

# 采用射线追踪法的天然气水合物海底地震观测系统设计\*

伍忠良<sup>1</sup>, 伍人瞰<sup>2</sup>

(1. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760; 2. 中南大学数学学院, 湖南 长沙 410012)

**摘要:** 射线追踪法是以建立的地下地质模型为基础, 研究不同的激发点发出的射线经地下地质界面反射后可以被接收到的信息, 从而了解不同的观测系统对于特定地质条件地震资料采集的效果, 对于海上地震采集相关参数的确定十分关键。在天然气水合物地震勘探中, 丰富的多波勘探信息对于查清水合物内部速度结构、提高地层的分辨率具有重要意义。本文在分析国外天然气水合物海底地震仪(OBS, ocean bottom seismometer)勘探的应用成果基础上, 采用射线追踪法理论计算和海上实验, 实现了针对天然气水合物的海底地震观测系统设计, 试验获得了转换横波记录, 取得了良好的应用效果。

**关键词:** 射线追踪法; 天然气水合物; 海底地震仪; 观测系统

中图分类号: P738 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)01-0061-09

## Layout design of ray tracing method on ocean bottom seismic survey for natural gas hydrate

WU Zhong-liang<sup>1</sup>, WU Ren-tun<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Marine Geological Survey Bureau, Ministry of Land & Resources, Guangzhou 510760, China;

2. School of Mathematics, Central South University, Changsha 410012, China)

**Abstract:** Ray tracing method of basing on the subsurface geology model is very important for defining some parameters during marine seismic exploration. The signal reflected from underground interface can be directly viewed when different emission locations are chosen. Thus the effect of different seismic survey geometry on seismic data acquisition can be understood. It is also very significant for using multi-waves both to reveal the internal velocity structure of gas hydrates ores and enhance the resolution of gas hydrates bearing formations. By analyzing the application of ocean bottom seismometers (OBS) on the gas hydrate exploration abroad, the method of ray tracing was introduced on the layout design of OBS in this paper; PS wave was recorded in the sea test, which gives satisfied application result.

**Key words:** ray tracing method; natural gas hydrate; ocean bottom seismometer; layout design

海底地震仪(OBS, ocean bottom seismometer)由于投放在海底, 可以接收海底的多分量位移记录, 因而可以获取地层的纵波、转换横波等多种有效的地震波信息。由于天然气水合物勘探区海底地形地貌情况复杂, 而且 OBS 数量有限、收放过程复杂, 所以如何布设 OBS、充分发挥其优势至关重要; 尤其是对于天然气水合物这种分布比较特殊的矿体,

如何选用参数(海底地震仪站位的分布形态、分布间距等技术参数)来进行野外地震勘探信息的采集, 才能查清水合物内部速度结构、提高地层的分辨率, 从而获得理想的采集效果是野外施工前必须研究的一个问题。因此, 在施工作业前必须针对天然气水合物探区的海底地质条件, 进行地震观测系统模拟, 设计一种可行的、符合采集目的要求的施工方案,

收稿日期: 2010-03-18; 修订日期: 2010-06-22。卢冰编辑

基金项目: 国家“863”计划重大项目((2006AA09A202, 2009AA09A201)

作者简介: 伍忠良(1967—), 男, 湖南省安乡县人, 高级工程师, 从事海洋地质地球物理勘察研究。E-mail: wzllzw1997@21cn.com

通信作者: 伍人瞰(1989—), 男, 广东省广州市人, 中南大学数学学院学士(在读), 从事地球物理数学建模与研究。E-mail: 623539822@qq.com

\* 感谢中科院南海海洋研究所丘学林博士、中国地质大学(北京)刘学伟、王祥春老师的指导。广州海洋地质调查局徐华宁、王伟巍、法国 Sercel 公司北京办事处乌锐、苗晓桂博士对本文进行了修改与指导工作, 在此一并致谢。

从而为实现天然气水合物矿体目标的发现及精细描述优选出最佳采集参数。下面就如何实现上述目标,同时结合国外 OBS 在天然气水合物地震勘探中的应用成果,探讨天然气水合物的海底地震观测系统设计。

## 1 天然气水合物海底地震观测系统设计方法

本观测系统设计主要依据射线追踪法,同时采用波动方程正演模拟显示剖面合成效果,指导野外采集。双聚焦理论参数模拟则从另一面进一步印证观测系统设计的合理性。

### 1.1 射线追踪法

射线追踪法是指在以往天然气水合物调查的基础上针对特定的水合物矿体采用“二维拟三维”的方法建立三维数据体,然后沿特定方向切取地震剖面,模拟野外采集的作业环境,分析 OBS 分布区间的射线数量而最终确定 OBS 的分布形态与分布间距,从而实现观测系统设计的一种方法。

射线追踪方法较多,主要包括求解初值问题的“打靶法”(Sambridge, Kennett, 1990)<sup>[1]</sup>、求解边值问题的“弯曲法”(Pereyra et al, 1980)<sup>[2]</sup>和基于程函方程的波前法(Vidale, 1990)<sup>[3]</sup>等。鉴于三维射线追踪方法耗时多,这里采用“二维拟三维”的方法,即在以往天然气水合物调查的基础上针对特定的水合物目标体建立三维地质模型,然后沿多个特定方向切取二维地质剖面,按野外采集的作业方式以及不同的 OBS 间距与分布形态,用“打靶法”进行二维射线追踪,再统计分析 OBS 分布区间内各类地震波特别是转换横波的面元叠加次数,据此判断 OBS 间距与分布形态的合理性,并确定最优的 OBS 的间距与分布形态,从而实现观测系统设计。

### 1.2 双聚焦理论观测系统参数优选

根据双聚焦理论<sup>[4-5]</sup>,震源在目标点周围一定范围内激发,检波器置于目标点接收。因此,可以用震源阵列聚焦束来评估观测系统中震源对目标点的成像分辨率的影响。具体做法:1)选取不同的炮点间距、测线间距(炮线间距),进行聚焦模拟;2)选取不同的 OBS 分布间距,进行聚焦模拟;3)根据分析结果,确定最佳的观测系统设计效果。

## 2 观测系统设计流程

### 2.1 射线追踪法

#### 2.1.1 天然气水合物目标体优选

在天然气水合物研究过程中,地震技术方法是

最主要的研究方法之一<sup>[6]</sup>。自 1999 年以来,国内科学家在我国南海北部陆坡进行了大量的天然气水合物的研究工作,采用高分辨率二维地震调查技术,初步圈定了天然气水合物的分布范围。之后,又进行了二维加密地震调查,测网密度达到  $1\text{km} \times 4\text{km}$ ,初步选定了天然气水合物试验区。

在地震剖面上,天然气水合物存在的典型特征有以下 4 点(以下简称天然气水合物识别的 4 大标志特征):1)似海底反射(BSR, bottom simulating reflection);2)与地层斜交;3)振幅空白带;4)速度结构异常。其中,BSR 为天然气水合物存在的典型标志<sup>[7-10]</sup>。

图 1a 为天然气水合物二维地震调查工区示意图。为了初步圈定天然气水合物成矿海区或成矿远景区,一般采用高分辨率二维地震勘探方法,以便在地震剖面上识别 BSR 等天然气水合物识别的 4 大标志特征,从而达到目标海域优选的目的<sup>[11-12]</sup>。调查时一般采用激发频率较高、激发频宽较宽的“点震源”系统<sup>[13-14]</sup>,根据调查海域的地震地质条件的不同,调查中使用的震源有高频电火花震源、SLEEVE(套筒枪)震源、G&GI 枪震源等<sup>[15]</sup>,通过优化电缆、震源的沉放深度等调谐组合参数,达到天然气水合物高分辨率调查的目的<sup>[16]</sup>。

根据以往高分辨率二维地震调查结果,HS606 测线内的部分线段 BSR 等特征显示良好。图 1c 为 HS606 原始二维地震剖面,BSR、振幅空白带、穿层特征都非常明显。图 1b 为 HS606 测线内对应 BSR 显示的地震速度剖面,在 CDP(共深度点, common depth point)1690 点附近 BSR 之上地层速度明显增加,在水合物稳定带之下,由于气体聚集的原因,出现速度下降的特征(速度下拉)。对测线 HS606 邻近几条二维测线分析后,认为天然气水合物 BSR 等特征非常明显,因此,作为目标体进行重点研究(图 1a)。图 1c 为 HS606 测线的简化地质模型,主要层位为 T0(海底)、T1 层和 BSR 地球物理反射界面(大部分线段与 T1 重合)。

#### 2.1.2 OBS 海底站位布设方案

##### 1)二维拟三维地质模型建立

为了简化模型,针对特定的目标体,重建相应的地质模型。具体方法:将 BSR 认为是一个与地层特征类似的界面,将 BSR 之上 20m 地层速度增加(变化为  $+50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),BSR 之下 20m 假定速度下降(变化为  $-50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),建立二维拟三维模型(图 2)。

##### 2)射线追踪

从三维模型中,切取通过目标体的二维测线剖

面, 利用射线追踪法, 模拟 OBS 分布形态以及分布间距, 分析纵、横波接收情况, 编写相应的软件, 计算不同 OBS 接收线段之内的覆盖次数与均匀程度, 选取最佳的覆盖效果(图 3)。

软件模拟时, 选取 OBS 分布间距为 100m、

200m、300m、400m、500m、600m、700m、1000m 等几组数据, 分别计算落入不同距离的线段内的叠加次数, 并用色标进行表示, 然后, 分析叠加次数的均匀程度和覆盖效果, 最终确定最佳的观测系统参数。

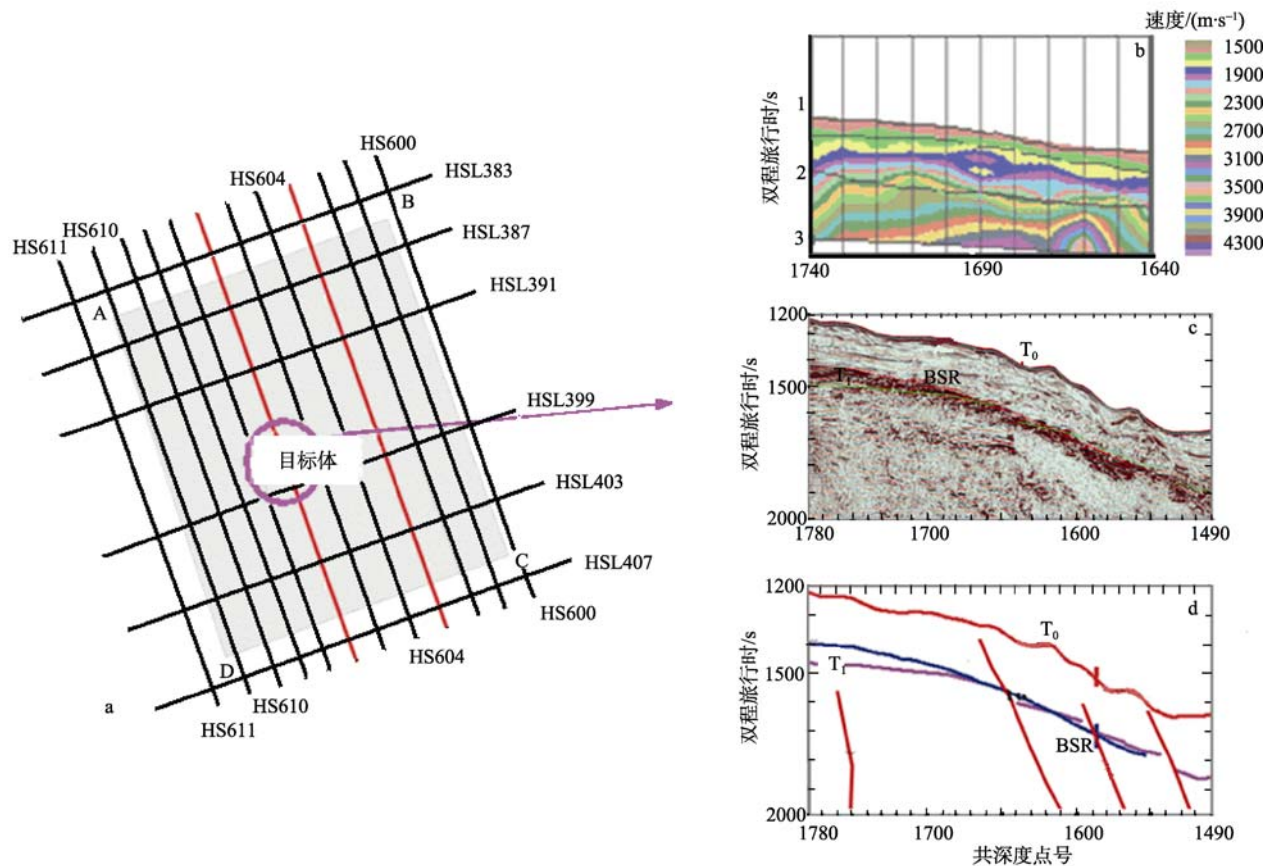


图 1 联合采集区目标体优选与二维地质模型构建

a. 天然气水合物二维地震调查工区示意图(图中 A、B、C、D 分别表示工区角点), 直线为测线, 测线对应的字符为测线编号; b. 天然气水合物目标体速度剖面; c. 天然气水合物高分辨率地震剖面; d. 天然气水合物地震调查二维地质模型

Fig. 1 Target optimization in the joint acquisition area and 2D geological model construction

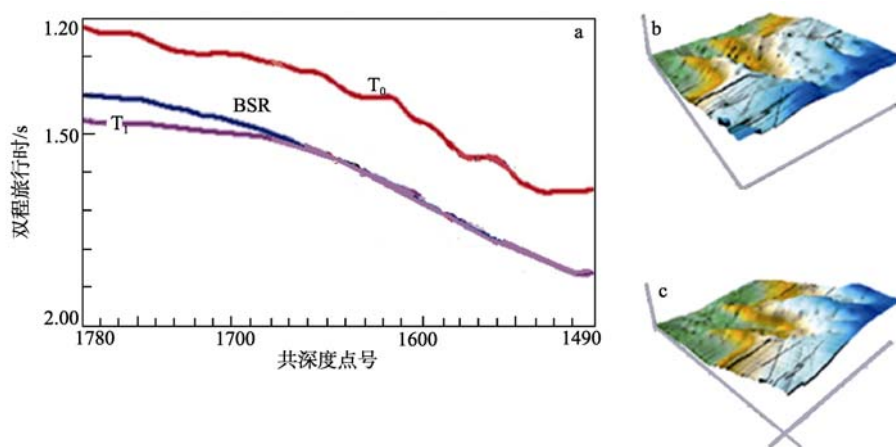


图 2 二维拟三维地质模型重建

a. 穿过水合物研究目标体二维地震测线(HS606)的简化地震模型; b.  $T_0$  层三维深度剖面示意图; c. 似海底反射(BSR)三维深度剖面示意图

Fig. 2 Geological model construction of 2D to pseudo-3D

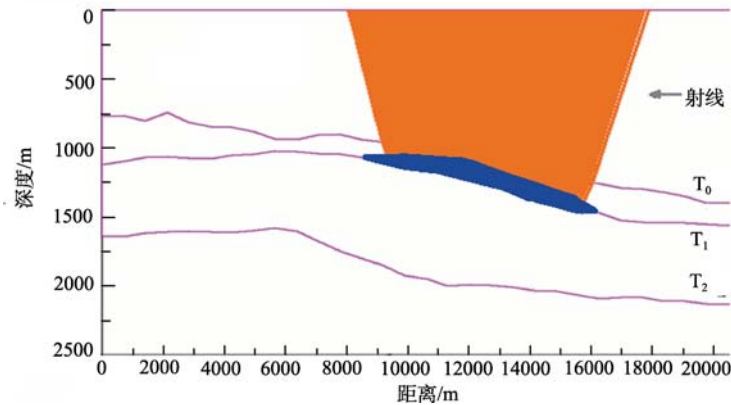


图3 BSR层的反射转换波射线分布和叠加次数图

图中蓝色表示水合物矿体(剖面), 射线所指的红色区域表示所对应的反射转换波射线分布区域

Fig. 3 Illustration of ray distribution of converted waves at BSR and the stack times

针对特定目标体 1 或者目标体 2, 穿过研究目标体, 切取任意方向的二维测线, 然后进行线段内的叠加次数的模拟试验。当 OBS 分布间距在 500m 以下时(300—400m 效果最佳), 线段内的叠加次数达到 30 次以上, 并且叠加次数的分布比较均匀。最后确定 OBS 台站之间的分布小于 500m 时效果较好, 且分布间距愈小, 所使用的 OBS 台数愈多, 叠加次数愈高, 覆盖效果愈好。

综上所述, 针对天然气水合物目标体, 结合软件模拟和实际投放时海流等因素所造成的投放误差的影响, 最终所确定的 OBS 最佳观测方案如下: 1) 分布间距应该在 500m 以下, 300—400m 效果最佳; 2) 分布方式为长方形或正方形的矩阵分布方式。

## 2.2 双聚焦理论观测系统参数优选原理

地震波在介质中的传播和反射过程可由 WRW(Wave-Down-Spread Reflecting Wave-Spread)物理模型进行描述(图 4), 地震波的传播可以划分为 5 个独立的步骤: 1) 震源激发, 震源强度用  $S$ (Source) 进行抽象表示; 2) 地震波向下传播, 用下行传播算

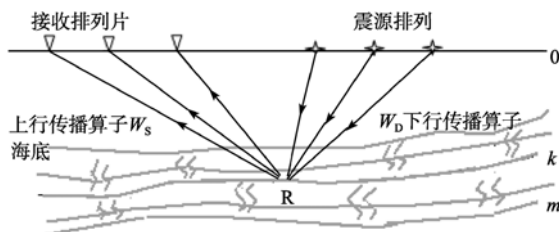


图4 反射界面的 WRW 正演模型剖面

$m$  表示反射界面,  $R$  表示放射界面  $m$  上的某个反射点,  $W_d$  表示下行传播算子,  $W_s$  表示上行传播算子,  $D$  表示接收排列片接收反射波算子变量,  $S$  表示震源激发所产生的地震波强度

Fig. 4 The WRW forward model at the reflecting interface

子  $W_d$ (Operator of Wave-Down-Spread)进行抽象表示; 3) 地震波在界面反射, 用反射算子  $R$ (Operator of Reflecting)进行抽象表示; 4) 地震波向上传播, 用上行算子  $W_s$ (Operator of Wave-Spread)进行抽象表示; 5) 观测系统数据接收(Data Receiving), 为了避免与反射 Reflecting 混淆, 算子变量用  $D$  进行抽象表示。

对于地下的某一反射界面  $m$ , 其对震源产生的反射波场强度  $P_m$  表示为:

$$P_m = D \cdot W_s \cdot R \cdot W_d \cdot S \quad (1)$$

式中  $P_m$  表示地下的某一反射界面  $m$  对于震源产生的反射波的波场强度(为了方便计算, 结果表示成相对强度, 即比例系数);  $D$  表示海水表面上的阵列接收片算子;  $W_s$  表示地震波上行传播算子, 随着反射界面  $m$  的变化而变化, 取值范围为:  $m-0$ ;  $W_d$  表示地震波下行传播算子, 随着反射界面  $m$  的变化而变化, 取值范围为:  $0-m$ 。

对于地下所有界面对震源产生的反射波波场强度总和  $P$  可以表示为:

$$P = D \cdot \sum_{k=1}^m [W_s \cdot R \cdot W_d] \cdot S \quad (2)$$

$k=1, 2, 3, \dots, m$ ; 0 表示第 0 层地层, 在海洋勘探中表示海水层;  $m$  表示第  $m$  层地层。

在双聚焦估算观测系统成像分辨率中, 引入检波器阵列聚焦束(focal detector beam)来估算检波器的成像分辨率, 引入震源阵列聚焦束(focal shot beam)来估算震源的成像分辨率。

当采用“检波器阵列聚焦束”或“震源阵列聚焦束”方法进行聚焦效果分析时, 为了节省计算机运行的时间, 以便在较短时间之内达到模拟效果,

一般在已构建的三维地质模型的基础上, 首先在一个方向切取二维地质剖面(反射界面的 WRW 正演模型剖面), 然后切取正交方向上另一二维地质模型, 最后重建双聚焦三维立体数据体。

对于相互正交的任何一个 WRW 正演模型剖面,  $k$  表示地层编号(取值范围为  $0 \sim m$ ,  $m$  为最深的目的层编号), 对于  $m$  层上的目标点, 用  $(j, m)$  表示, 其中  $j$  表示水平方向目标点的编号(取值为  $0, 1, \dots, 1000$ )。

#### 1) 检波器阵列聚焦束

计算检波器阵列聚焦束的出发点是用(1)式模拟单个目标点  $(j, m)$  的绕射。再用震源阵列聚焦算子  $F$  将炮点聚焦到目标点  $(j, m)$  上。这样就形成 CFP 道集(共聚焦点道集, common focal point)。CFP 道集可以看作震源位于目标点  $(j, m)$  上, 检波点按观测系统的检波器位置布置于地表, 所测得的地震记录。在海洋地震勘探中, OBS 用于接收地震波, 因此, 其功能相当于检波器接收排列。另外, 观测系统设计时, 模拟将 OBS 置于海底(或某个目的层  $k$  上), 然后, 再向下延拓 CFP 道集到地层  $m$  深度。通过计算地层  $k$  到地层  $m$  上两点之间的波场强度, 即可设计 OBS 布置的最佳位置。

$$P = F \cdot P_j \quad (3)$$

$P$  表示地层  $m$  上目标点  $(j, m)$  到地层  $k$  上目标点  $(j, k)$  之间的波场强度, 即  $k \sim m$  层之间波场;  $F$  为向下延拓算子, 表示反向外推波场从地表(水面)处经过每个第  $k$  层到第  $m$  层的深度, 取值范围:  $k \sim 0$  之间的算子;  $P_j$  表示  $0 \sim m$  之间的总波场强度。第一步震源阵列聚焦和第二步向下延拓 CFP 道集总体效应。可以看作是: 震源置于目标点激发, 检波器在目标点周围一定范围内接收。因为在第一步中震源阵列已经聚焦在目标点上, 所以炮点对检波器阵列聚焦束的影响远小于检波器排列对其的影响。这就是检波器阵列聚焦束能反映检波器阵列对目标点成像影响的原因。因此可用检波器阵列聚焦束来评估观测系统中检波器阵列对目标点的成像分辨率。

#### 2) 震源阵列聚焦束

震源阵列聚焦束描述炮点聚焦的属性。跟检波器阵列聚焦束计算相似, 计算震源阵列聚焦束的出发点是用(1)式模拟单个目标点  $(j, m)$  的绕射。再用检波器聚焦算子  $F$  将检波器聚焦到目标点  $(j, m)$  上。这样就形成 CFP 道集。然后, 再向下延拓 CFP 道集到  $m$  深度。观测系统设计时, 模拟将 OBS 置于目标点  $(j, m)$ , 震源置于水面上(第  $0$  层), 然后, 再向下延拓

CFP 道集到  $m$  深度。通过计算地层  $m$  到地层  $k$  上的两点之间的波场强度, 即可得到最佳观测系统参数。

$$P = P_j \cdot F \quad (4)$$

上式中  $P$  表示地层  $m$  与  $k$  目标点之间的波场强度(用相对强度表示, 即比例系数表示), 取值范围:  $m \sim k$  层之间波场;  $F$  为向下延拓算子, 表示反向外推波场从地表经过每个  $k$  层到  $m$  层的深度, 取值范围  $0 \sim k$ ;  $P_j$  表示  $m \sim 0$  之间的总波场强度。第一步检波器聚焦和第二步向下延拓 CFP 道集总体效应可以看作是: 震源在目标点周围一定范围内激发, 检波器置于目标点接收。因为在第一步中检波器已经聚焦在目标点, 所以检波器对震源阵列聚焦束的影响远小于震源排列对其的影响。这就是震源阵列聚焦束能反映震源分布对目标点成像的影响的原因。因此可以用震源阵列聚焦束来评估观测系统中震源对目标点的成像分辨率。

#### 3) 评价准则

基于双聚焦理论所研制的软件的评价准则如下: 主瓣分辨率要高(分辨率曲线中最大极值点与左右第一极小值点间距离大者表示分辨率); 主瓣能量要大, 且聚焦点的位置应为目标点的位置; 主旁瓣能量比(主瓣能量与旁瓣能量的比值)要大。

OBS 观测系统设计时, 首先将震源阵列置于目标点位置, OBS 当成接收点分布于目标点的周围的海底附近, 接收地震信号, 当聚焦波束主瓣能量大且波束位置不变, 旁瓣能量小且旁瓣数少时, 表示 OBS 的分布间距合理, 从而达到 OBS 观测系统设计的目的。

#### 4) 聚焦模拟

首先, 在以往调查的基础上, 建立天然气水合物目标层与相邻地层简化的地球物理模型, 将 BSR 简化为平行海底的地层。假定炮间距与线间距分别为  $25\text{m}$ (与野外采集一致), 然后根据不同 OBS 分布间距进行聚焦模拟。

#### 5) 参数确定

图 5 为聚焦模拟效果图。当 OBS 分布间距为  $500\text{m}$  时出现明显旁瓣, 但模拟震源的位置并未发生变化(图 5b); 当分布间距为  $750\text{m}$  时模拟震源的位置发生变化, 成像效果明显变差(图 5c); 而当 OBS 分布间距变小时模拟成像效果愈来愈好(图 5a)。

在南海北部陆坡进行天然气水合物三维地震与海底地震联合采集试验时, 由于试验海域海流变化大、速度快, OBS 投放位置精度误差较大。据试验统



计, 如果 OBS 采用海面投放方式, 位置误差为 100—500m。另外, 观测系统设计时需要考虑 OBS 台站不可

能太多。综合上述因素, 双聚焦理论的模拟结果表明: OBS 分布间距应小于 500m, 并且愈小愈好。

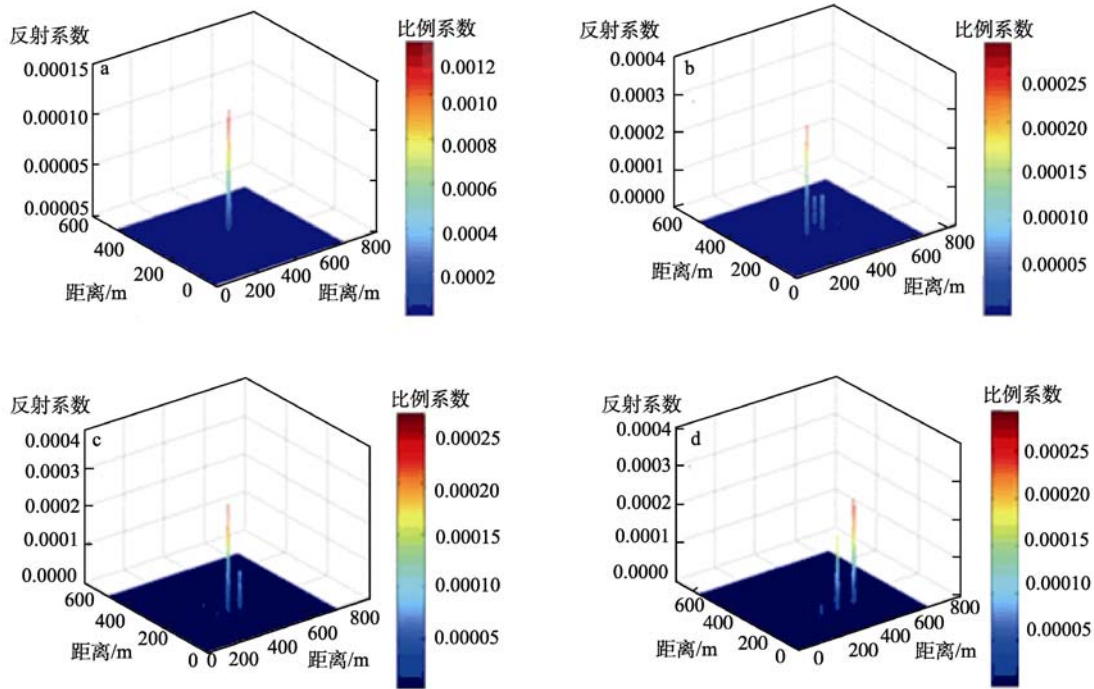


图 5 不同 OBS 分布间距情况下双聚焦三维效果模拟图

a. 分布间距 50m 时  $5 \times 4$  阵列 OBS 聚焦效果图; b. 分布间距 500m 时  $5 \times 4$  阵列 OBS 聚焦效果图; c. 分布间距 750m 时  $5 \times 4$  阵列 OBS 聚焦效果图; d. 分布间距 1000m 时  $5 \times 4$  阵列 OBS 聚焦效果图

Fig. 5 Simulated double focus graph with different OBS spacing

### 2.3 波动方程的正演模拟法

射线追踪是从运动学的角度模拟地震波的主要能量传播的路径和方位角等信息, 这些信息可用于分析统计射线分布以及面元的叠加次数。射线追踪模拟的优点是可有选择地追踪 PP 反射波或 PS 转换波, 且对于较简单的模型(如层状模型)追踪的速度快, 用的时间短; 射线追踪模拟的缺点是一般存在射线盲区, 很难适应任意复杂的模型。

求解波动方程是从动力学的角度模拟地震波的传播过程。根据勘探目标区的地质模型进行波动方程正演模拟, 帮助分析和解释勘探目标区的实际地震资料中的各种波, 以便有的放矢地进行实际地震资料的处理。当然, 也可按所设计的观测系统, 通过波动方程正演模拟得到一套模拟地震资料, 再对其进行处理, 根据处理结果, 即可用于检验处理方法和处理流程是否得当, 也可说明观测系统本身设计是否合理。

波动方程正演模拟的优点是可同时模拟出直达波、PP 反射波或 PS 转换波等各种类型的波, 且可适应非常复杂的地质模型; 缺点是非常费时间。

本文波动方程正演模拟研究主要是为了分析说

明 OBS 能接收到的各种波及其能量与观测系统的关系。在地震波场数值模拟中, 除了使用二阶位移波动方程外, 还常采用一阶应力-速度波动方程, 其主要优点是无须对介质的弹性常数进行空间求导, 因此, 它常被用于复杂介质中的地震波场数值模拟。再由于应力-速度波动方程中仅含一阶偏导数, 容易提高差分近似的阶, 达到提高数值模拟精度的目的, 所以常采用交错网格有限差分法求解此方程。

无论是在各向同性介质中, 还是在横向各向同性介质中, 弹性波场的交错网格有限差分法数值模拟的基本过程是: 第一步, 将介质中相应的地震波传播方程表达成一阶应力-速度方程, 此时, 方程仅含应力、速度变量关于时间或空间变量的一阶偏导数; 第二步, 将应力、速度变量交错地分布在模型的网格点上; 第三步, 将方程中的所有一阶偏导数用二阶或高阶差分近似, 得到相应的差分方程; 第四步, 将时间变量离散, 随着时间的步进, 根据差分方程循环交替地计算各网格点上的应力或速度。

图 6 为波动方程正演模拟的结果(6a)与 OBS 实际接收资料(6b)的效果对比图。正演模拟结果可以

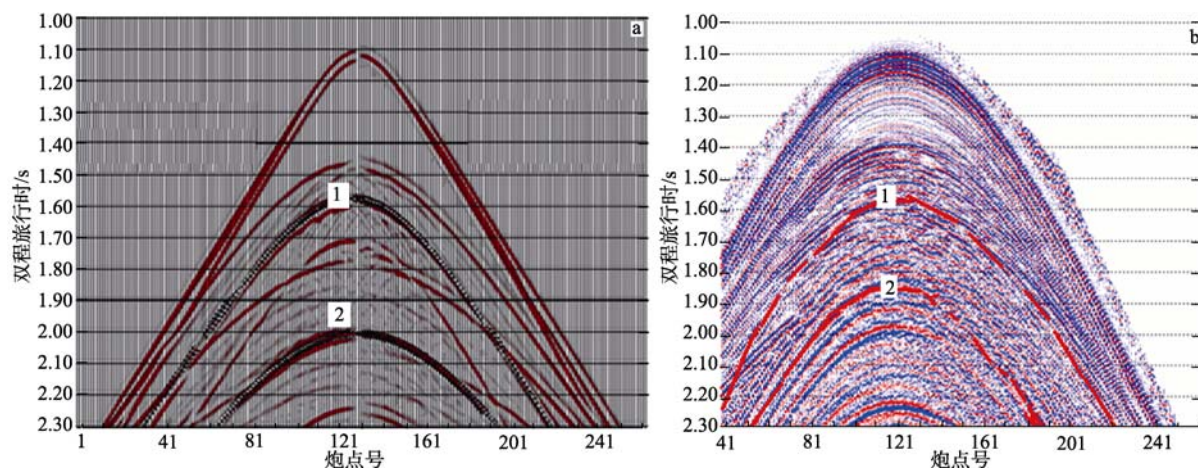


图 6 波动方程正演模拟结果与 OBS 实际接收资料(X 分量)的效果对比图

a. 波动方程正演模拟结果剖面; b. OBS(X 分量)的实际接收剖面。图中的白色方框“1”表示  $T_1$  转换波; “2”表示  $T_2$  转换波

Fig. 6 Comparison between the forward simulation of wave equation and the acquired data (X component) by OBS

帮助分析野外 OBS 数据的接收效果, 对野外采集具有较好的指导作用。

### 3 野外资料的采集效果

近年来, 由于横波资料对水合物含气构造具有较好的成像效果、纵横波波形反演可以获得更加精细的速度结构信息, 因此, 三维地震勘探<sup>[17-18]</sup>与海底地震勘探技术在海洋水合物地震勘探中越来越得到重视<sup>[19-20]</sup>。

目前, 美国、俄罗斯、德国、意大利、日本等国科学家在天然气水合物地震调查中广泛使用了三维地震与海底地震联合勘探技术, 对水合物成因、形态、BSR 等标志特征、储量预测进行了大量的研究工作, 取得了令人满意的成果, 例如, 欧盟等多国科学家在挪威外海斯瓦尔巴特海域采用三维(和二维)地震与海底地震联合勘探的方法, 取得了 P-P、P-S 波资料, 对水合物的速度结构、各向异性、含水合物地区的岩性结构进行综合研究, 为水合物储量预测提供丰富的多波勘探信息<sup>[21-25]</sup>。

2008—2009 年我国科学家在南海北部陆坡进行了天然气水合物三维地震与海底地震联合采集技术试验。激发震源为 540in<sup>3</sup> 的 GI 枪组合“点震源”系统, 炮间距为 25m, 线间距加密至 25m; 试验中一共采用了 28 台 OBS, 针对天然气水合物目标体, OBS 采用长方形矩阵进行布设, 分布间距为 500m。采集之后对天然气水合物 OBS 资料进行了综合处理, 处理流程见图 7。

图 8 为海底地震数据 X 分量剔除多次波前后的剖面效果对比图, 图 8b 为多次波剔除后的海底地震水平分量的剖面效果图。剔除多次波后, BSR 同向轴

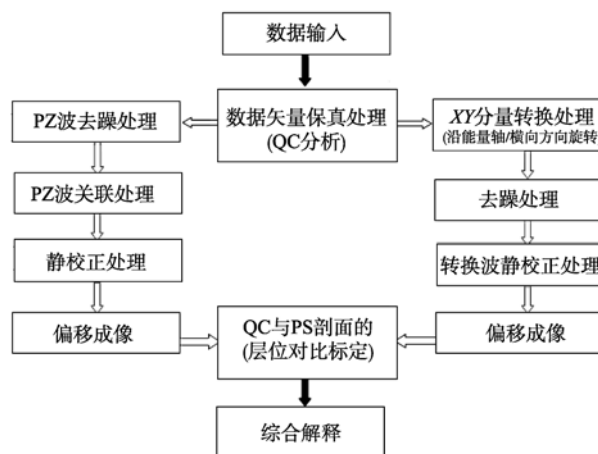


图 7 海底地震数据的处理流程图

Fig. 7 The flow chart for processing OBS data

更加连续, BSR 邻近地层可以更好地分辨。

图 9 为常规地震剖面与海底地震仪 X、Y 分量处理剖面的效果对比图。图 9a 为常规二维地震剖面, BSR 以上地层分辨率不够; 图 9b 为 X 分量海底地震剖面, 图 9c 为 Y 分量海底地震剖面, BSR 邻近地层分辨率得以明显提高, BSR 之下地层(2.20—4.20s 之间的地层)分辨率也明显提高。可见, 对于识别水合物目标体来说, 无论从 BSR 的连续性还是从 BSR 邻近地层分辨率以及更深地层的分辨率来说, 采用联合采集方式, 都更加有利于天然气水合物的研究。

### 4 结论

针对天然气水合物的海底地质条件, 进行了地震观测系统设计理论分析和海上实验, 采用了小于 500m 分布间距的长方形矩阵的 OBS 分布方式, 获取了含水合物地层的纵波、转换横波等多种有效的



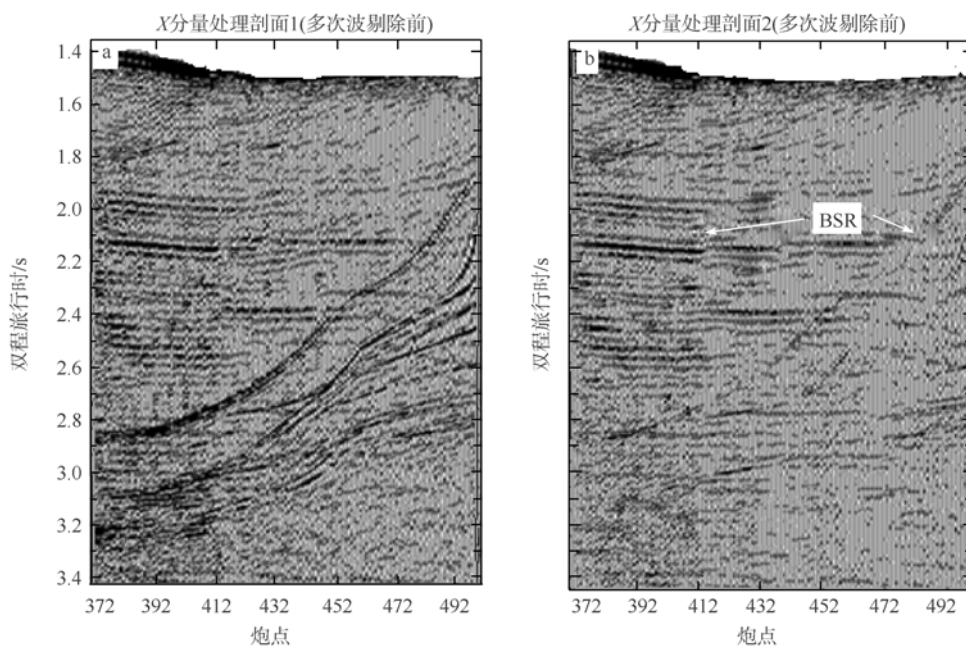


图 8 海底地震数据 X 分量多次波剔除效果图

a. 多次波剔除前 X 分量处理剖面; b. 多次波剔除后 X 分量处理剖面

Fig. 8 Effects of elimination of X component multiple waves from the OBS data

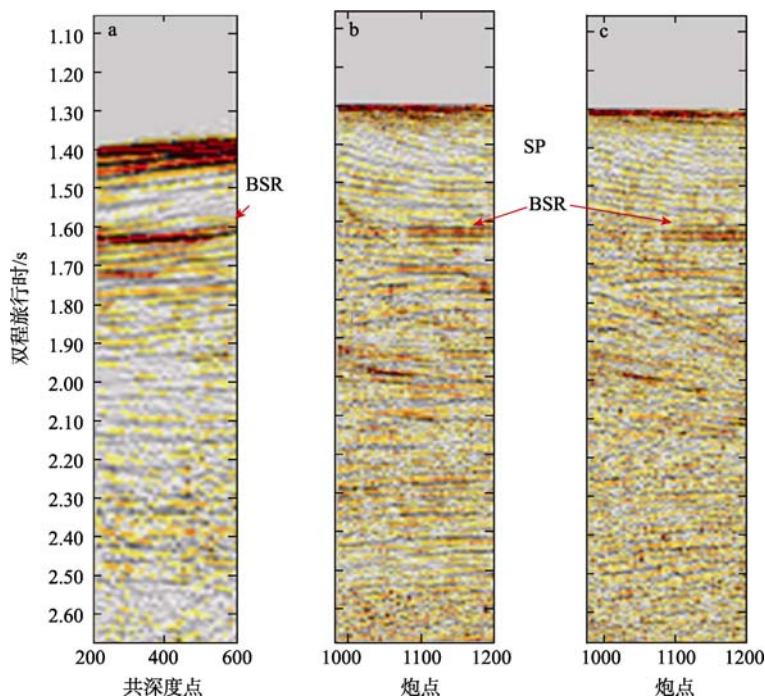


图 9 常规地震剖面与海底地震剖面效果对比图

a. 穿过目标体的一条常规二维地震剖面; b. 海底地震剖面(X 分量); c. 海底地震剖面(Y 分量)

Fig. 9 Contrast of conventional seismic profile to OBS profile

地震波信息, 对天然气水合物矿体的识别描述取得了良好的效果。

#### 参考文献

- [1] SAMBRIDGE M S, KENNETT B L N. Boundary value ray tracing in a heterogeneous medium: a simple and versatile algorithm [J]. Geophysics, 1990, 101: 157-168.  
 [2] PEREYRAET V, LEE W H K, KELLER H B. Solving



- two-point seismic ray-tracing problems in heterogeneous medium, Part 1, a general adaptive finite difference method[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 1980, 70: 79–9.
- [3] VIDALE J. Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions[J]. *Geophysics*, 1990, 55: 521–52.
- [4] VOLKER A W F. Analysis and optimization of 3D seismic acquisition geometries by focal beams[C]//Expanded Abstracts of 70th SEG Mtg, Calgary, Canada: American Society of Exploration Geophysicists, 2000. <http://www.3dsysam.nl/doku.php?id=publications:publications>.
- [5] 狄帮让, 王长春, 顾培成, 等. 三维观测系统优化设计的双聚焦方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(5): 463–471.
- [6] 张光学, 黄有样, 陈邦彦. 海域天然气水合物地震学[M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 27–36.
- [7] HYNDMAN R D, SPENCE G D. A seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B5): 6683–6698.
- [8] 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, 114: 1–8.
- [9] LEE M W, HUTCHINSON D R, AGENA W F, et al. Seismic character of gas hydrates on the southeastern U.S. continental margin[J]. *Marine Geophysical Researches*, 1993, 16: 163–184.
- [10] SUESS E, TORRES M E, BOHRMAN G, et al. Sea floor methane hydrate at hydrate Ridge, Cascadia Margin[M]//PAUL C K, DILLON W P. *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection*. Washington, D C: American Geophysical Union, 2001: 87–98.
- [11] HORNBAUGH M J, HOLBROOK W S, GORMAN A R, et al. Direct seismic detection of methane hydrate on the Blake Ridge[J]. *Geophysics*, 2003, 68(1): 92–100.
- [12] VANNESTE M, BATIST M DE, GOLMSHTOK A, et al. Multi-frequency seismic study of gas hydrate-bearing sediments in Lake Baikal, Siberia[J]. *Marine Geology*, 2001, 172: 1–21.
- [13] JOHNSTON R C, REED D H, DESLER J F. Special Report on marine seismic energy source standards[J]. *Geophysics*, 1998, 53(4): 566–575.
- [14] POSEWANG J, MIENERT J. High-resolution seismic studies of gas hydrates west of Svalbard[J]. *Geo-Marine Letters*, 1999, 19: 150–156.
- [15] 张明. 天然气水合物 BSR 的识别与地震勘探频率[J]. *海洋学报*, 2004, 26(4): 80–88.
- [16] 陆敬安. 海洋地震勘探中地震波、鬼波综合效应分析与应用[J]. *海洋技术*, 2006, 25(4): 76–78.
- [17] ANDREAS C, JOHN W P. 陆上三维地震勘探的设计与施工[M]. 俞寿朋, 译. 石油地球物理勘探局, 1996: 17–64.
- [18] CORDSEN A. Narrow-versus wide-azimuth land 3D seismic surveys[J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(8): 764–770.
- [19] NOUZÉ H, LAFOY Y, GÉLI L, et al. First results of a high resolution seismic study of a bottom simulating reflector in the fairway basin, offshore new caledonia[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates, Trondheim, Norway: Norway-ICGH5-Organising-Committee, 2005. [http://d.wanfangdata.com.cn/periodical\\_dzkjqb20060-4006.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/periodical_dzkjqb20060-4006.aspx)
- [20] ACCAINO F, TINIVELLA U. Gas Hydrates and active fluid outflow offshore the Shetland margin [C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates . Trondheim, Norway: Norway-ICGH5-Organising-Committee, 2005. [http://www.gas-hydrate.org.cn/symposium/symp\\_21\\_1.pdf](http://www.gas-hydrate.org.cn/symposium/symp_21_1.pdf).
- [21] HAACKE R R, WESTBROOK G K, PEACOCK S, et al. Seismic anisotropy from a marine gas hydrate system west of Svalbard[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates. Trondheim, Norway: Norway-ICGH5-Organising-Committee, 2005 [http://www.rhul.ac.uk/Earth-Sciences/For-Staff/staff\\_refs.asp?title=Dr&firstname=Ross&familyname=Haacke&YearFrom=1970&st=NOT\\_PhD&YearTo=2014&StaffID=40&offset=8](http://www.rhul.ac.uk/Earth-Sciences/For-Staff/staff_refs.asp?title=Dr&firstname=Ross&familyname=Haacke&YearFrom=1970&st=NOT_PhD&YearTo=2014&StaffID=40&offset=8).
- [22] ROSSI G, MADRUSSANI G, DAVIDE G, et al. Velocity and attenuation 3d tomography for gas hydrates studies: the NW offshore Svalbard case[J]. *Geophysical Prospecting*, 2007, 55(5): 655–669.
- [23] WESTBROOK G K, BUENZ S, CAMERLENGHI A., et al. Measurement of P- AND S-wave velocity, and the estimation of hydrate concentration at sites in the continental margin of Svalbard and the storegga region of Norway[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates . Trondheim, Norway: Norway-ICGH5-Organising-Committee, 2005. [http://www.gas-hydrate.org.cn/symposium/symp\\_21\\_1.pdf](http://www.gas-hydrate.org.cn/symposium/symp_21_1.pdf).
- [24] BOURIAK S, VANNESTE M. AND SAOUTKINE A. Inferred gas hydrates and clay diapers near the Storegga Slide on the southern edge of the Voring Plateau, offshore Norway[J]. *Marine Geology*, 1999, 163 (1/4): 125–148.