

doi: 10.11720/wtyht.2017.6.38

秦臻, 林振洲, 潘和平, 等. 木里水合物测井评价系统[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1275-1280. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.38>

Qin Z, Lin Z Z, Pan H P, et al. Logging evaluation system of natural gas hydrate in Muli Area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(6): 1275-1280. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.38>

木里水合物测井评价系统

秦臻^{1,2}, 林振洲^{2,3}, 潘和平², 方思南², 邓呈祥², 覃瑞东², 纪扬², 徐伟²

(1. 东华理工大学 地球物理与测控技术学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074; 3. 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: 陆域冻土区天然气水合物勘探进展迅速, 木里地区数口井已发现含天然气水合物储层, 但目前国内尚无匹配的测井评价系统软件, 影响了木里地区水合物勘探进度。为此, 基于木里地区地质、工程和数据条件, 利用 VB 语言开发了木里水合物测井评价系统。该系统的主要技术和方法有: ①测井数据预处理技术; ②测井响应特征与岩性分析; ③岩性与储层识别技术; ④储层参数计算与评价。结合这些技术和方法, 设计了系统的结构和功能, 采用分层式框架结构, 从下至上共 3 层: 基础数据层、中间支持层、应用层; 实现了系统和技术的主要功能, 建立了一套完整的链式处理模块和技术流程。现场应用表明, 该系统满足勘探现场水合物测井处理解释的精度和效率要求, 且结构简洁稳定, 功能完善。实现了对木里水合物测井的高效处理与解释, 填补了相关领域的空白, 支持了木里地区天然气水合物的勘探与开发。

关键词: 天然气水合物; 木里地区; 测井评价; 储层识别; 系统开发

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)06-1275-06

0 引言

天然气水合物是由气体分子与水在低温高压条件下形成的白色结晶状物质, 主要产于海底沉积物和陆上永久冻土带中, 是一种新型的潜在能源^[1-2]。陆域天然气水合物就是埋藏于陆地永久冻土带地层的天然气水合物, 据粗略估算, 青藏高原冻土区域内天然气水合物远景资源量约为 $1.12 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 潜力巨大^[3-4]。我国祁连山的冻土区内具有的气源条件良好, 特别是木里地区, 其地质条件比较有利于天然气水合物的形成。2008~2009 年, 已有多口井钻遇天然气水合物, 产于冻土层之下, 埋深 133~396 m, 展现出良好的勘探前景^[5]。

考虑到天然气水合物钻探取样技术复杂且成本昂贵, 因此, 地球物理测井是目前除钻井取心外识别和评价天然气水合物储层的最有效方法^[6-7]。木里

地区天然气水合物储层测井响应特征通常为: 高电阻率、低声波时差、低自然伽马、低密度等特征, 具有典型的水合物测井响应特征。王佟等^[8]分析了青海木里天然气水合物特征与成因, 指出其主要赋存于中侏罗统江仓组油页岩段的细砂岩夹层内的孔隙和裂隙中; 郭星旺等^[9]分析总结了永久冻土区天然气水合物饱和度评价方法, 指出这些方法需要相互验证以提高精度; 郭星旺等^[10]和侯颀等^[11]分析了木里天然气水合物测井响应特征, 并建立了识别方法; 林振洲等^[12]依据岩心情况分析了含水合物岩心的物性条件, 并建立了估算模型。另外, 海域和极地冻土天然气水合物的测井评价方法也得到长足发展, 但所处的地质环境不同, 因此相应的测井评价方法也有所不同^[13-14], 主要区别在于测井响应特征、孔隙度和饱和度模型及参数选择的不同^[6-7]。目前, 木里地区天然气水合物勘探发展迅速, 但尚无匹配的测井评价系统, 影响了勘探进度。因此, 急需一

收稿日期: 2017-09-08

基金项目: 国家 127 专项“天然气水合物资源勘查与试采工程”项目(GZHL20110324, GZH201400305); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160224)

作者简介: 秦臻(1985-), 男, 东华理工大学讲师, 主要从事测井方法与解释的教学和研究工作。Email: 442105079@qq.com

通讯作者: 潘和平(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事测井与井中物探的教学和科研工作。Email: panpinge@163.com

套水合物测井评价系统,提高勘探与开发的效率。

1 系统的技术和方法特点

研究区位于中祁连褶皱隆坳带西段,分布在木里煤田聚乎更矿区内,青海省天峻县木里境内^[3-5]。天然气水合物钻探区位于三露天井田内,共钻探天然气水合物钻孔14个,深度为0~600 m,目标层位为中侏罗统江仓组 and 木里组,岩性主要为砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、油页岩和煤等,测井工作取得了自然伽马、电阻率、密度、声波速度、井径、中子、超声成像等测井资料^[8-12]。考虑到不同钻孔测井的不同批次、钻孔易扩径等影响因素,系统首先对测井数据进行预处理,然后总结木里地区天然气水合物储层的测井响应特征,并建立岩性与流体的识别技术,最终形成木里地区天然气水合物储层参数计算与评价方法。

1.1 测井数据预处理技术

测井原始数据受到井眼环境、仪器测量、系统误差等因素的影响,为尽量消除这些影响,需要进行深度对齐、标准化和环境校正^[15-16]。系统建立了完整的预处理技术。

1.1.1 深度对齐

在实际的测井过程中,由于井眼环境、仪器自重、测量方式、居中情况等因素,造成电缆拉伸情况不同,使得各曲线之间深度发生偏差。通常采用人工方法或自动方法进行校正,人工校正适合局部深度校正,自动校正适合整条曲线的深度校正。二者方法相似,首先确认曲线之间深度是否存在错动,然后以某一条测井曲线为标准,确认其他曲线深度的差异再加以校正,完成各井深度对齐工作。

1.1.2 标准化

多井测井解释首先需要解决系统误差问题,如年代跨度大、测井仪器型号多、刻度标准不统一、操作方式不一致等问题,因此解释前需要进行标准化。木里地区曲线标准化工作有:①选取多井均稳定分布的江仓组上段70~100 m处泥岩层作为标准层;②标准井和标准化,求取所有井泥岩标准层测井特征值的平均值,此特征值构成一口虚拟标准井,建立各井相对标准井的相对校正量,完成标准化工作。

1.1.3 环境校正

影响测井曲线的环境因素较多,如井径、泥浆密度与矿化度、泥饼、井壁粗糙度、泥浆侵入带、地层温度与压力、围岩以及仪器外径、间隙等,为了取得较好的测井解释与数据处理效果,必须对测井曲线进

行环境校正。基于木里地区的地质和工程条件,总结出测井曲线主要受到井径、井壁粗糙度和泥浆的影响,利用对应测井仪器的校正图版,建立了声波(AC)、密度(DEN)和自然伽马(GR)的环境校正模型。

1.2 测井响应特征

木里天然气水合物储层常规测井方法主要有自然伽马、井径、深浅电阻率、补偿密度、补偿中子以及声波时差等。由于天然气水合物具有不同于储层骨架及油气的物理性质,因此在含水合物储层中呈现出独特的测井响应特征:低自然伽马、井径扩大、高电阻率、低密度、高中子孔隙度以及低声波时差等,尤其是高电阻率和低声波时差特征最为明显^[8-9]。总结了木里地区含有天然气水合物晶体的储层测井响应特征值,为测井识别水合物储层奠定基础。

1.3 岩性和储层识别技术

基于木里水合物储层岩性和测井响应特征,选用岩性和流体敏感测井曲线,利用贝叶斯判别、BP神经网络和支持向量机方法建立了流体、岩性识别方法^[17]。

1.3.1 贝叶斯判别法

贝叶斯的基本思想是:假定对所研究的对象(总体)在抽样前已有一定的认识,常用先验概率分布来描述这种认识,然后基于抽取的样本再对先验认识作修正,得到后验概率分布,再基于后验概率分布作各种统计判断,将贝叶斯统计的思想应用于判别分析,即得到贝叶斯判别方法。

1.3.2 BP神经网络法

BP神经网络是人工神经网络技术中最流行的一种,是地学领域中应用较多的分类工具。一般BP神经网络模型结构为一个输入层、多个隐层、一个输出层,只要隐层的节点个数足够多,就可以逼近任一非线性映射,故多数情况下只采用一个多节点的隐层。BP神经网络分为两个过程:学习过程,采用BP模型,用学习样本的已知指标和预测指标,来求学习样本的预测指标与已知指标间的非线性关系;预测过程,利用计算出的非线性关系,根据学习样本和待预测数据的已知指标的值,分别求出学习样本和待预测数据的预测指标的值。

1.3.3 支持向量机法

支持向量机是由Cortes和Vapnik于1995年正式提出一种机器学习方法,它在解决小样本非线性和高维模式识别问题中表现出许多特有的优势,并在很大程度上克服了“维数灾难”和“过学习”等问

题。支持向量机的基本思想是根据结构风险最小化原理,通过最大化分类间隔或边缘尽量提高学习机的泛化能力,即寻找一个满足分类要求的最优分类超平面,使得该超平面在保证分类精度的同时,能够使超平面两侧的空白区域最大化。

1.4 储层参数计算与评价

1.4.1 计算泥质含量

木里地区天然气水合物通常赋存在细粉砂岩夹层内^[4-6],因此泥质含量大小会影响测井响应,为评估对其造成影响的大小,并划分砂岩和泥岩层段,基于工区的地质条件,通常采用自然伽马测井值、密度—声波交会方法,建立泥质含量计算模型。

1.4.2 地层孔隙度计算

测井评价孔隙度直接指示着水合物的存储空间。通常利用测井确定天然气水合物储层中的孔隙度方法主要为密度测井(DEN)、中子测井(CNL)、声波测井(AC)、电阻率测井(RT)及核磁共振测井(NMR)等,这些测井方法所反映的地层物理响应值均和地层的孔隙度是紧密相关的。研究区内的储层较为致密,岩芯孔隙度分析表明当研究区内的天然气水合物赋存于砂岩中时,其地层的孔隙度为3%~11.68%,均值为6%^[8,10]。基于岩芯分析资料和工区地质条件,木里水合物测井评价系统采用密度、电阻率及声波测井方法计算天然气水合物储层的孔隙度,并作相应的压实校正,建立了可靠的孔隙度计算模型。

1.4.3 天然气水合物饱和度计算

沉积物中所含有的天然气水合物主要分布形式有下面几类:块状、脉状、节状和分散的胶结物^[4-6]。永久冻土区的天然气水合物储层评价模型有两类:冻土层内和冻土层下。木里地区所有井内的天然气水合物储层均出现在冻土层下,测井计算饱和度主要以阿尔奇公式为基础,其中参数选取是基础工作,依据工区岩芯实验并参考国内外水合物岩电实验情况,选定岩电参数为 $a = 1.32$, $m = 0.51$, $b = 1$, $n = 1.93$ ^[7,18]。目前采用标准阿尔奇公式、修正阿尔奇公式、印度尼西亚公式,时间平均方程饱和度方法和修正 wood 方程计算饱和度,建立了木里水合物饱和度计算方案。

2 系统的结构与主要功能

2.1 系统的结构

考虑到现场需求,充分借鉴和吸收国内外成熟

商业软件的成果和思想^[20-21],在 windows 系统下,利用 VB (Visual Basic 6.0) 语言编写了“木里水合物测井评价系统”,软件的体系结构见图 1。采用分层式框架结构,从下至上共 3 层:

1)基础数据层,进行数据访问和管理,考虑到用户便捷性需求,在系统数据格式的设计采用测井现场广泛使用的 Forward 数据格式,可以快速移植于国内常用测井处理软件,如 Forward、LEAD、CIFLOG 和卡奔等软件^[19-20],满足现场稳定、快速处理的数据格式要求;

2)中间支持层,体现软件核心价值的部分,提供主要功能和服务,封装形成界面组件库、预处理方法库、流体识别方法库和解释方法库;

3)应用层,提供测井计算与评价和测井绘图,可以快速编辑地显示、导出测井评价成果。该系统结构简洁稳定,占用内存小,对计算机配置要求低,易于操作与维护,运行处理效率高,可以适应环境恶劣的冻土区测井工作环境,获取可靠的测井解释成果^[4,6]。

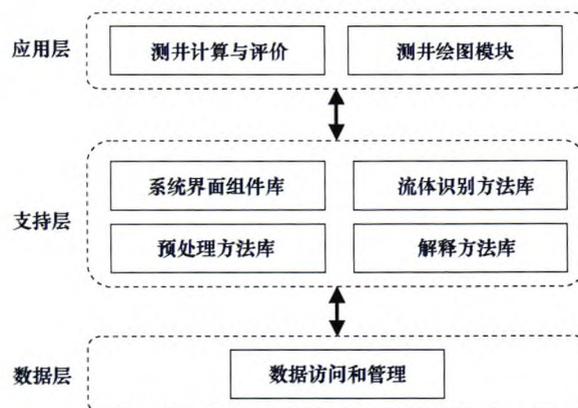


图 1 木里水合物测井评价系统体系结构

2.2 系统的主要功能

基于上文木里水合物测井评价技术和方法,以及系统的体系结构设计,实现了系统和技术的主要功能,建立了一套完整的链式处理模块和技术流程(图 2),易于实现和用户掌握。在获取原始测井资料后,通过该链式处理模块,解释人员可以快速准确地获取天然气水合物储层的测井识别结果、储层参数计算和评价成果,以及相应的数据和图件,符合现场处理的效率要求。该评价系统和其主要功能,具有数据管理的可移植与便捷化、识别技术选用的便捷化、评价方法与参数具有多套方案、系统维护和操作简单等特点。

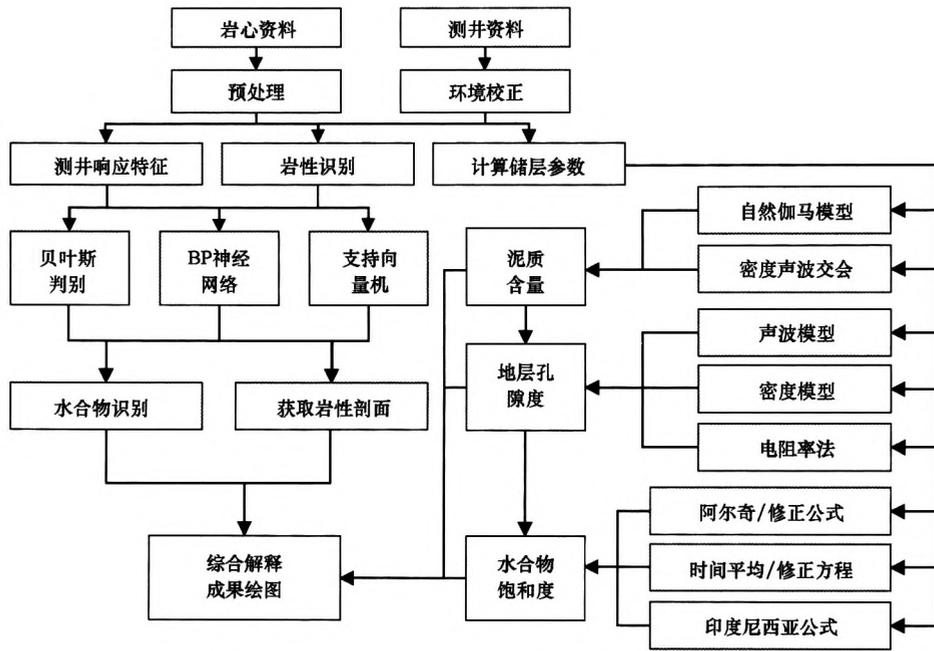


图2 木里水合物测井评价系统链式处理模块与流程

3 系统应用效果

利用木里水合物测井评价系统,处理解释了DK2(180~350 m)和DK8(236~366 m)两井的储层参数。DK2井计算结果显示(图3),该井密度测井受井眼环境影响大,除扩孔段和煤层段,选用声波计算孔隙度较为合理,计算的储层孔隙度范围为2%~8%,平均约为4.6%,而7块岩芯分析的平均孔隙度约5%,符合岩芯孔隙度分析特征^[3,12]。录井和岩芯

分析结果显示:220~275m、280m、290m、325m等数处水合物层段,黄色和红色分别代表录井岩芯分析疑似水合物层段和含水合物层段,通过评价系统识别和计算,综合解释完全识别出对应的储层段。但软件计算的饱和度差异较大,由于木里地区天然气水合物在工区条件下难以进行实验测量,获取直接饱和度数据,因此参考录井结果和前人成果^[7,9,18],分析认为阿尔奇公式、时间平均方程和印度尼西亚公式计算结果为含天然气水合物饱和度相近,范围为40%~60%,而另2种方法计算结果偏小。

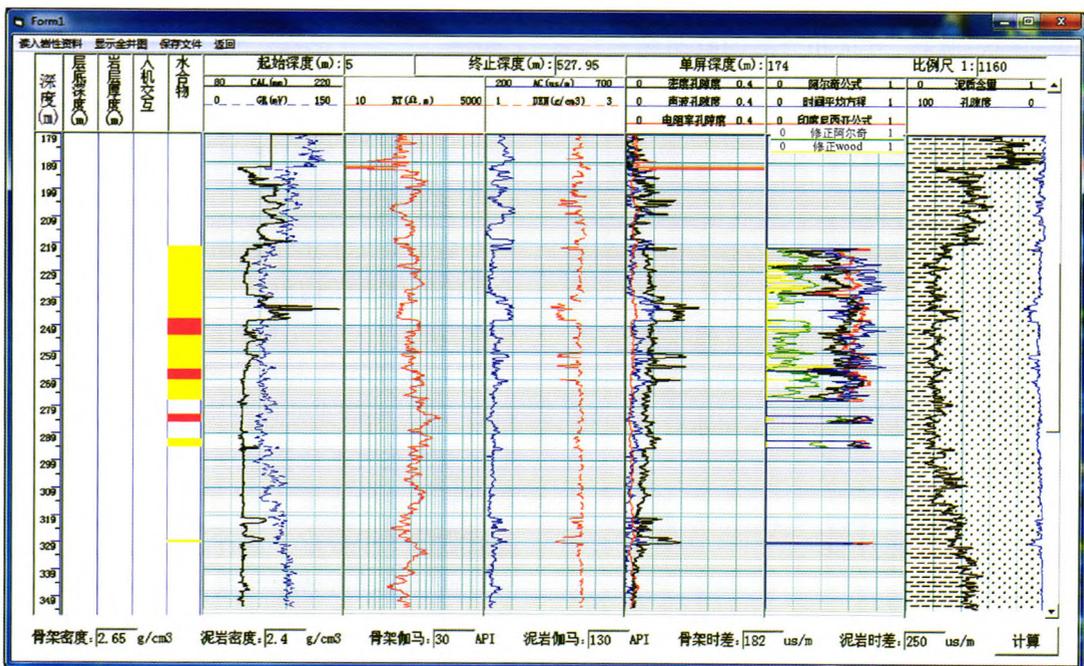


图3 DK2井180~350 m 储层参数计算成果

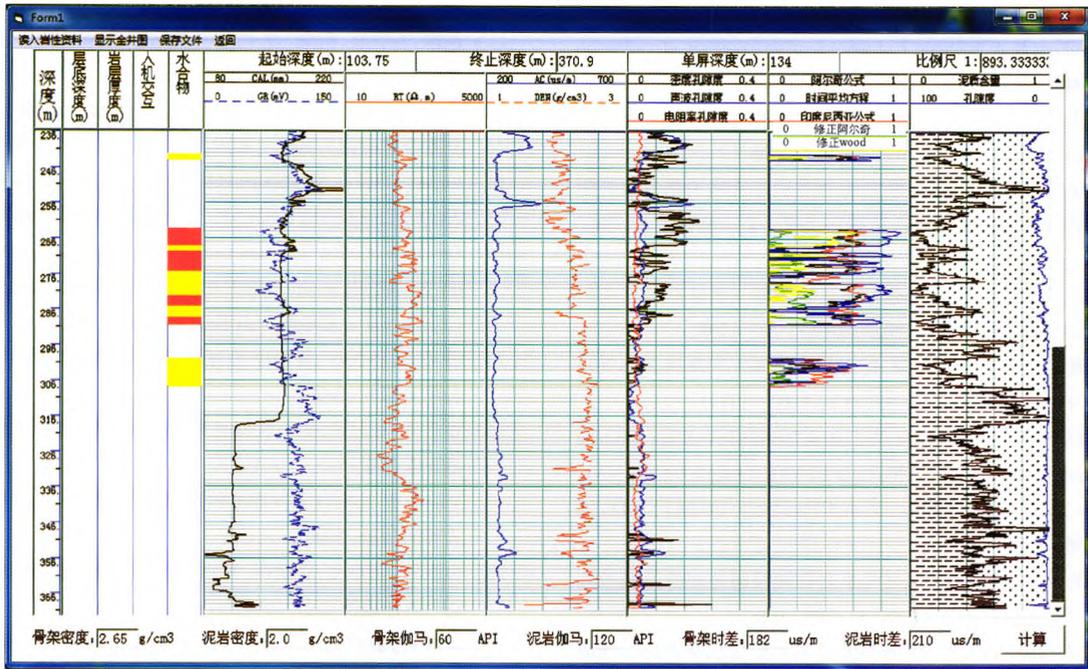


图 4 DK8 井 235~370 m 储层参数计算成果

DK8 井计算结果显示(图 4),该井密度测井受井眼环境影响大,除煤层段和扩孔段,选用声波计算孔隙度较为合理,计算储层孔隙度范围为 3%~7%,平均约为 4%,而 7 块岩芯分析的平均孔隙度约 4.5%,与岩心分析符合度较好。录井显示了 263、270、280、290 m 位置为主要的含水合物储层,而 241、273、280、300 m 为疑似水合物储层,利用评价系统综合解释完全识别出对应的储层段。但不同模型计算的饱和度存在差异,参考录井结果和前人成果,其中阿尔奇公式、印度尼西亚公式的计算结果与录井分析结果接近,范围约为 55%~90%,另 3 种方法计算结果均偏小。不难发现,该井与 DK2 井的饱和度模型评价效果不尽相同,分析原因可能由于 DK8 井岩性变化大,夹层较多导致非均质性对测井响应和饱和度计算影响较大。

木里水合物测井评价系统的应用表明,该地区的饱和度模型主要选用阿尔奇公式、时间平均方程和印度尼西亚公式,但需要相互验证以提高计算精度^[7,9,18]。利用该软件共处理解释 12 口井,水合物储层解释符合率可达到 85%以上。因此,考虑到木里水合物测井评价系统的精度和效率、系统数据和稳定性等特点,应用结果表明,该系统可以较好完成木里水合物测井评价工作。

4 结论和展望

1) 基于木里地区天然气水合物储层的地质、工

程条件,建立了一套较完整的测井评价方法,主要包括:木里天然气水合物测井数据预处理技术、测井响应特征与岩性分析、储层分层与岩性识别技术和储层参数计算与评价四个方面。

2) 基于用户需求和木里水合物勘探现场情况,设计并利用 VB 语言实现了木里水合物测井评价系统。软件使用 forward 数据格式,并具有一套完整的链式处理模块和流程,软件简洁稳定、对计算机配置要求低、易于操作与维护,可以胜任环境恶劣的冻土区测井与评价工作。

3) 利用该系统共处理解释木里地区 12 口井,结果表明该水合物评价系统可以较好地完成木里水合物测井评价工作,且结构简洁稳定,功能完善,可推广至地质、工程条件相似的冻土区天然气水合物测井评价工作中。

4) 结合应用的情况,该评价系统存在的主要问题:① 缺少非常规测井处理与解释功能;② 系统界面设计尚有可优化区域。因此,下一步计划首先解决上述问题,然后结合逐渐完善的分析化验、特殊测井和工程资料,进一步完善系统的评价功能;并计划推出试用版供各院校教学和科研使用,集思广益,进一步推动我国天然气水合物测井方法和软件的发展。

致谢:文章编写过程中得到地球物理地球化学勘查研究所高文利、孔广胜、方慧等专家的指导,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] Kvenvolden K A. Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? [J]. *Chemical Geology*, 1988, 71: 41–51.
- [2] Sloan E D. Clathrate hydrates of natural gases (second edit) [M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1998: 1–628.
- [3] 卢振权, 祝有海, 张永勤, 等. 青海祁连山冻土区天然气水合物资源量的估算方法——以钻探区为例 [J]. *地质通报*, 2010 (09).
- [4] 庞守吉, 苏新, 何浩, 等. 祁连山冻土区天然气水合物地质控制因素分析 [J]. *地学前缘*, 2013, 20(1): 223–238.
- [5] 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.
- [6] Collett T S, Lewis R, Winters W J, et al. Downhole well log and core montages from the Mount Elbert gas hydrate stratigraphic test well, Alaska North Slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 561–577.
- [7] 宁伏龙, 刘力, 李实, 等. 天然气水合物储层测井评价及其影响因素 [J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 591–606.
- [8] 王佟, 刘天绩, 邵龙义, 等. 海木里煤田天然气水合物特征与成因 [J]. *煤田地质与勘探*, 2009, 37(6): 26–30.
- [9] 郭星旺, 祝有海. 永久冻土区天然气水合物饱和度评价技术 [J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(5): 59–66.
- [10] 郭星旺, 祝有海. 祁连山冻土区 DK-1 钻孔天然气水合物测井响应特征和评价 [J]. *地质通报*, 2011, 30(12): 1868–1873.
- [11] 侯颀, 邹长春, 曲璐, 等. 青海木里三露天天然气水合物储层测井识别与划分 [J]. *现代地质*, 2015, 29(5): 1110–1121.
- [12] 林振洲, 李洋, 高文利, 等. 祁连山冻土区天然气水合物层位测井物性分析 [J]. *物探与化探*, 2013, 37(5): 834–837.
- [13] Collett T S, Lee M W. Downhole well log characterization of gas hydrates in nature—a review [R]. Edinburgh: ICGH, 2011.
- [14] Lee M W, Collett T S. Gas hydrate saturation estimated from fractured reservoir at site NGHP-01-10, Krishna-Godavari Basin, India [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(B7): 1–13.
- [15] 潘和平, 马火林, 蔡柏林. 地球物理测井与井中物探 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2009.
- [17] Vapink V N. 统计学习理论的本质 [M]. 张学工, 译. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [18] 赵洪伟, 陈建文, 龚建明, 等. 天然气水合物饱和度的预测方法 [J]. *海洋地质动态*, 2004, 20(6): 22–24.
- [19] 余春昊, 李长文. LEAD 测井综合应用平台开发与应用 [J]. *测井技术*, 2005, 29(5): 396–398.
- [20] 李宁, 王才志, 刘英明, 等. 基于 Java-NetBeans 的第三代测井软件 CIFLog [J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 192–200.

Logging evaluation system of natural gas hydrate in Muli Area

QIN Zhen^{1,2}, LIN Zhen-Zhou^{2,3}, PAN He-Ping², FANG Si-Nan²,
DENG Cheng-Xiang², QIN Rui-Dong², JI Yang², XU Wei²

(1. School of Geophysics and Measurement-control Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, GAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: The exploration of natural gas hydrate in the permafrost area is developed quickly. Several wells containing gas hydrate reservoirs have been found in Muli area. Nevertheless, there is no software log evaluation system in China, which affects the exploration progress of gas hydrate in Muli area. Therefore, based on the geolog, engineering and data sets, the authors developed the logging evaluation system of natural gas hydrate in Muli area by using VB language. The main technology and methods of the system include (1) the pre-treatment technology of logging data, (2) the analysis of logging response and lithologic characteristics, (3) the hierarchical and lithologic identification technology, and (4) the calculation and evaluation of reservoir parameters. Combined with the technology and methods, the structure and function of the system are designed. The layered structure is selected, and it contains 3 layers, i.e. basic data layer, middle support layer and application layer. The main functions of the system and technology are realized, and a set of chain process modular and technology flow charts is established. The field application results show that the system can satisfy the exploration processing precision and efficiency of hydrate logging interpretation requirements. The structure of the system is stable, and the function is completed. It achieves the target of the efficient processing and interpretation of gas hydrate logs in Muli area and fills the gaps in related fields. The system could support the exploration and development of natural gas hydrate in Muli area.

Key words: natural gas hydrate; Muli Area; logging evaluation; reservoir identification; system development

(本文编辑:叶佩)