

doi: 10.12029/gc20180207

赖锦, 韩能润, 贾云武, 季玉山, 王贵文, 庞小娇, 贺智博, 王松. 2018. 基于测井资料的辫状河三角洲沉积储层精细描述[J]. 中国地质, 45(2): 304-318.

Lai Jin, Han Nengrun, Jia Yunwu, Ji Yushan, Wang Guiwen, Pang Xiaojiao, He Zhibo, Wang Song. 2018. Detailed description of the sedimentary reservoir of a braided delta based on well logs[J]. *Geology in China*, 45(2): 304-318(in Chinese with English abstract).

基于测井资料的辫状河三角洲沉积储层精细描述

赖锦^{1,2} 韩能润³ 贾云武³ 季玉山⁴ 王贵文^{1,2} 庞小娇¹ 贺智博¹ 王松¹

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中石油西部钻探测井公司塔里木分公司, 新疆 库尔勒 841000; 4. 渤海钻探测井分公司, 天津 300280)

摘要:通过岩心观察、常规测井和成像测井等资料,对库车坳陷大北克深地区白垩系巴什基奇克组辫状河三角洲沉积储层特征进行了精细研究。结果表明辫状河三角洲前缘发育的水下分流河道、河口坝等构成了主要的骨架砂体类型。通过岩心刻度测井建立了一套较完整的岩性和沉积构造识别模式。在此基础上建立了不同沉积微相的测井识别与划分标准,并探讨了不同沉积微相对储层物性的控制。然后根据粒度中值和成分成熟度指数将沉积微相进一步细分为水下分流河道中砂岩、水下分流河道细砂岩等不同的岩性岩相类型,并分别建立了粒度中值和成分成熟度指数的测井评价模型。在此基础上以成像测井为主,辅以常规测井和岩心资料及粒度参数和成分成熟度指数,实现单井连续的岩性岩相识别与划分。研究成果可为后续沉积储层精细评价乃至天然气勘探开发综合研究奠定基础。

关键词:辫状河三角洲前缘;成像测井;沉积微相;巴什基奇克组;库车坳陷

中图分类号: TE122·22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2018)02-0304-15

Detailed description of the sedimentary reservoir of a braided delta based on well logs

LAI Jin^{1,2}, HAN Nengrun³, JIA Yunwu³, JI Yushan⁴, WANG Guiwen^{1,2},
PANG Xiaojiao¹, HE Zhibo¹, WANG Song¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. CNPC Xibu Drilling Engineering Company Tarim Department, Korla 841000, Xinjiang, China; 4. Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin 300280, China)

Abstract: The sedimentary reservoir of Lower Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa depression was studied by making full use of core observation as well as conventional and image logs. The results show that the Bashijiqike Formation was formed in the sedimentary facies zone of braided delta front subfacies, of which the underwater distributary channel and mouth bar depositional microfacies constitute the main framework of sandbodies. A suite of recognition models for typical lithologies and sedimentary

收稿日期: 2017-01-05; 改回日期: 2017-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(41472115)、国家科技重大专项(2011ZX05020-008、2016ZX05019-005-007)。

作者简介: 赖锦, 男, 1988年生, 博士, 讲师, 从事沉积学、储层地质学与测井地质学教学与研究工作; E-mail: sisylaijin@163.com。

通讯作者: 王贵文, 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 从事沉积学、储层地质学与测井地质学方面的教学与科研工作; E-mail: wanggw@cup.edu.cn。

structures were built by core-log calibration methods. Then the well logging recognition and division standards were built, and the control of depositional microfacies on reservoir quality was discussed. The depositional microfacies were further divided into lithologies and lithofacies such as medium-grained sandstones of underwater distributary channel and fine-grained sandstones of underwater distributary channel based on the medium grain size and compositional maturity index. In addition, the logging evaluation methods of medium grain size and compositional maturity index were built. At last, the vertical distribution law of lithologies and lithofacies in single wells were figured out by making full use of image logs, shapes of conventional logs and core observations as well as the logging calculation of medium grain size and compositional maturity index. The research results lay a solid foundation for detailed description of sedimentary reservoir as well as the natural gas exploration and development in the future.

Key words: braided delta; image logs; sedimentary microfacies; Bashijiqike Formation; Kuqa depression

About the first author: LAI Jin, born in 1988, male, lecturer, majors in the study of sedimentology, reservoir geology and well logging geology; E-mail: sisylaijin@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41472115) and National Science and Technology Major Project (No. 2011ZX05020-008, 2016ZX05019-005-007).

1 引言

库车坳陷自中生代以来受北侧天山造山带向南的强烈逆冲推挤,形成北高南低的古地理格局,决定了古水流流向及沉积物来源主要来自北部的南天山再旋回造山带(刘建清等,2014),从而进一步控制了沉积相带的展布(刘春等,2009)。白垩纪时期,气候总体干旱、炎热,野外露头可见红色泥岩、砂质泥岩及石膏或含石膏泥岩广泛分布,反映了干旱条件下的陆相红层沉积(刘景彦等,2001),体现了库车坳陷白垩纪时期总体为一氧化的宽浅湖盆(张荣虎等,2009)。北部的南天山存在多个物源供应出口,强烈的造山运动导致其碎屑供应充足,且地形高差较大,来自南天山的季节性河流携带了大量的沉积物质由北向南搬运,在山前陡坡带形成冲积扇或扇三角洲沉积(刘春等,2009;张荣虎等,2009)。此后由于地势变缓,水动力能量减弱,碎屑物质快速卸载并在氧化宽浅湖盆中形成辫状河三角洲沉积体系(刘建清等,2014)。库车坳陷白垩系巴什基奇克组具有充足的油气来源,发育优质的储盖组合,具有优越的油气成藏条件和良好的天然气勘探前景(漆家福等,2013)。南天山山前发育的大量成排成带的与断层相关的背斜构成了其主要的圈闭类型。其中天然气的富集高产除受构造位置和裂缝影响外,沉积储层条件决定的有效“甜点”的发育对其控制明显(张荣虎等,2014;赖锦等,2014)。油气的形成与分布严格受控于沉积体系和沉积微相的时空展布及其成岩作用历史(张荣虎等,2015)。精细

的沉积储层描述有利于揭示其内部非均质性,可为天然气的进一步勘探开发部署提供有力指导。然而由于研究区目的层段埋藏较深,取芯成本较高,使得依托于岩心分析化验的其他资料的获取也较为困难,沉积微相特征的精细描述与刻画只有依托于成本相对较低的、纵向连续性好的测井资料。

成像测井能提供环井壁360°高分辨率的岩石物理二维图像信息,把地层岩性、裂缝、孔洞和沉积构造等特征引起的电阻率的差异,转换成图像上RGB颜色空间显示(孙鲁平等,2009;陈翠雀等,2009;Lai Jin et al., 2017a)。成像测井信息非常丰富,在地层岩性识别、沉积构造解释、古水流方向分析、沉积序列、沉积微相判别乃至裂缝解释及地应力分析等方面具有明显优势(张筠和徐炳高,2005;代一丁和崔维平,2015)。因此在钻井取芯少的油田中,利用成像测井资料信息量大、数据连续和纵向分辨率高的优势(何小胡等,2011),以成像测井资料为主、常规测井资料为辅,结合岩心地质分析资料,通过岩心刻度测井及切实有效的处理解释(何小胡等,2013),可以获取地层岩性、沉积构造、古水流方向等沉积相标志,为下一步高精度的沉积储层精细研究提供依据(何小胡等,2011;Lai Jin et al., 2017b)。

本文通过综合岩心观察、常规测井曲线形态分析以及高分辨率成像测井沉积学解释,首先建立了大北克深地区白垩系巴什基奇克组不同沉积微相的测井识别与划分标准,并探讨了不同沉积微相的物性特征。然后结合粒度筛析和薄片分析资料对

沉积微相进一步细分和量化,划分出水下分流河道中砂岩等不同的岩性岩相类型,并建立了不同岩性岩相类型的典型图版特征。在此基础上以纵向上连续的、分辨率较高的成像测井为主,以常规测井和岩心资料为辅,通过岩心刻度常规和成像测井资料实现单井沉积微相的精细描述与刻画,并进一步结合常规测井所计算的粒度参数和成分成熟度指数,实现单井纵向上连续的岩性岩相的识别与划分。研究成果可解决巴什基奇克组沉积储层描述精度低的问题,可为后续沉积储层评价乃至天然气勘探开发综合研究奠定基础。

2 沉积体系特征

2.1 沉积演化

总体而言,库车坳陷白垩系冲积扇及扇(或辫状河)三角洲沉积体系垂向上表现为多期扇体相互叠置,在平面上表现为多个扇体相互连接(刘春等,2009)。巴什基奇克组沉积时期处于库车前陆坳陷发育的晚期(肖建新等,2008),总体为三角洲沉积体系,沉积相的分异主要体现在纵向上(韩登林等,2009)。巴什基奇克组沉积早期(巴三段),气候炎热、干燥,且构造活动相对强烈,碎屑粒度较粗,形成扇三角洲沉积,东西向相带展布稳定,南北向相带差异明显。巴什基奇克组沉积中晚期(巴二段和

巴一段)处于构造活动相对平静期,地形差变小,且输入坳陷的物质变细,由于地形相对平缓,辫状河分布较宽,侧向频繁迁移并在注入湖泊的地方形成辫状河三角洲(肖建新等,2008),但沉积相仍呈东西分区、南北分带格局(张荣虎等,2009;张惠良等,2012)。研究区巴什基奇克组总体为一三角洲沉积体系,巴三段以扇三角洲沉积体系为主,而巴一段和巴二段则发育辫状河三角洲沉积体系,辫状河三角洲前缘和扇三角洲前缘的水下分流河道砂体、辫状河三角洲前缘河口坝砂体是巴什基奇克组主要的砂体成因类型(图1)(张荣虎等,2015;贾进华,2000)。这种平面上分布稳定,且纵向上相互叠置的“辫状河三角洲砂体裙”,具有厚度大、分布广、连续性好和隔夹层少的特点(图2),是很有利的储集砂体(肖建新等,2008;贾进华,2000),在良好盖层如古近系库姆格列木群膏盐岩层的封盖下,这种砂体裙可形成巨大的油气圈闭(肖建新等,2005),目前在克拉苏构造带发现的气藏如克拉2、大北和克深气田等基本以这种储盖组合方式为主。

2.2 沉积微相测井识别与划分

克深地区巴什基奇克组沉积早期(巴三段)由于强烈的构造沉降导致其以扇三角洲粗碎屑沉积体系为主,沉积中晚期(巴二段和巴一段)由于构造沉降基本停止,地形差降低,输入坳陷的物质变细,

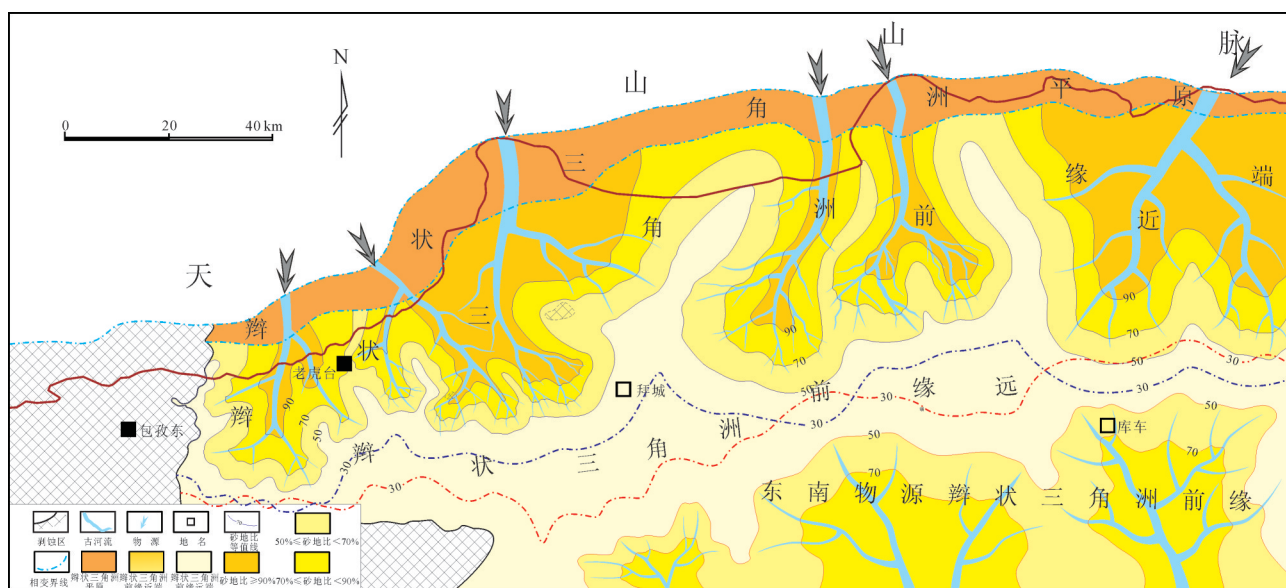


图1 库车坳陷克拉苏构造带白垩系巴二段沉积体系分布图(据张荣虎,等2015修改)

Fig.1 The distribution of the sedimentary systems of K_1bs_2 in Kelasu structural belt of Kuqa Depression (after Zhang Ronghu et al., 2015)

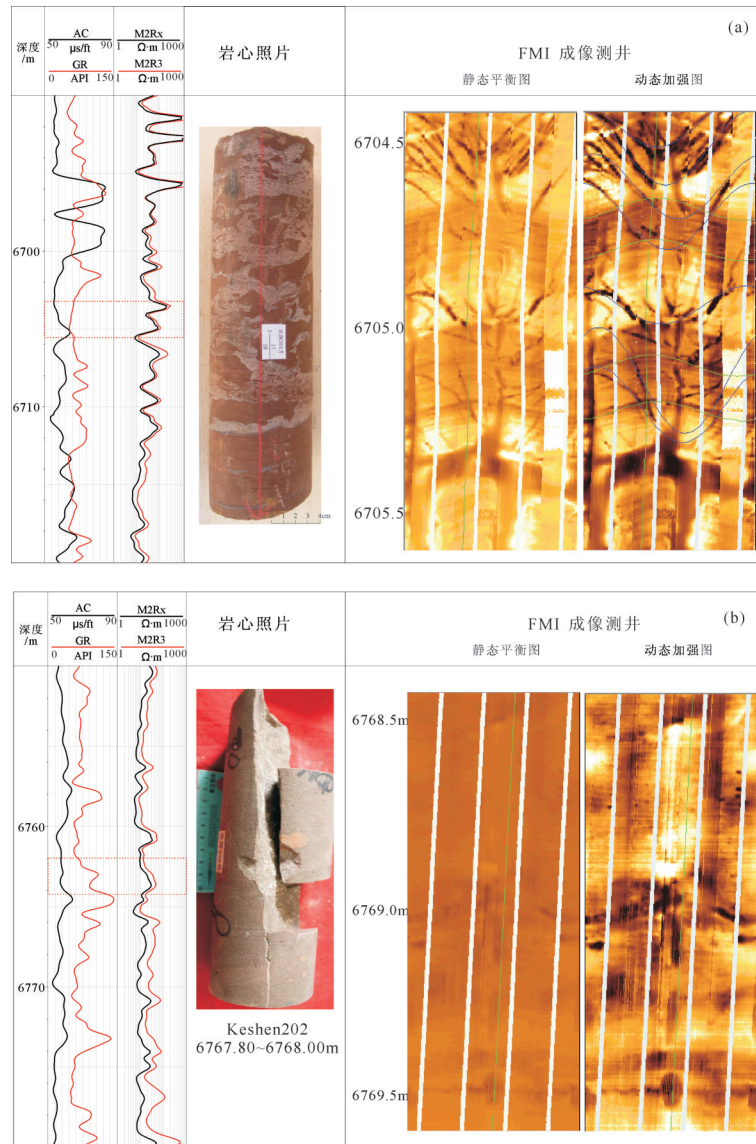


图2 巴什基奇克组典型辫状河三角洲前缘水下分流河道(a)以及河口坝特征(b)

Fig.2 Typical characteristics of underwater distributary channel and mouth bar of braided delta front in Bashijiqike Formation

其沉积体系演化以辫状河三角洲前缘为主(张荣虎等,2011;赖锦等,2015a)。纵向上相互叠置、平面上叠合连片分布的厚度较厚且平面延展性较好的辫状河三角洲前缘水下分流河道和河口坝砂体构成了良好的天然气储集空间(贾进华,2000)。然而由于克深地区目的层埋藏深,平均在6200 m以上,多数并未钻穿甚至未钻遇巴三段,因此本次研究主要是以埋深相对较浅的巴二段和巴一段为主,可划分出的沉积微相类型主要是辫状河三角洲前缘水下分流河道、河口坝和下水分流间湾等(赖锦等,2015a,2015b)。

水下分流河道微相岩性以褐色中、细砂岩为主,有时可见泥砾,发育槽状、楔状交错层理等沉积构造,有时可见冲刷面,代表由河道的摆动引起的水动力变化对下伏沉积物的冲刷,水下分流河道砂体总体具正韵律特征。在GR测井曲线上具明显的箱形或者钟形响应特征,反映了水动力较强,且沉积物供应充足的特点。成像测井上可拾取出明显的板状交错层理和平行层理(图2a)(赖锦等,2015b;Lai et al., 2017a)。

河口坝沉积位于水下分流河道的河口处,沉积速率最高,水动力作用强,颗粒分选较好,常为上粗

下细的反韵律,自然伽马测井曲线为典型的漏斗形。成像测井图上可拾取出明显的平行层理(图2b)(赖锦等,2015b;Lai et al., 2017a)。

水下分流间湾为水下分流河道之间的低洼部分,是河流和湖水波浪能量作用较低的地方,岩性主要为褐色泥岩以及少部分泥质粉砂岩,发育水平层理和波状层理,储集物性差。

此外,巴三段发育的扇三角洲前缘沉积体系主要以其粗碎屑沉积特征(岩性以含砾砂岩、砂砾岩为主)而与巴二段、巴一段辫状河三角洲前缘沉积体系相区分(赖锦等,2015b;Lai et al., 2017a)。

2.3 不同沉积微相与物性关系

克深地区巴什基奇克组储层沉积微相对储层物性具有先天性的控制作用,一般河口坝砂体物性较好,具有相对较高的渗透率值,主要就是河口坝微相砂体较纯,颗粒分选较好,因此容易保存较多的原生孔隙,连通性好,渗透率高;相比较而言,水下分流河道微相砂体物性也较好,具有较高的孔隙度,但渗透率相对较低;而水下分流间湾微相储集物性最差,主要是由于其先天条件不足,沉积物颗粒粒度较细或者砂泥混杂,颗粒分选差,导致其在后期的埋藏成岩演化过程中易于被压实致密,因此具有最差的储集物性(图3)。不同粒度储层物性差异较大,粒度越粗,其渗透率越高(张永辰,2014)。主要就是在同一深度范围、同一成岩阶段等条件下,沉积水动力能量较强,颗粒粒度越粗,杂基含量

越低,沉积物抗压实能力越强,储层物性相对较好。

3 岩性岩相分类

本文所研究的岩性岩相通常也称沉积岩石微相,是指形成于特征构造、沉积背景的具有一定沉积特征且岩石性质基本相同的三维岩体,反映了现今岩石组合面貌,又能体现一定的沉积环境,是对沉积微相的进一步细分和量化(赖锦等,2013;Lai et al., 2018)。通常采用的方法是将沉积微相与岩石相相结合研究以达到将沉积微相进一步细分的目的,如在岩石相研究的基础上,可将水下分流河道沉积微相进一步划分出水下分流河道细砂岩相、水下分流河道中砂岩相等(赖锦等,2013;阳文生等,2000)。通常反映岩性岩相的最灵敏的参数为成分成熟度和结构成熟度,如成分成熟度指数、粒度、分选和磨圆等。在理想的情况下,沉积物越纯,颗粒的粒度越粗,分选性越好,即储层结构成熟度和成分成熟度越高,对于油气的聚集越有利(庞雄奇等,2007,2011;冉冶等,2016;周正龙等,2016)。

一般情况下,储层物性与成分成熟度(石英/(长石+岩屑))的关系比较复杂(石英含量相对较低且趋于稳定),因此不能用该成分成熟度指数来指示储层岩性岩相的较好的参数,因而本文采用(石英+长石)/岩屑来表征储层成分成熟度变化。而结构参数中的分选和磨圆等与储层物性的关系较为复杂,也不能用来较好地指示储层岩性岩相的变化,相比较而言,巴什基奇克组储层的粒度除巴三段出现砂砾岩外,其他巴一段和巴二段基本以细砂和中砂为主,且粒度与储层物性的关系较为紧密。一般是随着粒度的增大,储层物性尤其是渗透率将显著增加,因此可以利用储层粒度来较好地指示储层岩性岩相的变化。

本次研究在划分储层岩性岩相时,主要是在储层沉积微相划分的基础上,优选粒度参数(粒度中值),同时辅以成分成熟度指数,对沉积微相进行进一步细分和量化,如水下分流河道沉积微相可进一步细分为水下分流河道中砂岩、水下分流河道细砂岩和水下分流河道砂砾岩3种不同岩性岩相类型(赖锦等,2013)。本次研究综合考虑以上因素,建立了克深地区巴什基奇克组储层岩性岩相划分的标准(表1)。

一般地,沉积水动力越强,沉积物颗粒粒度越粗,流水对沉积物的搬运与簸洗导致砂体也较纯,

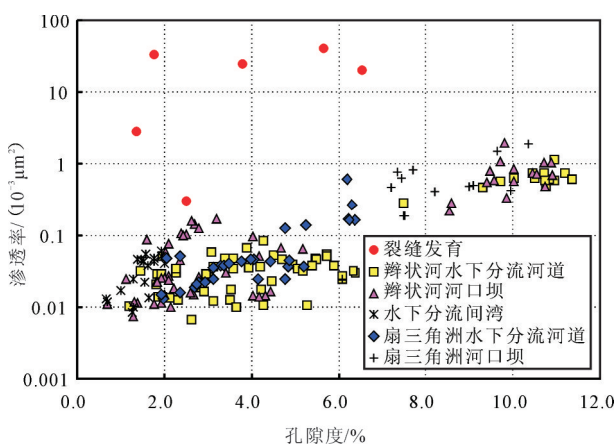


图3 储层不同沉积微相孔渗关系图

Fig.3 Crossplot of porosity and permeability of various depositional micro-facies

其中的杂基和岩屑等含量较低,而较稳定的矿物碎屑如石英和长石含量较高,因此成分成熟度指数也相对较大。(图4~图8)为几种典型岩性岩相(水下分流河道中、细砂岩,河口坝中、细砂岩,水下分流间湾泥岩)的常规测井(GR、AC和RT等)和成像测井沉积构造典型特征。

典型水下分流河道中砂岩岩性岩相的特征是其岩性以红褐色中砂岩为主,岩心上或成像测井图像上可见平行层理或板状和楔状交错层理。部分层段岩心以及成像测井图像上可见冲刷面,代表上

覆的粒度较粗的砂岩形成时期较强的水动力对下伏的红褐色泥岩的冲刷,是水动力条件突变的产物(吴冬等,2015),也指示了研究区巴什基奇克组季节性河流的冲刷与充填特征(图4)。成像测井静态和动态图上可见明暗截切的冲刷面。

典型水下分流河道细砂岩相的特征是岩性以红褐色细砂岩为主,沉积水动力能量也较强,岩心上或成像测井图像上可见平行层理或槽状交错层理(图5)。且水下分流河道中、细砂岩岩性岩相带中间常为水下分流间湾泥岩岩性岩相带所分隔。如图4所示,

表1 巴什基奇克组储层岩性岩相划分标准
Table 1 Division standard of lithologies and lithofacies of the Bashijiqike Formation

岩性岩相类型	岩性	粒度中值/mm	成分成熟度指数	沉积构造	成像测井图像
水下分流河道中砂岩	中砂岩	0.20~0.40	2.00~3.90 (2.80)	板状、楔状交错层理,可见冲刷面	层理面,正粒序
水下分流河道细砂岩	细砂岩	0.15~0.20	1.80~3.30 (2.30)	平行层理,板状、楔状或槽状交错层理	层理面,均质韵律
水下分流河道砂砾岩	含砾砂岩或砂砾岩	0.20~0.80	2.2~3.2 (2.70)	块状为主,底部有冲刷面,发育泥砾	冲刷面,暗色亮色斑块
河口坝中砂岩	中砂岩	0.20~0.40	2.50~4.80 (3.20)	平行层理和变形层理	变形构造,反韵律
河口坝细砂岩	细砂岩	0.15~0.20	2.20~4.20 (2.50)	楔状交错层理、平行层理和变形层理	均质韵律
水下分流间湾泥岩相	泥岩、粉砂质泥岩	0.05~0.09	<2.00	水平层理、透镜状层理和波状层理或为块状泥岩	暗色条带

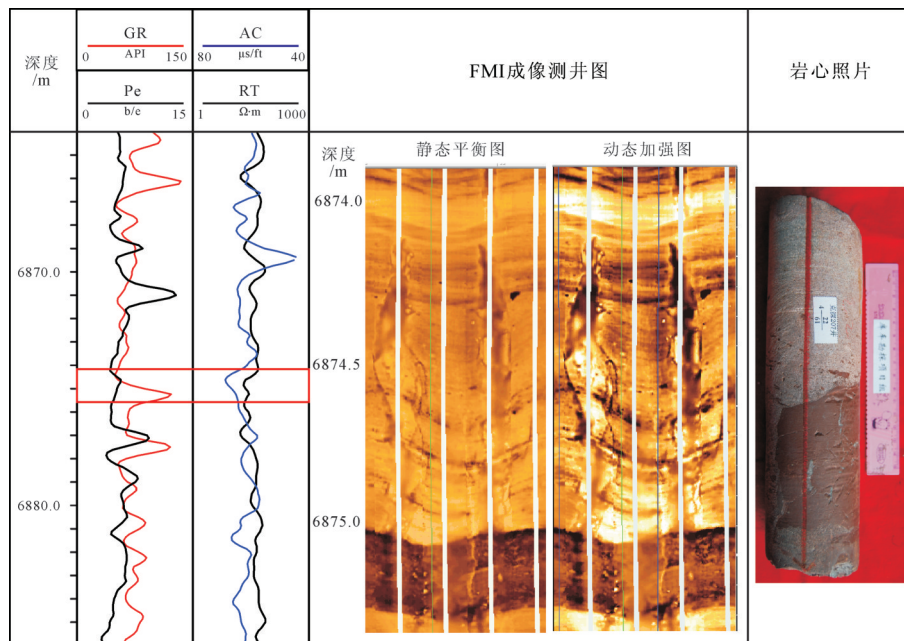


图4 水下分流河道中砂岩和 underwater 分流间湾泥岩相特征

Fig.4 Characteristics of the medium-grained sandstones of underwater distributary channels and mudstones of underwater distributary bay

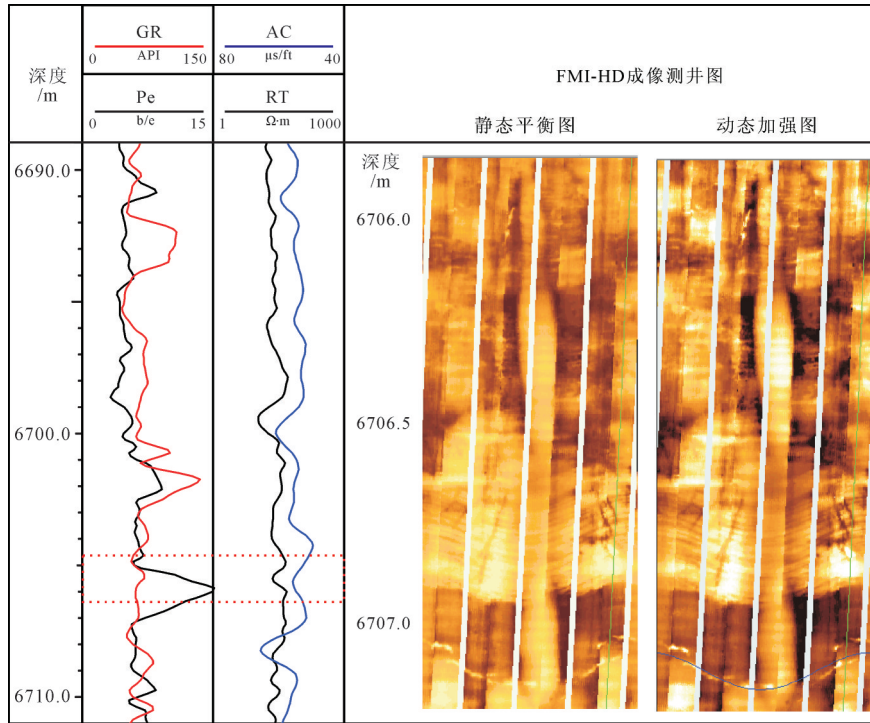


图5 水下分流河道细砂岩相特征

Fig.5 Characteristics of the fine-grained sandstones of underwater distributary channel

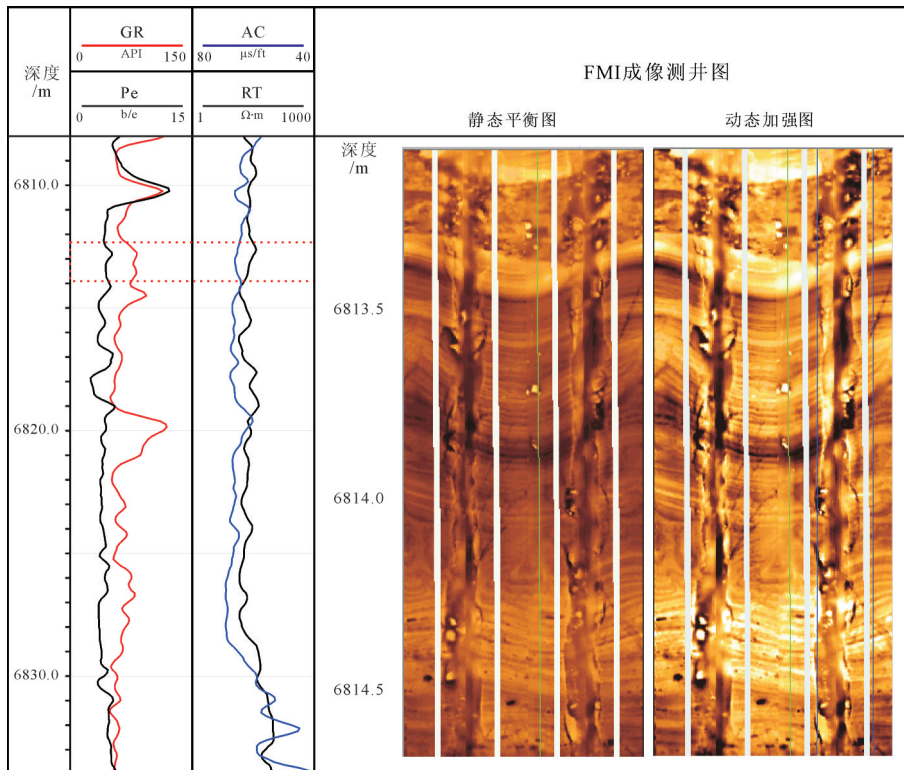


图6 河口坝中砂岩相特征

Fig.6 Characteristics of the medium-grained sandstones of mouth bar

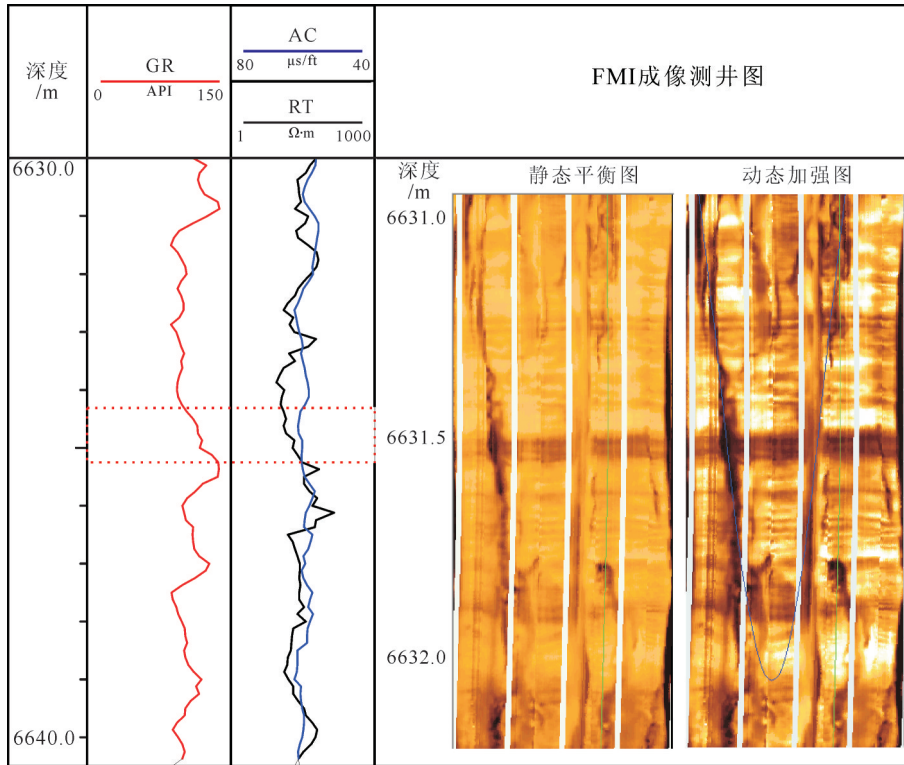


图7 典型河口坝细砂岩相特征

Fig.7 Typical characteristics of the fine-grained sandstones of mouth bar

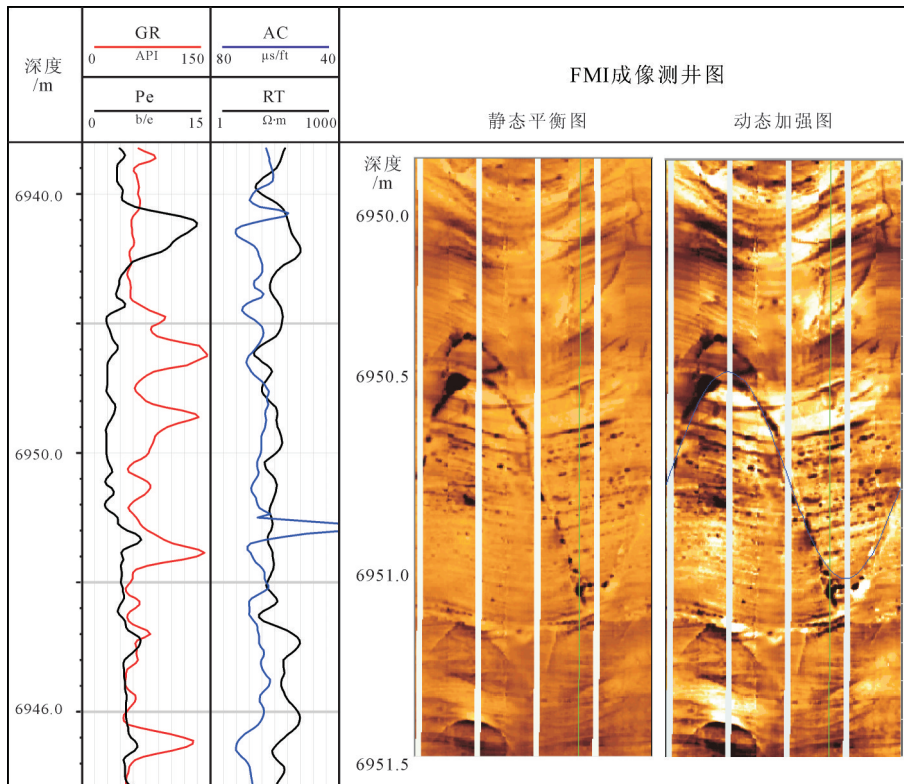


图8 典型水下分流河道砂砾岩相特征

Fig.8 Typical characteristics of the conglomerates of underwater distributary channels

两个水下分流河道细砂岩内部为一水下分流间湾泥岩所分隔,这与研究区巴什基奇克组沉积时期辫状河道的频繁改道与迁移相关。成像测井静态图上可见明显的正韵律特征,即河道底部表现为亮色,上部由于泥质含量增高颜色逐渐变暗。

典型河口坝中砂岩相的特征是岩性以红褐色中砂岩为主,岩心上或成像测井图像上可见平行层理和楔状交错层理发育,有时河口坝砂体内部可见变形构造(图6)。图6中成像测井静态和动态图上可看到河口坝砂体中发育的楔状交错层理和沉积物变形构造,也指示相对较强的水动力条件,但由于研究区氧化宽浅湖盆的沉积背景,季节性河流的冲刷常导致河口坝砂体难以得到保存,或者保存不完善从而目前只能观测到部分河口坝砂体,其厚度一般较薄(1~2 m),且其上部常被河道冲刷叠置(图6)。

典型河口坝细砂岩相的特征基本与河口坝中砂岩相类似,但其岩性粒度相对较细,以红褐色或褐色细砂岩为主,岩心上或成像测井图像上可见平行层理,偶可见沉积物的变形构造(图7),由于颗粒粒度较细,因此此时河口坝砂体的反韵律结构特征不明显,呈均质韵律特征。如图7中的成像测井图像表现为一亮色的块状,不显层理。河口坝砂岩下部通常为水下分流间湾泥岩所分隔,上部则常被水下分流河道砂体冲刷,代表季节性河道的改道与迁移作用(图6,图7)。

典型水下分流河道砂砾岩岩性岩相的特征是其岩性以红褐色砂砾岩为主,岩心上或成像测井图像上可见砾石(主要是泥砾)发育(图8),在成像测井图上表现为不规则组合的亮色或暗色斑块状(图8),一般与巴三段发育的扇三角洲沉积体系相对应。

4 岩性岩相的测井表征方法

前已述及,克深地区巴什基奇克组沉积以辫状河三角洲和扇三角洲前缘沉积背景为主,发育的水下分流河道、河口坝等构成了主要的骨架砂体。水下分流河道微相在GR测井曲线上具明显的箱形或者钟形响应特征,而河口坝微相GR测井曲线为典型的漏斗形。水下分流间湾则以高幅的指状或齿化箱型为主,代表较低的水动力条件(图2)。常规测井曲线形态与沉积微相并非一一对应关系,精细的沉积微相识别与划分尚需与长井段连续测量的成像测井资料相互标

定(张龙海等,2006)。因此在综合成像测井沉积层理、粒序等结构构造特征精细观察与描述的基础上,结合常规测井曲线幅度与形态分析,即可实现各单井纵向上沉积微相的测井识别与划分(图2)。

而要实现岩性岩相的测井识别,需要在沉积微相测井识别与划分的基础上实现粒度中值以及成分成熟度指数等岩性岩相表征参数的测井计算。文中采用的成分成熟度指数在铸体薄片资料齐全的时候可直接利用薄片统计资料来计算。当然,取心井是有限的而取心井段则更有限,因而相应的薄片资料也非常有限,为了获得纵向上连续的成分成熟度指数值,必须要借助测井资料(赖锦等,2013)。

由于对储层岩性响应较灵敏的测井曲线为GR、SP、Pe以及CAL等,这里定义一个岩性指数: $LI=GR/Pe$ (其中GR单位为API, Pe单位为b/e),即为自然伽马GR(API)与光电吸收截面指数Pe(b/e)的比值,作为表征储层成分成熟度较好的参数。且一般LI值越小,岩性指数LI值越小,(石英+长石)含量越高,岩屑含量相对越低,即代表储层岩性越纯,成分成熟度指数越大,一般情况下物性也越好(图9)(张永辰,2014;Lai et al., 2015)。

沉积物粒度参数主要包括颗粒粒度中值、平均粒径、颗粒分选系数、偏度和峰度等,这些参数均可以统计得到。粒度参数一般可通过岩石镜下薄片观察或粒度筛析法获得,其中粒度中值(Md)是指根据粒度筛析资料绘制的概率累积曲线上颗粒含量为50%处对应的粒径,一般用毫米(或 ϕ 值)来表示,通常粒度中值越大,代表粒度越粗,沉积物形成的水动力也越强(赖锦等,2013)。

在成分成熟度指数定量计算的基础上,本次论文研究优选对储层岩性岩相特征响应也较灵敏的粒度中值和成分成熟度指数来表征不同岩性岩相,因此也通过建立粒度中值参数和成分成熟度指数的测井计算模型来实现不同岩性岩相的测井识别与划分。

然而由于取心井和取心井段的限制,薄片资料以及粒度筛析资料也是非常有限的,因此只有采用测井资料来计算粒度中值。前人研究结果表明,由于粒度较细的沉积物沉积过程中易吸附放射性物质,因而显示较高的GR值,因此颗粒粒度也与GR测井曲线响应灵敏,自然伽马测井曲线可以用来计算岩石颗粒的粒度中值。一般而言,粒度中值 Md

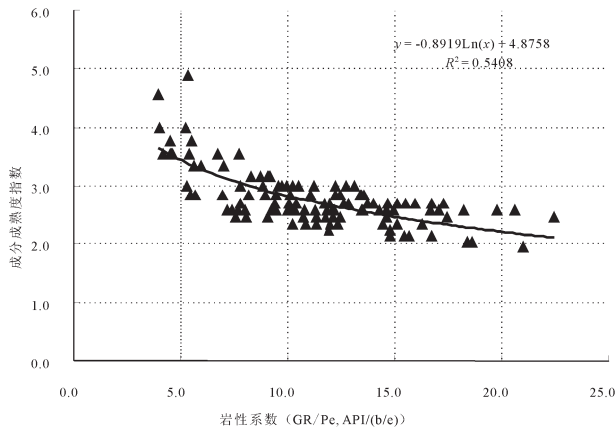


图9 成分成熟度指数与岩性LI关系图

Fig.9 Relationship between the content of compositional maturity index and the lithologic coefficient LI

(mm)的对数 $\lg(Md)$ 与 ΔGR (自然伽马相对值)为一线性相关关系,通过对二者做线性相关回归分析,即可通过粒度中值与 ΔGR 的关系来计算粒度中值这一参数。经典算法如式1和式2(赖锦等,2013;谭增驹等,1995;王谦和刘四新,2004)。

$$\lg Md = C_0 + C_1 \Delta GR \quad (1)$$

式中, Md 为粒度中值(mm), C_0 为经验系数, C_1 通过统计关系获得, ΔGR 为自然伽马相对值,计算公式为:

$$\Delta GR = \frac{GR - GR_{\min}}{GR_{\max} - GR_{\min}} \quad (2)$$

式中, GR 为自然伽马读数(API), GR_{\max} 和 GR_{\min} 分别为某一深度段内自然伽马曲线最大、最小值(API),可直接通过人工读取。

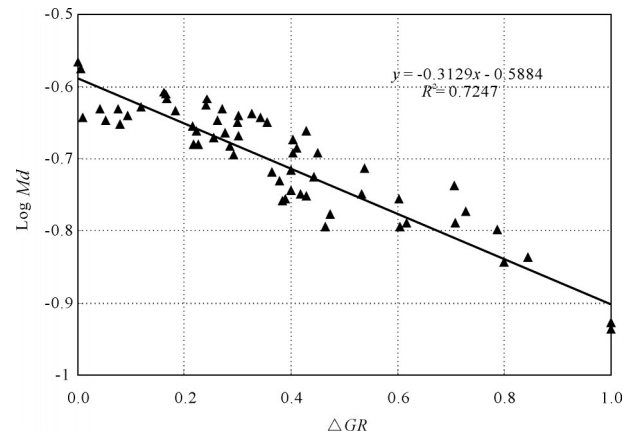
本文以薄片资料和粒度筛析资料为依据,通过岩石颗粒粒度中值与自然伽马测井值统计关系及回归分析,建立的用测井曲线计算粒度中值的回归公式为(图10,式3)(何春红等,2015):

$$\lg Md = -0.5884 - 0.3129 \Delta GR, R^2 = 0.73 \quad (3)$$

从克深地区巴什基奇克组砂岩储层粒度中值与 ΔGR 的拟合关系图(图10)^①,可以看出二者具有良好的统计相关关系,表明通过 ΔGR 的方法计算粒度中值参数这一方法可行,能够达到较高的精度(何春红等,2015)。

5 单井岩性岩相精细描述与刻画

通常判别沉积相和亚相时,一般可通过结合区域地质背景、岩心观察和常规测井,采用小比例尺

图10 巴什基奇克组储层粒度中值与 ΔGR 关系Fig.10 Relationship between ΔGR and medium grain size of Bashijiqike reservoirs

(1:200)静态图像展示成像测井解释结果。而在划分沉积微相时,则一般通过(1:10)动态增强图像放大目的层段的沉积构造特征,并与岩心观察和常规测井曲线形态相结合,综合岩性识别以及沉积构造描述,在相序的指导下对单井沉积微相进行划分(何小胡等,2011;Xu et al., 2015;Lai et al., 2017b)。前已述及,主要产气层段巴一段和巴二段沉积体系类型为辫状河三角洲前缘,因而研究工作的重点在于通过高精度的成像测井资料,对单井的沉积微相以及沉积序列等进行综合识别与划分。如下图11中该井6797~6800 m深度段,光从常规 GR 测井曲线上难以对其沉积微相类型做出精细评价,而从对应的FMI-HD成像测井图中可以看出,该深度段发育楔状交错层理,底部发育一明显的正粒序(FMI静态图上岩石粒度越细颜色越暗),同时砂体内部具有一些较薄的泥质条带,之上则发育冲刷面。总体而言可以得出水动力条件较强的结论,再结合其中发育的楔状交错层理、正粒序和冲刷面,因此可以判断其沉积微相类型为辫状河三角洲前缘水下分流河道。

在以上认识的基础上,通过综合常规、成像测井并辅以一定的岩心观察,同时也结合常规测井粒度中值以及成分成熟度指数的计算,即可实现单井纵向上岩性岩相的测井识别与划分。成像测井资料蕴含着丰富的地质信息,某种程度上可代替岩心观察。槽状交错层理代表了高能沉积环境,尤其是大型槽状交错层理多数发育于河道中下部。板状交错层理相应也代表较高能沉积环境,通常发育于河道中上部或河口坝沉积微相中。而水平层理的

发育则指示水动力较低的水下分流间湾沉积环境。块状层理在成像测井图像上不显纹层,在高能和低能环境中均有可能出现(代一丁等,2015)。

以下图12即为Y井单井纵向上的岩性岩相的识别与划分,其中层段E(6982~6984 m)常规测井上为一明显漏斗形,指示反粒序的发育,成像测井静态图上的颜色由暗相上变亮论证了反粒序的存在。再结合成像测井图像动静态图上较为均一的颜色(其中的暗色正弦曲线指示裂缝的发育,裂缝不在本文讨论的范围内)说明该段砂岩较纯,泥质组分较少,该层段以块状层理为主。因此通过常规以及成像测井的综合分析,判断该段为河口坝砂体,同时根据计算的粒度中值和成分成熟度指数,将其进一步细分为河口坝中砂岩和细砂岩(图12)。

层段D(6974~6976 m)为一典型的钟型GR测井曲线,较为平直的低幅的GR说明其泥质组分较少,指示较强的水动力沉积条件。成像测井上可看

到明显的明暗截切的冲刷面,冲刷面之上则为较为纯净的块状砂岩。结合常规测井粒度中值和成分成熟度指数的计算,将该段解释为水下分流河道中砂岩(UDCM)相,下伏的漏斗形GR曲线具明显反韵律特征的则为河口坝砂体。事实上,随着三角洲的往前推进,以及季节性河道的频繁摆动与迁移,早期形成的河口坝砂体常被上覆的水下分流河道砂体冲刷叠置(Schomacker et al., 2010)。

层段C(6940~6942 m)GR曲线为低幅的略微锯齿状的箱型,成像测井上可观察到明显的板状交错层理,指示较强的水动力条件,因此该层段也解释为单期形成的水下分流河道中砂岩岩相类型。一般而言,单期形成的河道砂体在常规测井上为明显的箱型或钟型响应(Xu, 2007),从图12中可以看出,层段C往上至6932 m深度段,GR曲线仍为具有一定齿化的箱型特征,而从高精度的成像测井图像上则可以看出,该厚层砂体内部还发育有冲刷面,

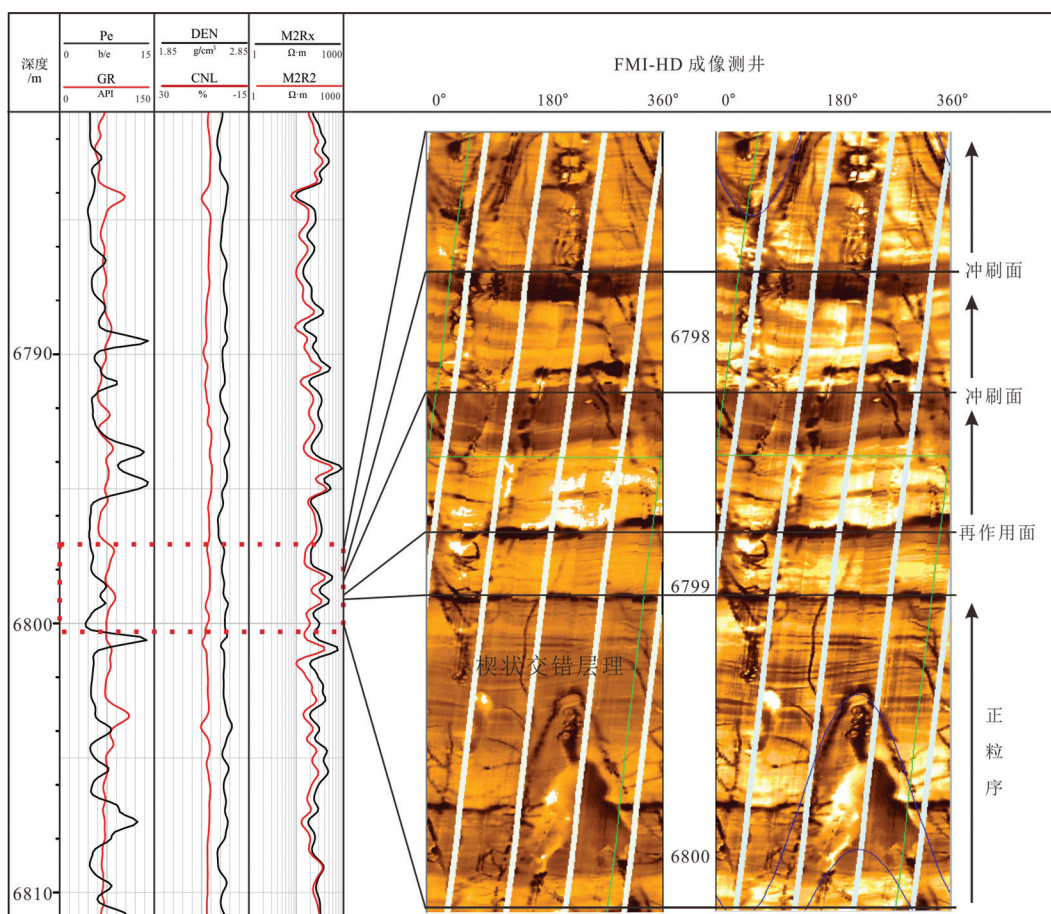


图11 克深地区X井辫状河三角洲前缘水下分流河道特征

Fig.11 Underwater distributary channel microfacies of braided delta front of Well X in Keshen area

冲刷面之上具有正韵律特征,同时沉积层理也由指示水动力较强的楔状、板状交错层理渐变为平行层理,因此其为多期河道叠加形成的砂体。

层段B(6912~6914 m)为略微锯齿状的低幅箱型GR测井曲线,成像测井上底部砂体较纯,色调以亮橙色为主,发育平行层理,往上可见一些薄层泥质条带,表现为暗褐色与两黄色相互叠置,指示沉积水动力发生一定变化(Keeton et al., 2015)。总体具有典型的正韵律特征,粒度中值指示为细砂岩的特征,因此将该层段综合解释为水下分流河道细砂岩相。层段A(6890~6892 m),略微锯齿状的低幅箱

型GR测井曲线,成像测井上发育的楔状交错层理,以及较大的粒度中值等特征,为典型水下分流河道中砂岩的鉴别特征(图12)。

沉积相的研究对于指导油气勘探、开发具有重要意义,通常沉积相和储层条件控制了砂体的发育程度和时空展布。库车地区古斜坡、古隆起区发育的辫状河三角洲水下分流河道中一细砂岩岩相区储层性质好,有利于天然气最富集(张荣虎等,2015)。

6 结论

(1)克深地区巴什基奇克组沉积以辫状河三角

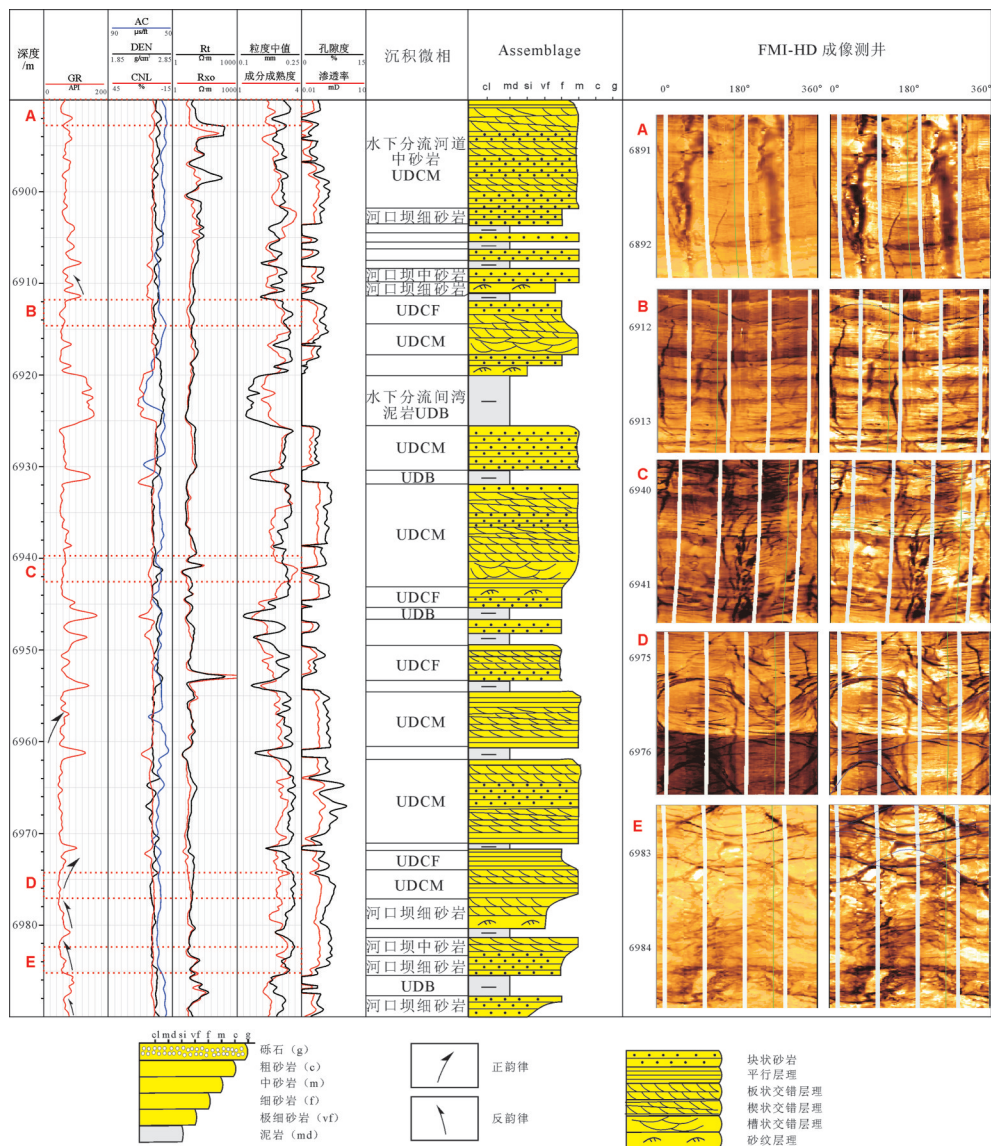


图12 克深地区Y井单井纵向上岩性岩相的测井识别与划分
Fig.12 Recognition and division of lithology and lithofacies for Well Y in Keshen area

洲前缘为主,发育水下分流河道和河口坝等沉积微相。河口坝砂体物性最好,相比较而言,水下分流河道微相砂体物性也较好,而水下分流间湾微相储集物性最差。

(2)根据岩性指数: $LI=GR/Pe$ 计算了储层的成分成熟度指数,此外,根据 ΔGR 建立了粒度中值的计算公式。

(3)根据粒度中值和成分成熟度指数将储层划分出水下分流河道中砂岩等不同的岩性岩相类型,并分别建立了不同岩性岩相的典型特征图版库。

(4)以高分辨率、纵向连续的成像测井资料为主,辅以岩心观察和常规测井曲线形态,通过岩心刻度测井实现了单井沉积微相的精细描述与刻画,而进一步根据常规测井计算的粒度中值和成分成熟度指数,实现了单井纵向上岩性岩相的测井识别与划分。

致谢:张永辰硕士、王凯硕士和徐渤硕士对于论文的图件整理和绘制工作给予了帮助,在此表示衷心感谢!

注释

①王贵文,赖锦,张永辰. 2013. 大北克深地区白垩系岩石物理相类型及在测井储层评价中的应用[R]. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司内部研究报告.

References

Dai Yiding, Cui Weiping. Imaging logging sedimentology study on Paleogene System in HZ25-7 structure of Huizhou depression in Pearl River Mouth Basin[J]. Geoscience, 2015, 29(1): 63-71(in Chinese with English abstract).

Chen Cuique, Luo Julan, Han Shou, Cong Peimao. Study on relationship between lowpermeability reservoir Fracture Growth and reservoir productivity [J]. Well Logging Technology, 2009, 33(5):475-479(in Chinese with English abstract).

Han Denglin, Li Zhong, Han Yinxue, Liu Jiaqing, Li Weifeng, Li Shalan. 2009. Sealing feature of burial diagenesis environment and its contrals on differentiation of cementation in Cretaceous sandstone reservoir in Kelasu structure zone, Kuqa depression, Acta Petrologica Sinica, 25(10): 2351- 2362 (in Chinese with English abstract).

He Chunhong, Zhang Chengguang, Tang Jun, Ju Dahai, Cao Jiangning. 2015. Lithologic Grade Logging Classification and Its Application Effect in Keshen Area of Kuqa Depression[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 12(2):43-47 (in Chinese with English abstract).

He Xiaohu, Li Junliang, Li Guojun, Liang Quansheng, Liu Xinyu. 2011. Sedimentology research on Imaging Well Logging and its application to western South China Sea Oilfield[J]. Well Logging Technology, 35(4): 363-371 (in Chinese with English abstract).

He Xiaohu, Li Junliang, Li Guojun, Liang Quansheng, Liu Xinyu. Application of imaging logging to deep- water gravity flow deposits study[J]. Well Logging Technology, 2013,37(1): 103-111 (in Chinese with English abstract).

Jia Jinhua. Depositional sequence and reservoir of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa foreland basin[J]. Earth Science Frontiers,2000, 7(3):133-143 (in Chinese with English abstract).

Keeton G, Pranter M, Cole R D, Gustason E R. 2015. Stratigraphic architecture of fluvial deposits from borehole images, spectral-gamma-ray response, and outcrop analogs, Piceance Basin, Colorado[J]. AAPG Bulletin,99(10), 1929-1956.

Lai Jin, Wang Guiwen, Xin Yi, Xiao Chengwen, Han Chuang, Zheng Xinhua, Wu Qingkuan. 2014. Diagenetic facies analysis of tight sandstone gas reservoir of Bashijiqike Formation in Kuqa Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 25(7):1019- 1032 (in Chinese with English abstract).

Lai Jin, Wang Guiwen, Chai Yu, Ran Ye, Zheng Xinhua, Xin Yi, Zhou Lei, Wu Qingkuan. 2015. Diagenetic sequence stratigraphy characteristics of Lower Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 33(2): 394- 407 (in Chinese with English abstract).

Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Shunan, Xin Yi, Wu Qingkuan, Li Jianlun, Cang Dan, 2013. Overview and research progress in logging recognition method of clastic reservoir diagenetic facies[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 44(12):4942-4953(in Chinese with English abstract).

Lai Jin, Wang Guiwen, Chai Yu, Xin Yi, Wu Qingkuan, Zhang Xiaotao, Sun Yanhui. 2017a. Deep burial diagenesis and reservoir quality evolution of high-temperature, high-pressure sandstones: Examples from Lower Cretaceous Bashijiqike Formation in Keshen area, Kuqa Depression, Tarim basin of China[J]. AAPG Bulletin, 101(6): 829-862.

Lai Jin, Wang Guiwen, Fan Zhuoying, Chen Jing, Wang Shuchen, Fan Xuqiang. 2017b. Sedimentary characterization of a braided delta using well logs: the Upper Triassic Xujiahe formation in central Sichuan basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 154, 172-193.

Lai Jin, Wang Guiwen, Zheng Yiqiong. 2013. Types and interpretation methods of lithology and lithofacies of the second member of Xujiahe Formation in Penglai Area, Central Sichuan Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 20(1): 33- 37 (in Chinese with English abstract).

Lai Jin, Wang Guiwen, Huang Longxing, Li Weiling, Ran Ye, Wang Di, Zhou Zhenglong, Chen Jing. 2015. Brittleness index estimation in a tight shaly sandstone reservoir using well logs[J]. Journal of

- Natural Gas Science and Engineering, 27: 1536–1545.
- Lai Jin, Wang Guiwen, Cai Chao, Fan Zhuoying, Wang Shuchen, Chen Jing, Luo Guanxing. 2018. Diagenesis and reservoir quality in tight gas sandstones[J]. Geological Journal, 53: 629–646.
- Liu Chun, Zhang Huiliang, Han Bo, Zhang Ronghu, Chen Ge. 2009. Reservoir characteristics and control factors of deep-burial clastic rocks in Dabei zone of Kuche Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 20(4):504–512(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianqing, Lai Xingyun, Yu Bingsong. 2004. Analyses for the sedimentary environment of Cretaceous strata and its causes of formation in the Kuqa depression[J]. Geoscience, 18(2):249–255 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jingyan, Lin Changsong, Xiao Jianxin. 2001. The characteristic of sequence stratigraphy and depositional systems of the Palaeogene Kuqa depression[J]. Coal Geology & Exploration, 31(6): 8–10 (in Chinese with English abstract).
- Pang Xiongqi, Li Peilong, Chen Dongxia, Zhang Shanwen, Zhang Jun, Yu Yixing. 2001. Characteristic and basic model of facies controlling oil and gas in continental fault basin[J]. Journal of Palaeogeography, 13(2):55–73(in Chinese with English abstract).
- Pang Xiongqi, Li Peilong, Zhang Shanwen, Chen Dongxia, Song Guoqi, Wang Yongshi, Zhang Jun. 2007. Control of facies-potential coupling on hydrocarbon accumulation in continental faulted basins and its basic geological models[J]. Oil & Gas Geology, 28(5):641–651.
- Qi Jiafu, Li Yong, Wu Chao, Yang Shujiang. 2013. The interpretation models and discussion on the contractive structure deformation of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Geology in China, 40(1): 106–120 (in Chinese with English abstract).
- Ran Ye, Wang Guiwen, Zhou Zhenglong, et al. 2016. Identification of lithology and lithofacies type and its application in Chang 7 tight oil in Heshui Area, Ordos Basin[J]. Geology in China, 43(4): 1331–1340 (in Chinese with English abstract).
- Schomacker E R, Kjemperud A V, Nystuen J P, Sigurd J J. 2010. Recognition and significance of sharp-based mouth-bar deposits in the Eocene Green River Formation, Uinta Basin, Utah[J]. Sedimentology, 57: 1069–1087.
- Sun Luping, ShouHao, Zhao Xiaolong, Li Ping. 2009. Sedimentary facies identification based on FMI imaging logging data[J]. Well Logging Technology, 33(4): 379–384(in Chinese with English abstract).
- Tan Zengju, Zheng Hongan, Zhang Chaomo, Liu Ziyun. 1995. Study of the lithology and texture of terrigenous clastic rock with medium grain size and average grain diameter [J]. Well Logging Technology, 19(2):130–133.
- Wang Qian, Liu Sixin. 2004. On comprehensive log interpretation method used in Lujiapudepression, Liaohe Oilfield[J]. Well Logging Technology, 28(2):133–134 (in Chinese with English abstract).
- Wu Dong, Zhu Xiaomin, Ma Aiyu, Li Yutong, Liu Ziliang, LiaoJijia. 2015. Sedimentary facies of the Chang6–Chang10 intervals in Heshui–Ta'erwan area, Ordos Basin[J]. Geology in China, 42(6): 1822–1836 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Jianxin, Lin Changsong, Liu Jingyan. 2008. Depositional palaeogeography and division of Cretaceous sequence of Wushi depression[J]. Earth Science Frontiers, 15(2): 8–19 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Jianxin, Lin Changsong, Liu Jingyan. 2005. Depositional palaeogeography of Cretaceous of Kuqa Depression in Northern Tarim Basin[J]. Geoscience, 19(2):253–260 (in Chinese with English abstract).
- Xu C. 2007. Interpreting shoreline sands using borehole images—A case study of the Cretaceous Ferron sands in Utah. AAPG Bulletin 91, 1319–1338.
- Xu C, Gehenn J M, Zhao D, Xie G, and Teng M K. 2015. The fluvial and lacustrine sedimentary systems and stratigraphic correlation in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin, China[J]. AAPG Bulletin 99(11), 2023–2041.
- Yang Wensheng, Zhao Limin, Hou Shoutan, Liu Fengyun. 2000. Preliminary application of fine reservoir description to development of Jingqiu oilfield[J]. Experimental Petroleum Geology, 22(4):377 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Huiliang, Zhang Ronghu, Yang Haijun, Yao Genshun, Ma Yujie. 2012. Quantitative evaluation methods and applications of tectonic fracture developed sand reservoir: A Cretaceous example from Kuqa foreland basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(3): 827–835.
- Zhang Jun, Xu Binggao. 2005. Application of Imaging Logging interpretation in West Sichuan Detrital Rock[J]. Well Logging Technology, 29(2): 129–133 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Longhai, Dai Dajing, Zhou Mingshun, Qiao Dexin, Ning Congqian, Li Chaoliu. 2006. Application of imaging logs in studying lake basin sedimentations[J]. Petroleum Exploration and Development, 33(1): 67–71 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ronghu, Jia Chengzao, Zhang Huiliang, Zhu Guohua. 2009. Carbonate debris characteristics and its geological significance in the terrestrial sandstone of Cretaceous bashijiike Group, Tarim basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 27(3):410–418.
- Zhang Ronghu, Wang Junpeng, Ma Yujie, Chen Ge, Zeng Qinglu, Zhou Chen-guang. 2015. The sedimentary microfacies, palaeogeomorphology and their controls on gas accumulation of deep-buried Cretaceous in Kuqa Depression, Tarim Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 26(4):667–678.
- Zhang Ronghu, Yang Haijun, Wang Junpeng, ShouJianfeng, Zeng Qinglu, Liu Qun. 2014. The formation mechanism and exploration significance of ultra-deep, low-porosity and tight sandstone reservoirs in Kuqa depression, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 35(6): 1057–1069.

- Zhang Ronghu, Yao Genshun, ShouJianfeng, Zhang Huiliang, TianJiqiang. 2011. An integration porosity forecast model of deposition, diagenesis and structure[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 38(2):145-151.
- Zhang Yongchen. 2014. Reseach on the relationship between lithology and fracture of the Cretaceous reservoir and its effectiveness in Keshen area[D]. Beijing: China University of Petroleum (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenglong, Wang Guiwen, Ran Ye, Lai Jin, Cui Yufeng, Zhao Xianling. 2016. A logging identification method of tight oil reservoir lithology and lithofacies: A case from Member Chang7 of TrassicYanchang Formation in Heshui area, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 43(1): 1-9.
- ### 附中文参考文献
- 代一丁, 崔维平. 2015. 珠江口盆地惠州凹陷HZ25-7构造古近系成像测井沉积学研究[J]. *现代地质*, 29(1): 63-71.
- 陈翠雀, 罗菊兰, 韩焘, 从培茂. 2009. 低渗透率储层裂缝发育程度与储层产能关系研究[J]. *测井技术*, 33(5):475-479.
- 韩登林, 李忠, 韩银学, 刘嘉庆, 李维峰, 李莎澜. 2009. 库车坳陷克拉苏构造带白垩系砂岩埋藏成岩环境的封闭性及其胶结作用分异特征[J]. *岩石学报*, 25(10):2451-2462.
- 何春红, 章成广, 唐军, 居大海, 曹江宁. 2015. 库车坳陷克深地区岩性粒级测井分类及应用效果[J]. *长江大学学报(自科版)*, 12(2): 43-47.
- 何小胡, 李俊良, 李国军, 梁全胜, 刘新宇. 2011. 成像测井沉积学研究在南海西部油田的应用[J]. *测井技术*, 35(4): 363-371.
- 何小胡, 张迎朝, 张道军, 左倩媚, 何卫军, 董贵能. 2013. 成像测井技术在重力流沉积研究中的应用[J]. *测井技术*, 37(1): 103-111.
- 贾进华. 2000. 库车前陆盆地白垩纪巴什基奇克组沉积层序与储层研究[J]. *地质前缘*, 7(3):133-143.
- 赖锦, 王贵文, 信毅, 周磊, 肖承文, 韩闯, 郑新年, 吴庆宽. 2014. 库车坳陷巴什基奇克组致密砂岩气储层成岩相分析[J]. *天然气地球科学*, 25(7):1019-1032.
- 赖锦, 王贵文, 柴毓, 冉冶, 郑新华, 信毅, 周磊, 吴庆宽. 2015a. 库车坳陷白垩系巴什基奇克组组成岩层序地层特征[J]. *沉积学报*, 33(2):394-407.
- 赖锦, 王贵文, 郑新华, 周磊, 韩闯, 吴大成, 黄龙兴, 罗官幸. 2015b. 大北地区巴什基奇克组致密砂岩气储层定量评价[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 46(6):2285-2298.
- 赖锦, 王贵文, 郑懿琼. 2013. 川中蓬莱地区须二段储层岩性岩相类型及解释方法[J]. *断块油气田*, 20(1):33-37.
- 刘春, 张惠良, 韩波, 张荣虎, 陈戈. 2009. 库车坳陷大北地区深部碎屑岩储层特征及控制因素[J]. *天然气地球科学*, 20(4):504-512.
- 刘建清, 赖兴运, 于炳松. 2004. 库车坳陷白垩系储层的形成环境及成因分析[J]. *现代地质*, 18(2):249-255.
- 刘景彦, 林畅松, 肖建新. 2001. 库车坳陷古近系层序和沉积体系发育特征[J]. *煤田地质与勘探*, 31(6):8-10.
- 庞雄奇, 李丕龙, 陈冬霞, 张善文, 张俊, 于轶星. 2011. 陆相断陷盆地相控油气特征及其基本模式[J]. *古地理学报*, 13(2):55-73.
- 庞雄奇, 李丕龙, 张善文, 陈冬霞, 宋国奇, 王永诗, 张俊. 2007. 陆相断陷盆地相-势耦合控藏作用及其基本模式[J]. *石油与天然气地质*, 28(5):641-651.
- 漆家福, 李勇, 吴超, 杨书江. 2013. 塔里木盆地库车坳陷收缩构造变形模型若干问题的讨论[J]. *中国地质*, 40(1), 106-120.
- 冉冶, 王贵文, 周正龙, 赖锦, 代全齐, 陈晶, 范旭强, 王抒忱. 2016. 鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油岩性岩相类型识别及其应用[J]. *中国地质*, 43(4): 1331-1340.
- 孙鲁平, 首皓, 赵晓龙, 李平. 2009. 基于微电阻率扫描成像测井的沉积微相识别[J]. *测井技术*, 33(4): 379-384.
- 谭增响, 郑宏安, 张超漠, 刘子云. 1995. 利用粒度中值平均粒径研究陆源碎屑岩岩性与结构. *测井技术*, 19(2):130-133.
- 王谦, 刘四新. 2004. 辽河油田陆家堡凹陷储集层综合测井解释方法[J]. *测井技术*, 28(2):133-134.
- 吴冬, 朱筱敏, 马爱钰, 李雨彤, 刘自亮, 廖纪佳. 2015. 鄂尔多斯盆地合水-塔尔湾地区长6~长10油层组沉积相研究[J]. *中国地质*, 42(6): 1822-1836.
- 肖建新, 林畅松, 刘景彦. 2008. 乌什凹陷及东部邻区白垩系层序划分与沉积古地理[J]. *地质前缘*, 15(2):8-19.
- 肖建新, 林畅松, 刘景彦. 2005. 塔里木盆地北部库车坳陷白垩系沉积古地理[J]. *现代地质*, 19(2):253-260.
- 阳文生, 赵力民, 侯守探, 刘凤芸. 2000. 精细储层描述在荆丘油田调整挖潜中的初步实践[J]. *石油实验地质*, 22(4):377.
- 张惠良, 张荣虎, 杨海军, 姚根顺, 马玉杰. 2012. 构造裂缝发育型砂岩储层定量评价方法及应用——以库车前陆盆地白垩系为例[J]. *岩石学报*, 28(3):827-835.
- 张筠, 徐炳高. 2005. 成像测井在川西碎屑岩解释中的应用[J]. *井技术*, 29(2): 129-133.
- 张龙海, 代大经, 周明顺, 乔德新, 宁从前, 李潮流. 成像测井资料在湖盆沉积研究中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(1): 67-71.
- 张荣虎, 贾承造, 张惠良, 朱国华. 塔里木盆地白垩系巴什基奇克组陆相砂岩中碳酸盐岩碎屑特征及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2009, 27(3):410-418.
- 张荣虎, 王俊鹏, 马玉杰, 陈戈, 曾庆鲁, 周晨光. 2015. 塔里木盆地库车坳陷深层沉积微相古地貌及其对天然气富集的控制[J]. *天然气地球科学*, 26(4):667-678.
- 张荣虎, 杨海军, 王俊鹏, 寿建峰, 曾庆鲁, 刘群. 2014. 库车坳陷超深层低孔致密砂岩储层形成机制与油气勘探意义[J]. *石油学报*, 35(6): 1057-1069.
- 张荣虎, 姚根顺, 寿建峰, 张惠良, 田继强. 2011. 沉积、成岩、构造一体化孔隙度预测模型[J]. *石油勘探与开发*, 38(2):145-151.
- 张永辰. 2014. 克深地区白垩系储层岩性和裂缝与储层有效性关系研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京).
- 周正龙, 王贵文, 冉冶, 赖锦, 崔玉峰, 赵显令. 2016. 致密油储集层岩性岩相测井识别方法: 以鄂尔多斯盆地合水地区三叠系延长组7段为例[J]. *石油勘探与开发*, 43(1): 1-9.