

# SN地区辉绿岩下弱信号宽方位采集与成像

陈习峰<sup>1</sup>, 薛永安<sup>1</sup>, 庞全康<sup>1</sup>, 朱峰<sup>2</sup>, 石一青<sup>2</sup>

(1. 中国石化江苏油田分公司物探研究院, 江苏 南京 210046; 2. 中国石化地球物理华东分公司, 江苏 扬州 225007)

**摘要:**高邮凹陷古近系辉绿岩广泛发育, SN地区最为典型。辉绿岩强反射是该区地震资料信噪比较低的主要原因之一。为了提高辉绿岩下成像质量, 不仅需要精准压制多次波等强干扰, 还需要加强辉绿岩强能量屏蔽机理分析, 进而找到增强岩下弱信号的措施。通过从纵向和横向两个维度分析辉绿岩对岩下地层的地震反射能量影响, 充分利用辉绿岩空间分布的局限性和差异性等特点, 提出以宽方位为核心的地震资料采集处理一体化解决方案。SN地区宽方位一体化成像攻关及观测系统退化分析证实: 覆盖次数有一定保证时, 观测方位的进一步增加更为重要。在此基础上做好分频能量补偿和优势方位成像, 能够在最大程度上克服辉绿岩对下伏地层的屏蔽作用, 实现辉绿岩下弱反射信号较好质量的成像。

**关键词:**高密度; 宽方位; 能量补偿; 分方位速度分析; 井约束建模; 辉绿岩; 阜宁组; 高邮凹陷

中图分类号: P631 文献标志码: A

## Wide azimuth acquisition and imaging of weak signals under igneous rocks in SN area

CHEN Xifeng<sup>1</sup>, XUE Yong'an<sup>1</sup>, PANG Quankang<sup>1</sup>, ZHU Feng<sup>2</sup>, SHI Yiqing<sup>2</sup>

(1. Geophysical Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Nanjing 210046, China;

2. East China Branch of Sinopec Geophysics Co., Ltd., Yangzhou 225007, China)

**Abstract:** The tertiary igneous rocks are widely developed in Gaoyou Sag, and the SN area is the most typical. The strong reflection of igneous rocks is one of the main reasons for the low signal-to-noise ratio of seismic data in this area. In order to improve the imaging quality under igneous rocks, it is not only necessary to accurately suppress strong interference such as multiple waves, but also to strengthen the analysis of the strong energy shielding mechanism of igneous rock, and then find measures to enhance weak signals under the rocks. By analyzing the influence of igneous rocks on the seismic reflection energy of the substrata from the vertical and horizontal dimensions, and making full use of the limitations and differences of the spatial distribution of igneous rocks, it was proposed an integrated solution of seismic data acquisition and processing with wide-azimuth as the core. The wide-azimuth integrated imaging research and the degradation analysis of the observation system in the SN area confirmed that the further increase of observation azimuth is more important when the coverage times are guaranteed to a certain extent. On this basis, frequency division energy compensation and dominant azimuth imaging can overcome the shielding effect of igneous rocks on underlying strata to the greatest extent, and achieve better quality imaging of weak reflection signals under igneous rocks.

**Key words:** high density; wide azimuth; energy compensation; azimuth velocity analysis; well constraint modeling; igneous rock; Funing Formation; Gaoyou Sag

高邮凹陷辉绿岩较为发育, 纵向上分布层位以阜宁组为主, 其次为三垛组、戴南组, 单层厚度一般几米至几十米, 厚度较大的达到一百多米<sup>[1]</sup>。当辉绿岩的地震反射速度远高于周围的沉积岩速度时, 通常会形成强波阻抗界面, 并在地震上产生以下三种效应<sup>[2]</sup>: ①临界角小, 很小入射角就产生全反射; ②有效入射角范围内, 地震波下传能量弱; ③干扰波发育, 折射波、多次波能量强, 难以获得准确的速度场。这三种效应共同作用使得辉绿岩下有效反

射表现为弱能量。

目前, 辉绿岩区地震处理主要需要解决第三种效应, 即关注于辉绿岩引起的各类干扰波压制, 特

收稿日期: 2021-05-25; 改回日期: 2021-09-10。

第一作者简介: 陈习峰(1972—), 高工, 从事地震采集及资料处理研究工作。E-mail: chenxf.jsyt@sinopec.com。

基金项目: 中国石化江苏油田分公司科技项目“永安高密度三维精确成像关键处理技术研究及应用”(JS19007)。

别是多次波压制<sup>[3]</sup>。但多次波压制后,辉绿岩下地层反射的有效信息未能得到恢复,辉绿岩体下方仍然缺少有效波反射。而对于第二种效应,处理中试图通过压制辉绿岩强反射振幅,进而突出辉绿岩体上下弱反射层位的振幅。这种方法并没有实现岩下弱信号的增强,且辉绿岩强振幅压制后,辉绿岩的识别程度变差,对后续的解释工作带来困难。

对辉绿岩区的地震资料深入分析认为:要解决岩下弱信号成像问题需要综合上述三种效应,实施一体化攻关。在做好多次波压制同时,强化辉绿岩屏蔽作用的分析,增强岩下弱信号的能量。岩下弱信号的增强是本文研究的重点:首先充分研究辉绿岩空间分布的差异性,包括空间展布及厚薄变化,借助宽方位采集克服第一种效应;其次充分考虑地震波下传能量损失及合理补偿对策克服第二种效应;在此基础上应用宽方位速度分析和叠前成像实现岩下弱信号品质的提升。

表1 SN地区辉绿岩岩石物性统计

发育层位	辉绿岩速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	辉绿岩密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	辉绿岩厚度/ m	围岩速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	围岩密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	辉绿岩反射系数
三垛组	3 800 ~ 5 263	2.40 ~ 2.58	4 ~ 31	2 664 ~ 2 898	2.12 ~ 2.23	0.24 ~ 0.36
戴南组	4 056 ~ 5 616	2.44 ~ 2.60	11 ~ 76	3 499 ~ 3 712	2.29 ~ 2.37	0.11 ~ 0.25
阜四段	5 471 ~ 5 675	2.52 ~ 2.70	25 ~ 126	3 690 ~ 3 916	2.45 ~ 2.49	0.21 ~ 0.22
阜二段	4 414 ~ 7 391	2.49 ~ 2.76	7 ~ 128	3 533 ~ 4 078	2.40 ~ 2.56	0.13 ~ 0.32

其中能否应用宽方位避开辉绿岩进行采集的前提在于辉绿岩在地下的展布特征是否支持。分析表明:工区内辉绿岩侵入形式多样,空间形态多变、厚度差异大。具体来说,多呈具有不同走向的条带或点块状,单个岩体面积多小于 $2\text{ km}^2$ (图1)。辉绿岩空间展布分布的不规则性使得对下覆地层的屏蔽影响复杂化,其中辉绿岩高陡、多套叠置区域,能量屏蔽作用尤其明显,地震波能量衰减能达到 $80\%\sim 90\%$ 。尽管辉绿岩在区域内分布范围较大,但局部存在变化。受地质构造运动、断层切割以及辉绿岩本身驱动能量等影响,辉绿岩分布并不连片,辉绿岩内部存在较多间隙,且纵横向的分布长短变化较大。同时,空间上辉绿岩的厚度分布也不稳定,变化较剧烈。因此充分利用辉绿岩体空间分布的不连续性及厚度的不均匀性,通过增加采集方位角,能够显著增加辉绿岩下地层有效反射信号的接收能力。

## 1 采集设计

### 1.1 屏蔽特征

在SN地区,根据测井资料统计了各套辉绿岩的岩石物性(表1)。从反射系数大小看,不论是较浅的三垛组辉绿岩,还是较深的戴南组和阜宁组辉绿岩都具有较大的反射系数,反射系数均值约为0.20,较正常沉积地层的反射系数要大近一个数量级。反射系数大意味着透射能力弱:由Zoeppritz方程计算可知,地震波每穿过一套辉绿岩下传能量都会降为原来的80%左右,当遇到纵向有三套辉绿岩时,下传能量只有初始能量的50%左右。如果再考虑地震波上传,辉绿岩对岩下反射能量的屏蔽还要加倍。因此在地震三维采集时既要大幅增加覆盖次数,也要增大采集观测方位角,尽可能在空间上避开辉绿岩,从而提升辉绿岩下地震照明强度。

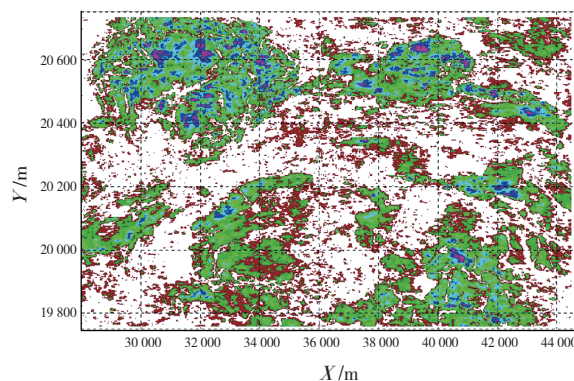


图1 SN工区戴南组辉绿岩平面分布检测

### 1.2 采集参数

结合辉绿岩的能量屏蔽特征和空间分布特性,要实现辉绿岩下地层有效反射,需要加强覆盖次数和方位角参数的论证。即:①利用较高的覆盖次数,有效增加岩下照明强度,增加岩下弱反射能量;②合理增加观测方位角,借助“避障”措施增加岩下反射能量。

研究中利用SN高精度三维<sup>[4]</sup>进行了退化分析。该三维的观测系统是30线14炮。主要采集参数为:炮线距140 m,炮点距60 m,接收线距140 m,接收道距40 m,滚动距420 m,最大纵距3 620 m,最大非纵距2 210 m,横纵比0.61,为典型宽方位采集<sup>[5-6]</sup>。主要考虑了两类分析:一是保持覆盖次数相同,研究采集方位角对资料的影响;二是保持采集方位角不变,分析覆盖次数对资料的影响。

方位角参数分析中,退化出了6L14S(线距140 m,排列片宽700 m)、6L28S(线距280 m,排列片宽

1 400 m)和6L56S(线距560 m,排列片宽2 800 m)等三种方案,它们的覆盖次数均为52次,方位角分别为8.3°、16.8°和31.4°。为增加分析的可靠性,对这三种方案的数据都进行叠前时间偏移处理,然后选取辉绿岩发育区主测线进行对比分析(图2)。可以看出,尽管覆盖次数相同,当接收排列片宽度增加时,岩下成像有明显的改善。即使最宽的方案,仍能观察到成像细节的提高,这充分说明了辉绿岩发育宽方位观测的必要性,而且为适应特别复杂的辉绿岩分布,全方位采集方位最为有利。

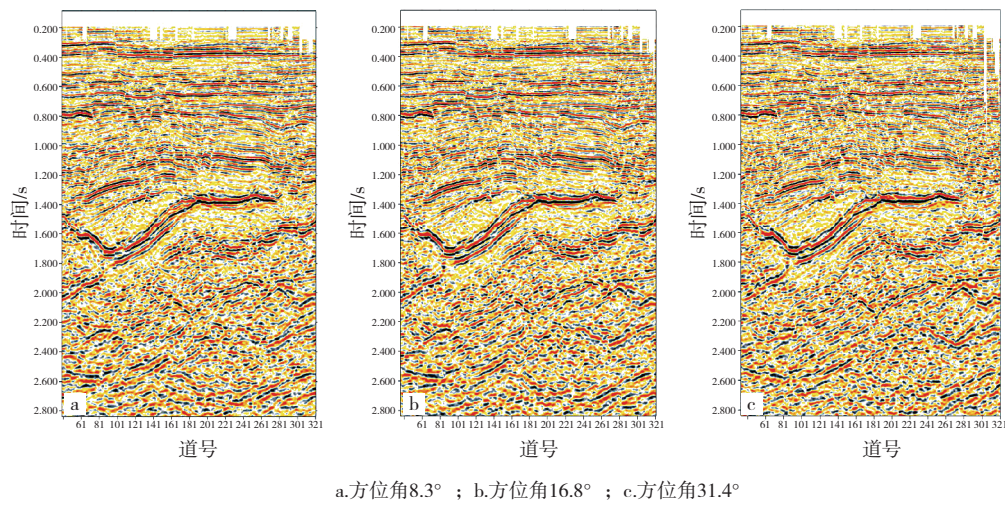


图2 相同覆盖次数条件下不同方位角对比分析

覆盖次数参数分析中,退化出了6L56S(线距560 m,排列片宽2 800 m)、12L28S(线距2 80 m,排列片宽3 080 m)和24L14S(线距140 m,排列片宽3 220 m)等三种方案。排列片宽度保持在2 800~3 220 m范围内,出于实际观测系统退化的限制,只能保持排列片宽度基本一致。它们的覆盖次数分别为52次、104次和208次。图3展示的是这三种方案成像后沿岩下目的层段提取的信噪比属性。从

图3a到图3b,再到图3c,图中较高信噪比的紫红色和绿色区域急速变大,反映了当接收排列片宽度保持不变时,增加接收线数,大幅提高覆盖次数可以有效提高资料信噪比。已有经验认为在高邮凹陷,相对某一固定面元,200次以上覆盖次数才能保证资料有较高的信噪比<sup>[7]</sup>,再结合前文中计算得到的辉绿岩区反射衰减中值40%,认为辉绿岩区满覆盖次数有必要提高到280次左右。

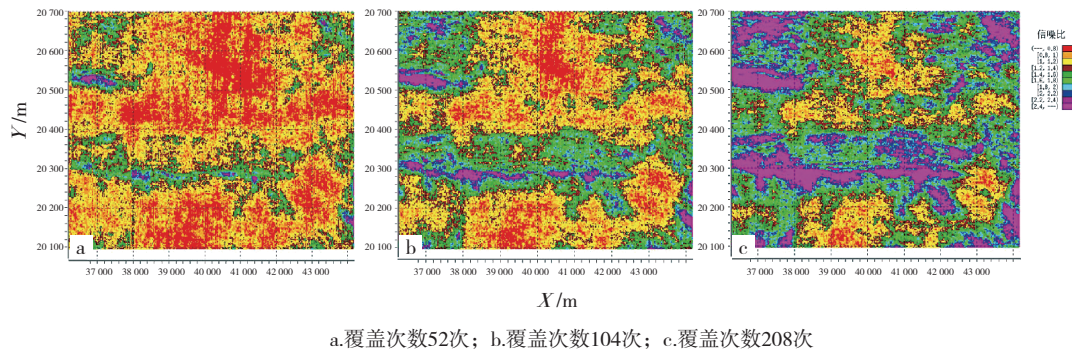


图3 覆盖次数退化分析

## 2 宽方位成像

偏移成像主要包括:振幅补偿、速度分析及偏移成像三大步骤。常规做法很少考虑辉绿岩区高精度三维高覆盖、宽方位的特性,为此,对常规处理思路进行了改进,主要包括:①针对辉绿岩区能量衰减规律,进行分频段能量补偿;②针对宽方位数据特点,在辉绿岩发育区开展全方位速度分析,并在低信噪比区结合测井速度提高初始速度模型精度,从而保证成像质量。

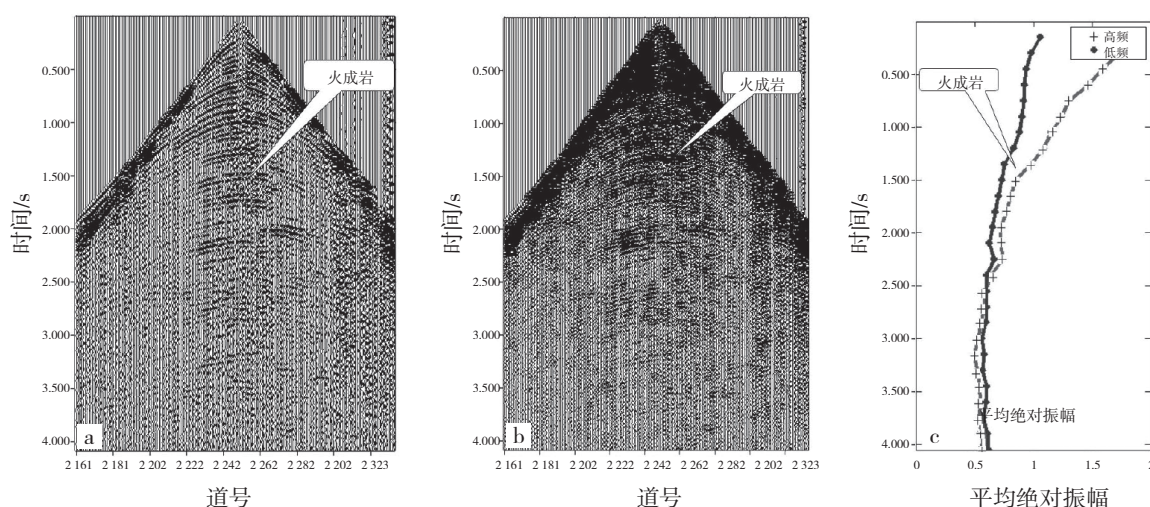
### 2.1 分频能量补偿

在辉绿岩发育区,地震波的能量大部分被反射,有效信号较弱,因此辉绿岩区的能量补偿不仅要考虑地震波在地下传播时,随着波前面的扩展在

时空域内的能量衰减,还要考虑由于辉绿岩屏蔽作用导致的强能量衰减。因为这两种作用都表现为能量衰减,因而在实际处理中可以将这两类统一起来,进而有针对性地做好能量补偿,球面扩散衰减通过常规振幅补偿方法很容易解决。而在辉绿岩发育区,能量不仅在时空域衰减,在频率域衰减更为明显,不同频率段的地震波在地下传播的过程中,受辉绿岩影响程度并不一致。

分析典型单炮的分频扫描数据(图4a、4b)可以看到:

0~20 Hz频率段的数据,浅层和深层的振幅能量较一致,而20~40 Hz频率段的数据,浅层和深层的振幅能量差异较大,其差异性要远远大于0~20 Hz频率段的数据。



a.0~20 Hz; b.20~40 Hz; c.能量衰减曲线

图4 辉绿岩区单炮分频能量衰减分析

拾取单炮能量曲线也可以明显看到:在辉绿岩以上(1 500 ms),中高频信号能量较强,进入辉绿岩后中高频信号能量反而逐渐弱于低频信号。这一方面可能反映了辉绿岩对中高频信号的能量强屏蔽,另一方面表明,如果在处理中使用统一的参数对单炮进行能量补偿,必然会出现岩下高频补偿不足或低频补偿过度,因此有必要对中高频段数据进行单独的能量补偿。

具体做法:在补偿中以20 Hz(经验值)为界将地震数据分为低频和中高频两部分,分别建立能量衰减曲线,在完成补偿后再合并低频和中高频数据。显然这种补偿方法是一种针对目标的处理,比较依赖于处理人员的地质认识和经验。如图5所示,与常规全频段补偿相比应用分频段能量补偿后,辉绿岩上下能量一致性更好,岩下弱信号得到了增强,中高频信息得到了较好的恢复。

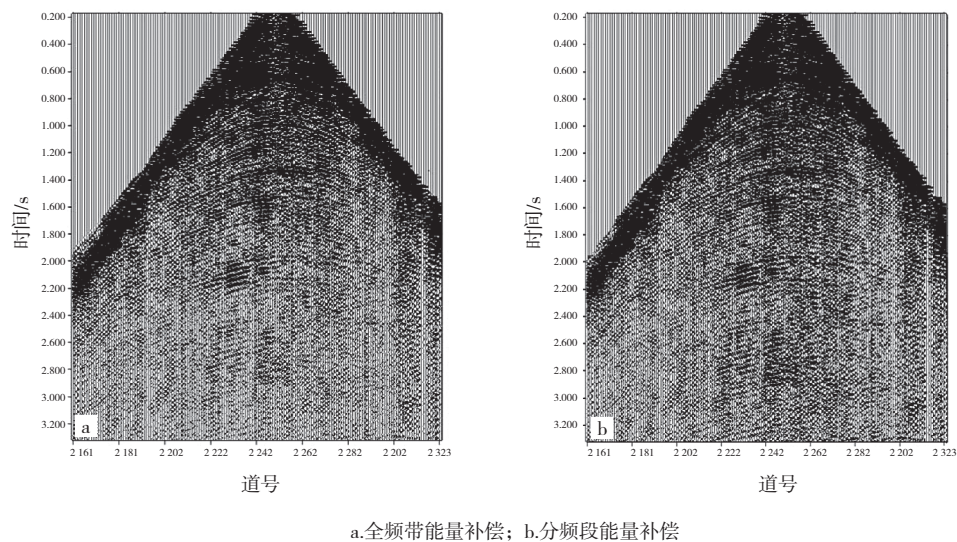


图 5 辉绿岩区单炮能量补偿

2.2 分方位速度分析

在辉绿岩发育区,由于辉绿岩空间分布的不规则,导致不同方位地震资料的有效信息差异明显。观察辉绿岩区高精度的分方位角速度谱(图6)可以看到,1.4 s左右位置为辉绿岩,其主要表现为能量强、速度较高。方位角在 $-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 数据的速度谱多

次能量较强,岩下有效信号弱,不易拾取准确的地层速度。而从 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 数据的速度谱中可以看到,该数据的速度谱多次波较 $-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 数据速度谱上的多次波明显偏弱,同时在该角度范围内的数据,辉绿岩岩下的有效信号较强,可以在速度谱上较容易地识别出岩下的有效速度。

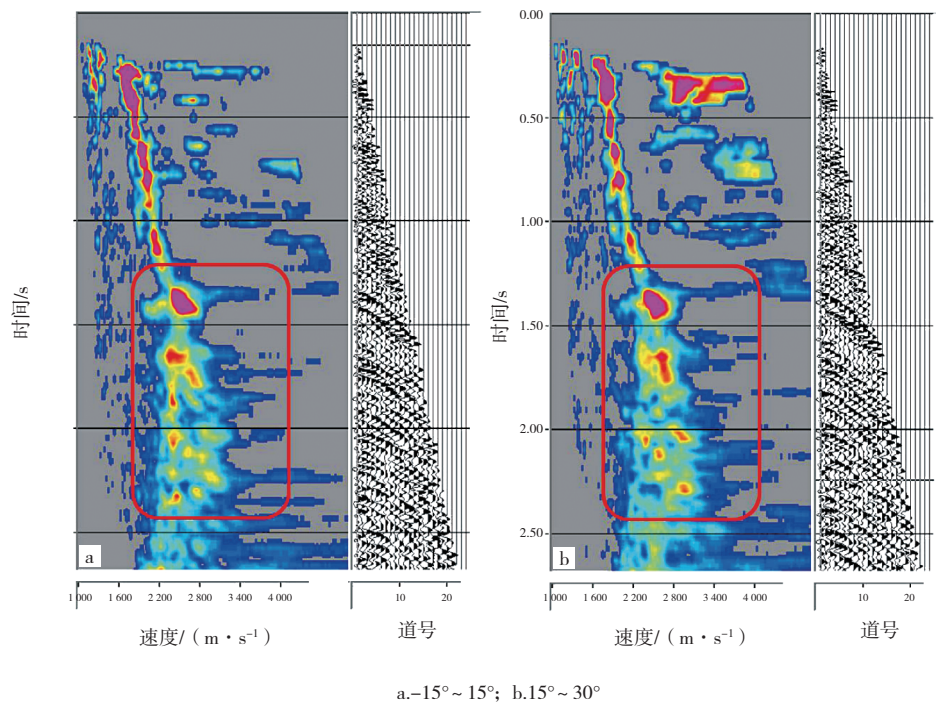


图 6 辉绿岩区分方位速度谱

在工区南部辉绿岩陡倾位置,辉绿岩多顺层沿主线展布。分析分方位数据及与之相应的速度进行偏移,明显可以看到:

在 $-15^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 的偏移剖面中,岩下多次波能量较

强,而有效能量较弱;与之相反,在 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的偏移剖面中,岩下多次波能量较弱,而有效能量较强(见图7)。这种成像质量的变化与地质上得到的认识是一致的。

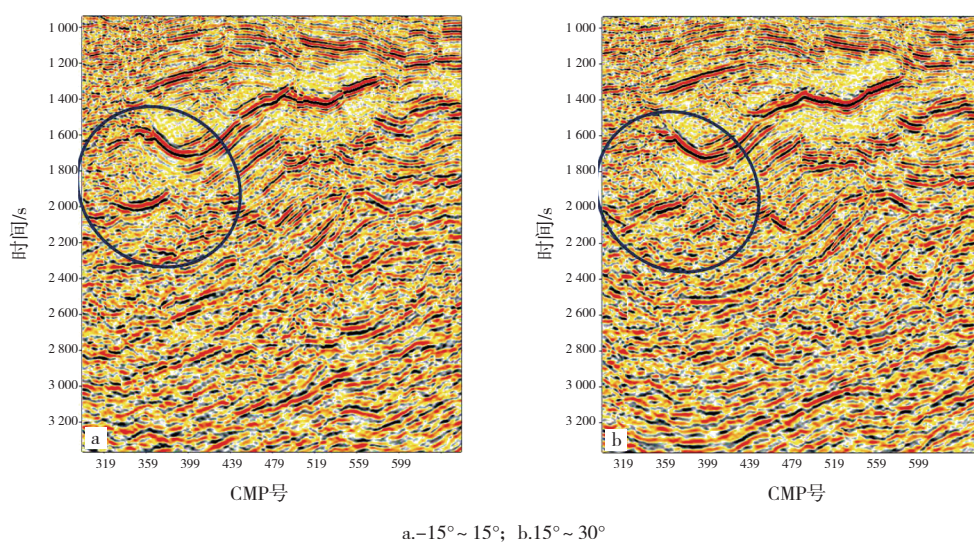


图7 辉绿岩区分方位叠前时间偏移

显然,SN地区辉绿岩在平面上确实不是平板一块,在一些区域采用宽方位可以获取更多的有效反射信息。如针对重点勘探目标,结合辉绿岩的主要分布走向来确定采集优势方向。针对不同分析位置,通过分方位速度分析,选取最优方位速度求取全区最佳均方根速度。利用宽方位数据所包含的岩下反射信息,结合对应的速度有效提高岩下复杂构造的成像质量。

### 2.3 井约束建模

辉绿岩区地震反射资料信噪比总体偏低,因此在辉绿岩区速度建模时引入测井速度是十分必要的。工区内共选取了12口井在此类低信噪比区开展井速度约束建模。井选取的原则是:①平面上尽可能散开;②所有目的层得到有效控制,即井位足够多、测井足够深。

对比单井位置处测井速度与地震速度可以看到:大多数井吻合程度良好。浅层部位测井速度与地震速度相对吻合较好,而中深层部位辉绿岩发育位置吻合程度较差。通常辉绿岩越发育,吻合度越低。如何基于地震速度和测井速度进行联合建模有两套解决方法:①重新解释地震速度,使地震速度的速度趋势与测井速度的速度趋势吻合性有所提高;②利用测井数据建立一个速度模型,然后选择一个较优化的方法将地震速度和测井速度融合起来,或通过其它方法将地震速度和测井速度融合起来<sup>[8]</sup>。第一种方法仍需由DIX公式将均方根速度转化为层速度,具有较大的不确定性,因此采用方法二将这两种速度在深度域上融合形成偏移初始速度场比较合适(图8)。

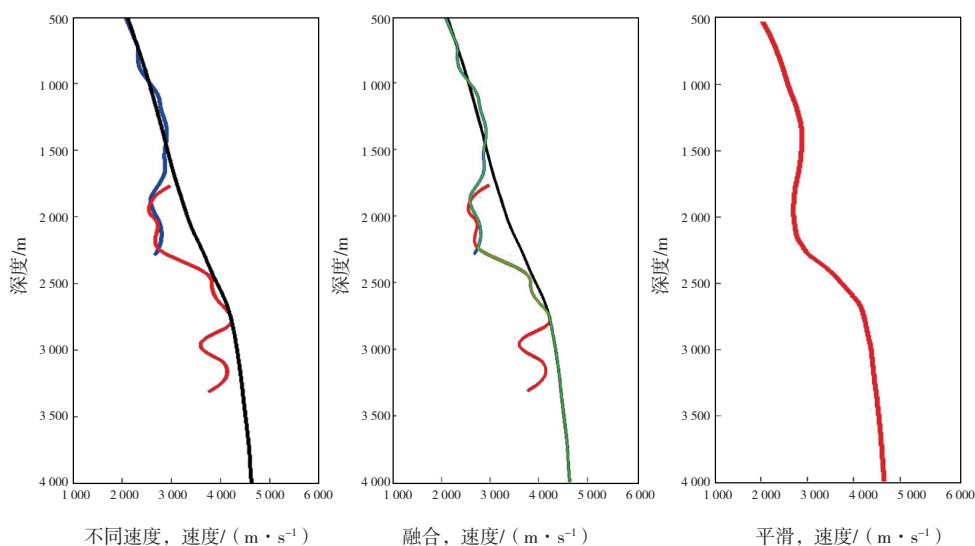
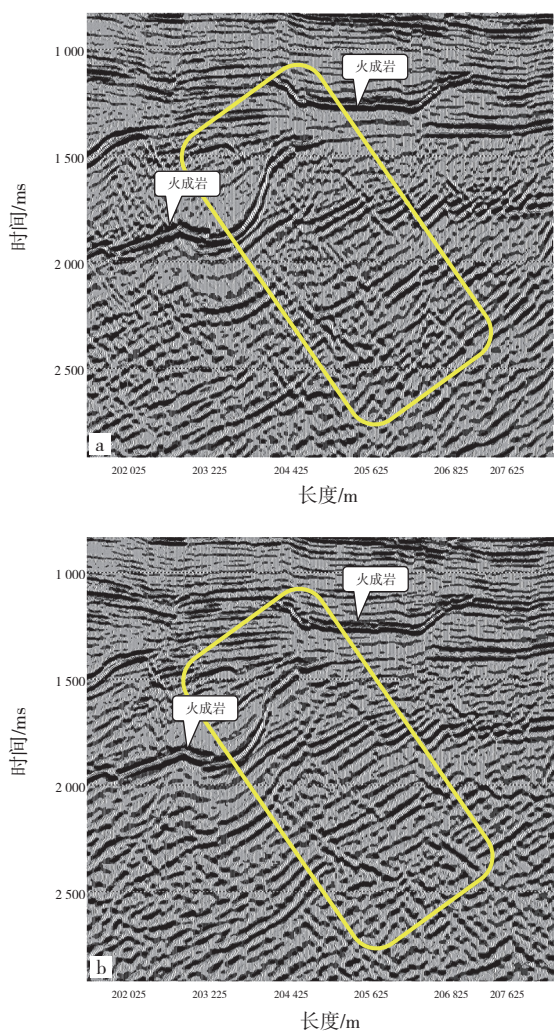


图8 地震速度和测井速度融合

### 3 效果分析

SN地区利用上述处理技术,首先应用分方位速度分析从不同方向上挖掘了岩下反射层速度信息,然后应用井约束层速度场构建技术将测井速度纵向精确性与地震速度的横向展布规律有机结合,形成了可靠初始层速度场,再应用网格层析速度反演技术对速度场进一步优化。最后开展叠前偏移成像,较好地改善了多期次辉绿岩发育区地震资料成像品质,辉绿岩下断块断面更加清晰,断裂组合关系更加合理(图9)。



a. 常规速度建模; b. 分方位速度建模

图9 辉绿岩下两种速度建模方法成像剖面对比

### 4 结论

(1)在辉绿岩发育区,深入研究辉绿岩的屏蔽作用,是改善成像质量的基础。既要研究有效入射角以内的下传能量衰减,也要研究全反射时辉绿岩的优势方位。针对前者提出分频能量补偿;针对后者提出围绕宽方位的采集处理一体化解决方案。

(2)在充分分析SN地区辉绿岩空间分布的局限性和差异性的基础上,利用较宽的观测方位尽可能避开辉绿岩空间上的优势方位,在野外有效获取岩下反射能量,保障了室内相配套的分方位速度分析及叠前成像有效性。

(3)采用分频的方式实现岩下弱信号能量较精准恢复,最终提升了岩下弱信号的成像质量。但本文提出分频能补偿方法是一种针对目标的处理,比较依赖于处理人员的地质认识和经验。

#### 参考文献:

- [1] 邱旭明,严元锋,唐焰,等. 苏北盆地沙瓦油区滚动勘探方法研究[J]. 地质学刊, 2014, 38(1): 66-71.
- [2] 管文华,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, 6(4): 24-28.
- [3] 刘立民,陈习峰,田坤,等. 苏北盆地火成岩发育区复杂断块精确成像对策[J]. 复杂油气藏, 2014, 7(1): 25-29.
- [4] 赵殿栋,吕公河,张庆淮,等. 高精度三维地震采集技术及应用效果[J]. 石油物探, 2001, 40(1): 1-8.
- [5] 刘依谋,印兴耀,张三元,等. 宽方位地震勘探技术新进展[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(3): 596-610.
- [6] 冯凯,和冠慧,尹成,等. 宽方位三维观测系统的发展现状与趋势[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(6): 24-28, 113.
- [7] 屠世杰. 高精度三维地震勘探中的炮密度、道密度选择——YA高精度三维勘探实例[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 926-935.
- [8] 王西文,刘全新,苏明军,等. 多井约束下的速度建模方法和应用[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(3): 263-267.

(编辑 杨芝文)