

# 数字检波器在近地表火成岩区适用性分析

古士明,朱峰,石一青,王平,王建,江宏,张志桥

(中石化石油工程地球物理有限公司华东分公司,江苏南京210009)

**摘要:**单点数字检波器采集优势不仅依赖其固有特性,还与地震信号传播过程中的吸收衰减作用有关,因此其应用效果与工区近地表的地质条件密切相关。WLZ地区近地表火成岩广泛发育,分布表现为多期、多套、多产状的特点,物性表现为低速孔隙状、中高速-高速致密状火成岩,对高频信号产生了较大的吸收衰减作用,因此数字检波器的性能特点在近地表存在复杂多类型火成岩的区域难以充分体现。

**关键词:**火成岩 数字检波器 高频信号 模拟分析 屏蔽作用

**中图分类号:**P631.4 **文献标志码:**A

## Applicability analysis of digital geophone in near surface of igneous rock

GU Shiming, ZHU Feng, SHI Yiqing, WANG Ping, WANG Jian,

JIANG Hong, ZHANG Zhiqiao

(The East China Company of Sinopec Geophysical Co., Nanjing 210009, China)

**Abstract:** The acquisition advantage of single digital geophone is not only relied on its inherent characteristics, but also related to absorption attenuation during seismic signal transmission. Therefore, its application effect is closely related to the seismic geological conditions near the surface of the work area. The near-surface igneous rocks in WLZ region are widely developed. Their distribution is characterized by multiple periods, multiple sets and high productivity, with physical properties of low-speed porosity, medium-high speed and high-speed compact igneous rocks, which have a larger absorption attenuation effect on high frequency signal. Therefore, it is difficult to fully embody the performance characteristics of digital geophone in near-surface existing complex kinds of igneous rock area.

**Key words:** igneous rock; digital geophone; signal of high frequency; simulation analysis; shielding effect

苏北盆地从2015、2016年分别在海安凹陷XJ地区、金湖凹陷WLZ地区进行了单分量数字检波器高精度三维地震采集,主要目的是获得主频高、频带宽的高分辨率地震资料。XJ探区近地表结构为含水流沙层,地震资料激发效果较好,数字采集单炮较老资料优势主频和有效频宽明显提高<sup>[1]</sup>;WLZ探区近地表结构复杂、胶泥之下为多组不同速度、不同性质的火成岩,单炮折射波发育,对高频信号存在不同的吸收衰减作用,此类地区的新采集地震资料较老资料在优势主频和有效频宽没有取得预期的效果。

数字检波器与模拟检波器从频谱和振幅特性方面相比,具有高保真、动态范围大、相位一致性好、频带宽等特点<sup>[2]</sup>。当二者统一转换到速度域时,数字检波器在0~600 Hz频率范围对信号的接收灵敏度高于模拟检波器;当统一转换到加速度域,数字检波

器对比模拟检波器具有全通放的优势(图1)。

但是地震采集中数字检波器为单点接收,模拟检波器为组合接收,不同的接收方式对探区的信噪比有不同的要求。模拟检波器的组合接收能够较好压制信噪比低地区各方向的干扰波,从而提高信噪比;单点接收的数字检波器采集压制干扰的能力较弱,只有在具有较好地震响应的地区能够实现提高分辨率的效果。同时,单点数字检波器的优势还依赖于激发时能否产生主频较高、频带较宽的单炮信号及传播过程中的吸收衰减问题,因此数字检波器

收稿日期:2018-03-02;改回日期:2018-05-15。

第一作者简介:古士明(1971-),工程师,现从事地震资料采集研究工作。E-mail:784662487@qq.com。

的应用效果不仅与检波器固有特性有关,还与工区近地表的地震地质条件密切相关。

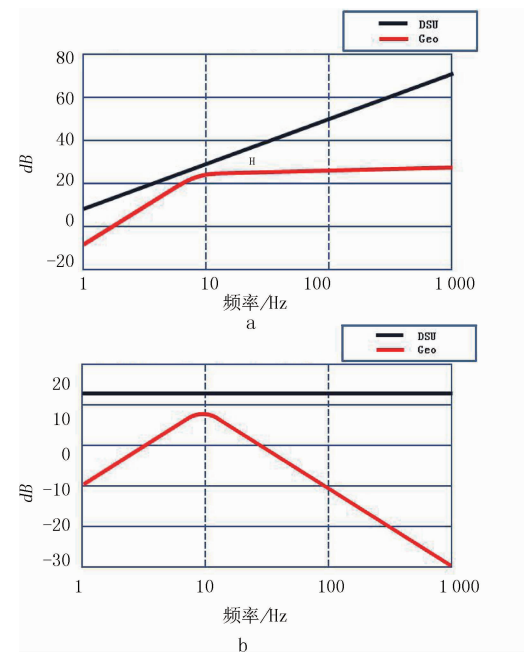


图 1 数字检波器与模拟检波器在不同域中频率响应特征(a:速度域;b:加速度域)

## 1 WLZ 探区近地表结构特征研究

该区自新生代古新世起至上新世,西北盱眙、南

部六合地区玄武岩大规模喷发,在桂五、古城一带大面积出露,向东倾覆逐渐掩埋于平原覆盖层之下。其顶板埋深由 15 m 逐渐到 110 ~ 126 m,厚度最大大于 100 m。地震采集进行 2 km × 2 km 的网格布设 50 m 微测井调查,由西向东选取 5 个点位进行钻井取芯及岩性物性测试,近地表表层结构剖面显示如图 2 所示,全区近地表 0 ~ 20 m 基本为胶泥地层,胶泥之下出现多套多期玄武岩地层:上部为疏松的气孔状玄武岩,分布在工区西部及中部 11 ~ 48 m 深度范围内,推测是来自西部釜山近源的火成岩,由西向北东埋深加深;下部广泛分布致密状玄武岩,平均埋深 25 m 以上,由西向北东埋深逐渐加深,推测为来自北部的火山口熔岩。局部致密火成岩之下存在裂隙或大缝洞火成岩,呈条带状分布于工区中北部,近地表的火成岩分布呈现多源、多方向的特征。

结合对第四纪近地表地质、精细近地表结构调查、钻井录井、以往地震资料的分析,确定火成岩分布为多组多套多期,盐城组、三垛组及戴南组均有发育。其中,盐城组存在气孔状、致密状、裂隙状等多组火成岩,且致密火成岩为多期次。由于区域上盐城组西抬,在该工区已经接近出露地表,因此盐城组发育的多类型火成岩埋藏浅,且靠近激发深度,对激发信号传播的影响最大。

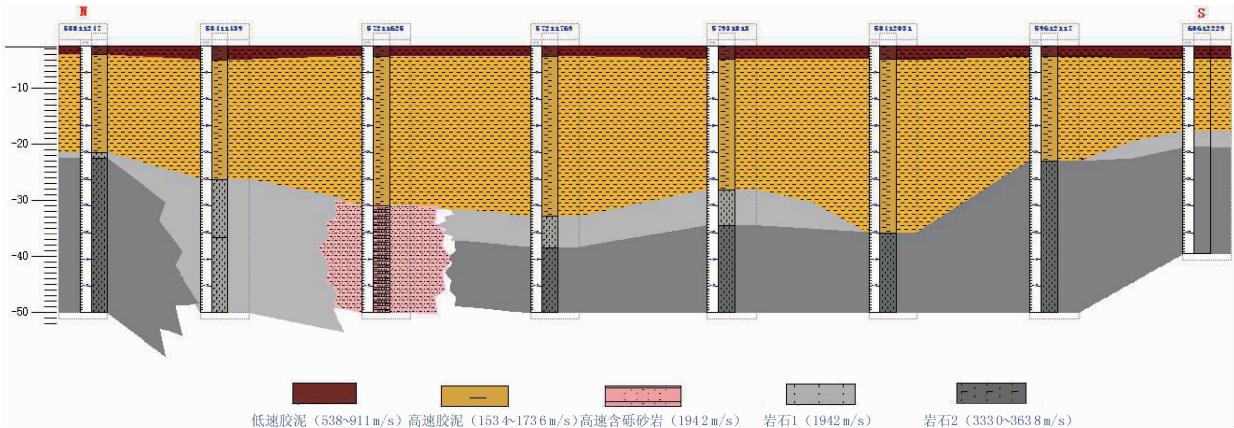


图 2 工区近地表 0 ~ 50 m 表层结构剖面

## 2 数字检波器采集资料分析

通过开展精细表层结构调查、老资料单炮分析、探井资料及近地表地质结构的研究,发现地震资料的品质与近地表火成岩结构存在一定的对应关系(图 3):

(1) 上升盘区域(蓝框):表层结构调查该区域存在中速火成岩( $1\,800\text{ m/s} \leq v \leq 3\,600\text{ m/s}$ ),对中深目的层反射影响不大,浅层反射信息丰富;

(2) 杨村断裂带区域(红框):火成岩地层随着断裂发育成断块状,断裂带内幕反射复杂;

(3) 断裂带下降盘区域(绿框):表层结构岩性取芯调查证实,底部存在孔隙状玄武岩( $v < 1\,800\text{ m/s}$ )。该层对地震激发信号有吸收衰减作用,使得浅中层分辨率明显降低。

(4) 斜坡带(黄框):存在多套、多角度的高速火成岩( $v > 3\,600\text{ m/s}$ ),影响地震激发信号的正常传播,造成该区整体呈现低信噪比特征。



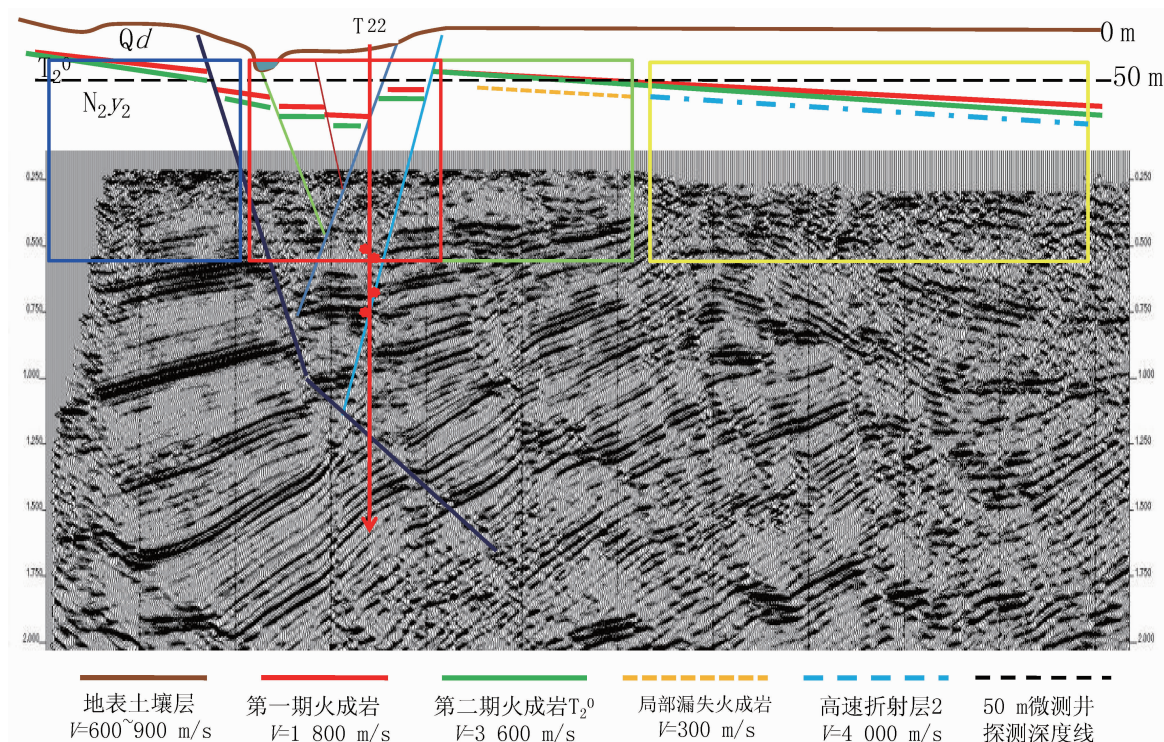


图3 近地表火成岩结构与地震资料关系对应

## 2.1 近地表火成岩对地震信号影响的分析

表层结构剖面显示全区大部分地区 20 m 以上有较好的胶泥层分布, 20 m 以下由西向东逐渐出现火成岩地层且埋深加大, 表现为低速孔隙状以及多期中、高速致密状, 对地震激发信号具有一定的吸收衰减作用, 直接影响其下伏地层的成像效果。

WLZ 工区在北部斜坡带区域出现了多套高速火成岩, 与下伏地层形成不同倍数的速度反转。正常地层速度是随着深度增加逐步提高的, 因此地震波能够不断透射传播到深部地层中<sup>[3]</sup>。当近地表火成岩相对于围岩波阻抗差异增大时, 就容易在浅层形成强折射或强反射, 向下传播的透射能量变少, 造成目的层地震反射能量弱; 同时也会形成各种干扰波, 对目的层的信号产生严重干扰, 最终导致目的层的地震资料信噪比低。

采用微测井解释数据建立表层模型, 进行不同倍数(2.6 倍、3.1 倍)的速度反转差值(2.6 倍模型上层速度 3 951 m/s, 下层速度 1 520 m/s; 3.1 倍模型上层速度 4 836 m/s, 下层速度 1 560 m/s)的正演模拟分析。

从模拟的原始及带通滤波的单炮看出(图4): 当表层的高速地层与下部低速地层因速度差异大而发生速度反转时(速度差倍数大于 2.6), 形成了较强的负向波阻抗界面, 地震波传播受到阻碍, 地震信号吸收衰减严重<sup>[4]</sup>, 地震波下传能量减弱, 地震波

能量几乎没有传递下去, 影响了下伏地层目的层反射成像。

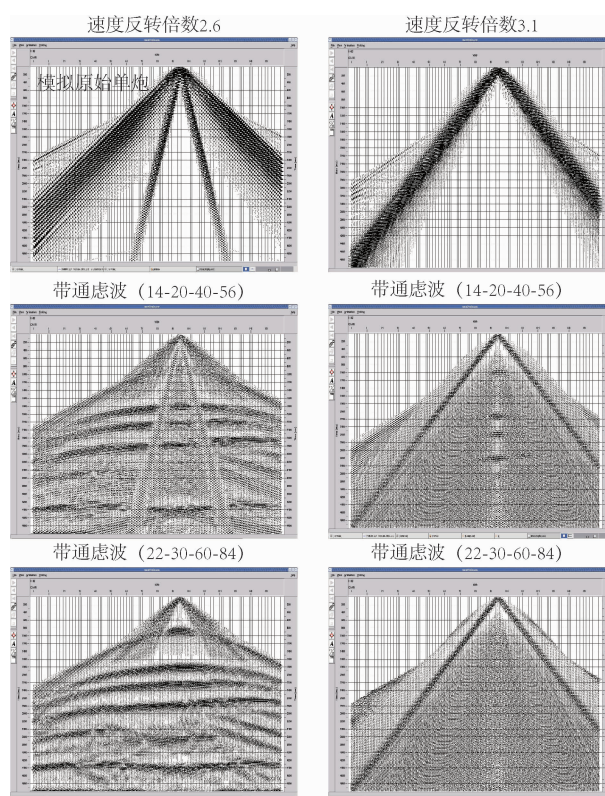


图4 速度反转不同倍数的模拟原始及带通滤波单炮对比

从实际采集单炮同样可以看出, 近地表不同速度和物性火成岩区域的单炮品质明显不同、频谱分



析结果差异较大<sup>[5-6]</sup>(图5)。工区南部上升盘地区近地表存在一套中速火成岩( $v=2\ 200\text{ m/s}$ ),单炮显示该套火成岩对其下伏目的层反射影响较小,同相轴较为连续且反射信息丰富,主要目的层时窗分析显示主频较高(25 Hz),优势频宽8~42 Hz,有效频宽0~58 Hz;中部断裂带下降盘部分区域近地表存在裂隙状、大孔隙低速火成岩( $v=1\ 340\text{ m/s}$ ),单炮显示浅中层信噪比较差,反射信息杂乱,主要目的层时窗分析显示主频降低到15 Hz,优势频宽8~30 Hz,有效频宽0~43 Hz;北部斜坡带近地表发育多组高速火成岩( $v=3\ 947\text{ m/s}$ ),单炮显示从浅到深目的层反射不连续,整体呈现低信噪比特点,主要目的层时窗分析显示主频12 Hz,优势频宽10~27 Hz,有效频宽0~42 Hz。说明不同速度和物性的近地表火成岩分布对地震资料品质影响程度较大。

与以往资料相比,实际采集的地震资料单炮主频仅局部有所提高,全区有效频宽拓展有限,与部署需要的高分辨率资料存在较大的差距。通过上述分析认为:其原因与近地表火成岩的分布存在直接关系,特别是近地表存在气孔、裂隙及高速火成岩( $v>3\ 800\text{ m/s}$ )的区域。

对此,在前述模型基础上采用不同的激发频率(5 Hz、10 Hz、20 Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz、60 Hz、80 Hz)进行模拟分析。从模拟单炮对比来看(图6),由于近地表存在高速火成岩地层,低频激发的单炮目的层反射好于

较高频率(40 Hz以上)激发的单炮,其中20~30 Hz激发频率单炮信噪比和分辨率都好于其他激发频率单炮。根据振幅衰减理论可知,当信号频率提高时,地层对其振幅衰减作用加强<sup>[3]</sup>。

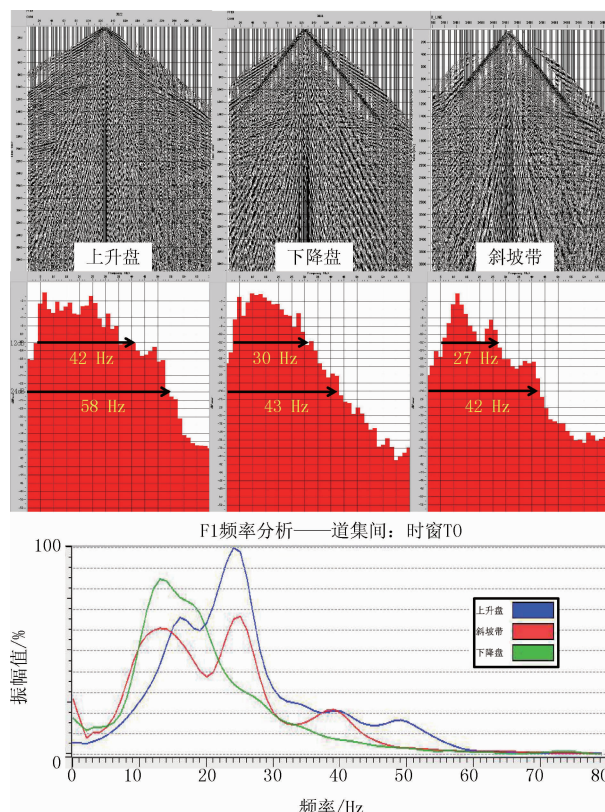


图5 不同位置实际地震采集单炮频谱分析

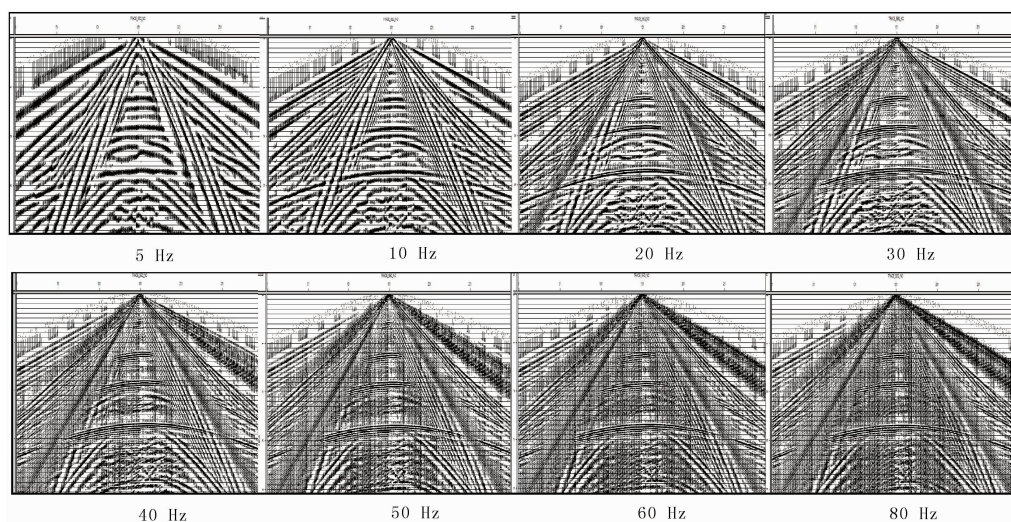


图6 不同激发频率模拟单炮对比

频率与振幅关系分析显示(图7):随着激发频率增加,高速火成岩地层对地震信号的吸收衰减作用增强,相对振幅值下降很快。低频端处(10 Hz以下)低频激发单炮能量高于高频激发单炮;中频端处(20~35 Hz)、30、40 Hz激发频率振幅值与50 Hz

以上基本相当;高频端处(40 Hz以上)50 Hz以上的激发频率单炮振幅值下降幅度较小,但是总体激发频率单炮振幅值下降到20%以下,说明近地表存在高速火成岩地层时,激发信号的高频部分已经被削弱。



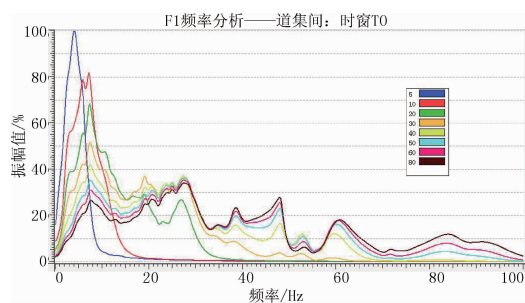


图 7 不同激发频率模拟单炮的频率-振幅关系

## 2.2 试验对比资料分析

复杂的近地表结构使得本区地震资料的高频信号存在缺失,局部信噪比降低。为了准确对比数字检波器和常规模拟检波器在本区的采集效果,开展了数字检波器与模拟检波器的对比试验,在第一联束试验线束位置区进行二维试验线对比。采集参数完全相同:中间放炮,道距:20 m,炮距:80/100 m,接收道数:300/384 道,覆盖次数:30/48 次;接收检波器类型分别为:数字检波器为 DSU-1 型号、单点接收;模拟检波器为陆用 20DX-10Hz,2 串×12 个、正方形面积组合。两条排列线完全重合。

从实际对比试验的原始单炮资料来看(图 8),单点接收的数字检波器单炮信噪比低于模拟检波器,特别是浅层反射信息掩盖在干扰波中;中深层反射层间分辨率及弱反射信息稍强。模拟检波器由于组合接收因此具有一定的压制噪音作用,浅层信息明显好于数字检波器单炮,但在中深层,二者反射信息基本一致。单炮频谱分析看出:两种检波器接收的主频相当、频宽相差不大。

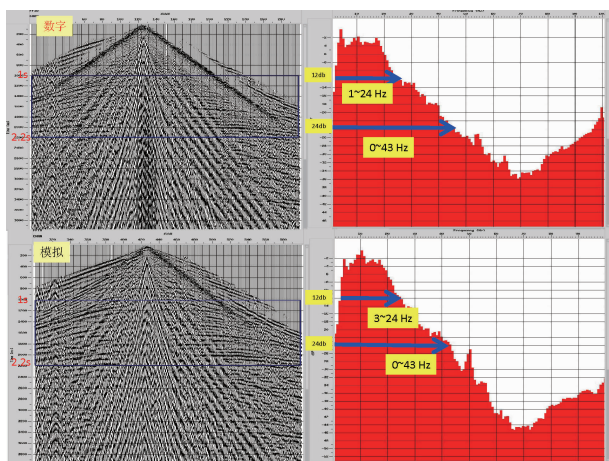


图 8 试验对比数字检波器与模拟检波器单炮及频谱对比

从剖面品质及信噪比频率分布对比(图 9)可知:数字检波器采集剖面与模拟检波器采集剖面品质相当,信噪比分布基本一致。下降盘区域模拟检波器采集剖面信噪比稍高于数字检波器采集剖面;

频率分布上,数字检波器剖面主频略高于模拟检波器剖面,但是提高幅度不大。对照近地表结构,整体剖面品质与近地表火成岩分布密切相关(图 9)。因此数字检波器的性能特点在近地表存在复杂多类型火成岩的区域难以充分体现,地震资料主频提高不明显、频宽拓展有限。

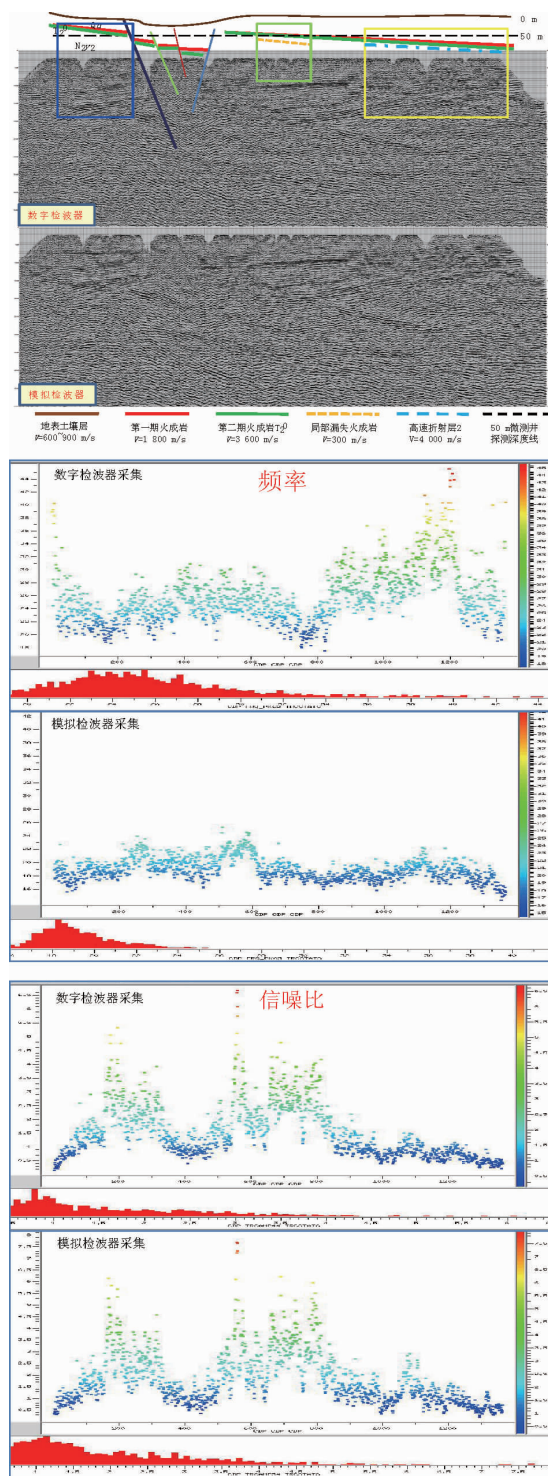


图 9 两种检波器采集剖面对比及与近地表结构的关系

(下转至第 34 页)

1 564 ~ 1 574 m 录井见油气显示,计算衍生参数( $S_0$  ( $S_0 + S_1$ )/ $S_2$ 为0.38, $OPI$ 为0.346, $PS \cdot P_g$ 值为31, $\Sigma C_{21}^-/\Sigma C_{22}^+$ 为0.42,主峰碳数为31;将计算参数分别投点在模版上,图中显示均落在重质油区域(图1~图4)。对该层取样进行油分析,原油密度为0.951 0 g/cm<sup>3</sup>,属于重质油类型,模版解释与油分析结论完全吻合。

## 4 结论与认识

(1)在不同凹陷、不同油源的情况下,利用对原油性质较为敏感的热解和色谱衍生参数图版来判断原油性质,具有较高的符合率,为钻探作业中及时准确判断所钻遇的油质类型提供了便捷的手段。

(2)在参数不全的情况下,模版可单独使用直接判断原油性质,一般情况下应相互验证,互为补充。在同时运用模版进行原油性质判断时,解释结果均相同为最佳;若有差异则以多数相同结论为准;若两两相同,需参考其它资料来认定,大量实验数据证实以主峰碳数与 $\Sigma C_{21}^-/\Sigma C_{22}^+$ 油质判断模版为准。

(3)基于衍生参数的解释图版中原油性质规律,将研究区原油分为轻质油(原油密度 $\rho < 0.87$  g/cm<sup>3</sup>)、中质油( $0.87$  g/cm<sup>3</sup>  $\leq \rho < 0.92$  g/cm<sup>3</sup>)和重质油( $\rho \geq 0.92$  g/cm<sup>3</sup>)。

(4)该方法在渤海油田的5个不同生油凹陷,36个不同层位的单层中进行应用,油质类型符合率达到94.4%,比常用的主峰碳法提高11.1%。

### 参考文献:

- [1] 陈章明,王振平,付广,等. 油气藏内烃类再运移及原油性质的改造[J]. 石油大学学报(自然科学版),2000,24(4):43-47.
- [2] 孔郁琪. 地化录井在松辽盆地黑帝庙油层原油性质判别中的应用[J]. 录井工程,2012(4):40-43.
- [3] 王应斌,王强,黄雷,等. 渤海海域油气藏分类方案及分布规律[J]. 海洋地质动态,2010,26(11):7-12.
- [4] 刘强国,刘应忠,刘岩. 录井方法与技术[M]. 北京:石油工业出版社,2017:139-164.
- [5] 梁汉昌. 气相色谱法在气体分析中的应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008:61-68.

(编辑 杨芝文)

(上接第16页)

## 3 认识与建议

在WLZ近地表存在多类型火成岩的地区,数字检波器的应用有以下认识:

(1)当近地表分布气孔状火成岩、火成岩裂隙层时,由于其速度较低,孔隙较大、裂缝较多,对地震信号产生较强的吸收衰减作用,使得浅中目的层分辨率明显降低;

(2)当近地表存在多组致密高速火成岩( $v > 3$  800 m/s)时,由于与下伏地层存在较大的速度差(倍数大于2.6),形成较强的负向波阻抗界面,产生“屏蔽”作用,影响地震波能量的下传,对高频信号的下传影响尤为严重,造成该区域地震资料分辨率和信噪比下降;

(3)当表层发育中速火成岩与下伏地层速度差较小时(速度差小于2.6),产生的“屏蔽”作用有限,对地震信号下传影响较弱,该区域地震资料分辨率相对应其他区域较高。

由于单点数字检波器采集对干扰波通放的特性,限制了其在表层结构复杂的低信噪比地区使用

效果;其优势依赖于激发时能否产生主频及频宽较高的单炮信号,以及传播过程中的吸收衰减作用。因此数字检波器的应用效果不仅与检波器固有特性有关,还与工区近地表的地震地质条件密切相关。只有在近地表结构简单、较高信噪比地区才能发挥其提高主频、拓展频宽的优势,进而达到提高资料分辨率的目的。

因此在进行地震采集部署时,应充分考虑近地表结构对地震信号激发与传播的影响,进而采用适当的方法设计与采集技术对策。

### 参考文献:

- [1] 王梅生. 数字检波器的应用及效果[J]. 物探装备,2007,17(4):235-240.
- [2] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 山东东营:石油大学出版社,1993:14-20.
- [3] 周发祥,宁鹏鹏,刘斌,等. 吸收衰减对地震分辨率的影响[J]. 石油地球物理勘探,2008,43(增刊2):84-87.
- [4] 管文化,刘立民,庞全康. 苏北盆地火成岩对地震资料品质的影响及对策[J]. 复杂油气藏,2013,(4):24-28.
- [5] 杨会朋,崔鸣,张松平,等. 东濮凹陷火成岩屏蔽作用研究及采集方案[J]. 断块油气藏,2009,16(4):54-56.

(编辑 杨芝文)