维普资讯 http://www.cqvip.com

第27卷 第1期
2005年3月

西北地震学报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 27 No. 1
March, 2005

2004年12月11日兰州陨石坠落的地震台网记录分析

荣代潞，张元生，李亚荣
（中国地震局兰州地震研究所，甘肃 兰州 730000）

摘 要：利用甘肃省地震局在兰州市区及附近布设的数字地震台网的记录资料，对2004年12月11日兰州陨石坠落的过程进行了初步反演和分析。结果表明，23时36分23秒陨石进入兰州地区26 km的上空，经历过一次较小的爆炸，然后向东北方向坠落，于23时36分42秒在13 km高空发生最终爆炸解体，没有较大陨石体坠落地面。

关键词：陨石；兰州地区；地震记录
中图分类号：P315.63；P185.83　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－0844(2005)01－0017－05

Analysis on the Seismic Data of the Lanzhou Meteorite Falling in Dec. 11, 2004

RONG Dai-lu, ZHANG Yuan-sheng, LI Ya-rong
(*The Earthquake Institute of Lanzhou, CEA, Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: The falling process of Lanzhou meteorite in Dec. 11, 2004 is conversed and analyzed using the seismic data recorded by the Lanzhou temporal digital network set by Seismological Bureau of Gansu Province. The results show that the meteorite came into the sky above Lanzhou through 26 km high at 23:36:23 in Dec. 11, 2004, and a small explosion occurred, then the fireball fell down towards to the north－east direction, arrived its endpoint and exploded and disjointed into small ones at 23:36:42 at 13 km high. No big ones fell down to the ground.

Key words: Meteorite; Lanzhou area; Seismic records

0 引言

2004年12月11日23时36分左右，一个发出夺目亮光的火球状物体从兰州上空飞过，兰州夜空瞬间亮如白昼，并传来巨大的爆炸声，人们感到强烈的振动。此事经媒体报道后，在兰州和全国引起强烈反响，同时也引起科学界的关注。据《兰州晨报》报道[1]，兰州地区某雷达站当时曾监测到这一事件，确认飞行物往东北方向飞去。西北师范大学长期从事基础天文教育的刘亚楠教授指出，这可能是一个小天体或宇宙尘埃穿过了大气层。经初步判断，这是一个陨石在兰州上空燃烧坠落爆炸事件。

世界上对较大陨石向地球的坠落给予极大的关注和研究。通常利用目击资料、照相记录、次声波记录和地震台网记录等来研究陨石的坠落过程[2-5]。地震资料是分析研究陨石坠落过程的重要基础资料之一。本次兰州陨石坠落事件除目击资料外，只有位于兰州地区的一个地震台网获得了完整的记录资料，这也是国内迄今为止获得的唯一一次记录陨石坠落的地震资料。本文拟介绍地震台网的记录资料并利用这些资料对这次兰州陨石坠落过程进行初步分析。

1 地震记录资料

2004年5月，为监测兰州地区的地震活动性，甘肃省地震局在兰州及附近地区布设了一个临时地

收稿日期：2005-03-01
* 中国地震局兰州地震研究所论著编号：LC20050009
作者简介：荣代潞(1946－)，男(汉族)，四川达州人，研究员，现主要从事地球物理研究.

维普资讯 http://www.cqvip.com

震台网，共包括9个台站，台站分布如图1。其中新建7个台，GXT和ANT是利用了甘肃省地震局原有的数字台网中的台站。12月11日，9个台站除DJS台因仪器电源故障没有获得记录外，其余8个台都获得了陨石坠落的三分向的数字记录(图2)。

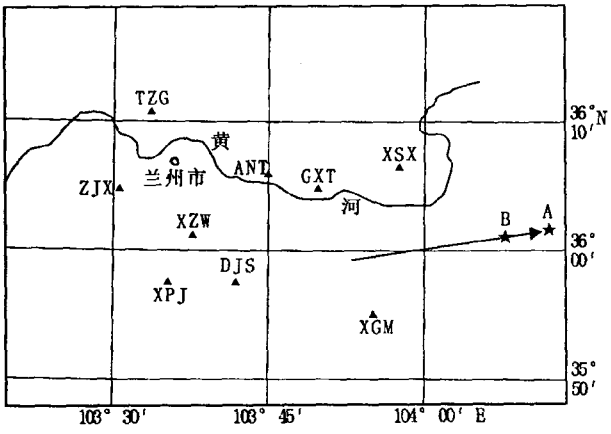

图1 兰州临时数字地震台网台站位置，陨石飞行路线和爆炸点

Fig. 1 Station location of Lanzhou temporal digital network, the flight path of the meteorite and the exploding point.

一些研究者分析过世界其他地区陨石坠落事件的地震记录。例如P. G. Brown[3]在2000年5月6日Moravka陨石坠落的地震记录分析中指出，由于陨石高速(超声速)坠落，在所有台站首先到达的波是陨石在终点(爆炸)产生的空气冲击波，即以斯内尔定律决定的临界角入射到地面，折射进入地下，以地震波的速度(在地表层大约是2～6 km/s)传播到达台站的P波(称为P_{term})；然后依次是从其他的较远的入射点到达的P波；从地表传播到达台站的瑞利波；在终点爆炸产生的、直接到达台站的空气冲击波。瑞利波的传播受到传播路径介质性质和地形的强烈影响，由于它的频率比爆炸引起的冲击波低，一般可以用频谱分析的方法发现它的存在[5]。直接到达台站的空气冲击波由于没有经过地表介质的衰减，其幅度最大，具有较高的频率。另外，在陨石最终爆炸前，可能有一些较小规模的爆炸事件，它产生的空气冲击波直接到达地震台站，在以后的地震记录中形成一系列的较小振幅的事件记录。P. G. Brown 举出两个台站的典型地震记录如图3所示。

为了判断本次陨石事件中台站记录波形的性质，首先，我们将台站记录波形中最大振幅的到时看作是陨石撞击地面产生的“地震波”的“P”波到时，然后按照一般的地震定位方法进行反演。结果是分别得到的“地震波”的传播速度都在300～400 m/s之间。这显然与根据天然地震和人工地震探测资料得到的地震波的传播速度不相符。我们还在某一地震台附近进行了重物坠地实验，得到的因重物坠地产生的振波的传播速度至少在1 000～1 300 m/s以上。

其次，我们对某一台站的天然地震记录和附近地面爆破记录与本次陨石事件的记录进行了对比。根据初步估计，XSX台距离陨石爆炸最近，该台记录到的一次地震事件、附近地面爆破事件和本次陨石事件的记录一并列出，如图4所示。可以看出，本次陨石事件的记录完全不同于地震和地面爆破记录。

根据以上分析，我们认为地震仪对本次陨石坠落事件的振幅最大的记录不是陨石坠落撞击地面产生的地面振动，而是陨石坠落最终爆炸解体所产生的空气冲击波直接到达地震台站所引起的振动。典型的一个台站的记录示于图5。

2 地震记录资料反演

2.1 反演方法

考察各台记录波形，除了最终爆炸产生的最大振幅的“震相”外，我们发现了P_{term}、瑞利波以及最终爆炸前的较小规模爆炸产生的事件的“震相”。其中最终爆炸产生的最大振幅的“震相”最易识别，判读较准，我们可以据此首先反演陨石的最终爆炸的位置。

设声波在空气中的传播速度为v，陨石的位置为(x,y,h)，其中x,y为以某一地点为坐标原点时的平面位置，h为陨石的高度，台站位置为(x_i,y_i,h_i)。则陨石产生的冲击波在某一地震台站的计算到时为

$$t_i^{cul} = (t_0 + \Delta t) + \frac{s_i}{v} \tag{1}$$

$(t_0+\Delta t)$为陨石产生冲击波的初始时刻；t_0为任意设定的初始时间；s_i为陨石到台站的距离。

$$s_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (h_i - h)^2} \tag{2}$$

设某一台站的观测到时为t_i^{obs}，则可以设定目标函数为

$$T(x,y,h,v,\Delta t) = \sum_{i=1}^{6} (t_i^{obs} - t_i^{cul})^2 \tag{3}$$

在参数$(x,y,h,v,\Delta t)$的一定范围进行搜索，在目标函数为最小的条件下，就可以根据记录波形的到时反演得到陨石的位置(x,y,h)和产生冲击波的初始时刻Δt，以及冲击波在空气中的传播速度v，

维普资讯 http://www.cqvip.com

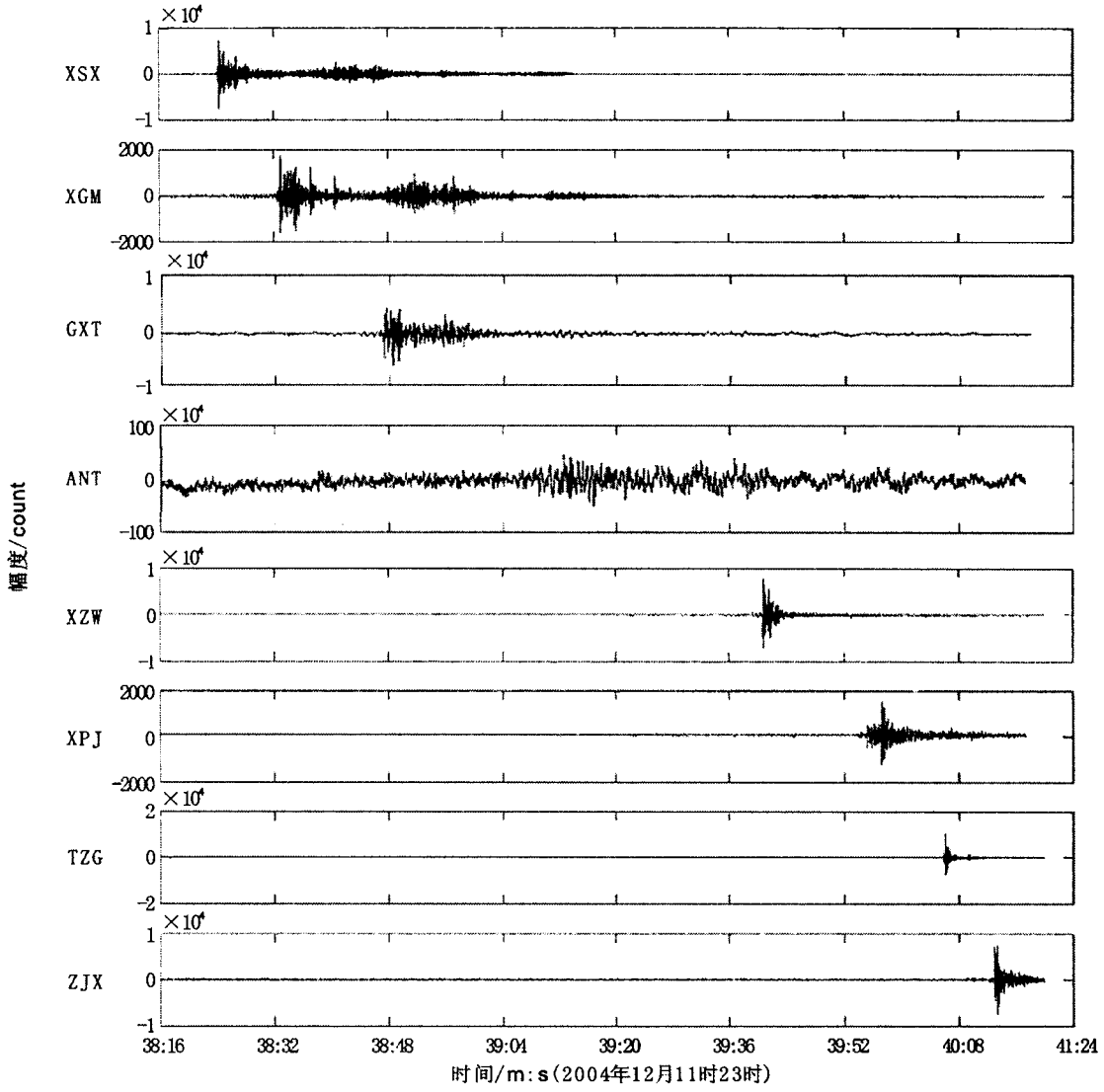

图 2　8 个台的垂直向记录波形

Fig. 2　The vertical recorded wave of 8 stations.

同时可以计算出各台到时的平均残差。得出直角坐标参数(x,y)后,可以根据原点的地理位置换算成地理坐标,由于考虑了地震台站的海拔高程,得出的高度 h 为海拔高度。

陨石在最终爆炸前的一些较小规模的爆炸的位置可以显示陨石的坠落过程。根据陨石坠落的路径,这些爆炸的直达空气冲击波在一些台站形成较小振幅的"事件"记录,由于陨石坠落的速度大大超过声速,这些"事件"记录位于终点爆炸产生的最大振幅之后。例如在 XGM 和 XSX 两个台站的记录中可以清楚地发现这些"事件"的记录波形。因此,我们在读出台站对这些事件的到时记录后,可以用上述方法反演这些爆炸的位置,从而大致勾画出陨石的坠落路径。

2.2　反演结果

我们称陨石最终爆炸的位置为 A,到达地震台产生的震相为 P_a;紧接着最终爆炸的前一个较小爆炸的位置为 B,震相为 P_b。各个地震台记录的到时如表 1;反演结果见表 2。A 点和 B 点位置及陨石飞行路线见图 1 所示。

表 1　各个地震台记录的到时(2004-12-11)

台站代码	P_a	P_b
XGM	23:38:32.9202	23:38:33.0209
XSX	23:38:24.4508	23:38:25.0285
XPJ	23:39:57.1115	—
ZJX	23:40:12.2511	23:40:13.2279
TZG	23:40:06.0197	23:40:06.2439
DJS	—	—
XZW	23:39:41.0332	23:39:41.0624
GXT	23:38:47.1600	—
ANT	23:39:08.7000	—

维普资讯 http://www.cqvip.com

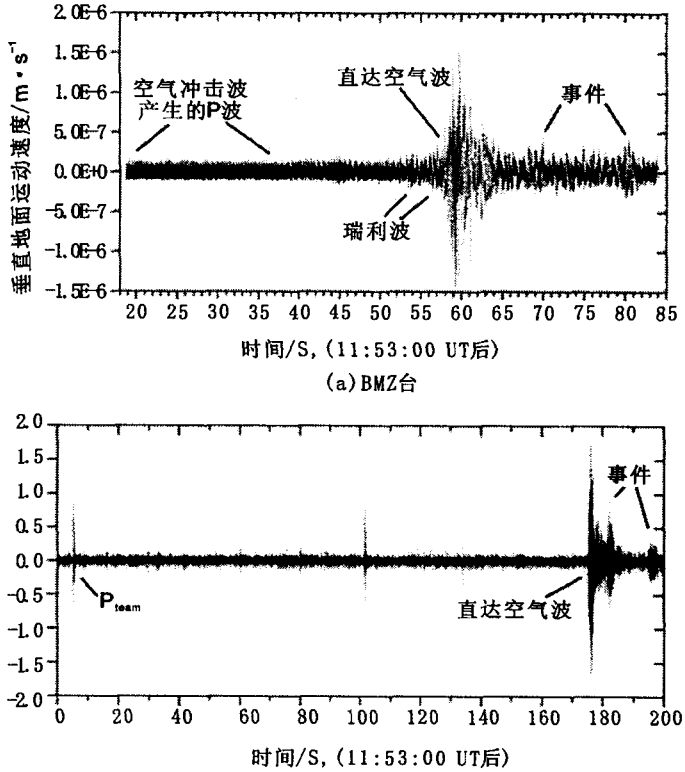

图 3 Moravka 陨石的地震台记录(据文献[3])

Fig. 3 The seismic records of the Moravka meteorite (according to [3]).

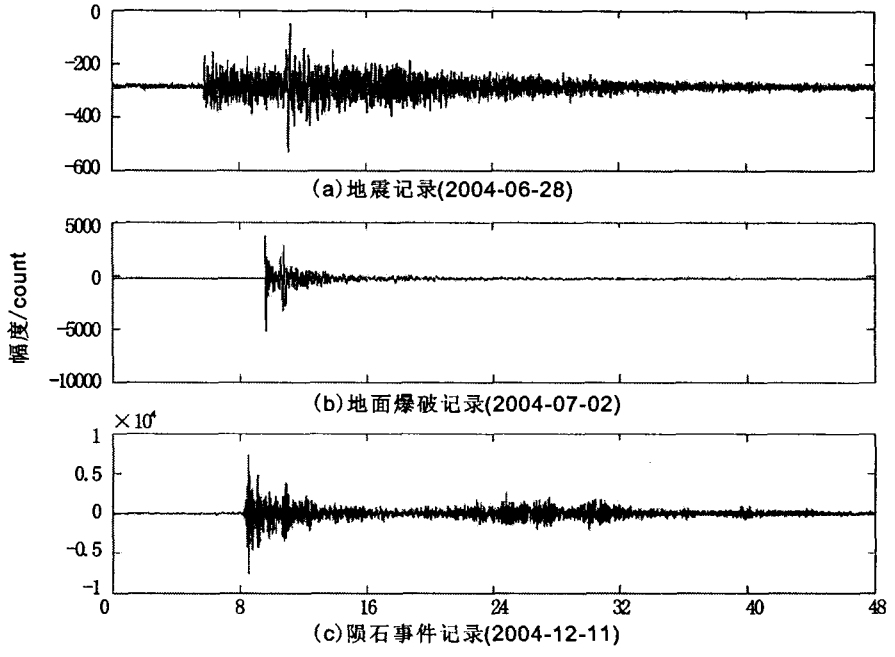

图 4 XSX 台三种事件记录的对比

Fig. 4 Comparing of three kinds of event record of XSX.

3 讨论和结论

(1) 据反演结果(图 1),陨石进入大气层后,经过 26 km 的高度向东北方向坠落,到达 13 km 高度时发生最终爆炸。这与雷达监测的坠落方向是基本

维普资讯 http://www.cqvip.com

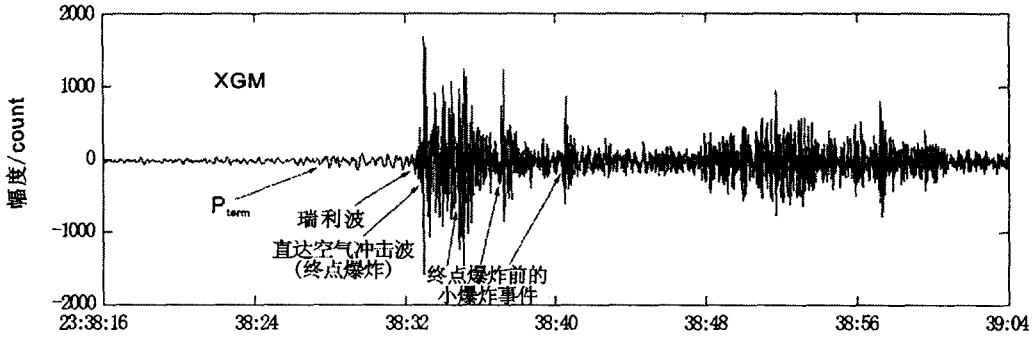

图 5　XGM 台的陨石事件记录波形

Fig. 5　The recorded wave of XGM station of the Lanzhou meteorite.

表 2　反演结果(原点的地理位置:东经 103.5°,北纬 36.0°)

位置	x	y	h	地理位置		冲击波(爆炸)	冲击波	平均残
序号	/km	/km	/km	东经	北纬	产生时刻	速度/m.s^{-1}	差/s
A	78	3	13	104°12.0867′	36°01.6187′	23:36:30	320	0.62
B	70	2	26	104°07.7701′	36°01.0791′	23:36:23	230	0.35

吻合的。

(2) 关于反演得出的声波传播的速度。我们知道,声波在空气中的传播速度与温度和风向、风速有关[6]。0 ℃时的声波速度是 331.45 m/s。大气层中的温度与大气层的高度有关。一般从地面向上,在对流层中温度是逐渐降低的,在其顶部可降至 200 ℃K左右;在更高的平流层中温度则随高度增加。另外不同高度的大气层中的风速也不相同。如果有陨石坠落时高空大气层的温度和风速资料,我们可以知道温度和风速与大气层高度的函数关系,然后把声波速度当成已知参量对其它未知参量进行反演,可以得到更为精确的结果。遗憾的是我们没有当时高空大气层的资料,只能把声波速度当成未知量一起参加反演,所得出的声波速度是冲击波在空间传播路径上的平均值。不过可以看出,从 26 km 高度到达台站的平均声波速度是 230 m/s;从 13 km 高度到达台站的平均声波速度是 320 m/s,大致符合声波在大气层中的传播规律和数值范围,是合理的。

(3) 据地震仪记录波形分析,我们认为,陨石在高空爆炸解体,没有较大物体坠落地面。这一结论也得到下述事实的支持:即陨石坠落事件发生后,引起新闻媒体、天文爱好者和科学界的极大关注,不少人(包括媒体工作者、爱好者和专业人员)在可能的坠落地点进行了较长时间的搜索无果。当然不排除有较小的碎片坠落地面。

(4) 本文仅用地震仪记录资料对此次兰州陨石坠落事件进行了分析研究。由于其它记录资料(例如次声波记录,照相记录等)的缺乏,加上我们的专业限制,本文的研究仅是初步的。

致谢:本项研究是在兰州地震研究所(甘肃省地震局)领导的安排和关心下完成的,特别是王兰民所(局)长(研究员)、杨立明副所(局)长(研究员)给予了直接的关心和支持;在调研和收集资料过程中得到甘肃省地震局监测中心、兰州观象台的大力协助,特别要感谢康云生、何少林、李建、张树勋、张淑贞等的热心帮助;感谢与许康生、姚同福、尹志文、王斌等的有益的讨论。

[参考文献]

[1] 唐学仁,邢剑扬. 陨石夜袭兰州追踪报道[N]. 兰州晨报, 2004-12-13,A3.

[2] Anglin F M, Haddon R A W. Meteoroid sonic shock—wave—generated seismic signals observed at a seismic arry[J]. Nature, 1987, **328**(13): 607—609.

[3] Peter G Brown, Douglas O Revelle, Edward Tagliaferri, et al. An entry model for the Tagish Lake fireball using seismic, satellite and infrasound records[J]. Meteorics & Planetary Science, 2002, **37**: 661—675.

[4] Peter G Brown, Kalenda P, Douglas O Revelle, et al. The Moravka meteorite fall: 2. Interpretation of infrasounic and seismic data[J]. Meteorics & Planetary Science, 2003, **38**(7): 989—1 003

[5] Douglas O Revelle, Peter G Brown, Spurny P. Entry dynamics and acoustics/ infrasounic/ seismic analysis for the Neuschwanstein meteorite fall[J]. Meteorics & Planetary Science, 2004, **39**(10): 1 605—1 626.

[6] 赵九章, 等编著. 高空大气物理学[M],北京: 科学出版社, 1965. 15,72—74.