

# 渤中M构造覆盖型深层潜山界面卡取方法及应用

陈靖<sup>1</sup>, 郭明宇<sup>2</sup>

(1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

**摘要:** 渤中M构造覆盖型深层潜山作为勘探新区, 受地质和工程因素的双重影响, 潜山界面的准确卡取面临诸多难点, 严重制约了地质资料录取和钻井工程安全。为了解决该类潜山界面卡取的难题, 通过系统总结研究区潜山特征, 以沉积背景作为地层对比的关键条件, 形成了“地层层序整体认识+沉积特征横向对比+潜山界面微观解析”的三级控制体系, 建立了一套适合覆盖型深层潜山界面的卡取方法。多口井的实钻验证表明, 该潜山界面卡取方法有较好的应用效果, 提供了可靠的数据支撑和评价依据, 对该构造后续作业以及其他类似潜山构造的界面卡取产生积极影响, 具有良好的推广价值。

**关键词:** 覆盖型; 深层潜山; 卡取方法; 地层对比

**中图分类号:** TE132 **文献标志码:** A

## Interface identification method for overburden deep buried hill in Bozhong M Structure and its application

CHEN Jing<sup>1</sup>, GUO Mingyu<sup>2</sup>

(1. Ener Tech-Drilling & Production Co., CNOOC Energy Development Co. Ltd., Tianjin 300452, China;

2. CNOOC(China)Ltd., Tianjin Branch, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** As a new area for exploration, the Bozhong M Structure covered deep buried hill is affected by geological and engineering factors. There are many difficulties in accurately identifying the buried hill interface, which seriously restrict the geological data acquisition and the safety of drilling projects. In order to solve this kind of the buried hill interface identification problem, the characteristics of buried hill in the study area are systematically summarized. Taking the sedimentary background as a critical condition for stratigraphic correlation, it has formed a three-level control system of “overall understanding of stratigraphic sequence+horizontal correlation of sedimentary characteristics+microscopic analysis of buried hill interface”, and established a set of identification methods suitable for the interface of overburden deeply buried hill. The actual drilling verification of several wells shows that the buried hill interface identification method has a good application effect, provides reliable data support and evaluation basis, has a positive impact on the subsequent operation of the structure and the interface identification of other similar buried hill structures, and has good popularization value.

**Key words:** overburden; deep buried hill; identification method; stratigraphic correlation

**引用格式:** 陈靖, 郭明宇. 渤中M构造覆盖型深层潜山界面卡取方法及应用[J]. 复杂油气藏, 2024, 17(1): 16-21, 28.

CHEN Jing, GUO Mingyu, et al. Interface identification method for overburden deep buried hill in Bozhong M Structure and its application [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2024, 17(1): 16-21, 28.

随着渤中19-6太古界深层潜山大型凝析气田的发现, 深层潜山作为目前海洋石油勘探的主要目标之一, 越来越受到重视。位于渤中19-6北部的渤中M构造是被中生界覆盖的深层太古界潜山, 具有中生界埋深变化较大、岩性复杂、存在两层潜山界面的特点, 潜山界面卡取不准确容易导致井漏、井涌、井眼垮塌等工程事故, 因此及时准确地卡取潜山界面是确保钻井安全、提高油气勘探效率的重要保障。

传统的潜山界面识别主要依靠现场人员参考邻井岩性资料进行对比分析, 确定潜山上覆地层的标志层, 通过肉眼识别岩屑中的典型矿物, 利用个

**收稿日期:** 2022-03-25; **改回日期:** 2023-02-15。

**第一作者简介:** 陈靖(1987—), 高级工程师, 大学本科, 主要从事海上油气勘探工作。E-mail: chenjing19@cnooc.com.cn。

**基金项目:** 中海石油(中国)有限公司“七年行动计划”重大科技专项(CNOOC-KJ-135-ZDXM36-TJ-08-TJ)。

人经验做出判断,无法快速准确定位当前钻头位置,且存在一定的滞后性,已经无法满足渤海油田优快钻井的勘探形势。为了解决上述难题,针对渤中M构造覆盖型深层潜山的特点,通过深入分析区域沉积背景,基于围区已钻井资料构建完整层位模型,依据特征元素和矿物富集规律与沉积环境的耦合特征,结合岩性、粒度、颜色等沉积特征,预判潜山界面深度,细化潜山界面卡取方法。应用实践表明,利用该方法可以准确卡取潜山界面,实际界面和录井卡取界面误差较小,有效解决了现场作业难题。

1 地质概况

渤中M构造地理位置处于渤海海域西南部,其构造位置夹持在渤中凹陷主洼和西南洼之间,西北部、西南部和东南部分别为沙垒田凸起、埕北低凸起和渤南低凸起<sup>[1]</sup>(图1a)。根据区域已钻井资料揭示该构造新生界地层之下缺失古生界,中生界直接覆盖在太古界潜山之上,属于双层结构潜山<sup>[2]</sup>。中生界岩性相对较致密,主要为凝灰岩和砂砾岩,太古界是该构造主要目的层,发育裂缝型储层,岩性以花岗片麻岩为主(图1b)。

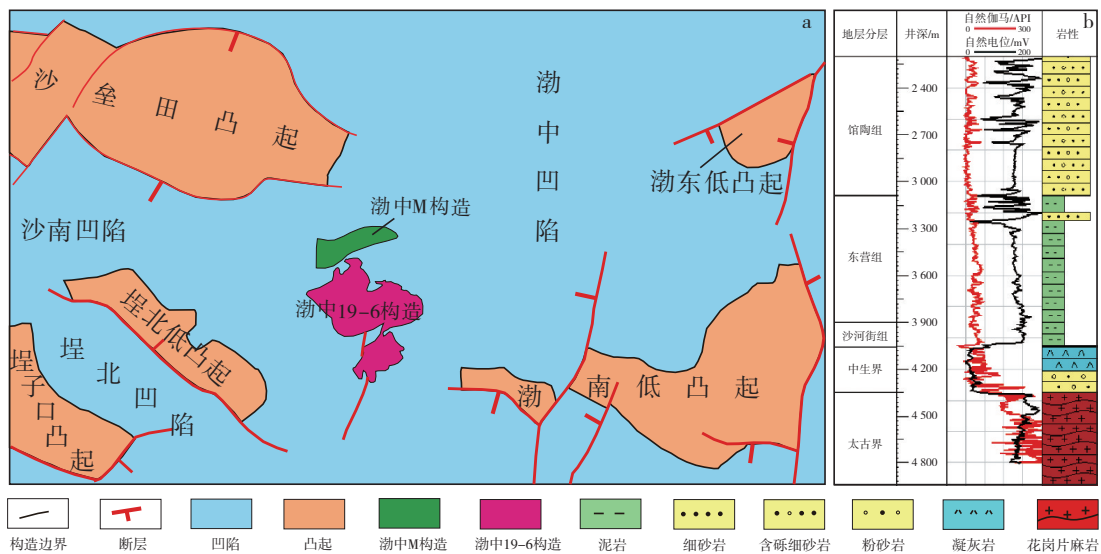


图1 渤中M构造区域位置与地层综合柱状图

2 研究区潜山界面卡取难点

2.1 深度预测误差大

该构造潜山埋深较大,地质条件复杂,地震剖面上呈现出双层结构(图2),应用常规叠前时间偏移等处理手段难以准确成像,地震资料品质较低,导致地震反射特征认识上的差异。此外,由于区域整体勘探程度低,可参考邻井资料少,受地层压实程度影响,各地层界面上下地震层速度变化明显,缺乏规律可循,导致速度引用不准确<sup>[3]</sup>,进而造成实钻潜山界面深度与预测深度差距较大。

2.2 地层精细对比难

中生界覆盖区潜山披覆潜山,新生界地层厚度及岩性组合无明显规律,标志层资料存在不确定性,钻井过程中难以应用传统方法对比地层,且中生界底部普遍发育一套砂砾岩,成分主要为石英、长石及少量火成岩块,部分长石风化严重,与太古

界顶部花岗片麻岩成分相似,容易对潜山界面的卡取产生干扰,建立随钻地层对比模型困难。

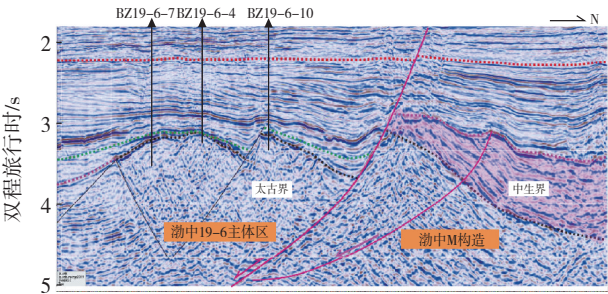


图2 渤中M构造地震剖面

2.3 钻井岩屑辨识难

随着钻井工艺的改进,在提质增效的大背景下,海上钻井大量应用扭力冲击器配合抗研磨新型钻头,造成录井过程中,返出岩屑破碎严重,甚至呈粉末状碎屑(图3),与井下原岩形态差异较大,矿物特征难以通过肉眼辨识,利用岩屑直接识别潜山界面难度较大。

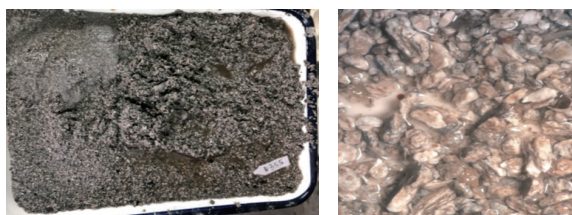


图3 钻井提速工具破碎岩屑特征

### 3 覆盖型深层潜山特征

#### 3.1 岩性组合特征

本区自下而上发育太古界、中生界、古近系沙河街组和东营组、新近系馆陶组和明化镇组以及第四系平原组7套地层,属于正常层序,其中东营组东三段及沙河街组为大套泥岩,颜色为深灰色或灰黑色,含灰质较重。中生界潜山岩性主要为凝灰岩及砂砾岩,颜色为灰色、绿灰色,少量红褐色。太古界潜山岩性为花岗片麻岩,浅灰色为主,成分主要为石英、长石,少量黑云母及暗色矿物,长石局部见黏土化及碳酸盐化,致密、坚硬。

根据已钻井情况,中生界底部砂砾岩与太古界花岗片麻岩较难区分,但是成分和结构仍然存在着一些细微区别。中生界砂砾岩虽然风化严重,但是仍然保留部分沉积特征,具分选和磨圆,岩屑整体较为混杂,太古界花岗片麻岩岩屑相对成形性较好,局部可见棱角,不具备沉积特征,且黑云母等暗色矿物含量比上覆砂砾岩明显增多,部分暗色矿物发生绿泥石化。

#### 3.2 钻井参数特征

实钻表明,沙河街组泥岩平均机械钻速11.08~15.55 m/h,扭矩波动不大。进入中生界后,机械钻速明显变慢,维持在4~8 m/h,扭矩呈高频中低幅振荡。进入太古界后,机械钻速因风化程度不同出现明显变快或变慢的现象,钻时曲线呈阶梯状分布,扭矩逐渐减小,波动幅度不大。

#### 3.3 测井电性特征

从测井曲线分析,东三段与沙河街组发育大套泥岩,自然伽马值变化不大,不易区分;但从电阻率曲线来看,沙河街组较东三段电阻率曲线整体上有小幅抬升<sup>[4]</sup>。通过电性特征,及时判断沙河街组顶界深度,可以根据预估厚度初步预测潜山界面的深度。中生界凝灰岩为中等自然伽马、中低电阻率特征,砂砾岩主要表现为高自然伽马、中等电阻率特征,且自然伽马、电阻率曲线波动幅度小。太古界花岗片麻岩表现为高自然伽马、高电阻率特征,但

自然伽马、电阻率曲线波动幅度极大<sup>[5]</sup>。

### 4 潜山界面卡取方法

根据研究区覆盖型深层潜山的特征,基于整体把控、局部约束的思想,以沉积背景作为地层对比的关键条件,创新提出基于围区地层数据叠置拼接构建完整层位模型,进而利用X射线荧光元素和X射线衍射矿物录井技术找出地层元素和矿物的富集规律,结合岩性、粒度、颜色等沉积特征,形成了“地层层序整体认识+沉积特征横向对比+潜山界面微观解析”的立体化三级控制体系,建立了一套适合覆盖型深层潜山界面的卡取方法。

#### 4.1 地层层序整体认识

首先需要充分利用地震资料,将本井过井地震剖面与邻井实钻资料对比,判断出两井相应地层的高低关系,厚度差异<sup>[6]</sup>,并且在实钻过程中依据确定的地层界线校正地震剖面,判断钻前预测的误差,对本井设计的地震剖面重新解释,进一步对卡取界面深度作出预测,并在实钻中加以校正。

此外该区覆盖型深层潜山属首次钻探,邻井参考资料较少,缺乏完整层位模型进行对比。由于在同一沉积环境下形成的沉积物具有相同的岩性特征,在实际钻探过程中,一个井区内沉积环境若没有发生较大的构造运动,其岩性特征、地层层序也是极其相似的,因此将围区钻遇中生界和太古界的井数据进行组合可以建立完整层位模型,例如实钻A井完钻层位中生界,实钻B井完钻层位太古界,将两口井的潜山数据进行叠置拼接可形成虚拟C井(图4),利用该模型对研究区地层进行整体预判,筛选录井资料中的敏感特征参数,为地层对比奠定基础。

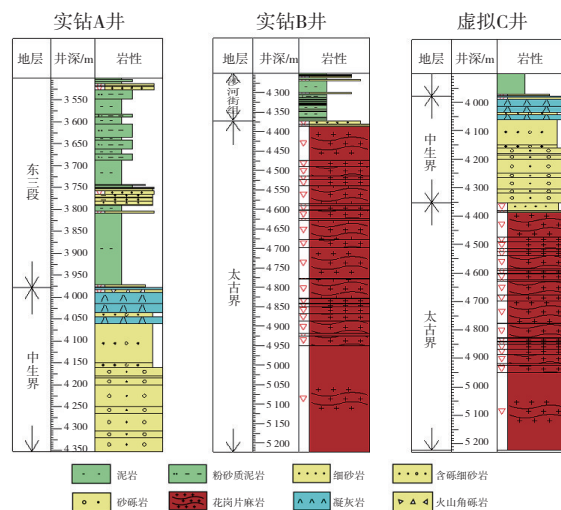


图4 围区地层数据叠置拼接模型示意



4.2 沉积特征横向对比

卡取潜山界面的过程实质上就是根据已钻井的沉积特征进行地层横向对比和随钻分析,其中比较有效可靠的方法是标志层对比,包括区域内分布稳定的地层、具有明显地质特征的岩性、易辨认的颜色等,一般标志层越靠近潜山,对比预测结果越精确。

该区在东二下段底部普遍发育一套砂岩储层,沉积粒度较细,物性偏差;进入沙河街组后碳酸盐含量显著升高,多见灰质粉砂岩(图5);自东营组东一段至沙河街组地层,其泥岩颜色由绿灰色逐渐变为褐灰色,直至基本上以黑色为主,颜色由浅变深,利用这种变化趋势可以对所钻地层初步定位,以上这些沉积特征都可以作为本区主要对比标志层。

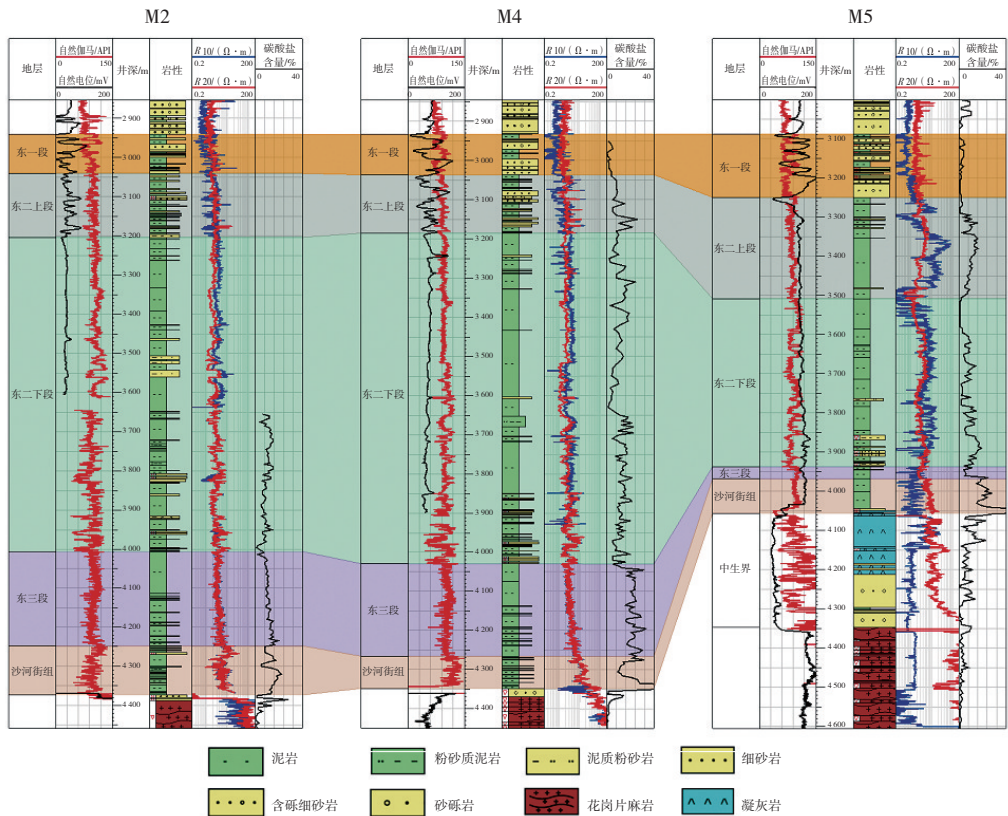


图5 渤中M构造连井剖面

4.3 潜山界面微观解析

潜山的岩性与上覆地层有着明显的区别和变化,但是由于抗研磨新型钻头和扭力冲击器的使用,岩屑细小难辨,仅依靠肉眼鉴定十分困难<sup>[7-8]</sup>。通过分析沉积环境的变化,筛选出各类沉积相的特征元素和矿物,根据其富集规律与沉积环境的耦合特征,可以及时发现潜山界面。

渤中凹陷沙河街组以黑色泥岩为主,属于深湖相沉积,在强还原条件下,有机质得以保存和富集,S元素呈低价态( $S^{2-}$ )易被有机质颗粒吸附富集或形成络合物发生沉淀,由于压实作用,泥岩孔隙中流体不断被挤压入砂岩中,随着孔隙压力的降低,Ca元素被大量析出沉积水底。因此在沙河街组底部会出现Ca、S元素大量富集。

在中生界潜山界面附近,由于矿物遭受风化时,K、Na、Ca元素争夺氧的能力不强,倾向于呈自由离子,容易发生迁移<sup>[9-10]</sup>。而Al元素在矿物中主要是作为硅的替代物与氧结合形成铝氧四面体结构,在化学风化作用过程中比较稳定,可以用 $(Na+K+Ca)/Al$ 指示风化壳的存在,作为卡取潜山界面的重要依据。

随着中生界埋深的增加,压实成岩作用逐渐加强,有机质的成熟和黏土矿物的转化形成大量的有机酸和二氧化碳,进入砂岩孔隙,使大量胶结物及砂砾岩中长石等不稳定组分发生溶蚀作用,造成中生界底部长石含量降低,石英等稳定矿物组分含量相对升高,出现石英、长石含量变化交汇,根据此特征可指示已接近太古界潜山界面附近。

太古界为凹陷基底,主要岩性为花岗片麻岩,与上覆中生界砂砾岩的形成背景不同,两者间最大的区别在于沉积作用使砂砾岩结构成熟度较高,填隙物类型及含量与花岗片麻岩截然不同。因此由中生界进太古界在元素和矿物特征上表现为K+Na元素含量升高,Fe+Mg元素含量下降,两者出现明显交汇;Si/Fe升高;微量元素V容易被黏土吸附,在太古界潜山界面处其含量也会明显下降;石英、黏土矿物含量下降,长石含量上升。

## 5 应用效果

现以M7井为例,将潜山界面卡取情况简述如下,首先根据本井地震剖面与已钻邻井M2和M4井进行初步对比,这两口井属于该构造太古界潜山暴露区,将T8反射轴的深度与邻井横向对比,认为本井中生界潜山顶界深度与已钻井太古界潜山界面深度相近,大致深度应该在4 350 m附近(图6)。与此同时,将邻近区块中生界潜山资料与本构造太古界潜山暴露区资料进行组合,建立了一个完整层位的地层对比模型。通过该地层模型进行分析,选取泥岩颜色出现变化和东二下段底部普遍发育的砂体作为横向对比的标志层。在实际钻探中,在3 850~3 950 m井段发育多套砂体,判断已经进入东二下段底部;泥岩颜色也由绿灰色逐渐变为深灰色,判断逐渐接近沙河街组,这些标志层特征与已

建立的地层模型特征基本一致,有助于判断地层层位。

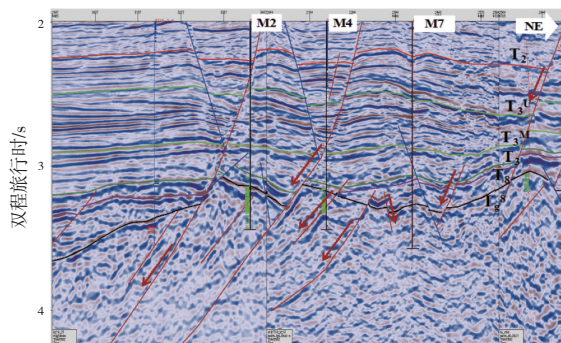


图6 过M7井地震剖面

该井钻进至井深4 340 m时,发现Ca、S元素以及风化壳指标 $(Na+K+Ca)/Al$ 明显升高,指示已经接近中生界潜山顶部。继续钻进至井深4 379 m,连续出现4 m慢钻时,机械钻速由13.48 m/h变为4.43 m/h,明显变慢,决定进行地质循环,返出岩屑为凝灰质泥岩,综合判断自4 375 m进入中生界。当钻进至井深4 617 m时,石英和长石含量出现交汇,指示已经接近太古界潜山顶部。继续钻进至井深4 642 m,出现了K+Na与Fe+Mg含量交汇,Si/Fe升高,微量元素V含量明显下降,石英、黏土矿物含量下降,长石含量上升,这些特征与太古界潜山相吻合,并且钻压由11.67 t升高至14.24 t,扭矩出现波动,决定进行地质循环,返出岩屑为花岗片麻岩,综合判断自4 635 m进入太古界(图7)。经测井结果证实

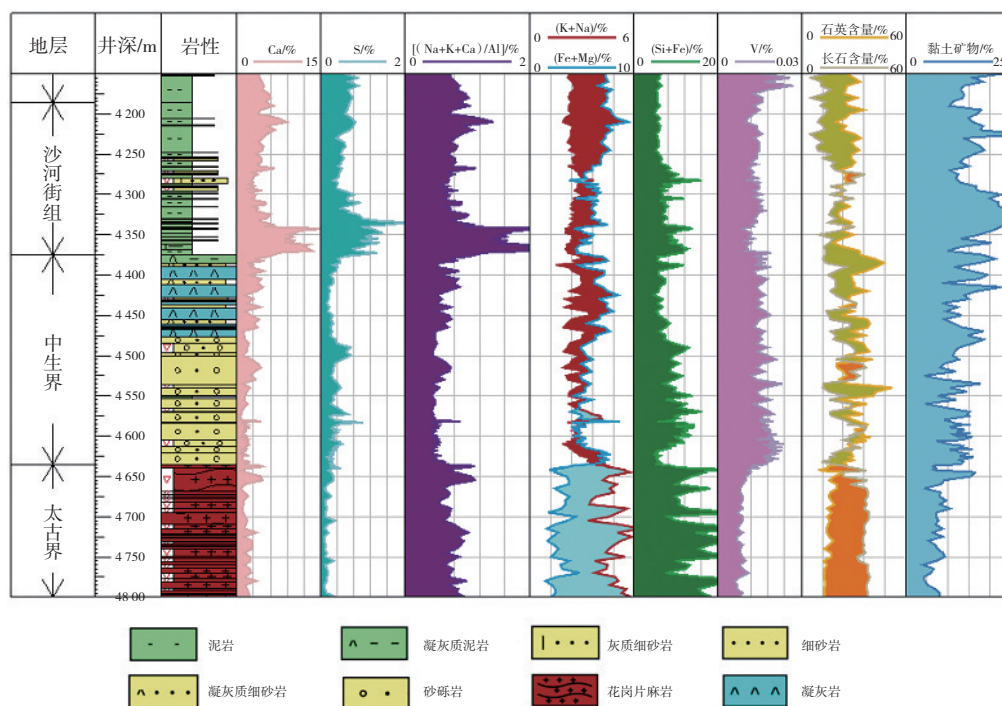


图7 M7井潜山界面元素/衍射特征



本井实际潜山界面深度与录井卡取深度一致。

应用上述潜山界面卡取方法,对渤中M构造的四口探井分别进行了中生界及太古界地层层位跟踪,潜山界面卡取深度与实际地层分层误差普遍小于5 m,潜山界面卡取准确率达到100%(表1)。

表1 渤中M构造中生界覆盖区潜山界面深度统计

井名	层位	卡取深度/ m	实际分层深度/ m	误差/ m	是否 准确
M5	中生界	4 056	4 056	0	是
	太古界	4 320	4 322	2	是
M6	中生界	4 561	4 565	4	是
	太古界	4 930	4 932	2	是
M7	中生界	4 375	4 375	0	是
	太古界	4 635	4 635	0	是
M9	中生界	4 091	4 091	0	是
	太古界	4 794	4 794	0	是

6 结论

(1)该方法现场应用方便快捷,实用性强,以沉积背景作为地层对比的关键条件,创新提出基于围区地层数据叠置拼接构建完整层位模型,依据特征元素和矿物富集规律与沉积环境的耦合特征,结合岩性、粒度、颜色等沉积特征,形成“地层层序整体认识+沉积特征横向对比+潜山界面微观解析”三级控制体系。通过在研究区四口探井的应用,及时准确地对潜山界面进行识别,为潜山储层地质资料录取和钻井工程安全提供了保障。

(2)渤中M构造沙河街组属于深湖相,Ca、S元素大量富集,自上而下其含量逐渐升高,实现潜山界面预警,中生界顶部普遍存在风化壳,可应用风化壳指标(Na+K+Ca)/Al作为卡取潜山界面的重要依据,太古界花岗片麻岩与上覆中生界砂砾岩的形成背景不同,综合石英、长石、黏土矿物、微量元素V以及元素组合衍生参数快速识别潜山界面。

(3)潜山界面微观解析目前主要基于X射线元素和衍射录井资料,受限于采集间隔深度和样品代表性,纵向分辨率和精度不高,导致方法的适用范围受限。在接下来的研究中需要加强录井岩屑采集质量控制并且丰富样本数量,进一步提升该方法的适用性。

参考文献:

[1] 李慧勇,牛成民,许鹏,等. 渤中13-2大型整装覆盖型

潜山油气田的发现及其油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 19-26.

LI Huiyong, NIU Chengmin, XU Peng, et al. Discovery of Bozhong 13-2 Archean large monoblock volatile buried hill oilfield and its oil and gas exploration significance [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 19-26.

[2] 施和生,牛成民,侯明才,等. 渤中13-2双层结构太古宇潜山成藏条件分析与勘探发现[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 12-20.

SHI Hesheng, NIU Chengmin, HOU Mingcai, et al. Analysis of hydrocarbon accumulation conditions of double-layered Archeozoic buried hill and major discovery of Bozhong 13-2 Oil and Gasfield, Bohai Sea area [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26 (2): 12-20.

[3] 张科,赵汝敏,齐凯,等. 海外低勘探区预探井深度预测难点及对策[J]. 特种油气藏, 2014, 21(2): 57-60, 153. ZHANG Ke, ZHAO Rumin, QI Kai, et al. The difficulties and countermeasures of depth prediction for exploratory well in oversea low exploration degree area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(2): 57-60, 153.

[4] 夏良冰. 渤海X油田中生界潜山界面卡取方法[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(9): 109-110. XIA Liangbing. Interface identification method of Mesozoic buried hill in Bohai X Oilfield [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38 (9): 109-110.

[5] 赵彦泽,李战奎,苑仁国,等. 太古界潜山界面卡取方法及应用[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(z1): 55-57. ZHAO Yanze, LI Zhankui, YUAN Renguo, et al. Method and application of Archean buried hill interface identification [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(z1): 55-57.

[6] 石慧敏. 探讨提高录井卡层的准确方法[J]. 石化技术, 2019, 26(5): 257-258. SHI Huimin. Discussion on the accurate method of improving mud logging horizon identification [J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26 (5): 257-258.

[7] 陈真,罗鹏,袁洪水,等. 渤中X构造花岗片麻岩矿物特征录测关系研究与工程应用[J]. 录井工程, 2019, 30 (3): 73-76, 187.

CHEN Zhen, LUO Peng, YUAN Hongshui, et al. Study on the relation between mud logging and well logging of granite gneiss mineral characteristics in Bozhong X structure and its engineering application [J]. Mud Logging

(3)通过古地貌、结合单井相和连井相研究可以看出,区内主要发育东西两支浅水三角洲扇体,纵向上不同期扇体横向迁移变化,控制形成4套砂组叠合连片。

#### 参考文献:

- [1] FISK H N, MCFARLAN E, KOLB C R, et al. Sedimentary framework of the modern Mississippi delta [Louisiana] [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24 (2): 76-99.
- [2] 楼章华,袁笛,金爱民.松辽盆地北部浅水三角洲前缘砂体类型、特征与沉积动力学过程分析[J].*浙江大学学报(理学版)*, 2004, 31(2): 211-215.  
LOU Zhanghua, YUAN Di, JIN Aimin. Types, characteristics of sandbodies in shallow-water deltafront and sedimentary models in northern Songliao Basin, China[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2004, 31 (2): 211-215.
- [3] 韩永林,王成玉,王海红,等.姬塬地区长8油层组浅水三角洲沉积特征[J].*沉积学报*, 2009, 27(6): 1057-1064.  
HAN Yonglin, WANG Chengyu, WANG Haihong, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water deltas in Chang-8 subsection of Yanchang Formation, Jiyuan area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27 (6): 1057-1064.
- [4] 张昌民,尹太举,朱永进,等.浅水三角洲沉积模式[J].*沉积学报*, 2010, 28(5): 933-944.  
ZHANG Changmin, YIN Taiju, ZHU Yongjin, et al. Shallow-water deltas and models [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 933-944.
- [5] 朱筱敏,刘媛,方庆,等.大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式:以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J].*地学前缘*, 2012, 19(1): 89-99.  
ZHU Xiaomin, LIU Yuan, FANG Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake: Example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 89-99.
- [6] 秦润森,岳红林,周凤军,等.河控浅水三角洲前缘席状砂沉积特征及沉积模式探讨——以黄河口凹陷渤中34地区明下段为例[J].*沉积学报*, 2020, 38(2): 429-439.  
QIN Runsen, YUE Honglin, ZHOU Fengjun, et al. Characteristics and sedimentary models of sheet sand in shallow lacustrine fluvial-dominated delta front: A case study from lower member of Minghuazhen Formation in BZ34 area, Huanghekou Sag [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(2): 429-439.
- [7] 周天琪,吴朝东,袁波,等.准噶尔盆地南缘侏罗系重矿物特征及其物源指示意义[J].*石油勘探与开发*, 2019, 46(1): 65-78.  
ZHOU Tianqi, WU Chaodong, YUAN Bo, et al. New insights into multiple provenances evolution of the Jurassic from heavy minerals characteristics in southern Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 65-78.
- [8] 袁静,杜玉民,李云南.惠民凹陷古近系碎屑岩主要沉积环境粒度概率累积曲线特征[J].*石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 103-106.  
YUAN Jing, DU Yumin, LI Yunnan. Probability cumulative grain size curves in terrigenous depositional environments of the Paleogene in Huimin Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 103-106.

(编辑 刘义梅)

(上接第21页)

- Engineering, 2019, 30(3): 73-76, 187.
- [8] 张国田,赵宏明,刘新华,等.元素录井技术在兴古X断块古潜山岩性识别和界面卡取中的应用[J].*录井工程*, 2014, 25(2): 64-69, 102.  
ZHANG Guotian, ZHAO Hongming, LIU Xinhua, et al. Application of element logging technology of identifying lithology and interface in buried hill of X Fault Xinggu [J]. *Mud Logging Engineering*, 2014, 25(2): 64-69, 102.
- [9] 黄华,王晓阳.风化壳地层元素特征与录井识别方法[J].*录井工程*, 2012, 23(3): 28-32, 99.  
HUANG Hua, WANG Xiaoyang. Element characteristics and mud logging identification method for weathering crust formation [J]. *Mud Logging Engineering*, 2012, 23 (3): 28-32, 99.
- [10] 卢世浩,陈颖.XRF元素录井技术在奥陶系古潜山识别与层位划分中的应用[J].*录井工程*, 2017, 28(2): 118-123.  
LU Shihao, CHEN Ying. Application of XRF element mud logging technology in Ordovician buried hill identification and horizon division [J]. *Mud Logging Engineering*, 2017, 28(2): 118-123.

(编辑 刘义梅)