

许力生, 严川, 张旭等. 一种确定震源中心的方法: 逆时成像技术(二)——基于人工地震的检验. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4009-4027, doi: 10. 6038/cjg20131207.

Xu L S, Yan C, Zhang X, et al. A method for determination of earthquake hypocentroid: Time-reversal imaging technique——An examination based on people-made earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(12): 4009-4027, doi: 10. 6038/cjg20131207.

一种确定震源中心的方法: 逆时成像技术(二) ——基于人工地震的检验

许力生, 严 川, 张 旭, 李春来

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘 要 人工地震的激发时间和震源位置是已知的, 因此, 用人工地震观测资料检验地震定位技术是十分有效的技术途径. 为了检验逆时成像技术的实用性, 我们收集了 10 次人工地震的观测资料, 5 次气枪和 5 次化学爆破. 气枪记录台网的孔径 20 km 左右, 而化学爆破记录台网的孔径 200 km 左右. 首先, 通过测定值与真实值的比较, 从已有速度模型中筛选出两种较好的模型, 然后, 利用筛选出的两种模型分别对 10 次事件定位, 并通过测定值与真实值的比较以及测定值的不确定性分析挑选出最佳模型, 与此同时确定出最佳定位结果. 结果表明, 在现有最佳速度模型情况下, 气枪与化学爆炸的震中偏差均在 500 m 左右; 气枪震源深度的偏差在 100 m 左右, 而化学爆破震源深度的偏差在 200 m 左右; 化学爆破的激发时间的偏差在 0.06 s 左右, 而气枪的激发时间的偏差较大, 约在 0.4 s 左右, 这可能是由于局部水域的较低波速所致. 由此可见, 利用逆时成像技术能够在合理的准度和精度水平上确定发震时刻和震源位置, 甚至包括震源深度.

关键词 逆时成像技术, 人工地震, 定位检验

doi: 10. 6038/cjg20131207

中图分类号 P315

收稿日期 2013-07-02, 2013-08-30 收修定稿

A method for determination of earthquake hypocentroid: Time-reversal imaging technique ——An examination based on people-made earthquakes

XU Li-Sheng, YAN Chuan, ZHANG Xu, LI Chun-Lai

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract Origin times and locations of people-made earthquakes are known, so examining an earthquake-location technology using seismic recordings from the people-made earthquakes is one of the convincing ways. In order to examine the TRIT (Time Reversal Imaging Technique), we collect seismic recordings from 10 people-made earthquakes, 5 air-guns and 5 chemical explosions. The seismograph network for the air-guns is smaller, about 20 km across and the one for the chemical explosions is larger, about 200 km across. At first, two better velocity models were chosen out from the models available in literatures by comparing the measured values with the true ones. Then, the best one was decided further, while the final measured values for the 10 events were determined based on the two models, by comparing the measured values with the true ones, as well as the uncertainties of the measured values. The results show that, with the best velocity

model, the epicenter biases for both the air-guns and chemical explosions are around 500 m; the depth biases of the air-guns are around 100 m while those of the chemical ones are around 200 m; the origin time biases of the chemical ones are around 0.06 s, but those of the air-guns are larger, reaching about 0.4 s, which might be explained by the lower velocity of local water region. As a conclusion, origin times and hypocenters, including even focal depths, are able to be determined at reasonable accuracy and precision by the TRIT.

Keywords Time-reversal imaging technique, People-made earthquakes, Location examination

1 引言

通常情况下,人们利用标准定位方法确定震源的位置^[1-4].这种方法的优点在于,把地震定位问题线性化,可以方便快捷地利用最小二乘方法求解并构建解的置信边界;缺点是,当台站数较少、观测值中出现出格的数据或者地震事件在台网外围时,定位误差难以置信,置信边界也没有实际意义^[5-7].出现这种后果的重要原因是理想地假设具有大量的观测台站、观测误差呈正态分布且走时随震源位置线性变化.

当研究微震活动或微构造运动时,客观上对地震绝对定位的准确度(accuracy)和精确度(precision)要求更高,因此,非线性方法是必然的选择^[7-9].我们提出的逆时成像技术没有采用任何近似,同时,利用互相关技术测量到时,提升了测量的客观性和准确性;利用聚束能量作为目标函数,克服了最小二乘解对于少数或者个别出格数据敏感的缺点;利用非均匀网格搜索的方法确定非线性系统的解,可以利用解集的特征半径描述观测资料的分辨率或模糊度(ambiguity),进而利用观测到时的标准差和分辨率来描述解的不确定性,避免了标准定位方法中采用的统计方法^[10].

关于逆时成像技术的原理,我们已经利用位移表示定理做过阐述;关于这种技术的可行性,我们已经利用多种数值实验进行了论证^[10].在这里,我们利用这种技术处理 10 次震源参数已知的人工地震的真实资料,通过测定结果与真实值的比较,进一步检验它的实用性.

2 观测资料

为了进一步检验我们提出的新方法—逆时成像技术的实用性,我们特别向同事申请了在滇中南地区实施的 5 次气枪和 5 次爆破的波形资料.气枪和

爆破激发的位置和本研究所使用的台站如图 1 所示,记录气枪的台网孔径较小,约 20 km,而记录爆破的台网孔径较大,约 200 km.

2.1 气枪地震记录

为了在百公里尺度的区域内,实现深部介质物性与应力变化的高精度连续监测,以探索其与构造活动甚至强震孕育及发生的关系,中国地震局地球物理研究所在滇西地区建立了大容量气枪地震信号发射台与密集的地震台阵接收系统^[11],开展为期三年的实验研究.截止目前,此系统已经积累了很多次气枪的波形数据.我们得到的数据只是其中的 5 次事件的记录,采样率均为 100sps.气枪激发的时间和位置列于表 1.

表 1 5 次气枪激发的时间和位置

Table 1 Origin times and locations of the 5 air-guns

编号	日期	时间	$\varphi/(^{\circ}\text{N})$	$\lambda/(^{\circ}\text{E})$	h/km
Q1	2012-11-02	10:9:59.56	25.8092	100.5010	0
Q2	2012-11-02	10:14:22.55	25.8092	100.5010	0
Q3	2012-11-02	11:9:59.56	25.8092	100.5010	0
Q4	2012-11-02	12:9:59.56	25.8092	100.5010	0
Q5	2012-11-02	13:9:59.56	25.8092	100.5010	0

2.2 化学爆破记录

南北地震带南段地形地貌复杂,地壳厚度变化剧烈.小江断裂带是强震和中强震集中发生的深大断裂之一,其南段与曲江断裂和红河断裂相互交汇,构成一特殊而复杂的构造格局.为了调查上述断层的几何特征和深部形态,研究强震发生的构造背景,中国地震局地球物理研究所在小江断裂、曲江断裂和红河断裂的交汇地带实施了高密度地震观测,在 150 km \times 150 km 的范围内布设了 200 余台数字地震仪,构成四边形台阵,并在台阵的周边和内部进行了 6 次大当量的爆破.与此同时,为了获取深部二维地壳精细结构、探测滇南中部强震孕育的深部构造背景,中国地震局地球物理勘探中心实施了沿泸西—永德的人工地震折射/广角反射探测计划.我们

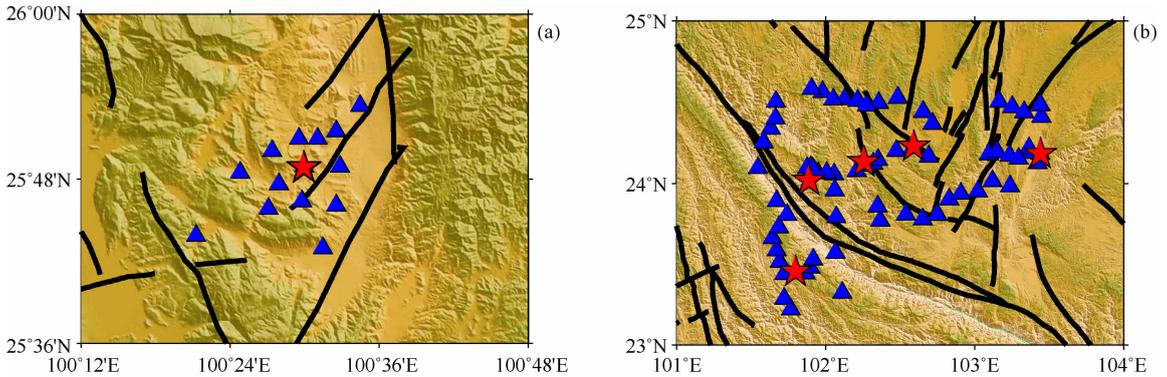


图 1 5 次气枪(a)和 5 次人工爆破(b)的震中(五角星)和台站(三角形)分布

Fig. 1 Distribution of recording stations (triangles) and 5 air-guns (a) as well as 5 chemical explosions (b)

得到的数据也只是其中 5 次的波形记录,其采样率均为 200sps. 爆破的具体时间和位置列于表 2.

表 2 5 次化学爆破激发的时间和位置

Table 2 Origin times and locations of the 5 chemical explosions

编号	日期	时间	$\varphi/(^{\circ}\text{N})$	$\lambda/(^{\circ}\text{E})$	h/km
B1	2012-12-20	1:10:14.58	23.46200	101.7967	0.060
B2	2012-12-20	2:0:17.50	24.18741	103.4313	0.063
B3	2012-12-26	0:0:17.98	24.23475	102.5974	*
B4	2012-12-26	0:10:13.71	24.01909	101.8801	0.070
B5	2012-12-31	5:10:14.85	24.13157	102.2576	*

注: * 无数据.

3 速度模型

已经有不少人研究过川滇地区的 P 波速度结构,我们从现有文献中查阅到其中 5 种结果^[12-17],另外,还有 IASPEI91 模型和 CRUST2.0 模型.如图 2 所示,这些模型之间存在着明显的差别,这可能与资料和方法有关.朱碚定等^[12]利用川南、滇北的短周期地震仪的深源远震波形作为观测资料,通过合成地震图技术为当地地壳中下部速度结构得到两种模型,一种包含了低速夹层(M1),另一种没有低速夹层(M2)^[12];熊绍柏等 1986 年利用 1984 年攀西地区南部爆炸地震折射剖面资料为这一地区构建了速度模型^[13],1993 年再次利用同样的资料,但重新拾取震相,结合合成地震图技术为当地重构了速度模型(M3)^[14].王椿镛等利用 174 个地震台记录到的 4625 次地方和区域地震的 P 波和 S 波到时为我国西南地区地壳和上地幔建立了三维速度结构,并由此提取了这一地区的水平分层速度模型(M4)^[15-16];白志明和王椿镛 2004 年通过有限差分射线反演

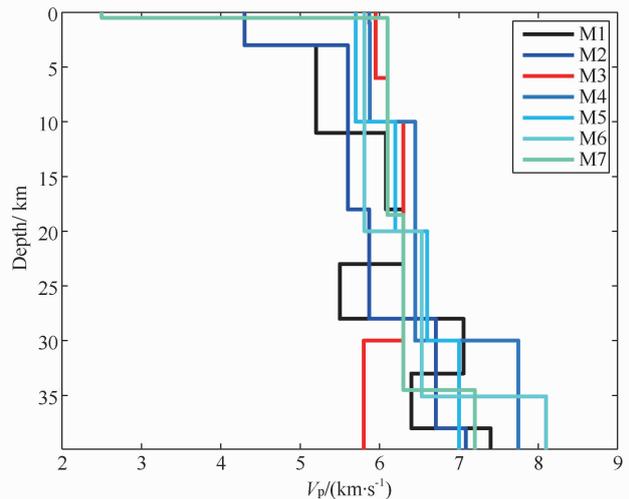


图 2 川滇地区的 P 波速度模型

M1 和 M2 来自朱碚定等^[12],M3 来自熊绍柏等^[13-14],M4 来自王椿镛等^[15]和 Wang 等^[16],M5 来自白志明和王椿镛^[17],M6 来自 IASPEI91 模型,M7 来自 CRUST2.0(具体数据见附录).

Fig. 2 P-velocity models of the Chuan-Dian area

M1 and M2 are from Zhu et al.^[12], M3, from Xiong et al.^[13-14], M4, from Wang et al.^[15] and Wang et al.^[16], M5, from Bai and Wang^[17], M6, from IASPEI91, M7, from CRUST2.0 (see appendix for numerical values).

方法,利用地震走时、振幅比和重力布格异常数据对云南地区遮放—宾川和孟连—马龙宽角地震剖面的地壳上地幔结构进行层析成像研究,得到了当地的速度模型(M5)^[17].

面对这些彼此之间存在差异的模型,我们不知道哪个更贴近实际.所以,我们只能首先利用相同的资料 and 不同的速度模型进行实验,然后通过分析测定值相对于真实值的偏差,确定最佳速度模型.为了同时兼顾各种速度模型,我们仅使用了垂直向记录,且信号窗长取为 1.25 s(窗长越短,对模型的要求越高).

表 3 至表 7 展示了利用相同的观测数据、基于 7 种不同的速度模型测定的 5 次气枪的激发时间和震源位置(纬度、经度和深度)及其不确定性. 类似地, 表 8 至表 12 展示了测定的 5 次爆破的激发时间和震源位置(纬度、经度和深度)及其不确定性. 可以看出, 尽管观测资料相同, 但速度模型不同, 则定位结果明显不同. 尤其是震源深度, 比如, 5 次气枪的震源深度测量值小到 0.118 km, 大到 3.659 km; 又如, 5 次爆破的震源深度测量值, 小到 0.094 km, 大到 11.555 km. 显然, 有些速度模型与实际速度结构相差甚远. 为了选择一个较贴近实际的速度模型, 我们分别计算了 5 次气枪和 5 次爆破的测量值与实际值的偏差, 并展示于图 3 和图 4. 首先关注震源位置的偏差, 因为激发时间的测定值依赖于震源位置. 不难看出, 模型 M1 和 M2 对应结果的偏差异乎寻常, 由此断定这两个模型与实际结构相差甚远. 另外, M7 也较差, 而其他模型似乎都比较接近实际. 为了优中选优, 我们还分别计算了气枪测量值和爆破测量值的偏差的平均值, 并展示于图 5. 从偏差的平均值不难看出, 模型 M3 和 M4 比较接近, 二者都相当好, 而 M6 也是不错的选择.

4 定位结果

由上面的分析可以看出, 模型 M3 和 M4 对应的偏差非常接近, 而模型 M6 似乎也相当好. 但是, 考虑到 M6 模型来自全球模型, 而 M3 和 M4 模型均为地方模型, 所以, 下面仅分析和讨论基于 M3 和 M4 模型的定位结果. 为了进一步提高定位精度, 信号窗长缩减到 1.0 s, 且对于气枪, 除垂直向记录外, 我们还选用了其他分向质量好的记录.

4.1 基于 M3 模型的定位

表 13 和表 14 分别给出了基于模型 M3 测定的 5 次气枪和 5 次爆破的激发时间、震中位置(纬度和经度)和震源深度及其不确定性. 为了比较测定值与真实值的差异, 我们分别计算了发震时刻、震中、震源深度以及震源位置的偏差, 并展示于图 6 中. 5 次气枪激发时间的最大、最小和平均偏差分别为 0.50、0.42 和 0.45 s, 震中位置的最大、最小和平均偏差分别为 0.54、0.28 和 0.41 km, 震源深度的最大、最小和平均偏差分别为 0.11、0.06 和 0.09 km, 震源位置的最大、最小和平均偏差分别为 0.55、0.29 和

表 3 利用相同的观测资料但不同的速度模型确定的事件 Q1 的震源参数及其不确定性

Table 3 Hypocentroid parameters of the Q1 and their uncertainties determined using the same data but various models

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	M	N
2012-11-02	10:9:59.5719	± 0.088	25.80832	± 0.00267	100.49759	± 0.00326	1.312	± 1.143	M1	10
2012-11-02	10:9:59.5711	± 0.088	25.80831	± 0.00301	100.49758	± 0.00361	1.316	± 1.158	M2	10
2012-11-02	10:9:59.9227	± 0.113	25.81044	± 0.00665	100.49777	± 0.00768	0.157	± 1.197	M3	10
2012-11-02	10:9:59.9098	± 0.110	25.81031	± 0.00641	100.49777	± 0.00685	0.162	± 1.090	M4	10
2012-11-02	10:9:59.8908	± 0.106	25.81001	± 0.00599	100.49777	± 0.00676	0.166	± 1.341	M5	10
2012-11-02	10:9:59.8993	± 0.108	25.81019	± 0.00623	100.49775	± 0.00737	0.165	± 1.077	M6	10
2012-11-02	10:9:59.7532	± 0.120	25.81064	± 0.00727	100.49783	± 0.00828	0.630	± 0.695	M7	10

注: M—模型, N—台站数目. 下同.

表 4 利用相同的观测资料但不同的速度模型确定的事件 Q2 的震源参数及其不确定性

Table 4 Hypocentroid parameters of the Q2 and their uncertainties determined using the same data but various models

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	M	N
2012-11-02	10:14:22.619	± 0.076	25.80843	± 0.00244	100.49805	± 0.00332	0.920	± 1.199	M1	11
2012-11-02	10:14:22.6184	± 0.076	25.80844	± 0.00212	100.49805	± 0.00281	0.934	± 1.183	M2	11
2012-11-02	10:14:22.9559	± 0.113	25.81060	± 0.00666	100.49782	± 0.00737	0.128	± 0.995	M3	11
2012-11-02	10:14:22.945	± 0.110	25.81060	± 0.00639	100.49777	± 0.00661	0.118	± 0.958	M4	11
2012-11-02	10:14:22.9159	± 0.103	25.81029	± 0.00578	100.49779	± 0.00574	0.150	± 0.829	M5	11
2012-11-02	10:14:22.9335	± 0.107	25.81041	± 0.00617	100.49781	± 0.00698	0.138	± 0.816	M6	11
2012-11-02	10:14:22.7866	± 0.119	25.81084	± 0.00724	100.49784	± 0.00699	0.617	± 0.732	M7	11

表 5 利用相同的观测资料但不同的速度模型确定的事件 Q3 的震源参数及其不确定性

Table 5 Hypocentroid parameters of the Q3 and their uncertainties determined using the same data but various models

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	M	N
2012-11-02	11:9:59.47	± 0.157	25.80573	± 0.00324	100.49537	± 0.00430	1.169	± 2.134	M1	12
2012-11-02	11:9:59.4576	± 0.157	25.80574	± 0.00266	100.49534	± 0.00367	1.217	± 2.059	M2	12
2012-11-02	11:9:59.942	± 0.128	25.80986	± 0.00754	100.49765	± 0.00745	0.148	± 1.214	M3	12
2012-11-02	11:9:59.9275	± 0.123	25.80969	± 0.00717	100.49751	± 0.00773	0.140	± 1.218	M4	12
2012-11-02	11:9:59.9029	± 0.114	25.80919	± 0.00642	100.49730	± 0.00761	0.159	± 1.288	M5	12
2012-11-02	11:9:59.9247	± 0.120	25.80947	± 0.00690	100.49744	± 0.00815	0.150	± 1.111	M6	12
2012-11-02	11:9:59.7775	± 0.137	25.81026	± 0.00829	100.49791	± 0.00922	0.615	± 0.843	M7	12

表 6 利用相同的观测资料但不同的速度模型确定的事件 Q4 的震源参数及其不确定性

Table 6 Hypocentroid parameters of the Q4 and their uncertainties determined using the same data but various models

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	M	N
2012-11-02	12:9:59.5474	± 0.099	25.80762	± 0.00198	100.49697	± 0.00251	1.182	± 1.275	M1	12
2012-11-02	12:9:59.5478	± 0.099	25.80762	± 0.00198	100.49699	± 0.00243	1.179	± 1.278	M2	12
2012-11-02	12:9:59.9334	± 0.110	25.81031	± 0.00656	100.49677	± 0.00748	0.147	± 0.931	M3	12
2012-11-02	12:9:59.9202	± 0.107	25.81017	± 0.00628	100.49676	± 0.00650	0.154	± 0.905	M4	12
2012-11-02	12:9:59.9003	± 0.100	25.80985	± 0.00569	100.49674	± 0.00629	0.177	± 0.957	M5	12
2012-11-02	12:9:59.9094	± 0.104	25.81002	± 0.00607	100.49680	± 0.00736	0.147	± 0.970	M6	12
2012-11-02	12:9:59.7735	± 0.117	25.81055	± 0.00717	100.49670	± 0.00678	0.675	± 0.752	M7	12

表 7 利用相同的观测资料但不同的速度模型确定的事件 Q5 的震源参数及其不确定性

Table 7 Hypocentroid parameters of the Q5 and their uncertainties determined using the same data but various models

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	M	N
2012-11-02	13:9:59.4108	± 0.107	25.80878	± 0.00267	100.49656	± 0.00259	3.659	± 1.066	M1	11
2012-11-02	13:9:59.4753	± 0.091	25.80973	± 0.00463	100.49675	± 0.00466	3.417	± 1.328	M2	11
2012-11-02	13:9:59.9951	± 0.090	25.81074	± 0.00454	100.49689	± 0.00441	0.627	± 2.114	M3	11
2012-11-02	13:9:59.979	± 0.089	25.81052	± 0.00410	100.49686	± 0.00404	0.678	± 2.052	M4	11
2012-11-02	13:9:59.9434	± 0.090	25.81005	± 0.00269	100.49684	± 0.00291	0.805	± 1.679	M5	11
2012-11-02	13:9:59.9677	± 0.088	25.81036	± 0.00336	100.49688	± 0.00345	0.685	± 1.873	M6	11
2012-11-02	13:9:59.8396	± 0.093	25.81117	± 0.00574	100.49697	± 0.00585	1.114	± 2.202	M7	11

表 8 利用相同的观测资料但不同的速度模型确定的事件 B1 的震源参数及其不确定性

Table 8 Hypocentroid parameters of the B1 and their uncertainties determined using the same data but various models

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	M	N
2011-12-20	1:10:13.4834	± 0.391	23.46331	± 0.02163	101.79786	± 0.03037	11.036	± 0.683	M1	17
2011-12-20	1:10:13.9204	± 0.261	23.47686	± 0.01326	101.80337	± 0.01949	3.114	± 0.786	M2	17
2011-12-20	1:10:14.6819	± 0.190	23.46338	± 0.01030	101.79790	± 0.00792	0.137	± 0.999	M3	17
2011-12-20	1:10:14.6377	± 0.191	23.46663	± 0.01022	101.79857	± 0.01030	0.174	± 1.526	M4	17
2011-12-20	1:10:14.4966	± 0.221	23.47286	± 0.01146	101.80112	± 0.01375	0.228	± 2.600	M5	17
2011-12-20	1:10:14.5943	± 0.197	23.46902	± 0.01043	101.79934	± 0.01030	0.208	± 1.796	M6	17
2011-12-20	1:10:14.5476	± 0.210	23.45852	± 0.01160	101.79761	± 0.01260	0.560	± 0.615	M7	17

表 9 利用相同的观测资料但不同的速度模型确定的事件 B2 的震源参数及其不确定性

Table 9 Hypocentroid parameters of the B2 and their uncertainties determined using the same data but various models

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	M	N
2011-12-20	2:0:16.3234	± 0.181	24.18722	± 0.00670	103.44181	± 0.00934	6.099	± 1.981	M1	15
2011-12-20	2:0:16.7888	± 0.102	24.18655	± 0.00369	103.43943	± 0.00564	3.077	± 0.263	M2	15
2011-12-20	2:0:17.4911	± 0.116	24.18372	± 0.00427	103.43884	± 0.00678	0.094	± 0.459	M3	15
2011-12-20	2:0:17.4497	± 0.098	24.18425	± 0.00380	103.43860	± 0.00569	0.107	± 0.335	M4	15
2011-12-20	2:0:17.3505	± 0.085	24.18595	± 0.00276	103.43777	± 0.00475	0.308	± 0.591	M5	15
2011-12-20	2:0:17.4147	± 0.089	24.18472	± 0.00347	103.43844	± 0.00512	0.154	± 0.479	M6	15
2011-12-20	2:0:17.369	± 0.156	24.18300	± 0.00637	103.43944	± 0.00938	0.580	± 0.371	M7	15

表 10 利用相同的观测资料但不同的速度模型确定的事件 B3 的震源参数及其不确定性

Table 10 Hypocentroid parameters of the B3 and their uncertainties determined using the same data but various models

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	M	N
2011-12-26	0:0:17.2755	± 0.438	24.24626	± 0.02150	102.59555	± 0.02895	11.555	± 7.842	M1	18
2011-12-26	0:0:17.4399	± 0.244	24.23784	± 0.01378	102.59610	± 0.01470	3.451	± 0.466	M2	18
2011-12-26	0:0:18.2159	± 0.265	24.24187	± 0.01523	102.59675	± 0.01701	0.254	± 3.090	M3	18
2011-12-26	0:0:18.1515	± 0.249	24.24028	± 0.01356	102.59655	± 0.01573	0.221	± 2.242	M4	18
2011-12-26	0:0:18.0049	± 0.232	24.23770	± 0.01193	102.59573	± 0.01421	0.193	± 1.819	M5	18
2011-12-26	0:0:18.0962	± 0.240	24.23937	± 0.01175	102.59624	± 0.01502	0.196	± 2.375	M6	18
2011-12-26	0:0:18.3335	± 0.416	24.24788	± 0.01227	102.59541	± 0.00973	5.865	± 14.134	M7	18

表 11 利用相同的观测资料但不同的速度模型确定的事件 B4 的震源参数及其不确定性

Table 11 Hypocentroid parameters of the B4 and their uncertainties determined using the same data but various models

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	M	N
2011-12-26	0:10:11.9432	± 0.290	24.01401	± 0.02034	101.87843	± 0.02861	10.947	± 0.905	M1	24
2011-12-26	0:10:12.8648	± 0.140	24.01542	± 0.00286	101.87976	± 0.00406	6.875	± 1.384	M2	24
2011-12-26	0:10:13.8335	± 0.150	24.01985	± 0.00810	101.88302	± 0.01167	0.444	± 2.623	M3	24
2011-12-26	0:10:13.7551	± 0.121	24.01821	± 0.00646	101.88185	± 0.01014	0.448	± 2.006	M4	24
2011-12-26	0:10:13.5216	± 0.127	24.01539	± 0.00262	101.87956	± 0.00346	1.895	± 2.265	M5	24
2011-12-26	0:10:13.6809	± 0.109	24.01706	± 0.00577	101.88099	± 0.00867	0.732	± 2.940	M6	24
2011-12-26	0:10:13.7675	± 0.221	24.02342	± 0.01233	101.88508	± 0.01814	0.827	± 3.275	M7	24

表 12 利用相同的观测资料但不同的速度模型确定的事件 B5 的震源参数及其不确定性

Table 12 Hypocentroid parameters of the B5 and their uncertainties determined using the same data but various models

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	M	N
2011-12-31	5:10:13.3767	± 0.252	24.14540	± 0.01130	102.25718	± 0.01319	8.841	± 3.211	M1	15
2011-12-31	5:10:14.1523	± 0.157	24.14254	± 0.00816	102.25638	± 0.00871	4.102	± 3.753	M2	15
2011-12-31	5:10:14.9711	± 0.163	24.13518	± 0.01005	102.25946	± 0.00961	0.337	± 2.411	M3	15
2011-12-31	5:10:14.9041	± 0.147	24.13687	± 0.00732	102.25880	± 0.00854	0.391	± 1.970	M4	15
2011-12-31	5:10:14.7273	± 0.140	24.14058	± 0.00724	102.25726	± 0.00793	0.862	± 3.955	M5	15
2011-12-31	5:10:14.8447	± 0.139	24.13819	± 0.00752	102.25829	± 0.00801	0.481	± 2.647	M6	15
2011-12-31	5:10:14.8799	± 0.209	24.13231	± 0.01112	102.26046	± 0.01261	0.792	± 2.155	M7	15

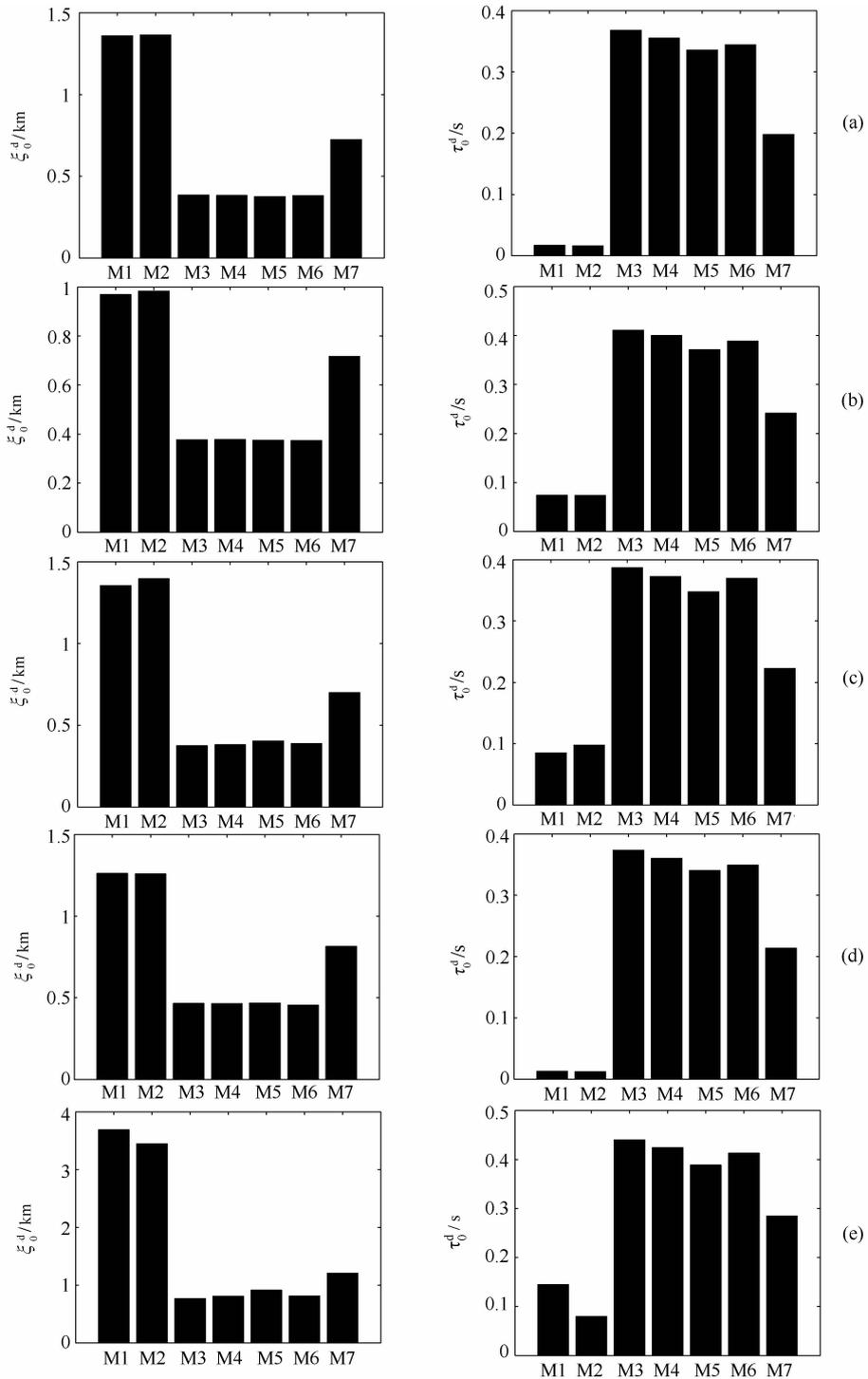


图3 基于7种不同的速度模型测定的5次气枪震源位置和激发时间与真实值的比较
 (a),(b),(c),(d)和(e)分别对应于事件Q1,Q2,Q3,Q4和Q5.在每个子图中,
 左边为震源位置的偏差,右边为激发时间的偏差.

Fig. 3 Comparison of the true values with the measured ones of the hypocentroid locations and origin times of the 5 air-guns based on the 7 various velocity models
 (a),(b),(c),(d) and (e) corresponds to Q1,Q2,Q3,Q4 and Q5, respectively. In each subplot, the left shows the biases of hypocentroid locations, and the right, the biases of origin times.

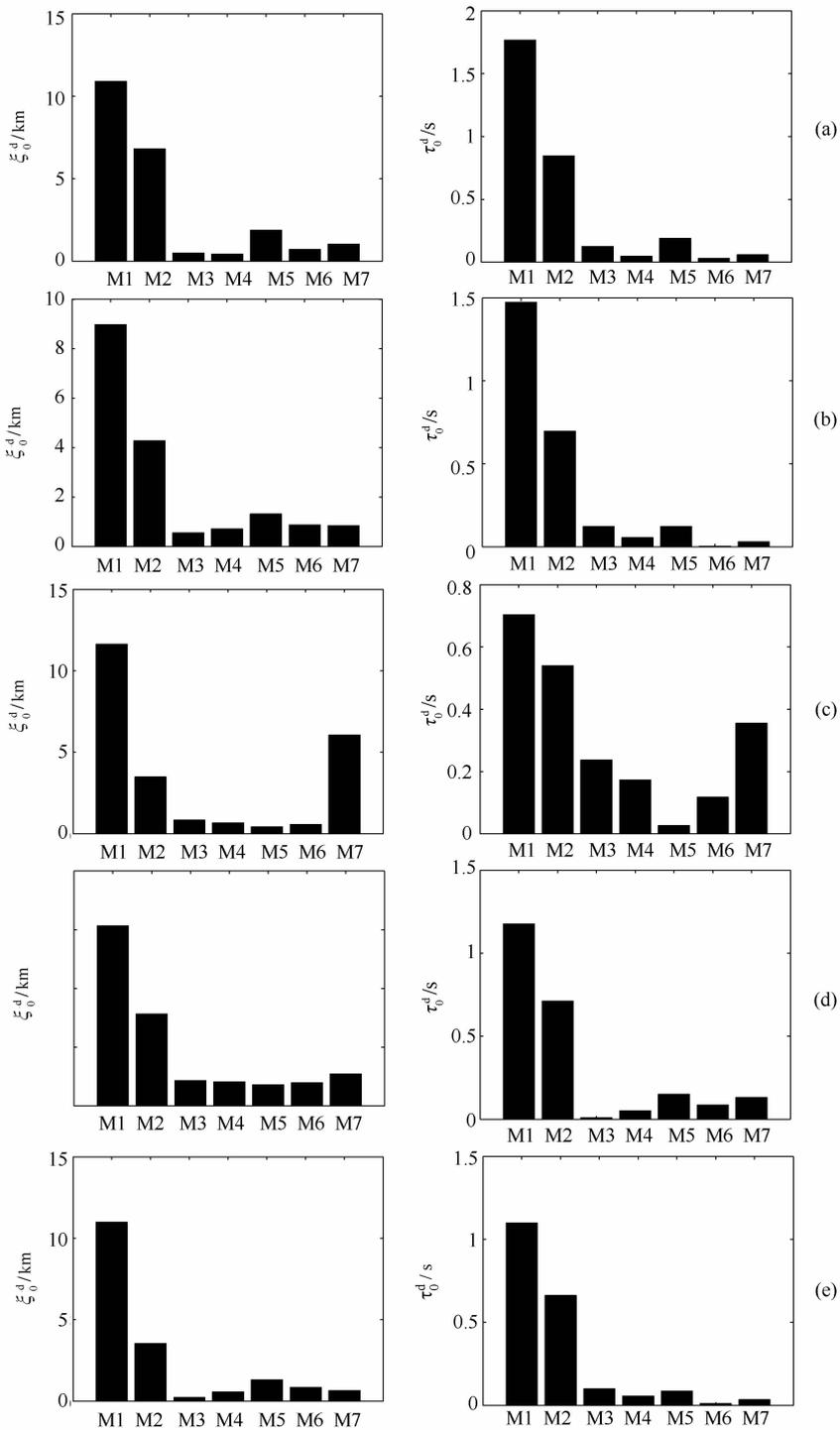


图 4 基于 7 种不同的速度模型测定的 5 次爆破震源位置和激发时间与真实值的比较

(a), (b), (c), (d) 和 (e) 分别对应于事件 B1, B2, B3, B4 和 B5。其他说明同图 3。

Fig. 4 Comparison of the true values with the measured ones of the hypocentroid locations and origin times of the 5 chemical explosions based on the 7 various velocity models

(a), (b), (c), (d) and (e) corresponds to B1, B2, B3, B4 and B5, respectively. The others are the same as in Fig. 3.

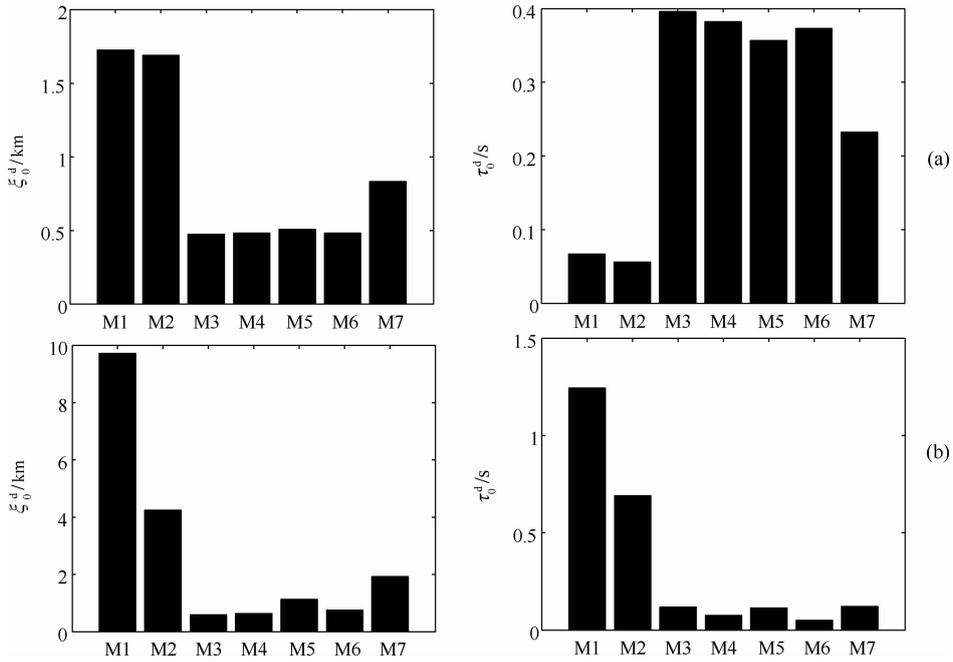


图 5 基于 7 种不同的速度模型测定的 5 次气枪和 5 次爆破的震源位置和激发时间相对于真实值的偏差的平均值的比较 (a)和(b)分别对应于气枪事件和爆破事件.其他说明同图 3.

Fig. 5 Comparison of the average bias of the hypocentroid locations and origin times of the 5 air-guns and the 5 chemical explosions based on the 7 various velocity models (a) is for the air-guns and (b), for the chemical explosions. The others are the same as in Fig. 3.

表 13 基于 M3 模型确定的 5 次气枪的激发时间和位置及其不确定性

Table 13 Hypocentroid parameters of the 5 air-guns and their uncertainties determined based on the model M3

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	N
2012-11-02	10:9:59.9766	± 0.116	25.81217	± 0.00686	100.49840	± 0.00653	0.088	± 0.795	21
2012-11-02	10:14:22.9896	± 0.136	25.81130	± 0.00793	100.49952	± 0.00792	0.103	± 0.916	25
2012-11-02	11:10:0.0540	± 0.118	25.81362	± 0.00700	100.49878	± 0.00577	0.057	± 0.749	25
2012-11-02	12:9:59.9794	± 0.123	25.81143	± 0.00721	100.49916	± 0.00647	0.108	± 0.848	28
2012-11-02	13:10:0.0299	± 0.097	25.81349	± 0.00574	100.49856	± 0.00507	0.110	± 0.668	28

表 14 基于 M3 模型确定的 5 次化学爆破的激发时间和位置及其不确定性

Table 14 Hypocentroid parameters of the 5 chemical explosions and their uncertainties determined based on the model M3

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	N
2011-12-20	1:10:14.6753	± 0.184	23.46248	± 0.00995	101.79787	± 0.00774	0.133	± 0.920	17
2011-12-20	2:0:17.489	± 0.112	24.18388	± 0.00475	103.43925	± 0.00658	0.114	± 0.545	15
2011-12-26	0:0:18.2072	± 0.269	24.24211	± 0.01608	102.59686	± 0.01730	0.254	± 3.303	18
2011-12-26	0:10:13.8354	± 0.156	24.02016	± 0.00841	101.88240	± 0.01319	0.418	± 2.950	24
2011-12-31	5:10:14.973	± 0.155	24.13484	± 0.00834	102.26086	± 0.00915	0.348	± 2.022	15

0.43 km. 5 次爆破激发时间的最大、最小和平均偏差分别为 0.23、0.01 和 0.12 s,震中位置的最大、最小和平均偏差分别为 0.90、0.13 和 0.52 km,震源深度的最大、最小和平均偏差分别为 0.35、0.05 和 0.21 km,震源位置的最大、最小和平均偏差分别为 0.90、0.15 和 0.59 km.

4.2 基于 M4 模型的定位结果

表 15 和表 16 给出了基于模型 M4 测定的 5 次气枪和 5 次爆破的激发时间、震中位置(纬度和经度)和震源深度及其不确定性.测定值与真实值的差异展示于图 7 中.5 次气枪激发时间的最大、最小和平均偏差分别为 0.50、0.41 和 0.44 s,震中位置的最

表 15 基于 M4 模型确定的 5 次气枪的激发时间和位置及其不确定性

Table 15 Hypocentroid parameters of the 5 air-guns and their uncertainties determined based on the model M4

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	N
2012-11-02	10:9:59.9633	± 0.114	25.81197	± 0.00664	100.49844	± 0.00594	0.098	± 0.816	21
2012-11-02	10:14:22.9770	± 0.132	25.81111	± 0.00761	100.49967	± 0.00836	0.110	± 1.042	25
2012-11-02	11:10:0.0503	± 0.116	25.81337	± 0.00678	100.49884	± 0.00614	0.066	± 0.828	25
2012-11-02	12:9:59.9749	± 0.120	25.81118	± 0.00693	100.49917	± 0.00668	0.104	± 0.844	28
2012-11-02	13:10:0.0163	± 0.096	25.81329	± 0.00560	100.49854	± 0.00525	0.122	± 0.705	28

表 16 基于 M4 模型确定的 5 次化学爆破的激发时间和位置及其不确定性

Table 16 Hypocentroid parameters of the 5 chemical explosions and their uncertainties determined based on the model M4

日期	时间	$\Delta t/s$	$\varphi/(^{\circ}N)$	$\Delta\varphi/(^{\circ}N)$	$\lambda/(^{\circ}E)$	$\Delta\lambda/(^{\circ}E)$	H/km	$\Delta H/km$	N
2011-12-20	1:10:14.6361	± 0.182	23.46576	± 0.00972	101.79848	± 0.01067	0.158	± 1.295	17
2011-12-20	2:0:17.4468	± 0.095	24.18442	± 0.00361	103.43905	± 0.00550	0.132	± 0.416	15
2011-12-26	0:0:18.1468	± 0.254	24.24047	± 0.01315	102.59676	± 0.01607	0.220	± 2.746	18
2011-12-26	0:10:13.7569	± 0.128	24.01852	± 0.00680	101.88121	± 0.00966	0.436	± 1.794	24
2011-12-31	5:10:14.9051	± 0.139	24.13650	± 0.00802	102.26024	± 0.00807	0.389	± 1.976	15

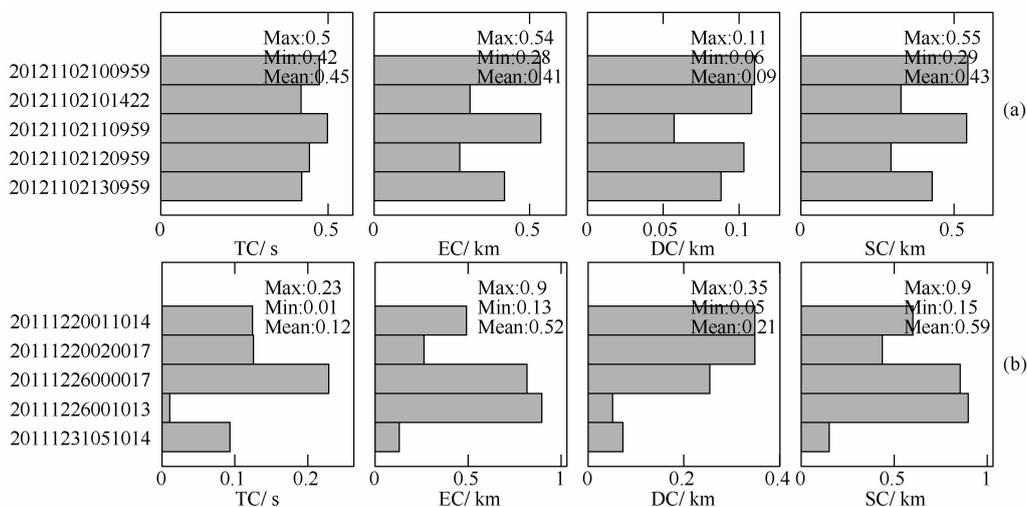


图 6 基于 M3 模型测定的 5 次气枪(a)和 5 次爆破(b)的激发时间和位置与真实值的比较

在每个子图中,从左向右依次为激发时刻的差异(TC)、震中位置的差异(EC)、震源深度的差异(DC)和震源位置的差异(SC).

Fig. 6 Comparison of the true values with the measured ones determined based on the model M3

(a) is for 5 air-guns and (b), for 5 chemical explosions. In each subplot, the changes of the origin times (TC), epicenters (EC), depths (DC) and source locations (SC) are shown from left to right, respectively.

大、最小和平均偏差分别为 0.52、0.25 和 0.39 km,震源深度的最大、最小和平均偏差分别为 0.12、0.07 和 0.10 km,震源位置的最大、最小和平均偏差分别为 0.53、0.27 和 0.41 km. 5 次爆破激发时间的最大、最小和平均偏差分别为 0.17、0.05 和 0.08 s,震中位置的最大、最小和平均偏差分别为 0.85、0.13 和 0.54 km,震源深度的最大、最小和平均偏差分别为 0.39、0.07 和 0.23 km,震源位置的最大、最小和平均偏差分别为 0.86、0.39 和 0.62 km.

4.3 定位结果比较

基于 M3 模型,气枪和爆破的激发时间的平均偏差分别为 0.45 和 0.12 s,而基于 M4 模型,气枪和爆破的平均偏差分别为 0.44 和 0.08 s. 基于 M3 模型,气枪和爆破的震中位置的平均偏差分别为 0.41 和 0.52 km,而基于 M4 模型,气枪和爆破的平均偏差分别为 0.39 和 0.54 km. 基于 M3 模型,气枪和爆破的震源深度的平均偏差分别为 0.09 和 0.21 km,而基于 M4 模型,气枪和爆破的平均偏差

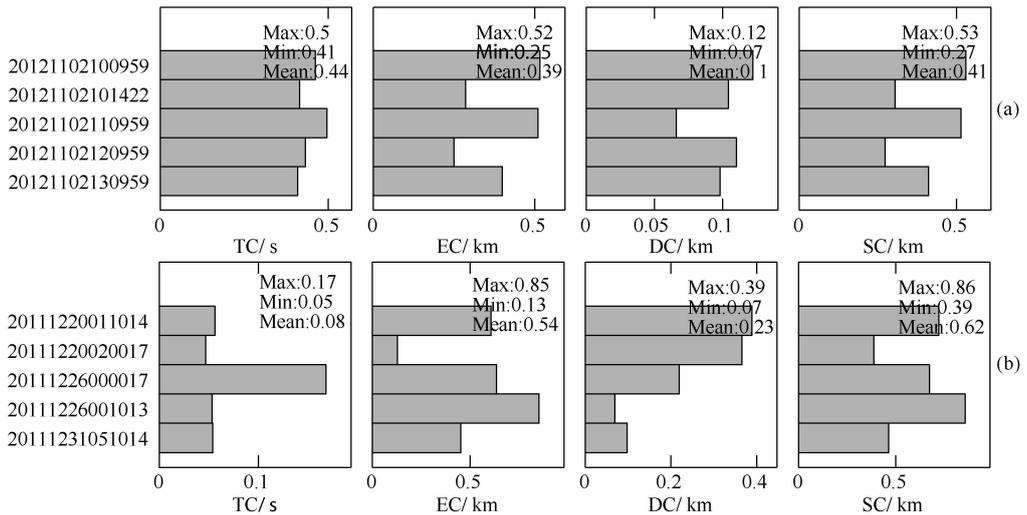


图7 基于M4模型测定的5次气枪(a)和5次爆破(b)的激发时间和位置与真实值的比较.其他说明同图6.

Fig. 7 Comparison of the true values with the measured ones determined based on the model M3.

(a) is for 5 air-guns and (b), for 5 chemical explosions. The others are the same as in Fig. 6.

分别为0.10和0.23 km.基于M3模型,气枪和爆破的震源位置的平均偏差分别为0.43和0.59 km,而基于M4模型,气枪和爆破的平均偏差分别为0.41和0.62 km.总体看起来,无论是气枪还是爆破,模型不同引起的激发时间的差别出现在百分之一秒的量级上,震中位置、震源深度和震源位置的差别出现在十米的量级上,因此,如前所述,模型M3和M4都是较好的模型.但是,考虑到用于气枪定位的台网的孔径较小,而爆破台网的孔径较大,所以,我们认为M4模型更好.

考虑模型M3和M4情况下定位参数的不确定性.在M3情况下,气枪的激发时间、震中纬度、震中经度和震源深度的不确定性平均值为0.118 s、0.0069°、0.0064°和0.07952 km,爆破的不确定性平均值为0.1752 s、0.0095°、0.0108°和1.948 km.在M4情况下,气枪的激发时间、震中纬度、震中经度和震源深度的不确定性平均值为0.1156 s、0.0067°、0.0065°和0.8670 km,爆破的不确定性平均值为0.1596 s、0.0083°、0.0100°和1.6454 km.比较发现,仅M3情况下气枪震中经度的不确定性0.0064°和震源深度的不确定性0.07952 km略小于M4情况下的不确定性0.0065°和0.8670 km,而其他参数的不确定性都是M4小于M3.因此,从测定参数的不确定性判断,M4也好于M3.与前面的认识一致.

5 讨论与结论

逆时成像技术的优点在于消除非线性问题线性

化引起的误差、提升观测到时的客观性和准确性以及克服个别出格数据对解的稳定性的影响,但是,对于速度模型的影响无能为力^[10].这就是为什么反复强调切合实际的速度模型对定位结果的重要性的原因,也是我们在这项研究中选用多个模型进行尝试的原因.事实再次说明,定位结果对速度模型有很强的依赖性.

通过基于实际观测资料的定位结果与真实值的比较,以及定位结果的不确定性比较分析,我们认为M3和M4模型都是研究区相当切合实际的模型,但M4更好.所以,我们有理由把基于模型M4测定的结果作为对5次气枪和5次爆破的最终定位结果.需要说明的是,在挑选模型时,无论是气枪还是爆炸,我们只使用了质量好的垂直向记录,且使用的时间窗较大,目的是为了兼顾各种速度模型.但是,在利用较好的M3和M4模型定位时,对于气枪,我们不但使用了垂直向记录,也增加了质量好的其他分向的记录,对于爆炸,我们仍然只使用了仅有的垂直向记录.不过,由于模型的改善,所以,我们使用的信号窗长缩小了.这样做的地目的是进一步提高定位准确度和精度.无论是分向的增加或是时间窗长的变化都意味着定位信息的变化,这就是为什么在挑选模型时基于M3和M4的结果有别于特别定位时得到的结果的原因.

从定位结果可以发现一个特殊的现象,即气枪激发时间的测定值偏离真实值较大(偏离平均值为0.44 s),而且测定的激发时刻总是晚于真实的激发时刻.关于这个问题,我们与有关专家讨论认为,可

能是地震波在水域传播一定距离所致. 因为, 地震波在水中的速度远小于在岩石中传播的速度. 当然, 准确合理的解释还有待有关专家的定量计算和分析. 而爆破激发时间的测定值偏离就十分合理, 测定值相对于真实值或早或晚, 且偏离值也不大 (偏离平均值仅为 0.08 s).

定位结果的不确定性依赖于方程系统、速度模型和观测资料, 而这里的观测资料不但指观测到时的质量也指台站的分布状况. 对于逆时成像技术, 由于不存在线性近似的问题, 所以, 方程系统对不确定性不造成影响; 由于利用互相关技术确定观测到时, 所以, 到时数据的质量引起的不确定性很小. 解的不确定性主要来源于实际速度结构的各向异性 and 观测台站的不完善. 到时残差的或大或小与或正或负反映了介质相对于震源的各向异性, 而台站分布的不完善则直接影响解的精度 (precision) 和不确定性边界的形状. 传统线性定位方法中, 解的不确定性总是一个标准的椭圆或椭球^[1-4], 而非线性方法中, 解的不确定性不再是椭圆或椭球, 具有复杂的几何特征^[4]. 逆时成像技术中, 我们借助于模糊度 (ambiguity) 和到时的残差的标准差来描述解的不确定性. 如果发震时刻的模糊度大于或等于到时残差的标准差, 则模糊度的边界就是不确定性边界; 如果发震时刻的模糊度小于到时残差的标准差, 则由标准差与模糊度的比确定不确定性边界^[10]. 与其他非线性方法一样, 不确定性边界具有复杂的几何特征. 图 8 和图 9 分别展示了用于 5 次气枪和 5 次爆破定位的台站分布、震源位置及其模糊度的几何特征, 可以看出, 不同的台站分布对应于不同的模糊度几何形状, 但都表明这些台站分布都能够相当好地分辨这 10 次事件的震源位置.

经过模型的筛选, 我们认为基于模型 M4 的定位结果可以被认为是最理想的定位结果. 5 次气枪的激发时间、震中纬度、震中经度、震源深度和震源位置的平均偏差分别为 0.44 s、0.49 km、0.1 km 和 0.41 km, 它们的不确定性依次约为 0.12 s、0.007°、0.007°和 0.87 km; 5 次爆破的平均偏差分别为 0.06 s、0.54 km、0.23 km 和 0.62 km, 它们的不确定性依次约为 0.16 s、0.008°、0.010°和 1.65 km. 考虑到介质的各向异性、台网的孔径和台站的分布, 我们认为这些偏差足够小, 不确定性也十分合理, 这表明逆时成像技术具有良好的实用性.

致谢 王宝善研究员为我们提供了气枪资料, 李永华研究员为我们提供了化学爆破的资料, 作者向

他们表示衷心感谢.

附录 速度模型数值

附表 1 根据朱碁定等^[12]建立的具有低速夹层的速度模型 [M1]

Appendix Table 1 Velocity model with a velocity-low layer from Zhu et al. ^[12] [M1]

层	厚度/km	P 波速度/(km/s)
1	3.0	4.30
2	8.0	5.20
3	7.0	6.08
4	5.0	6.30
5	5.0	5.50
6	5.0	7.06
7	5.0	6.40
8	8.0	7.40
9	8.0	6.80
10	10.0	8.01
11	10.0	8.06

附表 2 根据朱碁定等^[12]建立的无低速夹层的速度模型 [M2]

Appendix Table 2 Velocity model without a velocity-low layer from Zhu et al. ^[12] [M2]

层	厚度/km	P 波速度/(km/s)
1	3.0	4.30
2	8.0	5.60
3	7.0	5.60
4	5.0	5.87
5	5.0	5.87
6	5.0	6.71
7	5.0	6.71
8	8.0	7.09
9	8.0	7.09
10	10.0	8.01
11	10.0	8.06

附表 3 根据熊绍柏等^[13-14]建立的速度模型 [M3]

Appendix Table 3 Velocity model from Xiong et al. ^[13-14] [M3]

层	厚度/km	P 波速度/(km/s)
1	6.0	5.95
2	4.0	6.10
3	20.0	6.30
4	10.0	5.80
5	15.0	6.70

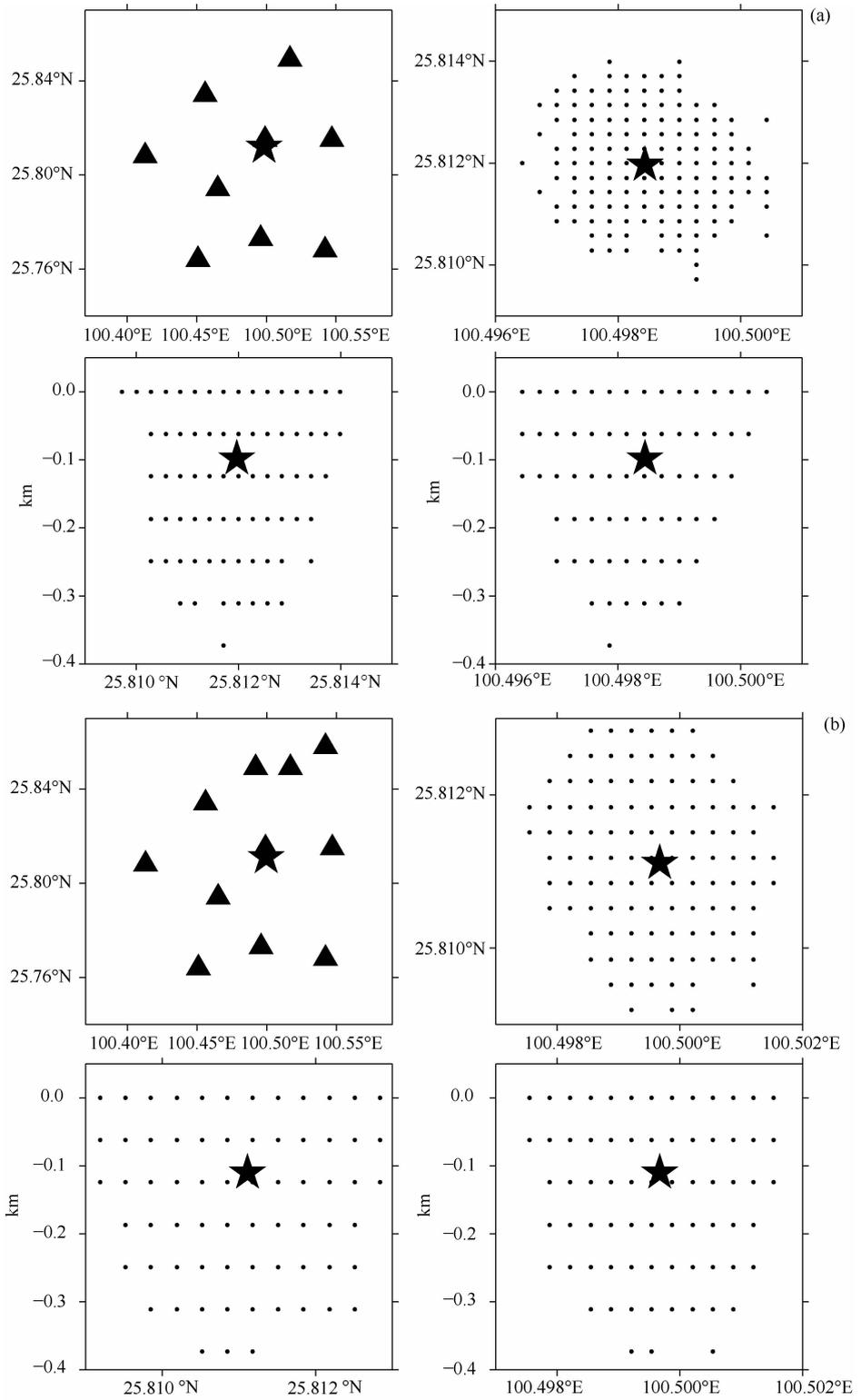


图 8a,8b 其说明见下下页

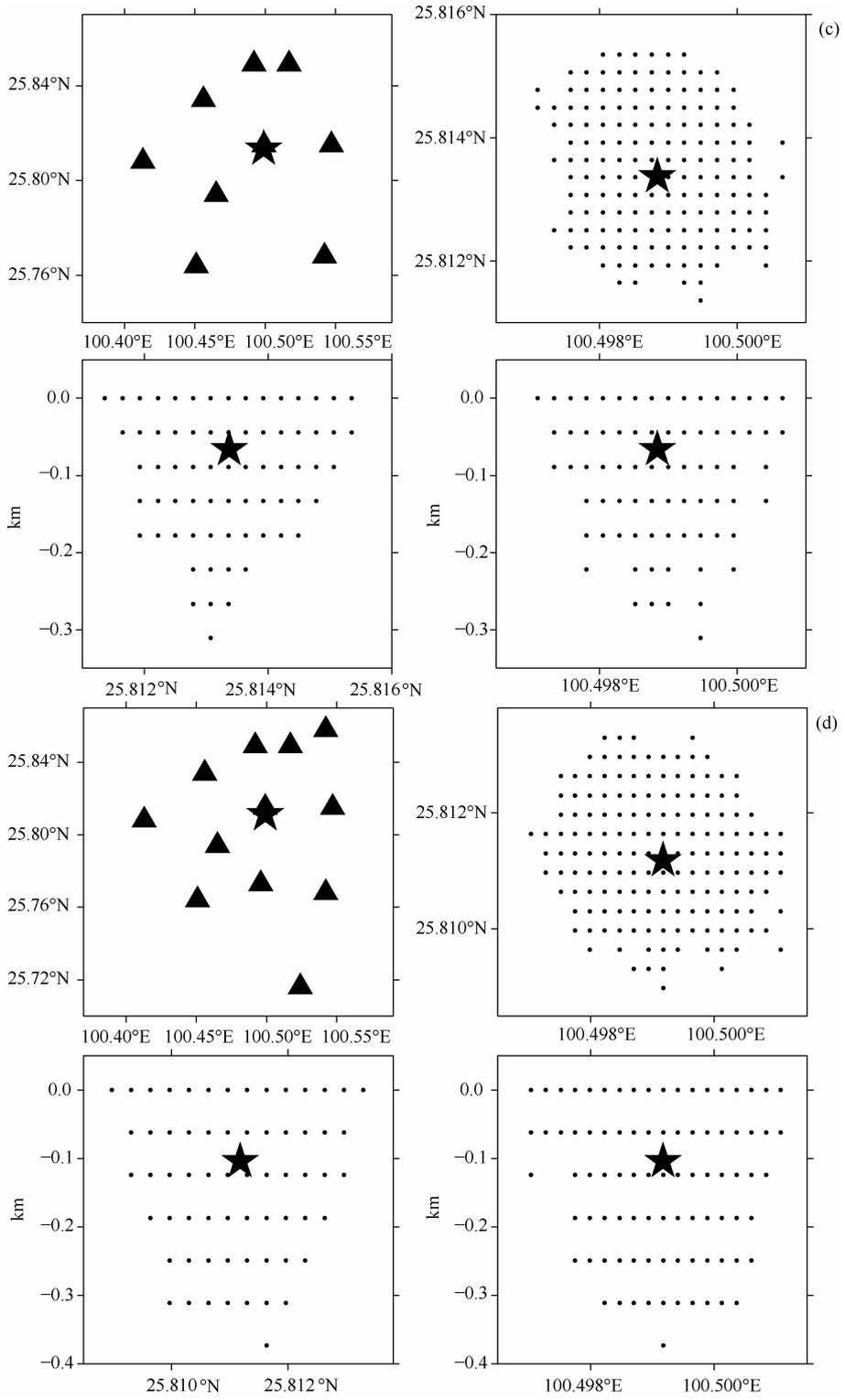


图 8c, 8d 其说明见下页

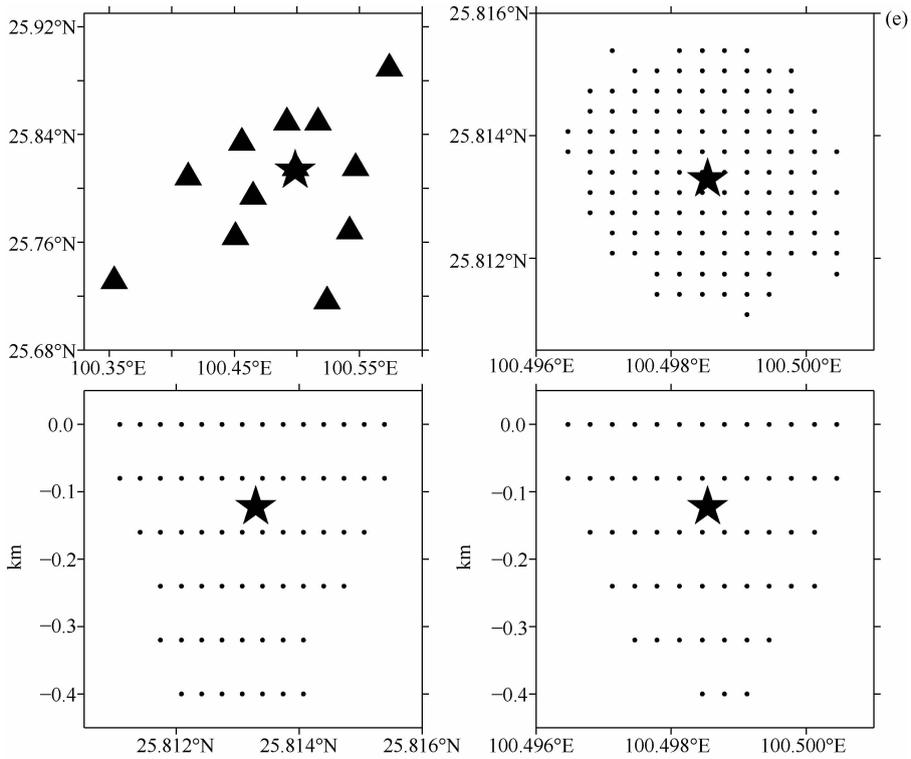


图 8 5 次气枪定位使用的台站分布、定位结果及其模糊度

(a)–(e) 依次对应于表 15 中的 5 次事件. 在每个子图中, 左上为震中与台站分布, 右上为震中及其模糊度在水平面内的投影, 左下为震源及其模糊度在纬度-深度剖面上的投影, 右下为震源及其模糊度在经度-深度剖面上的投影.

Fig. 8 Stations, hypocenters and their ambiguities of the 5 air-guns

(a)–(e) correspond to the 5 events listed in Table 15, respectively. In each subplot, the upper-left shows epicenter and stations, the upper-right, hypocenter and its ambiguity on ground surface, the lower-left, hypocenter and its ambiguity on cross-section of latitude and depth, and hypocenter and its ambiguity on cross-section of longitude and depth.

附表 4 根据王椿镛等^[15-16]建立的速度模型 [M4]

Appendix Table 4 Velocity model from Wang et al.^[15-16] [M4]

层	厚度/km	P 波速度/(km · s ⁻¹)
1	1.0	5.87
2	9.0	5.88
3	20.0	6.45
4	20.0	7.75
5	15.0	7.80

附表 5 根据白志明和王椿镛^[17]建立的速度模型 [M5]

Appendix Table 5 Velocity model from Bai and Wang^[17] [M5]

层	厚度/km	P 波速度/(km · s ⁻¹)
1	10.0	5.70
2	10.0	6.20
3	10.0	6.60
4	13.0	7.00
5	17.0	7.60

附表 6 IASPEI91 速度模型 [M6]

Appendix Table 6 Velocity model of the IASPEI91 [M6]

层	厚度/km	P 波速度/(km · s ⁻¹)
1	20.0	5.81
2	15.1	6.53
3	21.4	8.10

附表 7 CRUST2.0 速度模型 [M7]

Appendix Table 7 Velocity model of the CURST2.0 [M7]

层	厚度/km	P 波速度/(km · s ⁻¹)
1	0.5	2.50
2	18.0	6.10
3	16.0	6.30
4	8.5	7.20

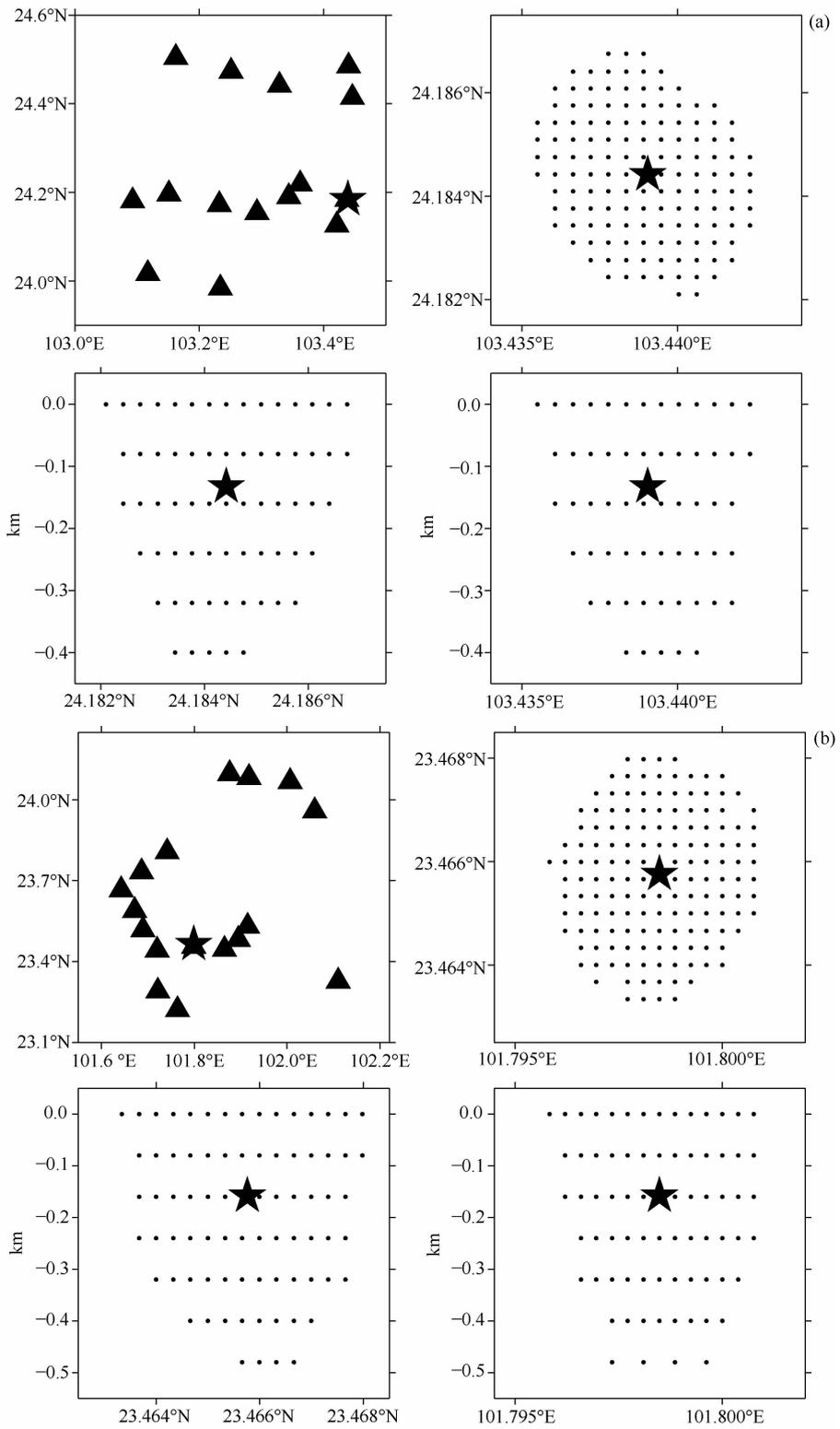


图 9a,9b 其说明见下下页

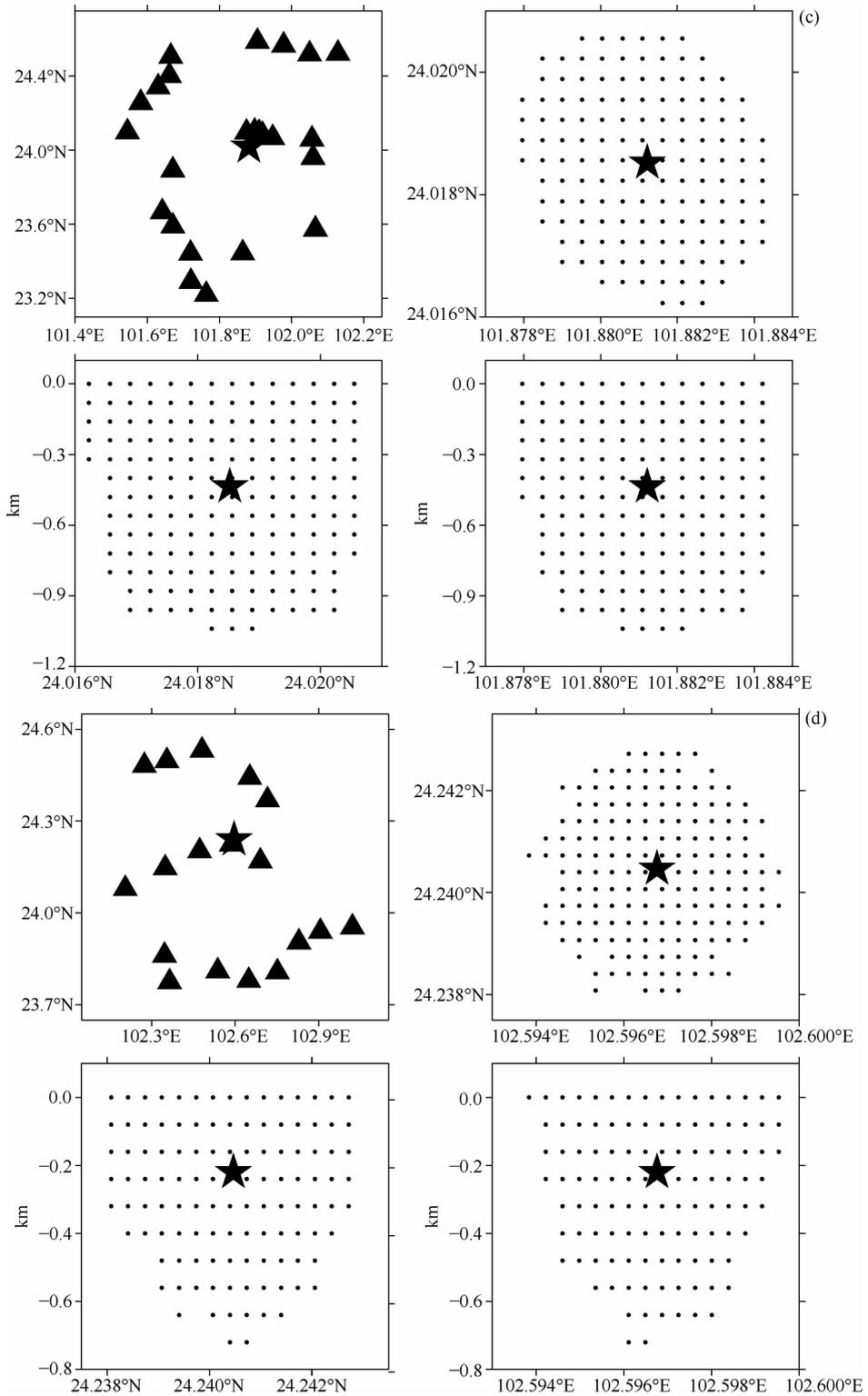


图 9c,9d 其说明见下页

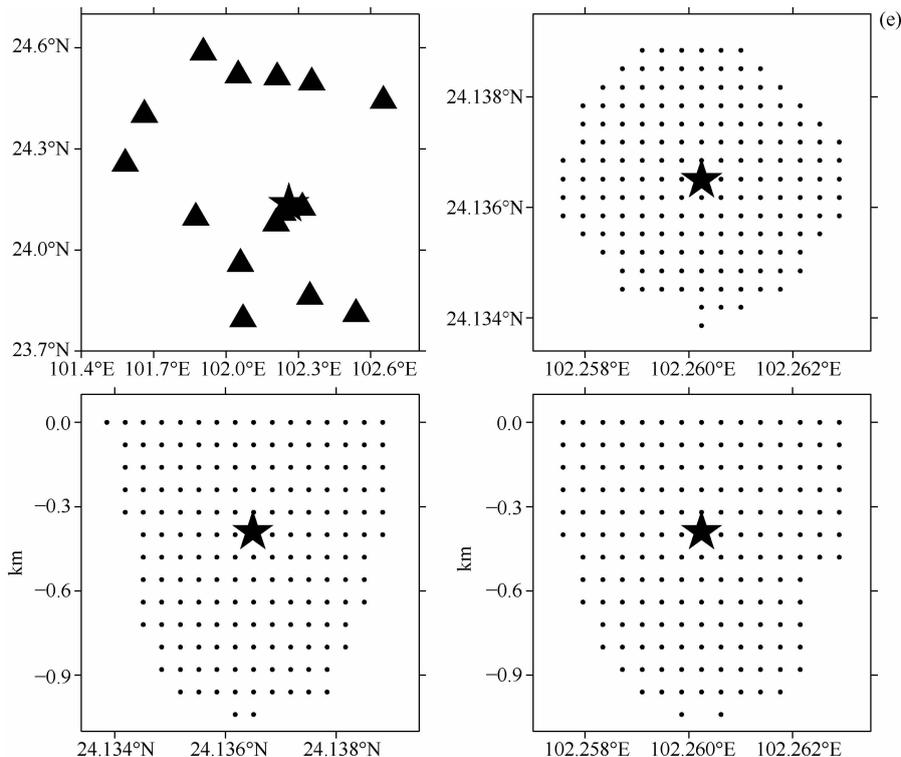


图 9 5 次爆破定位使用的台站分布、震源位置及其模糊度

(a)–(e) 依次对应于表 16 中的 5 次事件, 其他说明同图 8.

Fig. 9 Stations, hypocenters and their ambiguities of the 5 chemical explosions

(a)–(e) correspond to the 5 events listed in Table 16, respectively. The others are the same as in Fig. 8.

参考文献 (References)

- [1] Flinn E A. Confidence regions and error determinations for seismic event location. *Rev. Geophys.*, 1965, 3(1): 157-185.
- [2] Buland R. The mechanics of locating earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1976, 66(1): 173-187.
- [3] Jordan T H, Sverdrup K A. Teleseismic location techniques and their application to earthquake clusters in the South-Central Pacific. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1981, 71(4): 1105-1130.
- [4] Bratt S R, Bache T C. Locating events with a sparse network of regional arrays. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1988, 78(2): 780-798.
- [5] Evernden J F. Precision of epicenters obtained by small numbers of world-wide stations. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1969, 59(3): 1365-1398.
- [6] Anderson K R. Robust earthquake location using M-estimates. *Phys. Earth Planet. Interiors.*, 1982, 30(2-3): 119-130.
- [7] Rowlett H, Forsyth D W. Recent faulting and microearthquakes at the intersection of the Vema Fracture Zone and the Mid-Atlantic Ridge. *J. Geophys. Res.*, 1984, 89(B7): 6079-6094.
- [8] Thurber C H. Nonlinear earthquake location: theory and examples. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1985, 75(3): 779-790.

- [9] Pavlis G L. Appraising earthquake hypocenter location errors: a complete practical approach for single-event locations. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1986, 76(6): 1699-1717.
- [10] 许力生, 杜海林, 严川等. 一种确定震源中心的方法: 逆时成像技术(一)——原理与数值实验. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1190-1206, doi: 10.6038/cjg20130414.
- Xu L S, Du H L, Yan C, et al. A method for determination of earthquake hypocentroid: time-reversal imaging technique——principle and numerical tests. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(4): 1190-1206, doi: 10.6038/cjg20130414.
- [11] Wang B S, Ge H K, Yang W, et al. Transmitting seismic station monitors fault zone at depth. *Eos*, 2012, 93(5): 49-50.
- [12] 朱碁定, 李幼铭, 张立敏等. 川南、滇北地震台网区域壳幔介质分层结构的初步研究. *地球物理学报*, 1986, 29(3): 245-254.
- Zhu P D, Li Y M, Zhang L M, et al. On the study of the crust and upper mantle structure beneath the seismic telemetry network in south Sichuan and north Yunnan provinces. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 1986, 29(3): 245-254.
- [13] 熊绍柏, 滕吉文, 尹周勋等. 攀西构造带南部地壳与上地幔结构的爆炸地震研究. *地球物理学报*, 1986, 29(3): 235-244.
- Xiong S B, Teng J W, Yin Z X, et al. Explosion

- seismological study of the structure of the crust and upper mantle at southern part of the Panxi tectonic belt. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 1986, 29(3): 235-244.
- [14] 熊绍柏, 郑晔, 尹周勋等. 丽江—攀枝花—者海地带二维地壳结构及其构造意义. *地球物理学报*, 1993, 36(4): 434-444.
- Xiong S B, Zheng Y, Yin Z X, et al. The 2-D structure and it's tectonic implications of the crust in the Lijiang-Panzhuhua-Zhehai region. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 1993, 36(4): 434-444.
- [15] 王椿镛, Mooney W D, 王溪莉等. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究. *地震学报*, 2002, 24(1): 1-16.
- Wang C Y, Mooney W D, Wang X L, et al. Study on 3-D velocity structure of crust and upper mantle in sichuan-yunnan region, China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2002, 24(1): 1-16.
- [16] Wang C Y, Chan, W W, Mooney W D. Three-dimensional velocity structure of crust and upper mantle in southwestern China and its tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(B9), doi: 10.1029/2002JB001973.
- [17] 白志明, 王椿镛. 云南遮放—宾川和孟连—马龙宽角地震剖面的层析成像研究. *地球物理学报*, 2004, 47(2): 257-267.
- Bai Z M, Wang C Y. Tomography research of the Zhefang-Binchuan and Menglian-Malong wide-angle seismic profiles in Yunnan province. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(2): 257-267.

(本文编辑 胡素芳)