录波形的地震矩张量快速反演系统。地震矩张量反演的核心计算程序来自美国内华达大学地震实验室开发的矩张量反演程序软件包(Ichinose *et al*, 2003)。

1 方法原理

1.1 矩张量反演

在双力偶点源的假设条件下, 矩张量反演方法可表示为(Jost, Herrmann, 1989; Kawakatsu, 1998; Tajima *et al*, 2002):

$$\sum_i G_i^k(t) m_i^s = d^k(t), \quad (1)$$

式中, s 表示震源, k 表示台站, $G_i^k(t)$ 和 $d^k(t)$ 分别表示震源 s 至台站 k 的理论格林函数和台站 k 的实际观测记录。这里上标 k 包含台站 k 的 3 个分量, m_i^s 表示矩张量的第 i 个分量。若已知地壳速度模型, 格林函数可通过频率波数(f - k)法(Wang, Herrmann, 1980; Herrmann, Wang, 1985; Saikia, 1994)计算得到。一旦获得观测数据, 利用最小二乘法将观测波形与不同深度的格林函数进行拟合, 再根据目标函数 VR(方差减小值)来确定最佳解(Dreger, Helmberger, 1993; Fukuyama *et al*, 1998)。将理论波形记为 $o^k(t)$, 则

$$VR = \left[1 - \sum_k \frac{\sqrt{\int [d^k(t) - o^k(t)]^2 dt}}{\sqrt{\int d^k(t)^2 dt}} \right] \times 100\%. \quad (2)$$

VR 值越大, 表明波形拟合得越好, 求解出来的地震矩张量越可靠。因此我们认为最大 VR 值对应的深度即为最佳深度。

1.2 矩张量反演程序软件包

内华达地震实验室矩张量反演程序软件包(Ichinose *et al*, 2003)可基于区域台网三分量地震记录进行全波形地震矩张量反演, 反演过程中每一步数据处理都是一个独立的模块, 用户可以根据自己的需要对某个模块进行单独控制, 最后通过地震矩张量、震源深度及其与发震时刻的关系等判别标准来确定最佳的地震矩张量解。

美国内华达地震实验室已将该矩张量反演程序包用于内华达地区的地震矩张量实时反演中。Ichinose 等(2003)曾使用该方法, 基于不同的速度结构模型, 对美国加利福尼亚东部和内华达州西部 $M_w \geq 4.0$ 地震进行了矩张量计算, 计算结果显示, 在方位角分布较为均匀的情况下, 最少使用 3 个台站即可得到较好的矩张量解, 且 P 轴和 T 轴方向的偏差可控制在 10° 以内, 说明该软件的稳定性有充分保障。

2 区域台网地震矩张量快速反演系统的技术路线

本研究研发的区域台网地震矩张量快速反演系统包括自动反演平台、手动反演平台和管理平台等 3 部分。自动反演平台实现了系统触发、地震相关信息与地震波形记录获取、矩张量反演计算和最佳解挑选等过程的自动化; 手动反演平台可以根据用户需求, 自主进行反演计算; 管理平台用于管理各项反演事件及结果。该快速反演系统操作便捷, 最终通过网页形式对外提供数据服务。

2.1 自动矩张量计算平台

本文研发的实时快速矩张量自动反演系统的框架如图 1a 所示, 其处理流程(图 1b)主要分为以下步骤:

- 1) 地震发生后, 全国地震速报系统自动触发快速矩张量自动反演系统, 并由地震速报系统自动获取地震三要素;
- 2) 自动从区域测震台网实时流数据库中截取地震事件波形记录, 并解压缩为后续步骤需要的 SAC 格式文件, 同时准备好反演所需要的台站参数文件;
- 3) 自动进行矩张量反演计算. 由于本文使用的内华达大学地震实验室的矩张量反演程序, 其求解过程采用人机交互方式, 每次反演计算需要人工分多阶段运行多个程序, 且各程序运行过程中需要输入的参数和生成的结果也需要人工修改. 因此本文对该反演程序进行改进, 自动生成各阶段需要的输入文件及自动读取各阶段程序生成的结果, 实现自动矩张量解反演. 本系统采用 Crust2.0 速度模型计算格林函数, 采用的滤波频段为 0.02—0.08 Hz;
- 4) 自动挑选矩张量最佳解. 本文程序选用信噪比大于 20 dB 的地震波形记录, 与不同深度理论震动图进行拟合求解矩张量解, 最终选取反演方差减小值 VR 最大的解作为此次地震的矩张量最佳解;
- 5) 输出矩张量最佳解结果, 并在网页上进行发布和网页给出的反演结果包括地震三要素、震中位置、台站分布和矩张量解等信息, 以及波形拟合结果.

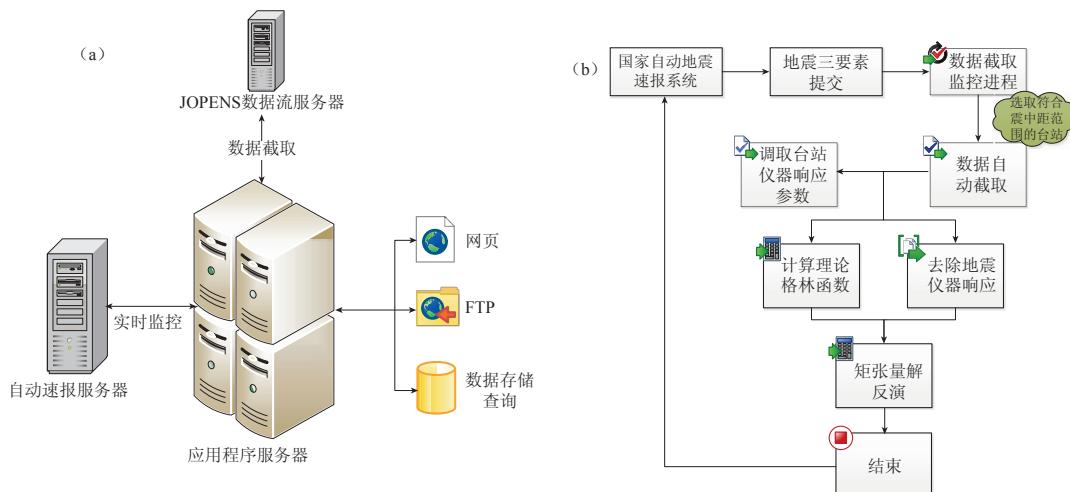


图 1 自动计算系统框架(a)和自动矩张量反演流程(b)

Fig. 1 Framework of auto computing system (a) and flowchart of auto moment tensor inversion (b)

2.2 手动矩张量计算平台

手动计算平台略去了传统矩张量计算中 Linux 系统操作、脚本修改及使用 SAC、rdseed 等专业软件处理数据的繁琐过程, 用户只需上传波形, 输入计算参数, 便可进行地震矩张量计算, 计算方法与自动计算所采用的方法一致. 计算完成后, 根据不同深度的波形拟合图可以确定计算结果的准确性, 选择是否重新计算. 计算结果通过网页形式对外服务. 目前手动计算平台只支持标准 SEED 格式的波形文件.

2.3 管理平台

管理平台主要是对计算服务和自动处理的数据进行管理。用户可在管理平台中设置全国自动地震速报系统的连接参数、自动反演触发条件等,也可校正自动计算结果、手动添加历史地震、清理用户计算文件等。

3 自动反演结果

本文研发的区域台网快速矩张量反演系统目前已在陕西省地震台网中心在线运行,区域台网覆盖范围包括陕西省区域台网台站及四川、甘肃、新疆、内蒙、青海、西藏、宁夏、云南等省区的部分台站,这些台站为快速反演系统提供了高质量的地震记录。

该系统自2014年8月开始运行,在运行近两年的时间内对西北片区的地震进行监测,共计得到165次地震的地震矩张量解(图2),其中震级最大的地震为2014年8月3日云南鲁甸 $M_S 6.5$ 地震,最小的地震为2014年9月12日四川青川 $M_S 3.4$ 地震。这165次地震的地震矩张量解的自动反演结果均在地震发生后15—25分钟内发布。

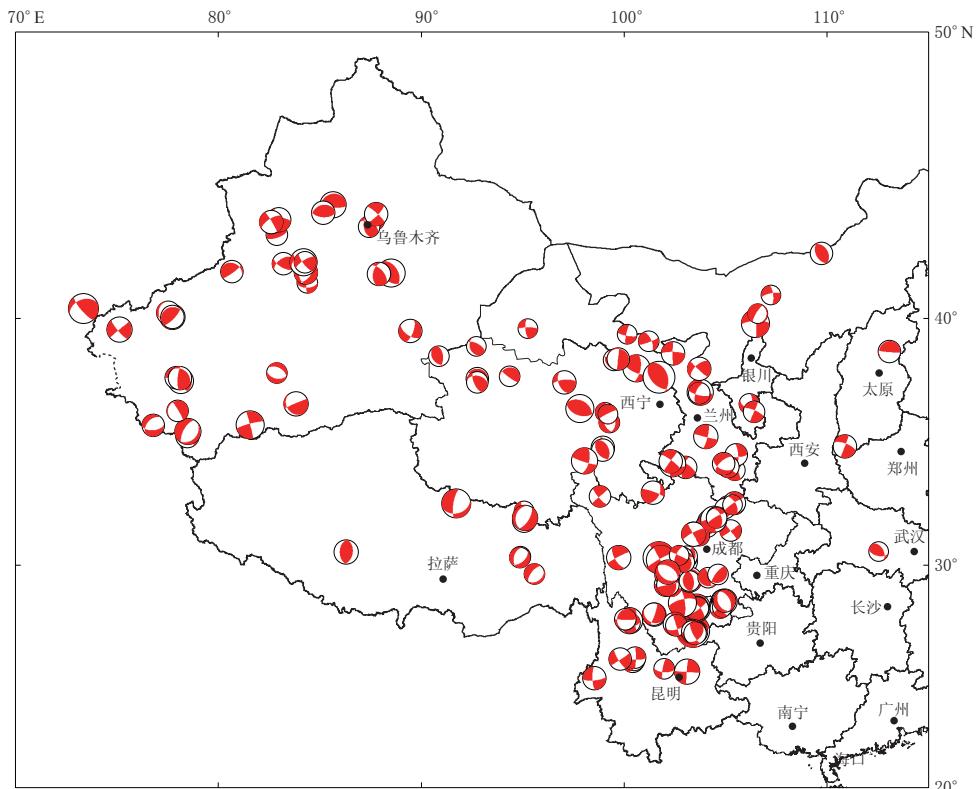


图2 区域台网快速矩张量反演系统获取的165次地震反演结果分布

Fig. 2 Distribution of 165 seismic moment tensor solutions from fast inversion system using regional seismic network data

综合考虑本反演系统使用的数据资料和算法特征,选取求解最优解的VR值对反演结果进行量化的论证。根据系统算法和源程序开发者Ichinose的经验和建议,选取 $VR \geq 50\%$ 作为反演结果可靠性的标准。本文对系统自动反演的165次地震的VR值进行统计,

其中 $VR \geq 50\%$ 的反演结果为 131 个, 所占比例为 79%; $VR < 50\%$ 的反演结果为 34 个, 所占比例为 21%. 对这 34 个 $VR < 50\%$ 的结果进行对比分析, 发现其中有 27 次地震发生在区域台网覆盖范围的外围或边缘, 台站包络性不佳.

将系统自动反演的 165 次地震中的 14 次 $M_s \geq 5.0$ 地震的矩张量解与 USGS 和中国地震局地球物理研究所的反演结果进行对比, 结果如表 1 所示, 可以看出各项参数的一致性较高.

表 1 区域台网地震矩张量自动反演系统 $M_s \geq 5.0$ 地震反演结果对比

Table 1 Contrast analysis of $M_s \geq 5.0$ earthquakes' inversion solutions from regional fast inversion system

发震时刻 年-月-日 时:分	震中 位置	M_w	深度 /km	节面 I			节面 II			资料来源 [*]
				走向/°	倾角/°	滑动角/°	走向/°	倾角/°	滑动角/°	
2014-08-03 16:30	云南 鲁甸	6.0	8	165	90	17	75	73	180	本文
		6.1	14	160	87	5	69	85	177	USGS
		6.3	11	165	87	6	74	87	177	地球物理研究所
2014-08-17 06:07	云南 永善	5.0	8	318	64	2	227	84	154	本文结果
		4.9	8	319	62	0	229	90	152	地球物理研究所
2014-10-01 09:23	四川 越西	5.0	8	352	74	20	256	70	163	本文结果
		5.0	10	350	79	21	256	69	168	地球物理研究所
2014-10-02 23:56	青海 乌兰	5.0	16	299	40	97	110	50	84	本文
		5.1	12	299	60	105	90	34	66	USGS
		5.1	17	287	47	80	121	44	101	地球物理研究所
2014-11-22 16:55	四川 康定	5.8	8	234	80	-176	143	86	-10	本文
		5.9	14	231	78	-170	139	80	-12	USGS
		6.1	12	233	90	180	143	90	0	地球物理研究所
2014-11-25 23:19	四川 康定	5.3	12	151	88	-7	241	83	-178	本文
		5.6	12	152	82	-3	242	87	-172	USGS
2015-01-14 13:21	四川 乐山	4.6	10	292	14	68	135	77	95	本文
		4.6	12	151	47	80	345	44	101	地球物理研究所
2015-02-22 14:43	新疆 沙湾	4.8	8	242	18	58	95	74	100	本文
		4.7	17	57	45	65	270	50	113	地球物理研究所
2015-04-15 15:39	内蒙古 阿拉善 左旗	5.1	4	358	84	-164	267	74	-6	本文
		5.4	22	174	85	-169	83	79	-5	USGS
2015-06-25 03:12	新疆 托克逊	5.0	20	140	43	83	330	48	97	本文
		5.0	33	133	46	98	302	45	82	USGS
		5.0	31	154	58	88	338	32	93	地球物理研究所
2015-10-12 18:04	青海 玛多	4.8	12	108	83	28	14	62	172	本文
		5.2	20	288	81	5	197	85	171	USGS
		5.1	20	112	81	6	21	84	171	地球物理研究所
2015-11-23 05:02	青海 祁连	5.0	20	10	64	151	114	64	30	本文
		5.0	9	11	78	143	110	54	15	地球物理研究所
2016-01-14 05:18	新疆 轮台	4.9	20	242	39	27	131	74	125	本文
		5.1	24	273	28	85	99	62	93	USGS
		5.0	20	272	23	78	105	68	95	地球物理研究所
2016-01-21 01:13	青海 门源	5.7	12	342	42	109	137	51	74	本文
		5.9	7	342	55	101	144	36	75	USGS
		6.0	7	335	53	98	141	38	79	地球物理研究所

*USGS 的反演结果引自 <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>, 中国地震局地球物理研究所的反演结果引自 <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/index.shtml>.

4 讨论与结论

本文结合区域台网现状, 对美国内华达大学地震实验室的矩张量反演程序进行改进, 研发了一套基于区域台网宽频带地震记录波形的快速矩张量反演系统。该系统以矩张量自动反演为主, 由地震速报系统触发, 自动获取地震三要素和地震波形记录, 自动反演计算地震矩张量并挑选最佳解, 最后通过网页发布, 实现了整个处理过程的自动化。这种自动化有利于快速得到矩张量反演结果, 能有效提高震后应急服务产品的产出速度, 并为灾后烈度速报、紧急救援和震后趋势的快速判定提供数据支持。此外, 该系统还提供了一套手动矩张量计算平台和管理平台, 只需通过网页即可完成用户选定事件的矩张量计算和管理, 略去了各种程序操作和脚本修改的过程, 更加方便、快捷, 易于操作。该系统目前在陕西省地震台网中心运行, 已实现西北部分地区中等强度地震的自动快速反演。

区域台网地震矩张量快速反演系统使用美国内华达地震实验室的矩张量反演程序包, 该软件包有充分的稳定性保障, 即使在稀疏台网下亦能够得到较为精确的地震矩张量解。对系统自动计算的 165 次地震反演结果的 VR 值进行统计, 结果表明, 系统可靠性可达 79%, 而其余 21% 的“不可靠”结果主要是由台网覆盖不全面造成的。如果只考虑区域台网覆盖范围内的地震, 系统可靠率可达 95%。再将系统自动计算的 14 次 $M_s \geq 5.0$ 地震的矩张量解与国内外权威研究机构给出的结果进行对比分析, 各项参数的一致性较高, 证实了该方法的可靠性比较高。

地震发生后, 经速报系统触发, 区域台网地震快速矩张量自动反演系统能在 20 分钟左右准确计算地震的矩张量解。如果参与反演的台站数据较多, 计算格林函数时间变长, 反演所用时间也会增加。该系统目前处于上线试运行阶段, 在今后的工作中还可对本文的方法进行优化, 以进一步减少得到结果所需的时间。

架设于陕西省、四川省和甘肃省台网中心的区域台网地震快速矩张量自动反演系统, 经过一年多的试运行, 成功反演了 $3.5 \leq M_s < 6.5$ 地震 165 次。除去 3 次系统升级时间段内发生的地震外, 该自动反演系统均经速报系统触发, 成功反演出地震矩张量, 且无地震事件遗漏。因此, 可以认为该系统能够稳定地、全面地监控区域地震。

研究中使用了美国内华达州地震实验室的矩张量反演软件包和 SAC 波形处理软件、中国地震局地球物理研究所和美国地质调查局(USGS)的相关计算结果; 中国地震局地球物理研究所国家测震台网数据备份中心(doi:10.11998/SeisDmc/SN; 郑秀芬等, 2009)和甘肃、内蒙古、宁夏、青海、四川、陕西、新疆、西藏、云南各省区的地震台网为本研究提供地震波形数据; 两名审稿专家提出了非常宝贵的意见及建议, 作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

陈继锋. 2015. 2012 年 5 月 3 日甘肃金塔 $M_s 5.4$ 地震矩张量反演[J]. 地震工程学报, 37(4): 1124–1128.

Chen J F. 2015. Moment tensor inversion of the 2012 Jinta, Gansu $M_s 5.4$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 37(4): 1124–1128 (in Chinese).

康清清, 缪发军, 刘红桂, 徐戈, 李峰. 2015. 利用矩张量反演法研究江苏高邮—宝应 $M_s 4.9$ 级地震震源机制解和震源深度[J]. 地球物理学报, 58(1): 204–215.

Kang Q Q, Miao F J, Liu H G, Xu G, Li F. 2015. Focal mechanism and focal depth of the Gaoyou-Baoying, Jiangsu,

China M_S 4.9 earthquake on 20 July 2012 derived from moment tensor inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(1): 204–215 (in Chinese).

吕坚, 郑勇, 倪四道, 高建华. 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.

Lü J, Zheng Y, Ni S D, Gao J H. 2008. Focal mechanisms and seismogenic structures of the M_S 5.7 and M_S 4.8 Jiujiang–Ruichang earthquakes of Nov. 26, 2005[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(1): 158–164 (in Chinese).

邵毅, 金星, 李军, 朱耿青, 邵平荣, 徐嘉隽. 2014. 利用区域台网快速自动反演中等强度地震矩张量[J]. 地震, **34**(2): 65–73.

Qiu Y, Jin X, Li J, Zhu G Q, Shao P R, Xu J J. 2014. Automated and rapid moment tensor inversion for moderate earthquakes using regional seismic network[J]. *Earthquake*, **34**(2): 65–73 (in Chinese).

吴微微, 杨建思, 苏金蓉, 杜文康, 高瑜, 郑钰, 田宝峰, 刘莎, 吴朋. 2014. 2013年吉林前郭—乾安震源区中强地震矩张量反演与区域孕震环境研究[J]. 地球物理学报, **57**(8): 2541–2554.

Wu W W, Yang J S, Su J R, Du W K, Gao Y, Zheng Y, Tian B F, Liu S, Wu P. 2014. Moment inversion of moderate earthquakes and seismogenic environment in Qianguo-Qian'an source region, 2013, Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(8): 2541–2554 (in Chinese).

谢祖军, 郑勇, 倪四道, 熊熊, 王行舟, 张炳. 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.

Xie Z J, Zheng Y, Ni S D, Xiong X, Wang X Z, Zhang B. 2012. Focal mechanism and focal depth of the 19 January 2011 Anqing earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(5): 1624–1634 (in Chinese).

赵翠萍, 陈章立, 郑斯华, 张智强. 2008. 伽师震源区中等强度地震矩张量反演及其应力场特征[J]. 地球物理学报, **51**(3): 782–792.

Zhao C P, Chen Z L, Zheng S H, Zhang Z Q. 2008. Moment inversion of moderate earthquakes and the locally perturbed stress field in the Jiashi source region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(3): 782–792 (in Chinese).

赵旭, Zacharie D, 黄志斌, 陈宏峰, 赵博. 2014. 基于W震相技术的全球强震($M_w \geq 6.5$)矩心矩张量自动反演系统评估[J]. 地震学报, **36**(5): 800–809.

Zhao X, Zacharie D, Huang Z B, Chen H F, Zhao B. 2014. Assessment of the automatic centroid moment tensor inversion system for global strong earthquakes ($M_w \geq 6.5$) based on the W-phase method[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(5): 800–809 (in Chinese).

郑秀芬, 欧阳飚, 张东宁, 姚志祥, 梁建宏, 郑洁. 2009. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑[J]. 地球物理学报, **52**(5): 1412–1417.

Zheng X F, Ouyang B, Zhang D N, Yao Z X, Liang J H, Zheng J. 2009. Technical system construction of Data Backup Centre for China Seismograph Network and the data support to researches on the Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(5): 1412–1417 (in Chinese).

Ben-Menahem A. 1995. A concise history of mainstream seismology: Origins, legacy, and perspectives[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **85**(4): 1202–1225.

Bernardi F, Braunmiller J, Kradolfer U, Giardini D. 2004. Automatic regional moment tensor inversion in the European-Mediterranean region[J]. *Geophys J Int*, **157**(2): 703–716.

Daniel S, Ammon C J, Jose M. 2003. Moment tensor solutions for small and moderate earthquakes in the Ibero-Maghreb region[J]. *Journal of Geophysical Research*, **108**(108): 101–112.

Dreger D S, Helmberger D V. 1993. Determination of source parameters at regional distances with three-component sparse network data[J]. *J Geophys Res*, **98**(B5): 8107–8125.

Fukuyama E, Ishida M, Dreger D S, Kawai H. 1998. Automated seismic moment tensor determination by using on-line broadband seismic waveforms[J]. *Zisin*, **51**(1): 149–156.

Fukuyama E, Dreger D S. 2000. Performance test of an automated moment tensor determination system for the future “Tokai” earthquake[J]. *Earth Planets Space*, **52**(6): 383–392.

Herrmann R B, Wang C Y. 1985. A comparison of synthetic seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**(1): 41–56.

Hou J M, Xu Z G. 2015. Focal mechanism solution statistics of seismic tsunami sources[J]. *Mar Sci Bull*, **17**(1): 40–49.

Ichinose G A, Anderson J G, Smith K D, Zeng Y H. 2003. Source parameters of eastern California and western Nevada earthquakes from regional moment tensor inversion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(1): 61–84.

Jost M L, Herrmann R B. 1989. A student's guide to and review of moment tensors[J]. *Seismol Res Lett*, **60**(2): 37–57.

Kawakatsu H. 1998. On the realtime monitoring of the long-period seismic wavefield[J]. *Bull Earthquake Res Inst Univ Tokyo*, **73**(3/4): 267–274.

Kubo A, Fukuyama E, Kawai H, Nonomura K. 2002. NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: Quality test and application[J]. *Tectonophysics*, **356**(1/2/3): 23–48.

Nábělek J, Xia G Y. 1995. Moment-tensor analysis using regional data: Application to the 25 March, 1993, Scotts Mills, Oregon, earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **22**(1): 13–16.

Pasyanos M E, Dreger D S, Romanowicz B. 1996. Toward real-time estimation of regional moment tensors[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(5): 1255–1269.

Randall G E, Ammon C J, Owens T J. 1995. Moment tensor estimation using regional seismograms from a Tibetan Plateau portable network deployment[J]. *Geophys Res Lett*, **22**(13): 1665–1668.

Romanowicz B, Dreger D, Pasyanos M, Uhrhammer R. 1993. Monitoring of strain release in central and northern California using broadband data[J]. *Geophys Res Lett*, **20**(15): 1643–1646.

Rueda J, Mezcua J. 2005. Near-real-time seismic moment-tensor determination in Spain[J]. *Seismol Res Lett*, **76**(4): 455–465.

Saikia C K. 1994. Modified frequency-wavenumber algorithm for regional seismograms using Filon's quadrature: Modeling of Lg waves in eastern North America[J]. *Geophys J Int*, **118**(1): 142–158.

Stich D, Ammon C J, Morales J. 2003. Moment tensor solutions for small and moderate earthquakes in the Ibero-Maghreb region[J]. *J Geophys Res*, **108**(B3): 2148.

Tajima F, Mégnin C, Dreger D S, Romanowicz B. 2002. Feasibility of real-time broadband waveform inversion for simultaneous moment tensor and centroid location determination[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(2): 739–750.

Wang C Y, Herrmann R B. 1980. A numerical study of P-, SV-, and SH-wave generation in a plane layered medium[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **70**(4): 1015–1036.

Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **84**(1): 91–104.

Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. *Bull Seismol Soc Am*, **86**(5): 1634–1641.