

双差地震定位法误差定量分析*

赵云峰¹, 王卫东², 祝意青¹, 刘芳¹, 卞龙²

(1. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 利用双层地壳模型, 在下地壳中构造若干地震事件构成事件簇, 分别在真实震源位置中添加不同程度的噪声后作为初始震源位置进行重定位, 重定位中分别使用均匀分布和仅分布于事件簇一侧的台站, 分析了初始震源位置和台站分布情况对双差重定位结果的影响。研究表明, 在台站均匀分布情况下, 当初始震中位置偏离真实震中小于 22.3 km 时, 双差重定位后事件的震中位置平均偏离真实震中小于 3.1 km, 事件间的相对震中距离为 2.9 km 与真实值 3.35 km 接近, 重定位后事件深度分布比真实事件集中; 重定位后事件间的相对震中位置与添加的噪声水平关系不大, 表明双差重定位法得到的事件间的相对震中位置更加稳定。当台站仅分布于震群一侧时, 重定位结果与台站均匀分布时基本相同, 表明台站分布对双差重定位结果影响不大。最后对双差重定位中最大震源对距离参数 MAXSEP 的分析表明, 当事件簇中震源对平均距离比 MAXSEP 稍大时, 重定位结果中部分事件的震源位置可能是不可靠的。

关键词: 双差重定位; 误差分析; 初始震源; 台站分布; 震源对

中图分类号: P315.73

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)02-0178-07

0 引言

双差定位法能够得到高精度的定位结果, 其前提条件为构成事件对的两事件间的距离远小于事件与台站之间的距离和射线路径上速度不均匀体的尺度 (Waldhauser, Ellsworth, 2000)。Waldhauser (2001) 提供了双差定位程序和 3 个地震定位实例。此后, 双差定位法被众多学者 (William, Schaff, 2004; 杨志娴等, 2003; Hauksson, Shearer, 2005; 李乐等, 2007; 姚豆生等, 2007; 朱艾澜等, 2008; 房立华等, 2011; An *et al*, 2010; Mandal, Horton, 2007) 使用, 均得到了较好的结果, 但对双差重定位的精度并没有真实上的认识。本文使用双层地壳模型, 在下地壳中构造若干震源, 研究初始震源位置误差对双差重定位结果的影响, 并对比台站分布不均匀时双差重定位结果, 分析台站分布对重定位的影响。最后, 简单分析双差重定位程序中事件对中两个事件间的最大距离 (即双差定位子程序 ph2dt 中的参数 MAXSEP 及双差定位子程序 hypoDD 中的 WDCT) 对重定位结果的影响。

1 理论数据

本文使用的地壳模型为双层模型, 理论构造 36

个全部位于下地壳的地震事件, 设置其中一个事件的 id 号为 1。理论上的真实震源位置和台站位置如图 1 所示, 使用的台站与震群的距离均在 500 km 以内。在讨论台站分布不均匀时仅使用震群北侧的 13 个台站。地壳模型如表 1。

表 1 地壳结构模型

Tab. 1 Crust structure model

| 深度/km | 0 | 3 | 30 |
|----------------------------|-----|-----|-----|
| P 波速度/km · s ⁻¹ | 3.4 | 6.5 | 7.2 |

当震源位于下地壳中时, 地震波走时 t 为

$$t = \frac{H_1}{v_1^2 \sqrt{\frac{1}{v_1^2} - C^2}} + \frac{h - H_1}{v_2^2 \sqrt{\frac{1}{v_2^2} - C^2}}$$

其中, H_1 为上地壳厚度, h 为震源深度, v_1, v_2 分别为地震波在上、下地壳中的速度, C 为射线参数。

2 地震定位

在真实震源位置中分别添加 30、25、20、18、15、13dB 的高斯白噪声, 以添加噪声后的震源位置作为初始震源位置, 分别使用均匀分布的台站和分布于震群一侧的台站记录到的震相数据进行

* 收稿日期: 2012-03-25.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40534021) 和国家自然科学基金项目 (41274083) 联合资助。

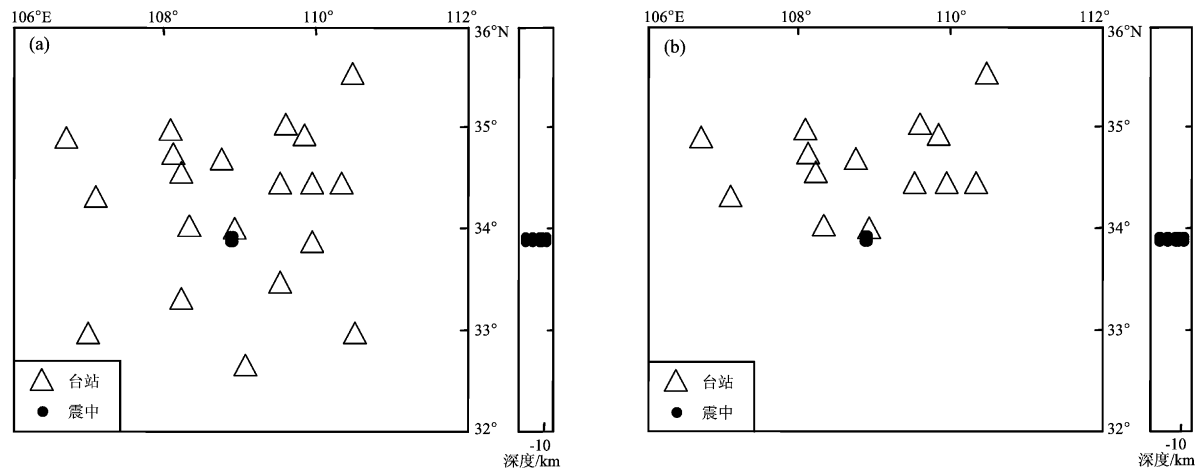


图 1 台站与震源分布图
(a) 台站均匀分布；(b) 台站分布于震群一侧

Fig. 1 Distribution of stations and hypocenter

(a) stations distributed in uniform; (b) stations distributed on one side of the earthquake swarm

双差重定位，验证双差定位程序的正确性，并在震相走时无误差和地壳速度结构精确已知的条件下定量分析初始震源位置及台站分布情况对双差定位结果精度的影响。在双差定位算法中，震源对中两事件间最大距离（对应于预处理程序 ph2dt 中的参数 MAXSEP 和重定位程序 hypoDD 中的参数 WDCT）重定位结果影响较大，由于所构造的 36 个事件间距较近，因此在震相数据预处理中使用 MAXSEP = 20，而在重定位中进行两轮迭代，WDCT 相应的取为 20、6。为比较重定位结果受 MAXSEP 和 WDCT 参数的影响程度，使用相同的

震相数据，定位过程中取 MAXSEP = 15 和 WDCT = 15、6 分析台站均匀分布情况下的重定位结果。

3 重定位结果

在真实震源位置参数中分别添加 30、25、20、18、15、13dB 的高斯白噪声，台站均匀分布于震群周围和仅分布在震群一侧时的重定位前后震源位置分布分别见图 2、图 3，重定位过程中 MAXSEP = 20，WDCT = 20、16，重定位后震源参数相对标准震源参数的偏移量见表 2。

表 2 初始震源位置有不同噪声水平时的重定位误差（MAXSEP = 20）
Tab. 2 Relocation error of initial hypocenter position with different decibel noise（MAXSEP = 20）

| 误差 | | 添加的高斯白噪声水平/km | | | | | |
|-------------|-----------------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | snr = 13db | snr = 30db | snr = 25db | snr = 20db | snr = 18db | snr = 15db |
| 台站均匀分布于震群周围 | 重定位后震中相对标准震中的误差 ^① | 0.8(4.4) | 1.0(7.9) | 1.6(17.8) | 3.1(22.3) | 7.2(28.6) | 12.1(33.0) |
| | 重定位后震源深度相对真实深度的误差 ^① | 1.13(0.30) | 1.15(0.42) | 1.21(0.84) | 1.29(1.20) | 1.08(1.34) | 1.41(1.70) |
| | 重定位后各事件与事件 1 的相对震中距离 ^② | 2.9(4.8) | 2.9(10.4) | 2.9(26.2) | 2.9(29.4) | 2.8(35.1) | 2.9(44.6) |
| | 重定位后各事件与事件 1 的相对深度距离 ^③ | 0.63(2.73) | 0.62(2.07) | 0.52(3.00) | 0.68(3.62) | 0.75(1.74) | 0.60(1.91) |
| 台站仅分布于震群一侧 | 重定位后震中相对真实震中的误差 ^① | 0.8(4.4) | 1.1(7.9) | 1.6(17.8) | 3.1(22.3) | 7.2(28.6) | 12.1(32.1) |
| | 重定位后震源深度相对真实深度的误差 ^① | 1.16(0.30) | 1.17(0.42) | 1.23(0.84) | 1.28(1.20) | 1.08(1.34) | 1.36(1.71) |
| | 重定位后各事件与事件 1 的相对震中距离 ^② | 3.0(4.8) | 3.0(10.4) | 2.9(26.2) | 2.9(29.4) | 2.7(35.1) | 3.0(45.2) |
| | 重定位后各事件与事件 1 的相对深度距离 ^③ | 0.60(2.73) | 0.59(2.07) | 0.50(3.00) | 0.66(3.62) | 0.75(1.74) | 0.55(1.94) |

注：①括弧内的数据为实际添加的平均误差；②事件间的真实水平相对距离平均为 3.35 km，括号内的数据为重定位前各事件相对于事件 1 的平均相对水平距离；③事件间的真实垂直相对距离平均为 5.22 km，括号内的数据为重定位前各事件相对于事件 1 的平均相对深度距离。

当重定位中震源对间的最大距离设置为 20 km 时, 重定位结果如表 2 和图 2、图 3。由图可以看出, 在台站均匀分布情况下, 当在真实震源位置中添加 18 dB 的噪声时, 初始震中平均偏离真实震中位置 22.3 km, 初始深度平均偏离为 1.29 km。双差重定位后, 震中平均偏离真实震中 3.1 km, 约为初始震中偏离真实震中的七分之一, 事件间的水平相对距离由重定位前的 29.4 km 下降为 2.9 km, 与真实水平相对距离 3.35 km 相当。重定位后的震源深度位置偏离真实深度为 1.29 km, 与实际添加的误差相当, 事件间的相对深度距离为 0.68 km, 与真实相对深度距离偏差较大。由此可

见, 对震源位置添加 18 dB 的噪声后的重定位结果得到的各事件的绝对位置与各事件间的相对距离和相对位置是较为准确的, 而在深度方向上, 事件的绝对位置和事件间的相对位置变化都较大。当初始震中偏离真实震中 33 km 时, 重定位后的震中偏离为 12 km, 约为初始震中偏离真实震中的三分之一, 事件间的水平相对距离由重定位前的 44.6 km 下降为 2.9 km, 依然与真实水平相对距离 3.35 km 相当。表明该噪声下, 重定位后事件间的绝对水平位置误差较大, 但是事件间的水平相对距离和水平相对位置准确性依然较高。在平均初始深度误差最小为 0.30 km 时, 重定位后平均震源

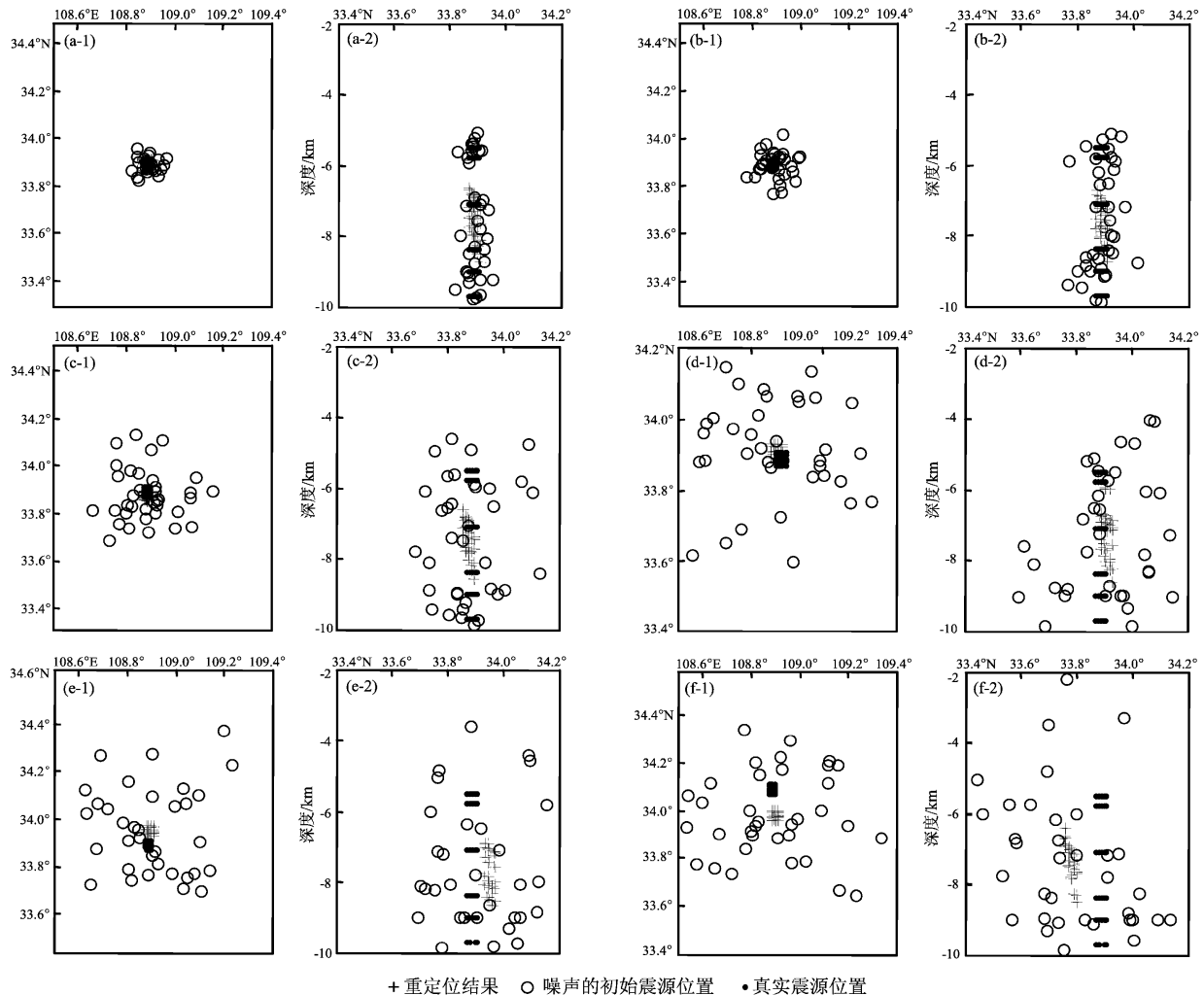


图2 台站均匀分布情况下, 分别添加 30dB (a)、25dB (b)、20dB (c)、18dB (d)、15dB (e)、13dB (f) 高斯白噪声时重定位前后的震源位置与标准震源位置图
((-1) 图为震中位置图, (-2) 图为震源深度图)

Fig. 2 Relocation result of initial hypocenter location with 30dB (a)、25dB (b)、20dB (c)、18dB (d)、15dB (e)、13dB (f) Gaussian white noise when stations distributed in uniform, and the real hypocenter location ((-1) panel shows epicenter location, (-2) shows focal depth)

深度误差为 1.13 km, 各事件相对于事件 1 的垂直相对距离由重定位前的 2.73 km 变为 0.63 km; 当平均初始深度误差最大为 1.7 km 时, 重定位后震源深度误差为 1.41 km, 各事件相对于事件 1 的垂直相对距离由重定位前的 1.91 km 变为 0.60 km, 同时由重定位后的震源深度分布 (图 2、3) 可以看出, 重定位后的震源深度分布较真实震源深度分布更为集中, 并且事件间的相对深度位置同准确的相对深度位置变化较为明显。在台站仅分布在震群一侧时, 重定位后的震中误差和震源深度

误差基本与台站均匀分布时的重定位结果一致。由此可以看出, 当震相走时无误差并且地壳速度结构准确时, 台站分布情况对双差重定位的得到的震中位置和震源深度结果影响较小。

为了对比分析重定位程序中最大震源对距离对重定位结果的影响, 使用在震源位置中添加 30dB、25dB、20dB、18dB、15dB 后的数据进行重定位。在重定位中, 将事件间建立震源对的最大距离取为 $\text{MAXSEPP} = 15$, 此时取 $\text{WDCT} = 15$ 、6, 仅对台站均匀分布情况下的重定位结果进行讨论。

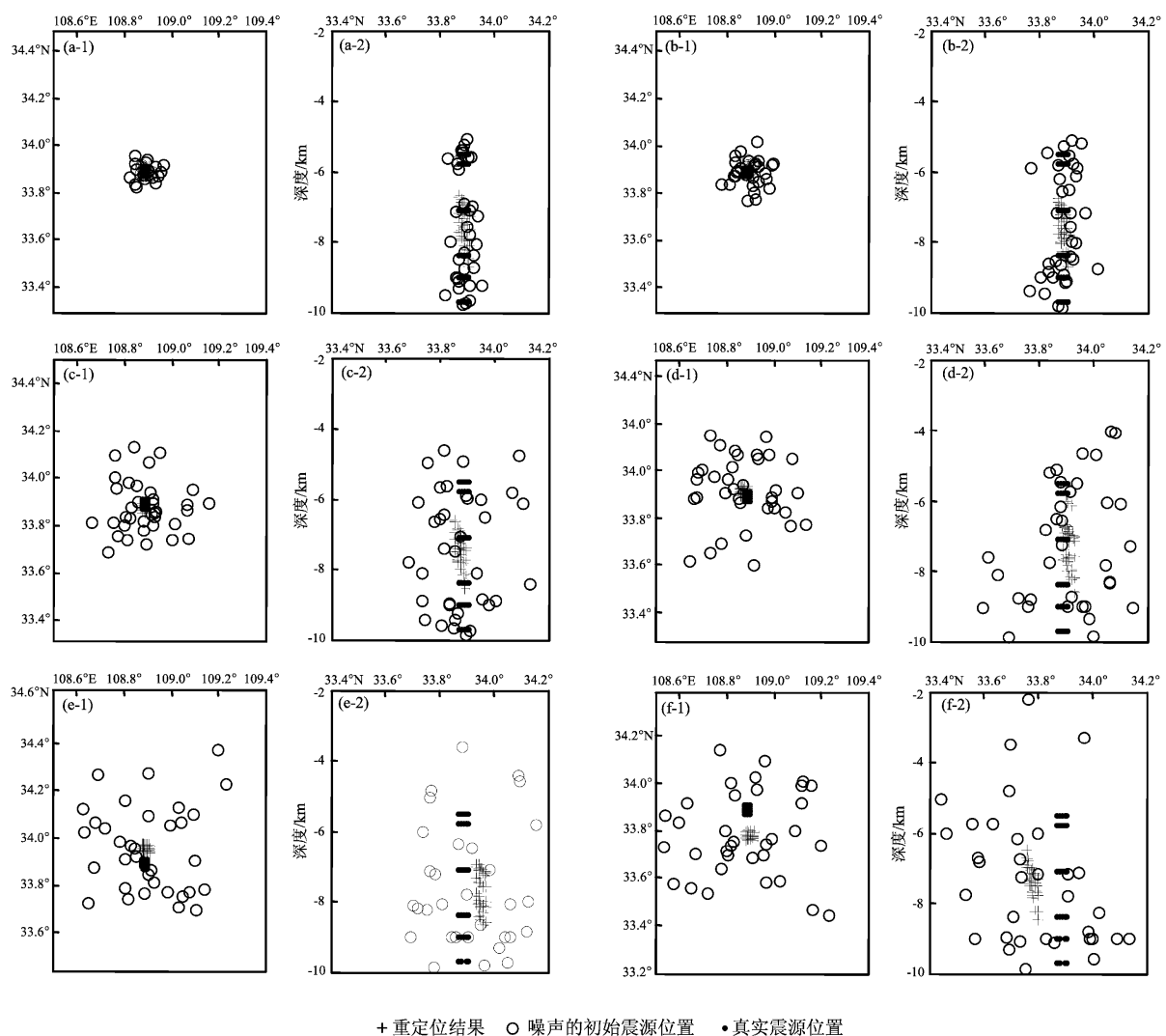


图3 台站分布在震群一侧时, 分别添加 30dB (a)、25dB (b)、20dB (c)、18dB (d)、15dB (e)、13dB (f) 高斯白噪声时重定位前后的震源位置与标准震源位置图 ((-1) 图为震中位置图, (-2) 图为震源深度图; $\text{MAXSEP} = 20$, $\text{WDCT} = 20$ 、6)

Fig. 3 Relocation result of initial hypocenter location with 30dB (a)、25dB (b)、20dB (c)、18dB (d)、15dB (e)、13dB (f) Gaussian white noise when the stations are on one side of the earthquake swarm, and the real hypocenter location ((-1) panel shows epicenter location, (-2) shows focal depth; $\text{MAXSEP} = 20$ in ph2dt, $\text{WDCT} = 20$ 、6 in hypoDD)

由图 4、表 3 并对比表 2 可以看出,在重定位中震源对间最大距离设置为 15 km 条件下,当震源位置中添加 18 dB 的噪声即初始震中位置与真实震

中位置偏离 22.3 km 时,各事件相对于事件簇中 id 号为 1 的事件平均相对距离为 24.7 km,此时重定位后,由图 4b 可以看出,原本的一个事件簇已经

表 3 初始震源位置有不同噪声水平时的重定位误差 (MAXSEP = 15)

Tab. 3 Relocation error of initial hypocenter position with different decibels noise (MAXSEP = 15)

| 误差 | | 添加的高斯白噪声水平/km | | | | |
|-------------------------|----------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|
| | | snr = 30dB | snr = 25dB | snr = 20dB | snr = 18dB | snr = 15dB ^① |
| 台站均 匀分布 于震群 周围 | 重定位后震中相对真实震中的偏移 | 0.8 (4.4) | 1.0 (7.9) | 1.6 (17.8) | 12.4 (22.3) | 10.9 (22.2) |
| | 重定位后震源深度相对真实深度的偏移 | 1.13 (0.30) | 1.15 (0.42) | 1.22 (0.84) | 1.19 (1.20) | 1.46 (1.41) |
| | 重定位后各事件与事件 1 的相对震中距离 | 2.9 (4.8) | 2.9 (10.4) | 2.9 (26.2) | 2.9 (24.7) | 2.8 (24.8) |
| | 重定位后各事件与事件 1 的相对深度距离 | 0.63 (2.73) | 0.62 (2.07) | 0.50 (3.00) | 1.40 (3.90) | 1.23 (1.90) |

注: ①该噪声水平下,重定位得到了 28 个事件的结果。

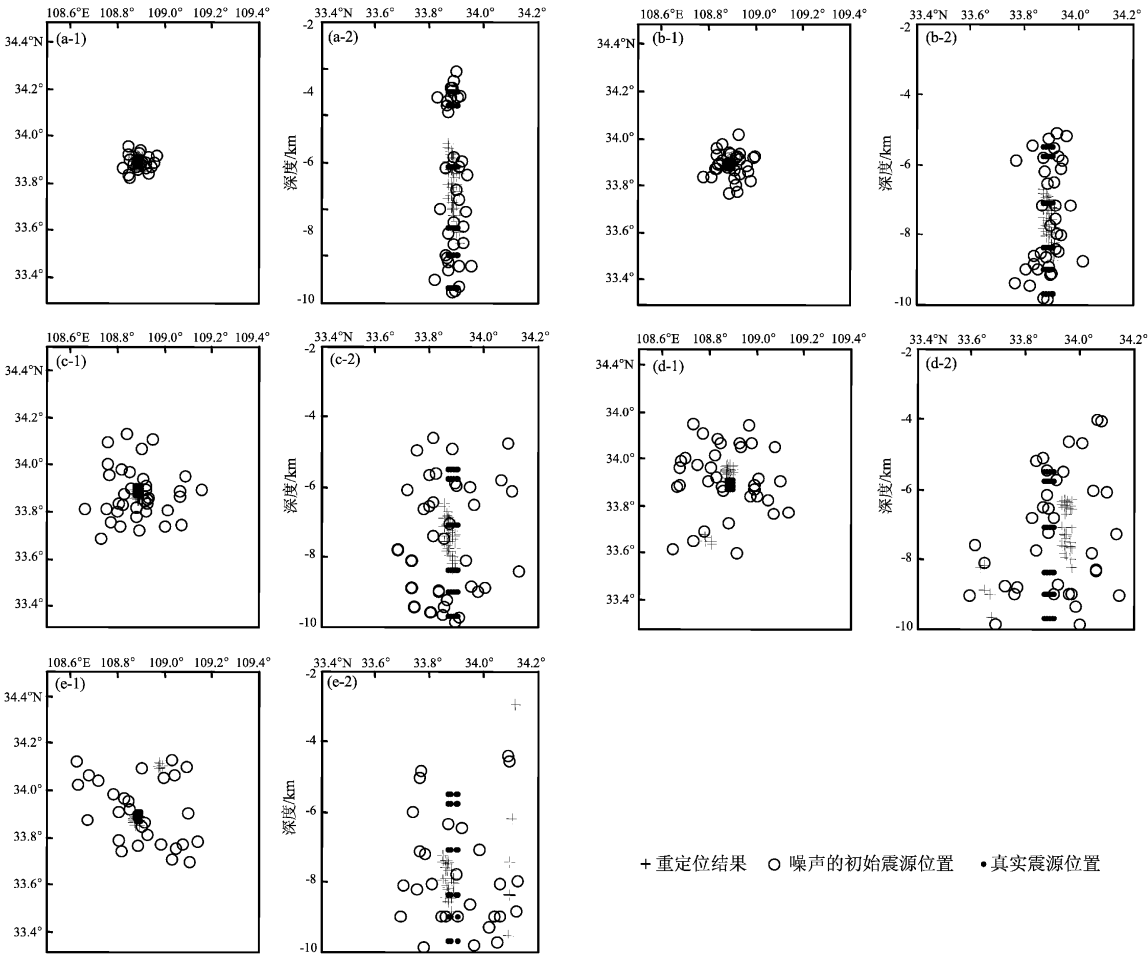


图 4 台站均匀分布时,分别添加 30dB (a)、25dB (b)、20dB (c)、18dB (d)、15dB (e) 高斯白噪声时重定位前后的震源位置与标准震源位置图 ((-1) 图为震中位置图, (-2) 图为震源深度图; MAXSEP = 15, WDCT = 15、6)

Fig. 4 Relocation result of initial hypocenter location with 30db (a)、25db (b)、20db (c)、18db (d)、15db (e)、Gaussian white noise when the stations are in uniform distribution, and the real hypocenter location ((-1) panel shows epicenter location, (-2) shows focal depth; MAXSEP = 15 in ph2dt, WDCT = 15、6 in hypoDD)

分裂为两个事件簇,而得到的36个事件的绝对震中位置与真实震中位置间的平均距离为12.4 km,大于 $\text{MAXSEP} = 20$ 时的距离3.1 km,与 $\text{MAXSEP} = 20$ 时的误差同为2.9 km,与真实数据3.35 km接近。表明重定位中最大震源对距离的选取对重定位结果有较大影响,因此在实际定位过程中需要适当选取其值。

4 结论与讨论

本文通过添加不同噪声的真实震源位置作为初始震源位置进行重定位,重定位中使用了分布均匀和仅分布在地震事件簇一侧的台站。重定位结果表明,在台站分布良好的情况下,当初始震中位置偏离真实震中位置22.3 km、事件簇中各事件间的平均相对距离(相对于事件id号为1)为29.4 km时,重定位后各事件的绝对震中位置相对真实震中平均偏离3.1 km,事件间的平均相对震中距离为2.9 km,与事件间的真实平均相对震中距离3.35 km相当,由此可以看出当初始震中位置与真实震中位置偏离较近时,双差重定位后得到的绝对震中位置较为可靠,而且从图3可以看出重定位后事件簇整体震中位置与真实震中位置偏离和单个事件震中位置与其真实震中的偏离相同,表明重定位后事件簇的质心与真实震源位置的质心发生偏离。当初始震中偏离真实震中28.6 km时,重定位后各事件绝对震中相对真实震中平均偏离增大为7.2 km,各事件间的相对震中距离仍为2.8 km,表明双差重定位法得到事件间的相对震中位置更为可靠,对初始震中位置误差不敏感。同时由表2可以看出,在深度方向上,在给震源位置添加各种程度的噪声时,重定位后事件簇的深度位置与真实深度位置的偏离程度均较为接近,由图3也可以看出重定位后各事件的深度位置均较为集中,但各事件与其真实深度位置平均偏离较大。

根据表2和图3,从不同台站分布情况的重定

位结果上看,对添加有不同噪声的初始震源位置重定位后,重定位结果中震中位置和深度位置变化很小,表明双差重定位法对台站分布情况不敏感,均匀分布和分布于一侧的台站均能得到较好的结果。

由图4并对比表2和表3可以看出,重定位中最大震源对距离 MAXSEP 参数对重定位结果有影响,特别是当真实震源对间的距离比 MAXSEP 稍大时,容易将事实上的一个事件簇分裂,导致重定位后部分事件的绝对位置与真实位置相差较大,因此在重定位过程中要谨慎适当的选取 MAXSEP 。

参考文献:

- 房立华,吴建平,张天中,等. 2011. 2011年云南盈江 $M_s 5.8$ 地震及其余震序列重定位[J]. 地震学报,33(2):262-267.
- 李乐,陈棋福,陈颢. 2007. 首都圈地震活动构造成因的小震精定位分析[J]. 地球物理学进展,22(1):24-34.
- 杨志娴,陈运泰,郑月军,等. 2003. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J]. 中国科学(D辑),33(增刊):129-134.
- 姚云生,李井冈,廉超,等. 2007. 双差定位程序的改进[J]. 大地测量与地球动力学,27(3):76-79.
- 朱艾斓,徐锡伟,刁桂苓,等. 2008. 汶川 $M_s 8.0$ 地震部分余震重新定位及地震构造初步分析[J]. 地震地质,30(3):759-767.
- Hauksson, Shearer P. 2005. Southern California hypocenter relocation with waveform cross-correlation, part 1: results using the double-difference method[J]. BSSA, 95(3):896-903.
- Mandal P, Horton S. 2007. Relocation of aftershocks, focal mechanisms and stress inversion: Implications toward the seismo-tectonics of the causative fault zone of $M_w 7.6$ 2001 Bhuj earthquake (India) [J]. Tectonophysics, 429(1-2):61-78.
- An M J, Feng M, Long C X. 2010. Long Deep ruptures around the hypocenter of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake deduced from aftershock observations[J]. Tectonophysics, 491:96-104.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake algorithm: method and application to northern Hayward fault, California [J]. BSSA, 99(6):1353-1368.
- Waldhauser F. 2001. HypoDD-A program to compute double-difference hypocenter location[R]. USGS Open File Report 01-113.
- William M, Schaff D. 2004. Absolute earthquake locations with differential data[J]. BSSA, 84(6):2254-2264.

Error Quantities Analysis on Double-difference Earthquake Location Algorithm

ZHAO Yun-Feng¹, WANG Wei-Dong², ZHU Yi-Qing¹, LIU Fang¹, BIAN Long²

(1. *Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shannxi, China*)

(2. *School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shannxi, China*)

Abstract

Based on the double-layer crust model, we constructed some earthquakes in lower crust to constitute the event cluster, and added different decibels noise to the real hypocenter location as initial hypocenter location in double-difference relocation when the stations are in uniform distribution and on one side of the clusters respectively, and then analyzed the influence of initial hypocenter location and stations distribution on the double-difference relocation results. The result indicates that in the situation of the stations are in uniform distribution, when initial epicenter location deviates less than 22.3 km from real epicenter, the double-difference relocated epicenter of earthquakes averagely deviates less than 3.1 km from real epicenter, and relative epicenter distance between the earthquakes is 2.9 km which approaches the real value of 3.35 km. The relocated depth distribution is more concentrated than that of real events. The relocated relative epicenter location between the earthquakes which is not sensitive to the different decibels noise is more stable obtained by double-difference location. The relocated results with stations are in uniform distribution or all on one side of the cluster are almost same, which shows that the stations distribution has little influence on the double-difference location. The analysis on the search radius MAXSEP shows that relocated focal location of some events may not be reliable when average distance between the focal pairs in the events cluster is slightly larger than MAXSEP.

Key words: double-difference location; error analysis; initial hypocenter; station distribution; focal pairs