第 36 卷　第 2 期(200~210)　　中 国 地 震　　Vol. 36　No. 2
2020 年 6 月　　EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA　　Jun. 2020

酆少英,刘保金,秦晶晶,等,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. 中国地震,**36**(2):200~210.

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

酆少英　刘保金　秦晶晶　姬计法　王宏伟
魏学强　李稳　谭雅丽

中国地震局地球物理勘探中心,郑州　450002

摘要　为了实验大容量气枪震源陆地水体流动激发反射地震探测效果,在长江中下游安徽省铜陵段,采用气枪船长江航道流动激发、沿江岸布设反射地震仪器接收的非纵弯线工作方式,得到了反映测线经过地区地壳深部结构和构造特征的反射地震数据。原始资料信噪比较低,但部分资料不同部位仍可辨认出来自地壳及莫霍面反射波组。就传播距离而言,地震波传播的水平距离最大可达 21km,垂直深度可达 30km 以上。在数据处理中,根据原始资料特点,针对性采用了非纵弯线面元定义、三维层析静校正、叠前多域去噪及组合反褶积技术,最终得到的叠加时间剖面上具有丰富的壳内反射波组。结果显示,测线经过地区的地壳结构为双层结构,总厚度为 30.0~36.0km。上地壳呈现隆坳相间的反射特征,下地壳存在多组叠层状弧型反射波组,莫霍面反射特征清晰,由 2~3 个反射同相轴组成,呈现 SW 端向 NE 段抬升的形态。剖面经过地区存在一个切穿下地壳和莫霍面的深部断裂,应该是长江深断裂的反映。研究结果充分说明,大容量气枪震源可应用于陆地流动水体地壳精细结构的深地震反射探测。

关键词:　**气枪震源　深地震反射探测　共中心面元　地壳精细结构**

[**文章编号**] 1001-4683(2020)02-0200-11　　[**中图分类号**] P315　　[**文献标识码**] A

0　引言

利用人工震源探测地壳结构和构造,在能源与矿产资源勘探、地质灾害风险探查、地震危险性评价、地壳构造研究等方面发挥着其他地球物理方法无法替代的作用,被称为“照亮地下的明灯”(陈颙等,2005)。

气枪激发源具有传播距离远、信号重复性好、绿色环保等优点(丘学林等,2007),是海上能源地震勘探的主要激发震源。近年来,许多地学专家、学者开展了利用大容量气枪震源研究地壳结构和介质变化的实验。如美国南加州的 LARSE 实验,利用海上气枪激发地震波探测莫哈韦沙漠及洛杉矶地区的壳、幔构造,探测结果显示,气枪激发产生的信号可以传播至

[**收稿日期**] 2019-12-01;[**修定日期**] 2020-04-16

[**项目类别**] 国家自然科学基金面上项目(41674140)、国家重点研发计划(2018YFC1503200)共同资助

[**作者简介**] 酆少英,男,1967 年生,博士,高级工程师,主要从事地壳深浅结构的反射地震探测研究。
E-mail:fsy.ny@163.com

少 200km 远，探测到地下约 20km 深的构造（Fuis et al，2003；Brocher et al，1997）；中国台湾的 TAICRUST 计划，可在 215km 远处的接收台站上，辨认出较清晰的气枪信号（Mcintosh et al，2005）；新西兰南岛的 SIGHT 地球物理调查，可在 265km 远的接收台站上辨别出较清晰的信号（Stern et al，2002；Okaya et al，2002）；中国科学院南海海洋研究所于 2001 年和 2004 年在南海北部利用大容量气枪源海上激发、陆上地震台站接收进行海陆联测，实验结果显示，气枪信号传播距离最远可至 255km，信号覆盖了香港和珠三角地区（丘学林等，2003；赵明辉等，2008）。上述实验结果均表明利用气枪震源进行地壳深部探测是可行的。将大容量气枪用于地壳深部构造研究，无论是海陆联测，还是水库激发（陈颙等，2007），均相当于气枪在接近于静止的水体内定点激发，而将大容量气枪在陆上江河中流动激发，采用反射地震方法研究地壳结构，目前国内外还未进行过尝试。2015 年 10 月开展的“地学长江计划”安徽实验（夏季等，2016；徐嘉隽等，2016）首次采用长江中大容量气枪流动激发，沿岸布设反射、折射地震仪器接收的综合观测方式，从得到的原始记录来看，取得了令人满意的初步成果。

本文利用“地学长江计划”安徽实验得到的反射地震数据，进行分析及数据处理，进而得到测线经过地区的地壳精细结构和构造图像，为分析大容量气枪震源陆上水体流动激发深地震反射探测的效果提供例证和技术参考，为大容量气枪震源在长江流域及其他大江大河的地壳精细结构反射地震探测的应用提供技术支撑。

1　研究区构造概况与测线位置

长江中下游地区是中国经济最发达的地区之一，也是矿产资源较为丰富的地区。一般将以阳新-常州断裂（又称江南断裂）、郯庐断裂带及襄樊-广济断裂为界的一个总体 NE 向相对宽阔、SW 向相对狭窄的“V”字型金属矿产富集地带（吕庆田等，2014；常印佛等，1991），称为长江中下游成矿带。本文的研究区位于长江中下游地区的长江池州、铜陵段，长江中下游成矿带的中南部（图 1）。

在构造分区上，研究区位于华北板块南侧、华南板块的东北缘。华南板块由扬子陆块和华夏陆块 2 个前寒武陆核组成，晋宁运动时期二者碰撞拼接在一起（Li，1998；刘彬等，2018），后期又经历了陆内裂谷和多期次造山运动。中三叠世受印支运动影响（华南板块与华北板块碰撞），区域构造体制发生了重大转变，由近 WE 向的陆、陆碰撞模式改变为 NE 向的俯冲运动模式（张岳桥等，2009），继而研究区及整个华南板块发生了大规模的陆内造山运动。伴随强烈的陆内造山运动及其后的伸展运动，不同动力学体系、不同期次构造事件相互叠加、复合和改造，形成了长江中下游地区隆拗相间的构造格局，沿江分布了宁芜、繁昌、铜陵、宁镇、庐枞等多个火山岩盆地或隆起。在两大板块的碰撞变动过程中，盖层褶皱普遍存在，断裂较为发育，岩浆活动频繁。其中长江深断裂为区域内的主要断裂，在其发育过程中逐步形成由 2 组断裂组成的齿状断裂带（刘建敏，2015）。断裂带的拉张作用构成沿江一带串珠状展布的盆地（徐树桐等，1993）。纵向上，深断裂切穿地壳，向上组成一个树状系统。长江深断裂在该区中生代构造格局的发展中起到了重要的作用。吕庆田等（2003、2014）在铜陵地区及邻区开展的深地震反射剖面探测，显示该区地壳纵向上存在 3 个大的构造分界面，分别在地幔与下地壳之间（M 面）、下地壳与上地壳之间（C 面）以及变质基底与沉积盖层之间（G 面）。由于变质基底和盖层之间滑脱面的存在，在区域应力作用下，本区广泛发育

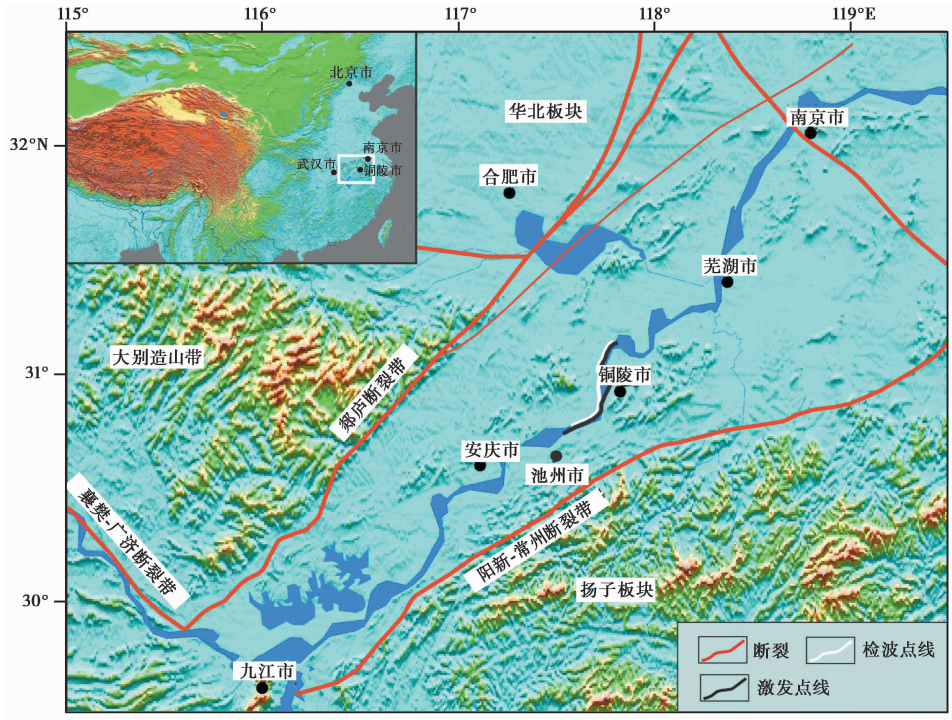

图 1 研究区构造概况及测线位置

断裂构造、穹隆构造、弧形构造及复杂的褶皱变形构造(柳丙全等,2013)。

数据采集采用气枪船长江航道中流动激发、沿江岸走向布设反射地震仪器固定排列接收的工作方式。测线南端点位于铜陵市枞阳县的汤沟镇,向北顺长江走向沿长江西岸江堤布设测线,北端点位于芜湖市无为县的刘渡镇,测线长度约 54km。

2 数据采集与处理

2.1 数据采集与原始资料分析

本次实验目的为测试大容量气枪震源陆上水体流动激发,进行反射地震探测,验证能否得到深部反射信息及其效果。数据采集激发线位于长江主航道,接收线沿长江铜陵段的江堤布设(图 2)。数据接收共布设 1802 道检波器,道间距 30m。地震波激发采用 4 支容量为 1500 in^3 的大容量气枪组合,气枪船按固定时间间隔逆流走航激发,激发点间距在100~150m之间变化。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,且二者存在一定的水平距离,不重合,造成激发点和接收点中点(简称炮检中点,下同)在空间分布上非常发散,即不是集中在一条直线段上,而是在一个不规则平面上(图 3),和传统的二维地震测线有很大的区别,这会给数据处理带来一定的困难。

激发时,由于受到船舶航行及沿岸各种工业、人类活动的干扰,从得到的原始记录来看,各种干扰波发育,原始资料的信噪比较低,很多记录上看不到反射波的影子,尤其是在远炮检距,干扰波能量更强。但在部分记录的小炮检距部位可追踪到反射波,如图 4 所示,在双程反射时间(TWT)4~5s、10~11s 均有隐约可见的反射同相轴,其中 TWT10~11s 的反射波

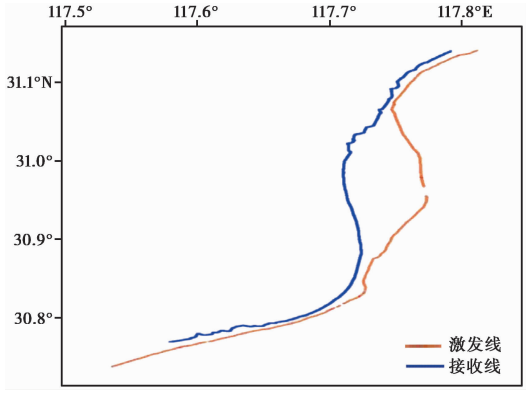

图 2　激发线、接收线位置

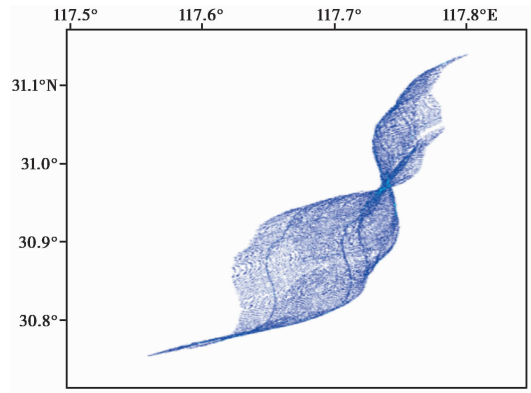

图 3　炮检中点分布

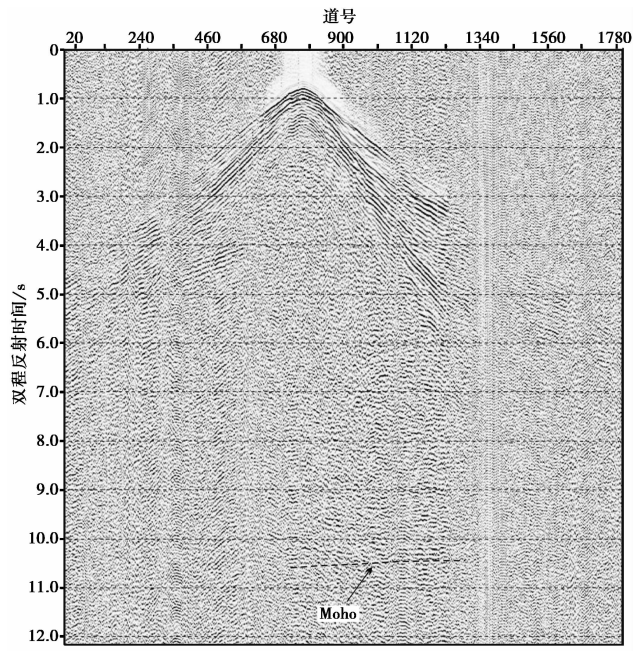

图 4　原始记录显示

组有可能是来自莫霍(Moho)面的反射波。

就传播距离而言，气枪激发的地震波传播水平距离最大可达 21km，垂直深度可达 30km 以上；从有效波频谱来看，有效信号的频带主要分布在 3~25Hz(图 5)，主频随着深度的增加从 16Hz 降至 10Hz。

2.2　数据处理

采用大容量气枪陆上流动水体激发，进行深地震反射探测，在国内外尚属首次开展，故在数据处理上存在一系列需要解决的问题。

不同于采用炸药激发进行深地震反射探测可采用常规的深地震反射数据处理软件和流程处理，本文得到的数据，信噪比较低、炮检中点分布发散，因此需要采用针对本次数据特点的数据处理流程和方法。数据处理采用了观测系统定义、交互废道剔除和初至切除、初至波

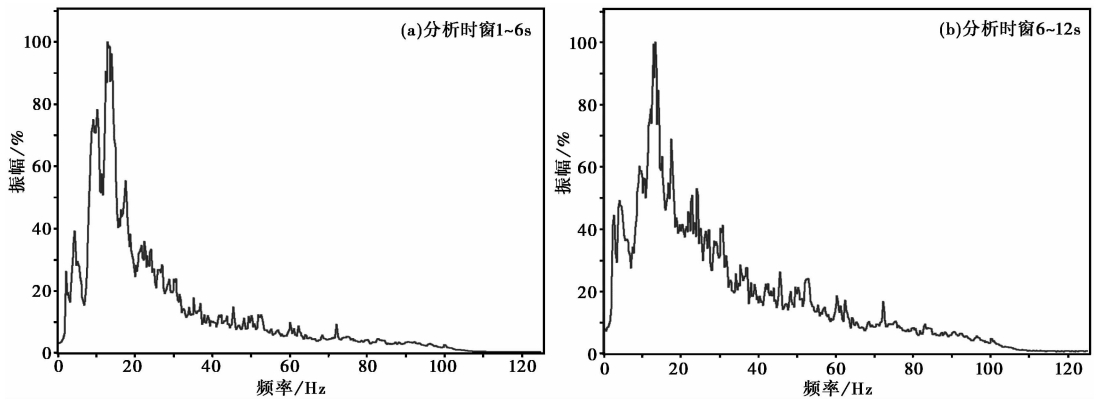

图 5 原始记录频谱分析

层析静校正、异常振幅检测与消除、振幅补偿、叠前多域多道集迭代去噪、组合反褶积、速度分析和剩余静校正的两次迭代、DMO 和叠后时间偏移、叠后随机噪音衰减等数据处理方法，其中观测系统定义和静校正是本次数据处理最为关键的环节，也是与常规二维反射地震资料处理不同的地方。

观测系统定义是反射地震数据处理最基础的工作之一，其目的为根据实际得到的激发点、检波点的坐标，在数据处理软件系统中确定激发点、接收点位置及二者的相互关系，从而计算每个检波点所属的共中心点位置，便于进行后续的共中心点叠加处理。受长江航道、江岸走向条件限制，本次实验激发线和接收线弯曲度较大，且二者不重合，炮检中点在空间分布上非常发散(图 3)，和传统意义上的二维测线有较大差别。因此，基于共中心点叠加的二维数据处理方法受到限制。在观测系统定义中，如何确定共中心线的位置，是本次数据处理的基础工作，也是特色之处。为此，在数据处理中将三维反射地震共中心面元概念引入来代替二维共中心点概念，同时借鉴二维弯线处理观测系统定义方法。具体做法为：首先，根据实际炮检点分布情况，计算出炮检中点分布，并统计炮检中点分布最集中位置，作为炮检中点分布中心线，即共中心线。其次，垂直共中心线，采用矩形面元划分方法，其中面元宽为道距的 1/2，面元边长通过理论计算和对比实验来确定。同一个面元内的炮检中点，可以认为是来自地下同一点的反射，叠加时应如同来自同一中心点那样得到加强。

受地形限制，本次实验炮点、检波点分布非常不规则，实际的观测系统为二维非纵弯线，因此采用二维静校正方法显然无法求取合理的静校正量。三维静校正方法不仅能适应三维反射地震数据，而且可以应用于二维弯线、非纵测线等不规则观测系统的二维地震数据。在静校正方法选择上，初至波层析静校正方法是数据处理中一种有效的静校正方法(李录明等，2000；王宝江等，2013)，该方法利用地震记录中的初至走时信息重建地下波速分布，并计算检波点、炮点的静校正量，是目前常用的静校正方法。在实际处理中，采用三维初至波层析静校正方法，拾取原始记录初至波到时信息，进行 3D 层析速度反演，计算炮检点范围内三维速度场的纵横向分布；抽取炮点、检波点所在位置的风化层速度、厚度等空间展布数值，计算炮点、检波点的静校正量。

3　叠加剖面的主要反射特征

由于研究区复杂的地质条件，加之气枪震源激发能量较小，原始记录中环境干扰大，得到的剖面信噪比较低。除此之外，受地形限制，部分段激发点与接收点距离过大，缺失小炮检距数据，因此剖面上缺失浅层资料（图 6 剖面中段），影响了对浅部构造的认识。但总体上，剖面不同部位存在一些反射能量变化较大、纵向上有一定宽度和横向上有限延续度的反射条带或一些断续的反射波组。这些反射条带或反射波组可能是由于地壳内部的岩性或岩相变化产生的具有波阻抗差异的地层变化界面，可作为地层对比、追踪及剖面解释的依据。

3.1　壳内反射特征

由图 6 剖面可看出，上、下地壳分界反射特征并不明显，不存在能量较强、延续度较好的层状界面反射波。这与一些地区深地震反射探测结果相一致（酆少英等，2015；Gao et al，2016；王海燕等，2017），即上、下地壳之间不是由一个简单的地层界面区分，而是存在一个变化带，使上地壳变形与下地壳变形脱耦，上、下地壳变形完全不同（王海燕等，2014），因此上、下地壳反射特征也不同。在 TWT5.5～6.5s 之间存在一组断续反射波组 T_C，T_C 之上以能量较强的倾斜、弧状反射波波组为主，T_C 之下主要为能量相对较弱的弧状反射波组。参考以往研究结果（吕庆田等，2014；徐涛等，2014），T_C 应对应于上、下地壳分界面（C 面）。

上地壳反射特征在剖面两端存在较大差别。SW 段（桩号 0～27km）以 TWT4～5s 处相向倾斜的 2 组反射波 C_{R1} 为界，其上以 NE 倾向的反射波组为主，呈现凹陷的反射特征；NE 段反射较为稀少，只存在几组弧状反射波组，呈现隆起的构造形态。剖面两端反射特征的差别，反映了构造特征的不同。

与上地壳相比，下地壳反射能量较弱。但从较弱的反射能量背景中，仍可以辨认出多组叠层状弧状反射波组。下地壳发育的叠层状弧状反射波组可能和该区位于华北与扬子板块之间、处于挤压环境有关。

3.2　莫霍面反射

壳幔过渡带（莫霍面）反射波 R_M 为剖面中反射能量较强的反射波组，在整个剖面均可追踪。莫霍面反射波组大约出现在 TWT10.0～12.0s 之间，由 2～3 个反射同相轴组成，构成了具有反射性的下地壳与透明性的上地幔的边界（Nelson，1991；王海燕等，2006）。T_M 整体呈 SW 向倾斜，以地壳平均速度6.0km/s计算，莫霍面深度为 30.0～36.0km，NE 端比 SW 端抬升约 6.0km，这与该区以往研究结果一致（卢占武等，2010；徐涛等，2014；吕庆田等，2014）。SW 段反射位于约 TWT12.0s 处，向 NE 段抬升，在桩号 9～22km 处较为平缓，并且出现不连续现象。从桩号 22km 开始，莫霍面反射波能量较强，呈 SW 向倾斜，时间上从 TWT11.5s 抬升到约 TWT10.0s，总体抬升约 1.5s。

3.3　剖面上存在的深部断裂

莫霍面反射波在桩号 9～22km 之间出现不连续，同时其上的下地壳弧状反射波组也出现相向倾斜的反射特征变化。这种反射特征的变化预示着剖面经过地区存在一个切穿下地壳和莫霍面的深部断裂 Fm，这应为长江深断裂（刘建敏，2015；吕庆田等，2014）在剖面上的反映。受施工条件限制，剖面浅部资料缺失，故 Fm 向上地壳延伸情况无法判断。

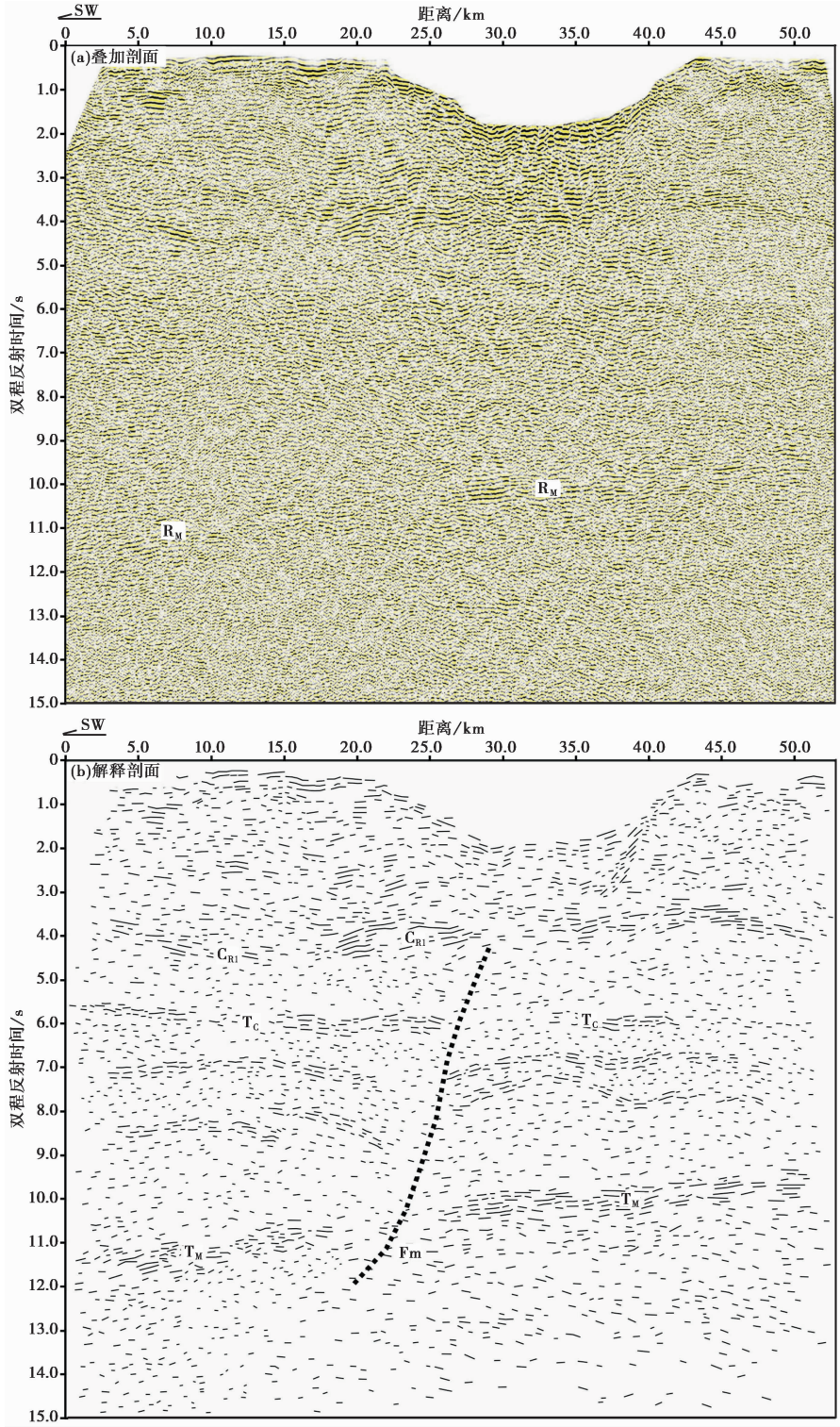
SW
距离/km
0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
50.0
(a)叠加剖面
双程反射时间/s
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
11.0
12.0
13.0
14.0
15.0
R_M
R_M
SW
距离/km
(b)解释剖面
双程反射时间/s
C_{R1}
C_{R1}
T_C
T_C
T_M
T_M
Fm

图 6 剖面图及解释结果

4　主要结论与讨论

（1）本研究得到了反映测线经过地区的地壳结构和构造的反射地震剖面，并取得了清晰的莫霍面反射图像，充分说明利用大容量气枪震源陆上水体激发可以得到反映地壳深部构造的反射地震图像。该实验的成功，说明大容量气枪震源可以应用于陆上流动水体的深地震反射探测。

（2）剖面经过地区的地壳结构可分为双层结构，即上地壳和下地壳。地壳总厚度为30.0~36.0km。壳内的反射较为丰富，上地壳反射特征在剖面两端存在较大差别，SW 段呈现凹陷的反射特征，NE 段反射波组构成隆起的构造形态。下地壳反射能量较弱，存在多组叠层状弧状反射波组。莫霍面在剖面上反射特征比较清晰，由 2~3 个反射同相轴组成，整体向 NW 向倾斜。剖面桩号 9~22km 之间的莫霍面反射波出现不连续，同时下地壳反射波组也出现相向倾斜的变化。这种反射特征的变化，预示剖面经过地区存在一个切穿下地壳和莫霍面的深部断裂，这应是长江深断裂的反映。

（3）气枪震源一般应用于海上，在陆上的应用也是仅限于水库等接近静止的水体中。本次实验的成功说明大容量气枪陆上水体流动激发可以得到具有一定信噪比的反射地震剖面。其原因在于，采用大容量气枪阵组合，可以有效压制压力脉冲，增强气泡脉冲（罗桂纯等，2006；赵明辉等，2008），从而增强了信号中的低频能量。低频能量传播中衰减较小，因而可以传播更远的距离。

与陆上常用的炸药震源相比，气枪震源具有绿色环保的优点，在江河湖泊中施工，可以避免对环境的破坏。气枪震源施工还具有施工时间短（本研究野外激发仅用 3 天，完成了428 炮次的激发）、效率高的优点，可以有效节约施工成本。因此，采用绿色环保的大容量气枪震源进行深地震反射探测，可以得到反映地壳结构和构造的反深地震剖面。此方法可以推广应用到其他条件适合的地区。

但是，由于施工条件的限制，大容量气枪震源陆上水体反射地震探测也存在无法避免的缺点。受江河流向的限制，测线布设选择度小，因此只能采用非纵弯线施工，造成炮检中点分布发散，数据处理无法按照常规的 2D 共中心点叠加方法。其次，剖面覆盖次数不均匀，造成剖面上不同段信噪比不一致；由于一些无法回避的障碍物，可能造成缺失浅部资料，如本次得到剖面的中段；繁忙的江河航道及两岸干扰比较大，降低了原始资料的信噪比；气枪激发对水深有一定要求，限制了气枪船在部分水体的应用。

（4）获取低频大能量地震波信号及反射数据处理是气枪震源陆地流动激发反射地震探测能否成功的关键因素。因此，气枪阵列中 4 只大容量气枪如何组合可以有效压制压力脉冲、增强气泡脉冲，从而增强信号中的低频能量，使气枪信号传播更远的距离，是在气枪阵列设计中需要特别注意的问题；在针对气枪震源陆地流动激发反射地震数据处理中，可根据资料特点，采用非纵弯线观测系统定义、三维初至波层析静校正的二维应用、叠前多域多道集迭代去噪、组合反褶积等数据处理方法的综合应用，可以得到反映研究区地壳构造特征的反射地震剖面，为铜陵地区的构造研究提供基础的地震学资料。

（5）本文得到的剖面上、下地壳反射特征存在较大的差别。以往的研究（陈沪生，1998；张达等，2011；吕庆田等，2003）表明，本区岩石圈表现存在多个构造拆离面，主要存在于莫霍

面与下地壳之间、下地壳与上地壳之间、沉积盖层与变质基底之间。由于构造拆离面的存在,在区域应力作用下,上下地壳之间、沉积盖层与变质基底之间的变形解耦,从而形成“隆”、“拗”相间的构造格局。剖面上地壳“隆”、“拗”相间的构造形态正是这一作用的反映。

致谢:“地学长江计划”安徽实验深地震反射剖面由中国地震局地球物理勘探中心和中石化石油工程有限公司华北分公司在 2015 年完成数据采集,现场人员付出了辛勤的工作;审稿专家对本文提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献

常印佛,刘湘培,吴言昌,1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京:地质出版社,1~239.

陈沪生,1988. 下扬子地区 HQ-13 线的综合地球物理调查及其地质意义. 石油与天然气地质,**9**(3):211~222.

陈颙,张先康,丘学林,等,2007. 陆地人工激发地震波的一种新方法. 科学通报,**52**(11):1317~1321.

陈颙,朱日祥,2005. 设立“地下明灯研究计划”的建议. 地球科学进展,**20**(5):485~489.

酆少英,刘保金,姬计法,等,2015. 呼和浩特-包头盆地岩石圈细结构的深地震反射探测. 地球物理学报,**58**(4):1158~1168.

李录明,罗省贤,赵波,2000. 初至波表层模型层析反演. 石油地球物理勘探,**35**(5):559~564.

刘彬,王学求,2018. 长江中下游地区铜地球化学块体物质来源及其对铜矿集区形成的制约. 矿物岩石地球化学通报,**37**(2):271~282.

柳丙全,王利民,黄蒙,等,2013. 安徽省大别造山带大地构造相划分及其特征. 安徽地质,**23**(3):168~172.

刘建敏,2015. 长江中下游地区晚中生代岩浆岩成因和深部过程. 博士学位论文. 合肥:合肥工业大学.

卢占武,高锐,匡朝阳,等,2010. 庐枞金属矿集区深地震反射剖面探测研究:一种经济的、变化的采集观测系统实验. 岩石学报,**26**(9):2553~2560.

罗桂纯,王宝善,葛洪魁,等,2006. 气枪震源在地球深部结构探测中的应用研究进展. 地球物理学进展,**21**(2):400~407.

吕庆田,董树文,史大年,等,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. 岩石学报,**30**(4):889~906.

吕庆田,侯增谦,赵金花,等,2003. 深地震反射剖面揭示的铜陵矿集区复杂地壳结构形态. 中国科学 D 辑:地球科学,**33**(5):422~449.

丘学林,陈颙,朱日祥,等,2007. 大容量气枪震源在海陆联测中的应用:南海北部实验结果分析. 科学通报,**52**(4):463~469.

丘学林,赵明辉,叶春明,等,2003. 南海东北部海陆联测与海底地震仪探测. 大地构造与成矿学,**27**(4):295~300.

王宝江,汪清辉,冯会元,等,2013. 黄土塬复杂地表非纵地震静校正应用研究. 西北大学学报(自然科学版),**43**(2):274~280.

王海燕,高锐,李秋生,等,2014. 青藏高原松潘-西秦岭-临夏盆地深地震反射剖面-采集、处理与初步解释. 地球物理学报,**57**(5):1451~1461.

王海燕,高锐,卢占武,等,2006. 地球深部探测的先锋-深地震反射方法的发展与应用. 勘探地球物理进展,**29**(1):7~13,19.

王海燕,高锐,卢占武,等,2017. 四川盆地深部地壳结构-深地震反射剖面探测. 地球物理学报,**60**(8):2913~2923.

夏季,金星,蔡辉腾,等,2016. 大容量气枪震源子波时频特性及其影响因素. 中国地震,**32**(2):249~260.

徐嘉隽,蔡辉腾,金星,等,2016. 大容量气枪震源长江定点激发信号检测. 中国地震,**32**(2):379~389.

徐树桐,陶正,陈冠宝,1993. 再论徐(州)-淮(南)推覆体. 地质论评,**39**(5):395~403.

徐涛,张忠杰,田小波,等,2014. 长江中下游成矿带及邻区地壳速度结构:来自利辛-宜兴宽角地震资料的约束. 岩石学报,**30**(4):918~930.

张达,吴淦国,杜建国,等,2011. 铜陵矿集区深部找矿工作的一些思考. 安徽地质,**21**(2):105~113.

张岳桥,徐先兵,贾东,等,2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录. 地学前缘,

16(1):234~247.

赵明辉,丘学林,夏少红,等,2008. 大容量气枪震源及其波形特征. 地球物理学报,**51**(2):558~565.

Brocher T M,Bilek S L,Clayton R W,et al,1997. Stacked wide-angle recordings of air-gun signals from the 1994 Los Angeles Region Seismic Experiment(LARSE). California,U.S. Geological Survey,97~132.

Fuis G S,Clayton R W,Davis P M,et al,2003. Fault systems of the 1971 San Fernando and 1994 Northridge earthquakes,southern California:relocated aftershocks and seismic images from LARSE Ⅱ. Geology,**31**(2):171~174.

Gao R,Chen C,Wang H Y,et al,2016. SINOPROBE deep reflection profile reveals a Neo-Proterozoic subduction zone beneath Sichuan Basin. Earth Planet Sci Lett,**454**:86~91.

Li Z X,1998. Tectonic history of the major East Asian lithospheric blocks since the Mid-Proterozoic-a synthesis. In:Flower M F J,Chung S L,Lo C H,et al. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. New York:The American Geophysical Union,221~243.

McIntosh K,Nakamura Y,Wang T K,et al,2005. Crustal-scale seismic profiles across Taiwan and the western Philippine Sea. Tectonophysics,**401**(1~2):23~54.

Nelson K D,1991. A unfied view of craton evalution motivated by recent deep seismic reflection and refraction results. Geophys J Int,**105**(1):25~35.

Okaya D,Henrys S,Stern T,2002. Double-sided onshore-offshore seismic imaging of a plate boundary:"super-gathers" across South Island,New Zealand. Tectonophysics,**355**(1~4):247~263.

Stern T,Okaya D A,Scherwath M,2002. Structure and strength of a continental transform from onshore-offshore seismic profiling of South Island,New Zealand. Earth,Planets Space,**54**(11):1011~1019.

The Seismic Reflection Survey Using Large Capacity Air-gun Source—A Case Study of Tongling Area in Mid-lower Reaches of the Yangtze River

Feng Shaoying Liu Baojin Qin Jingjing Ji Jifa Wang Hongwei Wei Xueqiang Li Wen Tan Yali

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

Abstract In order to verify the reflection seismic detection effect of large capacity air-gun on land flow water, we adopted the working mode of non-longitudinal and bending line which air gun ship excitated in the Tongling area of Yangtze river and the reflective seismic instrument received along the river bank. We obtained the reflection seismic data of the deep structure and tectonic features in the area. Although the original record has lower signal noise, the reflected wave group of upper crust and the Moho can be recognized in different parts of the record. The maximum horizontal distance of seismic wave propagation reaches as far as 21km, and the vertical depth of seismic wave propagation can reach more than 30km. Based on the characteristics of original data, we applied the combined methods such as non-longitudinal and bending line bin definition, 3d tomographic static correction, pre-stack multi-domain denoising and combined deconvolution. The abundant crustal reflections are in the stack time section. The results show that the crustal structure in the area are of double layer structure, with a total thickness of 30.0~36.0km. The reflection features of uplift and depression interphase was showed in the upper crust, and there are multiple groups of laminated arc-shaped reflection waves in the lower crust. The Moho is clearly observed by reflection features, which are composed of 2~3 reflection events, showing the raise from SW end to NE. There is a deep fault cutting through the lower crust and the Moho in the area, which is caused by the Yangtze river deep fault. The above results indicate that the large capacity air-gun can be used for deep reflection seismic detection of crustal fine structure in land flowing water.

Keywords: **Air-gun source**; **Deep seismic reflection detection**; **Common central bin**; **Crustal fine structure**