



CT 理论与应用研究

Computerized Tomography Theory and Applications

冻土区天然气水合物正演数值模拟与瞬时地震属性研究

杨文海, 张广东, 谭智, 金聪

Study on Forward Numerical Simulation and Instantaneous Seismic Attributes of Natural Gas Hydrate in Permafrost Area

YANG Wenhai, ZHANG Guangdong, TAN Zhi, and JIN Cong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2023.111>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地震资料宽频处理技术在天然气水合物矿体描述中的应用研究

Application of Broadband Seismic Data Processing Technology in the Description of Natural Gas Hydrate Ore Body

CT理论与应用研究. 2021, 30(5): 547–554

用于声波正演模拟的时空域高精度交错网格有限差分方法

Staggered-grid Finite-difference Method with High-order Accuracy in Time-space Domains for Acoustic Forward Modeling

CT理论与应用研究. 2017, 26(3): 259–266

基于支持向量回归的陆域天然气水合物成藏预测

Prediction of Terrestrial Gas Hydrate Accumulation Based on Support Vector Regression

CT理论与应用研究. 2019, 28(3): 299–310

各向异性介质地震波场数值模拟及特征分析

The Seismic Wave Numerical Simulation and Characteristics Analysis in Anisotropic Medium

CT理论与应用研究. 2017, 26(6): 661–668

无井波阻抗反演在西沙水合物研究中的应用

The Application of No-well Impedance Inversion in Xisha Area Hydrate Research

CT理论与应用研究. 2017, 26(4): 425–434

抛物线Radon变换方法在压制地震多次波中的应用

Application of Parabolic Radon Transform in the Suppression of Multiple Seismic Wave

CT理论与应用研究. 2017, 26(2): 165–176



关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨文海, 张广东, 谭智, 等. 冻土区天然气水合物正演数值模拟与瞬时地震属性研究[J]. CT理论与应用研究(中英文), 2024, 33(1): 25-34.
DOI:[10.15953/j.ctta.2023.111](https://doi.org/10.15953/j.ctta.2023.111).

YANG W H, ZHANG G D, TAN Z, et al. Study on Forward Numerical Simulation and Instantaneous Seismic Attributes of Natural Gas Hydrate in Permafrost Area[J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(1): 25-34. DOI:[10.15953/j.ctta.2023.111](https://doi.org/10.15953/j.ctta.2023.111). (in Chinese).

冻土区天然气水合物正演数值模拟与瞬时地震属性研究

杨文海¹, 张广东¹, 谭智¹, 金聪²

1. 武汉市勘察设计有限公司, 武汉 430022

2. 武汉地震工程研究院有限公司, 武汉 430071

摘要: 天然气水合物是一种具有巨大潜能的新型能源, 研究冻土区天然气水合物的地震响应特征, 对我国陆域天然气水合物的勘探和开发具有重要意义。本文运用 Kelvin 粘弹性介质模型, 基于祁连山冻土区的实际地质地层条件, 建立理论地质-地球物理模型; 采用交错网格有限差分法进行正演数值模拟, 并对自激自收地震记录进行波场特征分析和提取瞬时地震属性。研究结果表明: 地震波通过天然气水合物地层时, 反射振幅能量较弱; 在瞬时频率属性剖面可分辨层厚的范围内, 瞬时频率随着层厚增加, 频率在小幅度衰减; 地震波通过含天然气地层时, 反射波表现为强反射特征, 瞬时频率能量明显增大; 瞬时地震属性对波阻抗界面有更好的分辨能力, 特别是瞬时相位属性剖面, 作用明显。因此, 综合分析波场特征与瞬时属性特征可以为陆域天然气水合物的识别、预测提供依据。

关键词: 天然气水合物; 有限差分; 正演数值模拟; Hilbert 变换; 瞬时地震属性

DOI:[10.15953/j.ctta.2023.111](https://doi.org/10.15953/j.ctta.2023.111) 中图分类号: O 242; P 315; P 631 文献标识码: A

目前, 我国国民经济快速发展, 对油气资源的需求急剧增加, 常规油气资源的产量已不能满足经济社会发展的需求。天然气水合物由天然气(主要成分甲烷)与水在高压、低温(通常压力>10 Mpa, 温度0~10°C)条件下形成的固态结晶物质^[1], 其能量密度是其他非常规气体资源的10倍以上^[2]。这一潜在新型能源主要分布在大陆边缘的海底沉积物和陆域多年冻土区中^[3], 具有能量密度高、排放污染少等优点。因此, 天然气水合物一旦在未来进行经济开采, 可在一定程度上减少石油、煤炭等传统矿物能源的需求, 在工业和环境领域中有着重要意义。

尽管已发现的陆域天然气水合物在天然气水合物资源总量中占比较少, 主要分布于高纬度环北冰洋永久冻土区, 但其资源总量预计可达 $10^{13}\sim 10^{16} \text{ m}^3$ ^[4]。中国是世界第3大冻土国, 自20世纪90年代以来的调查研究表明, 青藏高原的祁连山^[5]、西藏羌塘盆地^[6]及东北大兴安岭漠河盆地^[7]等冻土区具备较好的天然气水合物形成条件。2008年11月, 我国在祁连山木里地区首次钻探并获取天然气水合物样品, 并成为第一个在中纬度冻土区发现天然气水合物的国家^[8], 为进一步开展陆域冻土区天然气水合物勘探开发提供了非常有价值的信息。

天然气水合物有着巨大的资源储量和应用前景, 然而, 当前缺乏十分有效的、特别是针对陆域冻土区天然气水合物的勘查技术方法^[9]。海域天然气水合物的地震异常识别已经比较成熟, 主要识别标志有似海底反射、似海底反射极性反转、空白带反射、BSR带的上下地层的速度异常等^[10]。而陆域冻土区由于受到地温梯度、地层压力和地质构造等多方面的影响, 导致天然气水合物地震反射信号特征不明显, 难以分辨, 使得该研究滞后于海域天然气水合物。陆域冻土区天然气水合物的特征识别目前主要集中在测井和电法勘探方法^[11], 在地震勘探方法并无很好的总结, 因此, 探讨含天然气水合物地层中的地震波传播规律以及地震异常反射特征(包括振幅、相位、频率), 可为陆域冻土区天然气水合物的勘探方法和开发提供参考依据。

地震正演数值模拟研究是通过建立地质-地球物理模型, 模拟地震波在地下的传播过程, 正确认

识复杂条件下地震波的传播机理、传播规律以及地震反射波场特性，进而提高地质解释精度^[12-13]。地震波在地下传播过程中，必定发生波的吸收与衰减，而实际地层更接近于粘弹性介质。

地震波属性（以下简称地震属性）种类很多，瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率的“三瞬”属性是最常用和有效的粘弹性介质的地震属性，尤其是瞬时频率和瞬时相位属性，它们与反射信号强弱无关。因此，本文基于粘弹性介质的波动方程，采用高阶交错网格有限差分方法，并结合完全匹配层（perfectly matched layer, PML）边界条件^[14]进行理论模型正演数值模拟。模型参数来源于祁连山DK-1井天然气水合物的测井数据，对模拟得到的自激自收时间剖面进行 Hilbert 变换，得到瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率，然后分析总结含水合物层和含气层的瞬时属性特征及规律，为识别勘探中的陆域冻土区天然气水合物特征识别及数据反演提供必要的依据。

1 祁连山地区天然气水合物地质、地球物理特征概述

青藏高原祁连山木里地区是我国陆上冻土区首次钻探并发现天然气水合物的地区，该地区位于青藏高原的东北端，海拔 4000~4300 m，实测冻土层厚度 60~95 m，具备天然气水合物形成的温压条件。构造上^[15]该地区为南祁连盆地的一个次级坳陷，坳陷内发育石炭系、下二叠统、上三叠统、侏罗系 4 套以暗色泥页岩为主的烃源岩，烃源岩质量较好，大部分已经进入高成熟-过成熟阶段，以生气为主；另外，侏罗系含有丰富的煤层气资源，这些条件皆有利于天然气水合物的形成。

2008 年至 2009 年间，在祁连山木里地区的 4 口钻井均获得了水合物样品或异常显示，天然气水合物分布在侏罗系煤系地层细砂岩、泥质粉砂岩的孔隙和裂隙之中^[16]，分布深度在 133~390 m 之间，其中 DK-1 井的天然气水合物位于 133.5~135.5 m、142.9~147.7 m、165.3~165.5 m^[17]。

统计 3 口钻井部分测段结果见表 1 所示，由测井结果可以看出，与不含天然气水合物地层相比，含天然气水合物地层具有较低的密度和较高的纵、横波速度。

表 1 祁连山 DK-1、DK-3 和 DK-4 三个井孔含水合物和不含水合物层段速度和密度^[18]
Table 1 Velocities and densities of the hydrate segments and segments without hydrate in the holes of DK-1, DK-3, and DK-4

| 井孔 | 深度 h/m | | 岩性 | 平均纵波速度 $V_p/(m/s)$ | | 平均密度 $\rho/(g/cm^3)$ | |
|------|---------------|---------------|-----|--------------------|-------|----------------------|-------|
| | 含水合物段 | 不含水合物段 | | 含水合物 | 不含水合物 | 含水合物 | 不含水合物 |
| DK-1 | 133.90~134.86 | 92.05~94.75 | 细砂岩 | 4728 | 4204 | 2.34 | 2.53 |
| | 143.35~144.30 | 49.20~69.70 | 细砂岩 | 4676 | 4171 | 2.38 | 2.57 |
| DK-3 | 139.05~154.45 | 195.05~196.95 | 泥岩 | 2996 | 2867 | 2.32 | 2.43 |
| DK-4 | 134.40~131.70 | 151.50~152.45 | 泥岩 | 4071 | 2822 | 2.25 | 2.31 |
| | 165.75~167.25 | 112.45~115.35 | 粉砂岩 | 3823 | 3356 | 2.22 | 2.36 |

本文以青藏高原祁连山木里地区钻孔 DK-1 的测井数据为基础，综合 3 口钻井的波速和密度变化范围，建立理论模型进行正演试算，分析、识别天然气水合物在自激自收剖面上的异常特征，利用时频分析手段，研究、分析异常特征及其分布规律，为后续实测资料解释提供理论基础。

2 地震模拟的基础理论

2.1 有限差分正演模拟

正演数值模拟是地震勘探和地震学的重要理论基础，是在假定地下介质结构模型和相应物性参数已知的情况下，借助现代计算机平台模拟地震波在地下介质中的传播规律，并计算在地面或地下各点所应观测到的地震数值响应的一种地震模拟方法。有限差分法正演模拟技术始于 20 世纪 70 年代初，Alterman 等^[19]开创性地使用显式有限差分格式获得了层状介质二阶弹性波方程的离散数值解，之后差分方法在地震勘探应用中不断得到发展。该方法基本思想是将区域离散为许多小网格，应用差分原理，用差商来近似代替微商，将求解连续函数的问题转换为求解网格节点上的差分方程

组的问题。

地震波在各向同性介质的均匀半空间传播过程中, 通常将地层介质视作完全弹性的, 而实际上地层中地震波将被介质吸收而导致能量衰减, 并且频率越高、衰减越快, 粘弹性介质能够很好地反映这一规律。因此, 采用粘弹性介质模型进行地震模拟, 更真实反映天然气水合物的地震响应特征。Kelvin 粘弹性介质模型是描述地震波衰减时常用的一种介质模型, 在加入粘滞项后, 其表达类型可以同均匀弹性各项同性介质的情况相对应。假定不存在外力项, 考虑二维的情况, Kelvin 粘弹性波方程的一阶速度—应力方程形式为^[20]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} + (\lambda' + 2\mu') \frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial t} + \lambda' \frac{\partial^2 v_z}{\partial z \partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} + \lambda' \frac{\partial^2 v_x}{\partial z \partial t} + (\lambda' + 2\mu') \frac{\partial^2 v_z}{\partial x \partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \mu' \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial z \partial t} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial x \partial t} \right) \\ \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 λ 和 μ 是均匀弹性各向同性介质的弹性拉梅系数, λ' 和 μ' 是粘性拉梅系数, 可通过下式计算:

$$\begin{aligned} \lambda + 2\mu &= \rho V_p^2 \\ \mu &= \rho V_s^2 \\ \lambda' + 2\mu' &= \rho V_p^2 / (Q_p \omega), \\ \mu' &= \rho V_s^2 / (Q_s \omega) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\omega = 2\pi f$ 为圆频率, V_p 和 V_s 为介质纵横波速度, Q_p 和 Q_s 分别表示描述纵波和横波衰减特性的品质因子。深层固结状态好的岩石的品质因子 Q 计算经验公式为^[21-22]:

$$\begin{aligned} Q_p &= a V_p^{2.2} \\ Q_s &= b \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 Q_p \end{aligned} \quad (3)$$

式中速度 V 的单位是 km/s, 依据文献中的研究成果, 系数取值分别为 $a = 14.0$, $b = 2.07$ 。

2.2 地震瞬时属性

一个给定的地震信号 $x(t)$ 可以用它的振幅 $a(t)$ 和相位 $\theta(t)$ 两个基本属性来表示:

$$x(t) = a(t) \cos(\theta(t)). \quad (4)$$

通过 Hilbert 变换, 它的正交道可以表示为:

$$y(t) = a(t) \sin(\theta(t)), \quad (5)$$

则其复数道^[23] $z(t)$ 为:

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t) \exp(i\theta(t)). \quad (6)$$

一旦实地震道和正交地震道求出之后, 瞬时振幅、瞬时相位就可用复地震道表示为^[24]:

$$\begin{aligned} a(t) &= (x(t)^2 + y(t)^2)^{\frac{1}{2}} \\ \theta(t) &= \tan^{-1} \left(\frac{y(t)}{x(t)} \right) {}^\circ \end{aligned} \quad (7)$$

定义瞬时频率为瞬时相位的导数, 在计算上可表示为:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{x(t) \frac{dy(t)}{dt} - y(t) \frac{dx(t)}{dt}}{x^2(t) + y^2(t)}, \quad (8)$$

上式计算时采用 5 点中心差分代替微分，则有：

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= \frac{x(t-2\Delta T) - 8x(t-\Delta T) + 8x(t+\Delta T) - x(t+2\Delta T)}{12\Delta T} \\ \frac{dy(t)}{dt} &= \frac{y(t-2\Delta T) - 8y(t-\Delta T) + 8y(t+\Delta T) - y(t+2\Delta T)}{12\Delta T} \end{aligned} \quad (9)$$

由于微分运算对相位的突变和噪声极其敏感，当信号瞬时包络 $a(t)$ 趋于 0 时，瞬时频率会产生无意义的尖峰频率，或正或负、且值异常大。为了减少这种现象，通过在公式 (8) 的分母部分加一个较小的阻尼因子 ε 可以在一定程度上避免瞬时频率尖峰值的出现^[25]，通常取 $\varepsilon = (0.001 \times A)^2$ 可算得较理想结果， A 为瞬时包络最大值。

这样利用复地震道分析可定义瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率等属性。瞬时振幅是反射强度的度量，正比于该时刻地震信号的总能量的平方根，可以确定特殊岩层的变化，当地层含有流体时，瞬时振幅会发生强烈的变化，是识别油气异常或者识别亮点、暗点和平点的有效工具；瞬时频率是相位时间变化率的度量，反映组成地层的岩性变化，由于地层的影响，它的变化很大，例如当地震波通过一些特殊储层时，高频成分会强烈衰减；瞬时相位是地震剖面上同相轴连续性的量度，不管地震反射波能量的强弱都能显示出其相位，弱振幅有效波在瞬时相位图上也有很好的连续性，分析相位的变化，有利于研究地层的接触关系、追踪层位和确定小幅度构造以及小断层，同时能够反映薄层和弱反射强度的地震波，使得弱信号有效波的相位能够显示出来。

3 正演数值模拟与地震属性分析

依据上述地震属性模拟的基础理论，本文利用了祁连山木里地区 DK-1 钻孔测井资料，选用楔状模型、圈闭模型，对陆域天然气水合物进行正演数值模拟与地震属性分析。

3.1 楔状模型

为了解在不同层厚的陆域天然气水合物赋存情况下地震响应的变化规律，以祁连山木里地区 DK-1 钻孔测井资料为基础，建立楔状模型，即天然气水合物楔状体倾斜角度 11.46°（图 1），通常含天然气水合物地层表现为高波速和低密度特征，模型采用的参数见表 2 所示。数值模拟时采用时间采样间隔 0.01 ms，记录长度 180 ms，道间距 0.25 m，子波主频 150 Hz。

模型构成如图 1 所示。基于粘弹性方程，通过交错网格有限差分正演模拟可得自激自收剖面图（图 2）。0 ms 位置的同相轴为直达纵波，36.0 ms 处为冻土层 ① 的底界面反射波，87.0 ms 为稳定沉积层 ② 的底界面反射波，下方倾斜同相轴为楔状体天然气水合物层 ④ 下界面的反射纵波。

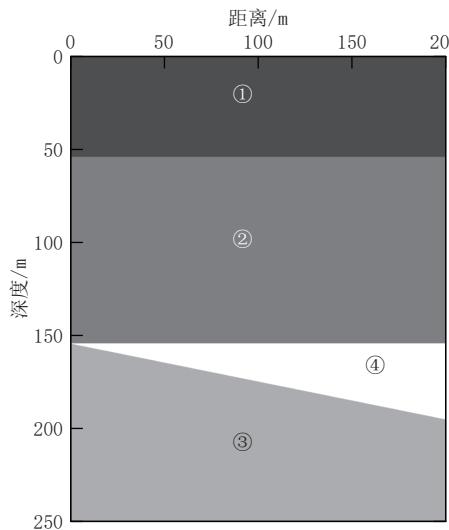
从自激自收 V_z 分量剖面（图 2）中可以看到，天然气水合物底界面反射能量较弱，且随着厚度增加，振幅存在逐渐减小的趋势，这种吸收衰减特性与实际地震波在地下介质传播特征相符。

通过 Surfer 软件数字化读出同相轴分开的位置位于距离起点 78 m 处，这也为楔状体厚度为 1/2 波长位置，当楔形体层厚度大于 1/2 波长时，楔形体上下界面的反射同相轴可以完全分开。而在厚度 1/4 波长~1/2 波长之间楔形体上下界面的反射同相轴相互叠加，无法分辨开；而在厚度小于 1/4 波长时，同相轴完全叠加在一起，无法分辨，且反射能量加强。

对图 2 的模拟 V_z 分量做 Hilbert 变换，通过复地震道分析，得到瞬时属性剖面如图 3 所示。因直达波振幅能量较强，且并非本文关注的对象，为了更好的反映天然气水合物层反射波场特征，将顶层直达波能量不显示，时间剖面起始时间均为 0.03 s。

图 3 (a) 为瞬时振幅属性剖面，由图可知，当地层厚度小于 1/2 波长时（即距离起点 78 m 处），波形开始出现叠加，底界面反射波逐渐消失，导致顶底界面无法分辨；当地层厚度小于 1/4 波长时（即

距离起点 39 m 处), 顶底界面反射波相互干涉使得瞬时振幅能量加强, 这也称为薄层的调谐效应。



注: ①冻土层; ②、③稳定沉积层; ④天然气水合物层图。

图 1 楔状模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wedge model

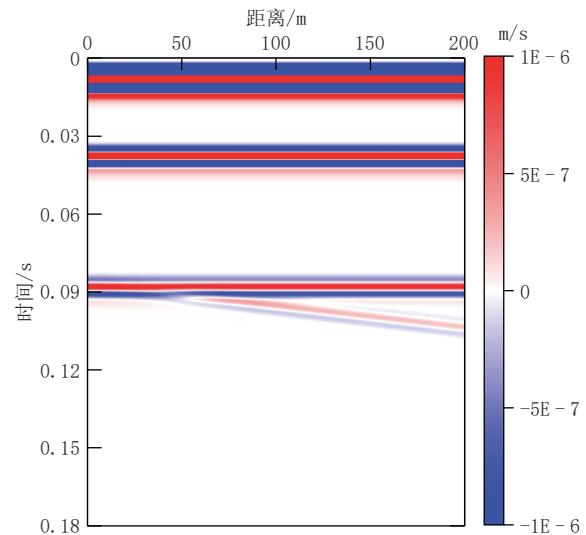


图 2 楔状模型自激自收记录 V_z 分量

Fig. 2 V_z component of wedge model

表 2 楔状地质-地球物理模型参数表
Table 2 The parameters of wedge-shaped geological-geophysical model

| 模型编号 | V_p /(m/s) | V_s /(m/s) | ρ /(g/cm ³) | Q_p | Q_s | 层厚/m |
|----------|--------------|--------------|------------------------------|-------|-------|------|
| 冻土层 ① | 3250 | 1950 | 2.31 | 187.2 | 139.5 | 54 |
| 稳定沉积物 ② | 4000 | 2000 | 2.37 | 295.6 | 153.0 | 100 |
| 稳定沉积物 ③ | 4450 | 2130 | 2.55 | 373.7 | 214.8 | - |
| 天然气水合物 ④ | 4750 | 2330 | 2.29 | 431.4 | 373.7 | 0~40 |

瞬时相位属性剖面如图 3 (b) 所示, 由于相位信息与振幅大小无关, 在瞬时相位属性剖面中, 随着楔状体厚度的增大, 弱振幅与强振幅波形具有同样地连续性。56 m 处即可看到上下两个界面反射波的相位信息, 分辨率较高。

瞬时频率属性剖面如图 3 (c) 所示, 天然气水和物层 ④ 底界面反射波瞬时频率随着厚度增加而减小, 但是由于水合物品质因子较大, 衰减幅度比较小。瞬时频率顶底界面分辨能力不如瞬时相位, 在上下两层反射波开始叠加处, 瞬时频率较大, 峰值可达到 220 Hz, 可能是波形叠加所致。

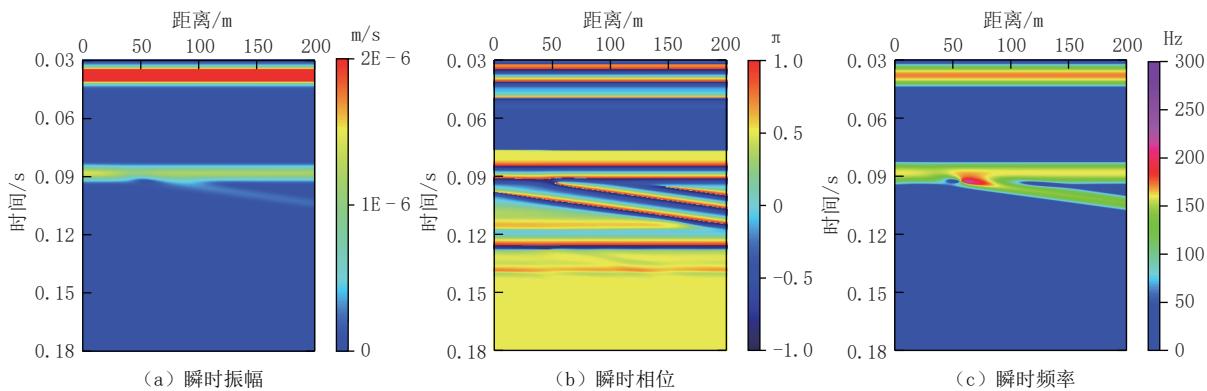
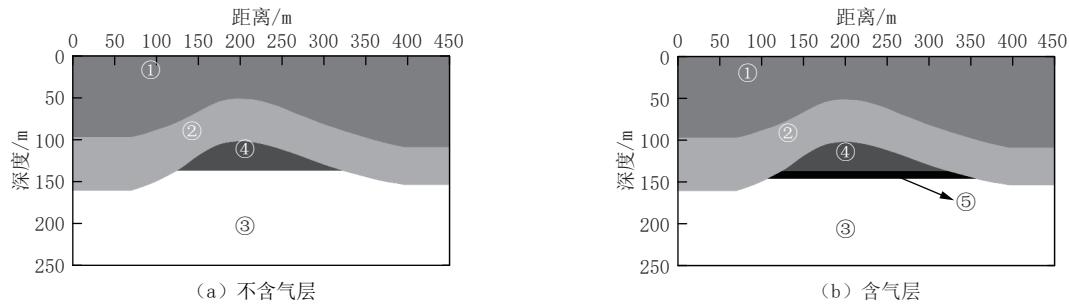


图 3 楔状模型瞬时属性剖面

Fig. 3 The instantaneous property of wedge model

3.2 圈闭模型

天然气水合物的赋存状态受很多因素影响, 现仅就天然气水合物下伏地层往往存在游离气层的情况进行正演数值模拟。为了对比研究是否含气层的天然气水合物模型的地震响应特征变化规律, 建立了如图 4 所示圈闭模型, 模型 ①~④ 层参数与表 2 中对应一致, 图 4 (b) 中含气层 ⑤ 参数分别为 $V_p = 3000 \text{ m/s}$ 、 $V_s = 1467 \text{ m/s}$ 、 $\rho = 2.16 \text{ g/cm}^3$ 、 $Q_p = 157.0$ 、 $Q_s = 77.7$, 层厚 10 m。



注: ①冻土层; ②、③稳定沉积层; ④天然气水合物层; ⑤游离气层。

图 4 圈闭模型示意图
Fig. 4 Schematic diagram of trap model

通过交错网格有限差分正演模拟, 两个模型所对应的自激自收时间剖面分别见图 5 (a) 和图 5 (b)。反射同相轴从上到下依次为直达纵波、冻土层 ① 与稳定沉积层 ② 的反射纵波、稳定沉积层 ② 与稳定沉积层 ③ 的反射纵波、天然气水合物层 ④ 上界面的反射纵波、天然气水合物层 ④ 下界面的反射纵波, 以及图 5 (b) 中含游离气层 ⑤ 下界面的反射纵波。与不含游离气层相比, 含气层 ⑤ 上下界面反射波同相轴在反射波中能量最强, 且相位没有反转。

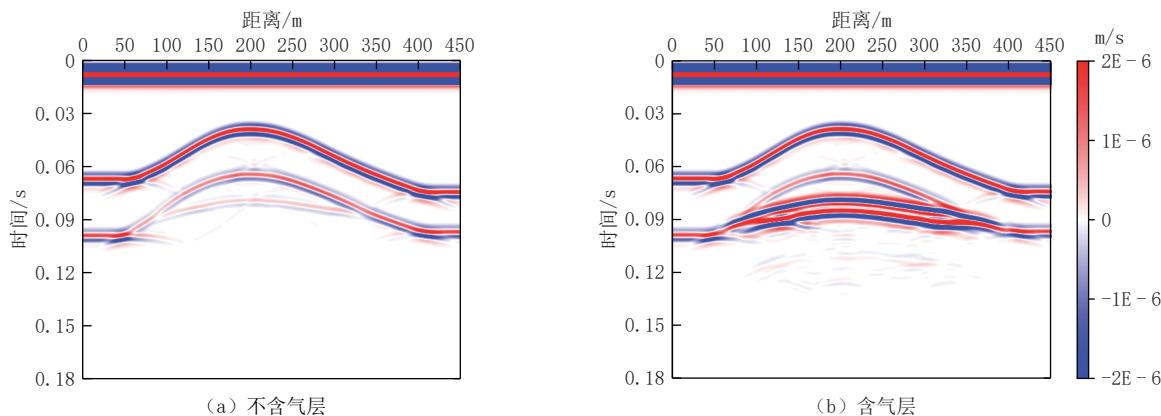


图 5 圈闭模型自激自收记录 V_z 分量

Fig. 5 V_z component of trap model

对图 5 中自激自收记录做 Hilbert 变换, 通过复地震道分析, 得到“三瞬”地震属性, 特征如下: 瞬时振幅属性剖面见图 6 所示, 与楔状模型呈现规律一致, 地震波通过含天然气水合物地层时, 表现为弱反射特征(图 6 (a))。当地震波通过天然气水合物地层存在下伏含气地层时, 由于波阻抗差异较大, 振幅有较明显增强(图 6 (b))。

图 7 为圈闭模型瞬时相位属性剖面, 由图可知, 波阻抗界面的相位均有较好的连续性, 不含气层反射波振幅较弱的位置, 在瞬时相位图上清晰连续, 其层位能被明显识别(图 7 (a)); 含气层下方随着多次波的出现, 干扰波的相位出现叠加(图 7 (b)), 其相位变化越来越复杂, 特征识别也越来越困难。

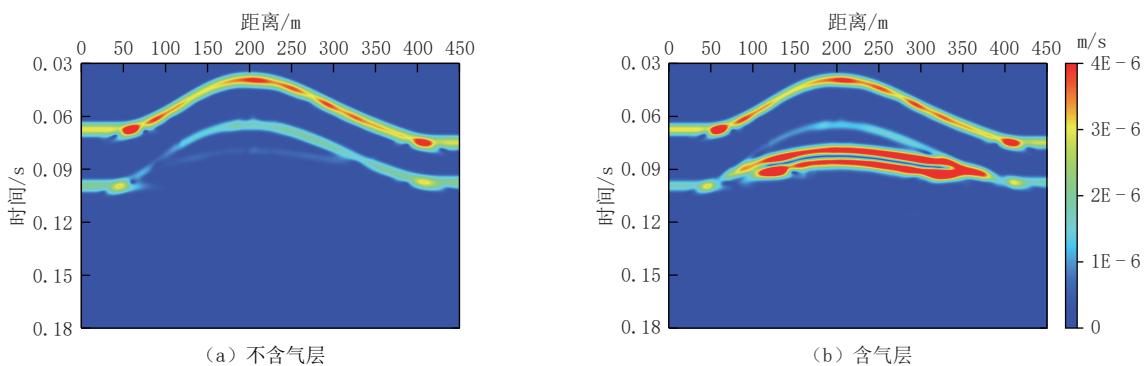


图 6 圈闭模型瞬时振幅属性剖面
Fig. 6 The instantaneous amplitude property of trap model

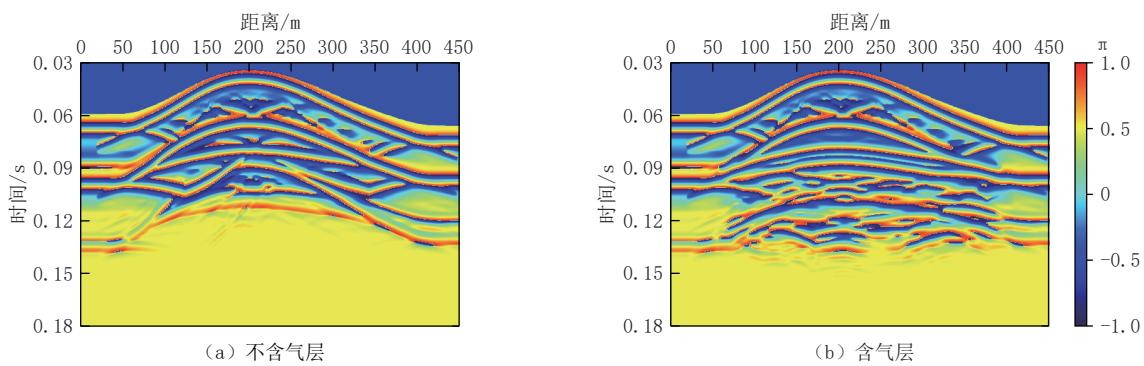


图 7 圈闭模型瞬时相位属性剖面
Fig. 7 The instantaneous phase property of the trap model

图 8 为圈闭模型瞬时频率属性剖面, 相比于不含气地层瞬时频率属性剖面(图 8(a)), 当地震波通过天然气水合物地层存在下伏含气地层时, 顶底界面反射波瞬时频率明显增大(图 8(b))。这一瞬时属性特征对于含游离气层的识别十分有利。

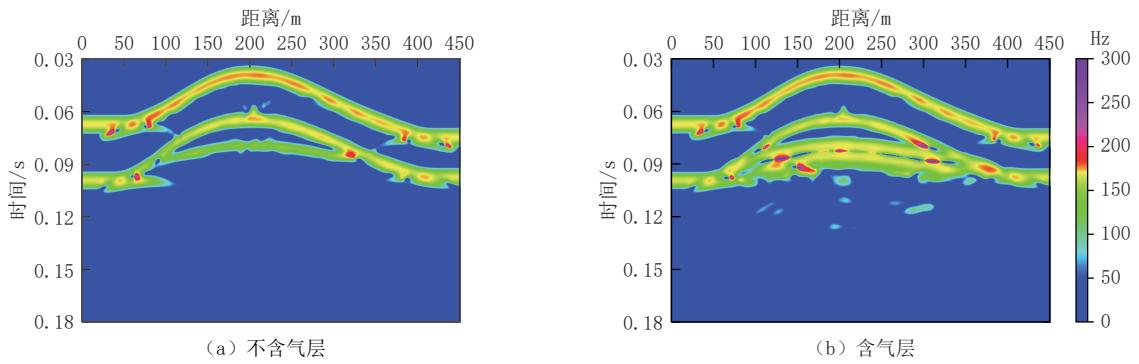


图 8 圈闭模型瞬时频率属性剖面
Fig. 8 The instantaneous frequency property of trap model

4 结论

本文根据祁连山 DK-1 井的测井数据, 获得冻土区含天然气水合物地层的速度与密度变化资料。通过构建含有冻土层、稳定沉积层、天然气水合物层及含气层等介质的理论地质-地球物理模型, 以粘弹性波动方程为基础, 采用交错网格有限差分法对地震波进行正演数值模拟, 并对正演所得自激自收剖面 V_z 分量进行 Hilbert 变换, 计算其瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率等“三瞬”属性特征, 得到如下结论:

(1) 由自激自收记录剖面信息可知, 地震波通过含天然气水合物地层时, 表现为底界面弱反射特征; 当地震波通过含气地层时, 由于界面波阻抗差异较大, 振幅会有明显增强。

(2) 通过分析瞬时地震属性剖面资料得出, 当地震波通过天然气水合物地层时, 底界面反射波振幅能量较弱, 在可分辨厚度的区域。平均瞬时频率随着厚度增加, 频率在小幅度衰减, 而在波形叠加区域。平均瞬时频率也较大。当地震波通过含气地层时, 由于波阻抗差异较大, 表现为强反射特征, 平均瞬时频率也较大。

(3) 与自激自收记录剖面信息特征对比表明, 瞬时振幅属性剖面反应的振幅信息更加明显, 瞬时相位属性剖面和瞬时频率属性剖面对波阻抗界面具有更高的分辨能力, 且瞬时相位属性剖面优于瞬时频率属性剖面。

综合分析地震波场特征和瞬时地震属性, 为陆域天然气水合物的特征识别提供理论依据; 期望获得的研究成果对陆域天然气水合物的预测、勘探工作有参考作用。

参考文献

- [1] SLOAN JR E D, KOH C A. Clathrate hydrates of natural gases[M]. CRC press, 2007.
- [2] KVENVOLDEN K A. Potential effects of gas hydrate on human welfare[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1999, 96(7): 3420-3426.
- [3] MAKOGON Y F. Natural gas hydrates: A promising source of energy[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2010, 2(1): 49-59.
- [4] 裴发根, 方慧, 杜炳锐, 等. 陆域冻土区天然气水合物勘探研究进展[J]. *物探化探计算技术*, 2022, 44(6): 751-763.
- [5] PEI F G, FANG H, DU B R, et al. Advances in exploration of natural gas hydrate in terrestrial permafrost areas of China[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 44(6): 751-763. (in Chinese).
- [6] 黄朋, 潘桂棠, 王立全, 等. 青藏高原天然气水合物资源预测[J]. *地质通报*, 2002, 21(11): 794-798.
- [7] HUANG P, PAN G T, WANG L Q, et al. Prospect evaluation of natural gas hydrate resources on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(11): 794-798. (in Chinese).
- [8] 刘怀山, 韩晓丽. 西藏羌塘盆地天然气水合物地球物理特征识别与预测[J]. *西北地质*, 2004, 37(4): 33-38.
- [9] LIU H S, HAN X L. Geophysical recognition and prediction of natural gas hydrates in Qiangtang basin of Tibet[J]. *Northwestern Geology*, 2004, 37(4): 33-38. (in Chinese).
- [10] 赵省民, 邓坚, 李锦平, 等. 漠河多年冻土区天然气水合物的形成条件及成藏潜力研究[J]. *地质学报*, 2011, 85(9): 1536-1550.
- [11] ZHAO X M, DENG J, LI J P, et al. Gas hydrate formation and its accumulation potential in Mohe, permafrost area, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(9): 1536-1550. (in Chinese).
- [12] 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.
- [13] ZHU Y H, ZHANG Y Q, WEN H J, et al. Gas hydrates in the Qilian mountain permafrost, Qinghai, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(11): 1762-1771. (in Chinese).
- [14] 方慧, 孙忠军, 徐明才, 等. 冻土区天然气水合物勘查技术研究主要进展与成果[J]. *物探与化探*, 2017, 41(6): 991-997.
- [15] FANG H, SUN Z J, XU M C, et al. Main achievements of gas hydrate exploration technology in permafrost regions of China[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(6): 991-997. (in Chinese).
- [16] 张旭东. 琼东南海域天然气水合物地震反射特征[J]. *物探与化探*, 2014, 38(6): 1152-1158.
- [17] ZHANG X D. The seismic reflection characteristics of gas hydrate in southeast Hainan sea area of the South China Sea[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(6): 1152-1158. (in Chinese).
- [18] LEE M W, COLLETT T S. In-situ gas hydrate saturation estimated from various well logs at the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 439-449.
- [19] 韩建光, 于常青, 张晓波, 等. 陆域冻土区天然气水合物多波地震数值模拟研究[J]. *地质学报*, 2016, 90(9): 2502-2512.
- [20] HAN J G, YU C Q, ZHANG X B, et al. Multiwave seismic numerical simulation study on terrestrial

- gas hydrate in permafrost area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(9): 2502–2512. (in Chinese).
- [13] 罗登贵, 刘江平, 金聪, 等. 活断层的地震响应特征与瞬时地震属性[J]. 地球科学, 2017, 42(3): 462–470.
- LUO D G, LIU J P, JIN C, et al. Instantaneous seismic attributes and response characteristics of active faults[J]. *Earth Science*, 2017, 42(3): 462–470. (in Chinese).
- [14] HASTINGS F D, SCHNEIDER J B, BROSCHEIT S L. Application of the perfectly matched layer (PML) absorbing boundary condition to elastic wave propagation[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 100(5): 3061–3069.
- [15] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 鄂连山冻土区天然气水合物及其基本特征[J]. 地球学报, 2010, 31(1): 7–16, 130.
- ZHU Y H, ZHANG Y Q, WEN H J, et al. Gas hydrates in the Qilin mountain permafrost and their basic characteristics[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(1): 7–16, 130. (in Chinese).
- [16] 徐明才, 刘建勋, 柴铭涛, 等. 青海木里地区天然气水合物反射地震试验研究[J]. 地质与勘探, 2012, 48(6): 1180–1187.
- XU M C, LIU J X, CHAI M T, et al. An experimental study of natural gas hydrates in the muli region, Qinghai Province by the seismic reflection method[J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(6): 1180–1187. (in Chinese).
- [17] 吕丽新, 陈永进, 张硕, 等. 冻土区天然气水合物基本特征及国内研究现状[J]. *资源与产业*, 2012, 14(5): 69–75.
- LV L X, CHEN Y J, ZHANG S, et al. Characteristics and research advances of natural gas hydrate in permafrosts[J]. *Resources and Industries*, 2012, 14(5): 69–75. (in Chinese).
- [18] 刘杰, 刘江平, 程飞, 等. 青藏高原冻土区天然气水合物地层的岩石物理分析[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1008–1018.
- LIU J, LIU J P, CHENG F, et al. Rock physics analysis of the hydrate bearing sediments in the permafrost region of Qinghai-Tibet plateau[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(3): 1008–1018. (in Chinese).
- [19] ALTERMAN Z, KARAL JR F C. Propagation of elastic waves in layered media by finned difference methods[J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1968, 58(1): 367–398.
- [20] 奚先, 姚姚. 二维粘弹性随机介质中的波场特征分析[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 608–615.
- XI X, YAO Y. The analysis of the wave field characteristics in 2D viscoelastic random medium[J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(3): 608–615. (in Chinese).
- [21] 李庆忠, 魏继东. 高密度地震采集中组合效应对高频截止频率的影响[J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(4): 363–369.
- LI Q Z, WEI J D. Influence of array effect on cutoff frequency of high frequency in high-density seismic acquisition[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2007, 42(4): 363–369. (in Chinese).
- [22] 犇帮让, 裴正林, 夏吉庄, 等. 薄互层油藏模型黏弹性波方程正演模拟研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2009, 44(5): 622–629, 527, 650.
- DI B R, PEI Z L, XIA J Z, et al. Forward simulation of viscoelastic wave equation in thin-interbedded reservoir model[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009, 44(5): 622–629, 527, 650. (in Chinese).
- [23] TANER M T, KOEHLER F, SHERIFF R E. Complex seismic trace analysis[J]. *Geophysics*, 1979, 44(6): 1041–1063.
- [24] 程乾生. 希尔伯特变换与信号的包络, 瞬时相位和瞬时频率[J]. 石油地球物理勘探, 1979, 14(3): 1–14.
- [25] MATHENNEY M P, NOWACK R L. Seismic attenuation values obtained from instantaneous-frequency matching and spectral ratios[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 123(1): 1–15.

Study on Forward Numerical Simulation and Instantaneous Seismic Attributes of Natural Gas Hydrate in Permafrost Area

YANG Wenhai¹, ZHANG Guangdong¹, TAN Zhi^{1✉}, JIN Cong²

1. Wuhan Geotechnical Engineering and Surveying Co. Ltd., Wuhan 430022, China
2. Wuhan Institute Earthquake Engineering Co. Ltd., Wuhan 430071, China

Abstract: Natural gas hydrate is a new energy source with great potential. Studying the seismic response characteristics of natural gas hydrate in permafrost area is crucial to the exploration and development of natural gas hydrate in China's land area. Based on the Kelvin viscoelastic media model, our work establishes a theoretical geological-geophysical model based on the actual geological and stratigraphic conditions of the Qilian Mountain permafrost, uses the staggered-grid finite difference method to perform forward numerical simulation, and performs wave field characteristic analysis and instantaneous seismic attribute extraction of self-excitation and self-receiving seismic records. The results show that the reflected amplitude energy is weaker when the seismic wave passes through the gas hydrate formation. In the range where the instantaneous frequency attribute profile can distinguish the layer thickness, the instantaneous frequency decreases marginally with the increase of the layer thickness. When seismic waves pass through natural gas-bearing formations, the reflected waves show strong reflection characteristics, and the instantaneous frequency energy increases. The instantaneous seismic attribute has better resolution for the wave-impedance interface, especially the instantaneous phase attribute profile. Therefore, the comprehensive analysis of the instantaneous attribute characteristics can provide a basis for the identification and prediction of terrestrial gas hydrates.

Keywords: Natural gas hydrate; finite difference; forward numerical simulation; Hilbert transform; instantaneous seismic attribute



作者简介: 杨文海, 男, 中国地质大学(武汉)硕士, 武汉市勘察设计有限公司从事城市地下管线探测方面的应用研究, E-mail: 125781614@qq.com; 谭智[✉], 男, 武汉大学硕士, 武汉市勘察设计有限公司从事城市地下管线探测方面的应用研究, E-mail: 408723294@qq.com。