

doi: 10.12029/gc20190515

王冠,熊小松,高锐,陈宣华. 2019. 花海盆地深地震反射剖面的最佳采集参数实验和分析[J]. 中国地质, 46(5): 1146–1160.

Wang Guan, Xiong Xiaosong, Gao Rui, Chen Xuanhua. 2019. Experiment and analysis of the best acquisition parameters for deep seismic reflection profiles in Huahai Basin[J]. *Geology in China*, 46(5):1146–1160(in Chinese with English abstract).

花海盆地深地震反射剖面的最佳采集参数实验和分析

王冠^{1,2},熊小松¹,高锐^{3,4},陈宣华¹

(1. 中国地质调查局-中国地质科学院地球深部探测中心,北京 100037;2. 中国地质大学(北京),北京 100083;
3. 中国地质科学院地质研究所,北京 100037;4. 中山大学地球科学与工程学院,广东 广州 510275)

摘要:深地震反射方法是探测地壳深部结构的先锋技术,能获取到莫霍面和上地幔的反射图像,成为揭示岩石圈结构、解决深部地质构造问题的有效手段。花海盆地位于河西走廊盆地群西部,处于不同大地构造单元的交汇部位,地层发育较全,但出露和发育程度差异较大,除白垩系为大面积连续分布外,其他各时代的地层均出露不全,常表现为被侵入岩分割破坏的残块状,为了确定深地震反射在花海盆地适合的采集参数,在采集前开展点试验,进行小、中、大炮炸药井炮激发参数对比优选,最终得到最优化的采集参数。在小炮实验中,36 kg 药量取得的反射信息没有 48 kg 和 60 kg 的丰富,而且在 MOHO 反射的清晰度上 48 kg 和 60 kg 药量更为清晰,单井激发比组合井激发效果好;在中炮和大炮实验中,不同组合井对比差异不大,随着药量增大,激发能量增大,面波、折射波等干扰波能量也在增大,小炮干扰波能量最弱,反射信息最丰富的,中炮和大炮干扰波较发育,但通过后后期去噪处理,也能得到中浅层反射信息。

关键词:花海盆地;深地震反射;采集实验;深地勘查工程

中图分类号:P631.4 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)05-1146-15

Experiment and analysis of the best acquisition parameters for deep seismic reflection profiles in Huahai Basin

WANG Guan^{1,2}, XIONG Xiaosong¹, GAO Rui^{3,4}, CHEN Xuanhua¹

(1. *Deep Exploration Center, Chinese Academy of Geological Sciences and China Geological Survey, Beijing 100037, China;*
2. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China;* 3. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;* 4. *School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China*)

Abstract: The deep seismic reflection profiling is a pioneering technique for detecting the deep structure of the crust. It can obtain the reflection fabrics of the Moho and the upper mantle, and hence is an effective method for revealing the lithosphere structure. The

收稿日期:2019-03-18; 改回日期:2019-09-11

基金项目:中国地质调查局项目(DD20179342, DD20160083),国家自然科学基金(41774114, 41574093, 41590860)和国家重点研发计划课题(2016YFC0600302)联合资助。

作者简介:王冠,男,1993年生,硕士生,研究方向:盆山结合带深部结构;E-mail:18500193419@163.com。

通讯作者:熊小松,男,1983年生,博士,副研究员,主要从事深部构造与大陆岩石圈演化研究;E-mail:benxung@126.com。

Huahai Basin is located in the western part of the Hexi Corridor basin, which is the intersection area of different tectonic units. The stratigraphic development is relatively complete, but the degrees of excavation and development are quite different. Except for the large area continuous distribution of the Cretaceous strata, the strata of other epochs are incompletely exposed, and are often manifested as residual debris damaged by division of intrusive rocks. In order to determine the suitable acquisition parameters for deep seismic reflection in the Huahai Basin, the authors conducted a pilot experiment before the collection, in which the small, medium and large TNT explosives were fired, and wells with different depths were drilled to make comparison. The parameter comparison was preferred, and finally the optimized acquisition parameters were obtained. In the small TNT explosives experiment, the reflection information obtained by the 36 kg dose is not as rich as the information obtained by 48 kg and 60 kg dose, and the results of 48 kg and 60 kg doses are clearer in the clarity of the MOHO reflection, with the single well excitation better than the combined well excitation. In the experiment of medium and large TNT explosives, the contrast of different combination wells does not show much difference. As the dose increases, the excitation energy increases, and the interference wave energy such as surface wave and refracted wave also increases. The interference wave energy of the small TNT explosives is the weakest, but has the most abundant reflection information. The interference waves of the medium and large TNT explosives are more developed, but the middle-shallow reflection information can also be obtained through the noise-suppressed processing.

Key words: Huahai Basin; deep seismic reflection profiling; acquisition experiment; deep geological survey engineering

About the first author: WANG Guan, male, born in 1993, master candidate, majors in research on the deep structure of basin-mountain belt; E-mail: 18500193419@163.com.

About the corresponding author: XIONG Xiaosong, male, born in 1983, associate professor, engages mainly in research on the deep structure and evolution of the continental lithosphere; E-mail: benxung@126.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. DD20179342, DD20160083), NSFC (No. 41774114, 41574093, 41590860) and National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0600302).

1 引言

花海盆地位于河西走廊盆地群西部,主体位于阿拉善地块北部过渡带上,南邻河西走廊,西跨阿尔金地块,北接北山海西褶皱带,处于不同大地构造单元的交汇部位(任战利等,1995)。花海盆地地层发育较全,但出露和发育程度差异较大,前石炭纪地层中太古界—古元古界与中新元古界构成了区内结晶—变质基底部分,寒武系—泥盆系发育其上,断续出露有寒武—奥陶系、志留系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系。上述地层除白垩系为大面积连续分布外,其他各时代的地层均出露不全,常表现为被侵入岩分割破坏的残块状。

深地震反射方法是探测地壳深部结构的先锋技术,它的基础是常规地震反射方法,两种方法原理相同,都是利用不同物性界面上产生的弹性波反射同相轴来描述断裂、界面等地质构造特征。但深地震反射方法在探测深度上比常规地震反射方法大得多,一般记录长度都在15 s以上,所以能获得深度到达莫霍面和上地幔的反射图像,成为我们揭示

岩石圈结构、解决深部地质构造问题的有效手段(梁慧云等,1996;王海燕等,2006)。自20世纪70年代美国COCORP计划(地壳探测计划)首先运用深地震反射方法探测地壳结构并取得巨大成功以来,英国、法国、德国、加拿大、意大利、俄罗斯、比利时、澳大利亚和瑞典等国家,相继实施了深地震反射探测计划,并取得了一批显著的成果(Brown, 1985, 1991; Cook, 1985; Klemperer, 1989; Bois et al., 1990; 卢占武等, 2010)。大量的激发试验表明,在灰岩区、花岗岩区和火山岩区中以相对较大药量、深井深激发为主;在地壳尺度的深反射地震中,石灰岩和结晶岩区激发药量在20~30 kg、井深在24~30 m;在第四系胶泥区中以潜水面下井深和相对较小药量激发为主,药量6~12 kg、井深12~18 m(杨贵祥, 2005; 杨勤勇等, 2009; 刘国霖, 2009; 姜鹏飞等, 2009; 刘振东等, 2012; Lü et al., 2013)。

在中国地质调查项目的支持下,通过采用最佳采集参数来获取花海盆地的地壳反射结构,以揭示研究区地壳结构框架,探讨断裂构造体系和岩浆系统空间结构,为达到研究目的我们在花海盆地—北山构造带开展了深地震反射剖面为主要手段的深

部地质调查工作。为了确定最佳采集参数,在采集前开展点试验,进行小、中、大炮炸药井炮激发参数对比优选,最终得到最优化的采集参数。获得的最佳采集参数将有利于指导后期在花海盆地深部地震探测工作的开展,降低采集成本同时获取高分辨率的地震剖面。

2 实验区条件

花海盆地位于 $39^{\circ}57'30''\text{N}\sim 40^{\circ}48'27''\text{N}$ 、 $97^{\circ}01'21''\text{E}\sim 98^{\circ}31'47''\text{E}$,海拔1195~1250 m。花海盆地属于温带干旱气候,干燥多风。经野外踏勘,沿测线可将研究区地表地貌分为五类:低矮山丘、丘陵、戈壁滩、沙化地以及农田地,其中低矮山丘相比较丘陵来说,岩石裸露,表层坚硬,地表起伏大。根据地震、钻井、重磁资料,花海盆地构造单元为花海坳陷,花海坳陷内基岩埋藏深、中新世界沉积达500 m,是盆内主要油气勘探区(谢恭检,1983;杨重信等,2005)。花海盆地构造格局见图1。

花海坳陷沉积了中、下侏罗统、下白垩统、古近-新近系渐新统、中新统、上新统和第四系,其中缺失上白垩统、古新统、始新统地层。下白垩统与

渐新统之间为最主要的不整合界面(图2)。以此不整合面为界花海坳陷可明显地划分为两大构造演化阶段:早白垩世的拉张阶段及新生代以来的挤压阶段(王世成等,1999)。早白垩世新民堡群分布广泛,为滨浅湖一半深湖相沉积,是盆地生油岩的主要发育时期,具有生油岩厚度大、有机质丰度高、分布范围广、类型较好,且已普遍成熟等特点(任战利等,1995;卢进才等,2017)。

3 技术试验

为获得最优反射信息,开展点试验,进行小、中、大炮炸药井炮激发参数对比优选(井深、药量和组合井数),试验点及接收排列高程如图3。

对于中小炮实验采用的观测系统为19180-20-40-20-19180,960道对称接收;大炮实验采用的观测系统为40-20-57100,1428道单边接收。本次采集实验使用SN7C-10 Hz 超级检波器,组合方式为矩形面积组合,10个检波器为1串,组内距 $D_x=3\text{ m}$, $D_y=3\text{ m}$,组内基距 $L_x=12\text{ m}$, $L_y=3\text{ m}$,组合高差控制在2 m之内。地震记录仪器使用428XL数字地震仪器;小炮、中炮记录长度30 s,大炮60 s;在采样

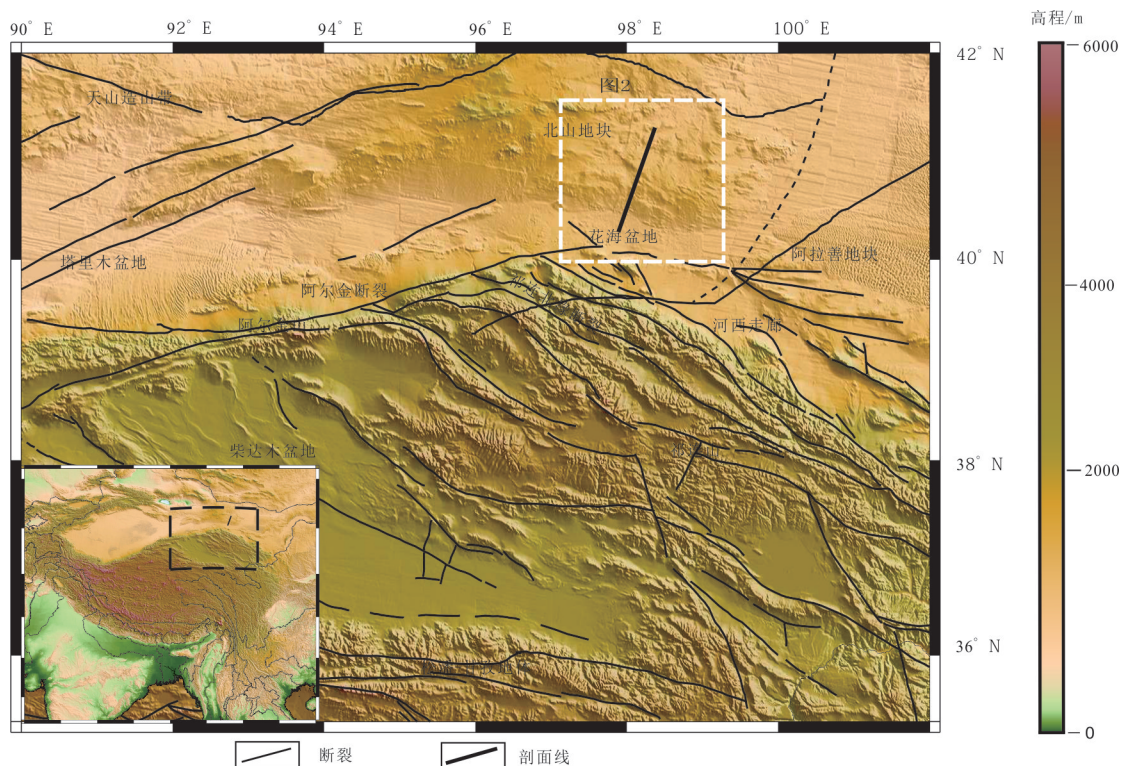


图1 花海盆地研究区以及周缘地区构造简图

Fig.1 Structural map of the Huahai Basin study area and surrounding areas

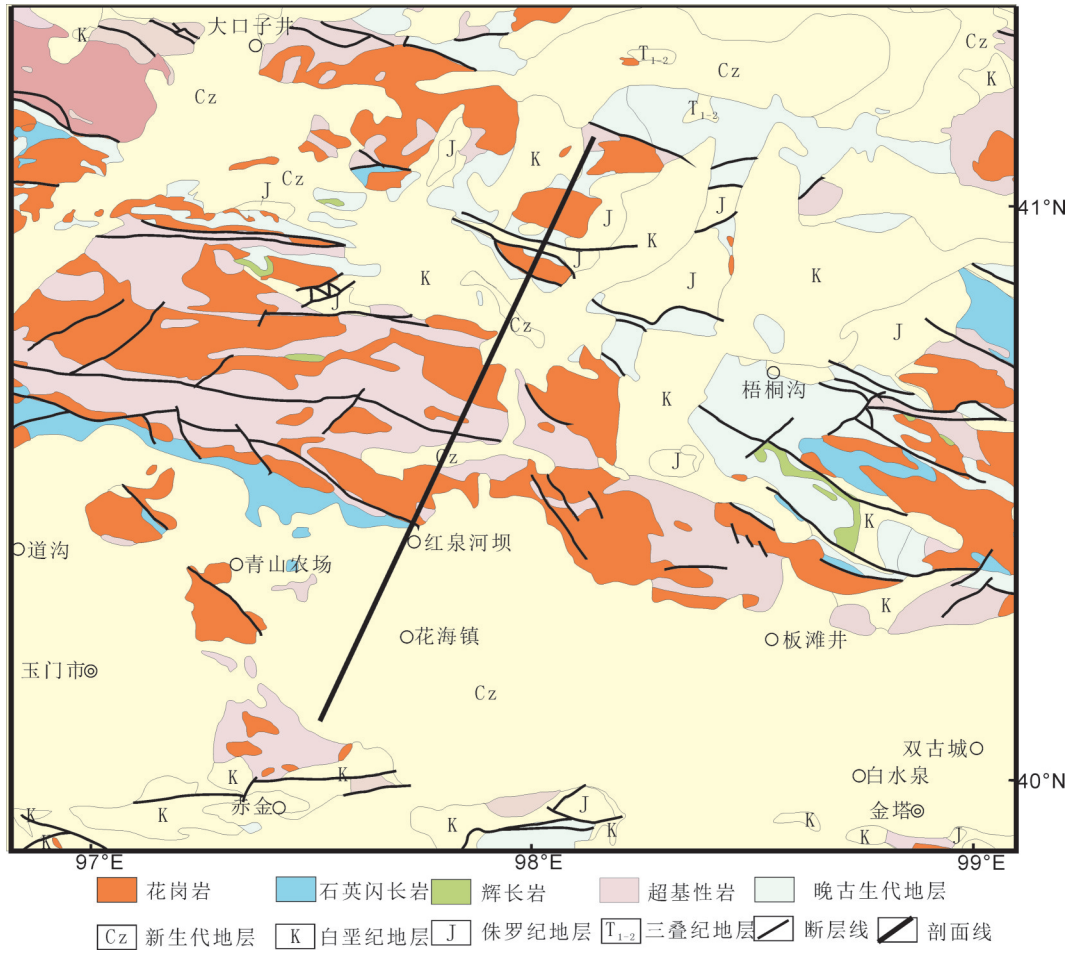


图2 花海盆地地质略图(据徐学义等,2009修改)
 Fig.2 Sketch geological map of the Huahai basin (modified from Xu et al., 2009)

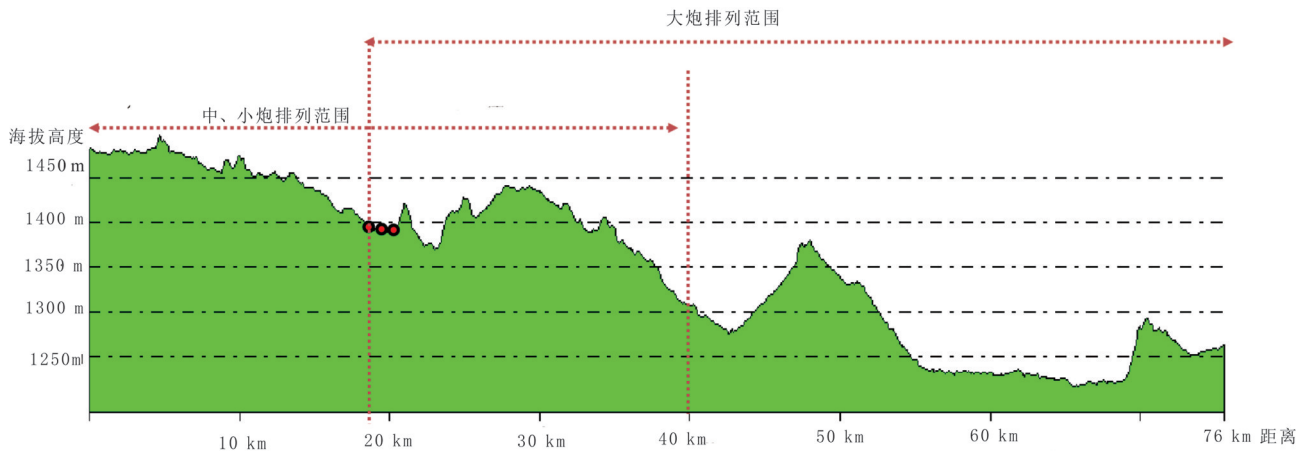


图3 点试验接收排列高程图
 Fig.3 Point test receiving arrangement elevation map

表 1 实验对比内容
Table 1 Experimental comparison table

试验类型	激发因素	组合基距	炮数	备注
S1 小炮药量+ 组合试验	1口×30 m×36 kg	\	1	潜水面下激发 (潜水面: 20 m)
	1口×30 m×48 kg	\	1	
	1口×30 m×60 kg	\	1	
	2口×20 m×单井 24 kg、总药量 48 kg	$D_x=12$ m	1	潜水面下激发
	2口×20 m×单井 30 kg、总药量 60 kg	$D_x=12$ m	1	
S2 中炮井深 +组合试验	3口×25 m×单井 50 kg、总药量 150 kg	$D_x=16$ m	1	潜水面下激发
	4口×25 m×单井 38 kg、总药量 150 kg	$D_x=D_y=16$ m	1	
	2口×35 m×单井 76 kg、总药量 150 kg	$D_x=16$ m	1	
S3 大炮 组合井试验	4口×45 m×单井 124 kg、总药量 496kg	$D_x=D_y=16$ m	1	在 1800m/s 以上的高速层中或潜水面下 激发
	6口×35 m×单井 84kg、总药量 496kg	$D_x=D_y=18$ m	1	
	8口×25 m×单井 62 kg、总药量 496kg	$D_x=D_y=18$ m	1	
合计			11	

间隔上,小炮、中炮间隔 2 ms,大炮则为 4 ms;采用 SEG-D 的记录格式、12 dB 的前放增益、0.5 N_LIN 的前置滤波,以及不设置低截频率(实验对比内容见表 1)。

4 试验资料分析

4.1 小炮试验

小炮实验采用的采集参数是道距 40 m,最小偏移距 20 m,最大偏移距 19180 m,960 道对称接收。小炮试验点接收排列地表高程如图 4。

4.1.1 小折射记录

为获得小炮试验点下低速层厚度,采用重锤激发排列接收的小折射方法记录并计算出低速层厚度(图 5)。根据调查结果,该点处低速带厚度 5.1 m。

4.1.2 单井药量对比

如表 1 所示,小炮单井药量试验控制井深 30 m,前人调查显示,花海盆地的潜水面深度为 20 m(程远顺, 2011),因此 30 m 的井深能够确保炸药在潜水面

之下激发。三个对比药量分别为 36 kg、48 kg、60 kg。

明显看出,36 kg 药量激发不足以反映地下地层信息,下传能量散失严重;48 kg、60 kg 药量能量稍强。在图 6 中,48 kg、60 kg 药量激发获得的反射信息中,12 s 以浅的地层反射信息丰富,可见 6 组反射;而在 36 kg 药量上并不明显。在图 7、图 8 中,60 kg 激发较 48 kg 激发反射能量稍强,但都能见到丰富的反射信息,并获得清晰的 MOHO 反射;相反在 36 kg 药量上并不显著。

4.1.3 组合井药量对比

如表 1 所示,小炮组合井药量试验控制井深 20 m,两个对比组合井中单井药量分别为 24 kg、30 kg,在 1800 m/s 以上的高速层中或潜水面下激发。试验过后获得反射信息,经过自动增益后结果如图 9,经过低通滤波 0~10 Hz 处理后结果如图 10,经过带通滤波 20~40 Hz 处理后结果如图 11。

在图 9 中,两种药量对比下都能获得丰富的反射信息;而在图 10、图 11 中虽然能看到清晰的

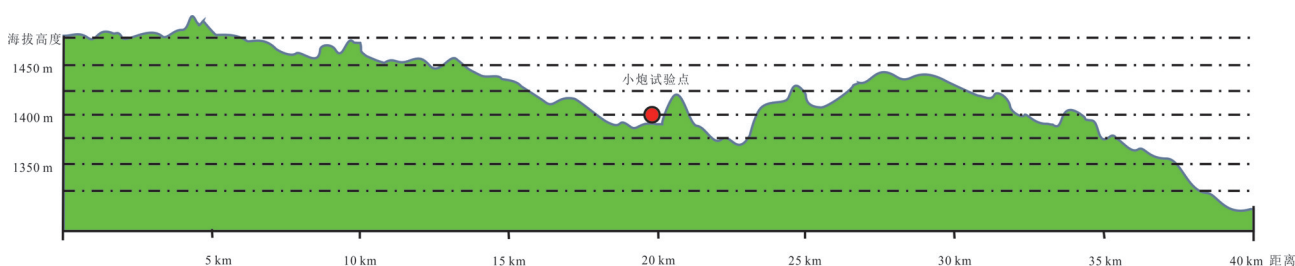


图 4 小炮试验点接收排列地表高程图

Fig.4 Small cannon test point receiving and arranging surface elevation map

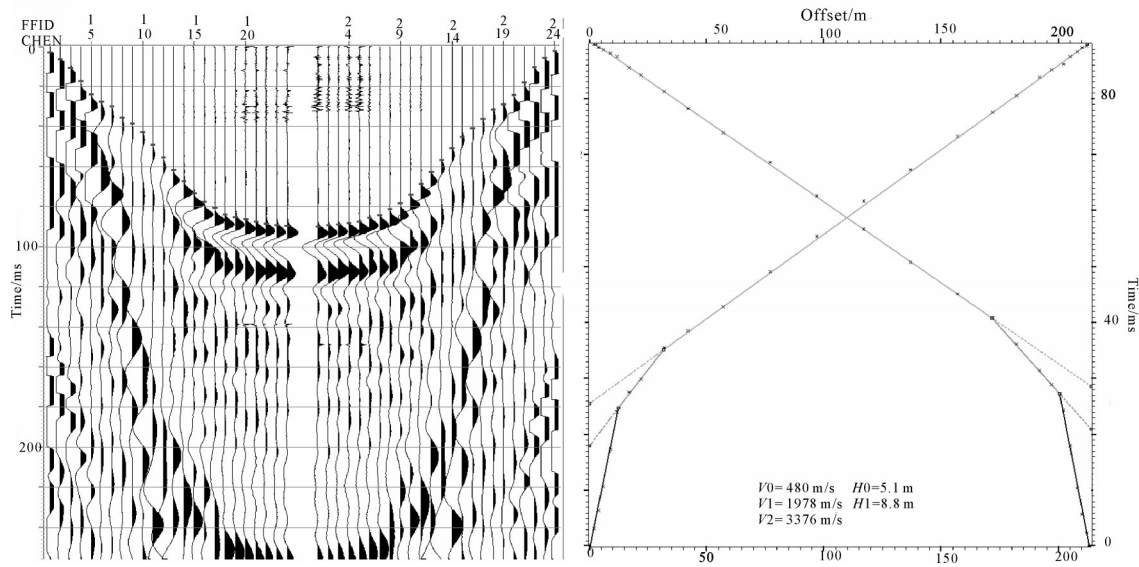


图5 小炮小折射记录及时距曲线
Fig.5 Small cannon small refraction record and hodograph

MOHO面反射,但整体对比来看,组合井深比单井深小炮稍差。

4.2 中炮试验

中炮实验采用的采集参数和小炮实验相同,是道距40 m,最小偏移距20 m,最大偏移距19180 m,960

道对称接收。中炮试验点接收排列地表高程如图12。

4.2.1 小折射记录

为获得中炮试验点下低速层厚度,采用重锤激发排列接收的小折射方法记录并计算出低速层厚度(图13)。

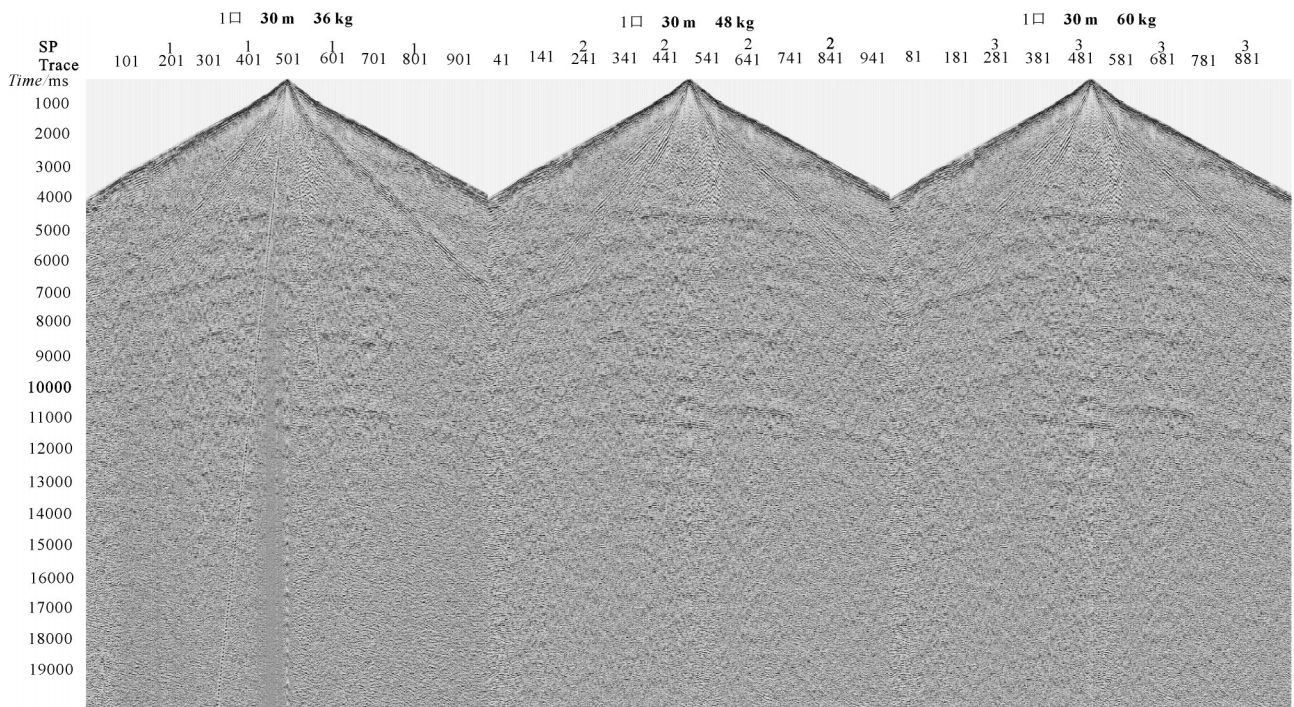


图6 小炮单井自动增益
Fig.6 Small cannon single well automatic gain

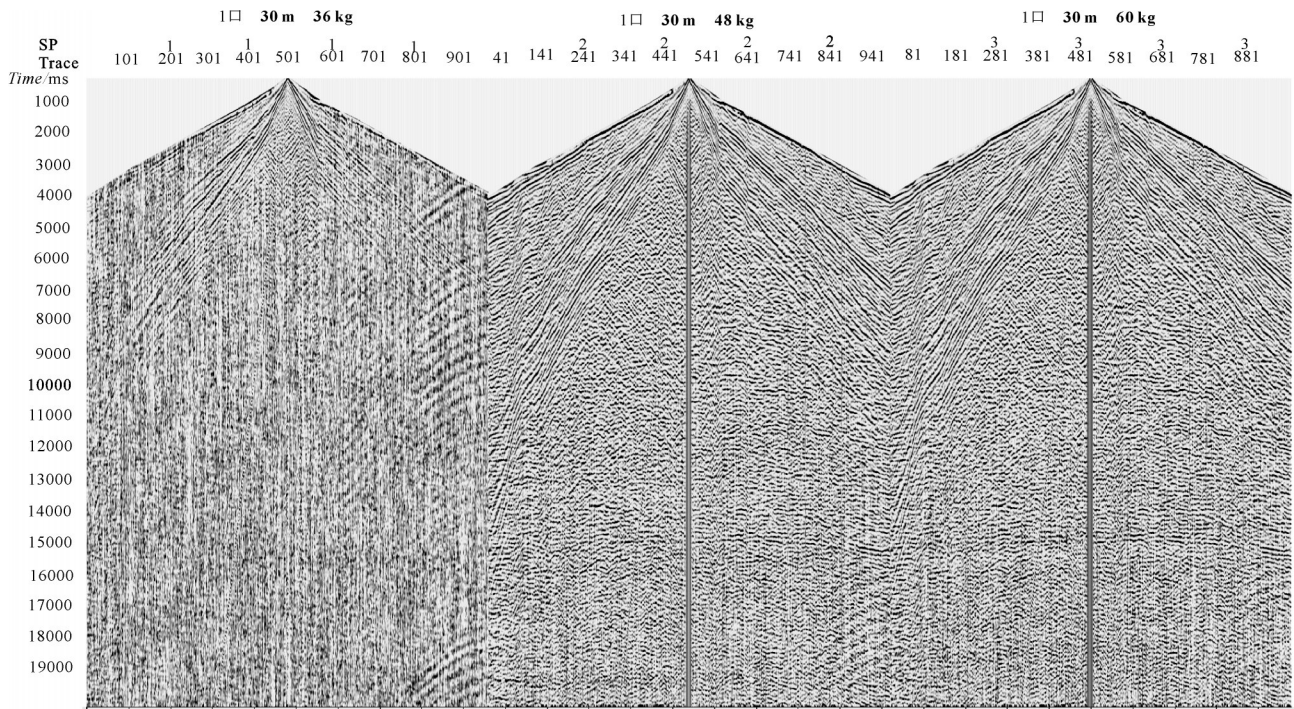


图7 小炮单井低通滤波0~10 Hz
Fig.7 Small cannon single well 0~10 Hz low-pass filter

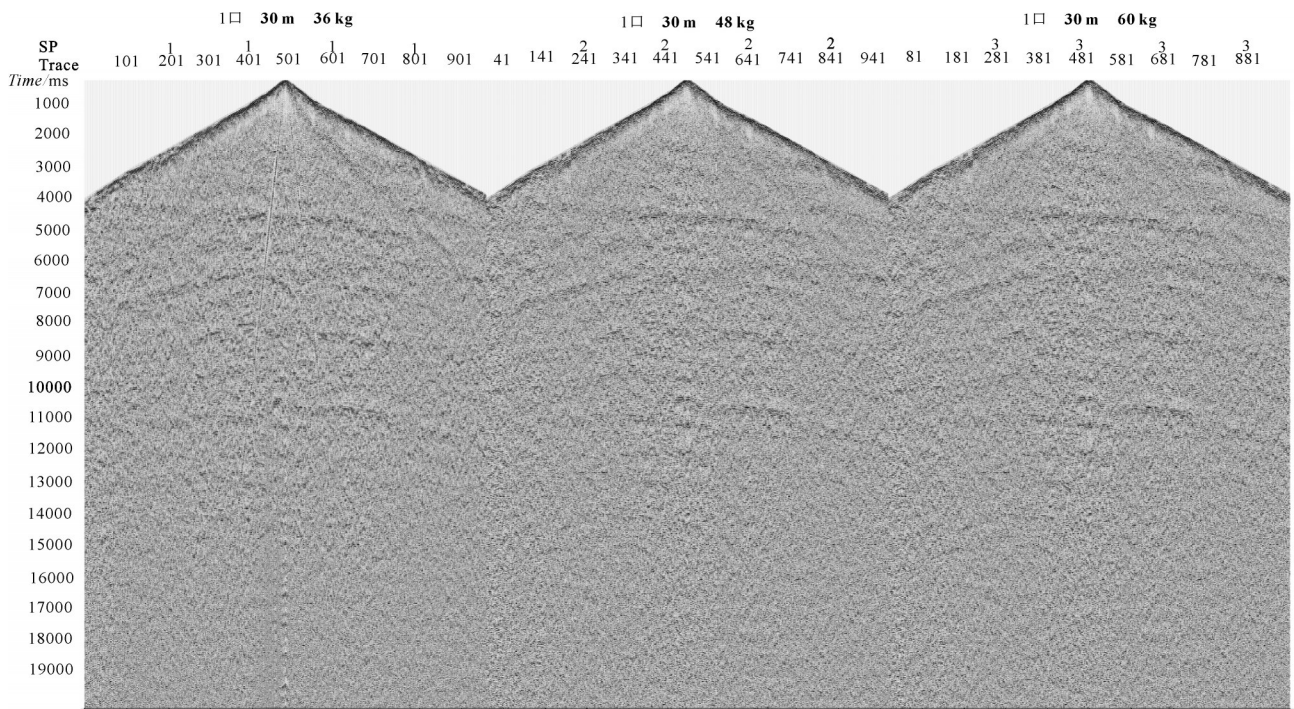


图8 小炮单井带通滤波20~40 Hz
Fig.8 Small cannon single well 20~40 Hz bandpass filter

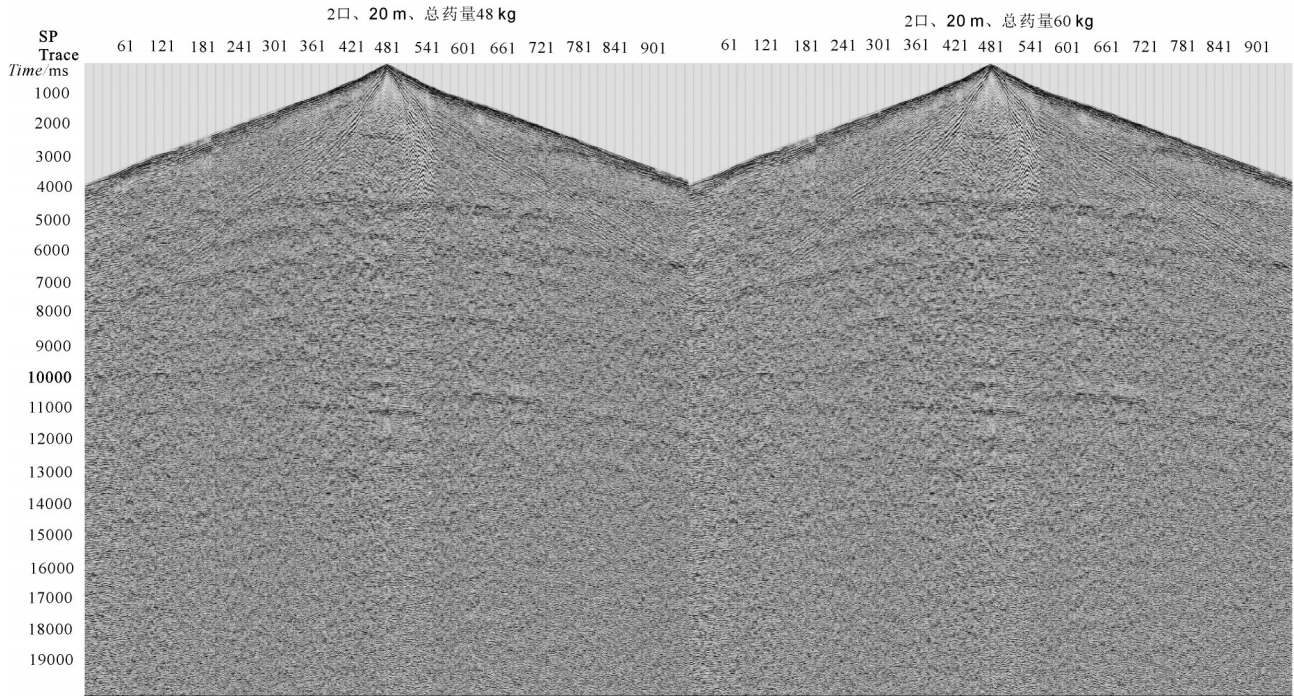


图9 小炮组合井自动增益
Fig.9 Small cannon combined well automatic gain

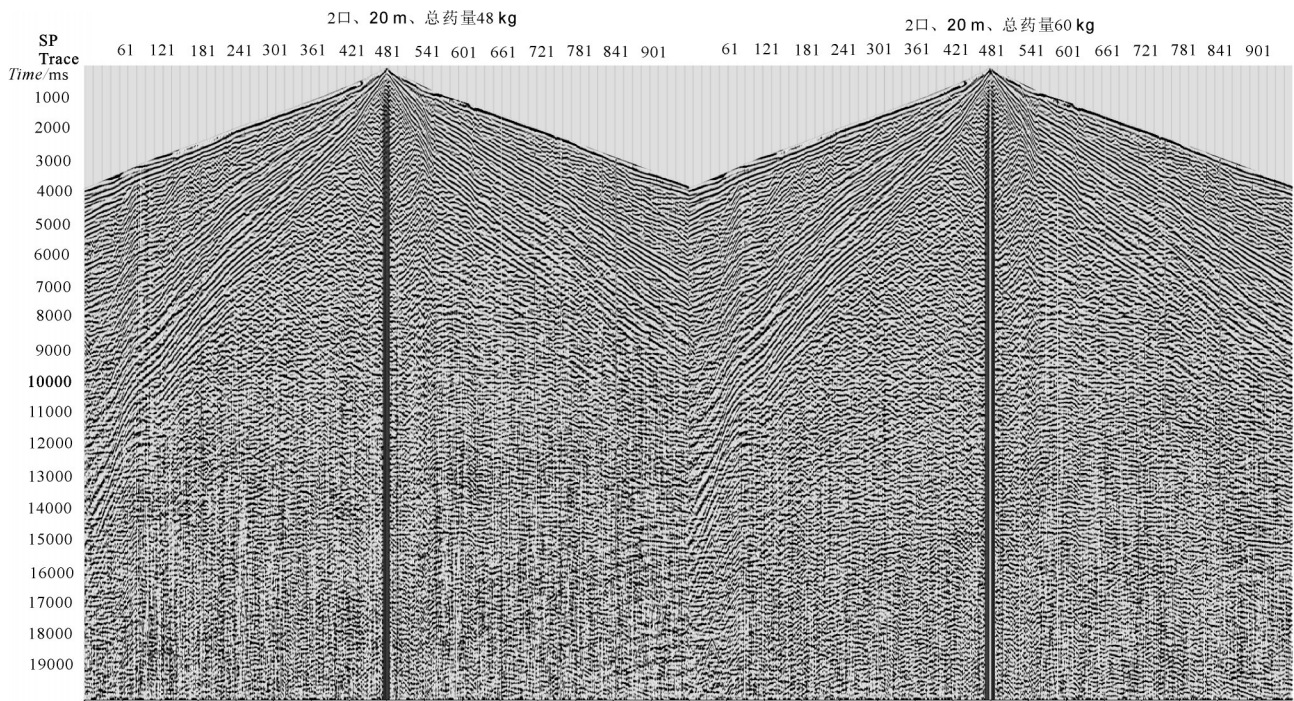


图10 小炮组合井低通滤波0~10 Hz
Fig.10 Small cannon combined well 0-10 Hz low-pass filter

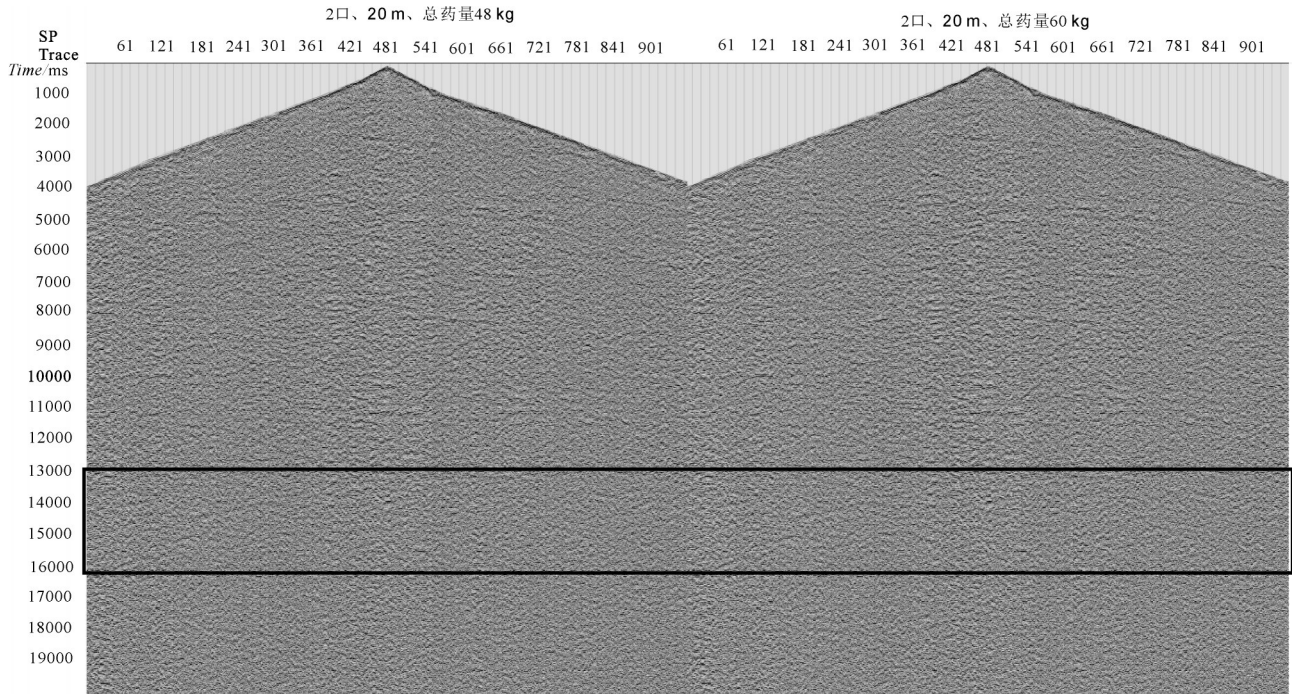


图 11 小炮组合井带通滤波 20~40 Hz

Fig.11 Small cannon combined well 20~40 Hz bandpass filter

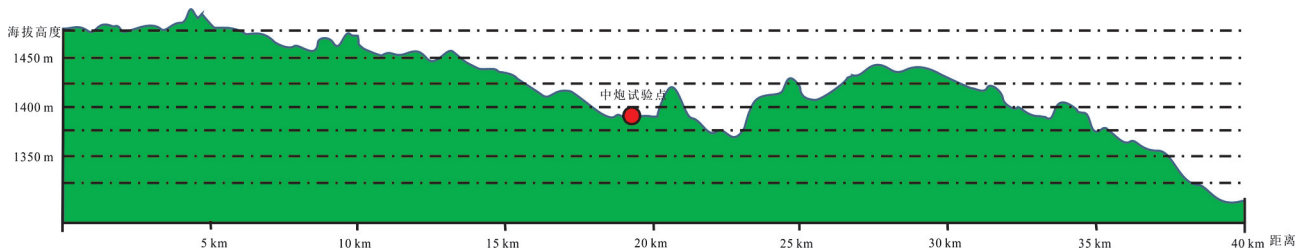


图 12 中炮试验点接收排列地表高程图

Fig.12 Medium cannon test point receiving and arranging surface elevation map

根据调查结果,该点处低速带厚度 3.6 m。

4.2.2 组合井药量对比

如表 1 所示,中炮组合井药量试验控制总药量为 150 kg,三个对比中参数分别为井深 35 m 两口井、井深 25 m 三口井以及井深 25 m 四口井,在 1800 m/s 以上的高速层中或潜水面下激发。试验过后获得反射信息,经过自动增益后结果如图 14,经过低通滤波 0~10 Hz 处理后结果如图 15,经过带通滤波 20~40 Hz 处理后结果如图 16。

在图 14 中,9 s 以浅反射信息较强,信噪比高,而 9 s 以深,受干扰波影响,反射信息不明显;在图 15 中,经过 10 Hz 低通滤波处理后,9 s 以深可以看到有效反射,在 15 s 左右可见 MOHO 面反射。总体上从中炮不同组合井试验对比分析来看,总药量一

致,中炮的能量、信噪比差异不大。15 s 左右均可见 MOHO 反射。

4.3 大炮试验

大炮实验采用的采集参数是道距 40 m,最小偏移距 20 m,最大偏移距 57100 m,1428 道单边接收。大炮试验点接收排列地表高程如图 17。

4.3.1 小折射记录

为获得大炮试验点下低速层厚度,采用重锤激发排列接收的小折射方法记录并计算出低速层厚度(图 18)。

根据调查结果,该点处低速带厚度 3.2 m。

4.3.2 组合井药量对比

如表 1 所示,大炮组合井药量试验控制总药量为 496 kg,三个对比中参数分别为井深 45 m 四口井、井

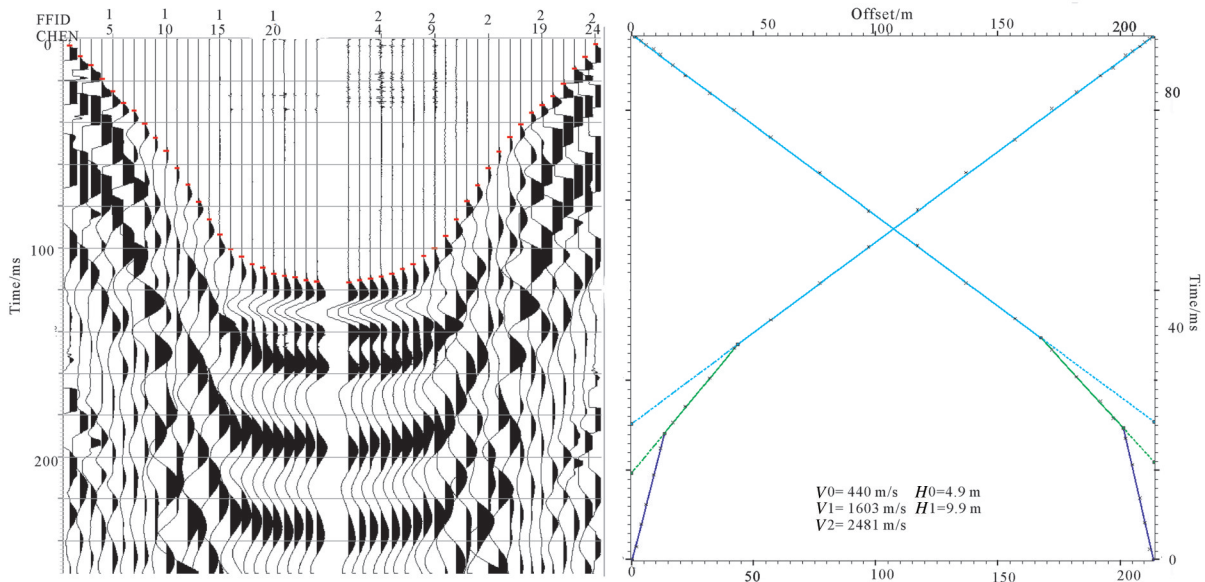


图13 中炮小折射记录及时距曲线
 Fig.13 Medium cannon small refraction record and hodograph

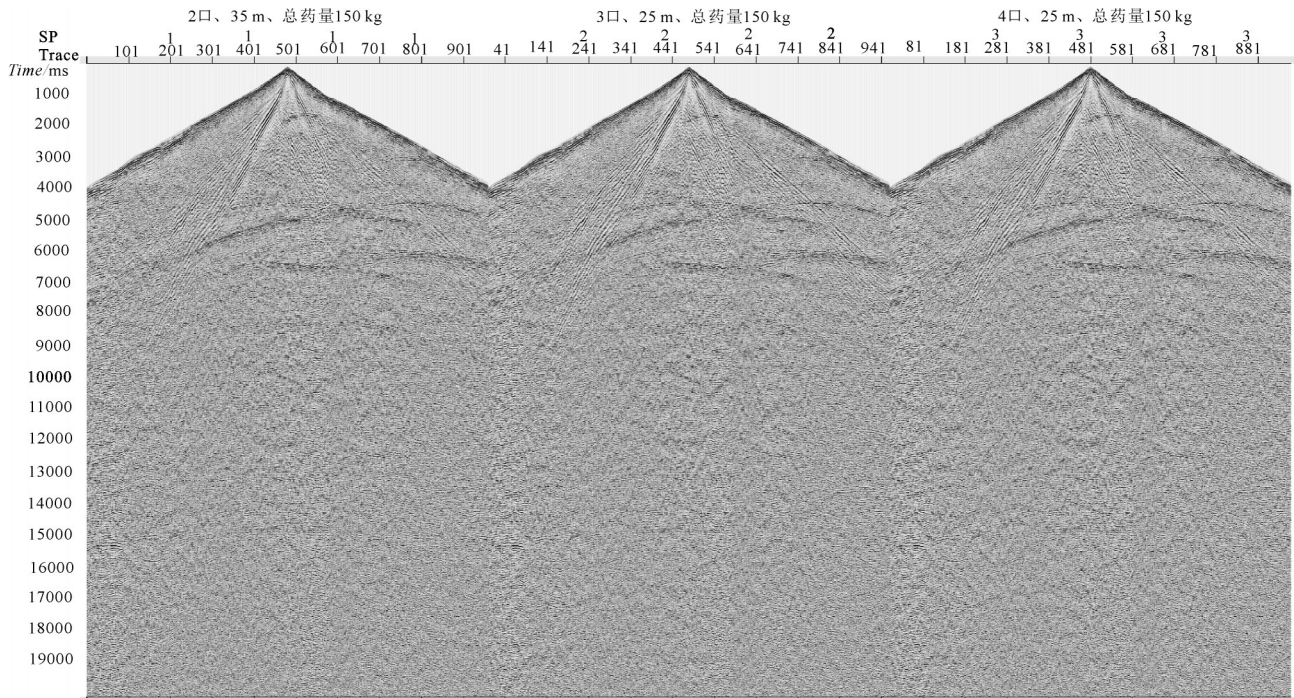


图14 中炮组合井自动增益
 Fig.14 Medium cannon combined well automatic gain

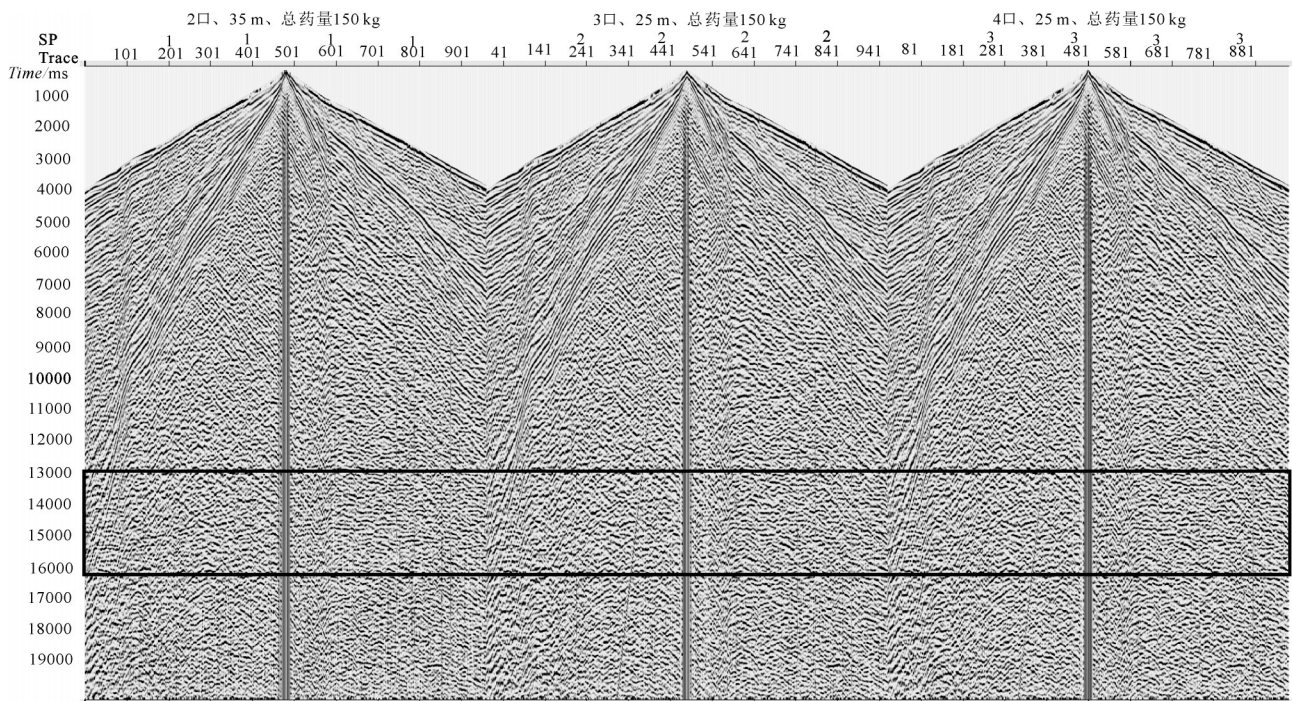


图 15 中炮组合井低通滤波 0~10 Hz
 Fig.15 Medium cannon combined well 0-10 Hz low-pass filter

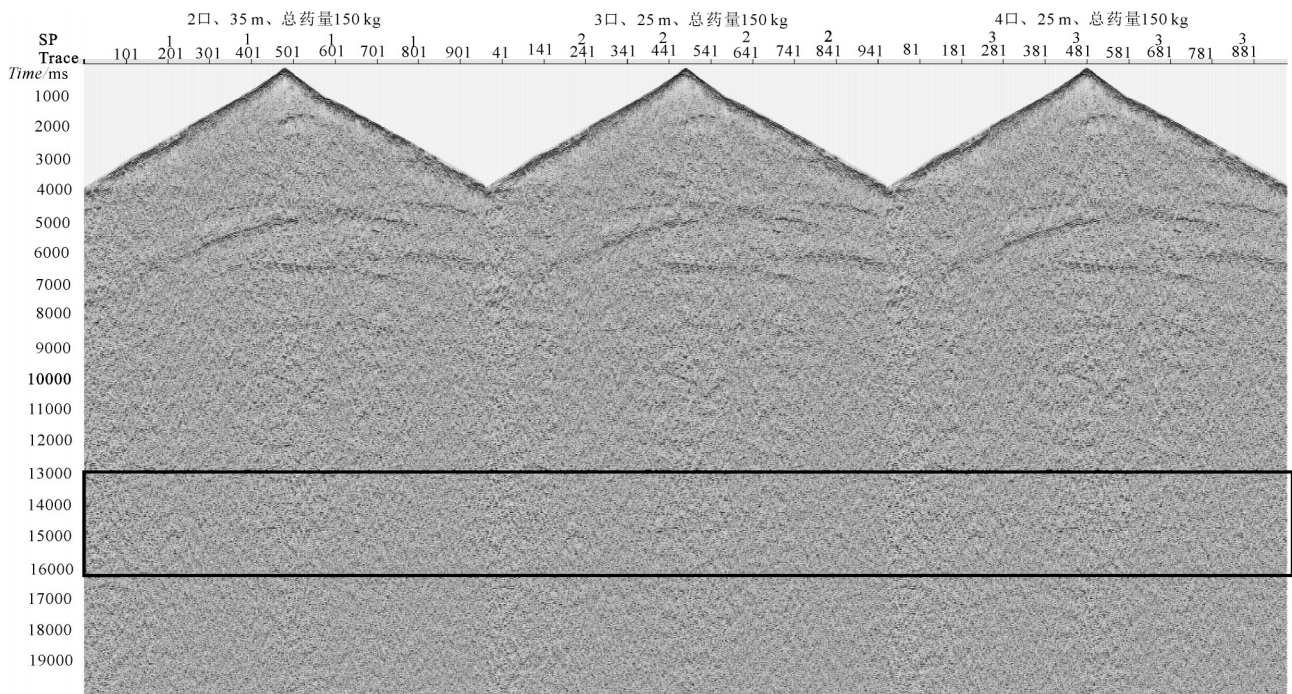


图 16 中炮组合井带通滤波 20~40 Hz
 Fig.16 Medium cannon combined well 20-40 Hz bandpass filter

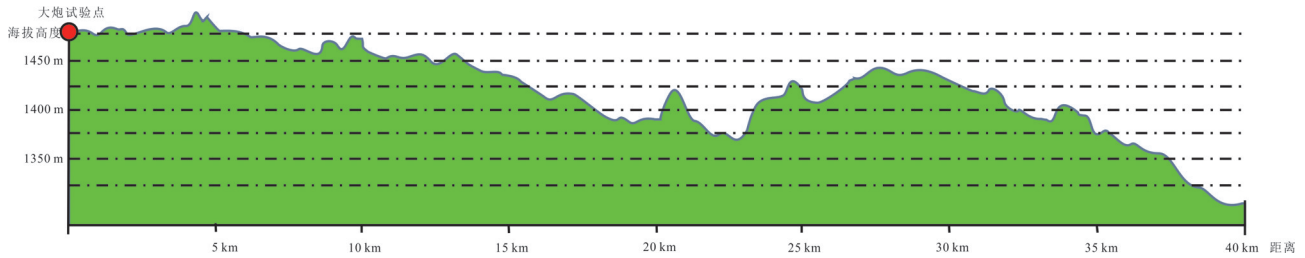


图17 大炮试验点接收排列地表高程图
Fig.17 Cannon test point receiving and arranging surface elevation map

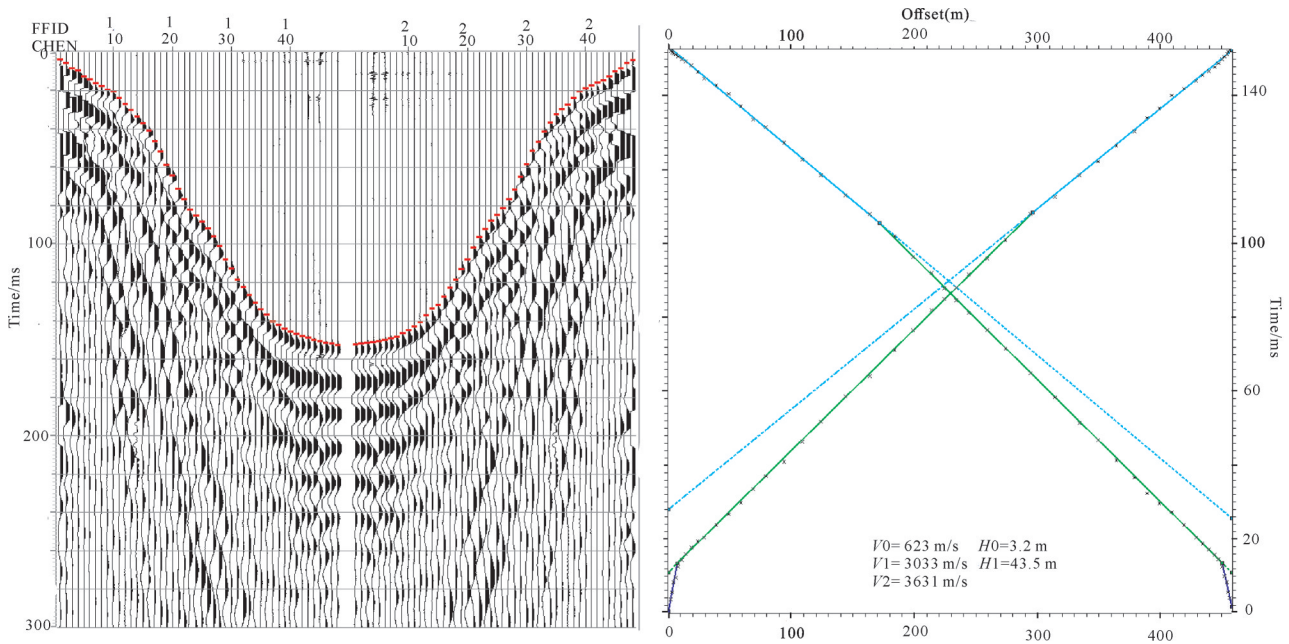


图18 大炮小折射记录及时距曲线
Fig.18 Cannon small refraction record and hodograph

深35 m六口井以及井深25 m八口井,在1800 m/s以上的高速层中或潜水面下激发。试验过后获得反射信息,经过自动增益后结果如图19,经过低通滤波0~10 Hz处理后结果如图20,经过带通滤波10~20 Hz处理后结果如图21。

在图20中,经过低通10 Hz处理后可以看出面波发育较强,但15 s左右可见MOHO反射。整体上从大炮不同组合对比试验分析来看,总药量496 kg,各井数组合激发大炮能量较强,能量传播到57 km远的排列。但各组合大炮彼此品质差异不大。通过10 Hz以下、15 s左右可见到MOHO反射。

5 结论

花海盆地是本次深反射地震剖面调查的重要组成部分,为了在正式采集中获得高质量的原始数据奠定基础,笔者通过小炮、中炮和大炮的各种对比试验,探索试验出适合于花海盆地勘探的深地震反射采集参数。获得以下几点结论:

(1)在小炮实验中,经过对比发现,在药量对比上,36 kg反映出的反射信息没有48 kg和60kg反映出的丰富,在MOHO反射的清晰度上后者更为清晰;在井深对比上,单深井激发整体效果比组合井激发整体效果好。小炮激发参数为单井药量48 kg

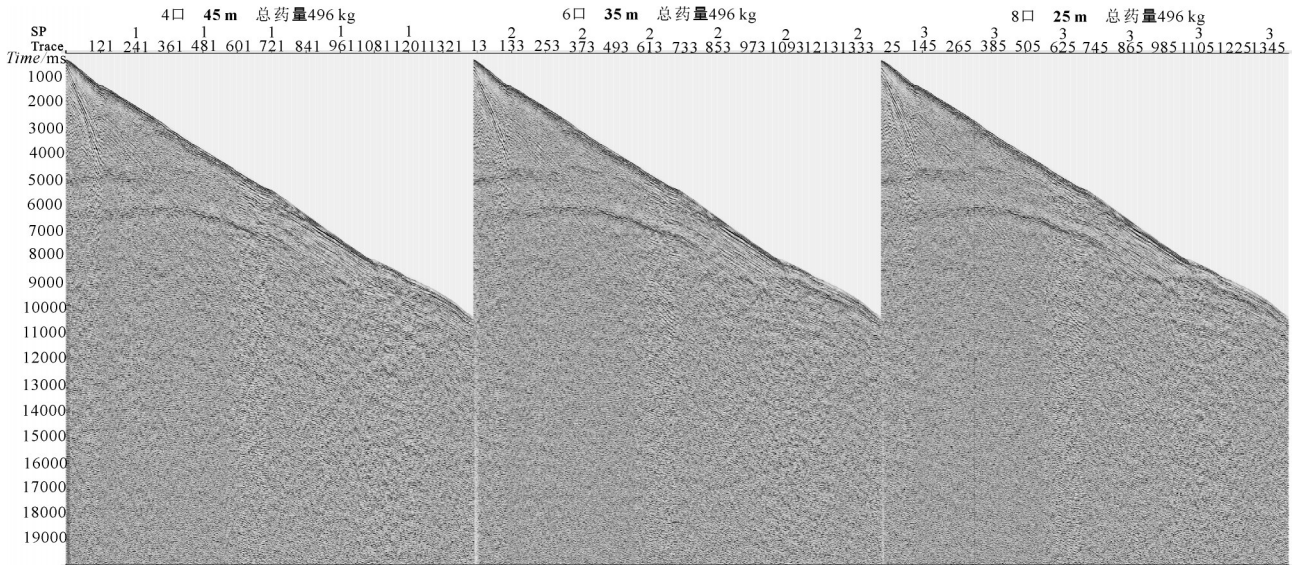


图19 大炮组合井自动增益
Fig.19 Cannon combined well automatic gain

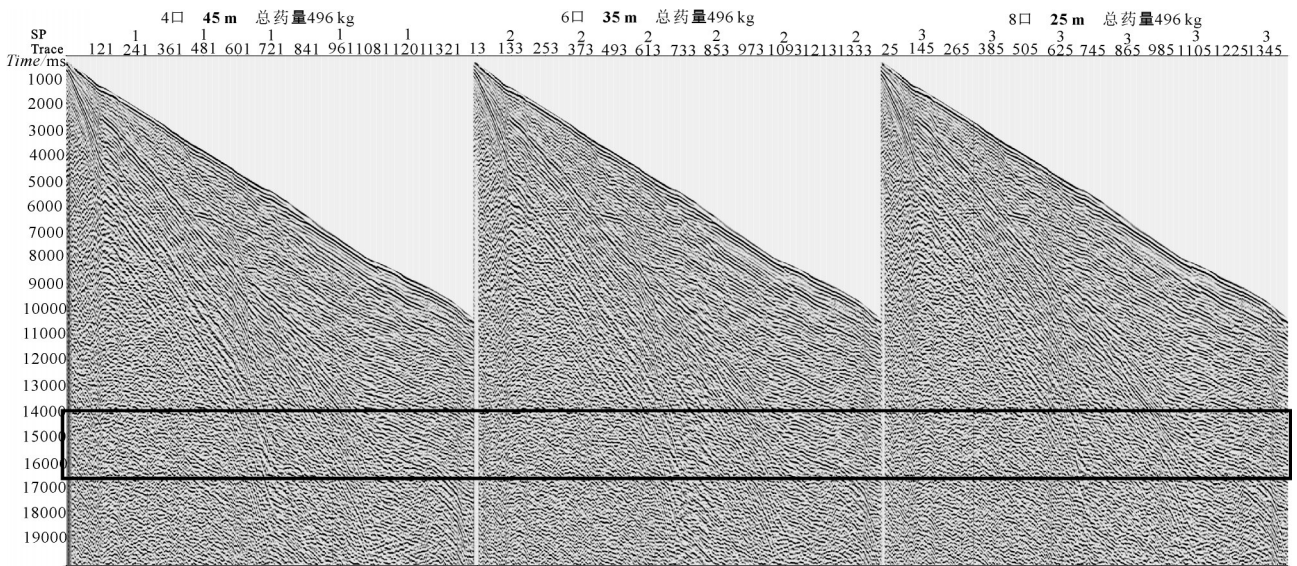


图20 大炮组合井低通滤波0~10 Hz
Fig.20 Cannon combined well 0-10 Hz low-pass filter

在高速顶下潜水面下3 m激发,最浅井深为30 m,而在成井特别困难区域,采用20 m井深,总药量48 kg两口井为一组的组合井参数。

(2)在中炮和大炮实验中,不同组合井对比差异不大,都可获得清晰的MOHO反射。整体来看,随着药量增大,激发能量增大,但面波、折射波等干扰波能量也在增强,因此,小炮干扰波能量最弱,反射信息最丰富,中炮和大炮干扰波较发育,12 s以浅

反射信息不如小炮丰富。但通过后期去噪处理,也能得到中浅层反射信息。MOHO面反射主要集中在低频10 Hz以下频带。中炮的采集参数为总药量150 kg在高速顶下潜水面下3 m激发,最浅井深为25 m,三口井为一组的组合井或者总药量150 kg在高速顶下潜水面下3 m激发,最浅井深为38 m,两口井为一组的组合井。大炮采集参数设置为总药量496 kg在高速顶下潜水面下3 m激发,最浅井深为

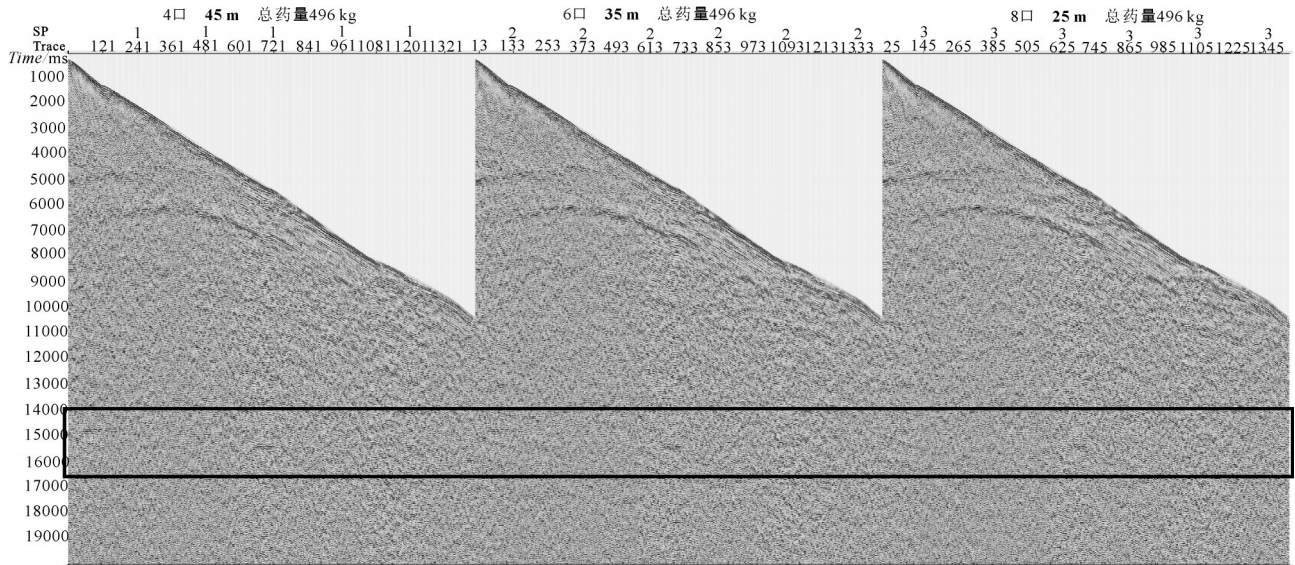


图21 大炮组合井带通滤波10~20 Hz
Fig. 21 Cannon combined well 10-20 Hz bandpass filter

40 m,六口井为一组的组合井。

致谢:感谢中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司吐哈物探处和工程技术人员付出的辛勤工作!感谢审稿专家提出的修改意见!

References

- Bois C, Party ECORS Scientific. 1990. Major geodynamic processes studied from the ECORS deep seismic profiles in France and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 173(1/4):397-410.
- Brown Larry D. 1991. A new map of crustal 'terranes' in the United States from COCORP deep seismic reflection profiling[J]. *Geophysical Journal International*, 105(1):3-13.
- Brown Larry D. 1985. Continents—From accretion to extension: New results from COCORP deep seismic profiling, SEG Technical Program Expanded Abstracts 1985[J]. *Society of Exploration Geophysicists*, 122-123.
- Cheng Yuanshun. 2011. Status analysis of the groundwater in the Huahai basin, Yumen, Hexi Corridor Basin, Northwestern China[J]. *Gansu Agriculture*, (9):8-9 (in Chinese).
- Cook Frederick A. 1985. Geometry of the Kapuskasing structure from a Lithoprobe pilot reflection survey[J]. *Geology*, 13(5):368-371.
- Jiang Pengfei, Tang Degao, Ren Xia, Ning Pengfei. 2009. Analysis on explosion parameters of blast seismic exploration in carbonatite rock[J]. *J. Hunan University of Sci. & Tech. (Nature Science Edition)*, 24(4):21-25 (in Chinese with English abstract).
- Klemperer Simon L. 1989. Deep seismic reflection profiling and the growth of the continental crust[J]. *Tectonophysics*, 161(3/4):233-244.
- Liang Huiyun, Zhang Xiankang. 1996. Research progress and advances of deep seismic sounding[J]. *Progress in Geophysics*, 11(1):42-60 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guolin. 2013. Application of Rock Mechanics of Anti-Stress-Strain to Some Projects[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Liu Zhendong, Lu Qingtian, Yan Jiayong, Zhao Jinhua, Wu Ming'an. 2012. Tomographic velocity structure of shallow crust and target prediction for concealed ore deposits in the Luzong basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12):3910-3922 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jincui, Zhang Hongan, Niu Yazhuo, Liu Huchuang, Chen Qingtang, Wei Jianshe. 2017. Petroleum and geological conditions and exploration of Carboniferous-Permian in Yin-E basin, western Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 44(1):13-32 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zhanwu, Gao Rui, Kuang Chaoyang, Liu JinKai, Hou HeSheng, Feng ShaoYing, Wang HaiYan. 2010. Research on deep seismic reflection profile in Luzong ore concentration area: An economical and changeable gathering test[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2553-2560 (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Yan Jiayong, Shi Danian, Dong Shuwen, Tang Jingtian, Wu Mingan, Chang Yinuo. 2013. Reflection seismic imaging of the Lujiang - Zongyang volcanic basin, Yangtze Metallogenic Belt: An insight into the crustal structure and geodynamics of an ore district[J]. *Tectonophysics*, 606:60-77.
- Ren Zhanli. 1996. Determination of palaeothermal field and significance in oil-gas exploration on Huahai-Jinta Basin[J]. *Journal of Northwest University*, 26(1):171-176 (in Chinese with English abstract).

- Wang Haiyan, Gao Rui, Lu Zhanwu, Zhao Yulian, Wang Lili, Yu Haifeng. 2006. The pioneer technology in the deep sounding of the earth—the development and application of the deep seismic reflection profiling[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 29(1): 7–13 (in Chinese).
- Wang Shicheng, Yuan Wanmin, Wan Lanfen, Ren Zhanli. 1999. Thermal evolution and timing of hydrogen generation in the Huahai basin: evidence from apatite fission track data[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20:428–432 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qibin, Zhang Jin, Wang Jijun, Zhao Guoze, Tang Ji. 2012. Electrical resistivity structures between the Northern Qilian Mountains and Beishan Block, NW China, and tectonic implications[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200–201:92–104 (in Chinese with English abstract).
- Xie Gongjian. 1983. Oil prospects in the Huahai–Jinta basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 4(3):318–323 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, He Shiping, Wang Hongliang, Chen Junlu. 2009. The Metallogenic Background Map in the East Tien Shan – Bei Shan (1:1000000) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Yang Chongxin, Li Baixiang, Wang Zhilin. 2005. Discussion of geophysical field characteristics and other geological issues in West Hexi Corridor[J]. *Acta Geologica Gansu*, 14(1):76–81 (in Chinese with English abstract).
- Yang Guixiang. 2005. The method of seismic exploration in the bare carbonate rock area[J]. *Progress in Geophysics*, 20(4):1108–1128 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qinyong, Chang Jian, Xu Guoqing. 2009. Study of shooting mechanism of seismic waves in limestone–exposed area[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 44(4):399–405 (in Chinese with English abstract).
- 程远顺. 2011. 河西走廊玉门市花海盆地地下水现状分析[J]. *甘肃农业*, (9):8–9.
- 姜鹏飞, 唐德高, 任霞, 宁鹏飞. 2009. 硬岩地层爆破地震勘探的激发因素分析[J]. *湖南科技大学学报:自然科学版*, 24(4):21–25.
- 梁慧云, 张先康. 1996. 各国地壳上地幔深地震反射研究计划与进展[J]. *地球物理学进展*, 11(1):42–60.
- 刘国霖. 2013. 反应力应变岩石力学在工程中应用的简明论述[J]. *三峡大学学报:自然科学版*, 24(6):44–47.
- 刘振东, 吕庆田, 严加永, 赵金花, 吴明安. 2012. 庐枞盆地浅表地壳速度成像与隐伏矿靶区预测[J]. *地球物理学报*, 55(12):3910–3922.
- 卢进才, 张洪安, 牛亚卓, 刘护创, 陈清棠, 魏建设. 2017. 内蒙古西部银额盆地石炭系—二叠系油气地质条件与勘探发现[J]. *中国地质*, 44(1):13–32.
- 卢占武, 高锐, 刘金凯, 匡朝阳, 鄄少英, 李朋武, 张季生, 王海燕. 2010. 庐—枞金属矿集区深地震反射剖面解释结果——揭露地壳精细结构, 追踪成矿深部过程[J]. *岩石学报*, 26(9):2543–2552.
- 任战利, 张小会, 刘池洋, 吴汉宁. 1995. 花海—金塔盆地生油岩古温度的确定指明了油气勘探方向[J]. *科学通报*, 40(10):921–921.
- 王海燕, 高锐, 卢占武, 赵玉莲, 王丽丽, 于海峰. 2006. 地球深部探测的先锋——深地震反射方法的发展与应用[J]. *勘探地球物理进展*, 29(1):7–13.
- 王世成, 袁万明, 王兰芬, 任战利. 1999. 花海拗陷的热演化和生烃期的磷灰石裂变径迹证据[J]. *地质学报*, 20(4): 428–432.
- 谢恭俭. 1983. 花海—金塔盆地的含油远景[J]. *石油与天然气地质*, 4(3):318–323.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 陈隽璐. 2009. 东天山—北山地区成矿地质背景图 (1:1000000)[M]. 北京: 地质出版社.
- 杨贵祥. 2005. 碳酸盐岩裸露区地震勘探采集方法[J]. *地球物理学进展*, 20(4):1108–1128.
- 杨勤勇, 常鉴, 徐国庆. 2009. 灰岩裸露区地震激发机理研究[J]. *石油地球物理勘探*, 44(4):399–405.
- 杨重信, 李百祥, 王志林. 2005. 河西走廊西段地球物理场特征及相关地质问题探讨[J]. *甘肃地质*, (1):76–81.

附中文参考文献

程远顺. 2011. 河西走廊玉门市花海盆地地下水现状分析[J]. *甘肃农*