

AVO 反演在琼东南海域天然气水合物识别中的应用

孟大江,文鹏飞,张旭东

(自然资源部海底矿产资源重点实验室,广州 510075;中国地质调查局广州海洋地质调查局,广州 510075)

摘要:为了更好地研究天然气水合物展布形态和赋存情况,利用 AVO 反演技术对琼东南海域天然气水合物进行了识别。首先通过对不同地层模型下天然气水合物和游离气的 AVO 属性特征进行了正演模拟分析,获得了天然气水合物 AVO 属性的响应特征。研究表明,天然气水合物饱和度不同时,其 BSR 处 AVO 属性特征也不同。当天然气水合物饱和度较高时,BSR 处的 AVO 属性特征为:截距为负值,梯度为正值,截距 \times 梯度为负值,流体因子为负值;当饱和度较低时,受游离气的影响,其 BSR 的 AVO 属性特征为:截距为负值,梯度为负值,截距 \times 梯度为正值,流体因子为负值且幅值较大。鉴此,根据正演分析结果,重点对琼东南海域地震资料进行了天然气水合物 AVO 属性异常分析,判识确定该区具有高饱和度水合物的 AVO 属性特征,其天然气水合物勘探潜力大。

关键词:天然气水合物;AVO 反演;水合物敏感属性;琼东南盆地深水区

中图分类号:P631.443

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.07006

天然气水合物又称可燃冰,是由水和气体在低温、高压环境下形成的冰态物,广泛分布于大陆边缘海底沉积物和永久冻土带中,其具有能量高、分布广、规模大等特点,据估计全球天然气水合物资源量是地球上常规化石燃料的 2 倍,是未来理想的替代能源^[1,2]。目前水合物的地球物理识别方法主要有似海底反射 BSR、波阻抗反演、振幅空白带、速度异常以及 AVO 属性等^[3-10],其中 AVO 属性已经成为水合物识别的重要手段。由于海洋地震资料的信噪比较高,并且水合物主要赋存于近海底较浅的沉积层,因此,能够获得到天然气水合物对地震反射振幅的精确响应,为利用 AVO 技术识别水合物提供了基础。

AVO 技术是利用地震反射振幅与偏移距的变化关系以及其反演获取的属性来判断岩性特征及物性参数的一项地震勘探技术,经过多年的发展,AVO 技术已经广泛应用于石油天然气勘探中。目前利用 AVO 技术识别海域天然气水合物也取得了不错的效果,在我国南海北部也有一些成功的应用实例^[7,11]。

为了更好地了解琼东南海域的天然气水合物的展布形态和赋存情况,笔者利用该海域高分辨率三维地震资料进行了 AVO 属性反演。首先,建立天然气水合物和游离气不同的地层模型进行 AVO 正演模拟,优选敏感参数,建立 AVO 属性解释的理论基础。其次,对地震资料进行叠前优化处理,提高道集的信噪比,同时利用 Zoeppritz 方程的近似公式进行 AVO 属性的提取,并识别出水合物 AVO 属性异常区域。最后,结合该工区的地质条件,进行综合分析,圈定水合物的有利区带,为水合物的钻探提供依据。

收稿日期:2018-05-20

作者简介:孟大江(1986—),男,硕士,工程师,主要从事海洋地震资料处理解释及反演方面的研究工作。E-mail:dajiangmeng@163.com

1 AVO 反演理论与正演

1.1 AVO 反演理论基础

AVO 的理论基础是 Zoeppritz 方程,由于该方程较复杂,涉及参数多,使用起来比较困难,因此,许多学者对其进行了简化,目前使用较多的近似公式是 Aki-Richards 公式和 Shuey 公式^[12],其中 Shuey 公式在 AVO 属性提取中使用较多,其表达式如下:

$$R(\theta) \approx P + G \sin^2 \theta$$

其中: $P = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) = \frac{\Delta(\rho\alpha)}{2\rho\alpha}$,
 $G = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 2 \frac{\Delta\mu}{\rho\alpha^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 2 \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) - \frac{\Delta\beta}{\beta}$,
 $\mu = \rho\beta^2, \frac{1}{2}(P-G) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\beta}{\beta} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) = \frac{\Delta(\rho\beta)}{2\rho\beta}$ 。

式中:R 为反射系数;

P 为截距;

G 为梯度;

θ 为入射角;

α 为纵波速度;

β 为横波速度;

ρ 为密度;

μ 为剪切模量;

$(P-G)/2$ 为拟横波分量。

根据近似公式,常规的 AVO 反演处理可以

获得多种属性,不同属性具有不同的物理意义:截距剖面反映了法向入射时 P 波反射的强度;梯度剖面反映了反射振幅随入射角的变化率;截距与梯度的衍生属性截距×梯度剖面反映油气异常的亮点剖面;流体因子反映了偏离背景异常的孔隙流体效应,流体因子对游离气异常较敏感。

1.2 AVO 正演及敏感参数优选

为了更好地了解天然气水合物在不同地层模型下 AVO 属性响应特征,建立了 3 种理论地层模型进行 AVO 正演模拟:第 1 种为只含有水合物的地层模型;第 2 种为水合物饱和度较高,含游离气的地层模型;第 3 种为水合物饱和度较低,含游离气的地层模型。由于该区没有钻井资料,因此,水合物以及地层参数主要根据文献^[13,14]取得。选取 50 Hz 雷克子波,利用 Zoeppritz 方程进行 0~45° 入射角 AVO 道集正演,并提取各种 AVO 属性,建立水合物 AVO 理论解释模型,优选敏感参数,指导后续的 AVO 属性解释。

当地层中只含水合物且水合物饱和度较高时,AVO 道集正演及属性如图 1 所示,水合物地层纵波速度为 2 300 m/s,横波速度为 850 m/s,密度为 1.8 g/cm³。其中水合物顶底 AVO 特征表现为振幅绝对值随偏移距的增大而减小,水合物顶底的 P(截距)与 G(梯度)属性分别表现为较大的异常值具有相反的极性,可通过 P×G 属性进行识别,表现为小于零的异常值,其中 P 波阻

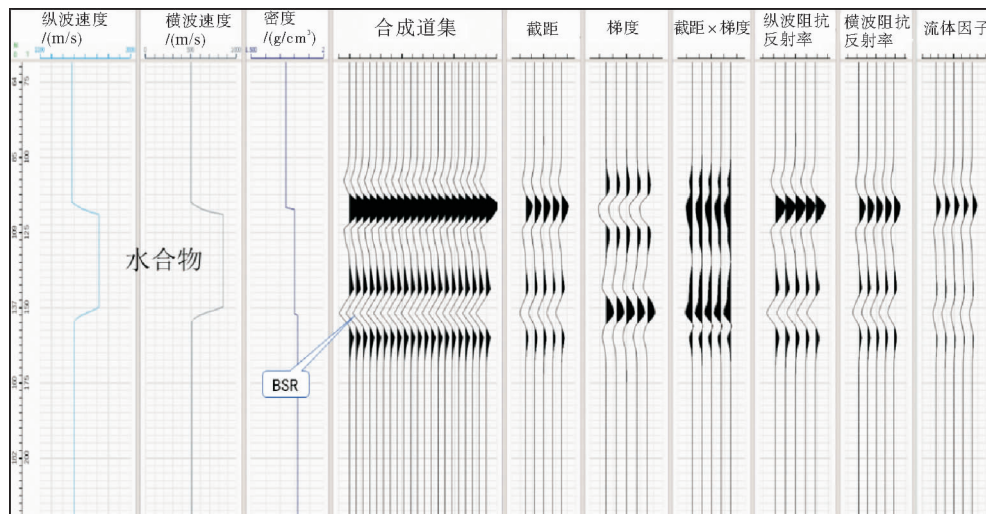


图 1 高饱和度水合物 AVO 正演

Fig. 1 AVO model for high gas hydrate

抗反射率、S波阻抗反射率以及流体因子在BSR处表现为较大的负异常，但其特征与截距属性相似，不易识别。

在第1类水合物地层模型中加入游离气后的模拟结果如图2所示。游离气地层的纵波速度为1400 m/s，横波速度为510 m/s，密度为1.60 g/cm³。含游离气后，水合物顶底AVO特征仍然表现为振幅绝对值随偏移距的增大而减小，水合物顶底的P(截距)与G(梯度)属性同样分别表现为较大的异常值具有相反的极性， $P \times G$ 属性为

小于零的异常值，流体因子表现为较大的负异常，P波阻抗反射率、S波阻抗反射率异常幅度增大。其中游离气AVO特征表现为明显的振幅绝对值随偏移距的增大而增大的特征， $P \times G$ 属性为大于零的异常值，流体因子具有较大的正异常，可据此特征识别游离气异常区域。

在第2类模型中降低了水合物的饱和度，保持游离气不变，模拟的结果如图3所示。水合物地层的纵波速度为1950 m/s，横波速度为600 m/s，密度为1.8 g/cm³。水合物顶的AVO

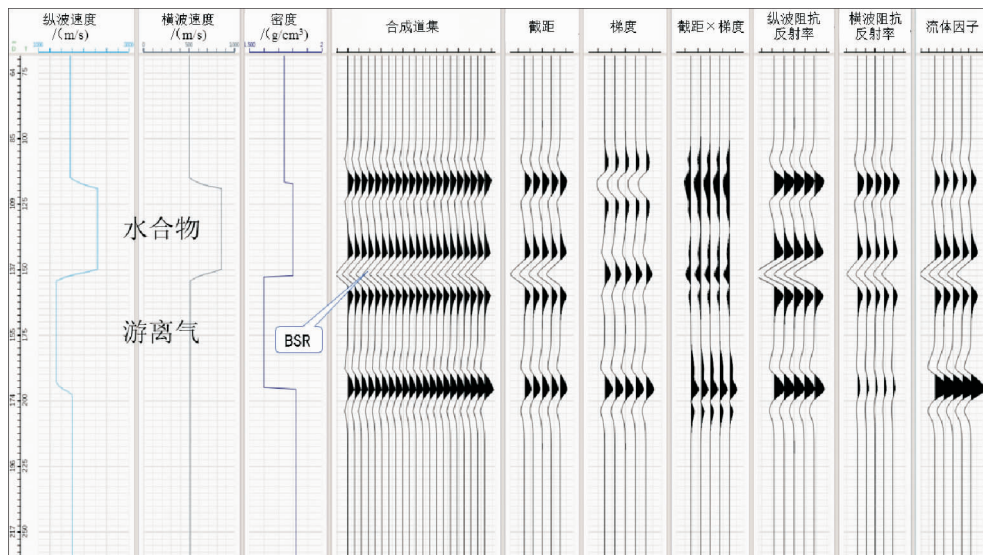


图2 高饱和度水合物和游离气AVO正演

Fig. 2 AVO model for high gas hydrate and free gas

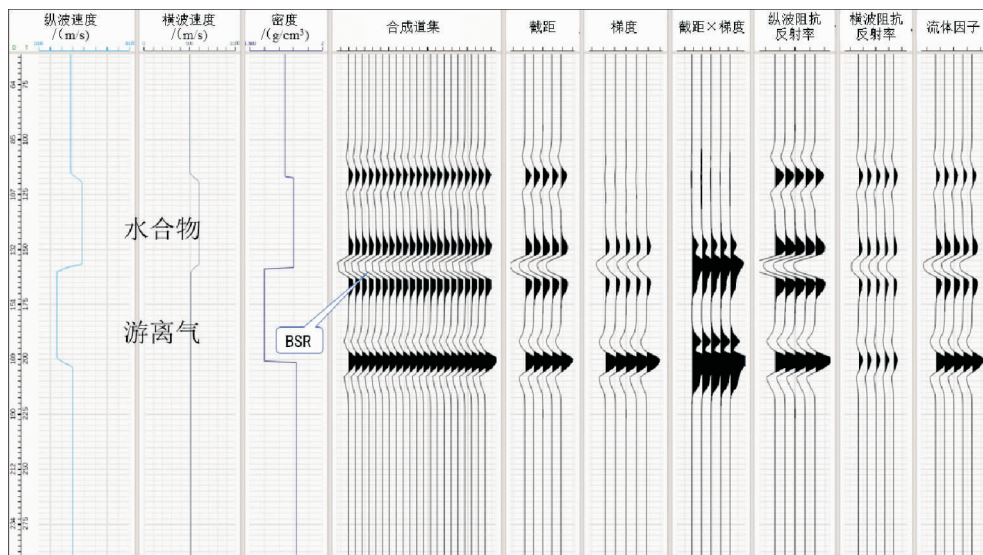


图3 低饱和度水合物和游离气AVO正演

Fig. 3 AVO model for low gas hydrate and free gas

特征以及 AVO 属性与前 2 种地层模型类似,但水合物的底受到游离气的影响,其 AVO 特征表现为振幅绝对值随偏移距的增大而增大的特征,其 P 与 G 属性均表现为负异常值,其乘积大于零, P 波阻抗反射率、 S 波阻抗反射率以及流体因子均表现为负的异常值,其中游离气的 AVO 特征与第 2 类地层模型类似。

经过上述分析,可知在地层中只含水合物或者水合物饱和度比较高以及游离气含量较低的情况下,水合物的 AVO 特征表现为振幅绝对值随偏移距的增大而减小,水合物顶底的 P 与 G 属性分别表现为较大的异常值,但具有相反的极性,可通过 $P \times G$ 属性进行识别,表现为小于零的异常值,其中 P 波阻抗反射率、 S 波阻抗反射率以及流体因子在 BSR 处表现为较大的负异常;当地层中水合物含量较低且含游离气时,水合物的 AVO 特征表现为振幅绝对值随偏移距的增大而增大的特征,其 P 与 G 属性均表现为负异常值,其乘积大于零, P 波阻抗反射率、 S 波阻抗反射率以及流体因子在 BSR 处均表现为负的异常值。由此可见,在不同地层模型下,水合物的 AVO 特征表现不同,尤其是存在游离气的情况下,因此,在实际应用时可分别采用水合物以及游离气的 AVO 属性进行组合判别。

2 琼东南海域水合物 AVO 反演识别

2.1 研究区地质概况

琼东南盆地位于海南岛南部海域,西靠莺歌海盆地,北邻海南隆起,东北以神狐隆起与珠江口盆地珠三拗陷相邻,南与永乐隆起相接。根据盆地的断陷结构及其展布特征,可将盆地划分为 5 个主要构造带,即北部拗陷带、北部(中部)隆起、中央拗陷、南部隆起和南部拗陷(图 4)。该盆地新生代构造沉积演化具有早期陆相断陷、晚期海相拗陷的显著特点。古近纪早期陆相具有多幕特征,主要分为 3 幕断陷期,其中,第 1 幕为晚白垩世末—始新世初,为盆地裂陷初期,沉积物主要为红色及杂色粗碎屑沉积。第 2 幕为始新世—早渐新世,可细分为 2 个阶段,中始新世—晚始新世为盆地快速裂陷期,发育一套中深湖相烃源岩,富含有机质是该区的重要烃源岩;始新世末—早渐新世是盆地稳定沉降期,形成了一套有机质丰富的含煤岩系,是该区的主要气源岩。第 3 幕为晚渐新世时期,为盆地萎缩期,充填了大套有机质丰度较高的浅海相泥岩^[15,16]。

天然气水合物的气源不仅有微生物成因烃

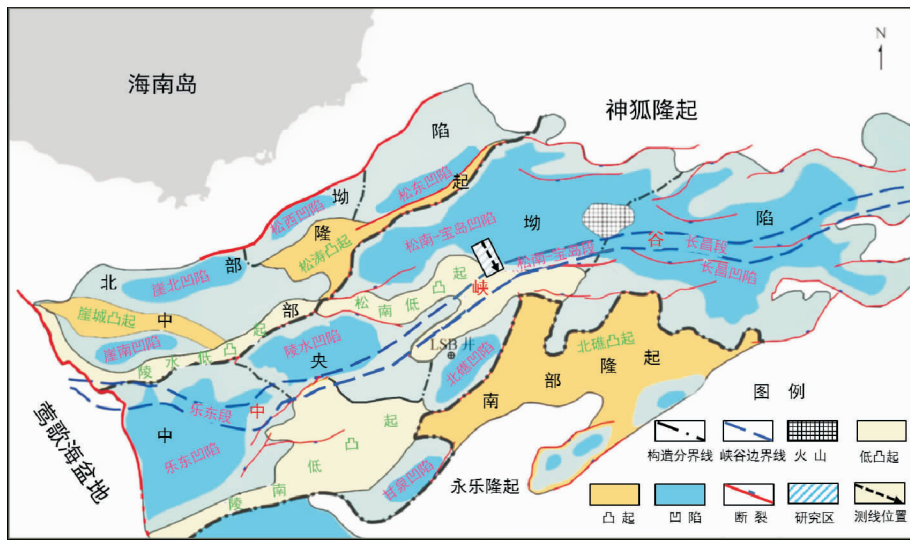


图 4 琼东南盆地区域构造地理位置及研究区(据文献[16]修改)

Fig. 4 Regional tectonic location of Qiongdongnan Basin and research area (modified from reference [16])

气,还包括热分解成因烃气。琼东南盆地经过油气勘探证实,始新统和下渐新统崖城组是盆地主力烃源岩,自上新统莺歌海组以来,盆地处于高排烃阶段,以排气为主,因此,该区具有充足的气源条件^[16]。同时,该盆地断裂、流体底辟以及气烟囱现象比较发育,为深部热解气向浅部天然气水合物的形成提供了运移通道^[17]。最后,琼东南盆地海底具有高压低温条件,其海底温度约为 $0\sim 5^{\circ}$,大地热流平均值为 77.5 mW/m^2 ,地温梯度约为 $39.1\text{ }^{\circ}\text{C/km}$,海底压力在 $(6\sim 13)\times 10^6\text{ Pa}$,平均压力约为 $10\times 10^6\text{ Pa}$,保证了水合物形成的温压条件,并且其沉积速率在黄流组沉积后开始加速,沉积速率 $>500\text{ m/Ma}$,为天然气水合物提供了足够的储集空间^[18]。总之,琼东南盆地区具有有利的温压条件、充足的可容空间、良好的构造背景以及稳定的气源,具备水合物成藏的优越条件。

2.2 AVO 属性的提取

琼东南海域目前还未进行天然气水合物的勘探,其调查程度相对较低,此次研究区的地震资料是采用单源单缆方式采集的,测线间距为 50 m ,海底地形整体较平坦,呈北陡南缓的变化趋势,水深在 $1\ 700\sim 1\ 900\text{ m}$ 之间。

该区地震资料经过常规噪音压制、多次波衰减、速度分析以及叠前时间偏移后,其CRP道集质量已经大幅提升,仅在远道由于各向异性的影响存在微弱上拉的现象以及随机噪音干扰。虽然该现象对地震叠加影响较小,但由于AVO是分析地震振幅随偏移距的变化关系,需要较高质量的道集资料,因此对该道集进行了优化处理。处理流程如图5所示,主要分为2部分,首先,进行高密度各向异性速度分析,分析剩余速度将道集拉平,再对随机噪音进行压制,然后在优化后的道集上利用Zoeppritz方程的近似公式进行AVO属性的提取;其次,结合AVO正演优选的水合物敏感参数进行水合物以及游离气异常区的识别,圈定水合物的发育区域。

2.3 水合物 AVO 属性识别

地层含天然气水合物后会引引起纵横波速度的增加,与周围地层形成较大的波阻抗差异,特别是其下伏地层含有游离气时,其波阻抗差异会更明

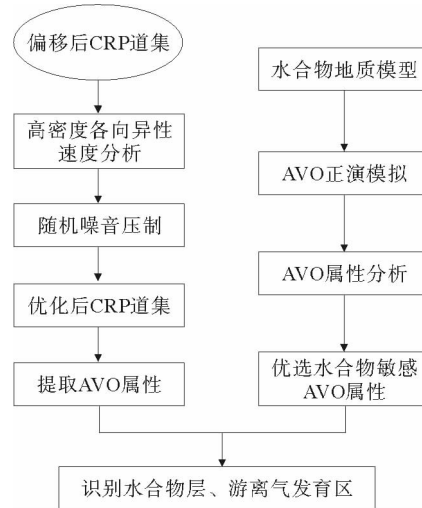


图5 AVO属性处理流程图

Fig. 5 The flowchart of AVO attributes processing

显,即形成BSR(似海底反射)现象^[9,19,20]。虽然BSR存在多解性,但是在天然气水合物的勘探初期,BSR仍然是识别水合物的重要手段。通常对天然气水合物AVO属性的分析,选择在BSR现象较为明显的地震剖面进行。天然气水合物理论模型正演分析表明,天然气水合物饱和度不同时,其BSR处AVO属性特征也不同。当饱和度较高时,BSR的AVO属性特征为:截距为负值,梯度为正值,截距与梯度的乘积为负值,流体因子为负值;当饱和度较低时,受游离气的影响,BSR的AVO属性特征为:截距为负值,梯度为负值,截距与梯度的乘积为正值,流体因子为负值且幅值较大。

根据分析结果,选取工区一条典型地震剖面进行分析,图6是该工区的地震剖面,图中显示距海底约 300 ms 处(黑色箭头),有BSR特征发育,表现为强振幅,极性与海底相反,其上、下部振幅相对较弱,具有明显的空白带。根据图5流程提取水合物的AVO敏感属性,如图7~10所示,其中图7为该剖面的截距属性,BSR处表现为较强的负截距值,表明BSR界面上下速度差异较大,推测BSR之上地层由于含水合物速度增大,BSR之下由于含有游离气速度急剧减小,由此形成了较大的负截距值。图8为梯度剖面,BSR处表现为正梯度值,根据正演模型分析,水合物饱和度较高时,BSR表现为较高的正梯度值,同时截距与梯度的乘积属性在BSR处也表现为较强的负值(如图9所示),由此推测该区水合物饱和度含量

较高。图 10 为流体因子剖面,流体因子是一种对游离气较敏感的属性,在 BSR 处表现为负值异常,在该剖面中的 BSR 处表现为较强的负异常值,证实该处发育游离气异常,为水合物的形成提供了充足的气源。图 11 为 BSR 处截距与梯度的

乘积属性的平面切片,可以看出异常主要分布在工区东北部和西南部,为水合物发育的有利区域。

综上所述,该工区天然气水合物的 AVO 属性特征主要表现为较强的负截距值、正梯度值、较强的截距 \times 梯度属性负值以及较高的负流体因子值。

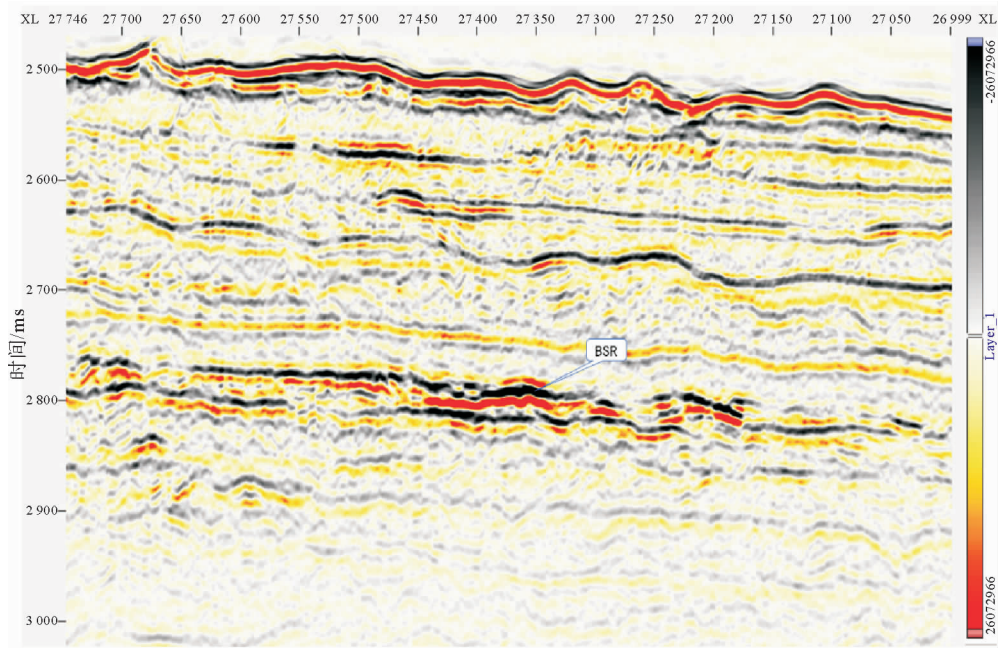


图 6 地震剖面(剖面位置见图 4)

Fig. 6 Seismic section(see fig. 4 for location)

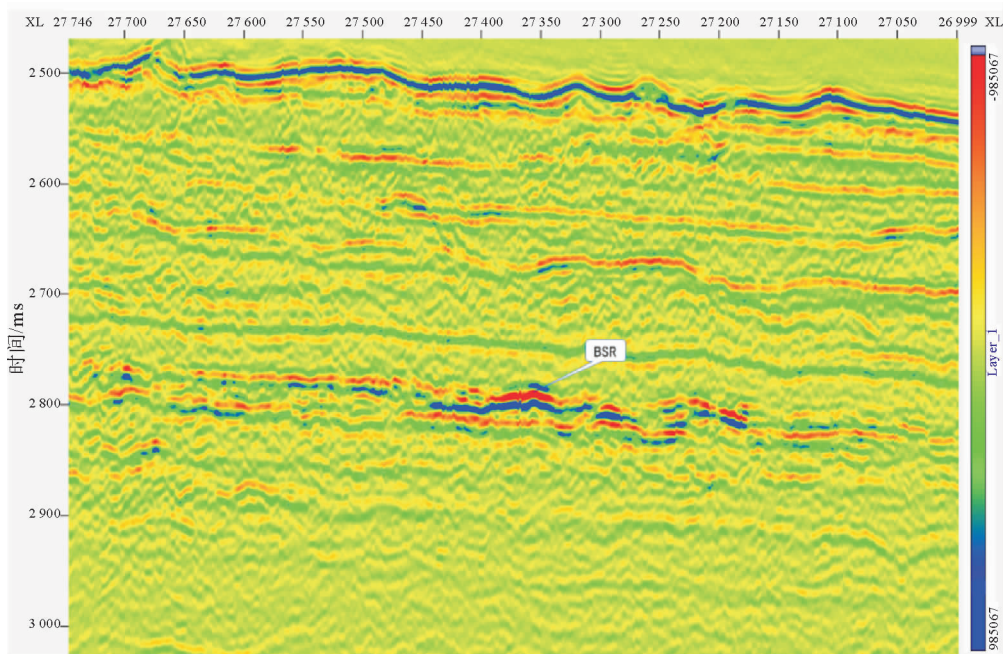


图 7 截距属性剖面

Fig. 7 Intercept of AVO attributes section

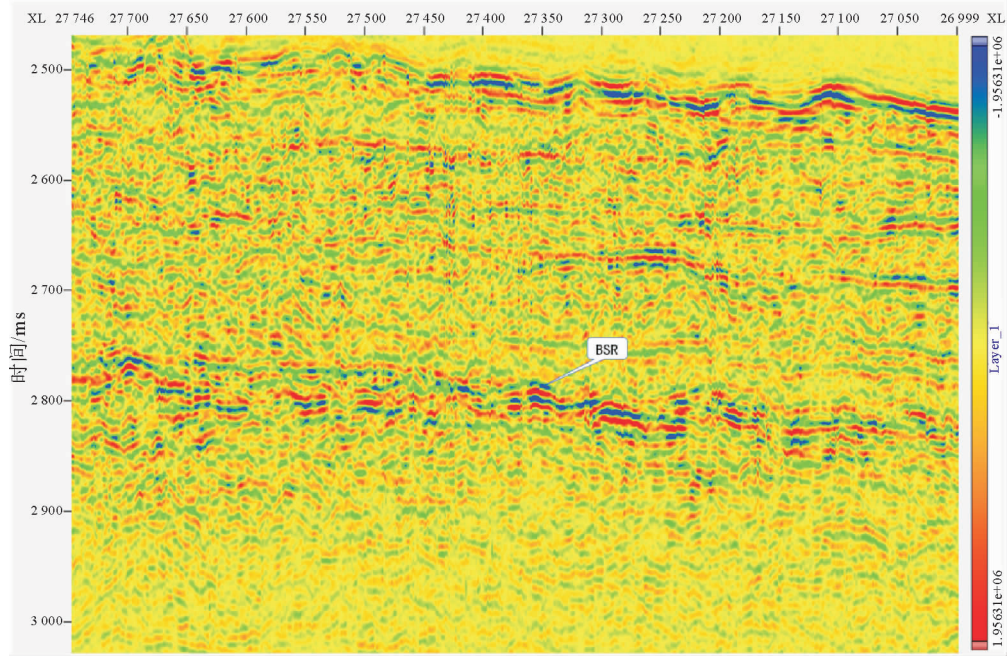


图 8 梯度属性剖面
Fig. 8 Gradient of AVO attributes section

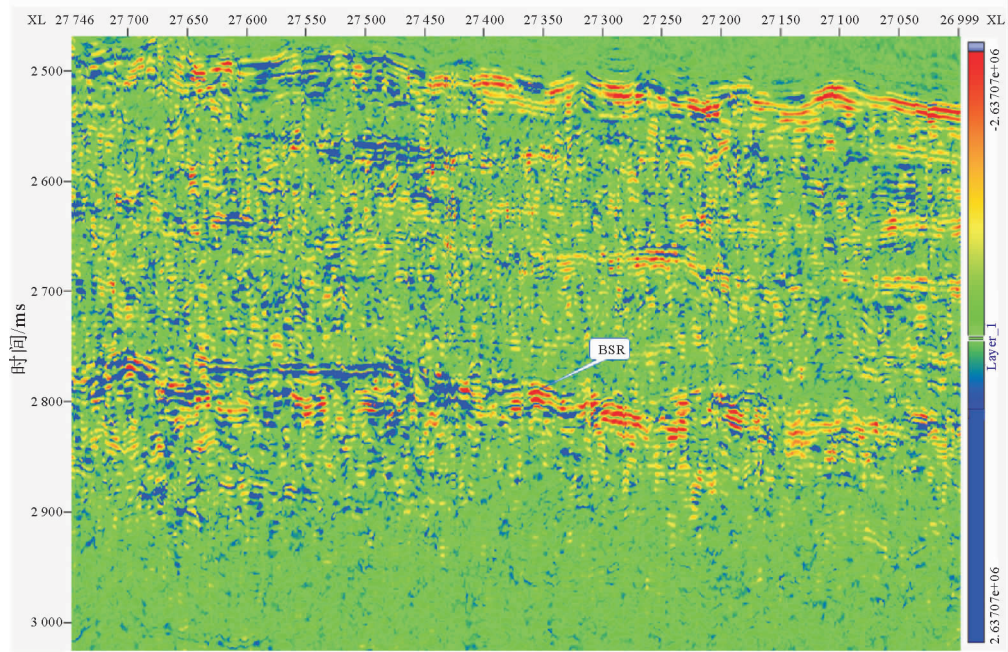


图 9 截距×梯度属性剖面
Fig. 9 Intercept×Gradient of AVO attributes section

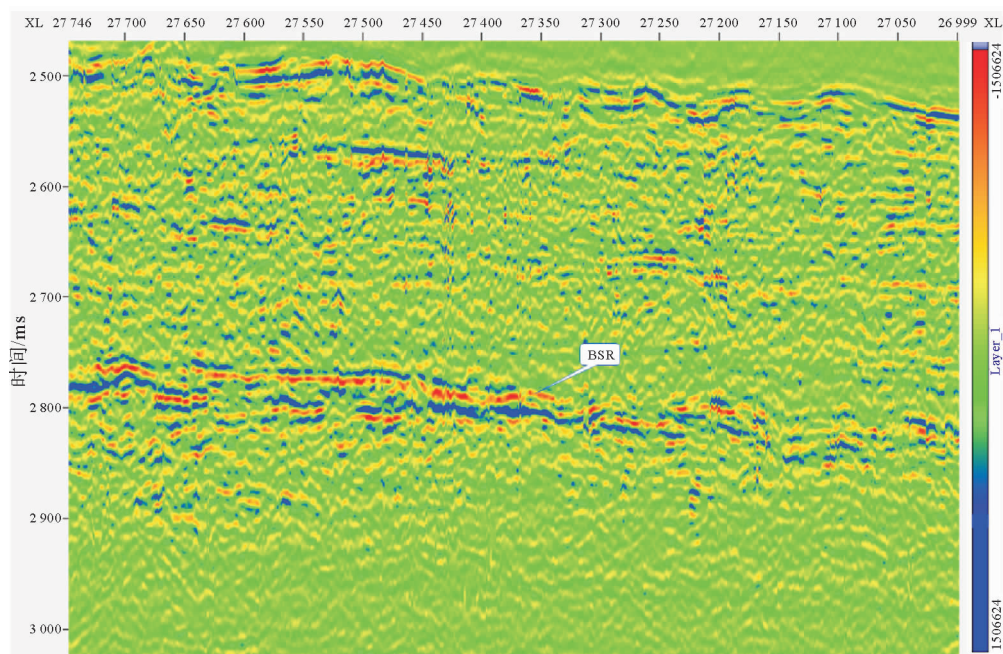


图 10 流体因子属性剖面

Fig. 10 Fluid factor of AVO attributes section

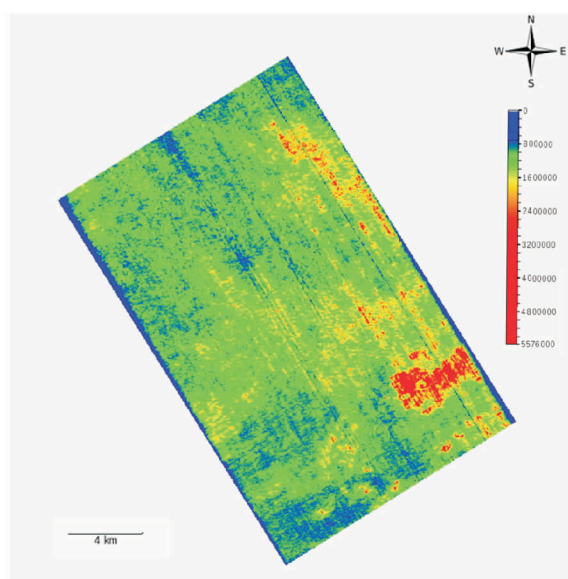


图 11 沿 BSR 层截距×梯度属性平面切片

Fig. 11 The slice of Intercept×Gradient of AVO attributes for BSR

2.4 水合物运聚通道分析

充足的气源供给是天然气水合物成藏的物质基础和前提条件,琼东南海域水合物的气源主要有 2 类,第 1 类是微生物成因甲烷,该类气源主要

来自于上新统一第四系海相泥岩及沉积物;第 2 类是热成因气,经过油气勘探的证实,热成因气主要来自于下渐新统崖城组煤系烃源岩。虽然琼东南海域具有充足的气源条件,但是高饱和度水合物的产出及分布规律和资源规模大小,还要取决于水合物气源运聚供给输导系统类型的优劣及其展布特征。

通常天然气水合物热成因气源的主要运移通道有断裂、底辟和气烟囱等^[21]。首先来分析一下本工区的断裂发育情况,图 12 为该工区一张反映该区断裂发育的典型地震剖面,可以看出该区断裂主要分早、晚 2 期,其中早期构造活动比较强,断裂比较发育,晚期构造活动比较弱,断裂比较少,且活动性较弱,由于这两类断层并未沟通热裂解气和深海区高压低温稳定带地层,深部热裂解气难以通过断裂向浅部运移,热裂解气很难通过断裂给水合物提供气源;其次,从剖面可以看出工区发育疑似泥底辟现象,在其顶部发育微小断裂,推测其可作为热解气向海底浅层运移的通道;另外,该工区还存在明显的河道下切的现象,推测其形成的不整合面可作为天然气水合物浅层生物成因气源的运移通道。

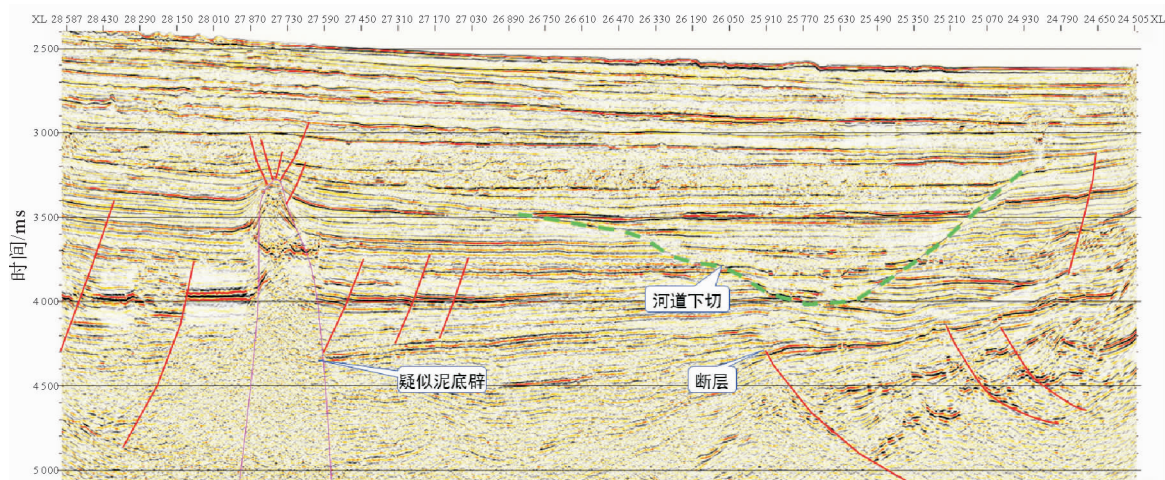


图 12 研究区断层裂隙与疑似泥底辟构成的流体运聚输导系统及其运聚通道特征

Fig. 12 Fluid migration and transport system formed by fault fissure and suspected mud diapir of the study area and its characteristics of migration and accumulation channels

3 结论

通过对不同地层模型下天然气水合物 AVO 属性的正演模拟分析,获得了天然气水合物 AVO 属性的响应特征,认识到当天然气水合物饱和度不同时,其 BSR 处 AVO 属性特征也不同。当天然气水合物饱和度较高时,BSR 处的 AVO 属性受天然气水合物影响较大,其特征为:截距为负值,梯度为正值,截距 \times 梯度属性为负值,流体因子为负值;当饱和度较低时,BSR 处的 AVO 属性受游离气的影响较大,其 AVO 属性特征为:截距为负值,梯度为负值,截距 \times 梯度属性为正值,流体因子为负值且幅值较大。

根据正演分析的结果,对琼东南海域的地震资料进行了天然气水合物 AVO 异常属性分析,认为该区天然气水合物 AVO 属性异常主要表现为较强的负截距值、正梯度值、较强的截距 \times 梯度负值以及较高的负流体因子等特征,具有高饱和度天然气水合物的 AVO 属性特征,同时该区也具备底辟、不整合等形成天然气水合物的气源运聚条件,因此,该区具有较大的勘探潜力。

参考文献:

- [1] 张光学,张明,杨胜雄,等.海洋天然气水合物地震检测技术及其应用[J].海洋地质与第四纪地质,2011,31(4):51-58.
- [2] 苏正,曹运诚,杨睿,等.南海北部神狐海域天然气水合物成藏模式研究[J].地球物理学报,2014,57(5):1664-1674.
- [3] 勾丽敏,张金华,王嘉玮.海洋天然气水合物地震识别方法研究进展[J].地球物理学进展,2017,32(6):2626-2635.
- [4] 徐华宁,陆敬安,梁金强.珠江口盆地东部海域近海底天然气水合物地震识别及地质成因[J].地质前缘,2017,24(4):57-65.
- [5] 徐云霞,文鹏飞,张如伟,等.无井波阻抗反演在西沙水合物研究中的应用[J].CT理论与应用研究,2017,26(4):425-434.
- [6] 薛花,张宝金,徐云霞,等.波阻抗反演在琼东南海域水合物检测中的应用[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(2):173-180.
- [7] 梁劲,梁金强,王宏斌,等.AVO属性分析在天然气水合物地震解释中的应用[J].物探化探计算技术,2008(1):22-26,89.
- [8] 吴志强,陈建文,龚建明,等.AVO技术在水合物勘探中的应用[J].海洋地质动态,2004,20(6):31-35.
- [9] 宋海斌,Osamu M,杨胜雄,等.含天然气水合物沉积物的岩石物性模型与似海底反射层的AVA特征[J].地球物理学报,2002,45(4):546-556.
- [10] 刘洁,张建中,孙运宝,等.南海神狐海域天然气水合物储层参数测井评价[J].天然气地球科学,2017,28(1):164-172.
- [11] 陈建阳,张志杰,于兴河.AVO技术在水合物研究中的应用及应注意的问题[J].天然气地球科学,2005,16(1):123-126.
- [12] 宋建国,王艳香,乔玉雷,等.AVO技术进展[J].地球物理学进展,2008,23(2):508-514.
- [13] 梁劲,王明君,陆敬安,等.南海北部神狐海域含天然气

- 水合物沉积层的速度特征[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 29-35.
- [14] 郭依群, 杨胜雄, 梁金强, 等. 南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物分布特征[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 24-31.
- [15] 何家雄, 苏丕波, 卢振权, 等. 南海北部琼东南盆地天然气水合物气源及运聚成藏模式预测[J]. 天然气工业, 2015, 35(8): 19-29.
- [16] 谢玉洪. 南海北部自营深水天然气勘探重大突破及其启示[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 1-8.
- [17] 王静丽, 梁金强, 沙志彬, 等. 南海北部琼东南海域气烟囱发育特征及其对水合物形成与分布的影响[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(3): 1-6.
- [18] 刘平, 李绪深, 唐圣明, 等. 琼东南盆地南部隆起带天然气水合物赋存特征分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2017, 37(1): 73-78.
- [19] 孙春岩, 章明显, 牛滨华, 等. 天然气水合物地震似海底反射现象 AVO 正演模型研究[J]. 现代地质, 2003, 17(3): 337-344.
- [20] 马在田, 耿建华, 董良国, 等. 海洋天然气水合物的地震识别方法研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(1): 1-8.
- [21] 张光学, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海东北部陆坡天然气水合物藏特征[J]. 天然气工业, 2014, 34(11): 1-10.

APPLICATION OF AVO INVERSION TO GAS HYDRATES IDENTIFICATION TO THE QIONGDONGNAN AREA, NORTHERN SOUTH CHINA SEA

MENG Dajiang, WEN Pengfei, ZHANG Xudong

(Key Laboratory of Marine Mineral Resources, MNR, Guangzhou 510075, China;
Guangzhou marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510075, China)

Abstract: AVO inversion technique was applied to identification of gas hydrate in the Qiongdongnan area, Northern South China Sea. First, the AVO attributes of gas hydrate and free gas under different stratigraphic models are simulated and analyzed. Results show that the AVO attributes characteristics of gas hydrate change with saturation. When the gas hydrate saturation is high, the AVO attributes will be characterized by negative intercept, positive gradient, negative intercept x gradient, and the negative fluid factor. When the saturation is low, however, there will be negative intercept, negative gradient, positive intercept x gradient, negative fluid factor and larger amplitude. Therefore, according to the results of forward analysis, the seismic data of the Qiongdongnan sea area are processed by AVO attributes, and upon the basis, the characteristics of AVO attributes for high saturation hydrate in this area are identified. It proves that the method has big potential in gas hydrate exploration.

Key words: gas hydrates; AVO inversion; sensitive attributes of gas hydrates; deep water area of Qiongdongnan Basin