

doi: 10.11720/wtyht.2017.6.03

高景华, 刘建勋, 张保卫, 等. 高精度地震探测陆域天然气水合物的有效性研究[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1005-1011. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.03>

Gao J H, Liu J X, Zhang B W, et al. A study of the effectiveness of the high precision seismic method in detecting land natural gas hydrate[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(6): 1005-1011. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.03>

高精度地震探测陆域天然气水合物的有效性研究

高景华^{1,2}, 刘建勋^{1,2}, 张保卫^{1,2}, 王小江^{1,2}, 徐明才^{1,2}

(1. 国家现代地质勘查技术研究中心, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 为配合天然气水合物资源勘探工作, 2010 年在木里地区开展了高精度反射地震方法探测天然气水合物的有效性试验研究。反射地震采用 192 道接收, 道间距 2 m, 炮间距 8 m, 覆盖次数 24 次, 每道采用 6 个 60 Hz 检波器单点组合接收。激发震源使用炸药, 井深为 3~4 m, 激发药量为 1.2~2.4 kg。采用该工作方法得到地震剖面的信噪比和分辨率较高, 构造形态特征明显。综合分析解释反射地震和测井及地质资料, 推断解释了天然气水合物富集地带, 提出了验证孔位。2013 年, 该探测结果得到了 DK9 钻孔验证, 在距离已发现天然气水合物 DK3 钻孔 SE 方向约 450 m 处发现了厚度较大的天然气水合物。试验研究结果表明: 在天然气水合物含量较低的测区, 利用地震方法直接探测天然气水合物难度较大, 但综合分析测区物化探和地质资料, 结合钻井资料, 能够通过反射地震探测天然气水合物的富集地带。

关键词: 天然气水合物; 反射地震; 断裂构造; 钻孔验证; 合成地震记录

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)06-1005-07

0 引言

随着世界上石油、天然气资源的日渐耗尽, 具有清洁能源的天然气水合物被称为 21 世纪最具有价值的战略资源。

目前发现的天然气水合物主要分布在海域大陆架和陆域永冻土区。海域天然气水合物勘探开发较早, 其方法技术相对比较成熟, 陆域天然气水合物勘探开发较晚, 目前仅在俄罗斯西伯利亚、加拿大马更些三角洲地区 (Mackenzie Delta) 以及美国的阿拉斯加北斯洛普 (North Slope) 地区通过勘探发现了天然气水合物。我国陆域天然气水合物勘探起步较晚, 直到 2008 年才在青海祁连山木里冻土区发现天然气水合物实物样品^[1-2]。世界上陆域天然气水合物主要集中在北极圈附近, 而祁连山永久冻土分布在中纬度地带, 与极地永久冻土区天然气水合物的赋存条件和基本特征存在着显著差异^[3-6]。

在天然气水合物勘探中, 反射地震方法是一种最有效的方法, 在加拿大 Mackenzie (马更些) 三角洲 Mallik 地区^[7-10] 利用反射地震勘探技术, 取得了较好的探测效果。依据地震探测结果, 认为天然气水合物分布与深部断裂带有关, 在未胶结成岩地层中, 含水合物地层反射波的速度相对较高, 含水合物地层反射波的振幅与水合物的含量成正比, 水合物含量越高, 反射波振幅越强。

为配合青海木里地区天然气水合物资源勘查工作, 2010 年, 我们在木里地区开展了反射地震方法探测天然气水合物的有效性试验研究 (图 1), 通过试验研究, 取得了一些利用地震属性识别含天然气水合物地层的初步认识, 根据已知钻孔揭示的含天然气水合物地层的地震属性, 结合其它物化探资料, 推测了天然气水合物分布范围, 该推断解释结果于 2013 年得到了钻探验证, 在验证孔内发现了厚度较大的天然气水合物实物样品。

收稿日期: 2017-09-08

基金项目: 国家高新技术研究发展计划 (“863” 计划) 课题 (2012AA061403)

作者简介: 高景华 (1958-), 女, 教授级高级工程师, 主要从事复杂条件下地震方法技术研究和勘查工作。

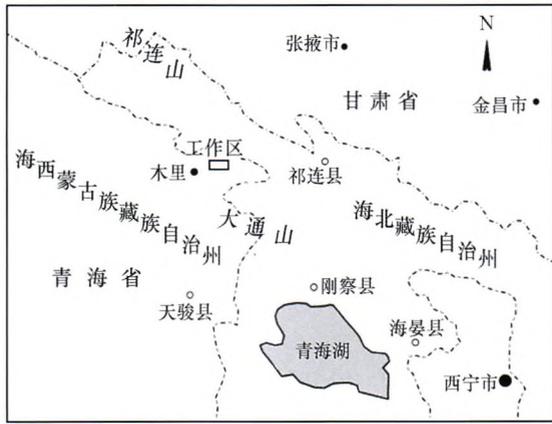


图1 测区地理位置示意

1 地质概况

自震旦纪以来,祁连山先后经历了大陆裂谷阶段、海底扩张及沟弧盆体系阶段、造山等演化阶段,形成了现今的地质构造格局^[3]。

木里地区位于中祁连与南祁连两构造单元间的拗陷区内,主要地层有侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系。侏罗系地层岩性主要为泥岩、粉砂岩、细粒砂岩及炭质泥岩。白垩系、古近系和新近系以细粒红色碎屑岩、粘土岩为主,第四系分布广泛,以冰水—洪积和冰川堆积物为主^[4]。含天然气水合物的地层为侏罗系煤系地层,该含煤地层沉积于三叠系为基底的拗陷中。

测区区域地质构造线总体方向为北西向,大多断层以逆冲推覆断层为主,与之相应的是在北西向、北东向拉伸作用下形成的走滑正断裂(图2)。试验区局部地质构造为一受断层切割的单斜构造,主要断层为北西西和北东东向的逆冲断层,地层产状整体为向南倾斜。

祁连山地区水资源丰富,且具有丰富的煤层气,并发现有长达将近1年的烃类气体漏泄,在这面积约 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的多年冻土地区具备形成天然气水合物的物源条件和所需的冻土条件及温压条件^[4]。

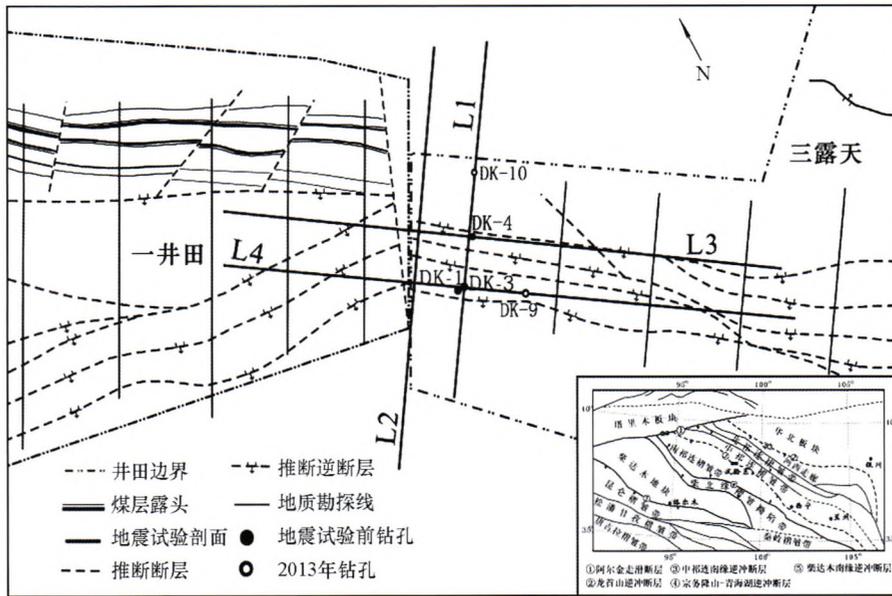


图2 试验区构造示意

2 物性特征分析

在祁连山木里地区,经钻井发现的天然气水合物位于永久冻土层之下,钻孔揭示的天然气水合物呈薄层状、团块状赋存于泥质粉砂岩、细砂岩、泥岩的裂隙面上。图3为在祁连山木里冻土区天然气水合物DK-1科学钻探试验孔得到的速度、密度测井曲线^[2]。由该测井结果可以看出,密度、纵横波速度与泊松比的测井曲线特征类似,即含天然气水合

物地层具有较低的密度和纵、横波速度及泊松比。而冻土区则具有较高的密度和纵、横波速度及泊松比。

从图3所示的测井结果,推断75 m深度为永冻岩层的下界,75~95 m之间为永冻岩层的过渡带。在永冻岩层以下,密度降低似乎与常理不符,推测该深度范围内密度的降低可能与岩层破碎有关。在天然气水合物分布的地层深度范围内,具有密度、速度整体减小的趋势。煤层具有很明显的低速、低密度的特征。

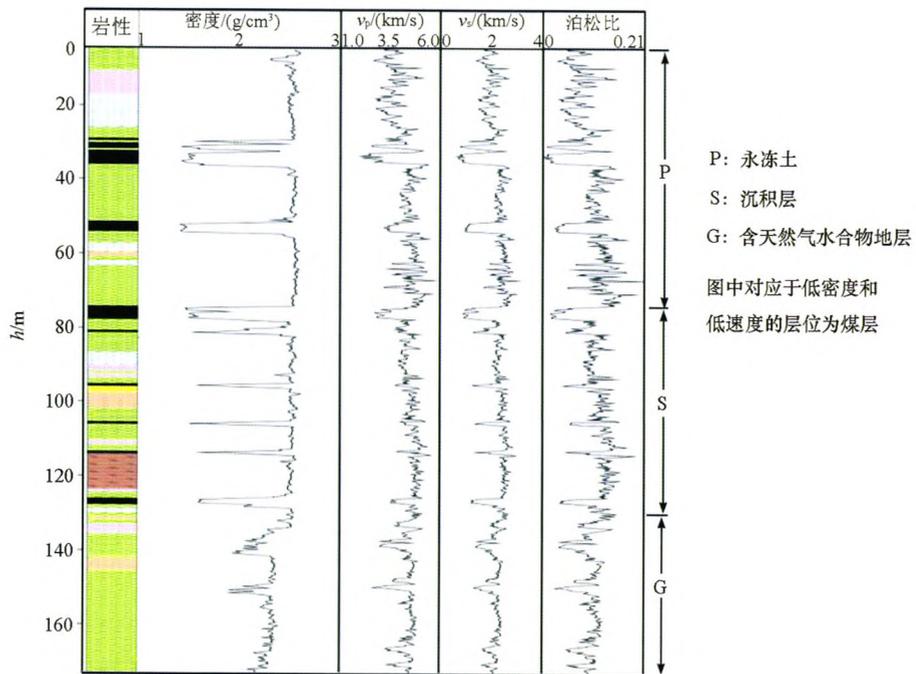


图3 DK-1 科学钻探试验孔测井曲线

3 地震工作方法

3.1 数据采集

为研究含天然气水合物地层反射波的属性,在木里地区开展了反射地震试验研究,试验剖面布置如图2所示。L1 和 L2 试验剖面相互平行,垂直构造走向分布,L1 地震试验剖面通过 DK-1、DK-3 和 DK-4 等钻孔。相互平行的 L3 和 L4 试验剖面垂直于 L1 和 L2,与构造走向平行。通过参数试验,最终选取的剖面试验参数如下:

接收排列采用单边和中间激发相结合的多次覆盖观测方法,每个接收点采用 60 Hz 检波器串以点组合的方式接收。在进行反射地震数据采集试验时,选取的采集方法如下:2 m 道间距,8 m 炮间距,24 次覆盖,16~30 m 偏移距,192 道接收。激发震源使用炸药,井深为 3~4 m,激发药量为 1.2~2.4 kg。

采用的地震数据采集系统为 Sercel 428XL 有线遥测数字地震仪器,使用的仪器记录因素为:采样率 0.5 ms,记录长度 3 s,全通频带接收。

3.2 数据处理

受永久冻土层和复杂表层条件及测区环境影响,本次采集到的地震记录信噪比较低,为处理好该资料,对该资料进行了反复试验处理,经试验选用的地震数据处理流程如图4所示。

为提高地震记录的信噪比和了解含天然气水合物地层的速度特征,本次数据处理重点进行了去噪

和精细速度分析处理。

在地质构造复杂、干扰波发育严重的情况下,其地震叠加剖面并不能真正地反映地下地质构造的形态。为使地震剖面更好地反映地下地质构造,对本次获得的地震剖面进行了偏移处理。

4 试验结果分析

根据地震剖面上反射波的波组特征,结合测区地质资料,对获得的试验地震剖面进行了推断解释,图5表示了经推断解释的 L1 线地震深度剖面。

在解释后的 L1 线地震剖面上,分布有多条逆冲断裂,其中分布在剖面左侧倾向 SW 的逆冲断层断距相对较大,且向地表延伸较浅,而分布在剖面右侧的 2 条倾向 NE 的逆冲断层断距相对较小,其活动性也不如向 SW 倾斜的断层。在这两条倾向 SW 的逆冲断层之间形成明显的断层破碎带,在断裂破碎带内,反射波振幅相对较弱。

对海洋天然气水合物的研究表明^[5],天然气水合物稳定带与深部气源密切相关。在木里试验区,充分发育的逆冲断层的上断点埋深较浅,较厚永久冻土层(图3)作为良好的盖层,使断裂破碎带有可能成为甲烷气体局部富集的空间。如果没有永久冻土层作为封闭盖层,由深部运移的气源有可能通过断裂向上飘逸到地表,形成不了天然气水合物。由此可见,深部断裂带和烃源岩地层是形成天然气水合物的充分条件,而永久冻土层则是天然气水合

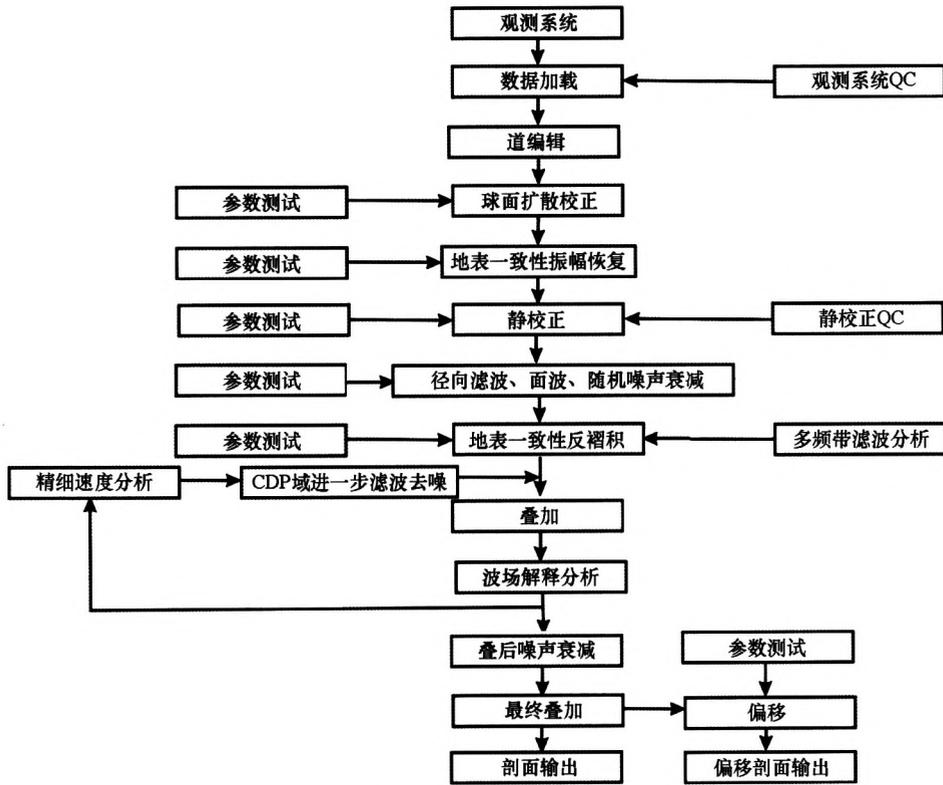


图 4 数据处理流程

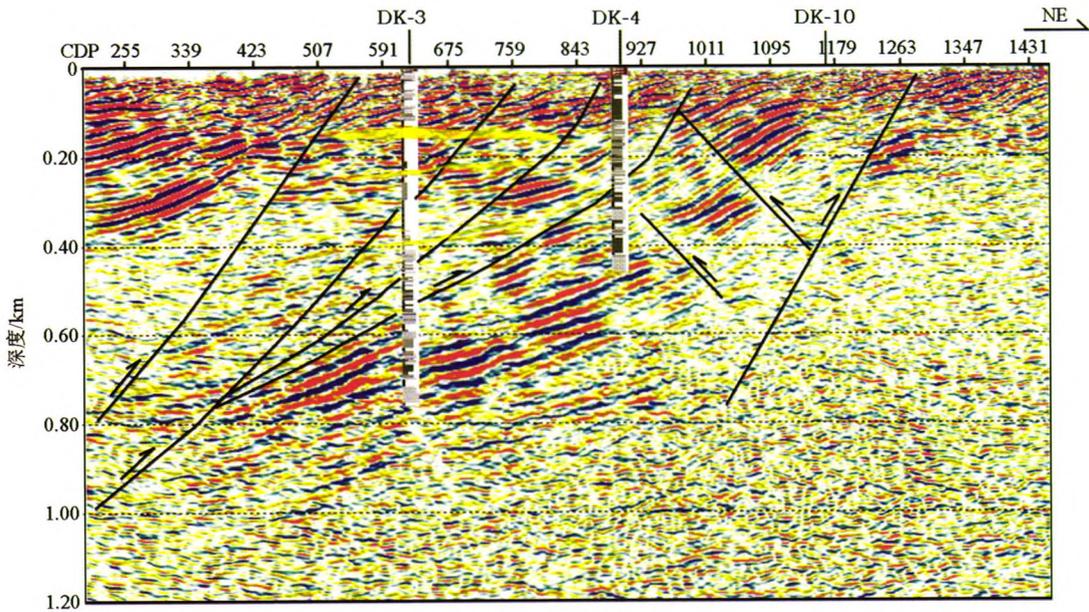


图 5 L1 线地震深度剖面

物富集成藏的必要条件。

在图 5 所示的 L1 线地震剖面上,在相应的位置标出了 DK3、DK4 和 DK10 钻孔(DK3 与 DK1 相距很近,如图 2 所示)。综合分析地震剖面上的波组特征、地震波的频率、振幅、速度和电阻率测井曲线^[12]分析,不支持 DK4 钻孔钻遇天然气水合物。实际上,由于 DK4 附近冻土层厚度较薄,尽管该钻孔位置断裂构造发育,也没有钻遇天然气水合物实

物样品。根据所获得的地球物理资料,结合钻孔资料,推断解释了天然气水合物富集地带,如图 5 上的半透明黄色条带所示。

剖面上的 DK10 是依据其它非地震资料确定的钻孔位置。在 DK10 中,未发现天然气水合物,但发现了大量气体。由图 5 所示的地震剖面看出,DK10 位于一个断层圈闭的构造上,受断层圈闭影响,钻孔揭示的孔中气体压力较大。在 DK10 附近地震波频

率低、振幅弱,与已发现天然气水合物的 DK3 附近的地震波组特征明显不同,显然,地震资料本身不支持在该处钻遇天然气水合物。

图 6 表示了经解释后的 L4 线地震深度剖面,由于该剖面基本沿构造走向布置,地震剖面上反映的地层产状比较平缓。在该剖面上解释了 4 条倾向 NW 的正断层和一组倾向 SE 的逆断层。根据 DK3 揭示的天然气水合物层段在地震剖面上的波组特征,结合其他物化探资料,特别是由电阻率解释的冻土层厚度,提出了 DK9 验证孔位。实际上,在建议

的钻孔位置反射地震波组还有微隆起,该隆起更有利于甲烷气体富集,在合适的冻土及温压条件下形成天然气水合物。

图 7 为 2013 年实施的 DK9 验证孔综合柱状图,可以看出,在 DK9 验证钻孔 188.2~209.45 m 处发现有含天然气水合物地层 A,单层厚度大于 20 m。此外,在 270 m 和 360 m 深度附近,还发现有 2 套约 10 m 厚度的含天然气水合物地层 B 和 C,证实了地震推断解释结果。在图 6 所示地震剖面上,B 和 C 含天然气水合物地层反射波呈杂乱中弱振幅出现。

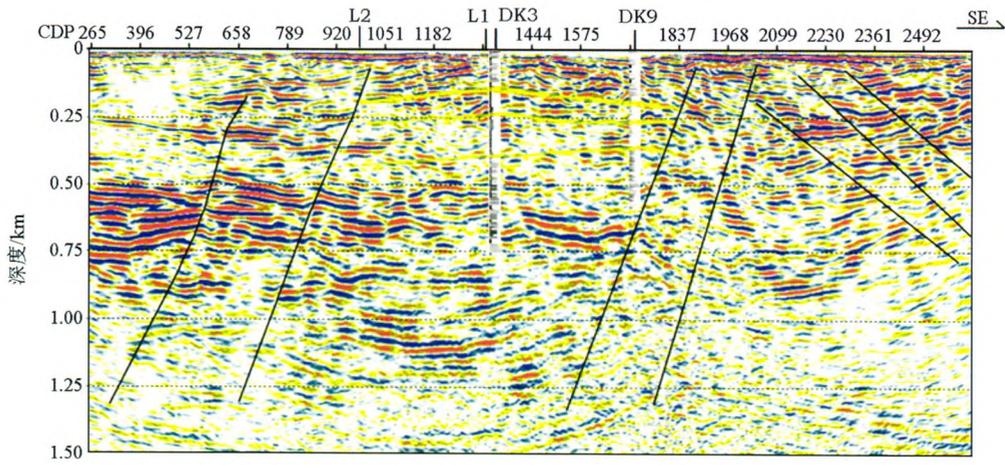


图 6 L4 线地震深度剖面

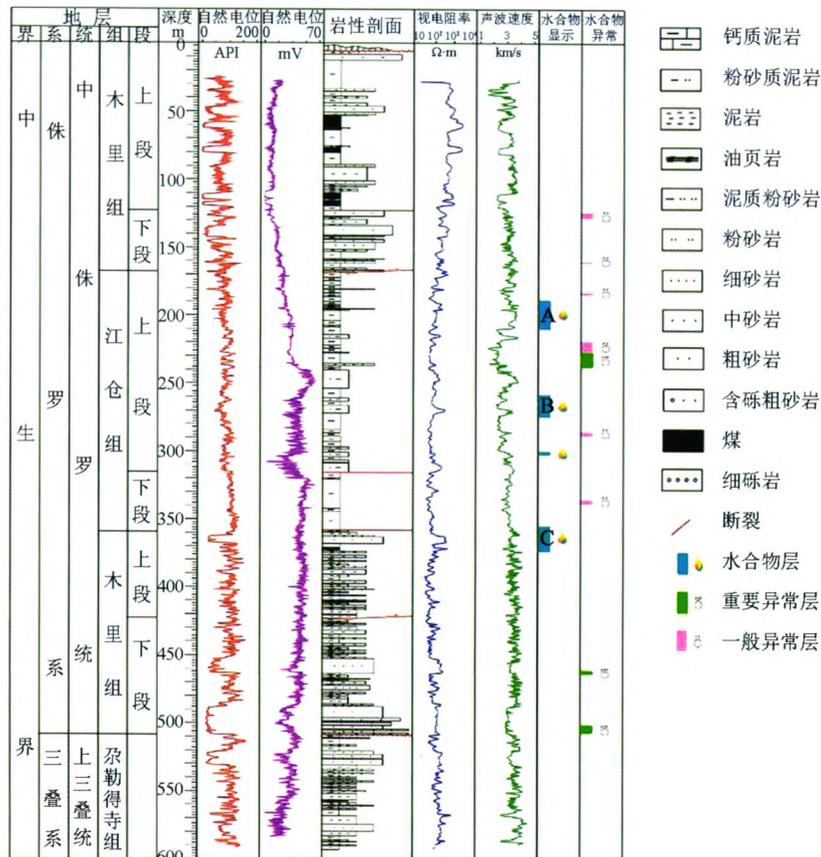


图 7 DK9 钻孔综合柱状图

在图 7 所示的验证孔柱状图上,发现含天然气水合物地层的声波速度变化较大,含天然气水合物地层 A 的岩性主要为泥岩和油页岩,其平均速度为 3 362 m/s,含天然气水合物地层 B 的岩性主要为油页岩和钙质泥岩,其平均速度为 2 711 m/s,而含天然气水合物地层 C 的岩性主要为泥岩和中、细砂岩,其平均速度为 3 372 m/s。由于木里地区硬岩层中天然气水合物含量较低,含水合物储层的速度与储层的岩性和地层的破碎程度有关,与天然气水合物的含量关系不是很大。

在断裂破碎带内,孔隙度较大,天然气水合物以晶体形态出现,该结晶晶体产生的高频散射波经叠加后呈现相对高的频率,如 DK3 钻孔中含天然气水合物层段处的反射波;而非破碎完整地层的孔隙度较低,在这种情况下,天然气水合物以侵染状形式出

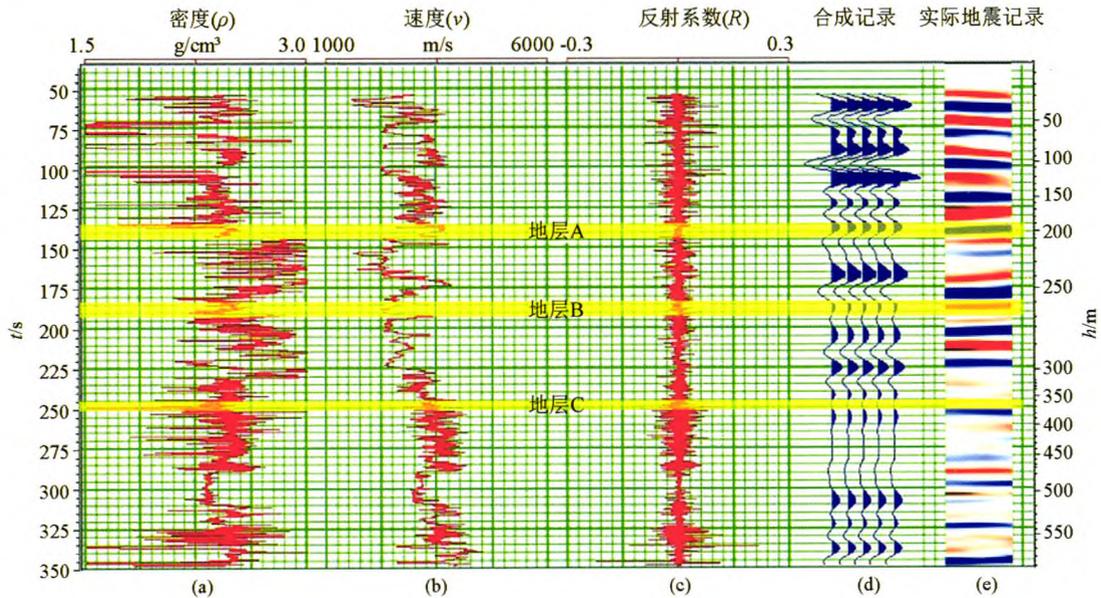
现,该含天然气水合物地层形成的反射波振幅相对较弱,频率中等,如 DK9 钻孔中深度约 360 m 处的反射波。

由测井密度(图 8a)与纵波速度(图 8b)通过公式

$$R_i = \frac{v_{i+1}\rho_{i+1} - v_i\rho_i}{v_{i+1}\rho_{i+1} + v_i\rho_i}$$

计算的反射系数 R 如图 8c 所示。

使用带宽为 10~80 Hz 的地震 Rick 子波与反射系数 R 褶积得到的合成记录(图 8d)与实际地震记录(图 8e)对比后得出,在发现水合物的层段(图中黄色标注位置),合成记录与实际地震记录具有较好的可对比性,含天然气水合物地层反射波的振幅相对较弱,频率相对较高。



a—测井密度;b—纵波速度;c—反射系数;d—合成记录;e—实际地震记录

图 8 合成记录与实际记录的对比

5 结论

陆域天然气水合物的形成与深部气源向上运移、温压和冻土条件密切相关。深部烃源气只有通过深部断裂通道才能向上运移至水合物稳定带,富集在断裂附近的破碎带内,在合适的温度压力条件及永久冻土封闭环境下,形成天然气水合物。

陆域含天然气水合物地层形成反射波的地震属性十分复杂,通常情况下,若水合物出现在孔隙度较高的断裂破碎带内,该反射波的频率相对较高,速度相对较低;若水合物出现在孔隙度较低的完整地层内,该反射波的振幅相对较弱,频率中等,速度相对

较高。

地震方法探测陆域天然气水合物的有效性试验研究表明,采用地震方法能够对深部断裂的位置、产状和断裂破碎带进行探测,根据含天然气水合物地层反射波的运动学和动力学特征及其钻孔资料解释的地震异常已被钻探验证,验证结果与地震推断解释相一致。

由于木里地区天然气水合物含量较低(木里地区 DK-1 钻孔天然气水合物含量约为 0.28%),利用地震方法直接探测天然气水合物难度较大,但综合分析测区物化探和地质资料,结合钻井资料,能够探测天然气水合物富集地带,达到间接寻找天然气水合物的目的。

致谢:本项目得到“863”课题“冻土带天然气水合物地球物理勘查技术”项目经费资助,在野外数据采集期间,青海煤炭地质 105 勘探队给予了帮助;在该项目研究期间,中国地质科学院祝有海、方慧和孙忠军研究员对该项目的开展提出了许多合理化的建议。对上述单位、专家的帮助和支持表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 徐水师,王佟,刘天绩,等.青海省木里煤田天然气水合物资源量估算[J].中国煤炭地质,2009,21(9):1-6.
- [2] 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):1762-1770.
- [3] 冯益民.祁连造山带研究概况——历史、现状及展望[J].地球科学进展,1997,12(4):307-314.
- [4] 祝有海,刘亚玲,张永勤.祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件[J].地质通报,2006,25(1-2):58-63.
- [5] 杨传胜,李刚,龚建明,等.断裂对天然气水合物成藏的控制作用[J].海洋地质动态,2009,25(6):1-5.
- [6] 徐明才,高景华,柴铭涛,等著.金属矿地震勘探[M].北京:地质出版社,2009.
- [7] Milkereit B, Adam E, Li Z, et al. Multi-offset vertical seismic profiling: an experiment to assess petrophysical-scale parameters at the JAPEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well[J]. Geological Survey of Canada, Bulletin, 2005, 585: 1-13.
- [8] Schmitt D R, Welz M, Rokosh C D. High-resolution seismic imaging over thick permafrost at the 2002 Mallik drill site[J]. Geological Survey of Canada, Bulletin, 2005, 585: 1-13.
- [9] Miller R D, Hunter J A, Doll W E, et al. High-resolution seismic imaging of the gas hydrate stability zone at the Mallik L-38 research site[J]. Geological Survey of Canada, Bulletin, 2005, 585: 1-14.
- [10] Riedel M, Bellefleur G, Mair S, et al. Acoustic impedance inversion and seismic reflection continuity analysis for delineating gas hydrate resources near the Mallik research sites, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada[J]. Geophysics, 2009, 74(5): B125-B137.
- [11] Dunham L. Method for determining resistivity derived porosity and porosity derived resistivity[J]. The Log Analyst, 1996, 11-12: 16-18.
- [12] Xu M C, Sun Z J, Liu J X, et al. Validity experiment of natural gas hydrate in permafrost detected by seismic method[C]//Szczecin: 2013 the 10th ocean mining & gas hydrates symposium, 2013: 121-125.

A study of the effectiveness of the high precision seismic method in detecting land natural gas hydrate

GAO Jing-Hua^{1,2}, LIU Jian-Xun^{1,2}, ZHANG Bao-Wei^{1,2}, WANG Xiao-Jiang^{1,2}, XU Ming-Cai^{1,2}

(1. National Modern Geological Exploration Technology Research Center, Langfang 065000, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: In order to cooperate with the exploration of natural gas hydrate resources, the authors conducted the validity of the experimental study of high precision seismic reflection method in Muli area for the detection of natural gas hydrate in 2010. 192 receive channels, 2 m group spacing, 8 m shot spacing, and 24 folds were used in reflection seismic survey. 60 Hz geophone string (with 6 geophones) each received channel received seismic wave in the form of point array. Excitation sources were explosives, shot depth was 3~4 m, and shot charge was 1.2~2.4 kg. The seismic sections obtained by the method possessed high S/N ratio and resolution as well as obvious structural form characteristics. On the basis of a comprehensive analysis and interpretation of reflection seismic, well logging and geological data, the enrichment zones of natural gas hydrate were explained and validated borehole location was determined. The detection results were verified by DK9 borehole drilling in 2013. The gas hydrate reservoirs with large thickness were found 450m southwest of DK3 borehole. Experimental results show that it is difficult to detect natural gas hydrate directly by seismic method in the lower gas hydrate content's area, but through a comprehensive analysis of geophysical, geochemical and geological data in combination with drilling data, the enrichment zones of natural gas hydrate can be detected by seismic exploration.

Key words: natural gas hydrate; seismic reflection; fault structure; drilling verification; synthetic seismogram

(本文编辑:叶佩)