

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 05. 014

冷泉活动区气泡羽状流数值模型研究

李灿苹¹, 勾丽敏², 尤加春³, 欧触灵¹

(1. 广东海洋大学海洋遥感与信息技术实验室, 湛江 524088; 2. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083;

3. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

摘要:羽状流对天然气水合物的识别起到了间接指示作用, 为研究冷泉活动区气泡羽状流产生的地震响应, 需建立符合实际羽状流特征的模型。为此, 参考实际羽状流赋存状态, 结合含气泡水体特征, 在已建立模型基础上, 从羽状流气泡的垂直运移规律、分布特点及羽状流外观特征上对模型进行了改进, 先后获得 3 个羽状流模型, 最后的模型Ⅲ更接近实际羽状流赋存特征。通过与实际羽状流的对比, 讨论分析了模型Ⅲ的合理性, 并得出结论: 所建模型体现了实际羽状流气泡的本质特征, 并包含了更为复杂的气泡含量变化, 可用于进一步深入研究羽状流地震响应特征, 也为气泡羽状流的地震识别及天然气水合物的相关研究提供了较好的数值模型。

关键词:羽状流; 冷泉; 天然气水合物; 数值模拟; 偏移成像

中图分类号: P738

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)05-0141-10

天然气水合物具有重要能源战略意义, 水合物的识别和勘探开发是当今科学界研究的热点。近年来, 中国在水合物勘探和开采上取得了一定进展^[1-5], 于 2007 年 5 月 1 日在南海北部成功钻获天然气水合物实物样品, 推测中国海域其他区域存在天然气水合物 27 处^[6]; 2008 年 11 月在青藏高原祁连山脉木里地区永久冻土带钻获了水合物实物样品^[7], 这都证实了我国蕴藏有丰富的天然气水合物资源。

在水合物赋存区域上覆海水中经常发现气泡羽状流, 此现象已通过声呐或地震手段探测到, 如巴伦支海西缘海底^[8]、Cascadia 大陆边缘水合物脊^[9]、鄂霍次克海^[10]、墨西哥湾^[11]、日本海会聚边缘 Naoetsu 盆地中的 UT-04 海岭^[12]及其他海域^[13]、地中海的泥火山^[14]等。羽状气泡携带水合物喷溢出海底, 形成海底“火焰”现象, 在黑海观察到从海底泥火山口溢出的海底羽状流气泡高达 1 300 m^[15]。从羽状流图^[16]中可看到, 羽状流中气泡在上升过程中由于受到洋流、海底地势环境的影响^[17-19], 羽状流表现出形似羽毛状(这也是“羽状流”名称的由来),

有垂直的, 也有倾斜形状。海底羽状流的形成归因于海底冷泉, 即来自海底沉积地层(或更深)的气体以喷涌或渗漏的方式注入海洋中的一种地质现象^[10, 20], 冷泉喷涌到海水中的大量气体便可形成气泡羽状流。由于渗漏型天然气水合物成藏与海底冷泉活动关系密切, 而且海底冷泉活动所产生的气体是影响海洋环境甚至是全球气候变化的重要因素, 因此, 作为冷泉活动直接表现形式的羽状流越来越多地受到科学家们的重视^[21]。

海水与气泡会形成一个明显的波阻抗界面, 当声波在海水中传播遇到气泡时会发生散射^[22], 利用散射成像理论可以识别出水体中的气泡羽状流。目前识别羽状流主要是通过摄影及声呐技术^[8-11]。声呐信号频率可高达数万赫兹, 散射信号能量较强, 所获得的图像分辨率较高, 羽状流清晰可见^[10]。近年来, 刘学伟等发现我国南海某天然气水合物发育区的地震剖面^[23]不仅揭示了气烟囱、断裂构造、典型的 BSR 及空白带等现象, 在其上覆海水中还存在呈垂直条状分布的气泡羽状流地震响应(图 1)。这表明地震方法在检测水体中的气泡羽状流方面具有潜力。虽然地震波的频率较低, 使气泡羽流的散射信号强度、分辨率和成像效果明显逊于声呐信号, 但地震方法勘探范围广, 兼可提供包括水体、海底以及地下不同深度空间范围内丰富的地质和地震波信息, 在区域气泡羽状流检测及其相关天然气水合物研究中具有其他探测手段无可比拟的优势。目前, 该领域的研究刚刚起步, 气泡羽状流地震频带信号的响应机理尚无定论。因此, 有必要建立符合实际气泡

基金项目:国家自然科学基金项目(41306050); 中央高校基本科研业务费专项(2652013122); 广东省科技计划项目(2014A010103030); 广东省自然科学基金(2015A030313617)

作者简介:李灿苹(1977—), 女, 副教授, 主要从事天然气水合物地震勘探数值模拟研究, E-mail: canpinglihydx@163.com

通讯作者:勾丽敏(1972—), 女, 讲师, 主要从事地震资料处理及散射波地震勘探研究, E-mail: goulm@163.com

收稿日期: 2017-06-01; **改回日期:** 2017-07-03. 蔡秋蓉编辑

羽状流特征的数值模型,从而进行地震数值模拟研究,以探究冷泉活动区气泡羽状流产生的地震响应特征,进而为水合物的识别和成藏机制研究提供新的方法和依据。

文献[24]进行了羽状流数值模拟研究的初步探索,建立了羽状流速度模型,为后续深入研究做了准

备。但与实际羽状流赋存状态^[10]相比,文献[24]中的模型较简单。文献[25]又进一步改进了模型,但仍不能够很好地反应出实际羽状流的赋存特点。基于此,本文在文献[24,25]所建模型基础上,对气泡羽状流数值模型进行了系统地建模研究,并对模型的合理性进行了分析。

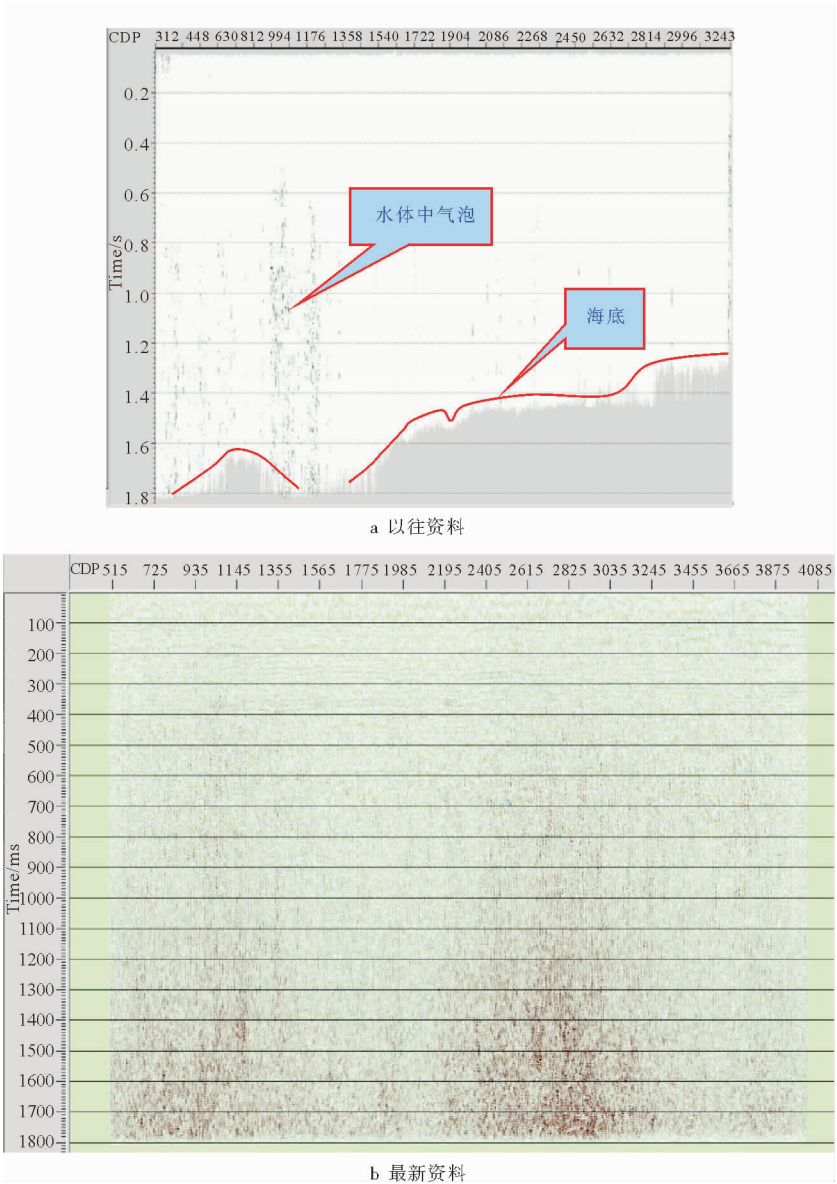


图 1 我国南海某测区羽状流地震偏移剖面(由中国地质大学(北京)刘学伟教授提供)

Fig.1 The seismic migration section in some areas of the South China Sea

(The data is provided by Professor Liu Xuewei from China University of Geosciences in Beijing)

1 初始模型(模型 I)

根据声呐探测的羽状流和实际观测的羽状流气泡大小与分布特征,建立了最初的羽状流模型。

1.1 模型建立基础

如何构建羽状流数值模型,要从如何能引起地震响应角度分析,而产生地震响应的根本是介质中存在波阻抗差。实测结果^[26]显示,水合物分解的气

泡上升到海水中,对海水整体密度的影响很小,意味着在建模时可忽略密度变化,而主要考虑气泡对水体速度的影响。本小节将从计算含气泡海水介质的声波速度着手,进而针对羽状流内气泡的运移和分布特征来构建模型。

1.1.1 含气泡水体的声波速度

液体中溶入气体及空化过程中产生的气泡,会改变液体内的压力分布^[27],从而使液体的声学特性发生改变。以气泡壁处声压和径向振动速度为边界条件,姚文苇^[28]推导出了含气泡介质内声速的表达式:

$$c_m^2 = \frac{K(3K_b - \rho\omega^2 a^2 - \frac{2\sigma}{a}) + \rho\omega^2 R^2 \varphi(K - K_b + \frac{2\sigma}{3a})}{3K_b - \rho\omega^2 a^2 - \frac{2\sigma}{a} + 3\varphi(K - K_b + \frac{2\sigma}{3a})}$$
$$\frac{(\rho + 2\rho_b + \frac{4\sigma}{\omega^2 a^3}) + 2\varphi(\rho - \rho_b - \frac{2\sigma}{\omega^2 a^3})}{\rho(\rho + 2\rho_b + \frac{4\sigma}{\omega^2 a^3}) - \varphi\rho(\rho - \rho_b - \frac{2\sigma}{\omega^2 a^3})} \quad (1)$$

式(1)中 K 、 K_b 、 ρ 、 ρ_b 、 σ 为固定值参量, ω 、 a 、 φ 和 R 为给定可变参量,由此,给定参量,通过此公式可以计算出气泡半径和含量变化的含气泡海水声波速度。

表 1 是公式(1)内各参数的详细说明。

表 1 声速表达式(1)中各参数说明
Table 1 Explanation of parameters in
equation (1) of acoustic velocity

参量	参量含义	取值	单位
C_m	气液混合物的声波速度	—	m/s
K	液体体积模量	2.34×10^9	N/m ³
K_b	气体体积模量	1.4×10^5	N/m ³
ρ	液体密度	1 023	kg/m ³
ρ_b	气体密度	1.29	kg/m ³
ω	频率	25	KHz
a	气泡半径	-	m
σ	液体表面张力	0.073 8	N/m ³
R	假定含气泡两相混合区 为球形时的半径	1.0	m
φ	气泡含量(体积分数)	-	-

1.1.2 羽状流中气泡运移与分布特征

当气体自海底逸出形成羽状流后,羽状流气泡受到海水压力影响,在不断上升过程中具有随机分布的宏观特征,即含气泡海水介质属于随机介质;而且,在上升过程中,随着深度的减小,海水压力变小,由此将导致气泡半径逐渐变大,大到一定程度气泡将破碎或分裂成小气泡。研究表明^[29],小气泡比大

气泡稳定,深水中的气泡比浅水中的气泡稳定,因此,在气泡浮升的某一时刻,大、小气泡呈现出依次分层的特点。同时,海水中声速本身就具有垂直分层的特点^[30],这是由于影响海水声速变化的 3 个要素(温度、盐度和压强)都随深度而变,且都有分层特点的缘故。但不含气泡的海水,这种分层特点的速度变化不大,大约在 30 m/s 以内。

1.1.3 羽状流速度模型的实现思路

实验发现^[30],当空气溶解于水时,声速不会发生变化,即使溶解于水中的空气达到饱和状态也是如此;当空气不是溶解于水中,而是以气泡形式存在于水中时,即使有少量气泡存在,声速都会发生改变。所以,海底地层大量甲烷气体通过运移通道(气烟囱和裂隙等)溢出到海水中形成的羽状流气泡势必会改变所在区域海水的声学特性,即海水的声波速度将发生改变。含气泡海水的声波速度又将与气泡的半径大小以及气泡的含量相关,而公式(1)正体现了气泡含量和气泡半径与海水声波速度之间的关系,给定气泡半径和含量即可得到声波速度。文献[31]详细讨论了气泡半径和含量对含气泡海水介质的影响,为实现羽状流数值模型奠定基础。

综合以上依据,羽状流数值模型中声波速度需满足以下条件^[24]:

- (1) 羽状流中不同位置的气泡含量和气泡半径不同,所以模型内速度应随机变化;
- (2) 速度的变化与气泡含量和气泡半径大小有关;
- (3) 气泡含量和气泡半径随海水深度变化,但在某一深度范围内,气泡半径和气泡含量变化不会很大,所以,将模型沿深度范围分层,每层深度相同,每层内有一背景气泡半径和背景气泡含量,层内其他位置的气泡含量和气泡半径将围绕背景值随机扰动变化;
- (4) 随着海水深度变浅,气泡半径和含量先增大后减小。这是由于气泡上升过程中,随着压力减小,气泡逐渐变大,当达到一定极限时,气泡破碎或分裂成较小气泡,破碎气泡溶入海水中,致使气泡含量逐渐变小,这一过程相当于气泡半径逐渐变小。因此,在气泡上升过程中,气泡半径和气泡含量的变化规律为随着深度的变浅,先增大后变小。

1.2 羽状流速度模型的实现

按 1.1.3 节羽状流速度模型的实现思路,根据我国南海实际羽状流赋存状态(图 1),设定羽状流模型速度体规模为:横向 200 m,纵向深 1 000 m,横纵向网格步长 1 m;模型分为 50 层,每层纵向上采

用 20 个网格,即 20 m。实现羽状流速度模型的具 体算法如图 2 所示。

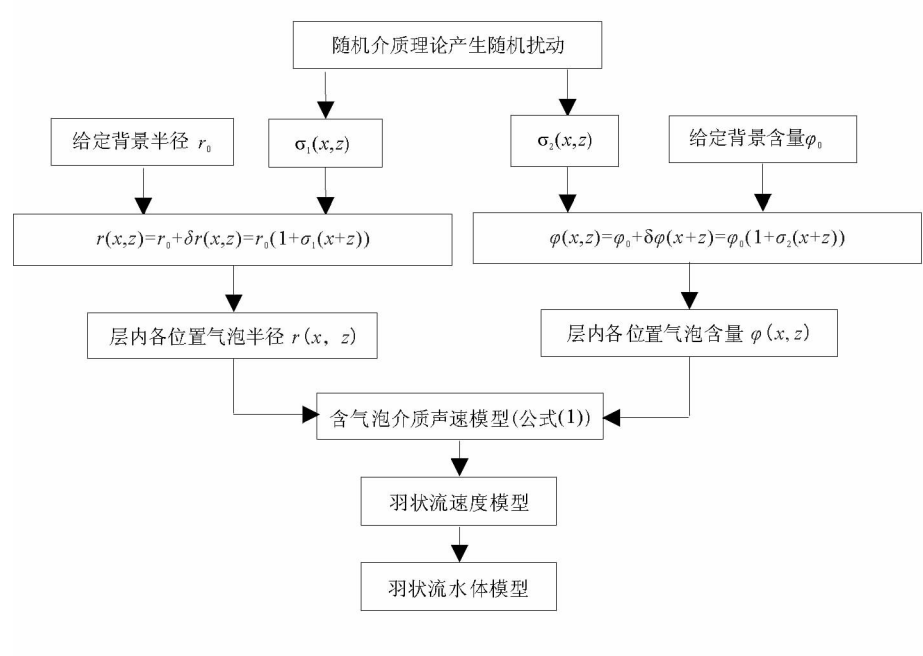
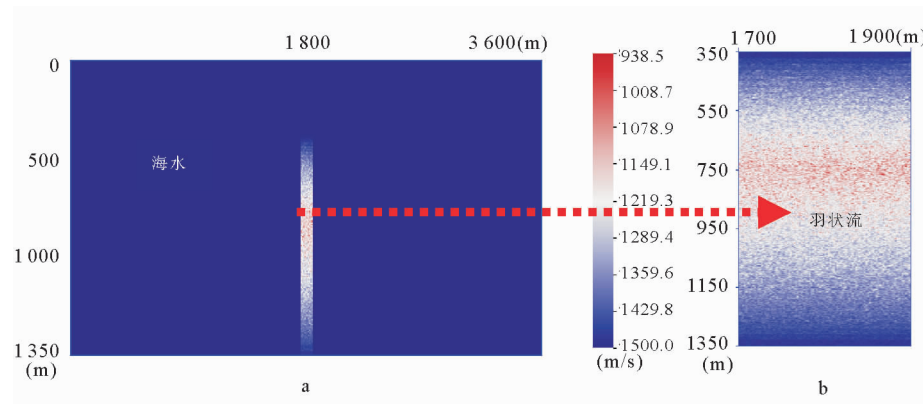


图 2 羽状流模型建立流程图
Fig. 2 The flow chart of plume model building up

根据实际羽状流探测结果^[6,8]可知,羽状流处气泡半径大都处于毫米级,并由此设定模型中背景气泡半径的变化范围是 $2.0 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-4}$ m,背景气泡含量变化范围是 $1.8 \times 10^{-6} \sim 4.8 \times 10^{-5} \sim 1.8 \times 10^{-6}$;再将背景半径或含量按着 50 层均匀离散,由此获得 50 层的背景气泡半径或含量。气泡半径在 1 000 m 深度范围内,从 1 350 m 到 750 m 逐渐增大,从 750 m 到 350 m 范围逐渐减小,即 1 000 m 深度范围内,前 600 m 逐渐增大,后 400 m 逐渐减小。由于此处涉及的气泡含量为体积含量,故气泡半径增大或减小也意味着气泡含

量也相应增大或减小。
由随机介质理论产生随机扰动 $\sigma(x, z)$ ^[32],将背景气泡半径 r_0 及含量 φ_0 代入
$$r(x, z) = r_0 + \delta r(x, z) = r_0(1 + \sigma_1(x, z)) \quad (2)$$
$$\varphi(x, z) = \varphi_0 + \delta \varphi(x, z) = \varphi_0(1 + \sigma_2(x, z)) \quad (3)$$
得到模型中各位置的气泡半径和气泡含量,再代入公式(1)即得到羽状流速度。最后将羽状流置于“海水”中,即将羽状流速度体的左、右及上上区域以均匀海水速度 1 500 m/s 进行充填,从而实现了羽状流水体模型,如图 3 所示^[24]。



a. 水体模型; b. 羽状流

图 3 羽状流模型 I^[24]

Fig. 3 Model I of plume

a. The water body model; b. The plume

1.3 模型 I 的缺陷

分析最初建立的羽状流模型(图 3),还是存在一定缺陷,具体如下:

缺陷(1):通过对文献[26,29,31,33]结果的分析 and 进一步推导,得出以下结论:半径 0.5 mm 的气泡上升 260 m 可以增大到 5 mm,而海水中气泡半径达到 5 mm 就要破碎。模型 I(图 3)中,羽状流深度范围是 1 000 m,气泡半径和含量在整个 1 000 m 深度范围内先增大后减小,即气泡上升到 600 m 才开始破碎,这与以上结论不相符。因此,模型 I 中气泡半径和含量在深度上的变化规律不合理。

缺陷(2):实际的羽状流(图 4^[10])受到海水压力的影响,气泡破碎或分裂成小气泡,从而形状通常为下宽上窄的羽毛状或窄的半椭圆状,且受洋流影响,有的呈现倾斜状。模型 I 的外形为简单的长方形,其外观特征与声呐探测的实际羽状流(图 4^[10])相比相差较大,因此,模型 I 的外观形态也需进一步改进。

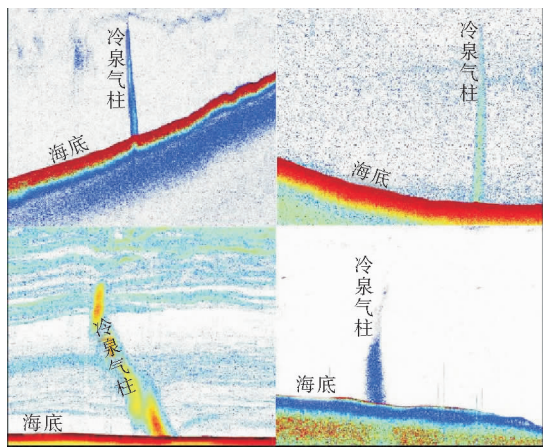


图 4 鄂霍次克海冷泉气泡羽状流^[10]

Fig. 4 Cold seepages and bubble plumes discharged from the Okhotsk Sea

2 重构模型(模型 II)

针对模型 I(图 3)所存在的缺陷(1),依据气泡上升过程中的垂向运移规律与分布特征修改 1 000 m 深度范围内气泡的变化状态,建立了模型 II。

2.1 改进方案

根据文献[26,29,31,33]所得结论,气泡从海平面以下 1 350 m 上升到 350 m,半径不可能就经历一次“先增大再减小(增大到一定程度破碎或破裂)”

的过程。因此,将原羽状流模型(图 3)1 000 m 深度范围分 3 个周期(即 3 个变化过程),每个周期气泡半径和含量依然是先增大后减小。考虑到气泡在上升过程中经历破裂为小气泡的过程,气泡半径也将逐渐变小,由文献[26,29,31,33]结果的分析 and 进一步推导所得结论(半径 0.5 mm 的气泡上升 260 m 可以增大到 5 mm,而海水中气泡半径达到 5 mm 就要破碎),3 个周期从深到浅的顺序,其深度依次分别为 420、340 和 240 m。每个周期内的气泡半径和含量纵向变化原理和模型 I 相同,即上升到一定高度后,气泡开始破碎或分裂成小气泡,导致半径减小,含量也随之减小(含量是体积含量,故也随之减小);单个周期每层内气泡半径和含量依然围绕背景气泡半径和背景含量随机变化,与模型 I 原理相同。

改进的羽状流(模型 II)声波速度实现算法与模型 I 相同,只是将原有模型纵向上分成 3 个周期,而每个周期深度上又遵循着气泡半径和含量先增大后减小的规律。

模型 II 中羽状流 3 个周期(由浅到深顺序)气泡背景半径和背景含量取值如下:

第 1 周期:气泡背景半径变化范围是: $4.6 \times 10^{-4} \sim 4.6 \times 10^{-3} \sim 4.6 \times 10^{-4}$ m,背景气泡含量变化范围是 $1.8 \times 10^{-6} \sim 4.6 \times 10^{-5} \sim 1.8 \times 10^{-6}$ 。

第 2 周期:气泡背景半径变化范围是: $4.8 \times 10^{-4} \sim 4.8 \times 10^{-3} \sim 4.8 \times 10^{-4}$ m,背景气泡含量变化范围是 $1.6 \times 10^{-6} \sim 4.8 \times 10^{-5} \sim 1.6 \times 10^{-6}$ 。

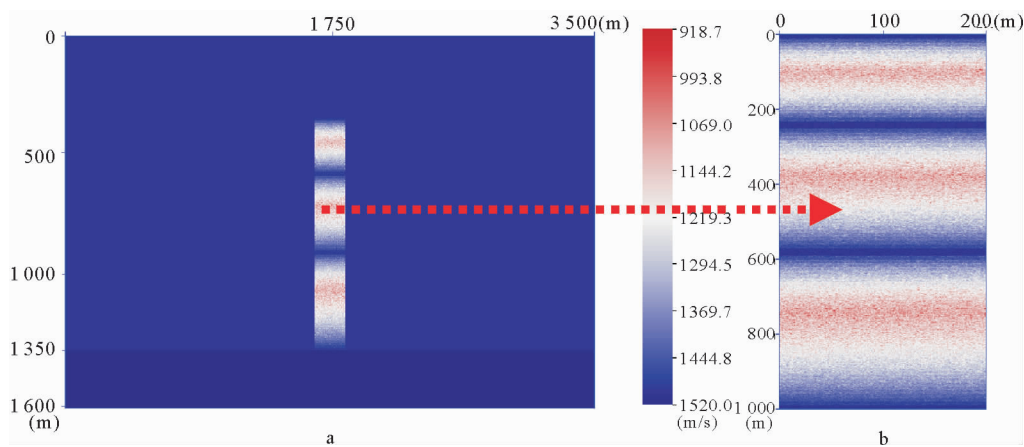
第 3 周期:气泡背景半径变化范围是: $5.0 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-4}$ m,背景气泡含量变化范围是 $1.5 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-6}$ 。

考虑到随着海水深度变浅,压力减小,气泡半径增大,含量增加,同时伴随着气泡破碎成小气泡以及气泡个数变化等现象,所以 3 个周期的背景半径和含量起止数值不同,总体依次变小。

2.2 模型实现

根据以上改进方案,实现了羽状流模型速度体。为了后期能够获得较好的成像效果,在原模型底部加了 250 m 的均匀层(速度 1 520 m/s),相当于海底一均匀薄层,最终实现的羽状流水体模型,如图 5^[26]所示。

图 5 所示羽状流水体模型规格为:横向 3 500 m,纵向 1 600 m,横纵向网格 1 m;羽状流横向位于模型正中间,即位于 1 650~1 850 m 范围内,纵向位于 350~1 350 m 深度范围;羽状流区域横向 200 m,纵向 1 000 m,如图 5b 所示。



a. 海水及羽状流； b. 羽状流
图 5 重构的羽状流模型（模型 II）^[26]

Fig. 5 A plume model (Model II) was reconstructed
a. Seawater and plume; b. The plume

与羽状流模型 I 比较,模型 II 更符合羽状流气泡在水体中的垂直分布状态,但形状上还是与模型 I 相同,因此,羽状流形状的实现还需进一步改进。

3 重构模型(模型 III)

根据 1.3 节分析的模型 I (图 3)所存在的缺陷 (2),对羽状流的外观形态进行了改进,建立了模型 III。

3.1 改进方案

为使羽状流模型的外观形态更加贴近实际赋存特点,在模型 II 的基础上,利用一个可调倾斜度的椭圆方程来实现垂直和倾斜形状的羽状流。倾斜的椭圆方程^[34,35]在 MATLAB^[36]中的语句为:

$$Y = (y - 1\ 750)/b; \quad \% \text{椭圆横向 } b = 200,$$

1 750为羽状流横向中心位置

$$X = (x - 1\ 350)/a; \quad \% \text{椭圆纵向 } a = 500,$$

1 350为羽状流纵向深度位置

$$k = [Y \times \cos(\varphi) + X \times \sin(\varphi)]^2 + [X \times \cos(\varphi) + Y \times \sin(\varphi)]^2 - 1 \quad (4)$$

具体实现过程:首先给定椭圆的倾斜角度 φ ,再通过 MATLAB 语句循环判断式(4)中 k 值,若 $k > 0$,则在椭圆外部将数据填充为均匀海水速度(1 500 m/s),否则保留羽状流原有速度数据;再调整椭圆长轴 b 和短轴 a ,改变倾斜角度 φ 便可实现任意角度倾斜的羽状流形状。

3.2 模型实现

根据公式(4)及其实现过程,获得了垂直的和倾

斜的羽状流速度模型,如图 6 所示。

与图 4 中实际羽状流的外观形态相比,图 6 中的羽状流模型较模型 I 和模型 II 更接近实际水体中羽状流的形态:羽状流在上升过程中,随着海水深度变浅,压力变小,气泡破碎或分裂,导致气含量降低,从而顶部变窄,而且当洋流冲击力大时会发生倾斜。

4 模型 III 的合理性分析

模型的地震响应特征是气泡羽状流建模时所遵循的重要原则,模型地震响应特征是真实介质本质特征的最直接的外在表现形式,因此,地震响应特征可用于模型合理性评价。鉴于此,采用基于模型 III 的气泡羽状流地震正演模拟获得叠前炮集记录和深度域偏移叠加剖面,以羽状流声呐图像和实测的羽状流成像结果为参考标准,从地震响应特征这一视角进行对比,验证模型 III 的合理性。

4.1 模型 III 的正演模拟与成像处理

为了简便起见,选用垂直形状(倾斜角度为 0°)、一个周期的模型 III 进行正演模拟,其速度模型如图 7 所示。由于只设计一个周期,故水体模型规格也做了相应修改:羽状流区域深度 300 m,宽度 100 m;水体模型横向 1 000 m,深度 400 m,海底加 20 m 均匀薄层(速度 1 700 m/s)。

采用有限差分解二维声波方程的方法对该模型进行正演模拟,具体采集参数如表 2 所示。

正演模拟炮集记录如图 8 所示,利用真实速度体做叠前深度偏移所获得的偏移叠加剖面如图 9 所示。

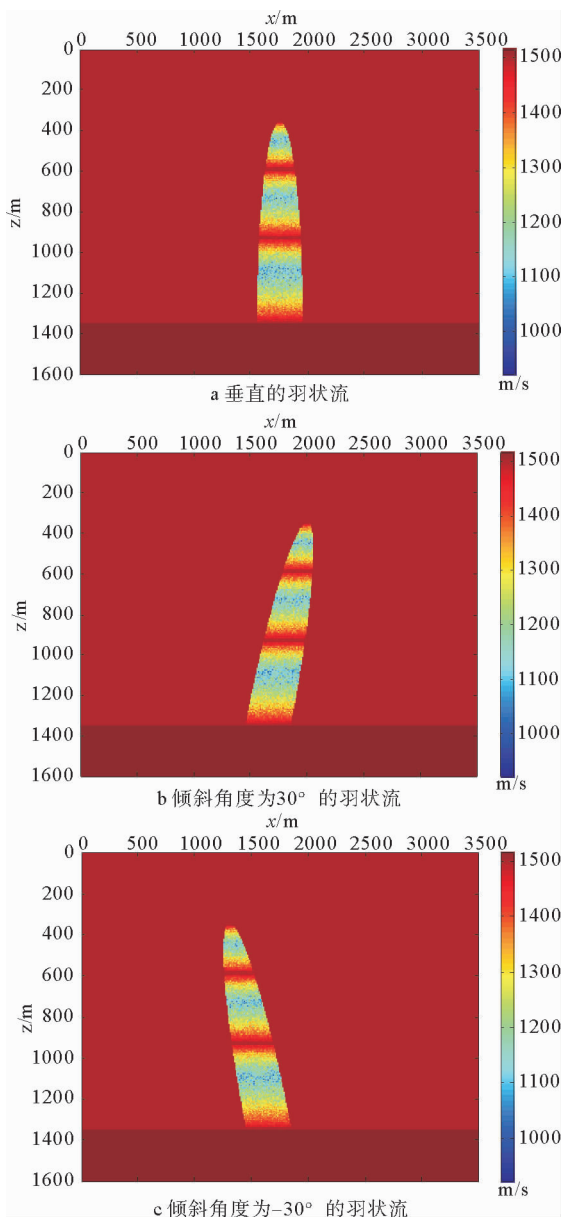


图 6 不同倾斜角度的羽状流水体模型
Fig. 6 A plume waterbody model (Model III) with different angles of inclination

由图 8 和图 9 可见,气泡羽状流可以产生地震响应,且炮集记录中羽状流所在位置的地震波场具有明显的散射波场特征^[24]。炮集记录和偏移叠加剖面(图 8 和图 9)中羽状流的散射波场特征与图 1

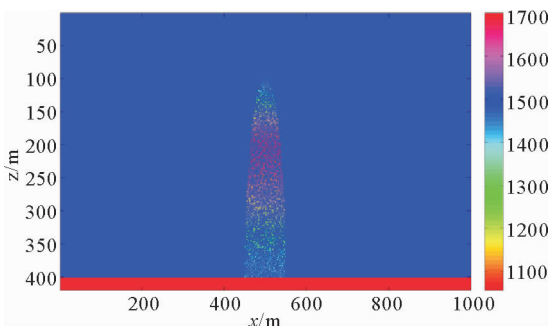


图 7 模型 III 垂直形状、一个周期的羽状流水体模型
Fig. 7 The plume water body model (Model III): vertical shape and one cycle

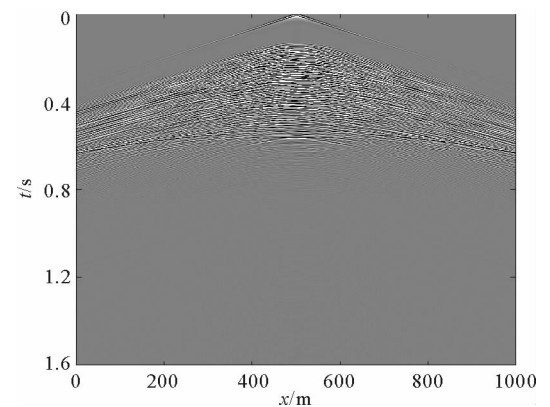


图 8 模型 III(图 7)第 50 炮地震记录
Fig. 8 The seismic record of the 50th shot corresponding to Model III in Fig. 7

和图 4 中实际羽状流地震剖面中含羽状流区域波动现象相对应,即羽状流气泡发育区域散射波能量强,其他区域能量弱,而羽状流区域散射波能量的强弱与气泡半径大小及气泡含量有关,气泡含量越高,能量相对越强。同时,羽状流地震频带范围的散射波能量变化与声呐散射能量强弱变化规律基本一致,表明该模型体现了羽状流中气泡的随机分布状态。

4.2 模型合理性分析

与羽状流模型(图 7)相比,图 9 的羽状流外围

表 2 正演模拟采集参数
Table 2 Acquisition parameters of forward simulation

测线长度/m	深度/m	网格剖分	震源主频/Hz	炮间距/m	总炮数	炮点深度/m	道间距/m	排列长度/m	最小偏移距/m	记录长度/s	采样率/ms
1 000	400	1 m×1 m	140	10	101	0	1	1 000	0	1.6	0.2

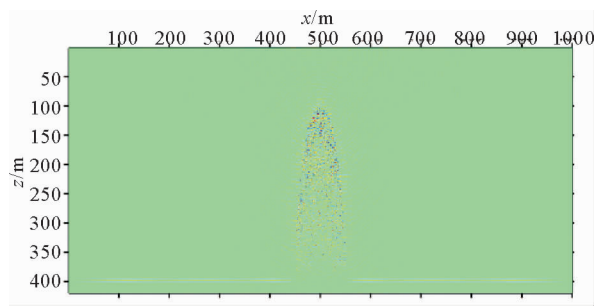


图 9 模型Ⅲ(图 7)偏移叠加剖面
Fig. 9 The migration stacked section
corresponding to Model Ⅲ in Fig. 7

轮廓清晰、能量归位较好,内部能量强弱变化有致,偏移叠加剖面成像效果较好。对比图 10 所示挪威斯瓦尔巴特群岛多束气泡羽状流(该处实测气泡含量由海底至海面逐渐降低)声呐图^[37],发现尽管真实羽状流外观形态更为复杂,声呐所记录的散射信号能量显著强于地震频带散射信号,但是考虑羽状流模型和真实羽状流气泡含量变化规律不同产生的差异后,就羽状流内部而言,二者具有非常相似的地震响应。与图 1 所示的实际地震剖面对比,发现模型Ⅲ的羽状流内部地震散射特征与实际羽状流地震提取结果吻合,都表现为随机分布的羽状流气泡产生的短同相轴。在能量强弱变化方面,图 8 正演结果与图 1(a)实际羽状流非常相似,散射波最强能量出现在羽状流的中上部区域,揭示本文所建模型符

合实际气泡羽状流的分布状态与变化特征;但图 1(b)的地震响应特征显然与图 10 声呐结果更接近,可能预示该区羽状流中气泡浓度沿海底至海面方向逐渐减小。由此说明,本文所建模型体现了实际气泡羽状流的本质特征,并包含了更为复杂的气泡含量变化,具有实际意义和应用价值。

5 结论

以声呐记录仪和地震方法得到的实际羽状流为参考,结合含气泡水体特征,在详细论述了最初建立的羽状流模型基础上,从羽状流气泡半径和含量在深度上的变化特征及羽状流的外观形态两个方面对模型进行了改进,并讨论分析了最终模型的合理性。以上研究表明,针对羽状流中气泡垂向运移规律、分布特点和羽状流外观特征,在忽略气泡对羽状流水体密度影响的条件下,采用与气泡含量和半径大小等参数有关的含气泡海水声速模型,依据随机介质理论建立羽状流模型是气泡羽状流建模的可行方法。这种方法所实现的多周期羽状流模型包含了气泡垂向运移和分布更为复杂情况的羽状流类型,体现了气泡羽状流的本质特征,可用于进一步深入研究羽状流地震响应特征,也为气泡羽状流的地震识别及天然气水合物的相关研究提供了较好的数值模型。

参考文献(References)

[1] 王秀娟,吴时国,王吉亮,等. 南海北部神狐海域天然气水合物分解的测井异常[J]. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2799-2807. [WANG Xiujuan, WU Shiguo, WANG Jiliang, et al. Anomalous wireline logging data caused by gas hydrate dissociation in the Shenhu area, northern slope of South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(8): 2799-2807.]

[2] 王吉亮,王秀娟,钱进,等. 裂隙充填型天然气水合物的各向异性分析及饱和度估算——以印度东海岸 NGHP01-10D 井为例[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1312-1320. [WANG Jiliang, WANG Xiujuan, QIAN Jin, et al. Anisotropic analysis and saturation estimation of gas hydrate filled in fractures; a case of site NGHP01-10D, offshore eastern India[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1312-1320.]

[3] 郝召兵,黄为清,秦静欣,等. 气体水合物密闭采样原位饱和度和评估技术研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3917-3921. [HAO Zhaobing, HUANG Weiqing, QIN Jingxin, et al. Estimation technique for gas hydrate saturation of pressure core samples[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3917-3921.]

[4] 卢振权,何家雄,金春爽,等. 南海北部陆坡气源条件对水合

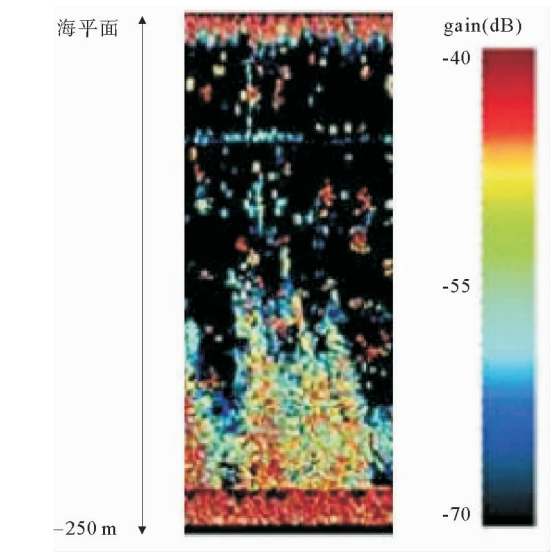


图 10 挪威斯瓦尔巴特群岛气泡羽状流声呐图^[37]
(声呐频率为 12 kHz,水平分辨率为 20 m,底部红色为海底)
Fig. 10 Sonar diagram of bubble plume at Svalbard in Norway
(The sonar frequency is 12 kHz, and The horizontal resolution is 20 m, and the seafloor is in red at the bottom of the diagram)

- 物成藏影响的模拟研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 188-194. [LU Zhenquan, HE Jiaxiong, JIN Chunshuang, et al. A study of modeling the effects of gas sources on gas hydrate formation in the northern slope of South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(1): 188-194.]
- [5] 张永勤. 国外天然气水合物勘探现状及我国水合物勘探进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(10): 1-8. [ZHANG Yongqin. Exploration current status of the gas hydrate abroad and the progress of the gas hydrate in China[J]. Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(10): 1-8.]
- [6] 姚伯初, 杨木壮, 吴时国, 等. 中国海域的天然气水合物资源[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 333-341. [YAO Bochu, YANG Muzhuang, WU Shiguo, et al. The gas hydrate resources in the China Seas[J]. Geoscience, 2008, 22(3): 333-341.]
- [7] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1762-1771. [ZHU Youhai, ZHANG Yongqin, WEN Huaijun, et al. Gas hydrates in the Qilian Mountain permafrost, Qinghai, northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(11): 1762-1771.]
- [8] Sauter E J, Muyakshin S I, Charlou J L, et al. Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 243(3-4): 354-365.
- [9] Shipboard Scientific Party. Preliminary report, drilling gas hydrates on hydrate ridge, Cascadia continental margin[R]. College Station, TX: ODP, 2002.
- [10] 栾锡武, 刘鸿, 岳保静, 等. 海底冷泉在旁扫声纳图像上的识别[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 474-480. [LUAN Xiwu, LIU Hong, YUE Baojing, et al. Characteristics of cold seepage on side scan sonar sonogram[J]. Geoscience, 2010, 24(3): 474-480.]
- [11] Sassen R, Losh S L, Cathles III L, et al. Massive vein-filling gas hydrate: relation to ongoing gas migration from the deep subsurface in the Gulf of Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(5): 551-560.
- [12] Matsumoto R. 日本海东缘海洋天然气水合物矿藏之上的甲烷羽状流——地下甲烷运移到浅水的可能机制[J]. 龚建明译. 海洋地质动态, 2006, 22(5): 33. [MATSUMOTO R. Methane plumes over a marine gas hydrate system in the eastern margin of Japan Sea[J]. GONG Jianming, trans. Marine Geology Letters, 2006, 22(5): 33.]
- [13] Freire A F M, Matsumoto R, Santos L A. Structural-stratigraphic control on the Umitaka Spur gas hydrates of Joetsu Basin in the eastern margin of Japan Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(10): 1967-1978.
- [14] Charlou J L, Donval J P, Zitter T, et al. Evidence of methane venting and geochemistry of brines on mud volcanoes of the eastern Mediterranean sea[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2003, 50(8): 941-958.
- [15] Greinert J, Artemov Y, Egorov V, et al. 1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080 m in the Black Sea: hydroacoustic characteristics and temporal variability[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 244(1-2): 1-15.
- [16] 李灿苹, 刘学伟, 赵罗臣. 天然气水合物冷泉和气泡羽状流研究进展[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 1048-1056. [LI Canping, LIU Xuewei, ZHAO Luo Chen. Progress on cold seeps and bubble plumes produced by gas hydrate[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 1048-1056.]
- [17] Heeschen K U, Tréhu A M, Collier R W, et al. Distribution and height of methane bubble plumes on the Cascadia Margin characterized by acoustic imaging[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(12): 1643.
- [18] Tryon M D, Brown K M, Torres M E. Fluid and chemical flux in and out of sediments hosting methane hydrate deposits on hydrate ridge, OR, II: hydrological processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 201(3-4): 541-557.
- [19] Tryon M D, Brown K M. Fluid and chemical cycling at Bush Hill: implications for gas-and hydrate-rich environments[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2004, 5(12): Q12004.
- [20] 邸鹏飞, 冯东, 高立宝, 等. 海底冷泉流体渗漏的原位观测技术及冷泉活动特征[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(5): 1592-1602. [DI Pengfei, FENG Dong, GAO Libao, et al. In situ measurement of fluid flow and signatures of seep activity at marine seep sites[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(5): 1592-1602.]
- [21] 刘善琪, 尹凤玲, 朱伯靖, 等. 冷泉形成的数值模拟研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1731-1741. [LIU Shanqi, YIN Fengling, ZHU Bojing, et al. Numerical simulation on the formation of cold seepage[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(5): 1731-1741.]
- [22] 吴如山, [美]安艺敬一. 地震波的散射与衰减[M]. 李裕澈, 卢寿德译. 北京: 地震出版社, 1993: 1-5. [WU Rushan, AKI K. Scattering and Attenuation of Seismic Waves[M]. LI Yuche, LU Shoude, trans. Beijing: Seismic Press, 1993: 1-5.]
- [23] You J C, Li C P, Cheng L F, et al. Numerical simulation of methane plumes based on effective medium theory[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(11): 9089-9100.
- [24] 李灿苹, 刘学伟, 勾雨敏, 等. 冷泉活动区天然气水合物上覆水体中气泡羽状流的数值模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(3): 391-399. [LI Canping, LIU Xuewei, GOU Limin, et al. Numerical simulation of bubble plumes in overlying water of gas hydrate in the cold seepage active region[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 56(4): 579-587.]
- [25] Li C P, Gou L M, You J C, et al. Further studies on the numerical simulation of bubble plumes in the cold seepage active region[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(1): 118-124, doi: 10.1007/s13131-016-0803-3.
- [26] Hu L, Yvon-Lewis S A, Kessler J D, et al. Methane fluxes to the atmosphere from deepwater hydrocarbon seeps in the northern Gulf of Mexico[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C1): C01009.
- [27] 刘海军, 安宇. 空化单气泡外围压强分布[J]. 物理学报, 2004, 53(5): 1406-1411. [LIU Haijun, AN Yu. Pressure

distribution outside a single cavitation bubble[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(5): 1406-1412.]

[28] 姚文苇. 气泡对声传播影响的研究[J]. *陕西教育学院学报*, 2008, 24(1): 107-109. [YAO Wenwei. Effect of bubble on propagation of acoustic wave[J]. *Journal of Shaanxi Institute of Education*, 2008, 24(1): 107-109.]

[29] 徐麦容, 刘成云. 水中浮升气泡的半径和速度变化[J]. *大学物理*, 2008, 27(11): 14-17. [XU Mairong, LIU Chengyun. The change of radius and velocity of the rising bubble in water [J]. *College Physics*, 2008, 27(11): 14-17.]

[30] 刘伯胜, 雷家熠. 水声学原理[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 6-15. [LIU Bosheng, LEI Jiayi. *The Principle of Acoustics*[M]. 2nd ed. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010: 6-15.]

[31] 李灿苹, 刘学伟, 杨丽, 等. 气泡半径和含量对含气泡海水声波速度的影响[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 528-533. [LI Canping, LIU Xuewei, YANG Li, et al. Study on the bubble radius and content effect on the acoustic velocity of seawater with bubbles[J]. *Geoscience*, 2010, 24(3): 528-533.]

[32] 李灿苹, 王南萍, 李志宏. Von Karman 型自相关函数模拟随机介质[J]. *物探与化探*, 2010, 34(1): 98-102. [LI Canping, WANG Nanping, LI Zhihong, et al. The application of Von Karman type autocorrelation function to modeling random media[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 34(1): 98-102.]

[33] 鞠花, 陈刚, 李国栋. 静水中气泡上升运动特性的数值模拟研究[J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(3): 344-349. [JU Hua, CHEN Gang, LI Guodong. Research on numerical simulation of motion behaviors of single bubble rising in still water[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(3): 344-349.]

[34] 袁文俊, 尚亚东, 黄勇, 等. 某些常微分方程的亚纯解表示与应用[J]. *中国科学: 数学*, 2013, 43(6): 563-575. [YUAN Wenjun, SHANG Yadong, HUANG Yong, et al. The representation of meromorphic solutions to certain ordinary differential equations and its applications[J]. *Scientia Sinica (Mathematica)*, 2013, 43(6): 563-575.]

[35] 夏洁, 庞兆君, 金栋平. 面内弹性绳系卫星系统的内共振[J]. *振动工程学报*, 2012, 25(3): 232-237. [XIA Jie, PANG Zhaojun, JIN Dongping. Inner resonance of an in-plane elastic tethered satellite system[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2012, 25(3): 232-237.]

[36] 张志涌. 精通 MATLAB R2011a[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 10-30. [ZHANG Zhiyong. *Mastering MATLAB R2011a*[M]. Beijing: Beihang University Press, 2011: 10-30.]

[37] Westbrook G K, Thatcher K E, Rohling E J, et al. Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(15): L15608.

STUDY ON NUMERICAL MODELS ABOUT BUBBLE PLUMES
IN THE COLD SEEPAGE ACTIVE REGION

LI Canping¹, GOU Limin², YOU Jiachun³, OU Chuling¹

(1. Laboratory of Ocean Remote Sensing and Information Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;
2. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;
3. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Bubble plume is an indirect indicator to gas hydrate. In order to study the seismic responses produced by bubble plumes in a cold seepage active region, a model well marching the characteristics of the actual plume needs to be established. Taking the actual occurrence of the bubble plume as a reference and taking bubble water characteristics into account, we improved the vertical distribution pattern of the plume bubbles and the appearance of plume for established models following the principles of vertical migration law. At last, three models are worked out. Testing shows that the Model Ⅲ is more accurate in presenting the actual occurrence characteristics of the plume rather than the Model Ⅰ and Model Ⅱ. Rational discussion is made by comparing the model with the real plume. And it is concluded that the model established well reflects the essential characteristics of the bubbles in plume, and contains more complex changes in bubble content. Therefore, it can be used to further study the seismic response characteristics of plume, and make it possible to identify bubble plumes for research and evaluation of natural gas hydrate deposits.

Key words: plume; cold seepage; gas hydrate; numerical simulation; migration imaging