

稀井区烃源岩有机碳的地球物理预测方法

——珠江口盆地恩平凹陷恩平组烃源岩勘探实例

李松峰^{①②} 徐思煌^{*①} 薛 罗^{①③} 刘晓霞^{①④} 袁彩萍^①

(^①中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉 430074; ^②中原油田分公司博士后工作站,河南郑州 450000; ^③中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃兰州 730020; ^④郑州工业贸易学校,河南郑州 450000)

李松峰,徐思煌,薛罗,刘晓霞,袁彩萍. 稀井区烃源岩有机碳的地球物理预测方法——珠江口盆地恩平凹陷恩平组烃源岩勘探实例. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 369-374.

摘要 烃源岩总有机碳(TOC)含量是烃源岩评价的基础,亦是油气资源量计算中的关键参数。稀井区由于钻井数据的稀缺,难以进行烃源岩 TOC 定量评价;在密井区,利用烃源岩 TOC 体定量预测技术可厘清生烃凹陷中烃源岩 TOC 的三维空间展布特征。本文基于恩平和惠州两凹陷地质背景、测井和地震信息等方面的相似性分析,通过类比,将适用于密井区惠州凹陷的成熟的烃源岩 TOC 体定量预测技术成功地应用于稀井区恩平凹陷。研究表明:恩平凹陷恩平组烃源岩 TOC 值大多为1%~2%,属于中等烃源岩;个别地区 TOC 值超过2%,属于优质烃源岩。

关键词 有机碳含量 烃源岩 稀井区 地球物理数据 恩平凹陷 惠州凹陷

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

烃源岩总有机碳(TOC, total organic carbon)含量是有机质丰度的重要表征参数,亦是含油气盆地中评价生烃条件和资源潜力的基础。尤其是在生烃凹陷的深凹陷区,一般烃源岩品质较好,但由于钻井很少,甚至没有,导致难以获取烃源岩样品。在此情况下,欲通过实验直接测定有机碳含量,则必然受烃源岩样品数量和分布范围的限制,难以满足研究的需要。因此,探索一套稀井区烃源岩 TOC 地球物理预测方法显得尤为重要。近年来,国内外学者在密井区烃源岩 TOC 地球物理预测方法研究及应用方面取得了重要进展。基于测井和地震数据可较好地评价烃源岩品质^[1~7],尤其是在 2006~2010 年期间开展的国家科技重大专项课题“南海东部海域已证实的富烃凹陷再评价及新领域勘探方向”研究中,采用了烃源岩 TOC 体定量预测技术,即通过测井信息预测烃源岩的单井 TOC 含量,再结合测井

与三维地震属性之间的响应关系,建立一个三维的烃源岩 TOC 数据体,达到刻画生烃凹陷烃源岩 TOC 的三维空间展布特征的效果。

本文采用类比方法,基于恩平凹陷与惠州凹陷的相似性的详实分析,将密井区惠州凹陷成熟的烃源岩 TOC 体定量预测技术及其 TOC 地球物理响应关系应用于稀井区恩平凹陷,并定量预测恩平凹陷烃源岩的 TOC 含量及其展布特征,弥补了该区烃源岩取心少、实测样品分布不连续的不足,实现了稀井区的烃源岩及油气资源潜力评价。

2 类比定量预测方法的基本思路

烃源岩 TOC 体定量预测技术是基于实测 TOC 数据、测井信息和地震属性的地球物理预测方法,主要分为测井预测和地震预测两部分。测井预测是基于实测 TOC 数据,建立 TOC 与多个测井参数之间的数学模型,预测单井 TOC 曲线^[3];地震预测是基于单井的 TOC 曲线结合井道旁的地震属性,建立

* 湖北省武汉市中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室,430074。Email: xusih@cug.edu.cn

本文于 2012 年 10 月 15 日收到,最终修改稿于 2014 年 2 月 24 日收到。

本研究受国家科技重大专项子课题(2011ZX05023-001-015)和构造与油气资源教育部重点实验室开放研究基金课题(TPR-2010-09)资助。

TOC与地震属性之间的响应关系,并应用于地震数据体,最终获取三维的烃源岩TOC数据体。地震预测的精度取决于拥有TOC曲线的单井数量(一般多于6口),且随着井数的增加,预测精度提高,可靠性增强。显然,烃源岩TOC体定量预测技术更适用于密井区烃源岩评价,而在稀井区的应用则存在诸多限制。本文提出的类比定量预测方法,探讨了烃源岩TOC体定量预测技术在稀井区的应用,取得了良好效果。

众所周知,类比法的应用基础是两个事物具有可比性。对于两个生烃凹陷而言,构造、沉积、层序等地质背景均可能存在相似性,若在测井和地震信息方面也具有一定的相似性,那么类比效果会更准确。恩平凹陷三维工区仅有3口钻井钻遇恩平组,无法满足应用烃源岩TOC定量预测技术的基本条件(钻井数 ≥ 6 口),因此必须补充建立虚拟井。已有钻井的TOC预测曲线可从实际钻井资料获取,而虚拟井的TOC预测曲线须借助本身的地震属性和相关的惠州凹陷的TOC地球物理响应关系进行预测。

本文首先对恩平凹陷和惠州凹陷的地质背景、测井和地震信息进行了相似性分析;在此基础上对惠州凹陷恩平组烃源岩的TOC地球物理响应关系进行误差校正,并用于计算恩平凹陷恩平组虚拟井的TOC预测曲线;然后依据已知钻井和虚拟井的

TOC预测曲线定量计算恩平凹陷恩平组烃源岩的三维TOC数据体,展示其不同深度和不同时间平面上的TOC含量及其变化特征。具体可分为以下实施步骤(图1)。

(1)将恩平和惠州两凹陷地震数据体分别导入Strata软件,进行数据体标准化,确保类比的准确性。

(2)利用惠州凹陷恩平组烃源岩TOC地球物理响应关系,求取恩平凹陷恩平组已知钻井的TOC曲线;再将此TOC曲线与利用实际测井资料预测的TOC曲线进行对比,确定两种方法预测的TOC误差曲线。

(3)利用多口单井的TOC误差曲线求取恩平凹陷恩平组烃源岩的区域TOC误差地球物理响应关系。

(4)在恩平凹陷恩平组建立虚拟井(满足虚拟井和已知井的个数之和 ≥ 6 口),先利用虚拟井本身的地震属性和惠州凹陷烃源岩的TOC地球物理响应关系计算虚拟井的初始TOC预测曲线。

(5)利用恩平凹陷恩平组烃源岩的区域TOC误差地球物理响应关系和虚拟井本身的地震属性计算TOC误差曲线,对初始TOC预测曲线进行校正,获取虚拟井的最终TOC预测曲线。

(6)结合恩平凹陷恩平组已知井和虚拟井的TOC

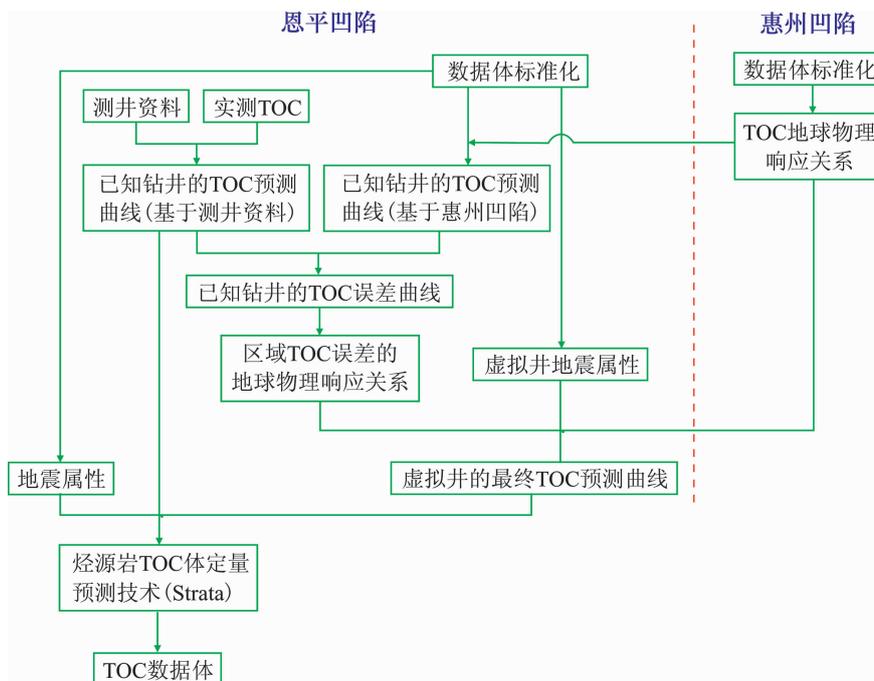


图1 恩平组烃源岩有机碳地球物理预测流程图

预测曲线和地震属性,应用烃源岩 TOC 体定量预测技术计算恩平凹陷恩平组烃源岩 TOC 三维数据体。

3 恩平凹陷与惠州凹陷的相似性分析

3.1 地质背景

恩平和惠州两凹陷均位于珠江口盆地珠一拗陷,呈北东—南西走向,北邻北部隆起带,南接中央隆起带(图 2),具有相近的地质背景,其构造期次及地层发育相同,沉积环境相似。两个凹陷均经历了五次重要构造运动:神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动和东沙运动,造就其下断上拗、下陆上海、陆生海储等一系列独特的构造格局^[8]。沉积地层均包括:古近系神狐、文昌、恩平及珠海组,新近系珠江、韩江、粤海及万山组,第四系。其中文昌和恩平组为主要烃源岩:前者为浅湖—中深湖相沉积,下部以深灰色泥岩为主,向上为砂泥互层;后者为河湖、沼泽相沉积,下部为大套砂岩夹泥岩,上部为黑灰色泥岩与灰色砂岩不等厚间互夹煤层^[9~11]。

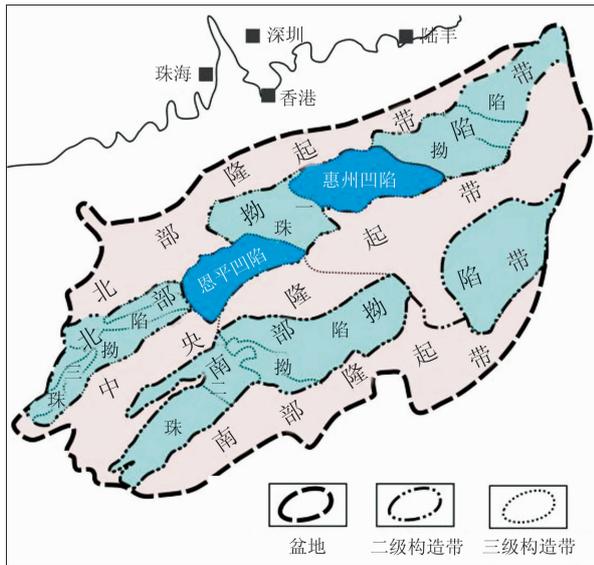


图 2 珠江口盆地恩平和惠州两凹陷构造位置示意图

3.2 测井和地震信息特征

恩平和惠州两凹陷在构造、沉积、层序等地质背景上的相似性,也体现在测井和地震信息上。

本次研究选取能直接或间接反映地层岩性或沉积环境的几种测井曲线(包括 GR、RT、DEN/DT)参数进行分析,用于对比的 W_{EP} 和 W_{HZ} 井分别位于

恩平凹陷和惠州凹陷的沉积中心部位,均具代表性。将此两井测井参数分别做概率分布对比,结果表明无论是概率曲线形状还是主频特征,均表现出强相似性(图 3)。

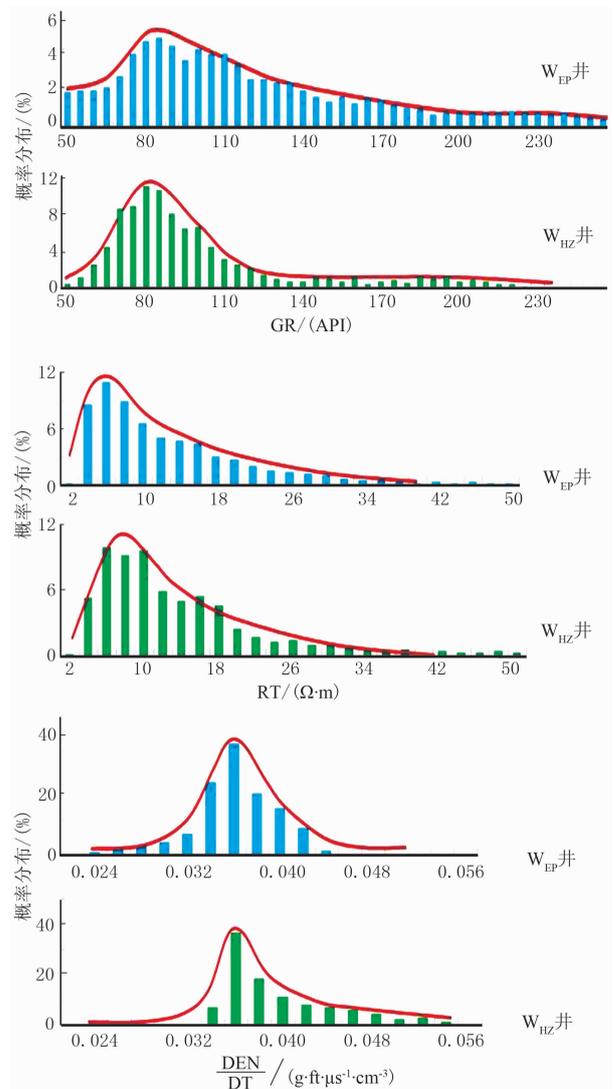


图 3 W_{EP} 和 W_{HZ} 井测井参数对比图

地震剖面可宏观地反映凹陷的构造、沉积、层序等地质背景。从两凹陷的典型地震剖面可看出,其有利烃源岩层序均表现相似的地震反射特征,即具有中—高频、中—高连续、平行—亚平行的中—强反射特征(图 4)。

此外,在两凹陷的沉积中心部位分别建立虚拟井 VW_{EP} 和 VW_{HZ} ,并提取两口虚拟井的井旁振幅包络和瞬时频率两种地震属性进行对比,亦可反映地层的岩性、厚度和沉积环境等特征。对比结果表明,两口虚拟井的地震属性也具相似性(图 5)。

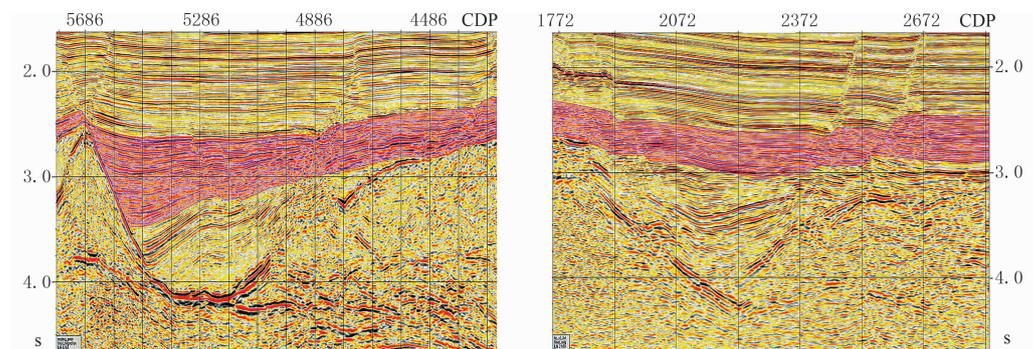
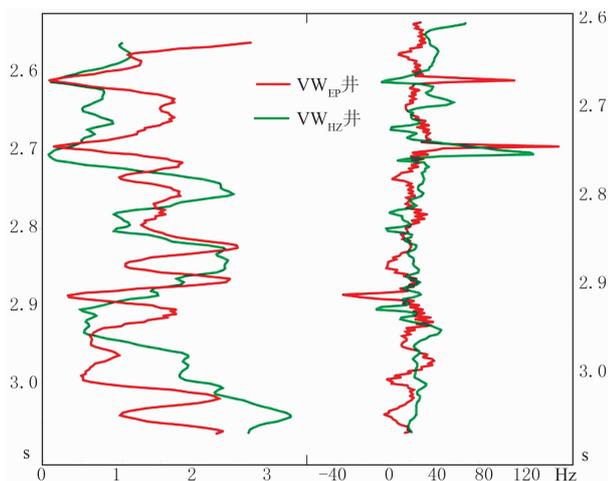


图4 恩平(左)和惠州(右)两凹陷地震剖面对比图

图5 VW_{EP} 和 VW_{HZ} 两井振幅包络(左)和瞬时频率(右)地震属性对比图

4 恩平凹陷烃源岩 TOC 定量预测

4.1 数据体标准化

不同地震数据体的采集、处理过程存在差异,因此在振幅值上可能存在数量级上的差别。为了消除这种差异,准确地进行定量分析,需要将恩平和惠州两凹陷的数据体的幅值进行标准化,但不会影响其频率和相位等信息,这样可避免因幅值数量级上的差异而导致两地的地震属性差别。此外,利用地震属性进行计算时,在一定程度上会受到时窗差异的影响。为了消除这类误差,需将两地地震数据体时窗范围适当进行调整,使其既能完全包含目的层,又不至于过大,依此将两地地震数据体的时窗范围限制在 2.0~5.0s。

4.2 区域 TOC 误差地球物理响应关系

恩平凹陷三维工区仅有 3 口井钻遇恩平组烃源岩,而烃源岩 TOC 体定量预测技术的应用条件为

钻井数 ≥ 6 口,以保证预测精度。因此,对于稀井区的恩平凹陷来说,需建立一定数量的虚拟井,赋予其 TOC 曲线,再与已知井的 TOC 曲线共同实现恩平凹陷恩平组烃源岩 TOC 定量预测。

恩平凹陷已知井的 TOC 曲线可通过测井信息进行预测,而虚拟井 TOC 曲线需借助地震资料和惠州凹陷的 TOC 地球物理响应关系来赋值。虽然恩平和惠州两凹陷同处珠一拗陷,在地质背景、测井和地震信息上有很大的相似性,但两地的 TOC 地球物理响应关系仍会存在一定差异。为了减小类比误差,本次研究引入区域 TOC 误差地球物理响应关系,对类比应用的结果再进行校正,以提高类比的准确度。

恩平凹陷恩平组烃源岩的区域 TOC 误差地球物理响应关系是基于 3 口已知井的 TOC 曲线、地震属性及惠州凹陷恩平组烃源岩 TOC 地球物理响应关系等计算的。首先,利用恩平凹陷 3 口钻井的地震属性和惠州凹陷的 TOC 地球物理响应关系求取 3 口已知井的 TOC 曲线;其次,将这些 TOC 曲线与基于实际测井资料预测的 TOC 曲线进行对比,获取 3 口已知井的 TOC 误差曲线;最后,将 3 口已知井的 TOC 误差曲线导入 Strata 软件,求取恩平凹陷恩平组烃源岩的区域 TOC 误差地球物理响应关系为

$$\begin{aligned} \text{TOC}_{\text{误差}} = & 0.157727A_1 - 0.213887A_2 + \\ & 0.288249A_3 + 0.0222737A_4 - \\ & 0.0717987A_5 - 1.40308A_6 - 6.49105 \quad (1) \end{aligned}$$

式中 $A_1 \sim A_6$ 均代表地震属性: A_1 为平均频率, A_2 为滤波切片(25~30 \rightarrow 35~40Hz), A_3 为综合绝对振幅, A_4 为积分振幅, A_5 为视极性, A_6 为瞬时微分振幅。

4.3 TOC 定量预测

在 2006~2010 年期间国家科技重大专项“南海东部海域已证实的富烃凹陷再评价及新领域勘探方向”课题研究中,首次应用烃源岩 TOC 体定量预测技术,建立了惠州凹陷恩平组烃源岩 TOC 地球物理响应关系式

$$TOC_{惠州} = -0.0293116A_1 - 0.0119336A_2 - 0.172364A_3 + 0.128514A_4 + 0.267631A_5 - 0.00269869A_6 + 3.31425 \quad (2)$$

式中 $A_1 \sim A_6$ 均代表地震属性: A_1 为平均频率, A_2 为主频, A_3 为滤波切片(5~10→15~20Hz), A_4 为瞬时余弦相位, A_5 为二阶导数, A_6 为瞬时频率。依据恩平凹陷恩平组虚拟井本身的地震属性,获得了虚拟井的初始 TOC 预测曲线,再利用该区恩平组烃源岩区域 TOC 误差地球物理响应关系和虚拟井本身的地震属性计算 TOC 误差曲线,并校正初始 TOC 预测曲线,最后获得虚拟井的最终 TOC 预测

曲线。结合恩平凹陷恩平组已知井和虚拟井的 TOC 预测曲线和地震属性,应用烃源岩 TOC 体定量预测技术,确立了该区恩平组烃源岩的 TOC 地球物理响应关系式

$$TOC_{恩平} = 0.290706A_1 + 0.128673A_2 - 1.62795A_3 - 0.0464078A_4 + 0.0308228A_5 - 0.149579A_6 - 0.0141159A_7 - 0.12134A_8 - 0.0555267A_9 + 0.0400046A_{10} - 3.12218 \quad (3)$$

式中 $A_1 \sim A_{10}$ 均代表地震属性: A_1 为综合绝对振幅, A_2 为平均频率, A_3 为瞬时微分振幅, A_4 为视极性, A_5 为积分振幅, A_6 为滤波切片(25~30→35~40Hz), A_7 为主频, A_8 为滤波切片(5~10→15~20Hz), A_9 为道积分振幅, A_{10} 为瞬时余弦相位。计算其 TOC 三维数据体,显示 TOC 的空间展布特征(图 6)。从整体上看:恩平凹陷恩平组烃源岩 TOC 值大多为 1%~2%,属中等烃源岩;个别地区 TOC 值超过 2%,属优质烃源岩。

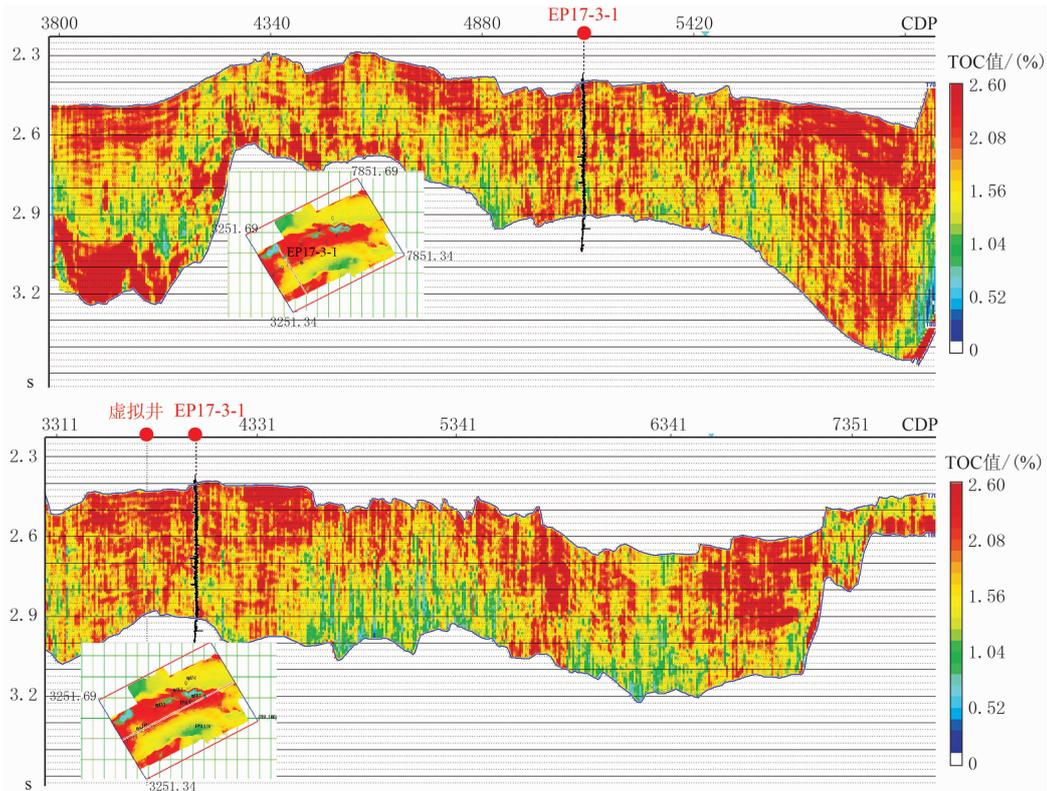


图 6 恩平凹陷恩平组烃源岩 Inline 4021 测线(上)和 Crossline 5140 测线(下)TOC 展布特征

5 结论与讨论

受钻井数量限制,稀井区烃源岩 TOC 难以定

量预测,而应用密井区的烃源岩 TOC 体定量预测技术可有效地刻画生烃凹陷中烃源岩 TOC 的三维空间展布特征。恩平凹陷与惠州凹陷在地质背景、测井和地震信息等方面具有较好的相似性,借鉴适

用于密井区惠州凹陷的成熟的烃源岩 TOC 体定量预测技术及已取得的烃源岩 TOC 地球物理响应关系式等研究成果,类比应用于稀井区恩平凹陷,定量预测其烃源岩 TOC 含量及其展布特征。研究结果表明:恩平凹陷恩平组烃源岩 TOC 值大多为 1%~2%,属于中等烃源岩;个别地区 TOC 值超过 2%,属于优质烃源岩。

类比应用烃源岩 TOC 体定量预测技术时应关注:①参与类比的两个地区必须具有相似的地质背景等,且相似性越高,其预测结果就越准确;②两个地区的烃源岩应具有相同或相似的地震反射特征,若局部地区的烃源岩对应不同的地震反射特征,则需依照沉积相等资料进行人工校正;③所用三维地震数据最好为高分辨率地震数据,其分辨率越高,则预测精度就越高。

参考文献

- [1] Patterson C D, Quarles C A, Breyer J A. Possible new well-logging tool using positron Doppler broadening to detect total organic carbon (TOC) in hydrocarbon source rocks. *Radiation Physics and Chemistry*, 2003, 68(3): 523-526.
- [2] Kamali M R, Mirshady A A. Total organic carbon content determined from well logs using $\Delta\log R$ and neutron fuzzy techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 45(3): 141-148.
- [3] 徐思煌,朱义清. 烃源岩有机碳含量的测井响应特征与定量预测模型——以珠江口盆地文昌组烃源岩为例. *石油实验地质*, 2010, 32(3): 290-295, 300. Xu Sihuang, Zhu Yiqing. Well logs response and prediction model of organic carbon content in source rocks — A case study from the source rock of Wenchang formation in the Pearl River Mouth Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 2010, 32(3): 290-295, 300.
- [4] 张寒,朱光有. 利用地震和测井信息预测和评价烃源岩——以渤海湾盆地富油凹陷为例. *石油勘探与开发*, 2007, 34(1): 55-59. Zhang Han, Zhu Guangyou. Using seismic and log information to predict and evaluate hydrocarbon source rocks: An example from rich oil depressions in Bohai Bay. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(1): 55-59.
- [5] 刘震,常迈,赵阳等. 低勘探程度盆地烃源岩早期预测方法研究. *地学前缘*, 2007, 14(4): 159-167. Liu Zhen, Chang Mai, Zhao Yang et al. Method of early prediction on source rocks in basins with low exploration activity. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(4): 159-167.
- [6] 潘仁芳,徐乾承. 地震反演预测页岩有机质成熟度的研究. *长江大学学报(自然科学版)*, 2011, 8(2): 29-31. Pan Renfang, Xu Qiancheng. Study on forecast of the shale strata thermal maturity of organic matter using seismic inversion. *Journal of Yangtze University (Nat Sci Edit)*, 2011, 8(2): 29-31.
- [7] 顾礼敬,徐守余,苏劲等. 利用地震资料预测和评价烃源岩. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 554-560. Gu Lijing, Xu Shouyu, Su Jin et al. Muddy hydrocarbon source rock prediction and evaluation with seismic data. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 554-560.
- [8] 吴培康. 南海北部多幕裂陷作用与含油气系统. *石油学报*, 1998, 19(3): 11-15. Wu Peikang. Multistage rifting and petroleum systems in the northpart of South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(3): 11-15.
- [9] 陈长民,施和生,许仕策等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件. 北京:科学出版社,2003.
- [10] 王家豪,刘丽华,陈胜红等. 珠江口盆地恩平凹陷珠琼运动二幕的构造—沉积响应及区域构造意义. *石油学报*, 2011, 32(4): 588-595. Wang Jiahao, Liu Lihua, Chen Shenghong et al. Tectonic-sedimentary responses to the second episode of the Zhu-Qiong movement in the Enping Depression, Pearl River Mouth Basin and its regional tectonic significance. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4): 588-595.
- [11] 李松峰,徐思煌,施和生等. 珠江口盆地惠州凹陷古近系烃源岩特征及资源预测. *地球科学——中国地质大学学报*, 2013, 38(1): 112-120. Li Songfeng, Xu Sihuang, Shi Hesheng et al. Characteristics of Paleogene source rocks and prediction of petroleum resources in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(1): 112-120.

(本文编辑:朱汉东)

作者简介



李松峰 博士,1980年生;2006年本科毕业于中北大学机械设计制造及其自动化专业,2009和2013年在中国地质大学(武汉)先后获得能源地质工程专业硕士和博士学位;2009年7月~2010年6月曾在河南油田石油勘探开发研究院工作;现在中原油田博士后工作站从事烃源岩地球化学评价和地球物理预测、油气成藏及资源评价等方面的研究工作。