

# 海域天然气水合物的地震研究进展

吴志强<sup>1,2</sup>, 文 丽<sup>1,2</sup>, 童思友<sup>1</sup>, 闫桂京<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学, 青岛 266036; 2. 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

**摘 要** 海域天然气水合物的地震研究是在岩石物性分析成果的指导下, 用地震技术进行真假 BSR 的识别和含水合物沉积层物性预测. 海域天然气水合物地震研究的进展主要表现在: 物性分析理论模型由简单模型发展到最大程度模拟实际情况的复杂模型; 地震勘探方法已由常规的单道、多道地震发展到多频地震、高分辨率二维、三维地震和海底多分量地震; 地震资料处理由常规处理发展到突出 BSR 特征的/三高0和叠前时间偏移处理; 从利用速度、振幅结构研究识别天然气水合物发展到 AVO、多属性判别、多弹性参数和多物性参数反演识别天然气水合物、预测其物性参数. 这些新技术、新方法的应用, 加快了海域天然气水合物调查进度, 提高了天然气水合物地球物理识别的可靠性.

**关键词** 天然气水合物, 地震研究, 进展

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)02-0218-10

## Advances in seismic researches on natural gas hydrate in ocean

WU Zhizhiang<sup>1,2</sup>, WEN Li<sup>1,2</sup>, TONG Siyou<sup>1</sup>, YAN Guizhong<sup>2</sup>

(1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

**Abstract** The seismic research on marine gas hydrate has made great development. The main subject is how to identify BSR correctly and predict the Gas Hydrate sediment physical parameters(For example: thickness, porosity, concentration, etc.) On the basis of physical property analysis of marine rocks, seismic method is used to identify true and false BSR and predict physical property of hydrate-bearing sediments for recognition of gas hydrate in sea areas. Recently, great progress has been made in seismic researches on marine gas hydrate, which is showed in the following aspects: (1) for theoretical analysis of physical property, simple model has changed into complex model capable of simulating actual situations to the largest extent; (2) for seismic explorations, seismic methods have gone from conventional single and multi-channel to multi-frequency, high-resolution 2D and 3D and multiple components; (3) for seismic data processing, conventional method has given way to/ three highs0 and pre-stack time offset processing with emphasis on BSR characteristics; and (4) for identification of gas hydrate and prediction of its physical property parameters, researches on velocity and amplitude have been replaced by AVO, multi-attribute discrimination, multi-elastic parameter and multi-property parameter inversions. Thanks to these new techniques and methods, investigations in gas hydrate in sea areas have been greatly striding forward, and reliability of geophysical recognition of gas hydrate has been significantly heightened.

**Keywords** natural gas hydrate, seismic researches, advances

## 0 引 言

海域天然气水合物(简称水合物)地震研究是依据含水合物沉积层及其相邻沉积层的地球物理特征差异, 用地震勘探技术方法进行水合物识别、推测水合物沉积层和含游离气沉积层的分布并预测其储集

层物性和丰度.

由于含水合物沉积层所特有的地球物理特征, 为地震方法技术在海洋水合物研究中的应用提供了可能. 同时地震方法技术以它的高信噪比、高分辨率、高保真度、高可信度和低成本的优势, 在发现海洋水合物的过程中起到了关键的作用, 已成为海洋

水合物研究的重要工具。在海洋水合物地震调查技术中, 除早期的单道地震和常规的多道地震反射技术外, 现用于水合物研究的地震方法技术已包括深海拖曳地震技术<sup>[1]</sup>、高分辨地震技术<sup>[2]</sup>、广角地震反射技术(包括海底三分量地震记录)<sup>[3]</sup>、三维地震勘探技术<sup>[4]</sup>和垂直地震剖面(VSP)<sup>[5]</sup>等等。

地震剖面上的似海底反射波 BSRs (Bottom simulating reflectors) 已成为经钻探证实的海洋水合物存在的地震反射标志。但研究者发现 BSR 与水合物的存在并非一一对应, 虽然已在 BSR 反射处钻探取得了水合物, 但也有 BSR 的反射经钻探证明没有水合物, 同时也出现经钻探发现水合物地带的地震剖面上无 BSR 反射的情况<sup>[6]</sup>。因此从 90 年代开始, 水合物地震识别技术的研究得到了快速发展, 研究者希望采用各种地震处理和反演方法技术识别真假 BSR, 进而预测含水合物沉积层、含游离气沉积层的厚度、孔隙度和饱和度。

相对于相邻沉积层, 含水合物沉积层具有高纵波、横波速度, 高纵横波速度比的地球物理特征, 为地层物性提取的地震处理和反演技术的应用提供了理论依据。目前在石油、天然气地震勘探中应用成熟的岩性处理技术(如垂直入射的振幅分析与数值模拟<sup>[6]</sup>、AVO<sup>[7]</sup>反演分析、速度分析<sup>[8]</sup>、旅行时反演(层析成像)<sup>[9]</sup>、波形反演<sup>[10,11]</sup>、宽带约束反演<sup>[12]</sup>、衰减结构分析<sup>[13]</sup>弹性波阻抗反演<sup>[14]</sup>、多属性分析判别<sup>[15]</sup>和海底多分量地震<sup>[16]</sup>等技术方法, 都已应用到水合物地震识别中。研究者均期望在基于岩石物性的分析的基础上, 利用这些技术方法来分析 BSR 成因及其与水合物、游离气的相互关系、求取水合物和游离气的丰度和分布。

## 1 含水合物沉积层物理性质研究

利用地震技术进行水合物识别的前提是必须查清水合物沉积层及其相邻沉积层的地球物理特征(如纵波速度、横波速度和泊松比等), 水合物岩石物理性质研究是水合物地震研究基础, 对此进行了大量的研究工作, 几乎所有的水合物地震研究的文献均会以一定的篇幅阐述水合物沉积层、含游离气沉积层的岩石地球物理特征<sup>[17]</sup>。

含天然气水合物沉积物物理理论计算的最大困难是, 水合物在疏松沉积物中以多种形式存在, 如分散状、透镜状、层状、块状等。在沉积物的孔隙中, 水合物与沉积物颗粒可能紧密接触, 也可能没有接触, 也可能接触得不紧密。天然气水合物在沉积物中的

分布形式, 直接影响沉积物的物理性质, 会产生不同的声波速度<sup>[8]</sup>。因此, 研究者在进行水合物物理理论计算时, 都要先对水合物的赋存方式进行研究。

Ecker<sup>[18]</sup>假设天然气水合物在孔隙空间中以悬浮、半悬浮(或颗粒接触)和胶结三种形式出现, 即三种岩石物理模型(图 1)。在模型 A 中, 水合物悬浮于孔隙水中, 它只对孔隙流体的体积模量有影响; 在模型 B 中, 水合物成为骨架的一部分, 导致有效孔隙度和沉积物刚度减小; 在模型 C 中, 水合物与沉积物胶结良好, 使得有效孔隙度明显减小, 且沉积物刚度发生明显改变。

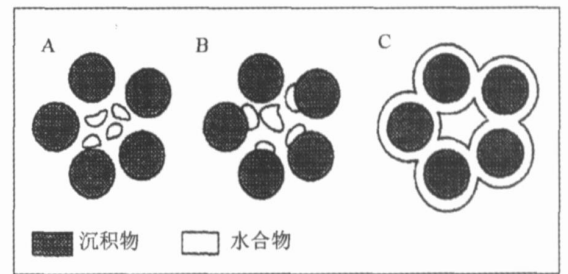


图 1 Ecker 的水合物微观模型(1998)

Fig. 1 The gas hydrate microcosmic model by Ecker(1998)

Jianchun Dai<sup>[8]</sup>等总结了六种水合物模型(图 2)。模型 1 假设水合物作为胶结颗粒随机地充填在沉积颗粒的接触点上, 模型 2 假设水合物是围绕着沉积颗粒生成的(Dvorkin 和 Nur, 1996); 依据这两种模型推断, 沉积物中只要含少量的水合物或随水合物饱和度的增加, 都会造成沉积物速度的剧烈增加。

许多研究者认为, 沉积在孔隙空间内的水合物有两种机理: a、水合物可以胶结颗粒, 是小颗粒骨架中最弱的一种结构成分, 在这种情况下水合物类似于成岩胶结物, 增加了沉积物的刚度(模型 3); b、水合物沉积远离颗粒接触处聚集(模型 4), 这种情况对小颗粒影响弱, 或根本无影响(Dvorkin et al., 1999; Helgerud et al., 1999)。Christine Ecker 同时用 Gasaman 公式计算了两种赋存(沉积)机理的水合物的纵、横波速度<sup>[9]</sup>。

模型 5 是一个/夹杂物模型, 将水合物看作是骨架, 将沉积物颗粒看作是骨架中的夹杂物。模型 6 是一个结核与裂缝充填模型, 水合物以结核形式存在于沉积物中, 或者充填于裂缝中, 在水合物取心中已经发现这种模型的水合物沉积物; 对此模型的声

波特特性描述完全是凭经验进行的(如 Lee 等 1996 年用加权平均方程),更进一步的经验公式是实际观测得到的.

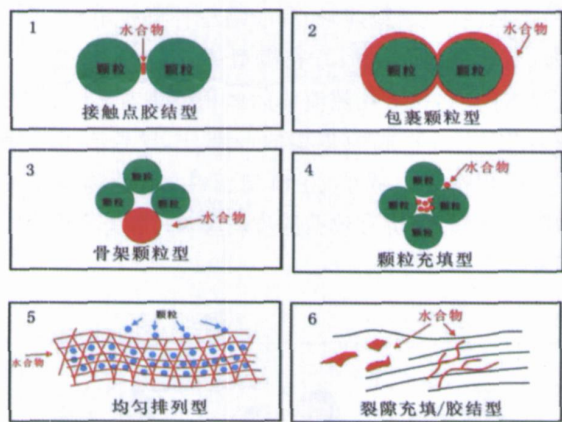


图2 JIANCHUN DAI 等人的水合物模型(2004)  
Fig. 2 The gas hydrate model by Jianchun Dai(2004)

Sava Diana 等<sup>[19]</sup>采用四种模型(图 3)进行深水天然气水合物沉积物岩石物理性质研究. 在模型 A 中,水合物均匀分布在沉积物中,并且作为骨架的一部分;在模型 B 中,水合物均匀分布在沉积物的孔隙空间中,对沉积物干矿物骨架没有影响;模型 C 是各向异性、薄层状介质,层状的水合物与层状的疏松沉积物交替出现,沉积物中饱和盐水;模型 D 也是各向异性、薄层状介质,层状的水合物与层状的疏松沉积物交替出现,在薄层沉积物的孔隙空间中含有水合物和盐水.

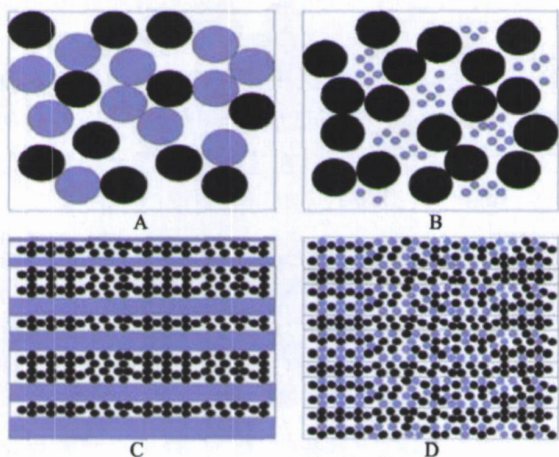


图3 Sava Diana 等人的水合物模型(2006)  
Fig. 3 The gas hydrate model by Sava Dian(2006)

Chand 等<sup>[20]</sup>对加权公式(WE)、三相有效介质模型(TPEM)、三相 Biot 理论模型(TPB)和差分有效介质理论模型(DEM)进行了总结和比较,认为不同模型有不同的适用特点(图 4).

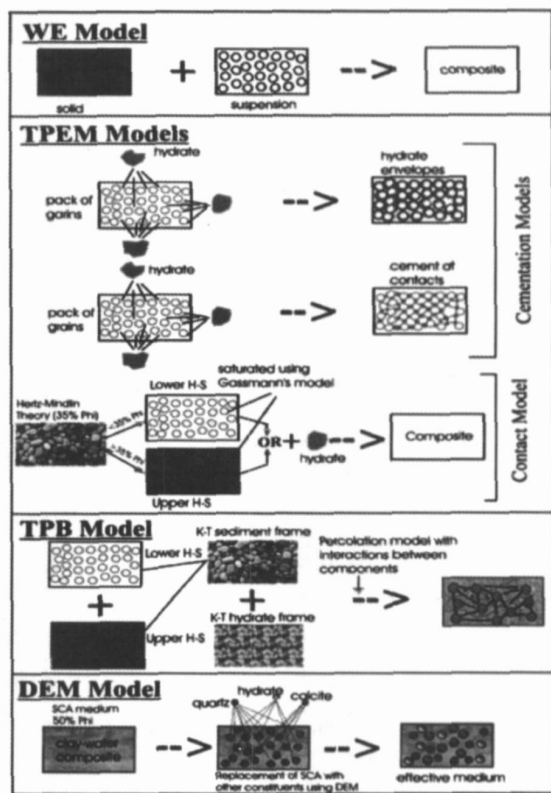


图4 几种水合物模型(Chand 等人,2004)  
Fig. 4 The gas hydrate model by Chand(2004)

从以上的分析中可以看出,天然气水合物在疏松沉积物中的赋存状况比较复杂,由此也产生许多含天然气水合物沉积物物性的理论计算模型.水合物岩石物性分析理论既有单相介质理论和双相介质理论,也有比较复杂的三相介质理论和多项介质理论.在上述理论的基础上,建立了很多速度与孔隙度和水合物饱和度的关系模型,既有简单的模型,如孔隙度降低模型、时间平均方程、时间平均) Wood 加权方程;也有复杂的模型,如弹性模量计算模型(Helgerud 模型)、三相介质波传播理论模型、四相加权方程、K2T 方程等.从理论上讲,复杂的模型理论严密,考虑了实际中各种可能,比较符合实际情况,但涉及的参数太多且在实际情况下这些参数的数值很难准确确定;简单的模型计算容易、简单可行,但缺乏严密的理论依据往往难以满足实际中各种复杂情况;宋海斌<sup>[17]</sup>在对理论计算模型分析后也

证明了这一点。

Jianchun Dai<sup>[8]</sup>等基于 6 种模型计算了水合物饱和度与纵波速度、横波速度变化曲线并与 Mallik 21238 井实测结果作了对比。虽然不同模型预测结果差异较大, 但是都反映了随水合物饱和度增加, 纵波速度、横波速度增加这一共同的趋势, 模型 3 计算的结果与 Mallik 21238 井实测结果基本一致, 用该模型精确预测了布莱克海台的各站位的水合物的饱和度。因此, 在利用地震资料进行水合物识别和饱和度预测时, 模型 3 是比较合适的水合物赋存模式。同时也必须注意, 当水合物饱和度较高时, 用该模型计算的横波速度比实际的要高得多。

虽然不同的岩石物性模型分析的结果在数值上有所差异, 但趋势是一致的。随水合物饱和度的增加, 其纵波速度、横波速度呈上升趋势, 泊松比呈下降趋势; 随游离气饱和度的增加, 其纵波速度呈下降趋势, 但当游离气饱和度大于 20% 时, 速度基本不变, 横波速度略有所上升, 泊松比下降; 水合物沉积层的纵波、横波速度和泊松比均大于含游离气沉积层的速度和泊松比。K. Andreassen 等<sup>[7]</sup>分析还表明, 当水合物沉积层的饱和度大于 20% 时而含游离气层的饱和度小于 4% 时, 会出现含游离气层的泊松比大于或等于水合物沉积层泊松比的情况。

## 2 地震调查技术

海洋水合物地震调查技术是根据水合物的地球物理特征和沉积特征而设计的。到目前为止, 已由单道地震和常规的多道地震调查技术, 发展到深海拖曳地震技术、高分辨率地震技术、广角地震反射技术、海底多分量高分辨率地震调查技术、多频、多道地震调查技术、三维地震勘探技术和垂直地震剖面等等。

### 2.1 深海拖曳地震技术

高分辨率近海底深拖(DTAGS)多道地震技术是用勘探船拖一条沉放在海底之上几米内多道电缆, 其它的工作方法与高分辨率 2D 地震资料的采集相同。该方法可有效地避免海底多次波的干扰和海水对高频地震波的衰减及压制作用, 提高了地震数据的信噪比和分辨率, 通过它可以详细地了解水合物和游离气的分布及相关速度。由于天然气水合物大多分布在深水海域, 在海底接收地震反射信号, 可大幅度缩短地震波传播路径; 相同的电缆排列长度, 在海底接收可以获取更大反射角的地震信号, 提高了速度分析精度; 甚至可以获得广角反射信息, 对

AVO 分析非常有利。

在 ODP 889/ 890 站位附近的海域使用 DTAGS (DeepTow Acoustics/ Geophysics System) 系统将多道地震接收装置放置在海底获得了高分辨率、宽频带(频带 250~650 Hz)地震资料, 可在纵向上分辨 4 m 厚的地层。R. Walia 用该数据较好地描述水合物沉积层的结构和进行了精确的速度分析<sup>[3]</sup>。

### 2.2 高分辨率和多频、多道地震调查技术

钻孔和取芯表明, 在水合物稳定带(HSZ)内的水合物沉积物与泥质沉积物呈多个薄互层的方式存在, 单层厚度在 10 m 以下水合物沉积层占相当大的比例, 有的甚至小于 1 m, 现有的地震勘探分辨率难以完全将其分辨出来; 实际上我们在地震剖面上看到的 BSR 可能是多个薄互层的综合作用的结果, 这在一定程度上影响了对水合物的预测和评价精度, 因此研究者希望通过高分辨率地震调查技术达到准确预测水合物的目的。

由于含水合物沉积层在海底之下的埋藏深度一般较小, BSR 的旅行时间短、高频成分衰减小, 为高分辨率地震调查技术的应用提供了有利的条件。现用于水合物高分辨率地震调查的技术方法有: 高分辨率地震采集技术<sup>[21]</sup>、深拖地震采集技术<sup>[3]</sup>和多频地震采集与研究技术<sup>[22]</sup>。

高分辨率地震资料的采集一般使用单道或多道地震电缆, 为了避免地震虚反射对高频成分的压制作用, 震源和检波器的沉放深度比较浅; 地震震源一般是小容量气枪震源或电火花震源, 以保证产生高主频、宽频带的地震震源子波。虽然这样的震源子波的穿透能力较小, 但对于水合物的勘探已经足够了。

西伯利亚的贝加尔湖及温哥华岛附近海洋的多频地震调查数据<sup>[22]</sup>表明, 不同的地震主频率和频带宽度的地震数据上的 BSR 特征不同。贝加尔湖多频地震资料的采集中, 采用低频气枪排列震源获取 7 ~ 100 Hz 的低频数据、中频单气枪震源获取 45 ~ 330 Hz 的中频数据和高频水枪震源获取 100 ~ 650 Hz 的高频数据, 用电火花震源获取 150 ~ 1000 Hz 的较高频数据, 结果表明不同的地震震源的频率与接收排列组合决定含水合物稳定带(HSZ)不同的成像效果, HSZ 在低频数据上表现为经典的 BSR; 在中频地震数据上, BSR 振幅变小、连续性变差, 甚至在局部看不到 BSR; 在高频和较高频地震数据上, HSZ 不再以单一反射形式(典型 BSR)出现, 而是以一系列的单独的增强型的反射的形式出现, 说明 HSZ 内的含水合物饱和度在纵向上是有变化的。同

时也可以看出,不同的分辨率地震数据在水合物调查评价中的作用不同,用低频地震数据可以便捷地确定水合物的区域分布特征,而中频、特别是高频地震数据能够精确地描述和刻画HSZ的内部结构。

### 2.3 广角地震反射技术

当地震波以大于临界角的方式传播时,除产生折射波外,还产生广角反射波。研究表明,BSR振幅随入射角的增加而增加,当入射角大于临界角时,BSR振幅呈快速增加的趋势<sup>[7, 23~25]</sup>。因此,广角反射技术可以突出BSR特征。

Katzman<sup>[5]</sup>等利用广角反射技术研究了Blake海台的水合物分布,Tinivella<sup>[26]</sup>等用广角反射和折射波数据联合反演研究南设得兰群岛水合物和游离气层的纵波速度和波阻抗。

### 2.4 海底多分量高分辨率及OBS地震调查技术

利用纵波速度特征求取天然气水合物饱和度存在多解性,研究者一直探讨利用天然气水合物的横波特征精确地求取天然气水合物饱和度,海底多分量地震勘探是获取横波信息的有效途径。由于在海水中横波不能传播,多分量地震一般采用海平面之下气枪激发,海底放置二分量(或多分量)电缆接收PP波和PS转换波反射振幅。该方法除具有能够接收到分辨率比PP波高的PS转换波的优势外,还有效避免了海底多次波、面波和其它干扰波,提高数据的信噪比。

在墨西哥湾的水合物调查中进行了海底多分量高分辨率地震<sup>[16]</sup>,在水深500~850m的海域布置一条测线。对采集到的数据进行处理后,得到了PP波剖面、PS转换波剖面和 $V_p/V_s$ 信息,这些信息对提高天然气水合物的预测精度非常有用。

海底地震仪(OBS)也是获取高分辨率地震数据的有效途径,Dhananjay Kumar等<sup>[27]</sup>利用OBS在俄勒冈海获得了清晰的双BSR地震剖面,在经反演处理P波速度剖面上准确反映了水合物的分布。

### 2.5 三维地震勘探技术

由于海底地形和构造的复杂性影响了BSR的成像,高分辨率3D地震有了用武之地。它既提高了地震数据的纵向分辨率,也提高复杂构造区的成像精度和横向分辨率,突出了BSR特征<sup>[15]</sup>。如2002年日本在南海海槽采用高分辨率3D地震调查,采用的地震参数是:压力2000psi容量1158 in<sup>3</sup>的气枪震源、25m的炮间距、8条长度2400m的地震电缆(每条电缆192道、道间距12.5m)。对取得的数据经过处理后,成果剖面信噪比、分辨率、偏移成像质量

高,BSR特征突出。

三维地震数据可以以水平切片的形式显示,能直观地观测水合物和游离气的横向分布。RIEDEL<sup>[28]</sup>等(2006)利用水平切片的瞬时振幅信息研究了Cascadia北部海域的水合物和游离气的分布,取得了较好的效果。

### 2.6 VSP测井研究

垂直地震剖面(VSP)方法是一种表面激发、井中接收的地震测量方法,它具有分辨率、信噪比高,能识别各种多次波和进行精确的地震、地质层位标定的优点,还可以进行地层纵波和横波速度的求取及地震反射形成机理和转换波研究等。由于它可以避开和减弱浅层低(降)速带的干扰并确定上行波和下行波,从而为研究和识别多次波提供了条件。利用VSP技术不仅可以最大限度地压掉多次波使BSR更加突出,而且还可以利用VSP的速率变化来判断含水合物沉积及其下伏的含游离气沉积的厚度。VSP另一个重要的作用是能准确地建立钻孔中地层深度与地震时间剖面对应关系,标定地震层位的地质属性。VSP方法在深海钻探和大洋钻探中的应用中取得了可喜的成果,Holbrook<sup>[6]</sup>等人已利用ODP164航次的VSP资料研究布莱克海台附近海底水合物和BSR下方游离气的分布特征。相对于高频段的声波测井,低频段的VSP方法可更准确地确定含游离气沉积层的厚度和速度,如ODP889站位在钻井过程中,受其它因素的影响(钻井泥浆的污染?作者注),其地层的物性发生变化,声波测井未能正确反映含游离气层,而VSP方法却将它准确地反映了出来<sup>[29]</sup>。

3D VSP是常规VSP的延伸,属立体地震的一部分;它在3D平面内均匀布置高分辨率地震震源,在井下以小深度间距的三分量检波器接收地震信号。3D VSP测量用于识别井下一定范围内天然气水合物稳定带(HSZ)的横向变化,并进行地震层位标定。

Donn McGuire等<sup>[30]</sup>利用该技术进行了阿拉斯加北部斜坡Hot Ice 1井天然气水合物的横向分布研究。虽然还没有看到最终的解释结果,但从处理后的成果剖面上,可以看到了该方法的高分辨率、高信噪比的优越性。

## 3 地震处理和识别

水合物赋存在海底之下较浅的地层中,地震处理一般为突出BSR特征的/三高(高分辨率、高保真



度、高信噪比)0处理<sup>[31~34]</sup>、叠前深度(时间)偏移处理为主。由于BSR与水合物存在并非一一对应,依据含水合物沉积物的地球物理及地震特征,采用速度分析、AVO反演、全波形反演、波阻抗反演水合物和多属性参数分析等地震技术识别水合物。

### 3.1 突出BSR特征研究

由于BSR呈强反射振幅特征,常规的处理可能会削弱其振幅强度。因此在处理中大多都采用/三高0处理手段,不但突出了BSR特征,也为波阻抗反演提供了基础资料。

在构造复杂或水合物沉积层及含游离气层不连续的海域,BSR的特征并不突出,突出BSR特征处理变得特别重要。PECHER(2001)等在对秘鲁-中美洲海槽的弱BSR进行识别时,应用叠前深度反演技术提高了BSR波形的连续性、分辨率,使BSR的特征更突出并易于识别,为应用高分辨率速度提取技术和全波形反演技术识别真假BSR和预测了该区域的水合物的分布提供了良好的基础数据。

叠前深度反演处理过程中要进行精确的速度建模,在得到处理成果的同时也可以得到精确的速度分布成果,对研究水合物和游离气的分布非常有利。

### 3.2 AVO反演研究

由于水合物沉积层与其上、下伏沉积层的明显的纵、横波速度、波速比特征的差异,AVO(Amplitude Versus Offset, 振幅随偏移距变化)分析与反演技术在水合物的研究中被广泛应用,研究者利用AVO进行真假BSR的识别、水合物沉积层的速度、孔隙度和水合物饱和度预测<sup>[9]</sup>等。利用AVO技术进行水合物识别是在水合物岩石物性分析的基础上,利用Zoeppritz方程计算BSR的AVO响应特征,然后与拾取的实际的AVO响应进行对比分析,探讨BSR成因,分析是否存在水合物及含游离气沉积层,反演计算水合物、含游离气沉积层厚度、孔隙度和饱和度。研究表明,随着偏移距(入射角)的增加,BSR振幅呈增加趋势,在大偏移距处BSR出现相位转换现象<sup>[7,18]</sup>。

Zoeppritz方程是AVO研究的基础,但由于Zoeppritz方程在计算时涉及的参数太多,计算量太大,一般都采用Koefted或R.Tshuey简化公式。用于AVO分析的数据通常为通过震源组合校正、检波器组合校正、球面扩散与振幅标定(保持振幅处理)、在此基础上进行了剔除噪音处理和提高分辨率处理并形成共中心点道集,然后分析BSR振幅随入射角变化(AVA)关系,计算并反演各种属性剖面,

最后进行真假BSR识别。

Ecker等<sup>[18]</sup>、宋海斌等<sup>[24]</sup>、牛滨华等<sup>[26]</sup>、张聿文等<sup>[35]</sup>、张璐等<sup>[36]</sup>、孙春岩等<sup>[37]</sup>基于不同的计算模型研究了BSR的AVA特征,这些研究的着重点和方法并不完全相同,但结论大同小异。BSR反射系数与沉积物中水合物、游离气的含量密切相关,当入射角小于25°时,BSR反射系数随入射角变化并不明显,当入射角大于25°时BSR反射系数随入射角的增加而快速增加。

需要指出的是,虽然AVO技术在水合物识别中的作用是重要的,但是受薄层调谐作用和地震反演技术多解性的影响,AVO技术在水合物与游离气的定量研究中的作用是有争议的。由于Zoeppritz方程是在界面两侧为弹性半空间的假定条件下推倒出来的,因此它仅适用于使顶、底界面产生的反射波能分离的厚度较大(一般应大于地震波长的一半)目的层。而天然气水合物是以多个薄互层的形式赋存在海底之下的沉积物中,目的层与围岩的许多弹性分界面都会产生反射波,它们在相互叠加、干涉、调谐后产生复合弹性反射波,在这种情况下机械地套用Zoeppritz方程计算单界面的含天然气水合物沉积层底界的AVA响应与实际的BSR的AVA响应有一定的差异。即使用Zoeppritz方程计算薄层反射系数随入射角变化关系,它也难以精确地考虑层间多次和转换波诸因素对接收到的地震反射波的影响。同时接收到的地震记录是具有一定的频带宽度、主频和延续长度的地震子波在多个薄互层弹性介质中传播和反射的结果,地震子波的波形、频率特征以及薄层界面的地震反射波的干涉调谐作用也是重要的影响因素。因此,用Zoeppritz方程计算的BSR振幅与入射角理论关系曲线,指导实际的地震AVO资料的真假BSR识别分析、预测天然气水合物丰度和分布,将产生较大的误差。避免上述因素对模拟水合物沉积层底界面的地震AVO响应影响,使模拟含水合物沉积层的底界面地震AVO响应更接近实际的地震记录,建议采用更适用于多层的、任何厚度的薄互层条件的地震波在弹性多层介质中传播理论计算模拟不同入射角的复合波地震响应<sup>[38,39]</sup>。

### 3.3 速度、波阻抗反演分析研究

基于水合物沉积物、饱和水沉积物和含游离气沉积物之间的速度特征差异,速度、波阻抗的分析和反演处理在水合物的识别中发挥了重要作用。叠加速度分析最早被用于水合物的研究中,Ecker<sup>[23]</sup>等对布莱克海台一条地震剖面做了详细的叠加速度分

析和用 DIX 公式转换成层速度后,用岩石物理模型公式计算了水合物饱和度和游离气饱和度。

但在现有的地震勘探频率条件下,地震叠加速度的变化不能由地震叠加振幅敏感地反映出来,致使地震叠加速度的选取精度差,由此求取的层速度分辨率低、误差较大。为解决这一难题,研究者采用全波形速度反演技术求取水合物沉积层的速度精细结构。

全波形反演主要是通过使实际的地震记录波形与计算合成地震记录波形之间的方差为最小目标函数进行求解来完成的。目前被广泛应用的全波形反演方法是在频率-波数域进行的,它包含了旅行时反演与波形反演、全局反演与局部优化反演等反演内容,它在多次搜索后用局部优化方法求解长波长(低频背景)纵波速度模型的基础上,进行多轮多次的迭代,求取短波长(高频)速度结构<sup>[40]</sup>。它可以反演求取 BSR 上下方沉积层的精细速度结构,识别真假 BSR。

Singh 等应用波形反演方法研究了温哥华岸外的 BSR 上、下方的速度结构<sup>[10]</sup>,该研究成果得到了 ODP164 航次的证实<sup>[11]</sup>。宋海斌等<sup>[40]</sup>应用该方法反演了日本东南海海槽双 BSR 的速度结构,解释了双 BSR 的反极性特征,给出了高分辨率的速度结构。Ganyuan Xia<sup>[41]</sup>等基于多道地震数据的叠前多级波形反演研究南卡罗莱纳近海的 BSR 成因,在进行波形反演时以非线性最优方法估算低频速度分量,用振幅随偏移距变化反演确定速度场的高频速度分量,由此推断该区 BSR 由游离气的存在引起的,在 BSR 之下至少有两个游离气层,结果得到了 ODP 钻井和 VSP 测井的证实。

目前,利用以测井资料为约束条件的地震宽带约束反演技术进行海洋水合物识别已成为研究的热点。地震宽带约束反演技术以反映垂直入射振幅变化的 P 波剖面为基础,以测井资料为标定和约束条件、以非线性系统理论为算法,来反演最优的声波阻抗模型,并在此基础上反演速度、波阻抗数据。由于它充分地利用测井信息的高分辨率性和地震资料的横向连续性,使反演的波阻抗数据具有较高的分辨率。Shaoming Lu 等<sup>[12]</sup>用稀疏尖脉冲约束反演技术反演地震波阻抗,预测布莱克海台水合物分布,展示了波阻抗剖面的高分辨率研究水合物展布的前景。

### 3.4 地震属性分析

利用地震属性识别天然气水合物一直是地球物理学家研究的内容之一。地震属性是指那些叠前、叠

后地震数据中所包含的几何学、动力学、运动学和统计学特征,这些参数特征有的对岩性储层环境敏感、有些对储层空隙中的流体敏感。由于海域天然气水合物的存在与地震振幅、速度并不存在单一的对应关系,而且不同地震属性的分辨率也不相同,因此,地球物理学家尝试采用多地震属性综合分析识别海域天然气水合物。

M. Hato 等<sup>[4]</sup>综合利用地震属性识别日本南海海槽天然气水合物。在这项研究中,从叠前 CMP 道集提取了相对 P 波波阻抗、相对 S 波波阻抗和泊松比;从叠后数据中,基于 Gabor2Morlet 谱分解技术(Morlet et al., 1982)计算了异常衰减;还用 Dix 方程从均方根速度中计算了地震层速度。将这些属性与水合物站位联合标定分析,认定天然气水合物储集层具有高 P 波波阻抗、高 S 波波阻抗、低泊松比、高地震层速度和低异常衰减的地震特征。对这些属性参数以地球物理的方法进行综合计算、分析,识别和描述天然气水合物储集带,特别是通过最优化的方法,用那些对天然气水合物储集带变化敏感的地震属性参数,进行综合计算、分析,提高了识别和描述天然气水合物储集带的精度。

王秀娟等<sup>[42]</sup>研究了用地震属性参数识别天然气水合物,指出综合分析含水合物和游离气沉积层的泊松比、纵波速度和 AVA 特征,可以识别天然气水合物和游离气在沉积地层中的分布模式。与不含水合物沉积层相比,BSR 上纵波和横波速度比较高,而泊松比略微偏低且出现 PP2 波反射系数的 AVO 负异常表明沉积层含有水合物。BSR 下纵波速度和泊松比都比较低表明沉积层游离气呈均匀分布;纵波速度低而泊松比不太低表明沉积层游离气呈块状分布。

## 4 含水合物储集层预测

利用地震方法技术预测含水合物、游离气储集层的物性,重点是求取水合物和游离气的丰度和分布。它一般在波阻抗反演的基础上,利用孔隙度、饱和度和波阻抗的关系反演求取储集层物性。

应用该项技术进行 BSR 上下方沉积层的物性参数预测,还有许多的特定问题待解决。如水合物沉积层是一个特殊的地层,其地震波阻抗与沉积层的孔隙度和含水合物的饱和度有密切的关系,给用反演得到的波阻抗数据求取孔隙度带来了较大的困难。Shaoming Lu 等<sup>[12]</sup>(2002)对应用地震宽带约束反演技术预测布莱克海台的孔隙度和含水合物、游

离气饱和度进行了较系统的研究并取得了可喜的成果。在对该区测井资料进行了细致研究的基础上, 分别拟合建立了饱和水沉积物的孔隙度、含水合物饱和度和、含游离气饱和度与地震波阻抗的经验公式, 然后用稀疏尖脉冲约束反演方法反演地震波阻抗, 最后将拟合公式应用到相应的波阻抗区域, 来获得估算的充水饱和度、水合物与游离气的分布。虽然这些经验公式是从 Blake Ridge 地区推导所得的, 对其它地区不一定完全适用, 但该研究的思路可适用于其它地区。

目前采用不同方法估计的全球范围内天然气水合物的储藏量差异较大<sup>[43~46]</sup>, 利用水合物的弹性特征可以提高预测的精度。采用弹性波阻抗反演<sup>[47]</sup>从基于反射角度的 P 波数据中反演计算含天然气水合物沉积物和它所圈闭的游离气沉积物的弹性参数, 进而预测水合物、游离气的丰度<sup>[14]</sup>。

Shaoming Lu<sup>[14]</sup>应用弹性波阻抗反演技术预测了 Blake 海台的天然气水合物的分布状况。首先对地震数据进行处理以获取共反射角道集数据, 然后进行弹性波阻抗反演; 根据 ODP Leg 164 的测井数据, 用两种算法进行测井约束下的弹性波阻抗反演; 得到了 P 波波阻抗、S 波波阻抗、 $V_s/V_p$ 、泊松比、拉梅系数( $K_0$ )和  $K/L$  等成果剖面。在此反演的成果的基础上, 利用天然气水合物、游离气与弹性参量的关系特征, 反演求取了沉积层的孔隙度和天然气水合物、游离气饱和度。该实例证明, 弹性波阻抗反演能够较精确识别天然气水合物并预测其丰度, 是一个有应用前景的高新技术。

由于水合物测井资料较少, 使基于测井资料约束反演求取水合物含量技术难以大面积应用, 研究者尝试以无井约束反演的方法估算水合物含量, Jianchun Dai<sup>[8]</sup>等提出了依赖反演和实际水合物岩石物理模型在地震数据上无井定量求取水合物的方法, 并在墨西哥湾深水区的三维地震数据体上反演求取了水合物饱和度的三维立体分布。首先以混合反演技术(Mallick (1995), Mallick et al. (2000), Dutta (2002), Mallick and Dutta (2002))联合叠前全波形反演和常规线性叠前反演高效率地求取高分辨率  $V_p/V_s$ , 然后再依据实际的水合物岩石物理模型定量估算水合物含量。该方法技术为水合物检测和资源潜力定量估计提供了有效工具。

## 5 结 论

到目前为止, 已初步形成了海洋水合物地震识

别、预测技术系列, 它主要以水合物地球物理弹性特征模型研究为基础, 以模型正演分析和波形模拟的结果为指导, 以精细的数据处理和多种岩性反演技术方法(如: 叠前深度偏移、/ 三高0处理、AVO 反演、速度、波阻抗反演、全波形反演、多参数综合分析等)为手段, 上述技术手段联合应用, 进行真假 BSR 的识别和水合物层、游离气层的厚度预测, 最后依据水合物物性特征进行物性参数反演, 预测水合物、游离气饱和度和分布。

国际上的研究成果表明, 有水合物测井资料的研究区, 模型分析和波形模拟的结果更为接近实际, 在岩性反演和处理解释中, 有了更为可靠的依据; 同时测井资料为井)震联合反演技术的应用提供了资料保障。

虽然水合物地震研究已取得了较大的进展, 但仍存在诸多未完全解决的难点。如含水合物沉积物的物性研究, 发展了众多的理论计算公式和模型(包括衰减模型<sup>[48]</sup>等), 简单的公式和模型参数选取容易, 与实际情况差异较大; 复杂的公式和模型比较符合实际情况, 但参数太多、难以准确选取, 仍是困扰研究者的难题。

BSR 的形成机理及地震特征(如 AVO 特征)仍处于多解和争论中。在含水合物沉积物的物性预测中, 如何区分孔隙度和饱和度对弹性参数的影响, 如何准确地预测水合物的含量, 也是研究者讨论的重点。

这些问题的存在, 影响了水合物地震研究的精度。因此在以后的研究中, 应着重开展如下工作:

(1)继续开展含水合物沉积物的物性研究, 形成既符合研究区地质特征、又能够准确选取参数的理论计算模型。

(2)根据反射层不同弹性参数(如: 纵波速度、横波速度、密度、泊松比)模型和测井资料, 用各种数学计算模型(包括波动方程正演模型)模拟 BSR 的成因机制和建立 BSR 的识别标志。

(3)数据采集向三维和海底多维多分量方向发展, 从而达到准确预测水合物物性参数和揭示水合物的空间分布。

(4)进行沿层孔隙度反演研究, 根据孔隙度变化对地震反射波的速度、振幅、频率和相位等特征参数的综合影响, 以水合物识别为目的的地震多属性提取、分析与综合判别技术将得到广泛的应用。

(5)将各种地震反演技术联合应用到水合物的地震识别中, 反演方法技术研究以最大程度地降低



地震反演的多解性、提高预测精度为重点。随着钻井和测井数据的取得,井)震联合约束反演将成为水合物地震识别中的常规和必备技术方法。多弹性参数的全波形反演和波阻抗反演将成为水合物研究的重要手段。

(6) 由于地震纵波勘探技术在天然气水合物识别中多解性的特点,应用多波勘探和基于角度道集数据基础上的提取纵、横波特征参数、弹性模量参数的弹性波反演技术预测水合物,以降低多解性、提高天然气水合物识别的精度。

(7) 加强综合地球物理调查和应用研究,综合利用高精度重力、大地电磁测量、地震等地球物理方法联合识别与预测水合物、提高调查精度。

## 参 考 文 献 (References):

- [1] Markl R G, Bryan G m, Ewing J I. Structure of the Blake Bahama outer ridge[J]. *Geophys. Res.*, 1970, 75: 4539~ 4555.
- [2] 宋海斌,等. 海洋天然气水合物地球物理研究(II): 地震方法[J]. *地球物理学进展*, 2001, 16(3): 110~ 118.
- [3] Rowe M, Gettrust L F. Faulted structure of the bottom simulating reflector on the Blake Ridge, western North Atlantic[J]. *Geology*, 1993, 21(6): 811~ 836.
- [4] Fink C P, Spence C d. Hydrate distribution off Vancouver Island from Multifrequency single channel seismic reflection data[J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(5): 2909~ 2922.
- [5] Katzman, Holbrook W S, Paul C K. Combined vertical incidence and wide angle seismic study of a gas hydrate zone, Blake Ridge[J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(4): 1975~ 1995.
- [6] Holbrook W S, Hoshing H, Wood W T, et al. The Leg 164 Science Party, Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling[J]. *Science*, 1996, 273(5): 1840~ 1843.
- [7] Karin A, Patrick E H, Mary M. Amplitude versus offset modeling of the bottom simulating reflection associated with submarine gas hydrates[J]. *Marine Geology*, 1997, 137(1): 25~ 40.
- [8] Dai J C, Xu H B, Fred S, et al. Detection and estimation of gas hydrates using rock physics and seismic inversion: Examples from the northern deepwater Gulf of Mexico[J]. *the Leading Edge*, 2004, 23(1): 60~ 70.
- [9] 宋海斌,江为为,张文生,郝天珧. 天然气水合物的海洋地球物理研究进展[J], *地球物理学进展*, 2002, 17(2), 224~ 229.
- [10] Singh S C, Minshull T A, Spence C D. velocity structure of a gas hydrate reflector[J]. *Science*, 1993, 260(1): 204~ 207.
- [11] Singh S C, Minshull T A. Velocity structure of a gas hydrate reflector at Ocean Drilling Program site 889 from a global seismic waveform inversion[J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(6): 24221~ 24233.
- [12] Lu S M, George A M, G. A. Estimation of gas hydrate and free gas saturation, concentration, and distribution from seismic data[J]. *Geophysics*, 2002, 67(2): 582~ 593.
- [13] 张聿文, 刘学伟, 金玉洁. 含天然气水合物地层的速度和衰减研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(2): 205~ 214.
- [14] Lu S M, George A M. Elastic impedance inversion of multichannel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas[J]. *GEOPHYSICS*, 2004, 69(1): 164~ 179.
- [15] Hato M, Matsuoka T, Inamori T, et al. Detection of methane hydrate bearing zones using seismic attributes analysis[J]. *THE LEADING EDGE*, 2006, 25(5): 607~ 609.
- [16] Milo M B, Paul E M, Bob A. H, et al. High resolution multicomponent seismic imaging of deepwater gas hydrate systems[J]. *THE LEADING EDGE*, 2006, 25(5): 578~ 596.
- [17] 宋海斌,等. 海洋天然气水合物地球物理研究(II): 岩石物性[J]. *地球物理学进展*, 2001, 16(2): 118~ 126.
- [18] Christinen E, Jack D, Amos N. Sediments with gas hydrates structure from seismic AVO[J]. *GEOPHYSICS*, 1998, 63(5): 1959~ 1669.
- [19] Diana S, Bob A H. Rock physics characterization of hydrate bearing deepwater sediments[J]. *THE LEADING EDGE*, 2006, 25(5): 616~ 619.
- [20] Shyam C, Tim A, Minshull, D G, et al. Elastic velocity models for gas hydrate bearing sediment: a comparison. *Geophysics. J. Int*, 2004, 159: 573~ 590.
- [21] R. D Hyndman, G. D Spence, R. Chapman, M. Riedel, R. N Edards. Geophysical studies of marine gas hydrate in Northern Cascadia[A]. *Natural gas hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection*[C], *Geophysical Monograph* 124, American Geophysical Union, 2001: 273~ 295.
- [22] M. Vanneste, M. De Batist, A. Golmshtok, A. Kremlev, et al. Multifrequency seismic study of gas hydrate bearing sediments in Lake Baikal, Siberia[J]. *Marine Geology*, 2001, 172: 1~ 21.
- [23] Ecker C, Dvorkin J, Nur A M. Estimating the amount of gas hydrate and free gas from marine seismic data[J], *Geophysics*, 2000, 65, 565~ 573.
- [24] 宋海斌, Matsubayashi Osamu, 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.
- [25] 牛滨华, 文鹏飞, 温宁, 等. 基于 BSR 的 AVO 正演估算水合物含量方法的研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 143~ 152.
- [26] Tinivella A F. Compressional velocity structure and Poisson's ratio in marine sediments with gas hydrate and free gas by inversion of reflected and refracted seismic data( South Shetland Island, Antarctica)[J]. *Marine Geology*, 2000, 164(1): 13~ 27.
- [27] Dhananjay Kumar, Mrinal K. Sen, Nathan L. Bangs. Seismic characteristics of gas hydrates at Hydrate Ridge, offshore Oregon[J]. *THE LEADING EDGE*, 2006, 25(5): 610~ 614.

[ 28] Riedel M, Spence G D, Chapman N R. Deep2sea gas hydrates on the northern Cascadia margin [ J]. THE LEADING EDGE, 2001, 20( 1): 87~ 92.

[ 29] Timothy S. Collett. A review of welllog analysis techniques used to assess gas2hydrat2bearing reservoirs [ A ]. Natural gas hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection[ C], Geophysical Monograph 124, American Geophysical Union, 2001: 189~ 210.

[ 30] Donn M G, Steve R, Tom W, et al. Gas hydrate exploration with 3D VSP technology, North Slope, Alaska. SEG Int'l Exposition and 74th Annual Meeting.

[ 31] 徐宁, 吴时国, 王秀娟, 等. 东海冲绳海槽陆坡天然气水合物的地震学研究[ J]. 地球物理学进展, 2006, 21( 2): 564~ 571.

[ 32] 陈林, 宋海斌. 海底天然气渗漏的地球物理特征及识别方法[ J]. 地球物理学进展, 2005, 20( 4): 1067~ 1073.

[ 33] 唐勇, 金翔龙, 方银霞, 等. 冲绳海槽天然气水合物 BSR 地震研究[ J]. 海洋学报, 2003, 25( 4): 59~ 66.

[ 34] 孙春岩, 牛滨华, 文鹏飞, 等. 海上 E 区天然气水合物地质、地震、地球化学特征综合研究与成藏远景预测[ J]. 地球物理学报 2004, 47( 6): 1076~ 1085.

[ 35] 张聿文、刘学伟、李海鸥. 基于单相与双相介质拟海底反射的 AVO 研究[ J]. 石油物探, 2004, 43( 3): 209~ 217.

[ 36] 张璐, 印兴耀, 孙成禹. 双相介质的 AVO 正演模拟[ J]. 地球物理学进展, 2005, 20( 2): 319~ 322.

[ 37] 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.

[ 38] 徐仲达、屠浩敏、邬庆良. 平面波反射系数与 AVO 技术[ J], 石油物探, 1991, 30( 3): 1~ 21.

[ 39] 徐仲达编著, 地震波理论[ A]. 上海: 同济大学出版社, 1997.

[ 40] 宋海斌、松林修、仓本真一, 天然气水合物似海底反射层的全波形反演[ J], 地球物理学报, 2003, 46( 1): 42~ 46.

[ 41] Xia H Y, Mrinal K S, Paul L S. Mapping of elastic properties of gas hydrates in the Carolina trough by waveform inversion[ J]. GEOPHYSICS, 2000, 65( 3): 735~ 744.

[ 42] 王秀娟, 吴时国, 徐宁. 地震属性参数在识别天然气水合物和游离气分布模式中的应用[ J]. 海洋与湖沼, 2006, 37( 5): 271 ~ 279.

[ 43] 王淑红, 宋海斌, 颜文. 地球系统中的天然气水合物2天然气体系研究展望[ J]. 地球物理学进展, 2006, 21( 1): 232~ 243.

[ 44] 方银霞, 黎明碧, 初凤友. 海底天然气水合物中甲烷逸出对全球气候的影响[ J]. 地球物理学进展, 2004, 19( 2): 286~ 290.

[ 45] 王淑红, 宋海斌, 颜文. 全球与区域天然气水合物中天然气资源量估算[ J]. 地球物理学进展, 2005, 20( 4): 1145~ 1154.

[ 46] 王淑红, 宋海斌, 颜文. 外界条件变化对天然气水合物相平衡曲线及稳定带厚度的影响[ J]. 地球物理学进展, 2005, 20( 3): 761~ 768.

[ 47] 王保丽, 印兴耀, 张繁昌. 弹性阻抗反演及应用研究[ J]. 地球物理学进展, 2005, 20( 1): 89~ 92.

[ 48] 王秀娟, 吴时国, 刘学伟. 天然气水合物和游离气饱和度估算的影响因素. 地球物理学报, 2006, 49( 2): 504~ 511.