

文章编号: 0253-2697(2023)12-2286-11 DOI:10.7623/syxb202312017

中国海洋宽频地震勘探技术现状、应用案例与发展方向

叶云飞 孙文博 黄饶

(中海油研究总院有限责任公司 北京 100028)

摘要:海洋宽频地震资料采集及配套处理技术取得了突破性发展,大幅拓宽了地震资料的频带范围。受地震波场传播规律及地层吸收因素影响,宽频地震数据在浅层和中—深层的频谱特征存在明显差异,特别是当地震波到达中—深层以后,宽频地震数据呈现明显的低频占优势的特征,其地震反射的同相轴与基于水平拖缆采集的常规地震资料的同向轴特征有显著差别。这使得基于传统地震振幅信息进行的地震反演和地震解释技术受到极大挑战。通过总结目前海洋宽频地震资料采集、处理的技术现状,利用中国深水区实际采集获取的地震数据,分析了现今深水宽频地震资料的子波和频谱特征,提出需针对不同深度宽频地震数据的特点及研究目标的需求,采用相应的反演、属性分析和层序解释技术,以充分发挥宽频数据的优势。此外,结合实际靶区的应用案例及成效,对海洋宽频地震勘探技术未来的发展方向进行了展望。

关键词:中—深层;深水;宽频地震;鬼波;反演;瞬时相位梯度;属性分析

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

Current status, application cases and development direction of marine broadband seismic exploration technology in China

Ye Yunfei Sun Wenbo Huang Rao

(CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: A breakthrough has been made in the acquisition and processing technology of marine broadband seismic data, greatly expanding the frequency range of seismic data. However, as influenced by the propagation laws of seismic wave fields and the absorption of strata, there are significant differences in the spectral characteristics of broadband seismic data between shallow and middle to deep layers. Especially, broadband seismic data indicate a dominant low-frequency feature in mid deep layers, and there are significant differences in events of seismic reflection and the conventional seismic data collected by horizontal streamers. Therefore, great challenges have been faced by the seismic inversion and interpretation techniques based on traditional seismic amplitude information. The paper first summarizes the current status of marine broadband seismic data acquisition and processing technology. Based on the large amount of data collected in deep water areas in China, it analyzes the wavelet and spectral characteristics of current deep-water broadband seismic data. It is proposed that inversion, attribute analysis, and sequence interpretation techniques should be adopted according to the characteristics of broadband seismic data at different buried depth and the requirements for targeted research, so as to fully utilize the advantages of broadband data. Moreover, based on the actual application cases of target areas as well as real achievements, the future development directions of marine broadband seismic exploration technology have been prospected.

Key words: middle to deep layers; deep-water; broadband seismic; ghost wave; inversion; instantaneous phase gradient; attribute analysis

引用:叶云飞,孙文博,黄饶.中国海洋宽频地震勘探技术现状、应用案例与发展方向[J].石油学报,2023,44(12):2286-2296.

Cite: YE Yunfei, SUN Wenbo, HUANG Rao. Current status, application cases and development direction of marine broadband seismic exploration technology in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2286-2296.

海洋宽频勘探技术是解决中—深层构造成像、提高地震分辨率、实现高精度勘探的重要方向。过去十余年,世界范围内海洋深水拖缆宽频地震勘探技术得到了长足发展^[1-4]，“弧形”、“犁式”、“阶梯形”等变深度电缆和水平缆深沉放宽频地震资料采集技术均取得了

很好的实验效果,使地震资料频带宽度从由常规资料的3倍频程扩展到5倍频程,频带范围从常规的6~80 Hz扩展到3~120 Hz。高品质的宽频地震资料不仅可以大幅提升中—深层地震资料的有效信号强度、改善地下复杂构造的成像精度,为地质研究提供可靠

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目“渤海潜山裂缝性储层地震响应机理及精确成像方法”(No. U19B2008)资助。

第一作者及通信作者:叶云飞,男,1982年3月生,2019年获吉林大学博士学位,现为中海油研究总院有限责任公司技术研究所所长、高级工程师,主要从事与海洋油气勘探开发相关的地球物理技术研究工作。Email: yeyf2@cnooc.com.cn

的数据,也可开展更高精度的沉积层序解释、岩性预测和流体检测等技术提供可靠的基础数据^[5-7]。

在过去的研究中,全世界地球物理学家主要致力于如何获取高质量的宽频地震数据,对如何应用宽频地震数据开展储层反演、数据解释等研究工作开展的较少。随着地震采集、处理及作业技术日臻完善,海洋宽频地震勘探技术已从工业化试验逐步向规模化应用阶段迈进,但针对宽频地震数据特点的解释及应用技术还未开展系统研究,依然在沿用常规地震资料解释及应用技术。为此,笔者回顾了海洋宽频地震资料采集处理技术的现状,在分析大量海洋实际宽频地震数据特征的基础上,剖析了宽频地震数据的子波特征和不同地层深度范围内宽频数据的频谱特征,提出了宽频地震数据在地震反演、属性分析和层序地层解释过程中特殊的应用技术和思路,并对海洋宽频地震勘探技术的未来发展方向进行了展望。

1 海洋宽频地震资料采集处理技术现状

由于海水与空气界面是一个强反射界面,海洋常用的拖缆地震资料采集技术在激发和接收环节都会产生虚反射(也称鬼波)效应,由此产生陷波点,压制了信号的低频和低频能量,限制了地震资料的频带宽度。常规地震资料采集中,鬼波紧随在有效反射波之后,表现为与反射波呈近乎平行的同相轴特征,这给后续地震数据的高分辨率处理带来了极大的挑战。为了压制鬼波,拓宽地震资料的有效频带,在过去十余年里,国际上知名科研院所、地球物理服务公司及石油公司在地震采集和处理两大领域开展了卓有成效的研究工作^[8-9]。通过设计新型地震资料采集方式,突出鬼波与反射波的走时和相位差异,为在后续处理环节中压制鬼波提供更为有利的条件。具体方式主要有两种:①通过检波器或震源在海水中沉放深度的变化来增加鬼波和有效信号的走时差异,如上下缆技术、上下源技术、变深度缆技术等^[10-14];②利用不同参数的检波器进行观测,增加鬼波和有效信号的相位差异,如双检电缆技术^[15-16]、多分量接收的海底电缆(OBC)技术^[17-18]、海底节点(OBN)技术^[19-20]等。

1.1 上下缆、上下源宽频地震采集处理技术

上下缆采集技术出现约在 2008 年,该技术将水平拖缆放置在不同深度进行采集,通过接收缆的不同深度来实现有效信号和鬼波的走时分离。采集后的上下缆数据经过合并处理实现对鬼波的压制。Grataco^[21]对多种域的波场分离进行了归纳总结,提出了相应的三维鬼波压制处理算法;Guan 等^[22]通过波场延拓技术建立的鬼波延迟算子来对上下缆采集数据进行鬼波压制。

上下源采集技术约出现在 2010 年,该技术将不同震源放置在不同深度进行采集,通过不同震源深度来实现有效信号和鬼波的走时分离。上下源采集技术可通过联合反褶积合并处理来实现上下源的鬼波压制^[23]。Robertsson 等^[24]通过计算波场的垂向梯度来压制震源鬼波。

在不同深度放置震源和接收缆需要准确地控制位置,对采集装备和采集施工的要求较高,特别是在天气恶劣、涌浪大的情况下,很难保证不同源、不同缆处于同一垂面上,因此,上下缆、上下源宽频地震采集技术并未得到广泛应用。

1.2 变深度缆宽频地震采集处理技术

Ray 等^[25]提出了变深度缆的概念,但因受鬼波处理技术的限制未能得到应用。在变深度缆采集中,同一条拖缆的沉放深度随着空间位置发生变化。变深度缆采集相对于上下缆采集具有高效、施工灵活的特点。变深度缆采集技术中使用的电缆主要有法国 CGG(Compagnie Générale de Géophysique)公司的弧形缆、美国西方地球物理(WesternGeco)公司的直斜缆、中国海洋石油集团有限公司的“犁式”电缆和阶梯缆。CGG 公司于 2010 年开始发展变深度缆技术;2011 年提出了弧形缆采集技术,并成功在西非、墨西哥及澳大利亚附近海域进行了应用^[12-13];2012 年在中国近海成功使用了斜缆宽频地震采集技术,使鬼波得到压制,增大了地震资料的高/低频能量、拓宽了地震资料的频带,使得中一深层地震资料的品质得到明显改善^[14]。“十二五”规划(2011—2015 年)和“十三五”规划(2016—2020 年)期间,中国海洋石油集团有限公司在中国南海深水区开展了“犁式”斜缆二维、三维宽频地震资料采集试验,明确了斜缆能克服深水区复杂的作业环境,地震资料的频带范围显著拓宽,实验数据的频带范围可达到 3~120 Hz^[26-27]。针对变深度拖缆采集的地震资料,Soubaras^[28]通过多道联合反褶积处理技术对叠前道集进行鬼波压制;Ferber 等^[29]引入 L1 范数反演处理技术对鬼波进行压制并根据压力分量计算出速度分量;Wang 等^[30]提出了基于置信区间的线性 Radon 域的鬼波压制方法;Poole^[31]利用平面波分解改写最小二乘法下的线性 Radon 变换,实现变深度缆鬼波压制。由于变深度缆采集对水深、作业环境和施工过程中的缆型控制及后续资料处理都有很高的技术要求,这类技术也未得到大规模应用。

1.3 平缆深拖宽频地震采集技术

平缆采集技术是早期的海上地震采集技术,约出现在 1960 年,在海上石油勘探中发挥了非常重要的作用。平缆采集的地震资料陷波问题严重,鬼波压制较

难,在鬼波压制方面相较于变深度缆等采集处理技术不占优势。尽管如此,鬼波压制处理技术在平缆采集中仍发展迅猛,诸多学者相继在时间-空间($t-x$)域、频率-空间($f-x$)域、频率-波数($f-k$)域及截距时间-斜率($\tau-p$)域对炮集数据进行最优化反演以压制拖缆的鬼波^[32-33]。此外,Beasley等^[34]提出了一种基于波动方程分离上行波和下行波的算法以去除接收缆的鬼波;Weglein等^[35]基于散射理论提出了利用格林函数进行鬼波压制的方法;Rickett等^[36]提出通过自适应寻找最佳鬼波时延进行鬼波压制的方法;Grion等^[37]针对海水面起伏变化开发了基于相移法波场延拓算子的鬼波压制方法。由于鬼波压制技术的快速进步^[38]以及平缆采集技术相较其他采集技术在作业上更方便、更灵活和更高效特性,水平深沉放(12~17 m)拖缆(平缆深拖)宽频采集技术在实际作业中的占比最高。

1.4 多分量宽频地震采集处理技术

双检拖缆采集技术最早出现在20世纪80年代末期。2007年,挪威石油地质服务(Petroleum Geoservices,即PGS)公司推出了Geostreamer双检拖缆采集系统。双检拖缆采集通常指在同一采集点放置两套检波器[常见的是压力检波器(水检)和速度检波器(陆检)的组合],利用同一种波形在两种检波器中发生的相位变化来识别并压制鬼波。针对双检拖缆采集方式,Carlson等^[16]通过对双检数据进行波场分解来保留具有更宽频带的上行波场。

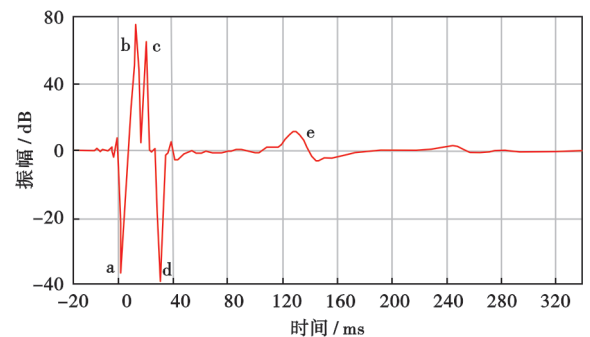
海底多分量地震采集技术也出现在20世纪80年代末期,主要包括OBC和OBN采集技术,同样具备提高地震频带宽度的能力^[39-41]。OBC和OBN技术将检波器置于海底,采集的资料受海水噪声干扰少,天然具备频带宽的特性;OBC和OBN技术可以利用水检和陆检资料的匹配合并来压制鬼波。然而,在海底采集系统中,由于不同检波器接收到的信号振幅、频率等信息会受到传感器灵敏度差异的影响,对采集装备要求高,在数据合并时,频谱陷波互补性差且易引入其他噪声,因此,宽频带资料的获取仍然需要通过地震资料处理来压制鬼波等噪声的影响。Barr^[42]详细介绍了海底电缆双检采集技术,并给出了利用双检地震数据计算合并比例因子的方法。高少武等^[43]以能量最小为原则分别计算了水检、陆检数据的相位、振幅匹配算子,并对双检数据进行合并处理,实现鬼波压制。

2 海洋宽频地震数据特征

2.1 海洋宽频地震数据子波特征

在海洋地震采集过程中,采集的地震信号受震源

气泡、震源鬼波、电缆鬼波等多重因素影响^[1-3]。图1所示为海洋水平拖缆采集地震信号的远场子波,其中包含一次波、震源鬼波、电缆鬼波、震源和电缆混合子波,以及震源气泡。宽频采集、处理的目的是为了让地震资料仅保留与真实地层反射相关的一次波。



注:a—一次波;b—震源鬼波;c—电缆鬼波;d—震源和电缆混合子波;e—震源气泡。

图1 水平拖缆采集接收到的地震子波

Fig. 1 Seismic wavelet received by horizontal streamer acquisition

经宽频采集和处理后,宽频地震数据的子波旁瓣能量明显得到压制,一次波能量得到增强,子波形态和频带范围与常规地震数据反演的子波有明显的不同(图2)。从图2可以看出,在宽频地震数据中,子波的旁瓣已经得到明显压制,频谱宽度有了较为明显的拓宽,特别是低频端有了较好的补偿。子波特征的变化将对宽频地震数据的反演、属性分析和解释等产生较大影响,甚至会带来计算流程的改变。

2.2 海洋宽频地震数据的频谱特征

图3所示为中国南海深水区通过斜缆采集获取的宽频地震数据,由于去除了虚反射的影响,在地震波双程旅行时为2.0~2.5 s的中—浅层,地震资料的分辨率很高,地震数据的低频和高端能量均较强,相对振幅在-10 dB以上的频带宽度达到10~125 Hz,地震数据的能量主要集中在40~80 Hz;但在地震波双程旅行时为3.0 s以深的深层中,高频能量迅速衰减,低频能量更强,相对振幅在-10 dB以上的频带范围为4~58 Hz,地震数据的能量主要集中在5~30 Hz。在宽频数据中,深层的能量主要集中在低频端,这使得大套地层的地震反射层次清楚,强阻抗界面的振幅强,内部地层的高频响应显得很弱。目前,很多勘探目的层系都集中在中—深层,但宽频地震资料所呈现的中—深层以低频信息占优、高频信息不足的特点使得地震剖面的“视分辨率”降低,反射界面不突出,由此给传统基于振幅信息开展构造解释、沉积储层刻画的技术带来了新的挑战。

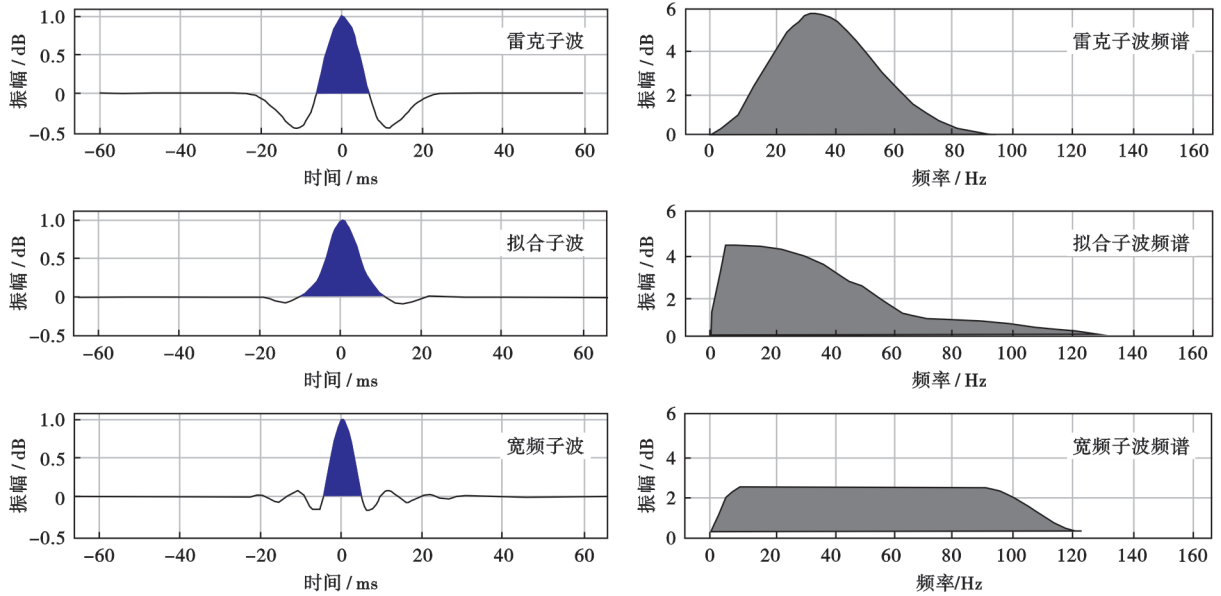


图 2 雷克子波、拟合子波和宽频子波比较

Fig. 2 Comparison of Riker, simulated and broadband wavelets

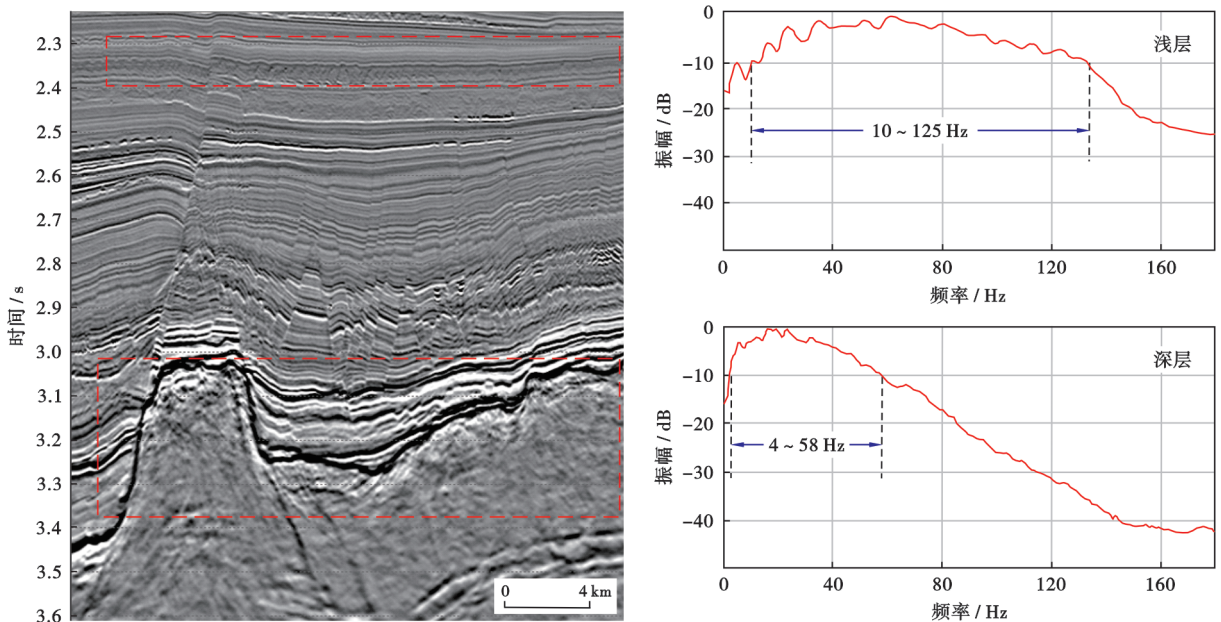


图 3 海洋斜缆宽频地震数据及其频谱特征

Fig. 3 Broadband seismic data and spectral characteristics of marine inclined cables

3 海洋宽频地震数据应用技术

笔者针对宽频数据的特点,提出了根据目标储层特征选择相应技术方法的思路,开展了海洋宽频地震数据的应用研究。大量的研究实践表明:基于宽频数据的地震反演技术可提高厚储层的描述精度,基于宽频数据的属性分析技术可提高薄储层的刻画精度,基于宽频数据稳定的相位信息可提高沉积层序的解释能力。

3.1 基于宽频地震数据的反演技术

通过地震反演补充地震资料中缺失的 6~8 Hz 以下的低频信息是业界广泛应用的储层预测技术^[44]。深水在勘探阶段的钻井数量较少,地层的压实趋势随水深变化剧烈,在地震反演过程中难以建立稳定、可靠的低频模型,这给地震反演工作带来了很大的挑战。宽频地震数据中的低频信息约可以达到 3 Hz,利用好低频信息可有效地降低反演过程中对钻井数据的依赖^[45]。业界对于如何应用宽频地震数据进行反演也有

过一些尝试,例如:利用宽频地震数据的频宽优势,通过分频迭代获取不同频段范围内的反演结果,可提高对薄储层的刻画精度^[46];此外,还可以通过在地震资料处理过程中的层析速度反演、全波形反演等技术获取高精度速度场,并以此为基础构建波阻抗反演的低频模型,结合宽频地震数据自身的优势,降低地震反演过程中对钻

井资料的依赖,提高预测结果的可靠性。与常规地震资料反演结果相比,在宽频地震数据的反演结果中,频率构成会发生显著变化(图4)。基于宽频地震数据的反演技术省去了常规地震反演过程中井控插值构建低频模型的过程,可以大大降低横向预测结果的多解性,也可以充分发挥宽频地震数据在纵向分辨率上的优势。

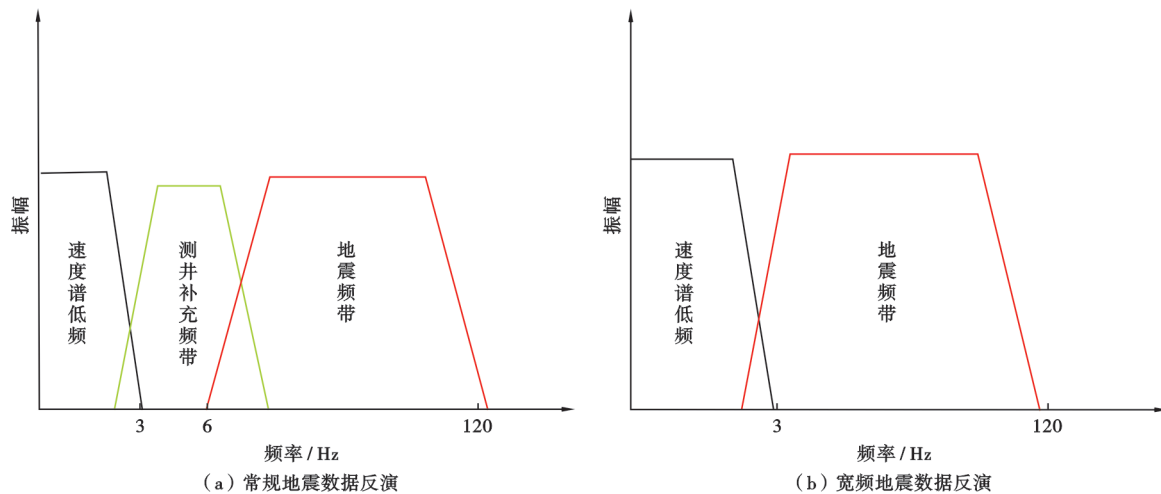


图4 地震数据反演结果的频带组成

Fig. 4 Frequency band composition of seismic inversion results

图5展示的是宽频地震数据反演结果与常规地震数据反演结果的对比,从中可以看出:①宽频资料反演对厚层地层预测更加准确,如在图5中标识A处,常规地震资料反演结果中出现了隔夹层现象,而宽频地震资料反演结果中则显示为厚层泥岩,且钻后结果也证实其为厚度达80余米的泥岩;②地震频带的拓宽使

得地震资料精度显著提高,细节更加清晰,如在图5中标识B处,基于宽频地震资料反演结果的边界更加清晰,储层连续性更好,对薄层的识别能力更强。

3.2 基于宽频地震数据的属性分析技术

地震属性的种类很多,分类方法也各有不同,但其计算过程均反应地震波形的不同变化特征。由于宽频

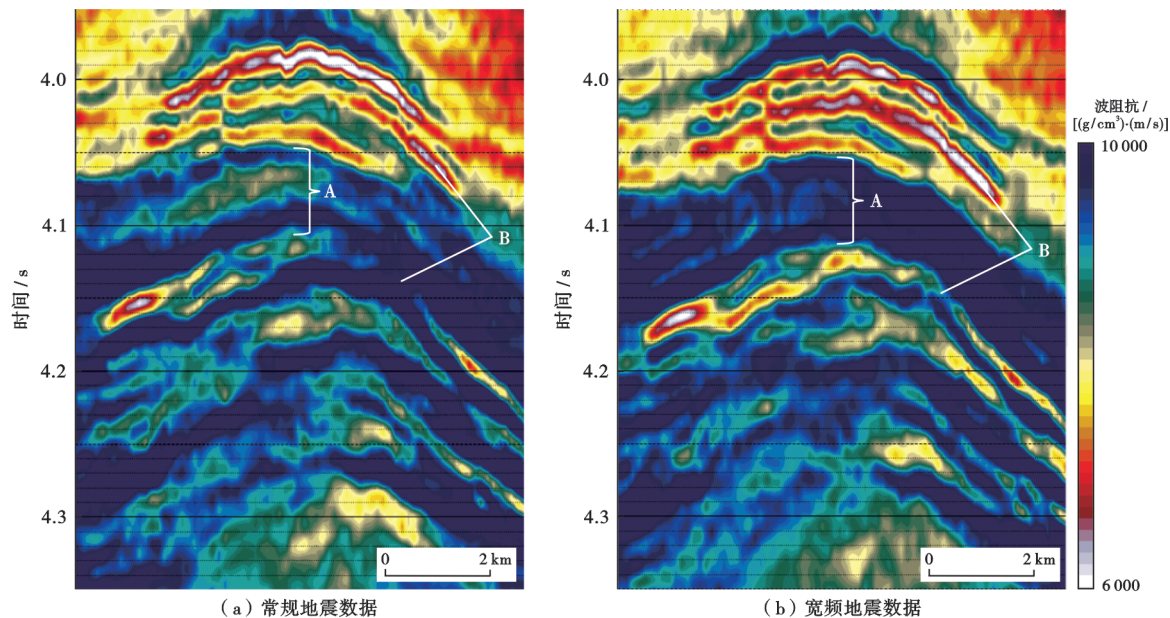


图5 常规地震数据与宽频地震数据反演结果比较

Fig. 5 Comparison of inversion results between conventional seismic data and broadband seismic data

地震数据的子波特征较常规地震数据有显著变化,其地震波形的变化势必会对地震属性的计算产生影响^[47]。如图 6 所示:在常规地震数据中,25 Hz 雷克子波的旁瓣较大,子波旁瓣部位的值对振幅包络属性产生较大影响,其瞬时振幅分辨率较低;在完全去除鬼波后的地震数据中,子波的理论低频部分可达 0 Hz,主频仍为 25 Hz,由于

旁瓣得到压制,瞬时振幅的精度明显提高;在频率范围为 2~115 Hz 的宽频地震数据中,由于子波有着丰富的低频信息,可以压制绝大多数子波旁瓣,而其中丰富的高频信息又可以很大程度地提高振幅包络属性的精度。

图 7 为深水某构造区目标层的振幅包络属性对比:在常规地震资料中,由于缺失低频和

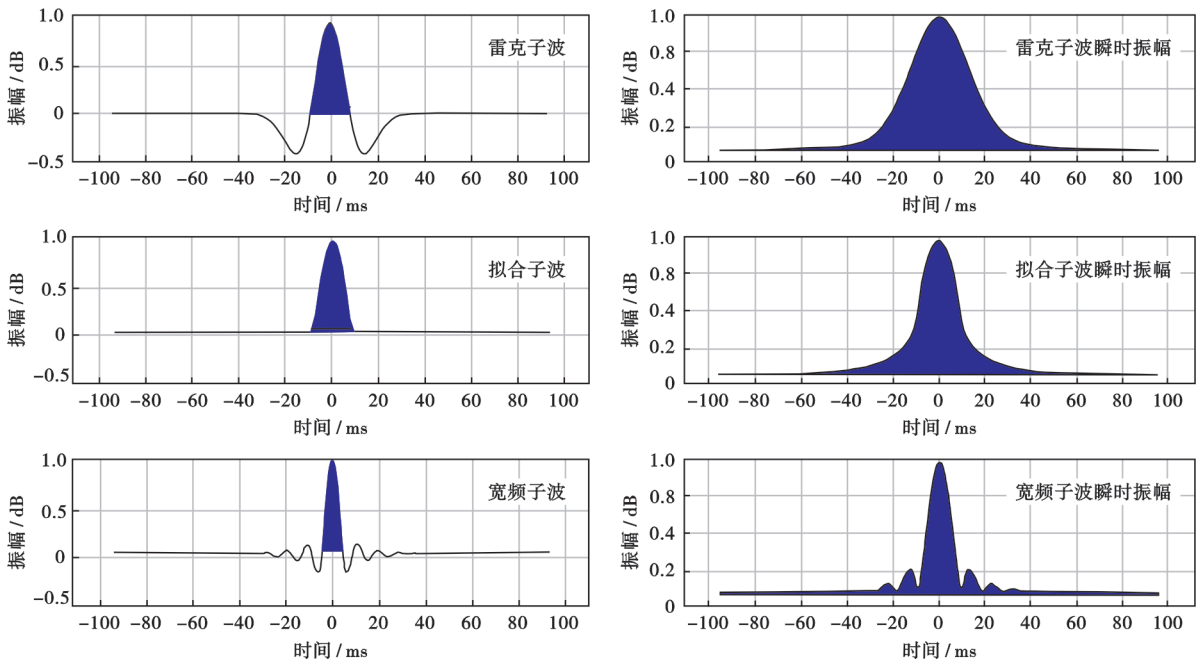


图 6 不同子波及瞬时振幅比较

Fig. 6 Comparison of different wavelets and instantaneous amplitudes

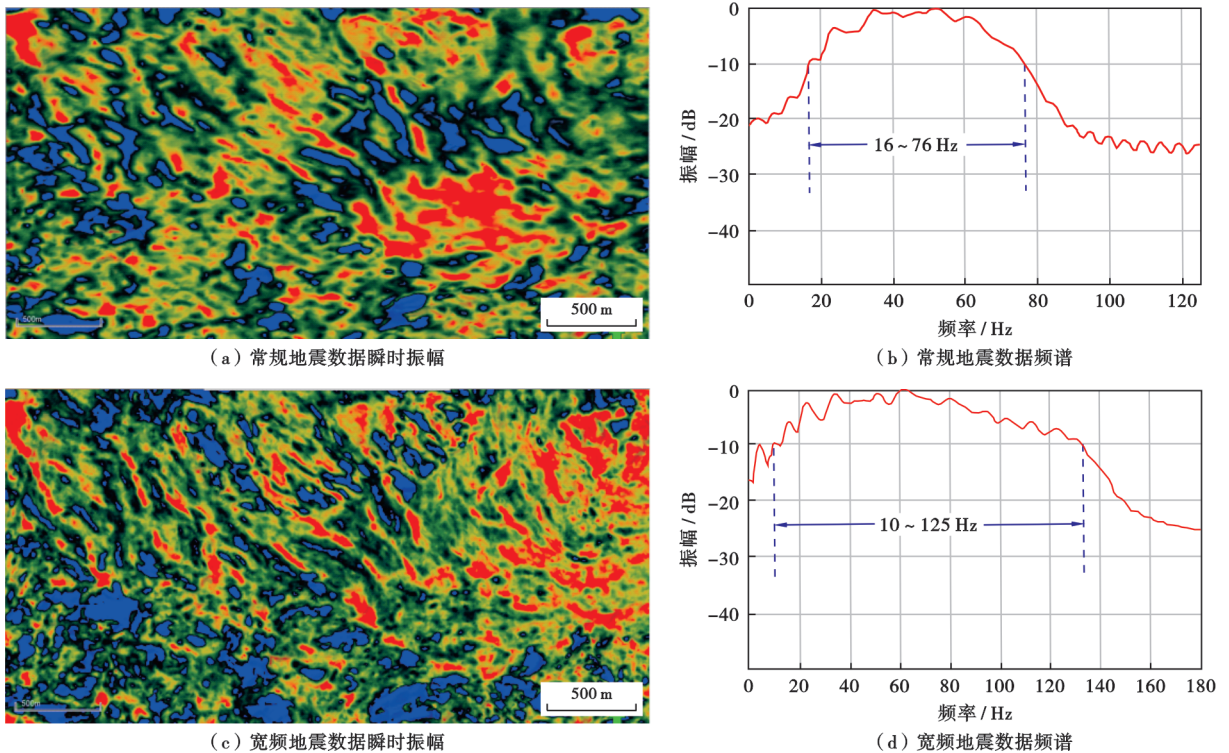


图 7 不同地震数据的瞬时振幅及频谱对比

Fig. 7 Comparison of instantaneous amplitudes between conventional data and broadband data

算的瞬时振幅属性的平面分辨率较低,特征模糊,产生很多虚假现象,无法准确地描述储层的横向变化;而在宽频地震数据的计算结果中,瞬时振幅属性在平面上的信噪比和分辨率得到了大幅提升,特征十分清晰,可以更好地展示出砂体横向分布的特征。

同样的差异也可以体现在地震相干属性中,由于

宽频地震数据低频丰富、频带较宽,其信噪比更高,这使得地震反射结果层次分明,振幅强弱变化自然、协调,断面成像清楚。如图8所示,宽频地震数据的相干体切片细节更丰富,分辨率更高,平面延伸很短的断层和复杂网状成岩断层均能得到很好表现,有利于断裂平面组合和构造应力特征等分析。

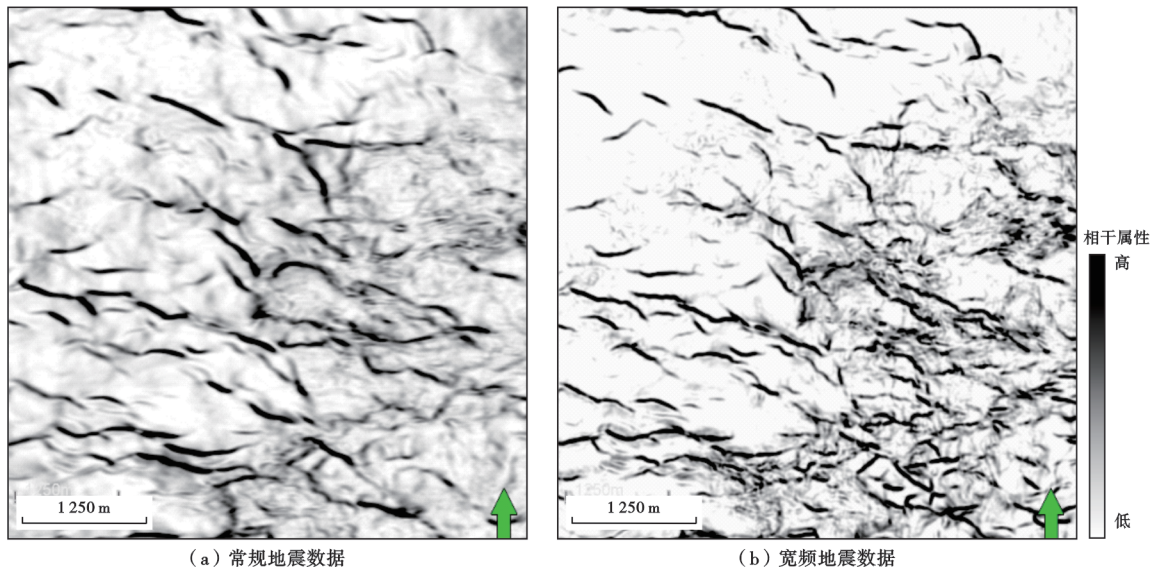


图8 常规地震数据与宽频地震数据的相干属性对比

Fig. 8 Comparison of coherent attributes between conventional seismic data and broadband seismic data

3.3 基于宽频地震数据的层序解释技术

海洋地震资料普遍受到鬼波影响,地震子波的旁瓣效应会使得相位不连续性并产生明显的多解性,因此,利用常规地震数据的瞬时相位属性求取瞬时频率时必须进行解卷绕处理,否则将带来严重的多解性。宽频采集的地震数据由于低频和低频信号均得到了拓展,其中丰富的低频信息可以有效地提高地震资料的信噪比,压制子波旁瓣,保留子波相位卷绕特征的瞬时相位梯度属性能有效提升薄层层序界面的识别能力,可有效解决宽频地震资料中一深层“视分辨率”低、沉积层序及储层内幕刻画难的问题^[48]。

对任意一个时间域信号 $x(t)$, 其 Hilbert 变换表示为 $Y(t)$, 其解析信号 $Z(t)$ 可表示为:

$$Z(t) = x(t) + iY(t) = A(t)\exp[i\theta(t)] \quad (1)$$

其中, $A(t)$ 和 $\theta(t)$ 可分别表示为:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + Y^2(t)} \quad (2)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1}\left[\frac{Y(t)}{x(t)}\right] \quad (3)$$

对瞬时相位 $\theta(t)$ 求取时间的一阶导数, 可得到瞬时频率 $\omega(t)$:

$$\omega(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4)$$

在式(3)计算瞬时相位的过程中用到了反正切函数, 但按照计算机处理中对反正切函数的规定, 若相位角度从 0 到 π 变化, 得到的结果是 0 至 π , 再从 $-\pi$ 至 0 , 即在位置 π 处发生跳变, 跳变幅度为 2π , 这种现象就是相位卷绕。因此, 在按照式(4)计算瞬时频率属性时, 为了使相位不发生跳变现象, 须对相位进行解卷绕处理。笔者将保留卷绕现象的瞬时相位的一阶导数称为瞬时相位梯度。由于瞬时相位梯度随时间变化, 保留了瞬时相位不连续特性与层序界面之间的对应关系, 可以准确识别层序界面的位置。

图9是分别用常规地震子波与实际宽频地震子波模拟的地震数据及其瞬时相位梯度属性。从对比结果可以看到: 在常规地震数据中, 子波旁瓣的存在会对结果产生较大影响, 过多的同相轴会给解释结果带来很大的不确定性, 特别是在地震资料品质较差的情况下, 将给实际地震数据的层序解释带来很强的多解性; 而基于宽频地震数据的瞬时相位梯度属性不受子波旁瓣干扰, 可准确地反映出地层的层序界面, 规避了由于子波旁瓣效应带来的多解性问题。

图10和图11是利用宽频地震数据的瞬时相位梯度属性在不同靶区应用的效果。在图10中, 基于宽频地震数据计算的“瞬时相位梯度”属性可以清晰地展现

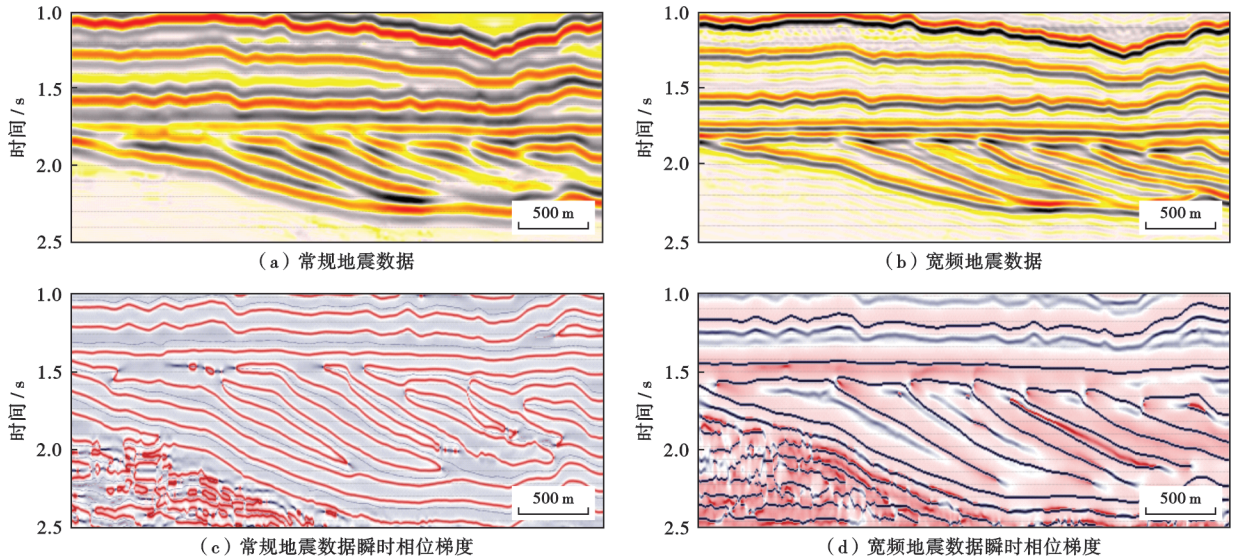


图 9 不同地震数据及其瞬时相位梯度对比

Fig. 9 Comparison of conventional seismic data and broadband seismic data and their instantaneous phase gradients

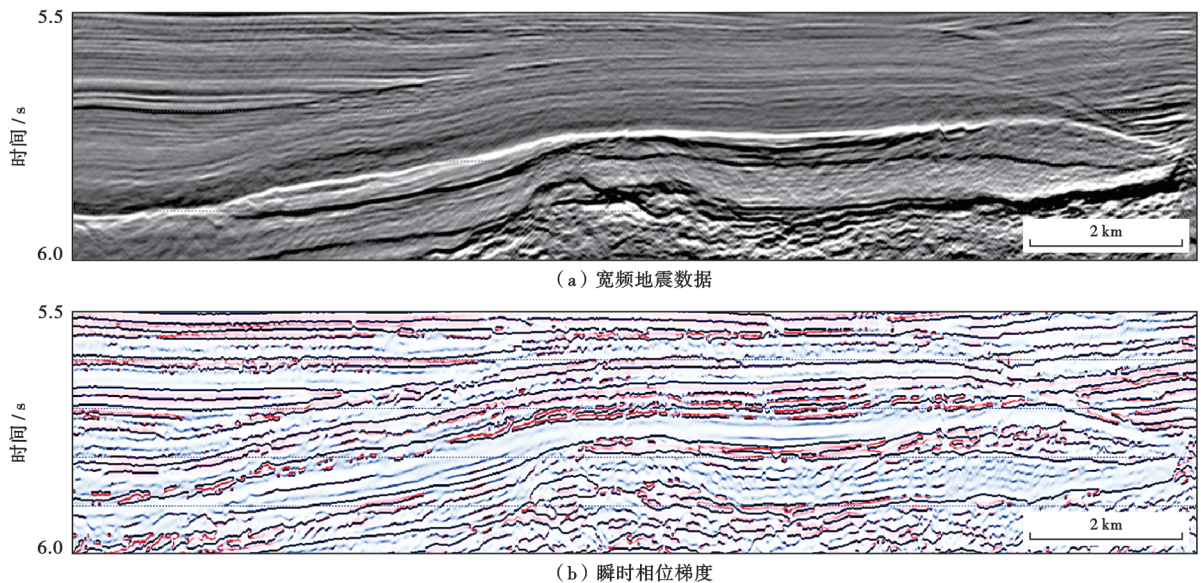


图 10 宽频地震数据及计算的瞬时相位梯度

Fig. 10 Broadband seismic data and calculated instantaneous phase gradients

出地层层序界面的位置,地层界面刻画清楚,可连续追踪;从图 11 可以看到,在基于宽频地震数据的瞬时相位梯度属性中,地层上超现象更明显,可以清晰地展示多期沉积体的叠置关系,为高精度层序地层解释方案提供可靠的依据。

4 海洋宽频地震勘探技术展望

随着勘探程度不断深入,中—深层必将成为中国乃至全世界海洋油气增储上产的重点领域,如何拓宽中—深层地震资料的频带,改善中—深层地震资料的成像品质是必须突破的地球物理问题。因此,海洋宽

频地震勘探采集、处理及解释技术仍有广阔的应用前景。结合目前海洋宽频地震技术的现状,笔者认为海洋宽频地震技术仍需加大以下研究:

第一,加大海洋宽频地震采集装备技术研究,研发具有更低频率的震源和检波器接收系统。国际上最先进的震源激发系统的最低频率可以至 1.5~2.0 Hz,拖缆检波器接收信号的最低截频可以至 3 Hz,OBN 检波器接收信号的最低截频可以至 2 Hz。为了在中—深层获得更低的频率,需紧跟国际前沿技术,加大海洋地震采集装备的自主研发力度,以获得更低频的地震波能量激发和接收。

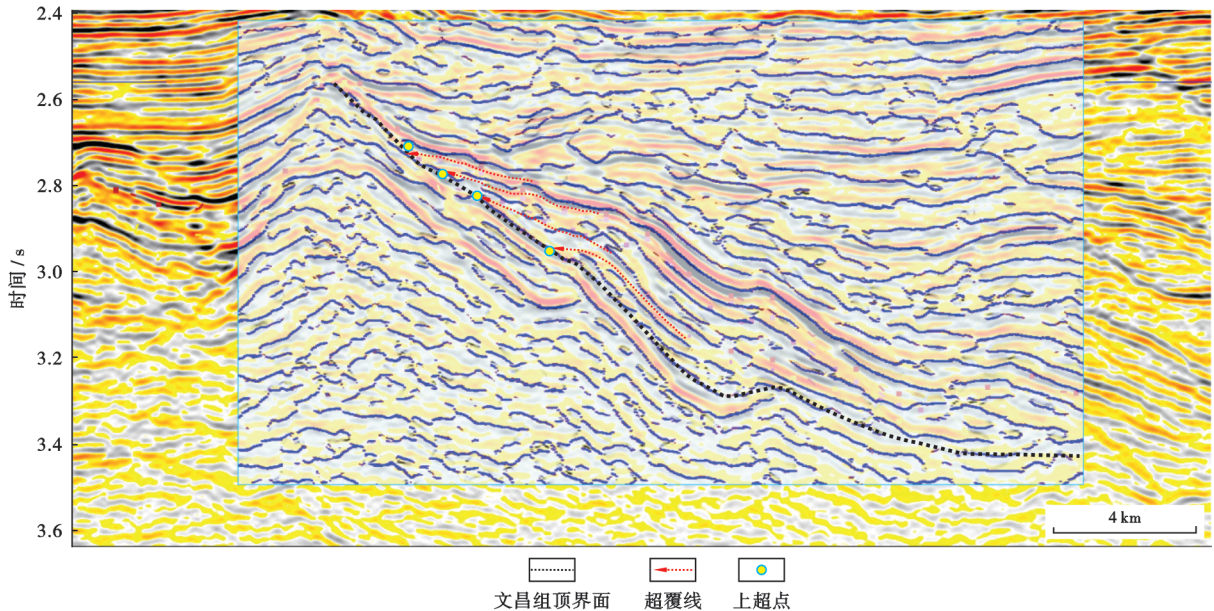


图 11 宽频地震数据及计算的瞬时相位梯度的叠合

Fig. 11 Overlap of broadband seismic data and calculated instantaneous phase gradients

第二,持续加强海洋宽频地震资料采集、处理技术攻关。首先,中国近年来已在水深大于 100 m 的海域实施了多块电缆沉放深度超过 10 m 的水平拖缆地震采集,作业效率高、鬼波压制效果好,未来仍具有广阔的前景;其次,浅水区水平拖缆鬼波压制技术仍有较大的发展空间,尤其目前还尚未找到完全压制震源和电缆鬼波的技术方法;此外,如何提高中—深层地震资料的高频信息能量依然是重点研究方向之一。

第三,深化海洋宽频地震解释及应用技术研究。在海洋宽频地震数据中,当地震波传播至中—深层目的层后会呈现明显的低频占优的特点,其视分辨率能力显著降低,因而需要解决中—深层薄储层刻画能力明显不足的问题,而单纯应用传统的地震解释和反演技术已无法发挥宽频地震数据的优势。笔者给出了一些宽频地震数据的研究思路和案例,未来仍有很大的潜力可挖,仍需根据宽频地震数据的特征持续加强配套解释及应用技术研究。

5 结论

(1) 经过十几年的发展,海洋宽频地震技术已日臻成熟并走向工业化应用,在解决海洋复杂目标地震成像精度方面具有明显优势,在走向中—深层精细勘探开发研究过程中具有广阔的应用前景。

(2) 宽频地震资料在中—浅层具有丰富的低频信息和更宽的频带,能够获得中—浅层的高分辨率图像;中—深层具有低频占优,高频信息不足的特点,丰富的低频信息有利于深部地层的构造成像,有利于提高地

震资料解释的可靠性和地震反演的精度。根据不同深度层段内宽频地震数据特点及研究目标的需求,采用相应的反演、属性分析和层序解释技术可以充分发挥宽频数据的优势。

(3) 针对宽频地震资料的装备研制、采集及配套处理技术、解释及应用技术的研究仍将是未来海洋地球物理技术研究的重点方向,在走向海洋油气藏精细描述的过程中仍将发挥重要作用。

符号注释: t —时间, s ; $x(t)$ —时间域信号; $Y(t)$ —Hilbert 变换后的信号; $Z(t)$ —解析信号; $A(t)$ — $x(t)$ 的瞬时振幅信号; $\theta(t)$ — $x(t)$ 的瞬时相位信号; $\omega(t)$ — $x(t)$ 的瞬时频率信号。

参考文献

- [1] KRAGH E, MUYZERT E, CURTIS T, et al. Efficient broadband marine acquisition and processing for improved resolution and deep imaging[J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(4): 464-469.
- [2] 吴志强. 海洋宽频带地震勘探技术新进展[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(3): 421-430.
WU Zhiqiang. New advances in marine broadband seismic exploration[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(3): 421-430.
- [3] 谢玉洪, 李列, 袁全社. 海上宽频地震勘探技术在琼东南盆地深水区的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(3): 430-435.
XIE Yuhong, LI Lie, YUAN Quanshe. Broadband marine seismic exploration in Qiongdongnan Basin deepwater areas[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2012, 47(3): 430-435.
- [4] 王华忠. “两宽一高”油气地震勘探中的关键问题分析[J]. *石油物探*, 2019, 58(3): 313-324.
WANG Huazhong. Key problem analysis in seismic exploration based

- on wide-azimuth, high-density, and broadband seismic data[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(3): 313-324.
- [5] 杨峰, 聂辉, 陈洪涛, 等. 宽频地震数据碳酸盐岩叠前储层预测——以滨里海盆地东缘 B 区块为例[J]. *石油物探*, 2019, 58(4): 555-562. YANG Feng, NIE Hui, CHEN Hongtao, et al. Carbonate reservoir prediction with broadband seismic data: a case study from the East Block B of Pre-Caspian Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2019, 58(4): 555-562.
- [6] 徐超, 李黎, 刘南. 斜缆采集地震数据的薄层岩性储层预测技术在珠江口盆地的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(5): 71-76. XU Chao, LI Li, LIU Nan. Application of thin layer lithological reservoir prediction technology for variable-depth steamer seismic in pearl river mouth basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(5): 71-76.
- [7] 肖张波, 雷永昌, 于骏清, 等. 基于宽频资料的扩展弹性阻抗反演方法在陆丰 22 洼陷低勘探区古近系岩性预测中的应用[J]. *物探与化探*, 2022, 46(2): 392-401. XIAO Zhangbo, LEI Yongchang, YU Junqing, et al. Application of broadband data-based extended elastic impedance inversion method in Paleogene lithology prediction of areas at a low exploration level in Lufeng 22 subsag[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(2): 392-401.
- [8] MOLDOVEANU N, SEYMOUR N, MANEN D J, et al. Broadband seismic methods for towed-streamer acquisition[C]// *Proceedings of the 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012*. Copenhagen, Denmark: European Association of Geoscientists & Engineers, 2012.
- [9] 李洪建. 海洋宽频地震勘探方法与应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016. LI Hongjian. Research and application of broadband marine seismic exploration[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [10] 刘春成, 刘志斌, 顾汉明. 利用上/下缆合并算子确定海上上/下缆采集的最优沉放深度组合[J]. *石油物探*, 2013, 52(5): 623-629. LIU Chuncheng, LIU Zhibin, GU Hanming. The determination of optimal sinking depths of over/under streamers in offshore survey by merge operator[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2013, 52(5): 623-629.
- [11] 赵仁永, 张振波, 轩义华. 上下源、上下缆地震采集技术在珠江口的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(4): 517-521. ZHAO Renyong, ZHANG Zhenbo, XUAN Yihua. Application of over/under streamer and over/under source seismic acquisition in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2011, 46(4): 517-521.
- [12] SOUBARAS R. Variable-depth streamer: deep towing and efficient deghosting for extended band-width[R]. *SEG/EAGE Research Workshop*, 2010: 289-292.
- [13] SOUBARAS R, DOWLE R. Variable-depth streamer: a broadband marine solution[J]. *First Break*, 2010, 28(12): 89-96.
- [14] 张振波, 李东方. 斜缆宽频地震勘探技术在珠江口盆地的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(3): 451-456. ZHANG Zhenbo, LI Dongfang. Variable-depth streamer seismic acquisition and processing in Pearl River Mouth Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(3): 451-456.
- [15] TENGHAMN R, VAAGE S, BORRESEN C. A dual-sensor, towed marine streamer: its viable implementation and initial results[R]. *SEG 0989*, 2007.
- [16] CARLSON D H, LONG A, SÖLLNER W, et al. Increased resolution and penetration from a towed dual-sensor streamer[J]. *First Break*, 2007, 25(12): 71-77.
- [17] 王守君. 海底电缆地震技术优势及在中国近海的应用效果[J]. *中国海上油气*, 2012, 24(2): 9-12. WANG Shoujun. Technical advantages of OBC seismic survey and its application effects offshore China[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2012, 24(2): 9-12.
- [18] HOFFE B H, LINES L R, CARY P W. Applications of OBC recording[J]. *The Leading Edge*, 2000, 19(4): 382-391.
- [19] 李斌, 冯奇坤, 张异彪, 等. 海上 OBC-OBN 技术发展与关键问题[J]. *物探与化探*, 2019, 43(6): 1277-1284. LI Bin, FENG Qikun, ZHANG Yibiao, et al. Summary of development and key issues of offshore OBC-OBN technology[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(6): 1277-1284.
- [20] 吴志强, 张训华, 赵维娜, 等. 海底节点(OBN)地震勘探: 进展与成果[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(1): 412-424. WU Zhiqiang, ZHANG Xunhua, ZHAO Weina, et al. Ocean Bottom Station Nodes (OBN): progress and achievement[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(1): 412-424.
- [21] GRATACOS B. Over-under deghosting: 1D, 2D or 3D algorithms in the F, FK or FXY domains[R]. *SEG 0125*, 2008.
- [22] GUAN Xizhu, FU Liyun, WEI Wei. Deghosting of over/under towed-streamer seismic data with wavefield extrapolation[J]. *ASEG Extended Abstracts*, 2015, 2015(1): 1-4.
- [23] PARKES G, HEGNA S. An acquisition system that extracts the earth response from seismic data[J]. *First Break*, 2011, 29(12): 81-87.
- [24] ROBERTSSON J O A, HALLIDAY D, VAN MANEN D J, et al. Full-wavefield, towed-marine seismic acquisition and applications[C]// *Proceeding of the 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012*. Copenhagen, Denmark: European Association of Geoscientists & Engineers, 2012.
- [25] RAY C H, MOORE N A. High resolution, marine seismic stratigraphic system: US4353121[P]. 1982-10-05.
- [26] 刘春成, 焦振华, 管西竹, 等. 海洋“犁式”电缆地震资料采集与处理方法[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(5): 1-7. LIU Chuncheng, JIAO Zhenhua, GUAN Xizhu, et al. The acquisition and process method of marine plow cable streamer seismic data[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(5): 1-7.
- [27] 刘春成, 陶杰, 焦振华, 等. 海洋“犁式”电缆采集技术研究与实践[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(6): 1069-1074. LIU Chuncheng, TAO Jie, JIAO Zhenhua, et al. Marine plow streamer acquisition [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(6): 1069-1074.
- [28] SOUBARAS R. Pre-stack deghosting for variable-depth streamer data[R]. *SEG 1083*, 2012: 780-789.
- [29] FERBER R, CAPRIOLI P, WEST L. L1 pseudo- V_z estimation and deghosting of single-component marine towed-streamer data[J]. *Geophysics*, 2013, 78(2): WA21-WA6.
- [30] WANG Ping, RAY S, PENG Can, et al. Premigration deghosting

- for marine streamer data using a bootstrap approach in Tau-P domain[R]. SEG 0225, 2013; 4221-4225.
- [31] POOLE G. Pre-migration receiver de-ghosting and re-datuming for variable depth streamer data[R]. SEG 0541, 2013; 4216-4220.
- [32] WANG Ping, RAY S, NIMSAILA K. 3D joint deghosting and crossline interpolation for marine single-component streamer data[R]. SEG 0882, 2014; 3594-3597.
- [33] SONG Jianguo, GONG Yunliang, LI Shan. High-resolution frequency-domain Radon transform and variable-depth streamer data deghosting[J]. Applied Geophysics, 2015, 12(4): 564-572.
- [34] BEASLEY C J, COATES R, JI Ying, et al. Wave equation receiver deghosting: a provocative example[R]. SEG 0693, 2013; 4226-4230.
- [35] WEGLEIN A B, CORREA G P, GUO Z, et al. New approaches to deghosting towed-streamer and ocean-bottom pressure measurements[R]. SEG 2114, 2002; 2114-2117.
- [36] RICKETT J E, VAN MANEN D J, LOGANATHAN P, et al. Slanted-streamer data-adaptive deghosting with local plane waves[C] // 76th EAGE Conference and Exhibition. Amsterdam, Netherlands; European Association of Geoscientists & Engineers, 2014.
- [37] GRION S, TELLING R, HOLLAND S. Rough sea estimation for phase-shift deghosting[R]. SEG 13688475, 2016; 5129-5133.
- [38] 李慧龙, 王征, 宋鑫, 等. 深拖平缆采集资料中鬼波衰减方法探讨[J]. 物探与化探, 2019, 43(1): 176-182.
LI Huilong, WANG Zheng, SONG Xin, et al. The application of broadband processing technology to deep towing flat streamer data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 176-182.
- [39] 杨晓明. 海底电缆双检地震数据合并处理关键技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
YANG Xiaoming. The research of key summing processing techniques of Ocean Bottom Cable Dual-sensor seismic data[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [40] 薛维忠. OBC双检资料处理技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
XUE Weizhong. The research on processing technique in the OBC Dual-sensor data[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [41] 程玉坤, 曹孟起, 冉建斌, 等. 海底电缆双检接收资料的几种处理方法及应用效果[J]. 天然气工业, 2007(增刊1): 86-89.
CHENG Yukun, CAO Mengqi, RAN Jianbin, et al. Several processing methods and application effects of ocean bottom cable dual-sensor data[J]. Natural Gas Industry, 2007(S1): 86-89.
- [42] BARR F J. Dual sensor OBC technology[J]. The Leading Edge, 1997, 16(1): 45-52.
- [43] 高少武, 赵波, 高轩, 等. OBC水陆检数据匹配技术[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(1): 29-32.
GAO Shaowu, ZHAO Bo, GAO Xuan, et al. A method for OBC dual-sensor data matching [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(1): 29-32.
- [44] 叶云飞, 崔维, 张益明, 等. 低频模型对波阻抗反演结果定量解释的影响[J]. 中国海上油气, 2014, 26(6): 32-36.
YE Yunfei, CUI Wei, ZHANG Yiming, et al. Impacts of low-frequency models on the quantitative interpretation of acoustic impedance inversion[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(6): 32-36.
- [45] 叶云飞, 刘春成, 刘志斌, 等. 海上宽频地震反演方法及其在南海深水区的应用[J]. 中国海上油气, 2018, 30(2): 65-70.
YE Yunfei, LIU Chuncheng, LIU Zhibin, et al. Analysis of marine broadband seismic data inversion and application in deep water of South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(2): 65-70.
- [46] 肖曦. 分频迭代宽频反演方法在储层预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(1): 294-299.
XIAO Xi. Application of iterative frequency-divided broadband inversion method in reservoir prediction [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(1): 294-299.
- [47] 叶云飞, 刘春成, 刘志斌, 等. 宽频地震数据瞬时振幅属性优势分析及在南海深水区的应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(4): 1626-1630.
YE Yunfei, LIU Chuncheng, LIU Zhibin, et al. Advantage analysis of instantaneous amplitude for broadband seismic data and application in deep-water area of South China Sea[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(4): 1626-1630.
- [48] 叶云飞, 焦振华, 陶杰. 海洋宽频地震数据瞬时相位梯度属性计算方法及优势分析[J]. 中国海上油气, 2021, 33(4): 46-53.
YE Yunfei, JIAO Zhenhua, TAO Jie. Calculation method and advantage analysis of instantaneous phase gradient attributes for offshore broadband seismic data[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(4): 46-53.

(收稿日期 2023-09-08 改回日期 2023-10-27 编辑 雷永良)