

羌塘盆地天然气水合物冻土层的地震反射 正演模拟分析

张帅^{1,2)}, 王平康³⁾, 祝有海^{1,2)}, 陆程^{1,2)},
庞守吉^{1,2)}, 殷建国¹⁾, 潘卫红¹⁾

1) 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京, 100083;

2) 天然气水合物勘查开发国家工程研究中心, 广州, 510075; 3) 中国地质调查局, 北京, 100037

关键词: 羌塘盆地, 冻土层, 结构模型, 地震反射, 正演分析

羌塘盆地是青藏高原最大的含油气盆地, 多年冻土广泛分布, 具备良好的天然气水合物形成条件和找矿前景。我国多年冻土区天然气水合物的形成主要受气源、地下水、温度和压力4个基本条件制约, 温压条件直接受多年冻土的热状态、厚度以及冻土层下地温梯度的控制和影响。由于冻土层是羌塘盆地天然气水合物形成的必要条件, 其不仅通过 $P-T$ 条件控制了天然气水合物稳定带的空间范围, 还作为盖层限制浅层烃类气体向上运移, 因而对于冻土层的空间展布研究一直是贯穿羌塘盆地天然气水合物研究的重点领域。在冻土地区由于冻土性质的复杂性、介质的不均匀性、物探的多解性等客观因素的影响, 增加了多年冻土区地球物理探测和图像解译工作的复杂性(闫家倩, 2021)。目前, 在冻土层的识别方法上, 除地质浅钻井温测井外, 团队还利用遥感数据反演技术、高密度电法、可控源音频大地电磁测深(CSAMT)、音频大地电磁测深(AMT)、地面核磁共振(SNMR)等探测技术, 均取得了一定的应用效果。本研究将在建立羌塘盆地相应的冻土层结构模型和岩石物理模型基础上, 开展地震反射模型正演分析, 进一步探讨地震勘探对冻土层识别的有效性。

1 冻土结构类型

依据地质浅钻揭示, 羌塘盆地的冻土层主要分为覆盖区(由未固结成岩的沉积物和基岩组成)和

基岩出露区两类, 随着纬度、海拔增高, 冻土层厚度增大, 依据冻土层岩土类型和含冰特征将羌塘盆地冻土层划分为4种主要的结构类型: 自上而下的①冻融层和含冰沉积物、含冰基岩、非含冰基岩冻土层; ②冻融层和含冰沉积物、非含冰沉积物和非含冰基岩冻土层; ③冻融层和含冰沉积物、非含冰沉积物冻土层; ④含冰基岩和非含冰基岩冻土层组成(王平康, 2015)。冻土层结构不同会引起地层压力的变化, 含冰沉积物厚度增大, 冻土层增厚, 相对来说, 第③种冻土层结构类型最理想, 而第④种基岩冻土层厚度发育较薄, 不利于天然气水合物成藏。同时, 我们依托浅钻测井数据利用岩石物理建模方法, 分别建立疏松地层和成岩地层的冻土层中的纵、横波及密度测井曲线的变化, 疏松地层中的冻土层对纵波速度和密度的改变均较大, 成岩地层中引起纵波速度和密度变化均较小, 而两种模型中, 横波的变化非常小。

2 冻土层结构模型与反射特征正演分析

在上述冻土层的结构类型和岩石物理特征分析的基础上, 首先建立两套简单条件下的相应冻土层结构模型进行反射特征正演分析。模型一为冻土层存在疏松沉积物中的模型, 冻土层之下依次为疏松地层和成岩地层, 冻土层的层速度设定为2000 m/s, 密度为1.3 g/cm³, 疏松地层的层速度为1700 m/s, 密度为1.45 g/cm³, 成岩地层的层速度为2200 m/s, 密度为1.8 g/cm³, 模型正演得到的地震反射

注: 本文为广东省基础与应用基础研究重大项目(编号: 2020B0301030003)和中国地质调查局项目(编号: DD20211350)的成果。

收稿日期: 2023-12-10; 改回日期: 2024-02-05; 责任编辑: 章雨旭。DOI: 10.16509/j.georeview.2024.s1.072

作者简介: 张帅, 男, 1987年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事含油气盆地分析与天然气水合物研究; Email: zhangshuai870517@163.com。

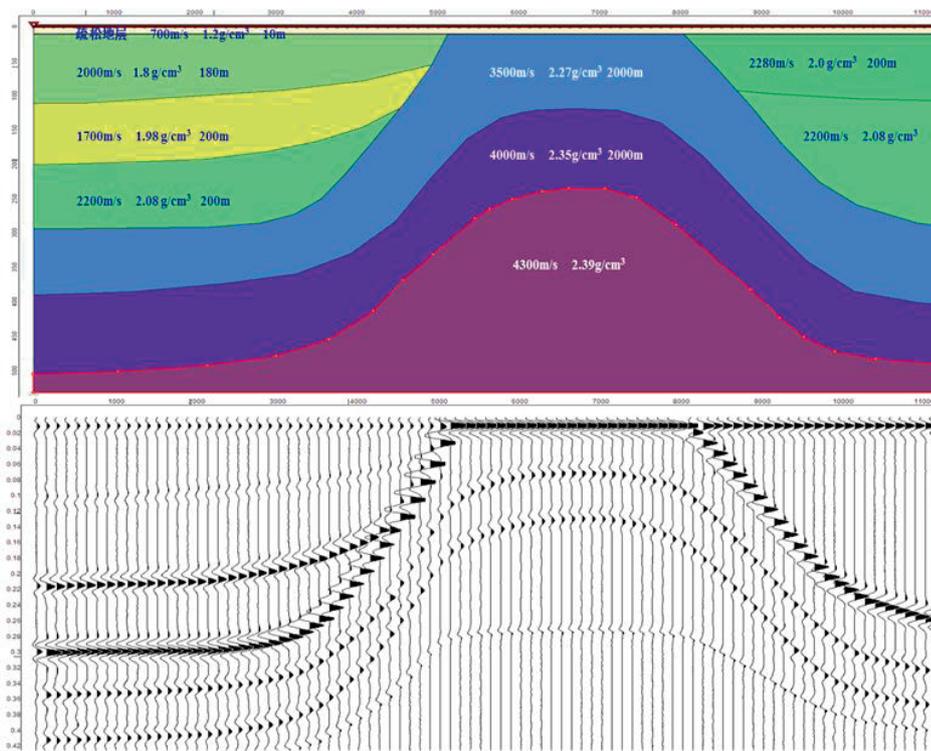


图 1 浅层地震反射特征模型正演图

剖面显示，其冻土层底界为一中强波谷反射，其下疏松地层与成岩地层之间为强波峰反射界面。模型二为冻土层存于基岩地层中的冻土层模型，冻土层之下依次成岩地层和深层成岩地层。基岩冻土层内层速度设定为 3600 m/s，密度为 2.27 g/cm³，其下成岩地层的层速度为 3500 m/s，密度为 2.27 g/cm³，深层成岩地层的层速度为 4000 m/s，密度为 2.35 g/cm³。利模型正演得到的地震反射剖面显示冻土层底界为一弱波谷反射。

3 冻土层复杂地震剖面反射特征正演分析

其次，以羌塘盆地雀莫错地区过 QK-8 井的 QMC-13 线地震反射剖面为例，依据测井数据与岩石物理分析，建立了冻土层复杂地震反射特征的剖面正演模型。浅层为薄层的松散第四系沉积物，层速度为 700 m/s，密度为 1.2 g/cm³，其下为一背斜形态的成岩地层，由浅至深速度及密度逐渐加大，背斜核部为老地层（地层速度 3500 m/s，密度 2.27 g/cm³），左侧由浅至深依次为高孔隙度冻土层（层速度 2000 m/s，密度 1.8 g/cm³）、疏松地层（地层速度 1700 m/s，密度 1.98 g/cm³）和成岩地层（地

层速度 2200 m/s，密度 2.08 g/cm³），右侧由浅至深依次为成岩冻土层（层速度 2000 m/s，密度 1.8 g/cm³）和成岩地层（层速度 2200 m/s，密度 2.08 g/cm³，厚度 200 m）。模型正演结果为浅部沉积物与背斜顶部为一强波峰反射特征，两侧亦为波峰反射，但由于阻抗差不同，振幅强度有变化，阻抗差异小处为弱反射。左侧疏松地层中冻土层底界面表现为中—强波谷反射，成岩地层中冻土层底界面表现为弱反射（图 1）。

4 结论

综上，冻土层底界面反射特征主要受地层岩性控制，在疏松地层中底界面具有一定的地震响应特征，在成岩地层中由于阻抗差异小，冻土层底界面地震响应特征不明显，这主要是由于疏松地层冻结前后的速度和密度变化大于硬岩地层冻结前后的纵波速度和密度变化，因此，利用地震探测方法识别松散沉积地层的冻土层厚度要更容易。

参 考 文 献 / References

- 王平康, 祝有海, 张旭辉, 张帅, 庞守吉, 肖睿, 李冰. 2015. 羌塘盆地冻土结构特征及其对天然气水合物成藏的影响. 沉积与特提斯地质, 35(1): 57-67.
- 闫家倩, 王雯杰, 韩晨. 2021. 青藏高原多年冻土活动层厚度探测方法综述. 地质论评, 67: 209-211.

ZHANG Shuai, WANG Pingkang, ZHU Youhai, LU Cheng, PANG Shouji, YIN Jianguo, PAN Weihong: The analysis on seismic reflection forward modeling in permafrost of gas hydrate in Qiangtang Basin.

Keywords: Qiangtang Basin; permafrost; structural model; seismic reflection; forward analysis