

秦晶晶, 鄯少英, 姬计法, 王宏伟, 魏学强, 李稳, 田一鸣. 2020. 非纵弯线气枪震源陆地反射资料叠加成像. 地震学报, 42(5): 592–603. doi: 10.11939/jass.20190157.
Qin J J, Feng S Y, Ji J F, Wang H W, Wei X Q, Li W, Tian Y M. 2020. Stack imaging of non-longitudinal bending line of land reflection seismic data generated by airgun source. *Acta Seismologica Sinica*, 42(5): 592–603. doi: 10.11939/jass.20190157.

非纵弯线气枪震源陆地反射资料叠加成像^{*}

秦晶晶 鄯少英[†] 姬计法 王宏伟
魏学强 李 稳 田一鸣

(中国郑州 450002 中国地震局地球物理勘探中心)

摘要 为探索大容量气枪震源在深部地震探测中的应用, 2015 年 10 月在安徽铜陵段开展气枪流动激发试验. 该试验采用沿长江航道激发、岸边固定排列接收的工作方式, 因受长江航道及江岸地形的影响, 加上原始记录中干扰波发育、静校正问题突出等, 基于常规的共中心点叠加的数据处理方法已不再适用. 为此, 开展了针对性的数据处理方法研究. 本文采用初至波层析静校正、叠前多域多道集去噪以及非纵弯线共反射面元叠加等一系列处理技术, 结果显示所获测线经过区域的深部构造叠加剖面较清晰.

关键词 气枪震源 非纵弯线 共反射面元叠加 安徽铜陵试验

doi: 10.11939/jass.20190157 中图分类号: P315.2 文献标识码: A

Stack imaging of non-longitudinal bending line of land reflection seismic data generated by airgun source

Qin Jingjing Feng Shaoying[†] Ji Jifa Wang Hongwei
Wei Xueqiang Li Wen Tian Yiming

(Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to explore the application of large-capacity airgun source in deep seismic reflection exploration, airgun flowing excitation experiment was carried out in the Tongling area of Anhui Province in October of 2015. The experiment adopts the working mode that the source is excited in Yangtze River channel and reflected signal is received in a fixed array along the shore. Due to the influence of the Yangtze River channel and river bank topography, coupled with development of interference wave and the prominent problem of static correction in the original records, the conventional processing method of common middle point superposition is no longer applicable in this region. Therefore, we carried out a targeted research on data processing methods. And a series of processing methods are applied, such as tomographic static correction, multi-domain and multi-channel joint de-noising and common reflection surface stacking of non-longitudinal bending line data. The results show that the obtained stacking

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(41674140)和中国地震局物探中心青年基金(YFGEC2017003)共同资助.

收稿日期 2019-10-16 收到初稿, 2020-01-14 决定采用修改稿.

[†] 通信作者 e-mail: redbeancumt86@163.com



section of deep structure is clear in the area where the survey line passes through. The results of this study can provide technical support and methodological reference for similar researches in other rivers using airgun source in the future.

Key words: airgun source; non-longitudinal bending line; common reflection surface stacking; Auhui-Tongling experiment

引言

近年来,我国科研人员针对人工激发源开展了大量的野外探索试验.大容量气枪震源作为一种重复性好、绿色环保、性能可靠的深部探测源(唐杰等, 2009),随着气枪理论技术的不断发展和完善,被逐渐应用于深部地下结构的探测中.相比其它类型的人工震源,大容量气枪震源具有以下优点:作业过程绿色环保、安全;具有高度可重复性;激发地震波的能量具有丰富的低频信号;激发能量大(陈颢, 李宜晋, 2007; 林建民等, 2008; 陈颢等, 2017).国内外诸多大容量气枪震源用于深部结构探测的成功实例,均证实了气枪震源用于深部地壳结构探测的可行性(Brocher *et al.*, 1995; Okaya *et al.*, 2002; 赵明辉等, 2004; 丘学林等, 2007; 陈佳等, 2016; 魏斌等, 2016).但这些成功实例中的气枪震源均是在静止的水体内激发,且侧重于宽频带地震台阵等方面的研究,对深部复杂的地质结构和断裂特征还不能精细刻画.为探索大容量气枪震源在深部构造探测中的应用,在“地学长江计划”的支持下,中国地震局联合多家单位于 2015 年 10 月在安徽铜陵段联合开展了气枪震源流动激发试验.本次试验不仅实现了大容量气枪震源在长江领域内的首次激发,同时也扩大了气枪震源的应用范围,为研究该区域地下深部结构提供了丰富的反射探测资料.

本次反射地震数据采集采用沿长江航道激发、岸边固定排列接收的工作方式,由于受长江航道及江岸地形的影响,激发线和接收线均为弯曲测线,且两者存在一定的水平距离,是典型的非纵弯曲测线.因此,常规的共中心点叠加二维数据处理方法已不再适用,这就需要我们探寻一套适合于非纵弯曲测线数据的处理方法.目前,在油气开发和煤田领域中,弯曲测线的应用实例较多,也取得了较好的应用效果(刘建芳等, 2007; 汪铁望等, 2010; 杨庆道等, 2011),但对水上激发、陆地接收这种特殊观测方式的弯曲测线数据处理的应用还很少.鉴于此,本文基于“地学长江计划”安徽试验得到的反射地震数据,对其进行初至波层析静校正、叠前多域多道集去噪以及非纵弯线共反射面元叠加等处理方法研究,藉此探讨大容量气枪震源开展深部构造精细成像的应用效果,同时为气枪震源在其它江河领域内反射地震探测的资料处理方面提供技术支撑和参考.

1 研究区地质构造和铜陵试验概况

1.1 研究区地质构造概况

长江中下游地区是我国东部重要的成矿带,是以襄樊—广济断裂、郯庐断裂带以及阳新一常州断裂(江南断裂)为界的一个南西狭窄、北东宽阔的“V”字型区域(常印佛等, 1991).在中晚侏罗世—早白垩世时期,由于受古太平洋板块的不断斜向俯冲挤压伴随的强烈陆内造山运动以及随后的伸展作用,长江中下游地区形成了断隆(九瑞、安庆—贵池、铜陵、宁镇等矿集区)与断凹(庐纵、宁芜等矿集区)相间的构造格局(周涛发等, 2008; 吕庆田等, 2014; 陈安国等, 2017).

研究区位于长江池州—铜陵段，构造分区上隶属扬子克拉通东北缘，为华北板块与扬子板块的结合部位(孙涛等, 2018). 已有研究表明，扬子地块具有“一盖多底”的地壳结构特征，在不同的构造单元具有不同性质的基底，其中沿江地区属于董岭式基底，即由古、中元古界董岭岩群构成的双层基底结构(常印佛等, 1996; 吴言昌等, 1999). 研究区从震旦纪至早三叠世一直处于稳定的盖层发育时期，未发生过重大的地壳运动，除缺失下、中泥盆世地层沉积外，各时代地层发育较完整(汤井田等, 2014; 兰学毅等, 2015); 中晚三叠世时期受印支运动影响，研究区经历了强烈的陆陆碰撞造山运动、板内变形构造活动及其相关的伸展作用，形成了长江中下游成矿带现今的构造面貌(酆少英等, 2020).

1.2 安徽铜陵试验概况

2015 年 10 月，中国地震局联合多家单位利用移动式气枪震源沿长江安徽段开展了气枪流动激发试验. 深地震反射剖面位于安徽省池州—铜陵段，测线西南端起于铜陵市枞阳县，沿长江航道走向向北沿岸布设，北西端终止于芜湖市无为县，测线长度约为 54 km. 气枪震源船按固定时间间隔沿长江航道进行激发，激发间距在 100—150 m 之间. 地震波接收使用 10 Hz 的检波器串(每道 12 个)，在长江江堤上共布设 1 802 道，道距为 30 m. 使用法国生产的 428XL 数字地震仪，采样间隔为 4 ms. 在气枪震源激发之前，首先进行地震仪器和气枪激发装置的遥控链接试验，目的是确保在正式数据采集时，气枪船和仪器车能够同步进行地震波的激发和接收. 深地震反射激发线和接收线如图 1 所示.

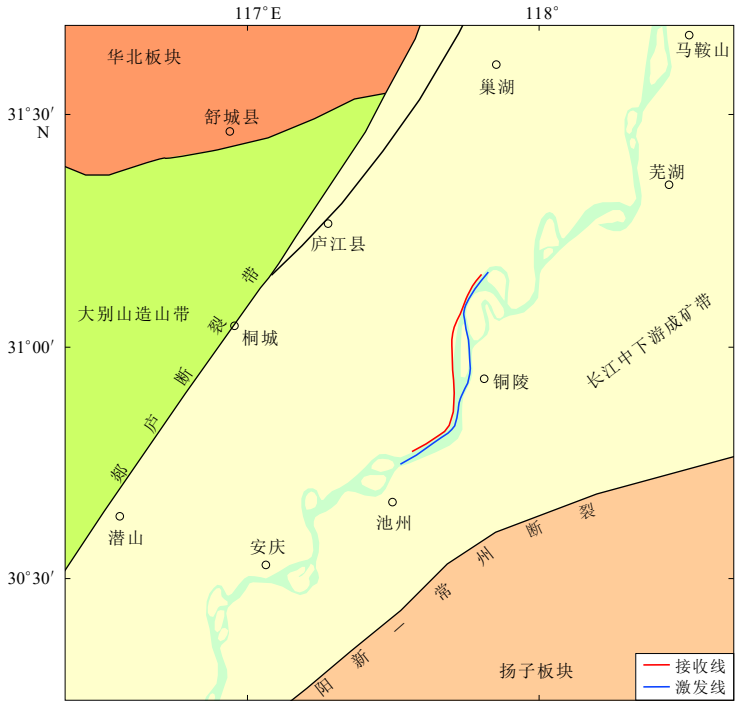


图 1 安徽铜陵气枪试验测线位置图

Fig. 1 Location of seismic lines of airgun experiment in Tongling, Anhui Province

2 数据处理方法

由于受长江航道及江堤地形的限制,测线布设只能沿着航道进行,因此造成激发点与接收点不在一条直线上,这与常规的二维纵测线观测存在很大的差别,给资料处理也带来了一定的难度。根据获得的原始地震资料特点分析,资料处理面临的问题主要包括以下几个方面:①原始记录信噪比低,能量差异较大,有效反射信号能量弱;②静校正问题严重;③测线部分段弯曲度较大,激发点和接收点中心分布较分散,对覆盖次数的均匀性以及共中心点(common middle point,缩写为CMP)同相叠加会产生影响。针对上述问题,本次数据处理中采用的关键处理技术包括静校正、噪声压制、CMP中心线的选取以及叠加成像等。

2.1 静校正

测线中段激发点与接收点相距较远,缺失近偏移距的初至波信息,加之江上激发、陆地接收的工作方式,均造成研究区内的静校正问题较为严重,使用常规的静校正方法很难获得理想的处理效果。通过对多种静校正方法的处理效果进行分析,最终决定采用基于初至波的层析静校正技术来解决该区资料的静校正问题,效果较为显著。相比折射波静校正而言,层析静校正方法不受地表及近地表纵横向速度变化、地下界面倾斜等因素的限制,是一种基于非线性初至波以及较小的速度单元划分方法,能够较好地解决长波长问题,同时有效真实地反映地下构造特征,因此较适合于复杂的近地表地区。

本次实际资料处理中,以二维非纵弯线的观测系统为基础,通过建立三维速度模型并采用拟三维静校正计算方法,获得了面元中心线分布范围内的速度场空间变化规律以及炮点和检波点的静校正量。本项初至波层析成像的流程及所采用方法主要包括:①初至时间拾取,尽可能地拾取所有偏移距的初至波信息;②建立初始速度模型及网格离散化,文中采用横向15 m、纵向40 m、深度10 m的网格对速度面元进行离散;③射线追踪以及剩余时差的计算;④多次迭代反演,直到理论走时与实际走时的剩余误差收敛,其反演得到的速度模型即为最终的层析结果;⑤给定风化层速度、厚度等空间展布数值,计算炮点和检波点的静校正量并将其应用于单炮记录和叠加剖面中。

图2为应用初至波层析静校正前、后的单炮记录对比图,可见:0—40道之间的初至波形态弯曲(图2a),经初至波层析校正后(图2b),单炮初至较为光滑,局部跳变得到了很好的改善,层间关系也变得更为清晰。初至波层析静校正方法不仅较好地解决了该区反射资料的静校正问题,还可以获得0—300 m深度范围内的近地表P波速度结构(图3),为后续的速度分析奠定良好的基础。

本次实际采集得到的是二维测线数据,层析速度反演的基本思想是通过定义二维非纵弯线的观测系统来建立三维速度模型,以获得拟三维数据体,从而进行三维层析速度反演;之后,根据选定的面元中心线抽取该分布范围内的速度结构剖面。图3是利用初至波层析反演方法得到的近地表P波速度结构,该图清晰地显示了浅层P波速度分布和地下界面的展布形态,总体上呈现出纵向成层、横向凹陷相间的起伏变化特征。深度100 m以浅的近地表P波速度一般为1 500—3 000 m/s,局部地段可达4 000 m/s;在桩号30—34 km之间出现了低速凹陷,P波速度小于2 500 m/s,此现象有可能与缺少近偏移距的初至波有关。

2.2 多域多道集联合去噪

由于受激发和接收条件等因素的影响,原始单炮记录(图4a)中发育有各类陆地和水域

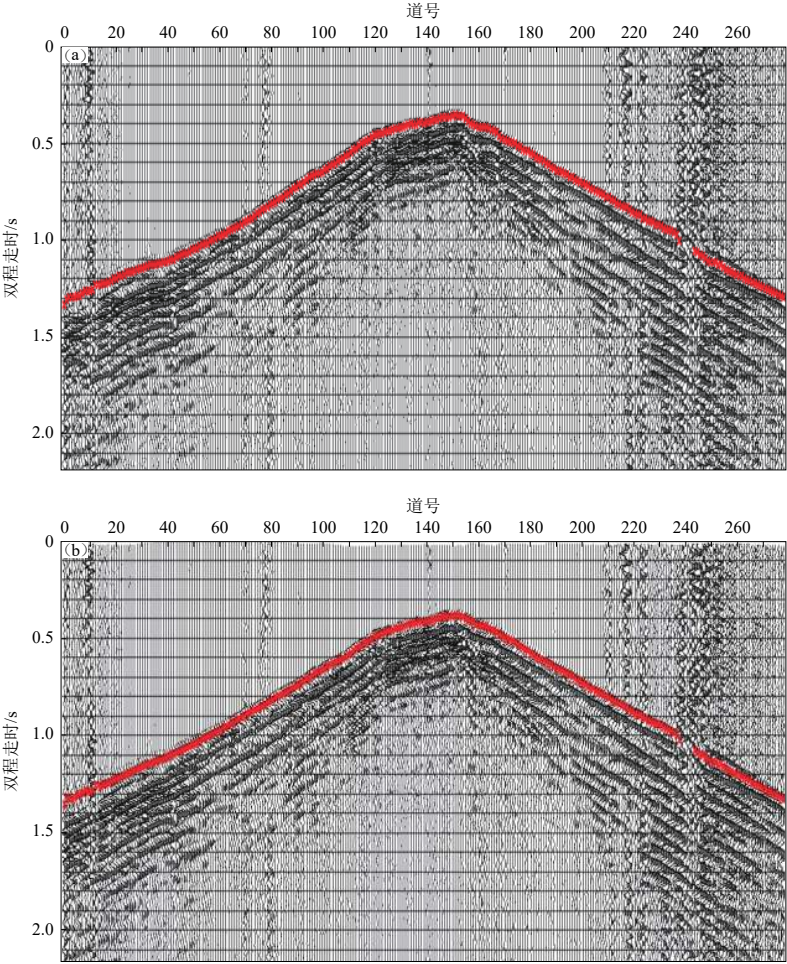


图 2 应用层析静校正前(a)、后(b)的单炮记录对比图

Fig. 2 Comparison of shot records before (a) and after (b) tomography static correction

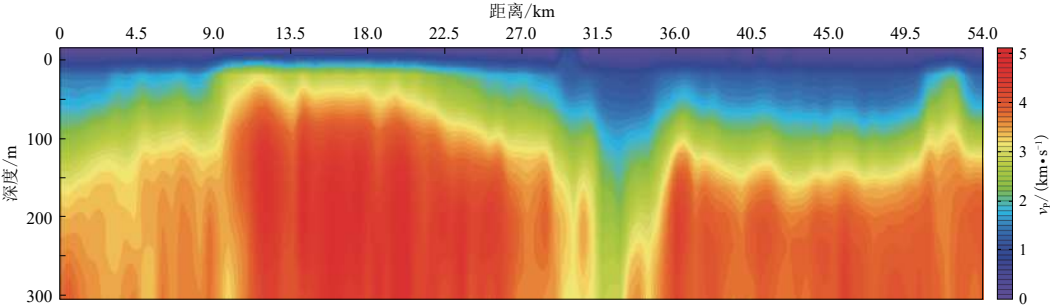


图 3 沿面元中心线的近地表 P 波速度结构

Fig. 3 Near surface P-wave velocity structure along midpoint line of common center bins

干扰波,有效反射波信号很难被辨识,导致原始资料信噪比较低.因此,数据处理时,需根据不同干扰波的特点,采用叠前多域多道集联合去噪方法对其进行针对性的压噪处理.目的

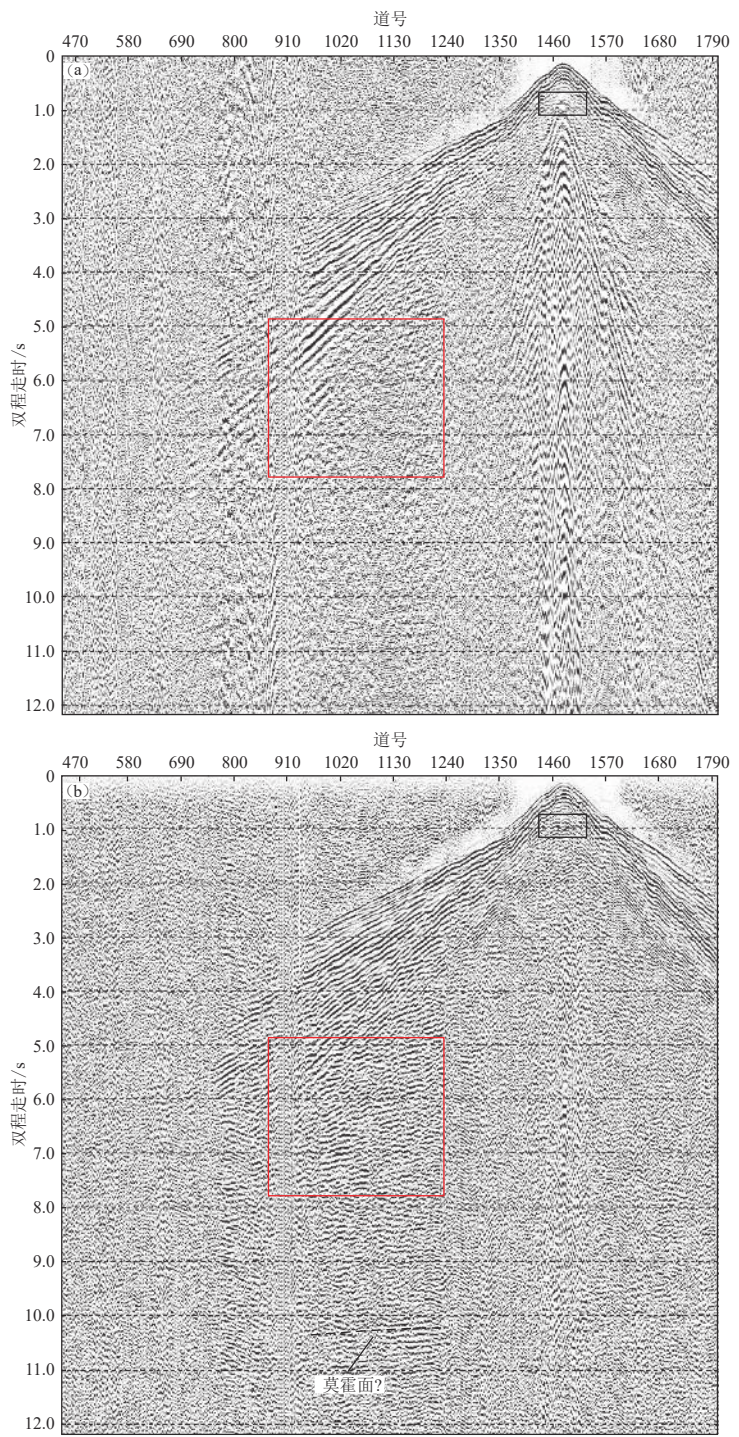


图 4 多域多道集联合去噪前(a)、后(b)的单炮记录对比图

Fig. 4 Comparison of shot records before (a) and after (b) multi-domain and multi-channel de-noising

是保证压制噪声的同时，尽最大限度地保留有效波信号。根据原始单炮记录中干扰波的特点，本次压制噪声采用的主要手段有：手工剔除坏道、坏炮；通过分频去噪技术消除强振幅

表 1 去噪方法和参数

Table 1 De-noising methods and related parameters	
处理方法	处理参数
时变带通滤波	0—6 s (8—40 Hz); 6—8 s (6—30 Hz); 8—30 s (4—25 Hz)
自适应面波压制	频率范围为0—6 Hz, 给定速度500 m/s
f - x 频率域随机 噪声衰减	横向道数151, 时窗500 ms, 增益窗口1 000 ms

淹没. 地震记录上的初至波在近炮点处具有震相明确、易于拾取的特点; 在远道处(450—750 道), 由于受到各类环境干扰以及激发能量的限制, 剖面上基本看不到任何相关地震波的信息. 从记录剖面来看, 原始资料的信噪比较低, 很难分辨出有效反射波信号. 图 4b 为多域多道集联合去噪压制后的单炮记录, 可见: 浅部近炮点处, 被面波淹没的有效反射信号得以清晰显现; 在 910—1240 道, 双程走时处于 4.0—11.0 s 范围内可识别出多组有效反射波组, 其中, 双程走时为 10—12 s 的反射波组可能是来自莫霍面的反射波. 通过对比发现, 压制后的单炮记录, 剖面信噪比得到了明显的提高, 有效反射信号和初至波能量也得到了很好的改善和保护.

2.3 叠加成像

2.3.1 面元线选取

从测线位置分布图(图 1)可以看出, 测线方向变化频繁且复杂, 部分测线弯曲度较大, 近似于 90°, 加上激发点和检波点中心分布发散, 难以形成有效的共中心点道集, 不能满足反射地震处理中共中心点叠加的条件. 因此, 如何合理地选取面元中心线是处理该区反射地震资料的关键. 理论上, 定义的每一个 CMP 点的中心位置与实际反射散点的中心位置保持一致, 处理得到的叠加剖面才能真实地刻画地下构造, 但在实际操作中这样处理过于繁琐, 且难以做到.

为此, 数据处理时, 我们引入三维反射地震共中心面元来代替二维共中心点的概念. 采用弯曲测线几何库定义的观测系统来分析共中心面元分布最集中位置, 以此作为炮检中心分布的中心线.

根据炮点与检波点的实际位置关系, 分析讨论不同反射角、不同深度情况下的共中心点分布范围及单位面元的覆盖次数. 为了减少其它因素对结果的影响, 假设地下介质为水平层状结构, 分别计算深度为 5, 10, 25, 35 km 时反射角为 30°, 45°和 60°的共中心点分布, 其结果如图 5 所示.

由图 5 可以看出: ① 面元整体上呈窄条带状不规则分布, 西南部的反射散点分布范围较大, 中部(即炮点与检波点相距最远处)的面元分布范围最小, CMP 面元缺失较为严重, 出现 CMP 面元相交的现象, 到了东北部, 面元分布范围变窄; ② 随着地层深度或反射角(或炮检距)的增大, 面元分布范围也随之增大. 总的来看, 无论反射角和地层深度怎样改变, 面元相对集中区域总是分布在共中心面元中心附近. 因此, 为了兼顾地下不同方位角、不同深度的成像效果, 我们最终选择沿着 CMP 面元中心连线方向进行后续的资料处理.

2.3.2 面元大小的选择

除了选择面元中心线之外, 还有一个重要因素就是共反射面元的网格划分. 如何合理地

噪声; 以单频波衰减压制单频工业电干扰; 使用自适应面波衰减和 f - x 频率域随机噪声衰减方法来压制面波、线性干扰、随机噪声等. 表 1 给出了本次数据处理中所用去噪方法及参数.

从原始记录剖面(图 4a)可以看出: 近道处的面波较为发育, 有效波信号已被严重

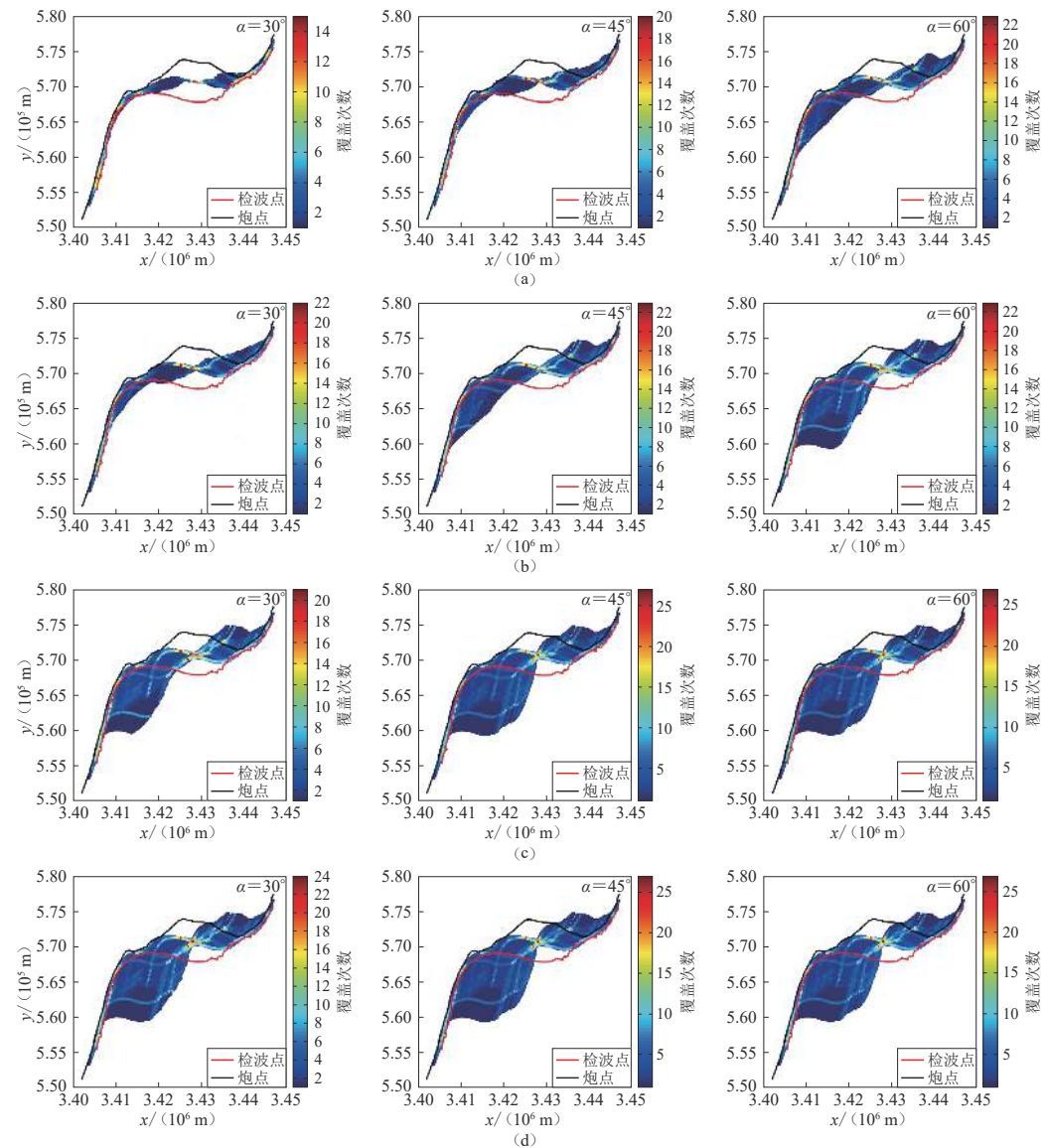


图 5 不同深度 h 上不同反射角 α 的面元分布及覆盖次数图

Fig. 5 Distribution of bins and folds with different depths h and reflection angles α

(a) $h=5$ km; (b) $h=10$ km; (c) $h=25$ km; (d) $h=35$ km

选取面元网格大小,对最终剖面的叠加效果同样起到至关重要的作用.如果共反射面元选取过大,则有可能将来自不同构造位置的共中心点选入一个道集内,同一面元内各道不能同相叠加,因而达不到增强有效反射、消除干扰的目的;如果面元选取过小,则会因同一个共中心面元内参与叠加的道数较少,覆盖次数低,同样起不到增强有效反射的效果.

数据处理时,我们沿着面元中心线按照固定的面元长度和面元宽度进行网格化,平行于面元中心线的面元边长(定义为面元长度)通常设定为道距的二分之一,垂直于面元中心线的面元边长(定义为面元宽度)需根据目的层的埋深和倾角等因素合理地取值.文中试验了

多种面元网格参数，经分析对比及综合考虑，最终选取 15 m×6 km 的面元大小来进行共反射面元的同相叠加。

2.3.3 速度分析

合理拾取地震波的叠加速度是获得良好地震叠加剖面以及计算反射界面埋深的关键。为获得剖面沿线近地表至莫霍面的地震波速度分布，资料处理中利用初至层析成像方法得到剖面沿线的近地表速度结构(图 3)，同时，参考 She 等(2018)有关长江中下游地区的浅部地壳剪切速度结构，基于深地震反射数据进行近地表结构和构造分析。对于记录到时处于 0—6 s 之间的中浅层，其反射同相轴呈双曲线形态，且速度谱能量团集中，资料处理时采用交互的速度谱分析方法来拾取剖面沿线的叠加速度；而对于记录到时大于 6 s 的中深层，速度谱能量团聚焦性较差；为获得较准确的深层反射波叠加速度，数据处理中采用反射波常速度扫描方法。除此之外，还参照田晓峰等(2016)和 Tian 等(2018)利用地震成像方法构建的长江中下游成矿带的浅部地壳速度结构。

2.3.4 叠加效果

图 6 为本次处理得到的叠加剖面，可以看出：15—45 km 之间，因受地形条件限制，激发点与检波点的距离过大，导致剖面上缺失 0—1 s 之间的浅部地层信息，影响对浅部构造特征的认识；剖面上双程走时 4—6 s 之间和 10—11 s 之间存在一些反射能量强、延续度较好的界面反射波组，这些反射波组可能是来自地壳内部具有波阻抗差异的岩性变化产生的地层反射界面。

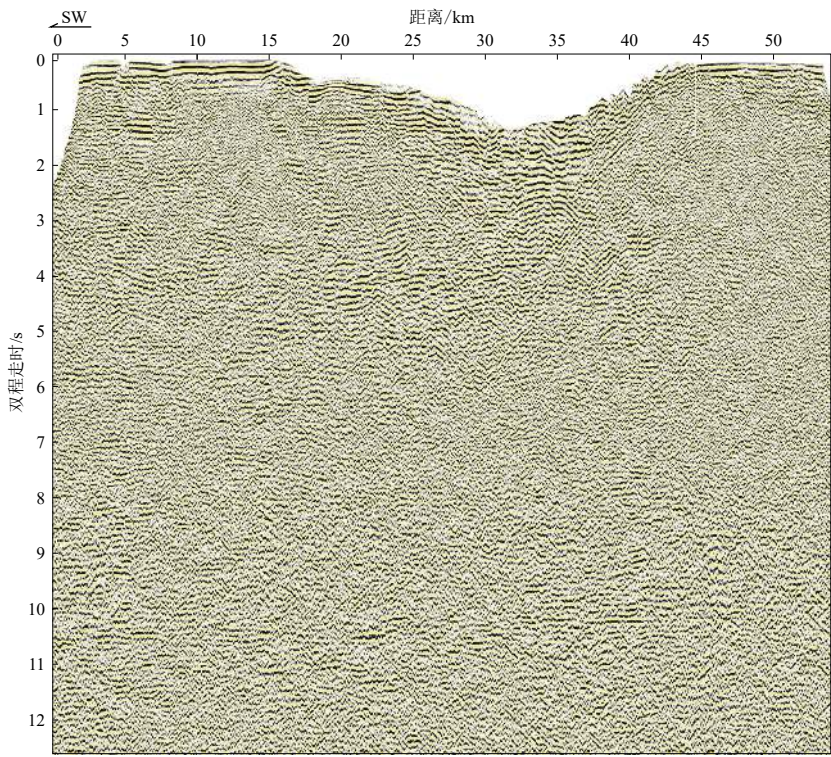


图 6 共中心面元中心线示意图

Fig. 6 Sketchmatic diagram for midpoint line of common center bin

3 讨论与结论

利用大容量气枪震源在江上激发、陆地接收的深地震反射探测,这在国内外尚属首次。根据非纵弯线的资料特点,通过初至波层析静校正、叠前多域多道集去噪以及非纵弯线面元叠加等处理方法的综合应用,可以得到剖面经过地区的较清晰的地下反射地震剖面。该研究成果不仅证明了利用大容量气枪震源进行深部构造反射地震勘探是可行的,而且可为未来时期气枪震源在其它江河领域开展类似工作提供技术支撑和方法借鉴。

相比其它人工震源,气枪震源具有绿色环保和经济实用的优势,但是也存在一定的缺陷。目前,大陆水体多数是有限的,其水体范围以及江河形状是决定激发效果的主要因素。如本次测线的中段,因存在无法回避的障碍物,激发线与接收线之间距离过大,造成浅部相应范围的资料缺失。此外,激发效果还受到水体深度和枪阵尺寸的影响,这些因素也限制了气枪震源在部分水体中的应用。

中国地震局地球物理勘探中心的技术人员为本文提供了野外采集数据,长安大学孙渊教授对本次数据处理给予帮助,两位审稿专家对文章提出了建设性的意见和建议,作者在此一并表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京:地质出版社: 1-239.
- Chang Y F, Liu X P, Wu Y C. 1991. *The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-239 (in Chinese).
- 常印佛,董树文,黄德志. 1996. 论中一下扬子“一盖多底”格局与演化[J]. 火山地质与矿产, 17(1/2): 1-15.
- Chang Y F, Dong S W, Huang D Z. 1996. On tectonics of “poly-basement with one cover” in middle-lower Yangtze craton China[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 17(1/2): 1-15 (in Chinese).
- 陈安国,周涛发,刘东甲,葛黎. 2017. 长江中下游成矿带及邻区 Moho 深度与成矿背景探讨[J]. 地质学报, 91(6): 1299-1311.
- Chen A G, Zhou T F, Liu D J, Ge C. 2017. The Moho depth and metallogenic setting of the middle-lower Yangtze River valley metallogenic belt and its adjacent areas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(6): 1299-1311 (in Chinese).
- 陈佳,李孝宾,杨军,叶泵. 2016. 云南宾川大容量气枪震源波形频谱特征分析[J]. 中国地震, 32(2): 216-221.
- Chen J, Li X B, Yang J, Ye B. 2016. Large volume air-gun source spectrum characteristics of Binchuan, Yunnan[J]. *Earthquake Research in China*, 32(2): 216-221 (in Chinese).
- 陈顺,李宜晋. 2007. 地震波雷达研究展望: 用人工震源探测大陆地壳结构[J]. 中国科学技术大学学报, 37(8): 813-819.
- Chen Y, Li Y J. 2007. Seismic wave radar research: Using active source to detect continental crust structure[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 37(8): 813-819 (in Chinese).
- 陈顺,王宝善,姚华建. 2017. 大陆地壳结构的气枪震源探测及其应用[J]. 中国科学: 地球科学, 47(10): 1153-1165.
- Chen Y, Wang B S, Yao H J. 2017. Seismic airgun exploration of continental crust structures[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(10): 1739-1751.
- 鄯少英,刘保金,秦晶晶,姬计法,王宏伟,魏学强,李稳,谭雅丽. 2020. 大容量气枪震源陆地反射地震探测: 以长江中下游铜陵地区为例[J]. 中国地震, 36(2): 200-210.
- Feng S Y, Liu B J, Qin J J, Ji J F, Wang H W, Wei X Q, Li W, Tan Y L. 2020. The seismic reflection survey using large capacity air-gun source: A case study of Tongling area in mid-lower reaches of the Yangtze river[J]. *Earthquake Research in China*, 36(2): 200-210 (in Chinese).
- 兰学毅,杜建国,严加永,安明,万秋,郭冬,廖梦奇,王云云,陶龙,张启燕,张莎莎. 2015. 基于先验信息约束的重磁三

- 维交互反演建模技术:以铜陵矿集区为例[J]. *地球物理学报*, **58**(12): 4436–4449.
- Lan X Y, Du J G, Yan J Y, An M, Wan Q, Guo D, Liao M Q, Wang Y Y, Tao L, Zhang Q Y, Zhang S S. 2015. 3D gravity and magnetic interactive inversion modeling based on prior information: A case study of the Tongling ore concentration area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(12): 4436–4449 (in Chinese).
- 林建民, 王宝善, 葛洪魁, 唐杰, 张先康, 陈顺. 2008. 大容量气枪震源特征及地震波传播的震相分析[J]. *地球物理学报*, **51**(1): 206–212.
- Lin J M, Wang B S, Ge H K, Tang J, Zhang X K, Chen Y. 2008. Study on large volume airgun source characteristics and seismic phase analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **51**(1): 206–212 (in Chinese).
- 刘建芳, 郭赟, 鲍伟, 管文华. 2007. 复杂地表二维弯曲测线地震资料处理方法研究[J]. *石油物探*, **46**(2): 196–201.
- Liu J F, Guo Y, Bao W, Guan W H. 2007. Research on 2-D seismic data processing slalom lines in complex surface condition[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, **46**(2): 196–201 (in Chinese).
- 吕庆田, 董树文, 史大年, 汤井田, 江国明, 张永谦, 徐涛, SinoProbe-03-CJ项目组. 2014. 长江中下游成矿带岩石圈结构与成矿动力学模型: 深部探测(SinoProbe)综述[J]. *岩石学报*, **30**(4): 889–906.
- Lü Q T, Dong S W, Shi D N, Tang J T, Jiang G M, Zhang Y Q, Xu T, SinoProbe-03-CJ Group. 2014. Lithosphere architecture and geodynamic model of middle and lower reaches of Yangtze metallogenic belt: A review from SinoProbe[J]. *Acta Petrologica Sinica*, **30**(4): 889–906 (in Chinese).
- 丘学林, 陈顺, 朱日祥, 徐辉龙, 施小斌, 叶春明, 赵明辉, 夏少红. 2007. 大容量气枪震源在海陆联测中的应用: 南海北部试验结果分析[J]. *科学通报*, **52**(4): 463–469.
- Qiu X L, Chen Y, Zhu R X, Xu H L, Shi X B, Ye C M, Zhao M H, Xia S H. 2007. The application of large volume airgun sources to the onshore-offshore seismic surveys: Implication from the experimental results in northern South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, **52**(4): 533–560.
- 孙涛, 李杭, 吴开兴, 陈陵康, 刘卫明, 胡紫娟. 2018. 铜陵矿集区断裂分形与多重分形特征[J]. *有色金属工程*, **8**(4): 111–115.
- Sun T, Li H, Wu K X, Chen L K, Liu W M, Hu Z J. 2018. Fractal and multifractal characteristics of regional fractures in Tongling metallogenic area[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, **8**(4): 111–115 (in Chinese).
- 唐杰, 王宝善, 葛洪魁, 陈顺. 2009. 大容量气枪震源的实验与模拟研究[J]. *中国地震*, **25**(1): 1–10.
- Tang J, Wang B S, Ge H K, Chen Y. 2009. Study of experiment and simulation of large volume air-gun in deep structures exploration[J]. *Earthquake Research in China*, **25**(1): 1–10 (in Chinese).
- 汤井田, 周聪, 任政勇, 王显莹, 肖晓, 吕庆田. 2014. 安徽铜陵矿集区大地电磁数据三维反演及其构造格局[J]. *地质学报*, **88**(4): 598–611.
- Tang J T, Zhou C, Ren Z Y, Wang X Y, Xiao X, Lü Q T. 2014. Three dimensional magnetotelluric inversion and structural framework of Tongling ore district, Anhui[J]. *Acta Geologica Sinica*, **88**(4): 598–611 (in Chinese).
- 田晓峰, 王夫运, 刘宝峰, 杨卓欣, 郑成龙, 高占永. 2016. 马鞍山—铜陵—安庆长江沿线上地壳速度结构成像[J]. *中国地震*, **32**(2): 390–396.
- Tian X F, Wang F Y, Liu B F, Yang Z X, Zheng C L, Gao Z Y. 2016. Upper crustal velocity structure along the Yangtze River from Ma'anshan to Anqing[J]. *Earthquake Research in China*, **32**(2): 390–396 (in Chinese).
- 汪铁望, 于相海, 胡浩, 刘明乾, 周夏丽. 2010. 弯曲测线地震资料相干噪声压制[J]. *地球物理学进展*, **25**(3): 946–950.
- Wang T W, Yu X H, Hu H, Liu M Q, Zhou X L. 2010. Attenuation of coherent noise in seismic data with crooked line geometry[J]. *Progress in Geophysics*, **25**(3): 946–950 (in Chinese).
- 魏斌, 苏金波, 王海涛, 郑黎明, 王琼, 张文来, 袁顺, 魏芸芸, 陈昊. 2016. 新疆呼图壁人工水体大容量气枪信号发射台性能研究[J]. *中国地震*, **32**(2): 222–230.
- Wei B, Su J B, Wang H T, Zheng L M, Wang Q, Zhang W L, Yuan S, Wei Y Y, Chen H. 2016. Site selection and construction of Hutubi airgun source signal transmitting seismic station and its characteristic of source[J]. *Earthquake Research in China*, **32**(2): 222–230 (in Chinese).
- 吴言昌, 曹奋扬, 常印佛. 1999. 初论安徽沿江地区成矿系统的深部构造: 岩浆控制[J]. *地学前缘*, **6**(2): 285–296.
- Wu Y C, Cao F Y, Chang Y F. 1999. A preliminary study on the deep seated structural magmatic control over the metallogenic

- system around the Yangtze river reaches in Anhui Province[J]. *Earth Science Frontiers*, **6**(2): 285–296 (in Chinese).
- 杨庆道, 王伟锋, 尹以东, 赵玉生, 李继白. 2011. 弯线地震勘探技术应用中的若干问题[J]. 石油地球物理勘探, **46**(3): 364–369.
- Yang Q D, Wang W F, Yin Y D, Zhao Y S, Li J B. 2010. Some issues in applications of seismic crooked line[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, **46**(3): 364–369 (in Chinese).
- 赵明辉, 丘学林, 叶春明, 夏赓原, 黄慈流, 谢剑波, 王平. 2004. 南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析[J]. 地球物理学报, **47**(5): 845–852.
- Zhao M H, Qiu X L, Ye C M, Xia K Y, Huang C L, Xie J B, Wang P. 2004. Analysis on deep crustal structure along the onshore-offshore seismic profile across the Binhai (Littoral) fault zone in northeastern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **47**(5): 845–852 (in Chinese).
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, **24**(8): 1665–1678.
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the middle and lower reaches of the Yangtze river area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, **24**(8): 1665–1678 (in Chinese).
- Brocher T M, Clayton R W, Klitgord K D, Bohannon R G, Sliter R, McRaney J K, Gardner J V, Keene J B. 1995. *Multichannel Seismic-Reflection Profiling on the R/V Maurice Ewing During the Los Angeles Region Seismic Experiment (LARSE)*, California[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report: USGS-OFR-95-228.
- Okaya D, Henrys S, Stern T. 2002. Double-sided onshore-offshore seismic imaging of a plate boundary: “Super-gathers” across South Island, New Zealand[J]. *Tectonophysics*, **355**(1/2/3/4): 247–263.
- She Y Y, Yao H J, Zhai Q S, Wang F Y, Tian X F. 2018. Shallow crustal structure of the middle-lower Yangtze River region in eastern China from surface-wave tomography of a large volume airgun-shot experiment[J]. *Seismol Res Lett*, **89**(3): 1003–1013.
- Tian X F, Yang Z X, Wang B S, Yao H J, Wang F Y, Liu B F, Zheng C L, Gao Z Y, Xiong W, Deng X G. 2018. 3D seismic refraction travel-time tomography beneath the middle-lower Yangtze River region[J]. *Seismol Res Lett*, **89**(3): 992–1002.