研究论文 · Linn ARTICLE

南海北部荔湾 3 区块天然气水合物分布特征及目标识别

李 杰^{1,2},何 敏^{1,2},颜承志^{1,2},李元平^{1,2},张俊斌^{1,2},钱 进³,靳佳澎^{3,4}, 李 方^{1,2}

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518054; 2. 中海石油深海开发有限公司, 广东 深圳 518054; 3. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对天然气水合物钻探与取样难以解决的水合物矿体空间展布等问题,利用白云-荔湾凹陷高 密度分析重新处理的三维地震资料,首先基于模糊数学的多属性融合技术对水合物分布进行刻画;再 通过高分辨率速度场对浅层开展高分辨率宽频无井反演技术,提高了水合物层分辨率;最后,利用岩 石物理方法及多种模型对水合物饱和度进行定量预测,实现了对 5~6 m 厚水合物层的有效辨别,进而 形成了一套适合于孔隙充填型的水合物矿藏目标识别评方法。结果表明:应用该技术可有效对荔湾 3 水合物富集区第四条带水合物空间刻画,揭示出该区水合物饱和度最高可超 40%,同时薄层与厚层水 合物具有明显互层分布特征,在水合物矿体刻画及饱和度预测基础上,进一步对该区实施了井位优选, 该方法预测的水合物层与实际钻探 H1 和 H2 站位吻合较好。这些结果说明常规三维油气地震数据在经 过宽频处理后可应用于高分辨率水合物勘探,节约经济成本,同时提高了常规地震在水合物勘探中精 度与实用性。

关键词: 天然气水合物; 多属性融合; 宽频反演; 水合物饱和度 中图分类号: P618.13 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)05-0081-09 DOI: 10.11759/hykx20190424001

天然气水合物广泛分布于大陆边缘的多个盆地,是 一种清洁高效的未来能源得到世界各国高度重视[14]。 2007-2017 年,我国在南海北部进行了多个水合物 取样、钻探,并开展了试验开采工作^[5-8]。中海石 油(中国)有限公司利用常规油气采集地震资料,对 南海北部白云-荔湾凹陷水合物进行了区域普查,发 现了 25 个水合物潜在区。地震属性是刻画水合物空 间分布的重要方法, 前人研究发现振幅类属性对地 层含水合物后异常较为敏感。振幅属性显示荔湾 3 水合物富集区第三条带SC-02井和W19井附近水合物 矿体呈马蹄形展布, 而 W18 井为块状展布^[9]。国际上 多个海域使用地震属性研究水合物分布,例如韩国郁 凌盆地、日本南海海槽及美国墨西哥湾等地区[10-12]。 大量研究发现荔湾3区块的第四条带是水合物试验 开采的潜力区,水合物具有层状特征,但是水合物 矿体在空间上呈不均分布,精细刻画该区域水合物 分布特征的研究还较少。2017年,水合物被确立为 一种新的矿种,因此,如何进行天然气水合物矿藏 目标的精细识别与评价技术,是水合物勘探开发亟 待解决的关键问题。本文通过对均方根振幅、相对

阻抗、振幅包络、视极性、三类 AVO 厚度和纵波阻 抗等属性进行融合、权重计算,获得水合物平面分布 概率。基于宽频无井反演声波阻抗,结合岩石物理模 型定量估算水合物饱和度,形成一套水合物钻前高 分辨率地震勘探技术,并对矿体展布特征分析。

1 研究背景

近年来,南海北部陆坡特别是神狐海域已经进行了多个天然气水合物钻探航次,神狐海域水合物钻探反位于珠江口盆地一系列海底峡谷的脊部,水 深范围在 500~1 500 m。该海域水合物主要以孔隙充 填型状态赋存,厚度从几米至七十多米不等^[8],在平 面上呈条带状展布特征。图1为研究区水合物站位分

收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-05-26

基金项目: "十三五"国家重点研发计划项目(2016YFC0304007);国家 高技术研究发展计划(863 计划)(2013AA092601)

[[]Foundation: Thirteenth National Key R&D Program of China, No.2016YFC0304007; National High-Tech R&D Program of China (863 Program), No.2013AA092601]

作者简介: 李杰(1986-),河北石家庄人,工程师,主要从事天然气水 合物勘探研究相关工作, E-mail: lijie51@cnooc.com.cn



布。其中第一条带和第二条带为GMGS1航次钻探区, 而第三条带和第四条带主要为GMGS3航次钻探区, GMGS3航次钻探揭示荔湾3的第四条带水合物呈厚 层状、相对高饱和度分布特征,在W11井水合物层厚 度大于70m,最高饱和度超过40%^[13-14]。而第三条带 上水合物分布范围大(图1),在W18井和W19井水合 物层厚度为14~28m,局部水合物层饱和度最高达到 70%以上^[8-9,15]。因此,不同条带水合物矿体展布特征 存在较大差异。最近研究发现在第四条带的W17井 地震剖面上发现双BSR,结合测井、气体组分及保压 取心等数据揭示该地区水合物在甲烷稳定带底界 (I-BSR)下部也发育,即存在 II 型天然气水合物、游离 气和水在沉积层孔隙中呈三相共存现象^[13]。利用激光 拉曼对第三条带 SC-01 井水合物样品测试也显示 I 型 水合物层与 II 型水合物层共存现象^[16]。因此,该区域 水合物呈多类型的分布,其岩性主要为泥质粉砂储 层。从两个条带 5 个站位取心样品的烃气体组分数据 看,热成因气对水合物成藏具有明显贡献作用。尽管 国际上发现的高饱和度水合物主要发育于与水道-天 然堤体系相关的砂质储层中^[10-11],但是神狐海域高饱 和度水合物主要富集于黏土质粉砂沉积物中^[17],相 对高饱和度水合物与富有孔虫等相对较粗岩性有关。



图 1 南海北部神狐海域三维地震解释的水深及水合物钻井位置

2 材料与方法

2.1 地震属性优选及权重计算

地震属性在储层或流体性质变化导致的响应特征比地震振幅敏感,利用多种地震属性可以进一步判定水合物的空间分布及赋存方式,实现区域分布的精确识别与刻画。结合该区域的测井及钻探成果,对多属性进行优化筛选后,提出了 6 种对水合物比较敏感的属性,分别是均方根振幅(RMS)、相对阻抗、振幅包络、视极性、振幅相对偏移距(AVO)厚度和纵波阻抗。

由于6种平面图属性数量级差别很大,不能简单 地进行融合叠加,需要多种属性进行归一化,归一 化的平面图表示综合属性预测的含水合物分布概率 图。为确定各个属性对识别水合物分布的重要性,本次研究采用层次分析法来确定各属性的权重系数,利用 Saaty^[18]提出的定量化 1—9标度法进行求取,含义如表1所示,即通过各属性间相互比较各要素相对于其上一层次要素的重要程度。

2.2 宽频无井反演技术

宽频地震反演是基于已有站位岩石物理分析, 利用高精度深度偏移速度场建立低频模型,然后在 时深转换后时间域宽频处理地震数据的基础上,采 用稀疏脉冲算法进行纵波阻抗反演,从而对天然气 水合物矿体进行精细描述刻画^[19-21],其关键技术流 程如图 2 所示。

Fig. 1 The interpreted water depth of seafloor from three dimensional seismic data and the drilling sites of gas hydrate in Shenhu area, the northern South China Sea

表1 标度法标度

Tab. 1 Method of nine marks

标度	标度含义
1	表示两个因素相比,具有相同重要性。
2	重要性处于1和3之间。
3	表示两个因素相比,一个比另一个稍微重要。
4	重要性处于3和5之间。
5	表示两个因素相比,一个比另一个明显重要。
6	重要性处于5和7之间。
7	表示两个因素相比,一个比另一个强烈重要。
8	重要性处于7和9之间。
9	表示两个因素相比,一个比另一个极其重要。
倒数	因素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 比较得到的判断 w _{ij} ,则因素 <i>j</i> 与 <i>i</i> 比
	较得到的判断 w _{ii} =1/w _{ii} 。



图 2 宽频地震反演技术流程

Fig. 2 The schematic flowchart of broadband seismic inversion

2.3 水合物饱和度定量预测技术

通过声波速度对水合物饱和度进行预测是水合 物地球物理研究的重要方向,计算方法主要有两类:

Tab. 2	Attribute weight val	ues obtained by anal	ytic hierarchy process
--------	----------------------	----------------------	------------------------

一类是经验公式,包括时间平均方程、伍德方程、李 权重方程等;还有一类是理论模型,包括等效介质 理论方程、K-T方程、BGTL理论^[22-26]。两类方法各 有长短,前者缺乏严密的理论依据,但简单实用,后 者理论比较严密,但涉及计算的参数过多,参数的 取值比较关键。本文主要基于荔湾3区块,用3种经 验公式对水合物饱和度预测进行详细介绍并对预测 结果分析比较。

3 结果

3.1 地震属性权重分析

在地震数据中似海底反射(bottom simulating reflector, BSR)是天然气水合物的重要识别标志之一, 因此,通过拾取地震剖面的 BSR 可以刻画水合物分 布范围。但是 BSR 常常指示的是水合物和下部游离 气或水的综合响应,无法判断温压稳定带附近水合 物和游离气的量,也无法指示温压稳定带之上低饱 和度孔隙型、块状或者脉状等类型水合物的赋存。 类似地,国内钻探结果也显示 BSR 与水合物发育无 严格对应关系,需要从地震数据中提取更多的信息 来综合判断水合物的富集区域^[20-27]。

荔湾3区块的第一和第二个条带上GMGS1航次 钻探了8个站位(图1),其中SH2、SH3和SH7三口 取到了水合物样品,其他5口井没有取到水合物样 品,但测井数据分析认为SH4井可能含有薄层的水 合物^[28]。本文采用其他7口井的钻探结果对含水合 物地层的属性在权重计算基础上进行分析标定,通 过前面各个属性对已钻井的预测精度分析,得到判 断矩阵如表2所示。

其中判断矩阵的最大特征值 λ_{max}=6.017 5, 一致 性指标 CI=0.002 8≪0.1, 所以认为矩阵具有满意的 一致性。矩阵分析表明 AVO 厚度属性在水合物层识 别刻画中所占权重最大, 相对阻抗属性次之。

	RMS	相对阻抗	振幅包络	视极性	AVO 厚度	纵波阻抗	权重
RMS	1	1/2	1	1	1/3	2	0.118 6
相对阻抗	2	1	2	2	1/2	3	0.216 5
振幅包络	1	1/2	1	1	1/3	2	0.118 6
视极性	1	1/2	1	1	1/3	2	0.118 6
AVO 厚度	3	2	3	3	1	5	0.363 2
纵波阻抗	1/2	1/3	1/2	1/2	1/5	1	0.064 3

3.2 多属性融合的水合物分布刻画

利用各个属性的权重对 6 种属性分析结果,在 研究区的 4 个条带进行平面融合,得到 6 种归一化后 的水合物分布概率平面图(图 3)。从图 3 中可以看出, 取得水合物样品站位水合物的分布概率都大于 0.7。 GMGS1 航次站位东侧可识别两个水合物富集条带, 即第三、四条带,水合物的分布概率和分布面积都比 GMGS1 钻探区的两个条带要分布范围大,与 GMGS3 航次钻探结果显示的这两个条带发育高饱和度水合 物矿体一致^[8]。



Fig. 3 Probability map of hydrate distribution in LW3 area

3.3 宽频无井反演

钻探揭示荔湾3地区发育孔隙充填型水合物,但 是水合物饱和度、厚度在空间上分布极不均匀,不同 井的水合物饱和度不同,水合物层厚度也差异较大^[8]。 采用井插值建立的低频模型的常规反演难以反映水 合物矿体快速的空间变化,因此本文基于宽频无井 波阻抗反演刻画水合物矿体空间展布。

3.3.1 低频模型

基于高精度深度偏移速度场建立的低频模型频 率,其频率最低可达 3~4 Hz,宽频地震数据体的低频 成分最低可达 4~5 Hz, 二者在频率域上无缝拼接(图 4), 从而保证反演结果低频部分不缺失,与常规井插值建 立的低频模型相比,该研究采用低频模型的反演更加 客观,减少了由于水合物非均质性较强导致的误差。

3.3.2 宽频无井反演结果

地震及反演剖面使用的均为时间域数据,其横 坐标 CDP 是共反射点道集,每道之间距离为 12.5 m。 如图 5a 和图 5b 地震剖面结合 W11 井测井曲线^[14],



Fig. 4 The frequency of conventional inversion (a) and broadband seismic inversion (b)

高密度分析处理地震剖面,较常规油气地震数据浅 部地层分辨率更高,有利于水合物薄层的识别。与常 规反演的波阻抗相比,宽频波阻抗反演结果可以更 好地刻画水合物的空间展布特征,主要体现在其刻 画含水合物地层分辨率更高,宽频阻抗反演结果显 示水合物层内部出现多套高阻抗薄层,呈现若干薄 层状高阻抗与相对低阻抗层互层的特征,最薄高阻 抗地层分辨精度可以达到 5~6 m,其横向延伸性更 好,说明宽频阻抗反演结果更加真实(图 5c 和图 5d)。

3.4 水合物饱和度定量预测

3.4.1 基于速度的饱和度预测

通过声波速度对水合物饱和度进行预测是水合物地球物理研究的重要方向,计算方法主要有两类: 一类是经验公式,包括时间平均方程、伍德方程、李 权重方程等;还有一类是理论模型,包括等效介质 理论方程、K-T方程、BGTL理论^[29-33]。两类方法各 有长短,前者缺乏严密的理论依据,但简单实用,后 者理论比较严密,但涉及计算的参数过多,参数的 取值比较关键。本文主要基于荔湾3区块,利用3种 经验公式对水合物饱和度进行预测和分析比较。

1) 时间平均方程

时间平均方程是指改进的威利方程,适用于固结、含少量流体的岩石模型,刚度较大或胶结度好的 孔隙流体介质。在水合物研究中,使用的时间平均方 程通常是皮尔森(Pearson)给出的三相介质方程,即:



图 5 过 W11 井常规地震剖面与反演阻抗剖面 Fig. 5 Seismic section and inversion results through Site W11 a: 常规处理地震剖面; b: 高密度分析地震剖面; c: 常规波阻抗反演结果; d: 宽频波阻抗反演结果

$$\frac{1}{V_{\rm p}} = \frac{\phi(1-S)}{V_{\rm w}} + \frac{\phi S}{V_{\rm h}} + \frac{1-\phi}{V_{\rm m}},\tag{1}$$

V_p是含水合物沉积介质的纵波速度; φ为岩心孔隙度; S 指水合物饱和度(水合物占孔隙的体积分数)。V_w、

*V*_h、*V*_m分别为水、纯水合物和岩石基质的纵波速度。2)伍德方程

伍德方程通常适用于饱和度较大的悬浮状态的 颗粒。含水合物的伍德方程为:

$$\frac{1}{\rho V_{\rm p}^2} = \frac{\phi(1-S_{\rm h})}{\rho_{\rm w} v_{\rm w}^2} + \frac{\phi S_{\rm h}}{\rho_{\rm h} v_{\rm h}^2} + \frac{1-\phi}{\rho_{\rm m} v_{\rm m}^2},$$
(2)

$$\rho = (1 - \phi)\rho_{\rm m} + (1 - S_{\rm h})\phi\rho_{\rm w} + S_{\rm h}\phi\rho_{\rm h} \,. \tag{3}$$

Kumar 等认为, 式中孔隙度的取值 ϕ 应为除去 水合物的孔隙部分, 这时水合物作为一个固体岩石 的一部分。第一个式子中 ϕ 如下, 其中 ϕ_0 为岩石不 含水合物时的孔隙度:

$$\phi = \phi_0 \left(1 - S_h \right) \,. \tag{4}$$

3) 李权重方程

伍德方程和时间平均方程分别对应不同条件下 的饱和度计算,李权重方程把伍德方程和时间平均 方程加权到一起,用调节权重因子 W 和常数 n 来适应实际情况。其方程如下:

$$\frac{1}{V_{\rm p}} = \frac{W\phi(1-S_{\rm h})^n}{V_{\rm p_1}} + \frac{1-W\phi(1-S_{\rm h})^n}{V_{\rm p_2}},\qquad(5)$$

 V_p 为李权重方程计算的沉积介质纵波速度; V_{p1} 是 由伍德方程计算得到的纵波速度; V_{p2} 是通过时间 平均方程得到的纵波速度; W 为权重因子; n 是与水 合物饱和度相关的常数; S_h 为孔隙中天然气水合物 的饱和度。Nobes^[34]等指出, 当 W>1时, 公式倾向于 伍德方程; 当 W<1时, 公式更倾向于时间平均方程; 当孔隙度降低时, S_h 比较高时, 公式趋近于时间平均 方程。

3.4.2 水合物饱和度预测方法对比

为了寻找适用于荔湾3目标区水合物饱和度预测 方法,利用研究区已发表的W11测井解释结果及已 有的岩石物性参数^[9-10,26],分别采用时间平均方程、 伍德方程和李权重方程计算地层的速度,再与实测 纵波速度V_p进行对比(图6),从图中可以看出,3种方 法计算的速度与实测速度变化趋势是一致的,但时 间平均方程计算的速度与测井速度 V_p数值相差较大, 数值整体较实测数据高 600 m/s 左右,伍德方程计算 的速度在水合物层段偏小,比实测纵波速度整体偏 低大约 250 m/s,因而只有李权重方程可以较好的模 拟水合物赋存对速度的影响。

3.5 水合物饱和度宽频反演

利用宽频无井反演的波阻抗数据,结合岩石物 理交汇分析和李权重方程,针对水合物稳定带底界 上部荔湾3区的第四条带开展了水合物饱和度定量 预测(图7)。结果显示该条带水合物饱和度最高可以 达到40%以上,水合物层最厚位置可以达到50ms 以上,且宽频无井反演能使识别厚度5ms的水合物 层。水合物层主要分布于水合物稳定带底界上部,且 呈倾斜状与水合物稳定带底界相切,成层状分布, 由厚度不一的高饱和度和低饱和度水合物层互层组 成(图7)。







4 讨论

利用多属性融合和宽频无井波阻抗反演,我们 对荔湾 3 区块的第四条带水合物矿体进行精细识别 及评价,优选了两口取心站位(H1和H2)(图1),对比 两口实测钻井数据与反演剖面可对本文技术及结果 进行质量控制。2015年及2017年,中海石油(中国) 有限公司分别在 H1 及 H2 两个站位完成了钻测井等 工作,取到了较高饱和度的充填在孔隙空间的水合 物,通过一系列现场甲板测试及点火实验,证实了 水合物的存在。在H2站位从上到下识别出5套水合 物层, 而 H1 识别出 4 套水合物层, 缺少第二套水合 物层。基于宽频阻抗数据反演饱和度剖面显示第二套 水合物层在H2到H1站位之间发生尖灭, 与测井结果 一致。另外两个站位实测饱和度数据与饱和度反演剖 面预测的饱和度值变化趋势一致,表明实测钻井数据 与预测的水合物分布吻合较好, 饱和度剖面上可以清 晰识别 6 m 的水合物薄层, 分辨率较高(图 8)。从反演 饱和度结果看, 该区域水合物饱和度最高在 40%以上, 主要分布于水合物稳定带底界上部。

5 结论

本文以基于模糊数学的多属性融合技术形成了 大区搜索水合物的技术。针对常规波阻抗反演技术 在识别刻画水合物层中的缺陷,提出采用高精度速 度建立低频模型的宽频无井波阻抗反演技术,提高 反演结果对水合物层预测精度。再分析多种经验公 式的水合物饱和度定量计算方法后,提出李权重方 程在模拟水合物赋存对地震速度影响中效果最好, 利用该方法能够使水合物薄层分辨率达 5~6 m。利用



Fig. 7 The gas hydrate saturation section in LW3 area

海洋科学 / 2019年 / 第43卷 / 第5期



图 8 水合物饱和度剖面与测井解释对比 Fig. 8 Comparison between hydrate saturation section and well logging interpretation

该技术进行钻前水合物展布及饱和度评价结果与实际钻探 H1 和 H2 站位相吻合。荔湾 3 研究区水合物 在第三、第四条带比第一和第二条带水合物分布面 积、赋存概率及矿体饱和度都更好。从第四条带的 水合物矿体空间刻画看,水合物层倾斜与水合物稳 定带底界相切,呈高饱和度和相对低饱和度水合物 层互层的特征,水合物饱和度最高达 40%以上且分 布于水合物稳定带底界上部。

参考文献:

- Schmuck E A, Paull C K. Evidence for gas accumulation associated with diapirism and gas hydrates at the head of the Cape Fear Slide[J]. Geo-Marine Letters, 1993, 13(3): 145-152.
- [2] Milkov A V, Sassen R. Estimate of gas hydrate resource, northwestern Gulf of Mexico continental slope[J]. Marine Geology, 2001, 179: 71-83.
- [3] Ergov A V, Crane K, Vogt P R, et al. Gas hydrates that outcrop on the sea floor: stability models[J]. Geo-Marine Letters, 1999, 19: 68-75.
- [4] Chong Z R, Yang S H B, Babu P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1633-1652.
- [5] Zhang Haiqi, Yang Shengxiong, Wu Nengyou, et al. Successful and surprising results for China first gas hydrate drilling expedition[J]. Fire in the Ice, 2007, 7(3): 6-9.
- [6] Yang Shengxiong, Zhang Ming, Liang Jinqiang, et al. Preliminary results of china's third gas hydrate drilling expedition: a critical step from discovery to development in the South China Sea[J]. Fire in the Ice, 2015, 15(2): 1-5.
- [7] Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, Lei Yong, et al. GMGS4 gas hydrate drilling expedition in the South China Sea[J]. Fire in the Ice, 2017, 17(1): 7-11.
- [8] 杨胜雄,梁金强,陆敬安,等.南海北部神狐海域天

然气水合物成藏特征及主控因素新认识[J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 1-14.

Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, Lu Jing'an, et al. New understandings on the characteristics and controlling factors of gas hydrate reservoirs in the Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 1-14.

- [9] 靳佳澎, 王秀娟, 陈端新, 等. 基于测井与地震多属 性分析神狐海域天然气水合物分布特征[J]. 海洋地 质与第四纪地质, 2017, 37(5): 122-130. Jin Jiapeng, Wang Xiujuan, Chen Duanxin, et al. Distribution of gas hydrate in Shenhu area: Indentified with well log and seismic multi-attributes[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2017, 37(5): 122-130.
- [10] Boswell R, Collett T S, Frye M, et al. Subsurface gas hydrates in the northern gulf of mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 34: 4-30.
- [11] Fujii T, Saeki T, Kobayashi T, et al. Resource assessment of methane hydrate by applying a probabilistic approach in the eastern Nankai Trough, Japan[J]. Journal of Geography, 2009, 118(5): 814-834.
- [12] Mohammed F, Wang J Y, Jinmo K. Seismic attributes and acoustic impedance inversion in interpretation of complex hydrocarbon reservoirs[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 114: 69-80.
- [13] Qian Jin, Wang Xiujuan, Collett T S, et al. Downhole log evidence for the coexistence of structure II gas hydrate and free gas below the bottom simulating reflector in the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 98: 662-674.
- [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): 1-8.
 Guo Yiqun, Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, et al. Characteristics of high gas hydrate distribution in the

Characteristics of high gas hydrate distribution in the Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 1-8.

[15] Zhang Wei, Liang Jinqiang, Lu Jinan, et al. Accumula-



tion features and mechanisms of high saturation natural gas hydrate in Shenhu Area, northern South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 708-719.

- [16] Wei Jiangong, Fang Yunxin, Lu Hailong, et al. Distribution and characteristics of natural gas hydrates in the Shenhu Sea Area, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 98: 622-628.
- [17] 陈芳,周洋,苏新,等.南海神狐海域含水合物层粒度变化及与水合物饱和度的关系[J].海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(5): 95-100.
 Chen Fang, Zhou Yang, Su Xin, et al. Gas hydrate saturation and its relation with grain size of the hydrate-bearing sediments in the Shenhu area of Northern South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011, 31(5): 95-100.
- [18] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw Hill, 1980.
- [19] 杨睿, 吴能友, 雷新华, 等. 波阻抗反演在南海北部 神狐海域天然气水合物勘探中的应用[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 495-500.
 Yang Rui, Wu Nengyou, Lei Xinhua, et al. Impedance inversion and itsapplication in gas hydrate exploration in Shenhu area, Northern South China Sea[J]. Geoscience, 2010, 24(3): 495-500.
- [20] Hyndman R, Spence G A. Seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors[J]. Geophysics Research, 1992, 97: 6683-6698.
- [21] Katzman R, Holbrook W, Paull C. Combined vertical incidence and wide-angle seismic study of a gas hydrate zone, Blake Ridge[J]. Geophysics Research, 1994, 99: 7975-7995.
- [22] 刘彦君, 刘喜武, 刘大锰, 等. 地球物理技术在天然 气水合物分布区预测中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 566-573.
 Liu Yanjun, Liu Xiwu, Liu Dameng, et al. Applications

of geophysical techniques to gas hydrate prediction[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5): 566-573.

- [23] 沙志彬,梁金强,郑涛,等. 地震属性在天然气水合物预测中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(5): 185-192.
 Sha Zhibin, Liang Jinqiang, Zheng Tao, et al. The application of seismic attributes to the prediction of gas hydrates[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, 33(5): 185-192.
- [24] 梁劲, 王明君, 陆敬安, 等. 南海神狐海域含水合物地 层测井响应特征[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 506-514.
 Liang Jin, Wang Mingjun, Lu Jing'an, et al. Logging response characteristics of gas hydrate formation in Shenhu area of the South China Sea[J]. Geoscience,

2010, 24(3): 506-514.

[25] 许升辉, 邓辉, 阎贫, 等. 台湾西南海域地震数据处 理及天然气水合物地震属性[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1823-1830.

Xu Shenghui, Deng Hui, Yan Pin, et al. Seismic data processing and seismic attributes of gas hydrate offshore southwestern Taiwan[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1823-1830.

[26] 吴志强, 文丽, 童思友, 等. 海域天然气水合物的地 震研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 218-227.

Wu Zhiqiang, Wen Li, Tong Siyou, et al. Advances in seismic researches on natural gas hydrate in ocean[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1823-1830.

- [27] 雷怀彦,郑艳红,吴保祥. 天然气水合物勘探方法 -BSR 适用性探析[J]. 海洋石油, 2002, 22(4): 1-8. Lei Huaiyan, Zheng Yanhong, Wu Baoxiang, et al. Exploratory method of gas hydrate-research of BSR technology[J]. Offshore Oil, 2002, 22(4): 1-8.
- [28] Wang Xiujuan, Hutchinson D R, Wu Shiguo, et al. Elevated gas hydrate saturation within silt and silty clay sediments in the Shenhu area, South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2011, 116(B05102): 1-18.
- [29] 业渝光,张剑,胡高伟,等.天然气水合物饱和度与 声学参数响应关系的实验研究[J]. 地球物理学报, 2008,51(4):1156-1164.
 Ye Yuguang, Zhang Jian, Hu Gaowei, et al. Experimental research on relationship between gas hydrate saturation and acoustic parameters[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(4): 1156-1164.
- [30] 赵洪伟,陈建文,龚建明,等. 天然气水合物饱和度的预测方法[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(3): 22-24.
 Zhao Hongwei, Chen Jianwen, Gong Jianming, et al.
 Prediction method of gas hydrate saturation[J]. Marine Geology Letters, 2004, 20(3): 22-24.
- [31] 孙春岩,章明昱,牛滨华,等. 天然气水合物微观模 式及其速度参数估算方法研究[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 191-198.
 Sun Chunyan, Zhang Mingyu, Niu Binhua, et al. Micromodels of gas hydrate and their velocity estimation methods[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 191-
- [32] Tinivella U, Accaino F. Compressional velocity structure and possions ration in marine sediment with gas hydrate and free gas by inversion of reflected and refracted seismic data(South Shetland Islands, Antarctica)[J]. Marine Geology, 2000, 164: 13-27.
- [33] Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner G H F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media[J]. Geophysics, 1958,

198.



23: 459-493.

[34] Nobes D C, Villinger H, Davis F F, et al. Estimation of marine sediment bulk physical properties at depth from

seafloor geophysical measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B14): 14033-14043.

The distribution and characteristics of gas hydrate in the Liwan3, northern slope of the South China Sea

LI Jie^{1, 2}, HE Min^{1, 2}, YAN Cheng-zhi^{1, 2}, LI Yuan-ping^{1, 2}, ZHANG Jun-bin^{1, 2}, Qian Jin³, JIN Jia-peng^{3, 4}, LI Fang^{1, 2}

(1. CNOOC China Limited, Shenzhen Branch, Shenzhen 518054, China; 2. CNOOC Deepwater Development Ltd., Shenzhen 518054, China; 3. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Apr. 24, 2019

Key words: gas hydrate; multi-attribute analysis; broadband inversion; hydrate saturation

Abstract: Many gas hydrate drilling sites and core samples have indicated that there are various types of natural gas hydrates in the northern slope of the South China Sea. However, the drilling data only shows the distribution of gas hydrate near the borehole location. It is still difficult to know how about the spatial distribution of gas hydrate away the drilled sites. High density analysis was used to reprocess the conventional three dimensional seismic volumes in the Baiyun-Liwan sag. Multi-attribute analysis based on fuzzy mathematics was used to predict the gas hydrate distribution. Then, high-resolution broadband inversion without the well limitation was conducted based on the high-resolution velocity analysis, which increased the resolution of identifying gas hydrate-bearing layers. Finally, several rock physical models were involved to quantitatively predict gas hydrate saturation using the inverted P-wave velocity, which has been used to describe the gas hydrate-bearing layers with a thickness ranging from 5 to 6 m. The method for pore-filling gas hydrate was proposed to identify and evaluate gas hydrate layer in this study. The distribution of gas hydrate at fourth hydrate zone in the Liwan 3 was proved to contain gas hydrate. The maximum value of gas hydrate saturation is over 40%, and that the thin gas hydrate layer is interbedded with thick layer. The actual drilling results at Sites H1 and H2 are in good accordance with the pre-drilling predictions, which has already proved the applicability of our proposed approach.

(本文编辑: 刘珊珊)