

2003 年民乐—山丹 6.1、5.8 级地震 序列精确定位^{*}

莘海亮¹, 张元生^{1,2}, 郭 晓^{1,2}, 李 稳¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000 2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 兰州 730000)

摘要: 利用遗传算法对 2003 年 10 月 25 日甘肃民乐—山丹 6.1、5.8 级地震及其余震进行了精确定位, 并在此基础上结合地质资料讨论了此次地震的发震构造。定位结果表明: 地震序列分布集中, 两次主震主要沿着民乐—永昌隐伏断裂分布; 震源深度主要分布在 10~15 km 范围内, 平均深度为 12.1 km; 此次地震序列的发震构造为民乐—永昌隐伏断裂与童子坝河隐伏断裂所组成的大黄山隆起区前缘逆冲断裂, 其中民乐—永昌隐伏断裂西段的 NWW 向局部断裂起主要作用。

关键词: 民乐—山丹地震; 地震精确定位; 遗传算法; 发震构造

中图分类号: P315.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2008)02-0129-05

0 引言

精确的地震空间位置是研究地震活动构造、地球内部结构和地震安全评估等工作的基础, 因此, 地震定位一直是地震学中一个最基础的研究课题。近年来, 随着数字化地震观测技术的发展, 地震定位结果的精度得到了很大提高。

2003 年 10 月 25 日 20 点 41 分和 48 分, 在甘肃省民乐县和山丹县交界地区相继发生了 6.1 级和 5.8 级地震。此次地震序列属于双震型 (肖丽珠等, 2005), 是自 1986 年甘肃门源 6.4 级地震后, 祁连山构造及河西走廊地区发生的首次 6 级以上地震; 也是昆仑山口西 8.1 级地震发生近两年后, 青藏块体北边界上的第一个 6 级以上地震。众多的学者对此次地震进行了多方面的研究, 取得了较为翔实的结果 (杜学彬等, 2004; 张希等, 2004; 郑文俊等, 2005), 然而对于本次地震序列的重新精确定位研究尚为空白。

本文中我们采用精度相对较高的绝对定位遗传算法对此次地震序列进行了精确定位, 并在此基础上分析和探讨了此次地震活动的空间分布特征及其与活动构造的关系。

1 研究方法

常用的地震定位方法主要分为绝对定位方法 (如 Geiger 法) 与相对定位方法 (如主事件定位法、双差地震定位法等)。台网的分布、可用于定位的震相的多少、地震波到时读数的精确度、对地壳结构掌握的精细程度等诸多因素, 都会影响地震定位的精度 (周仕勇等, 1999; 杨智娟等, 2003)。

遗传算法 (Sambridge 等, 1992) 是一种非线性全局优化方法, 它不是通过某种形式的扰动对单一模型进行改善, 而是首先用随机过程产生一组模型, 然后对这组模型同时进行改善。遗传算法在参数空间的搜索点的顺序是随机的, 即它从参数空间的一个点到另一个点是不确定的, 然而其收缩和集中于最优解是确定的, 这种简单的随机过程能导致高效的搜索机制。该方法可适用于震源定位、波形反演和速度结构研究等 (周民都等, 1999; Zhang 等, 2004; 王夫运等, 2006)。

绝对定位遗传算法的基本思路分为以下 3 个步骤:

(1) “繁殖”。从总的模型中随机地产生一组父模型 (表示震源位置), 父模型由多个参数组

* 收稿日期: 2007-08-22.

基金项目: 地震科学联合基金项目 (A07138) 资助.

成。先将模型的每一参数编成一个二进制子串（相当于生物学中的基因），然后将这些子串串联成一个二进制串（相当于生物学中的染色体）。对这一组模型分别计算每一个模型所对应的目标函数，即每个模型对应各台站观测资料的拟合差：

$$\varphi(m_k)=\sum_{k=1}^{sta}\left[\frac{(Ob_k-Ca_k)}{e}\right]^2,\quad k=1,2\cdots,Q$$

(1)

其中， $\varphi(m_k)$ 表示总的模型中第 k 个模型的拟合差； sta 表示所用观测值的总个数； Ob_k 为观测得到的地震波到时； Ca_k 为第 k 个模型计算得到的到时； e 为观测值的权重。最后根据目标函数 $\varphi(m_k)$ 值确立第 k 个模型繁殖的可能性。

(2)“交配”。从父模型中随机地选择两两成组，分别以“交配概率” P_c 随机地交换部分“染色体”（“基因”），产生两个新的子模型来代替原来的父模型，因此在“交配”阶段的模型数目是不变的。

(3)“变异”。这里的“变异”是指把子模型二进制代码中的某些位的值（0或1）进行修改，即相当于对模型中某些参数进行修改。值得注意的是，对一组父模型不管怎样进行配对，交叉产生的子模型中各参数值都不会超出各自的边界值，但“变异”则不然，所以必须规定子模型二进制代码的每一位发生变异的可能性的 P_m 。当变异这一步骤完成后，一组新的模型 Q 被产生出来，又可以进行下一次迭代。在迭代过程中可删除那些“繁殖”可能性（ $P_m(m_k)$ ）较小的模型，用“繁殖”可能性较大的模型替代。

以上3个过程多次重复，最终可优选出最佳的震中位置（周民都等，1999；万永革等，1995）。

2 数据处理

2.1 资料选取

对于此次地震序列，笔者使用甘肃省数字地震观测台网和国家基本观测台网记录到的地震数据。2003年10月1日至2003年12月31日共发生 $M_s\geq 1.0$ 地震572次，选取记录台站数大于等于3个且每个地震至少有3个S—P δ 记录的地震事件作为重新定位的地震，共有地震503个。选取的台站的分布情况如图1所示。

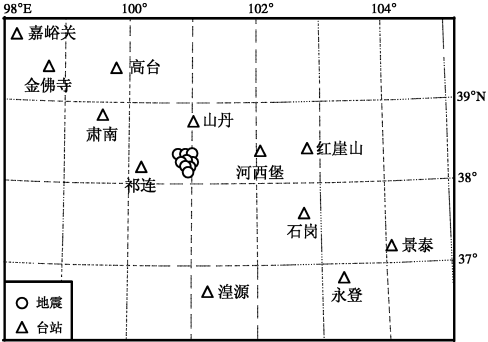


图1 所选台站的分布情况

2.2 速度模型

地震定位过程中，除了定位方法以外，建立合理的速度结构模型也至关重要。根据该区的三维速度结构图像（李清河等，1998），经过多次试算最终建立了分层结构速度模型（表1），波速比为 $V_p/V_s=1.732$ ，莫霍面深度为50 km，下界面P波速度为8.17 km/s。

表1 重新定位用的速度模型

深度 / km	层厚 / km	P波速度 / km·s ⁻¹
5	5	5.15
10	5	5.95
15	5	6.10
20	5	6.25
25	5	6.40
50	25	6.72

2.3 迭代计算

将收集整理的503个地震进行精确定位计算。在计算过程中，对误差大的记录资料进行核对，或者重新通过震相分析得到新的到时数据，最后走时标准差由初始的2.5降为0.6时趋于稳定（图2）。

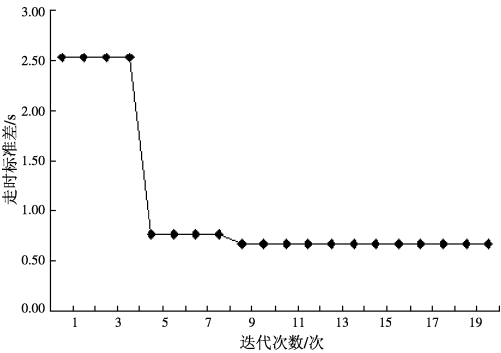


图2 走时标准差随迭代次数的变化

3 结果分析

3.1 震中分布特征

定位结果如图 3 b 所示。重新定位后, $M_s6.1$ 主震的震源深度为 13.8 km, 微观位置为 38.361°N 100.957°E 位于宏观震中 WS 方向约 5 km 处, 与甘肃省测震台网的定位结果 (38.33°N 100.95°E) 基本一致, 两者相距仅 3.5 km; $M_s5.8$ 主震的震源深度为 17.7 km, 位置为 38.364°N 101.048°E 位于宏观震中 ES 方向约 7.5 km 处, 与甘肃省测震台网的定位结果 (38.32°N 100.95°E) 也基本一致, 两者相距仅 9.7 km。

与重新定位前 (图 3 a) 相比, 定位结果显示地震序列集中分布, 有背离北祁连山前断裂 (军马场段) (F_3) 且向民乐—永昌隐伏断裂 (F_1)

和童子坝河隐伏断裂 (F_2) 靠拢的趋势; 震中区位于民乐—永昌隐伏断裂与童子坝河隐伏断裂交汇处, 两次主震震中与定位前的结果有着明显的偏离, 主要沿着民乐—永昌隐伏断裂朝 NWW 向分布。

3.2 震源深度分析

对民乐—山丹地震序列做震源深度分布直方图 (图 4)。对比定位前、后深度分布图可以看出, 定位前约 80% 的地震震源处于地表附近 (其中大部分地震由于受测震台网的监控能力所限没有给出震源深度), 重新定位后震源深度则主要集中在 10~15 km 深度, 约占参加定位的地震总数的 47.5%, 地震序列的平均震源深度为 12.1 km。

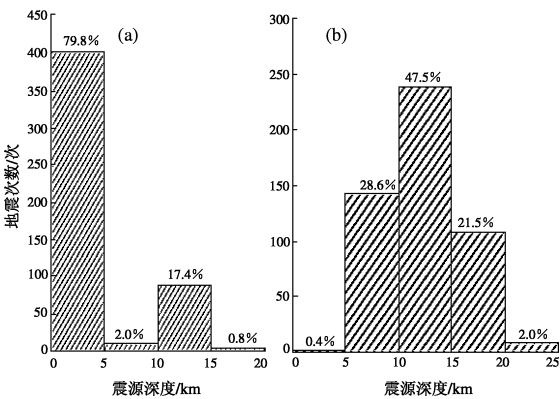


图 4 震源深度分布直方图
(a) 定位前; (b) 定位后

3.3 地震剖面分析

为了更好地分析地震与构造的关系, 我们沿着 $M_s6.1$ 主震震中, 垂直于民乐—永昌隐伏断裂做了 A_1-A_2 剖面 (图 5), 图中我们勾画出了发震断层的轮廓。该剖面为 NNE 走向, 起点为 (38.25°N 100.94°E), 终点为 (38.50°N 100.98°E), 长约 28 km, 横切民乐—永昌隐伏断裂西段, 且穿过 $M_s6.1$ 主震震源区。距剖面起点 11.9 km 处为民乐—永昌隐伏断裂西段 (NWW 向), 12.5 km 处为定位后 $M_s6.1$ 主震位置。

由图 5 可以看出, 民乐—山丹地震主要发生于民乐—永昌隐伏断裂上, 呈现较明显的“楔形”状分布, 其优势分布集中在 10~15 km 深度的层面上, 余震分布在主震 NE 向一侧。根据图中所勾画的发震断层轮廓, 可以得到该次地震发震断层倾向为 NE 向, 倾角为 60° 左右。

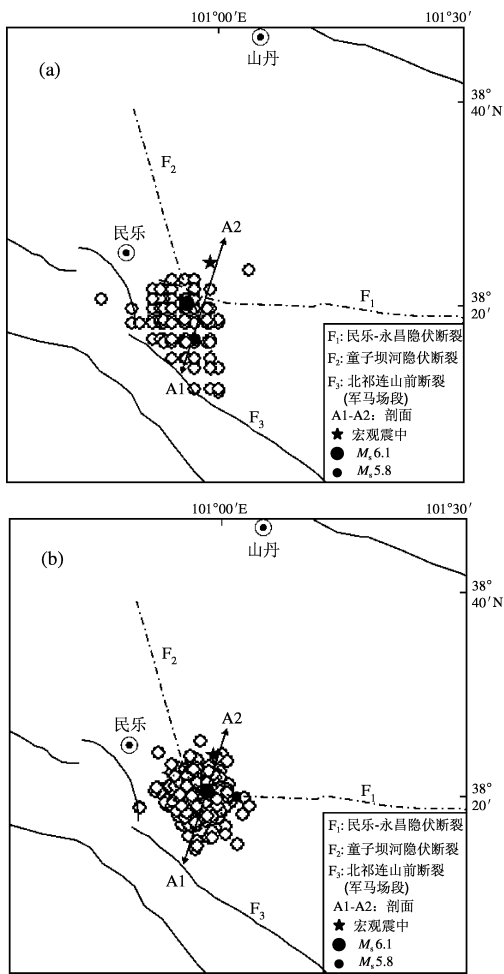


图 3 震中、断裂及剖面分布图
(a) 定位前; (b) 定位后

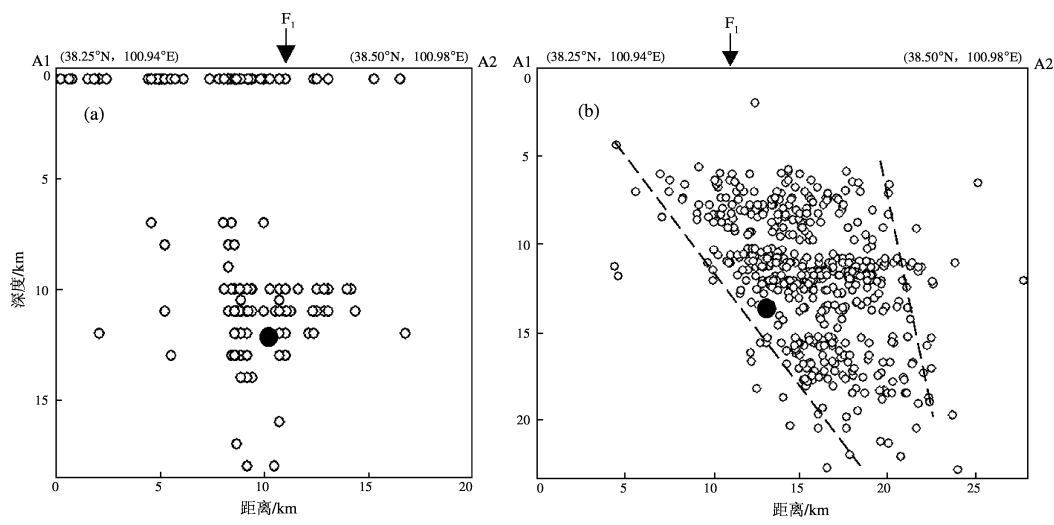


图 5 地震剖面分布图 (实心圈表示 $M_s6.1$ 地震)
(a) 定位前; (b) 定位后

3.4 发震构造分析

此次地震极震区所在发震构造位于河西走廊过渡带内断裂隆起边缘与民乐盆地的交汇部位,同时受到北部阿拉善活动地块 SW向区域应力和南部祁连山活动地块 NE向区域应力的挤压 (国家地震局地质研究所等, 1993; 郑文俊等, 2005)。地震定位后所得的 $M_s6.1$ 和 $M_s5.8$ 主震的微观震中主要沿着民乐—永昌隐伏断裂分布; 余震区位于民乐—永昌隐伏断裂与童子坝河隐伏断裂的交汇部位, 其分布规律与震后烈度考察结果基本吻合, 并且与主震震源机制解显示的逆断层结果相一致 (郑文俊等, 2005; 张洪由等, 2003)。该次地震序列的发震构造主要为民乐—永昌隐伏断裂与童子坝河隐伏断裂所组成的大黄山隆起区前缘逆冲断裂, 定位后的震中分布图 (图 3b) 以及地震剖面分布图 (图 5b) 表明, 其发震构造重点为民乐—永昌隐伏断裂 (F_1), 该断裂具有逆冲性质, 走向 NWW, 倾向 NE, 倾角约为 60° , 而童子坝河隐伏断裂 (F_2) 是引发本次地震序列的重要参与者。

4 结论与讨论

(1) 利用绝对定位遗传算法对 2003 年 10 月 25 日甘肃民乐—山丹地震的主震和余震序列进行了重新精确定位。定位后总的迭代走时标准差约为 0.6 s , 定位精度总体较定位前得到很大提高。定位结果显示地震序列分布集中, 两次主震分别

距离宏观震中约 5 km 和 7.5 km , 与定位前相比有明显的偏离, 并且主要沿着民乐—永昌隐伏断裂 NWW向分布。

(2) 震中定位结果特别是深度定位结果很好地解释了此次地震的发震构造特征。此次地震序列的发震构造主要为民乐—永昌隐伏断裂与童子坝河隐伏断裂所组成的大黄山隆起区前缘逆冲断裂, 重点为民乐—永昌隐伏断裂西段, 该断裂具有逆冲性质, 走向 NWW, 倾向 NE, 倾角约为 60° , 与郑文俊等 (2005) 所得结论吻合。

(3) 我国地震台网的逐步加密和“国家数字地壳网络观测项目”的全面完成, 为基于全局搜索的遗传算法进行地震精确定位的应用奠定了坚实基础, 绝对定位遗传算法在确定中强地震及其序列的发震断层时将会发挥更大的作用。

参考文献:

杜学彬, 叶青. 2004. 2003年民乐—山丹地震前山丹地电中短期—短期前兆变化和无临震显示问题 [J]. 西北地震学报, 26 (4): 334—338.
国家地震局地质研究所, 国家地震局兰州地震研究所. 1993. 祁连山—河西走廊活动断裂带 [M]. 北京: 地震出版社.
李清河, 张元生, 涂毅敏. 1998. 祁连山—河西走廊地壳速度结构及速度与电性的联合解释 [J]. 地球物理学报, 41 (2): 197—209.
王永革, 李鸿吉. 1995. 遗传算法在确定震源位置中的应用 [J]. 地震地磁观测与研究, 16 (6): 1—7.
王夫运, 张先康. 2006. 波形反演遗传算法及其在地震测深数据解

释中的应用 [J]. 地震学报, 28 (2): 158—166.

肖丽珠, 刘小凤, 张小美. 2005. 2003 年甘肃民乐—山丹 6.1 和 5.8 级地震序列类型及地震学参数异常特征 [J]. 地震研究, 28 (1): 28—33.

杨智娴, 陈运泰, 郑月军. 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, 33 (增刊): 129—134.

张洪由, 徐立生. 2003. 2003 年 10 月 25 日甘肃省西部发生 6.1 级和 5.8 级地震 [J]. 国际地震动态, (11): 39.

张希, 王双绪, 崔笃信, 等. 2004. 民乐—山丹地震的区域构造变形背景与中短期前兆 [J]. 中国地震, 20 (3): 238—246.

郑文俊, 何文贵, 赵广坤, 等. 2005. 2003 年甘肃民乐—山丹 6.1、

5.8 地震发震构造及发震机制探讨 [J]. 地震研究, 28 (2): 133—140.

周民都, 张元生, 张树勋. 1999. 遗传算法在地震定位中的应用 [J]. 西北地震学报, 21 (2): 167—171.

周仕勇, 许忠淮, 韩京, 等. 1999. 主地震定位法分析以及 1997 年新疆伽师强震群高精度定位 [J]. 地震学报, 21 (3): 258—265.

Sambridge M S, Drijkoningen G G. 1992. Genetic algorithms in seismic waveform inversion [J]. Geophys J Int, 109: 323—342.

Zhang Y S, Zhou M D, Rong D L, et al. 2004. 3-D velocity structure in the central-eastern part of Qilianshan [J]. ACTA Seismologica Sinica, 17 (3): 272—281.

Accurate Location of the2003 M inle-ShandanM6.1 5.8

Earthquake Sequence

XIN Hai liang¹, ZHANG Yuan sheng², GUO Xiaod², LIW en

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

(2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Science, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

Two earthquakes (M6.1, 5.8) occurred in M inle-Shandan, Gansu, on Oct 25, 2003. In order to obtain the accurate pocations of the earthquake sequence, we used Genetic Algorithm to repbate it and discussed its seismogenic structure combining with geologic data. The result shows that the sequence distributes centrally and two mainshocks distribute along the M inle-Yongchang concealed fault. The focal depths range mainly from 10 km to 15 km, the average 12.1 km. The seismogenic structure is the thrust of the Dahuangshan frontal uplifts constituted by the M inle-Yongchang concealed fault and Tongzibahe concealed fault, and the west segment of the NNW-trending M inle-Yongchang concealed fault is main seismogenic structure.

Key words: M inle-Shandan, accurate earthquake location, Genetic algorithm, seismogenic structure



王福昌 中国地震局防灾科技学院副教授。1997年毕业于曲阜师范大学数学系,获学士学位;2000年毕业于大连理工大学应用数学系应用数学专业,获硕士学位。主要从事多元统计分析和现代最优化方法的应用研究。



郭 晓 中国地震局兰州地震研究所助理研究员。2005年毕业于中国地震局兰州地震研究所固体地球物理专业,获硕士学位。主要从事卫星遥感应用及地震预报研究工作。



赖加成 福建省地震局泉州地磁台助理工程师。1994年毕业于防灾技术高等专科学校(现为防灾技术学院)。主要从事地震地磁监测工作。



曾宪伟 中国地震局兰州地震研究所在读硕士研究生。2005年毕业于青岛大学物理系,获学士学位。主要从事数字化观测数据的处理和分析工作。



莘海亮 中国地震局兰州地震研究所在读硕士研究生。2005年毕业于河北大学物理科学与技术学院,获学士学位。研究方向为地震精定位与地壳三维速度结构。

注:陈立德、刘翔、叶建庆、常祖峰的个人简介已分别刊登在本刊的 Vol.30 No.1 Vol.28 No.4 Vol.30 No.3 Vol.29 No.2