

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2018011905

# 南黄海中-古生界地震勘探震源设计及其应用

李玉剑<sup>1,2</sup>, 张异彪<sup>1</sup>, 刘璐晨<sup>1</sup>, 黄涛<sup>1,2</sup>, 李斌<sup>1</sup>, 陈建文<sup>3</sup>

1. 中石化海洋石油工程有限公司上海物探分公司, 上海 201208

2. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

**摘要:** 南黄海崂山隆起存在新近系底界  $T_2$  强反射界面, 中深部发育多套碳酸盐岩高速层, 并经历长期的压实作用及复杂的构造运动, 波阻抗差异变小, 构造特征更为复杂, 使得地震波场复杂, 深层有效的地震反射信号较弱, 信噪比较低, 成像质量较差。为了改善中-古生界反射波成像质量, 着重对震源端进行攻关, 优化设计了 2 组富低频、强能量的气枪组合震源(总容量为  $6390\text{in}^3$ ), 分别是沉放 10m 的平面组合震源和“倒梯形”立体组合震源(4 子阵沉放深度分别为 7、10、10、7m)。通过外业试验, 优选了低频更强的平面组合震源作为地震采集震源方案。与以往地震资料进行了对比, 本次采集的地震资料能量衰减较慢, 深层能量更强, 整体改善了  $T_2$  不整合面下伏反射层的成像质量, 为该区的中-古生界油气勘探奠定基础。

**关键词:** 气枪震源设计; 立体震源; 低频; 南黄海; 中-古生界

中图分类号:P738 文献标识码:A

## Seismic source specially designed for the Meso-Paleozoic strata and its application to South Yellow Sea

LI Yujian<sup>1,2</sup>, ZHANG Yibiao<sup>1</sup>, LIU Luchen<sup>1</sup>, HUANG Tao<sup>1,2</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, CHEN Jianwen<sup>3</sup>

1. Shanghai Geophysical Branch of Sinopec Offshore Oilfield Services Company, Shanghai 201208, China

2. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China

**Abstract:** Successful seismic survey in the South Yellow Sea has been a great challenge to both researchers and oil industry for years. The seismic reflection signal from deep is always very weak and the seismic wave field very complex. Therefore, the seismic imaging quality of the deep strata has been considerably poor in the past decades. The main reasons come from: 1. there are a strong reflector ( $T_2$  seismic reflection interface) and multi-sets of carbonate strata with high seismic velocity widely distributed in the region. 2. the impedance contrast of strata is small in the region as both the Mesozoic and Paleozoic strata have suffered long-term compaction. 3. the structure of the region is too complicated as the result of strong tectonic movement. In this paper, we proposed a specific and targeted seismic survey design, especially a special air-gun source, for the purpose to improve the images from the deep part. A systematic review is made on airgun theories. The wavelet features of single airguns, strongly-interacting clustered airguns, weakly-interacting tuning airguns and sub-array airguns are reviewed one by one. Above it, key factors for multi-level source are analyzed, such as the sub-array depth combination and firing time-delay. Then a design approach on plane-distributed airgun source and cubic-distributed airgun source(multi-level source) are developed. A  $6390\text{in}^3$  airgun source composed of 4 sub-arrays is specially designed for the South Yellow Sea 2016 Project. Two sets of seismic source is optimized, one is 10m in depth for all 4 sub-arrays and the other is 7m-10m-10m-7m in depth in shape of an inverted trapezoid. Field testing demonstrates that the plane-distributed airgun system with stronger low frequency components absorbs less energy and thus is more effective. It is a breakthrough indeed. Some deep strata become visible, and the seismic signal of the deep strata strengthened. The general quality of seismic images below the strong reflector ( $T_2$  seismic reflection interface) is greatly improved. The breakthrough and improvement have laid a solid foundations for future exploration of petroleum in deep strata of the region.

**Key words:** air gun source design; multi-level seismic source; low frequency; South Yellow Sea; Mesozoic-Paleozoic

**资助项目:** 南黄海油气资源调查(DD20160512); 南黄海海域油气资源普查(GZH20080503); 南黄海前第三系油气前景研究(XQ-2005-01)

**作者简介:** 李玉剑(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋地震采集参数设计与论证, E-mail: chinaliyujian@126.com

**通讯作者:** 张异彪(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋地质、地球物理调查研究, E-mail: zyb@sopgc.com

**收稿日期:** 2018-01-19; **改回日期:** 2018-03-23. 蔡秋蓉编辑

南黄海构造上是扬子板块在海域的延伸,是下扬子的主体。南黄海盆地是由中-古生界海相沉积盆地和中-新生界陆相沉积盆地叠加而成的大型含油气沉积盆地。南黄海盆地由南往北为勿南沙隆起、青岛坳陷、崂山隆起、烟台坳陷和千里岩隆起,为“两坳三隆”的构造格局<sup>[1-3]</sup>(图1)。

经过 40 多年的油气勘探认为, 南黄海中-古生界海相碳酸盐岩沉积层分布广、埋藏深、厚度大, 具有良好的油气前景, 是重要的油气勘探远景区<sup>[3-5]</sup>。由于碳酸盐岩地层具有很强的纵、横向非均质性, 对地震波场产生很强的散射和屏蔽作用, 地层间物性差异小、反射能量弱, 造成深部目的层地震频带窄、低频能量不够丰富, 多次波发育, 资料品质差, 地震成像困难; 剖面上目标层有效波能量弱、连续性差、分辨率和信噪比低, 难以横向对比追踪<sup>[6-10]</sup>。

针对上述问题,地震采集参数不断改进:电缆长度从3000m增大到8100m、震源容量从 $2940\text{in}^3$ 增大到 $6420\text{in}^3$ 、记录长度从6s延长到12s,地震成像

质量得到一定的改善,但深层的地震资料仍存在信噪比不高、分辨率较低、连续性较差等问题<sup>[11,12]</sup>。

目前常用的气枪等深组合震源能够很好地消除气枪震源的气泡效应；随着技术的发展，工业界开始采用上下源或者多层深度气枪阵列延时激发技术来压制陷波效应，拓宽频带，以 PGS 公司 Geo-Source<sup>[13]</sup> 技术和 CGG 公司 BroadSource<sup>[14]</sup> 技术为代表。结合国内外气枪组合震源设计技术，有必要针对该区特殊地震地质条件开展气枪组合震源的精细设计。

本文在以往南黄海地震地质条件分析的基础上,梳理了南黄海浅层、中深层地震地质条件,重点分析、探讨了南黄海崂山隆起中-古生界反射层成像质量差的原因;针对深层设计了2组低频成分丰富、能量强的气枪组合震源方案,使得激发产生的震源子波信号穿透性更强;通过外业试验,优选了低频更强的平面组合震源作为地震采集震源方案;与以往地震资料进行了对比,本次采集的地震资料能量

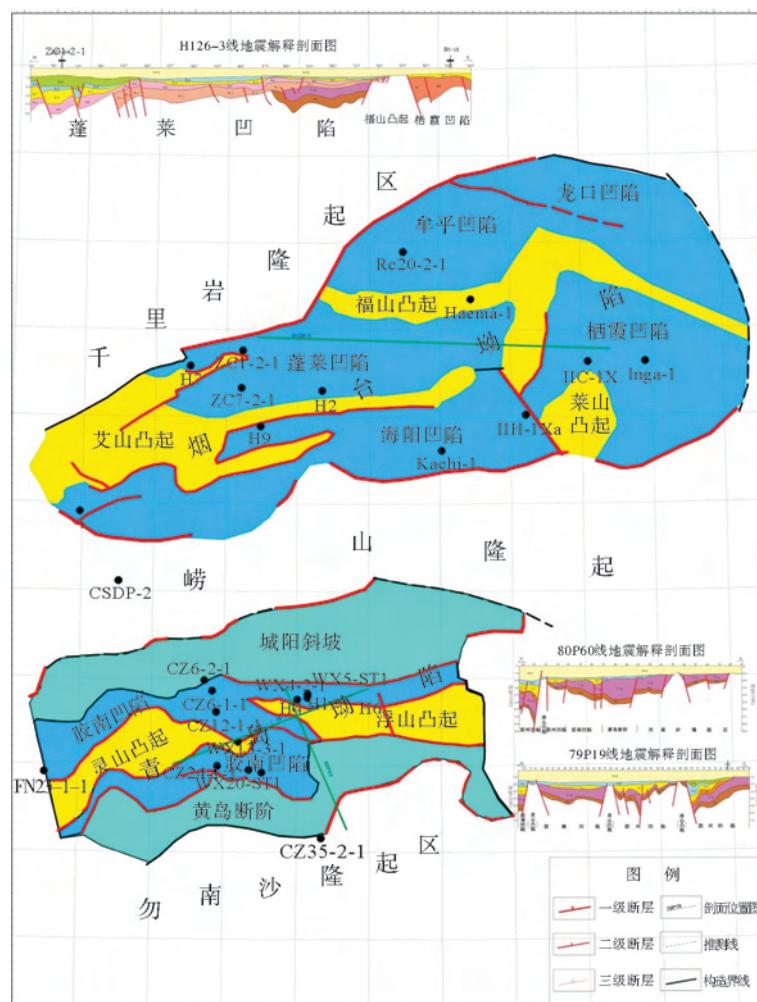


图 1 南黄海构造区划图(据青岛海洋地质研究所,2016 年)

Fig.1 Tectonic map of the South Yellow Sea

衰减较慢,深层能量更强,整体改善了  $T_2$  不整合面下伏反射层的成像质量,为该区的深层油气勘探奠定基础。

## 1 地震地质条件

根据南黄海钻井资料及邻区资料,陈建文等认为南黄海叠合盆地发育碎屑岩和碳酸盐岩两种类型的沉积建造。不同沉积建造因成分和结构的差异具有不同的速度和密度特征;不同时代的同一沉积建造经历了不同的成岩和地质演化过程,速度和密度也有差异<sup>[15-17]</sup>。

因不同时代和不同岩性的地层界面存在波阻抗,南黄海盆地在地震剖面上存在  $T_2$ 、 $T_4$ 、 $T_7$ 、 $T_{7-1}$ 、 $T_{7-2}$ 、 $T_8$ 、 $T_9$ 、 $T_{10}$ 、 $T_{11}$ 、 $T_{11-1}$ 、 $T_{12}$ 、 $T_{13}$  和  $T_g$  等 13 个主

要反射界面,其中  $T_2$ 、 $T_8$  和  $T_g$  为 3 个区域不整合面的反映<sup>[15]</sup>。各界面上下地层的地质属性及其岩性组合特征如表 1 所示。

### 1.1 浅层地震地质条件

南黄海水深 0~103m,水深 50m 以浅表层沉积物以粉砂质砂、砂质粉砂为主<sup>[18]</sup>,容易在海底与海面之间产生多次反射。如图 2 所示,南黄海某海域近道剖面海底多次波影响振幅能量强,中深反射层也受其影响,影响范围大。

虽然地震处理技术可压制海底多次波<sup>[19,20]</sup>,但采集设计时,在考虑深层反射能量足够的情况下,应避免气枪组合震源能量过大,增强低频成分,以减少海底多次波或其他类型干扰波的影响。

表 1 南黄海盆地地震反射界面以及地质属性(据陈建文等,2016 年)

Table 1 The seismic reflection interfaces and their geological properties

地震反射界面/接触关系	地层属性 (石炭系以下为推测)	岩性组合特征
$T_2$ /角度不整合	新近系	砂泥岩及沙泥沉积物
$T_4$ /角度不整合	古近系戴南组+三垛组	砂泥岩
$T_7$ /整合	古近系阜宁组	砂泥岩互层
$T_{7-1}$ /整合	上白垩统泰州组	泥岩夹粉砂岩
$T_{7-2}$ /角度不整合	中-下白垩统	砂岩夹泥岩
$T_8$ /角度不整合	侏罗系	泥岩夹砂岩及粉砂岩
$T_9$ /平行不整合	三叠系下统青龙组	灰岩及白云质灰岩
$T_{10}$ /平行不整合	二叠系上统龙潭组 +大隆组	泥岩及含煤岩系
$T_{11}$ /平行不整合	中石炭统黄龙组 -下二叠统栖霞组	灰岩夹钙质泥岩
$T_{11-1}$ /整合	中上志留统-泥盆统 -下石炭统	砂泥岩,下部砂岩为主,中部砾岩为主,上部泥岩为主
$T_{12}$ /平行不整合	下志留统高家边组	泥岩为主夹粉砂岩及砂岩
$T_{13}$ /整合	中上寒武统-奥陶系	下部白云岩及灰质白云岩,上部灰岩
$T_g$ /角度不整合	震旦系-下寒武统	下部白云岩夹泥质白云岩,上部泥岩
	前震旦系	变质岩

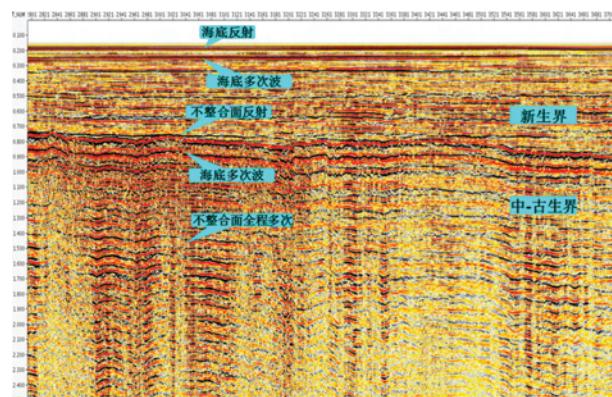


图2 南黄海某海域近道剖面多次波特征

Fig.2 The multiple characteristics in a near trace profile of South Yellow Sea

## 1.2 中深层地震地质条件

南黄海盆地烟台坳陷和青岛坳陷浅部存在两个主要的强反射界面,分别是 $T_2$ 和 $T_8$ 。在崂山隆起和勿南沙隆起,缺失了古近系和陆相中生界,新近系和下三叠统海相碳酸盐岩或更老的地层直接接触, $T_2$ 和 $T_8$ 为同一界面<sup>[21]</sup>。

当浅部地层存在强反射界面时,反射波临界角比较小,很小的入射角就可能产生全反射<sup>[22]</sup>,纵波很难透射,形成能量屏蔽作用,减小深层反射波的能量;反射回来的那部分能量容易在海底和海面等强反射界面形成多次反射波、折射波等干扰波,进而影响深层反射波的信噪比。

南黄海海相中-古生界发育3套碳酸盐岩地层,由上往下分别是下三叠统青龙组、下二叠统栖霞组-中上石炭统和中上寒武统。碳酸盐岩地层结构较为均匀、厚度较大、速度和密度梯度小,在地震剖面上其内部反射能量偏弱,没有清晰的反射波同相轴<sup>[21]</sup>。

图3是南黄海某海域叠前时间偏移叠加剖面,同为深层反射(双程旅行时4s附近),A区和B区地震反射波特征差异较大。A区为新生界地层,其岩性以砂泥岩为主,因经历的构造运动简单,沉积压实作用时间较短,造成不同反射界面波阻抗差异较大,反射波能量较强,同相轴连续性较好;B区为中-古生界地层,如上所述,存在较厚的碳酸盐岩地层,并经历了复杂的构造运动,很难形成较强的波阻抗界面,反射波能量较弱,深层反射的信噪比较差。

近些年针对 $T_2$ 强反射界面、下三叠统青龙组等碳酸盐岩较厚高速层造成中-古生界地层反射波能量弱的问题,立体电缆、大容量震源、长电缆等针

对性地震采集技术开始试验、探讨,成像质量得到一定的改善,但仍存在一定问题。为了进一步提高成像质量,需要震源子波信号能量大、穿透性强。

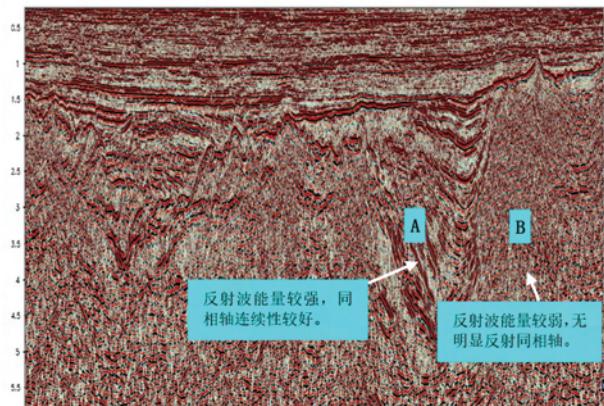


图3 南黄海某海域叠前时间偏移叠加剖面

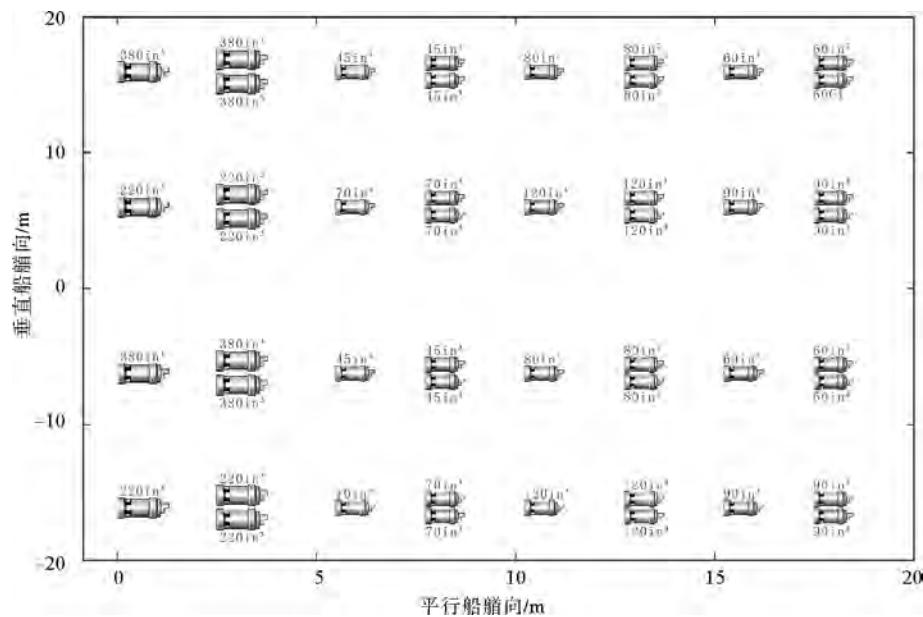
Fig.3 PTSM profile along a seismic line in South Yellow Sea

## 2 气枪组合震源设计

根据地震地质条件分析,本文气枪组合震源的设计目标是激发能量强(主峰值大)、低频段能量强(特别是60Hz以内频段<sup>[15]</sup>)、有效频段频谱光滑。

通过气枪组合震源理论研究及模拟分析,认识到:不同容量大小的单个气枪所激发出来的子波信号主频不同,通常大容量气枪偏低频,小容量气枪偏高频;在气枪组合震源中,大容量气枪起主要作用,决定了整个气枪阵列的能量和偏低频成分,小容量气枪对子波信号主要起修饰作用,使子波更光滑,偏高频成分更丰富,不能一味用小容量气枪,同样也不能一味用大容量气枪,需要大小容量气枪合理组合,设计时就是将这些不同频率的子波信号有效地组合成用于地震勘探的高能量宽频率的子波信号,其中还需要考虑对第一气泡效应的压制,这中间牵涉到相干组合和调谐组合,并且依此需要确定合理地相干间距和调谐间距<sup>[23-27]</sup>。

基于以上认识以及针对南黄海深部地层的设计目标,结合发现6号物探船现有气枪类型、容量、吊点长度以及备件等情况,设计了20余组气枪组合震源,并从中优选出总容量为6390in<sup>3</sup>的气枪组合震源(4子阵),图4为其气枪平面排布示意图。

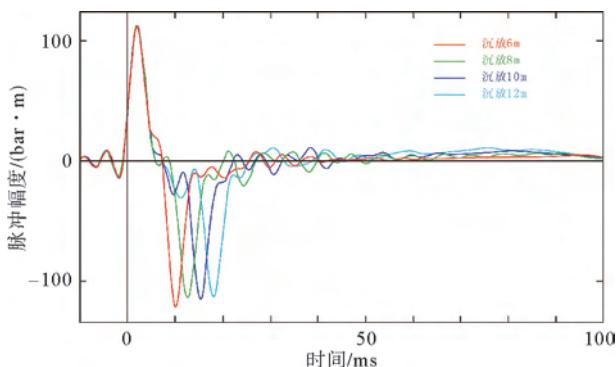
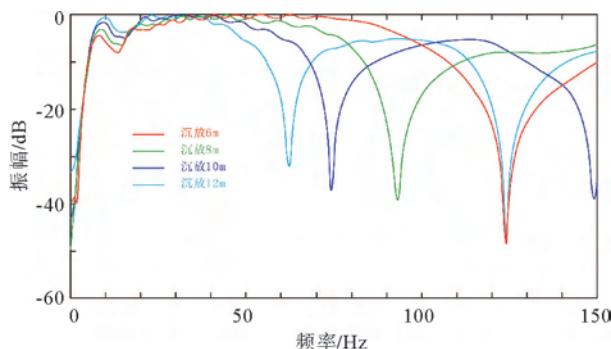
图4 6390in<sup>3</sup>气枪组合震源平面排布示意图Fig.4 Distribution of the 6390in<sup>3</sup> source

6390in<sup>3</sup>气枪组合震源分别沉放6、8、10、12m,受虚反射陷波效应影响,其远场子波各参数统计见表2,远场子波波形、频谱对比见图5和图6。随着沉放深度的增加,优势频宽快速变窄,沉放12m相比沉放6m远场子波优势频宽减小约52.7%;低频

段(6~20Hz)振幅能量逐渐增加,沉放12m相比沉放6m的远场子波频谱6~20Hz低频段振幅能量增加4~5dB;地震资料的频带宽度过窄会影响其分辨率,沉放12m时,远场子波的优势频宽(-6dB)仅为44Hz,初泡比为13.8,低于行业规范15以上的要求;

表2 气枪组合震源(6390in<sup>3</sup>)不同沉放深度模拟远场子波参数统计Table 2 The far-field seismic wavelet parameters on 6390in<sup>3</sup> source in different depths

沉放深度/m	主峰值/(bar·m)	峰-峰值/(bar·m)	初泡比	低截频/(-6dB, Hz)	高截频/(-6dB, Hz)	优势频宽/(-6dB, Hz)	主频/(-6dB, Hz)
6	113.0	234.7	26.1	6	99	93	52.5
8	107.7	222.2	19.8	6	89	83	47.5
10	110.6	228.0	19.9	6	66	60	36
12	106.9	220.3	13.8	6	50	44	28

图5 气枪组合震源(6390in<sup>3</sup>)不同沉放深度模拟远场子波波形对比Fig.5 Comparison of the far-field seismic wavelet signature of 6390in<sup>3</sup> source in different depths图6 气枪组合震源(6390in<sup>3</sup>)不同沉放深度模拟远场子波频谱对比Fig.6 Comparison of the far-field seismic wavelet spectrum of 6390in<sup>3</sup> source in different depths

沉放 10m 时,远场子波的优势频宽( $-6\text{dB}$ )提升到 60Hz,初泡比 19.9,满足行业规范,且相比沉放 12m 远场子波频谱 6~20Hz 低频段振幅能量略有降低,主峰值略高,相比沉放 8、6m 低频段优势明显。

综合考虑虚反射第一个陷波频段、气枪组合震源( $6390\text{in}^3$ )不同沉放深度远场子波优势频宽、低频段振幅能量、主峰值,确定本次平面气枪组合震源沉放深度 10m。

在此基础上,考虑到 4 子阵震源能量分布的对称性及虚反射陷波效应<sup>[28-33]</sup>,设计 1 组两个深度值气枪立体组合震源,受制于硬件条件,最深沉放深度

为 10m,另一个较浅深度分别设计为 5.5、7 和 8.5m,沉放 10m 的子阵列相比较浅深度的子阵列分别延迟 3、2 和 1ms。其远场子波各参数统计见表 3,远场子波波形、频谱对比见图 7 和图 8。

3 种深度组合其频谱在 70Hz 以内相差不大;其主峰值占比(主峰值/峰-峰值)相差较大,分别为 59.5%、61.7% 和 52.4%,由表 2 可计算均沉放 10m 的气枪平面组合震源其主峰值占比为 48.5%,主峰值占比越高,说明对鬼波的压制效果也好,由此选择 7、10m 这 2 个深度值进行气枪立体组合。

表 3 气枪立体组合震源( $6390\text{in}^3$ )不同沉放深度模拟远场子波参数统计

Table 3 The far-field seismic wavelet parameters on  $6390\text{in}^3$  source in different depths

沉放深度/m	主峰值/(bar · m)	峰-峰值/(bar · m)	初泡比	低截频/(-6dB, Hz)	高截频/(-6dB, Hz)	优势频宽/(-6dB, Hz)	主频/(-6dB, Hz)
5.5/10	109.1	183.5	20.1	6	70	64	38.0
7/10	112.6	182.5	20.6	6	70	64	38.0
8.5/10	108.4	206.7	20.8	6	69	63	37.5

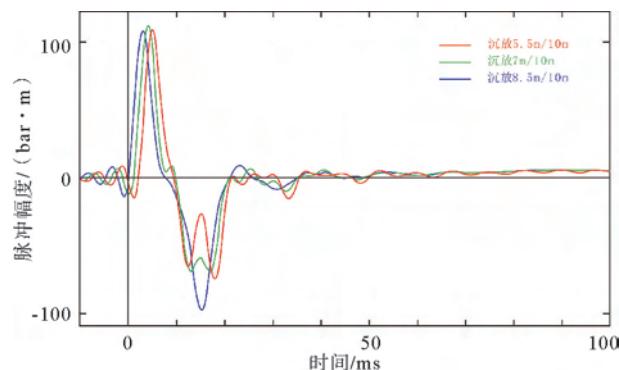


图 7 气枪立体组合震源( $6390\text{in}^3$ )不同沉放深度模拟远场子波波形对比

Fig.7 Comparison of the far-field seismic wavelet spectrum of  $6390\text{in}^3$  source in different depths

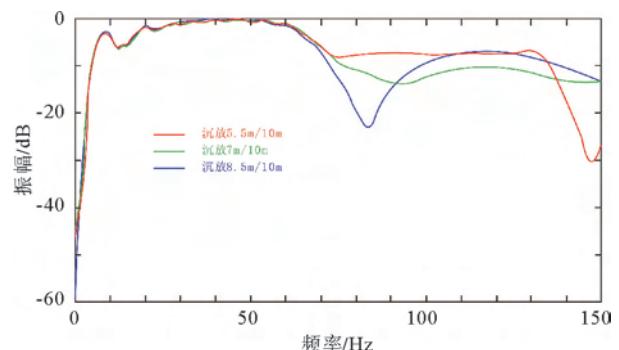


图 8 气枪立体组合震源( $6390\text{in}^3$ )不同沉放深度模拟远场子波频谱对比

Fig.8 Comparison of the far-field seismic wavelet spectrum of  $6390\text{in}^3$  source in different depths

进一步模拟分析 7、10m 两个深度值所组成的不同形状气枪立体组合震源,其远场子波各参数统计见表 4。不同组合形状其频谱在 70Hz 以内相差

不大,主峰值或峰-峰值差别也较小;第 1 组“倒梯形”相比第 2 组“正梯形”、第 3 组“N 形”初泡比较高,据此确定本次气枪立体组合震源采用“倒梯形”。

表 4 气枪立体组合震源( $6390\text{in}^3$ )不同组合形状模拟远场子波参数统计

Table 4 The seismic wavelet parameters of  $6390\text{in}^3$  multi-level source in different shapes

序号	震源沉放深度/m	主峰值/(bar · m)	峰-峰值/(bar · m)	初泡比	低截频/(-6dB, Hz)	高截频/(-6dB, Hz)	优势频宽/(-6dB, Hz)	主频/(-6dB, Hz)
1	倒梯形 7-10-10-7	112.6	182.5	20.6	6	70	64	38.0
2	正梯形 10-7-7-10	112.1	178.0	18.0	6	70	64	38.0
3	N 形 10-7-10-7	112.4	178.6	15.3	6	70	64	38.0

2012年发现2号物探船采用气枪立体组合震源(总容量 $5040\text{in}^3$ )进行地震勘探,南黄海中深层地震成像效果有了较大的改善<sup>[34]</sup>,其远场子波主峰值 $82.8\text{bar}\cdot\text{m}$ 。 $6390\text{in}^3$ 平面组合震源相比 $5040\text{in}^3$ 立体组合震源主峰值约提高34%, $65\text{Hz}$ 以内频段振幅能量提高 $3\sim 5\text{dB}$ , $65\sim 82\text{Hz}$ 频段因虚反射陷波的影响,差于 $5040\text{in}^3$ 立体组合震源(图9、图10); $6390\text{in}^3$ “倒梯形”立体组合震源相比 $5040\text{in}^3$ 立体组合震源主峰值约提高36%, $200\text{Hz}$ 以内频段振幅能量提高 $2\sim 5\text{dB}$ (图11、图12);考虑到本次勘探目的, $6390\text{in}^3$ 平面和立体组合震源远场子波性能均优于 $5040\text{in}^3$ 立体组合震源。

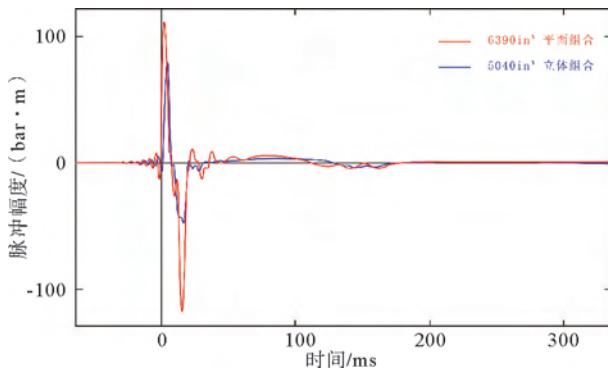


图9  $6390\text{in}^3$ 气枪平面组合震源和 $5040\text{in}^3$ 立体组合震源远场子波波形对比

Fig.9 Seismic wavelet comparison of  $6390\text{in}^3$  traditional source and  $5040\text{in}^3$  multi-level source

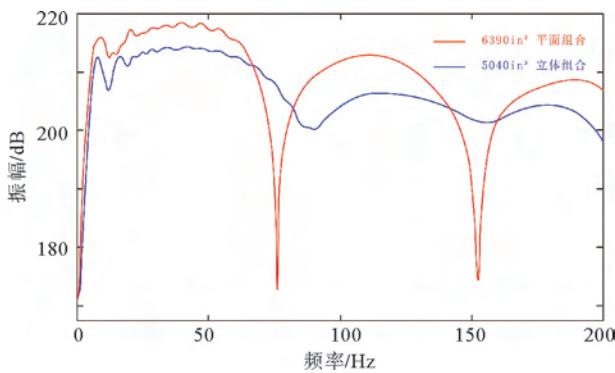


图10  $6390\text{in}^3$ 气枪平面组合震源和 $5040\text{in}^3$ 立体组合震源远场子波频谱对比

Fig.10 Spectrum comparison of  $6390\text{in}^3$  traditional source and  $5040\text{in}^3$  multi-level source

$6390\text{in}^3$ 气枪平面组合震源和“倒梯形”立体组合震源远场子波波形及频谱对比见图13、图14。主峰值相差不大,峰-峰值相差较大,立体组合相比平

面组合震源峰-峰值降低 $45.5\text{bar}\cdot\text{m}$ ,这是因为立体组合震源对虚反射有一定压制作用。两者远场子波频谱各有特点,在 $50\text{Hz}$ 以内频段平面组合相比立体组合震源振幅能量提高 $0.5\sim 1.5\text{dB}$ ; $50\sim 85\text{Hz}$ 频段,平面组合震源在此频段内陷波效应明显,特别是 $75\text{Hz}$ 左右,几乎得不到有效信号,立体组合震源改善了虚反射陷波效应的影响,频谱相对光滑。所以确定平面组合震源性能最优沉放 $10\text{m}$ 和立体组合震源最优“倒梯形”( $7\text{m}-10\text{m}-10\text{m}-7\text{m}$ )这2组震源方案进行外业试验,根据实际效果进一步优选出后续地震勘探所用的气枪组合震源。

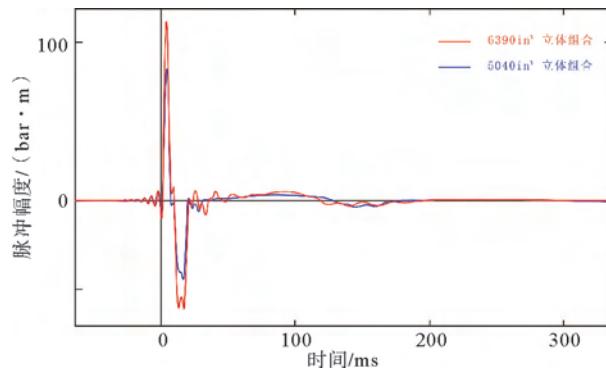


图11  $6390\text{in}^3$ “倒梯形”立体组合震源和 $5040\text{in}^3$ 立体组合震源远场子波波形对比

Fig.11 Seismic wavelet comparison of  $6390\text{in}^3$  multi-level source with inverted-trapezoid shape and  $5040\text{in}^3$  multi-level source

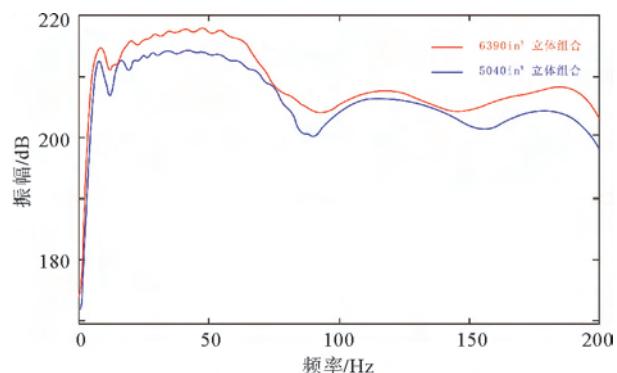


图12  $6390\text{in}^3$ “倒梯形”立体组合震源和 $5040\text{in}^3$ 立体组合震源远场子波频谱对比

Fig.12 Spectrum comparison of  $6390\text{in}^3$  multi-level source with inverted-trapezoid shape and  $5040\text{in}^3$  multi-level source

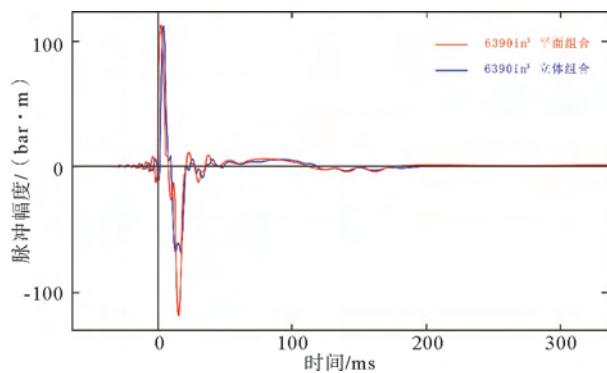


图 13 6390in<sup>3</sup> 气枪平面组合震源和“倒梯形”立体组合震源远场子波波形对比

Fig.13 Seismic wavelet comparison of 6390in<sup>3</sup> traditional source and multi-level source with inverted-trapezoid shape

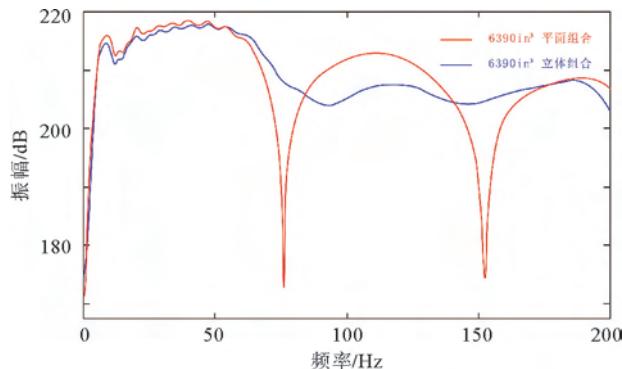


图 14 6390in<sup>3</sup> 气枪平面组合震源和“倒梯形”立体组合震源远场子波频谱对比

Fig.14 Spectrum comparison of 6390in<sup>3</sup> traditional source and multi-level source with inverted-trapezoid shape

### 3 试验方案对比

本次地震采集针对震源类型、电缆沉放深度进行试验,具体试验方案见表 5,在试验线进行 4 次同方向施工。试验方案 1 为平面组合震源沉放 10m,电缆沉放 16m;试验方案 2 为平面组合震源沉放 10m,电缆沉放 20m;试验方案 3 为“倒梯形”立体组合震源(7m-10m-10m-7m),电缆沉放 20m;试验方案 4 为“倒梯形”立体组合震源(7m-10m-10m-7m),电缆沉放 16m。

在试验采集完成后,对试验数据进行了处理分析。图 15、图 16 分别是 4 组试验方案初叠剖面及目的层段(双程旅行时 1.5~3s)频谱分析。

表 5 地震数据采集参数试验方案

Table 5 4 test plans for acquisition of parameters

试验方案	震源类型	震源沉放	电缆沉放
		深度/m	深度/m
1	平面组合震源	10	16
2	平面组合震源	10	20
3	“倒梯形”立体组合震源	7-10-10-7	20
4	“倒梯形”立体组合震源	7-10-10-7	16

对 4 组试验方案进行处理分析,因现场条件限制,通过相同的处理流程只做到初叠剖面。初步对比分析 4 组试验方案的初叠剖面,  $T_2$  不整合面下伏反射层反射波信号,4 组试验方案反射波组能量、连续性等特征相差不大;试验方案 1 相比其他试验方案反射波组能量略强,连续性略好。分析双程旅行时 1.5~3s 反射波组的频谱特征,如图 16 所示,在 6~40Hz 频段,试验方案 1 相比其他试验方案振幅能量更强,并且在 45Hz 以内频段无明显陷波点。综上,现场确定试验方案 1,即平面组合震源沉放 10m、电缆沉放 16m 作为本次地震采集方案。

为了进一步分析本次地震采集的效果,将试验方案 1 和试验方案 4 采集的地震资料进行相同的精细处理,处理过程主要包括低切滤波、去干扰波、SRME、Taup 反褶积、Radon 去多次波、DMO 叠加、叠后偏移等,处理过程中使用了相同的速度和切除。如图 17 所示,电缆沉放深度均为 16m,平面组合震源沉放 10m 相比“倒梯形”立体组合震源(7m-10m-10m-7m)所获得的地震剖面,1.6s 附近的有效反射无论在能量还是连续性上都有优势<sup>[25]</sup>。

图 13、图 14 为 6390in<sup>3</sup> 气枪平面组合震源沉放 10m 和“倒梯形”立体组合震源远场子波波形及频谱对比图。主峰值相差不大,在 50Hz 以内频段平面组合相比立体组合震源振幅能量提高 0.5~1.5dB。电缆沉放 16m,如前所述,因电缆接收的反射波信号已经过大滤波,模拟分析时为了更接近实际采集的地震波信号,根据南黄海地层地球物理特征,针对双程旅行时 3s 的反射层,赋值地层吸收衰减因子  $Q=110$ ,对比分析 6390in<sup>3</sup> 气枪平面组合震源沉放 10m 和“倒梯形”立体组合震源电缆沉放 16m 时子波波形及频谱(图 18、图 19),平面组合震源沉放 10m 的子波能量较强,40Hz 以内(特别是 6~20Hz)振幅能量增加明显,更利于中、深层地震勘探。

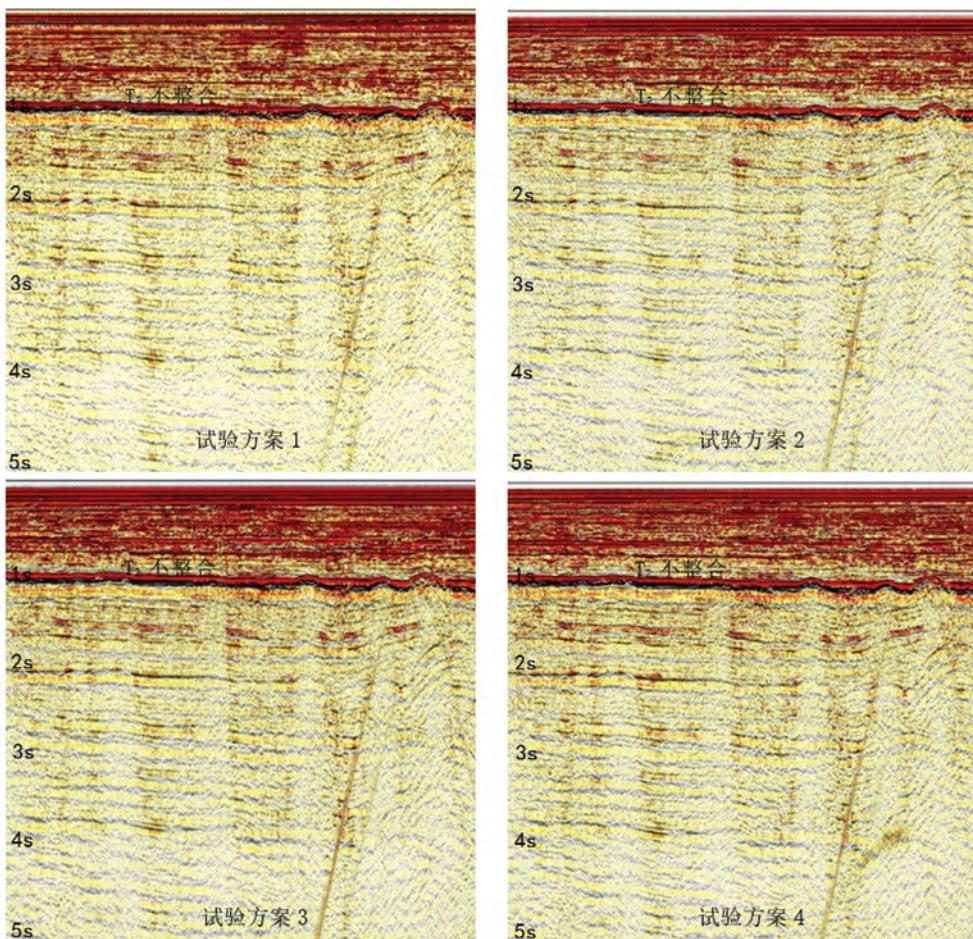
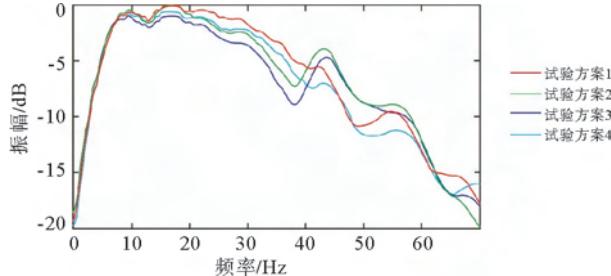
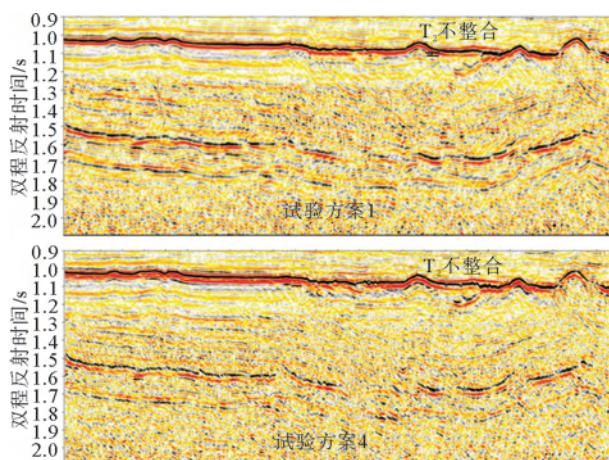


图 15 4 组试验方案初叠剖面

Fig.15 Pre-stacked profiles of the 4 test plans

图 16 4 组试验方案目的层段  
(双程旅行时 1.5~3s) 频谱分析Fig.16 Spectrum analysis of the target strata  
(double travel time 1.5~3s) of the 4 test plans图 17 试验方案 1 和 4 叠后偏移剖面对比  
(据陈建文等, 2016 年)Fig.17 Comparison of post-migration profiles between  
test plan 1 and plan 4

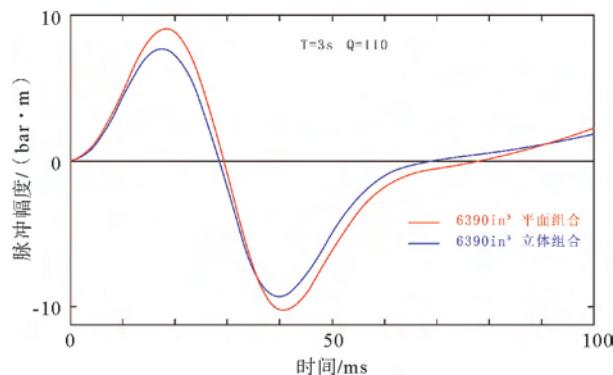


图 18 平面和立体组合震源电缆沉放 16m 子波波形对比( $T=3\text{s}, Q=110$ )

Fig.18 Comparison of the seismic wavelet on conventional and multi-level source in 16m( $T=3\text{s}, Q=110$ )

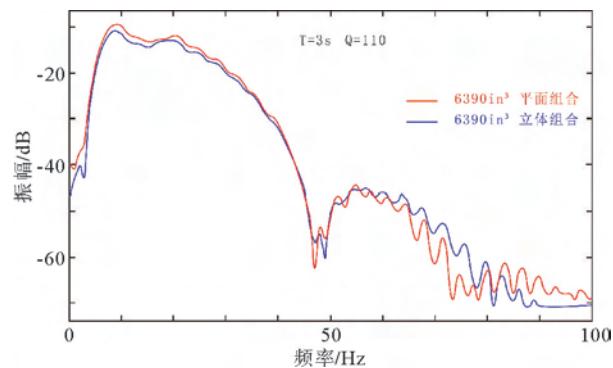


图 19 平面和立体组合震源电缆沉放 16m 子波频谱对比( $T=3\text{s}, Q=110$ )

Fig.19 Comparison of the seismic wavelet spectrum on conventional and multi-level source in 16m( $T=3\text{s}, Q=110$ )

#### 4 与以往资料对比

分析平面组合震源沉放 10m、电缆沉放 16m 采集的单炮记录浅、中、深层(双程旅行时分别为 0.6~1.4、1.6~2.6、2.8~3.8s)均方根振幅,并与以往相位采集的单炮记录进行对比,如图 20 所示,以往采集的单炮记录中、深层均方根振幅相对浅层均方根振幅能量占比分别为 28%、23%,而本次新采集的单炮记录中、深层均方根振幅相对浅层均方根振幅能量占比分别为 41%、36%,即本次采集的地震资料能量衰减较慢,深层能量更强。

选取相邻位置以往采集的地震资料与本次新采集的地震资料进行处理,并做叠前时间偏移,处理流程及选用的速度参数等相同,其叠加剖面如图 21 所示。相比以往采集的地震资料,处理后本次采集的地震剖面,  $T_2$  不整合面及下伏反射界面的断点更加清晰;1s 左右(箭头所示)的反射波组能量更强,连续性更好;中、深层(1.5~2.5s)反射波组能量、连续性得到一定程度的改善,也使得背斜构造特征更加明显。综上,本次采集增强了  $T_2$  不整合面下伏反射波能量,改善了反射波组的连续性,使下伏地层的构造特征更加清晰,整体改善了  $T_2$  不整合面下伏反射层的成像质量,达到了本次勘探的目的。

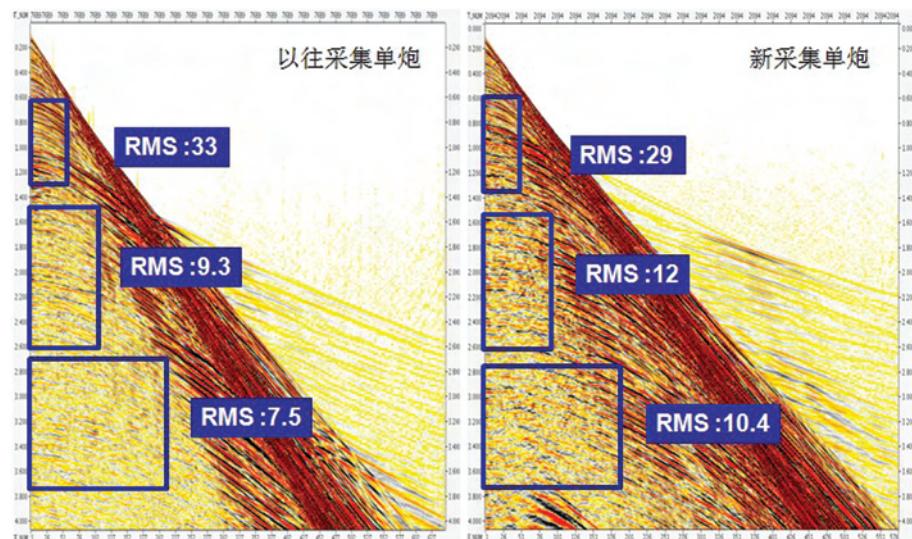


图 20 单炮记录浅、中、深层均方根振幅对比分析

Fig.20 Comparison of the RMS Aptitudes on shallow, middle and deep strata in single shot gathers

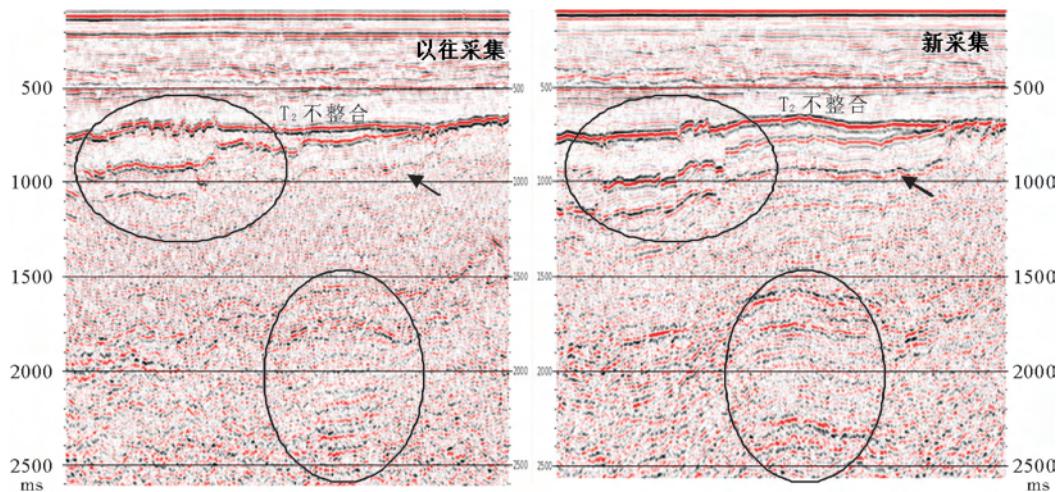


图 21 叠加剖面对比分析

Fig.21 Comparison of the stacked seismic profiles

## 5 结论

(1) 南黄海中-古生界地层经历长期的压实作用及复杂的构造运动之后,波阻抗差异变小,构造特征更为复杂,使得深层有效的地震反射信号较弱,地震波场复杂;浅部存在 T<sub>2</sub> 强反射界面及多套碳酸盐岩高速层,进一步减弱中深部反射波能量,且易形成多次波,进而降低中深部反射信号的信噪比。为了改善中-古生界反射波成像质量,优化设计出 6390in<sup>3</sup> 富低频、强能量的气枪组合震源;

(2) 气枪组合震源的设计影响因素较多,针对勘探目的优选组合参数是关键。设计好气枪容量组合方案后,气枪沉放深度就是主要优选的参数。气枪沉放深度浅高能量占优,低频能量较弱;为增强低频能量,通常会加深气枪沉放深度,在低频能量增强的同时,优势频带变窄,激发能量减弱。为了改善中-古生界反射波成像质量,需要激发能量和低频能量均强的气枪组合震源。根据物探船现有气枪类型、容量、吊点长度以及模拟分析等情况,沉放深度 10m 是一个较好的平衡点。通过外业试验验证了沉放 10m 的平面组合震源比“倒梯形”立体组合震源(4 子阵沉放深度分别为 7、10、10、7m)低频能量较强,地层吸收衰减后激发能量也较强;

(3) 与以往地震资料进行了对比,本次采集的地震资料能量衰减较慢,深层能量更强,整体改善了 T<sub>2</sub> 不整合面下伏反射层的成像质量,为该区的深层油气勘探奠定基础。

**致谢:**特别感谢青岛海洋地质研究所施剑、刘俊

等在本研究工作中的悉心指导!衷心感谢杨文达、徐洪斌、周云和等专家的帮助和指导!

## 参考文献(References)

- [1] 陈建文,龚建明,李刚,等.南黄海盆地海相中-古生界油气资源潜力巨大[J].海洋地质前沿,2016,32(1):1-7. [CHEN Jianwen, GONG Jianming, LI Gang, et al. Great resources potential of the marine Mesozoic-Paleozoic in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(1):1-7.]
- [2] 杨金玉.南黄海盆地与周边构造关系及海相中-古生界分布特征与构造演化研究[D].浙江大学,2010. [YANG Jinyu. Research on the tectonic relation between the South Yellow Sea basin and its adjacent area and distribution characteristic and tectonic evolution of the Mesozoic-Paleozoic marine strata[D]. Zhejiang University, 2010.]
- [3] 马立桥,陈汉林,董庸,等.苏北-南黄海南部叠合盆地构造演化与海相油气勘探潜力[J].石油与天然气地质,2007,28(1):35-42. [MA Liqiao, CHEN Hanlin, DONG Yong, et al. Tectonic evolution of Subei-Nanhuanghai superimposed basin from the late Mesozoic to Cenozoic and marine petroleum potential[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(1):35-42.]
- [4] 侯方辉,张志珣,张训华,等.南黄海盆地地质演化及构造样式地震解释[J].海洋地质与第四纪地质,2008,28(5):61-68. [HOU Fanghui, ZHANG Zhixun, ZHANG Xunhua, et al. Geologic evolution and tectonic styles in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(5):61-68.]
- [5] 祁江豪.南黄海盆地中-古生界构造演化及与四川盆地对比分析[D].中国地质大学(北京),2012. [QI Jianghao. Mesozoic-Paleozoic tectonic evolution in the South Yellow Sea basin and the comparative analysis with Sichuan basin[D]. China University of Geosciences(Beijing), 2012.]
- [6] 庞玉茂,张训华,肖国林,等.下扬子南黄海沉积盆地构造地质

- 特征[J]. 地质论评, 2016, 62(3): 604-616. [PANG Yumao, ZHANG Xunhua, XIAO Guolin, et al. Structural and geological characteristics of the South Yellow Sea Basin in Lower Yangtze Block[J]. Geological Review, 2016, 62(3): 604-616.]
- [7] 吴志强, 吴时国, 童思友, 等. 基于南黄海海相油气勘探的地震采集技术研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 1061-1070. [WU Zhiqiang, WU Shiguo, TONG Siyou, et al. A study on seismic acquisition basic on marine carbonate hydrocarbon exploration in the southern Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4): 1061-1070.]
- [8] 吴志强, 骆迪, 曾天玖, 等. 南黄海海相油气地震勘探难点分析与对策建议[J]. 海相油气地质, 2014, 19(3): 8-17. [WU Zhiqiang, LUO Di, ZENG Tianjiu, et al. Technical difficulties and countermeasures of petroleum seismic exploration in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 19(3): 8-17.]
- [9] 张海啟, 陈建文, 李刚, 等. 地震调查在南黄海崂山隆起的发现及其石油地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(3): 107-113. [ZHANG Haiqi, CHEN Jianwen, LI Gang, et al. Discovery from seismic survey in LaoShan Uplift of the South Yellow Sea and the significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(3): 107-113.]
- [10] 熊忠, 张敏强, 高顺莉, 等. 南黄海中-古生界地震波场反射特征模拟与采集技术攻关[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2172-2180. [XIONG Zhong, ZHANG Minqiang, GAO Shunli, et al. Seismic wave field simulation for reflection characteristics and technology study on seismic acquisition of Mesozoic-Paleozoic in the South Yellow Sea[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2172-2180.]
- [11] 吴志强. 南黄海中部隆起海相地层油气地震勘探关键技术研究[D]. 中国海洋大学, 2009. [WU Zhiqiang. The seismic techniques for exploring marine facies stratigraphic hydrocarbon entrapped in the middle uplift of the South Yellow Sea [D]. Ocean University of China, 2009.]
- [12] 邢涛, 张训华, 张维冈. 南黄海地球物理调查研究现状[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(6): 1-4, 37. [XING Tao, ZHANG Xunhua, ZHANG Weigang. Progress in geophysical survey and researches in the South Yellow Sea [J]. Marine Geology Letters, 2005, 21(6): 1-4, 37.]
- [13] Guillaume Cambois. Multi-level airgun array a simple and effective way to enhance the low frequency content of marine seismic data[C]. SEG, 2009.
- [14] Zhan Fu. Source deghosting for synchronized multi-level source streamer data[C]. SEG, 2015.
- [15] 陈建文, 施剑, 刘俊, 等. 南黄海海相中-古生界地震地质条件[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(10): 1-8. [CHEN Jianwen, SHI Jian, LIU Jun, et al. Seismic geological conditions of the marine Meso-Paleozoic in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(10): 1-8.]
- [16] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 15-22. [JIN Zhijun. Particularity of petroleum exploration on marine carbonate strata in China sedimentary basins[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 15—22.]
- [17] 李可恩. 含高速屏蔽层的地震数据采集及分析[D]. 成都理工大学, 2007. [LI Keen. Seismic acquisition and analysis in the area of high velocity shielding layers[D]. Chengdu University Technology, 2007.]
- [18] 孟祥梅, 刘保华, 阚光明, 等. 南黄海海底沉积物声学特性及其影响因素试验研究[J]. 海洋学报, 2012, 34(6): 74-83. [MENG Xiangmei, LIU Baohua, KAN GuanGmin, et al. An experimental study on acoustic properties and their influencing factors of marine sediment in the southern Huanghai Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(6): 74-83.]
- [19] 李鹏, 刘伊克, 常旭, 等. 多次波问题的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 888-897. [LI Peng, LIU Yike, CHANG Xu, et al. Progress on the multiple problems[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3): 888-897.]
- [20] 张广利, 郝重涛, 姚陈. 海洋地震资料多次波衰减方法综述[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2777-2787. [ZHANG Guangli, HAO Chongtao, YAO Chen. Summary of multiples attenuation approaches in marine seismic data processing[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2777-2787.]
- [21] 陈建文, 龚建明, 李刚, 等. 南黄海盆地海相中-古生界油气资源潜力巨大[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(1): 1-7. [CHEN Jianwen, GONG Jianming, LI Gang, et al. Great resources potential of the marine Mesozoic-Paleozoic in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(1): 1-7.]
- [22] 王建花, 李庆忠, 邱睿. 浅层强反射界面的能量屏蔽作用[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(6): 589-596 + 602-708 + 577. [WANG Jianhua, LI Qingzhong, QIU Rui. Energy shielding action of shallow strong reflector[J]. OGP, 2003, 38(6): 589-596 + 602-708 + 577.]
- [23] 王立明. 范氏气体下气枪激发子波信号模拟研究[D]. 长安大学, 2010. [WANG Liming. Simulation study on signature simulated by air-guns in conditions of van der waals gas[D]. Changan University, 2010.]
- [24] Ziolkowski A. Measurement of air-gun bubble oscillations[J]. Geophysics, 1998, 63(6): 2009-2024.
- [25] Ziolkowski A M, Hanssen P, Gatlift R, et al. Use of low frequencies for sub-basalt imaging[J]. Geophysical Prospecting, 2003, 51: 169-182.
- [26] Safar M H. The radiation of acoustic waves from an airgun [J]. Geophysical Prospecting, 1976, 24: 756-772.
- [27] Nooteboom J J. Signature and amplitude of linear air gun arrays[J]. Geophysical Prospecting, 1978, 26: 194-201.
- [28] SHEN Honglei, Elboth Thomas, TIAN Gang, et al. Modeling of multi-depth slanted airgun source for deghosting[J]. Applied Geophysics, 11(4): 405-417.
- [29] Denis Mougenot, Sercel France. Land and marine equipment for broadband seismic[C]. SEG, 2012.
- [30] 杨凯, 陈华, 顾汉明. 深水立体延迟激发气枪震源的设计与应用[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(6): 641-647. [YANG Kai, CHEN Hua, GU Hanming. The design and application of tri-dimensional delayed excitation air-gun arrays to deep water

- seismic exploration[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011,8(6):641- 647.]
- [31] Zhan Fu, Nan Du, Hao Shen, et al. Source deghosting for synchronized multi-level source streamer data[C].SEG,2015.
- [32] Cambois G, Long A, Parkes G, et al. Multi-level airgun array - A simple and effective way to enhance low frequencies in marine seismic[C].EAGE,2009.
- [33] Ronan Sablon, Thierry Payen, Helene Tonchia, et al. Ghost-free imaging combining synchronized multi-level source and variable-depth streamer[C].SEG,2013.
- [34] 唐松华,李斌,张异彪,等. 立体阵列组合技术在南黄海盆地的应用[J]. 海洋地质前沿,2013,29(5):64-70. [TANG Songhua, LI Bin, ZHANG Yibiao, et al. Application of tridimensional delayed excitation air-gun array in the South Yellow Sea basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29 (5):64-70.]