

文章编号: 0253-2697(2023)04-0612-14 DOI:10. 7623/syxb202304004

深层—超深层优质碎屑岩储层成因与测井评价方法

——以库车坳陷白垩系巴什基奇克组为例

赖 锦^{1,2} 肖 露² 赵 鑫² 赵 飞² 黎雨航² 朱世发² 王贵文^{1,2} 刘宏坤²

(1. 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; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249)

摘要: 深层—超深层是目前油气勘探的重点领域,寻找规模优质储层是实现深层—超深层油气勘探突破的关键。构造作用、沉积相和成岩相对优质碎屑岩储层的形成与发育具有重要影响,其中,沉积相是优质储层形成的基础,成岩相是优质储层发育的关键,构造作用通过影响裂缝发育和地应力场来改善储层品质。以库车坳陷白垩系巴什基奇克组储层为例,分析深层—超深层碎屑岩储层的基本特征,从沉积微相、成岩相和构造(裂缝、地应力)“三元控储”的角度揭示了深层—超深层储层品质的控制因素。沉积背景和成岩相控制了深层—超深层储层基质孔隙的形成与发育,裂缝可改善储层的渗透率和产能,不同构造样式下现今地应力的差异分布控制了基质孔隙保存和裂缝有效性。基于“三元控储”机理、成岩综合系数和储集物性,将库车坳陷深层—超深层储层划分为4类,其中,优质储层主要形成于高能水动力环境和低应力场背景,经历了弱—中等压实作用和弱胶结作用,溶蚀作用和裂缝发育常叠加改善储集物性。综合常规测井资料和成像测井资料分别建立了沉积微相、成岩相、裂缝发育和地应力场的测井评价方法,实现了库车坳陷白垩系深层—超深层优质砂岩储层的测井预测。研究方法 with 认识可以为开展深层—超深层储层综合评价与有利区带预测提供理论指导与技术支持。

关键词: 深层—超深层; 沉积微相; 成岩相; 裂缝; 地应力; 测井评价

中图分类号: TE122. 2

文献标识码: A

Genesis and logging evaluation of deep to ultra-deep high-quality clastic reservoirs: a case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa depression

Lai Jin^{1,2} Xiao Lu² Zhao Xin² Zhao Fei² Li Yuhang² Zhu Shifa² Wang Guiwen^{1,2} Liu Hongkun¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Currently, deep to ultra-deep reservoirs are the key areas of oil-gas exploration, and searching for large-scale high-quality reservoirs is the key to achieving breakthroughs in deep to ultra-deep oil-gas exploration. Tectonism, sedimentary facies and diagenetic facies play an important role in the formation and development of high-quality clastic reservoirs. Among them, sedimentary facies provide the basis for the formation of high-quality reservoirs, diagenetic facies are the key to the development of high-quality reservoirs, and tectonism can improve the quality of reservoirs by exerting effects on fracture development and crustal stress field. Taking reservoirs of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa depression as an example, the paper analyzes the basic characteristics of deep to ultra-deep clastic reservoirs, and reveals the controlling factors for the quality of deep to ultra-deep reservoirs from the perspective of “three-element reservoir control” involving sedimentary microfacies, diagenetic facies and tectonics (fracture and crustal stress). The sedimentary background and diagenetic facies control the formation and development of matrix pores in deep to ultra-deep reservoirs. Fractures can improve the permeability and productivity of reservoirs. The current differential distribution of crustal stress under different tectonic styles controls the preservation of matrix pores and the effectiveness of fractures. Based on the “three-element reservoir control” mechanism, the integrative modulus of diagenesis, and reservoir properties, the deep to ultra-deep reservoirs in Kuqa depression are divided into four categories. Among them, high-quality reservoirs are mainly formed in high-energy hydrodynamic environments and low stress field backgrounds, and have undergone weak to medium compaction and weak cementation. Reservoir properties can be improved jointly by dissolution and fracture development. The logging evaluation methods of sedimentary microfacies, diagenetic facies, fracture development and crustal stress field were established based on conventional logging data and imaging logging data, respectively, thus realizing

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42002133、No. 41872133)、中国石油大学(北京)科研启动基金项目(2462021YXZZ003)和中国石油—中国石油大学(北京)战略合作协议项目(ZLZX2020-01)资助。

第一作者: 赖 锦,男,1988年2月生,2016年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)地球科学学院副教授、博士生导师,主要从事沉积储层与测井地质学教学与研究工作。Email: laijin@cup.edu.cn

通信作者: 王贵文,男,1966年1月生,2010年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)地球科学学院教授、博士生导师,主要从事沉积储层地质与测井地质学方面的教学与科研工作。Email: wanggw@cup.edu.cn

the logging prediction of the Cretaceous deep to ultra-deep high-quality sandstone reservoirs in Kuqa depression. These research methods and understandings can provide theoretical guidance and technical support for conducting comprehensive evaluation of deep to ultra-deep reservoirs and predicting favorable zones.

Key words: deep to ultra-deep; sedimentary microfacies; diagenetic facies; fracture; crustal stress; logging evaluation

引用:赖锦,肖露,赵鑫,赵飞,黎雨航,朱世发,王贵文,刘宏坤. 深层—超深层优质碎屑岩储层成因与测井评价方法——以库车坳陷白垩系巴什基奇克组为例[J]. 石油学报, 2023, 44(4): 612-625.

Cite: LAI Jin, XIAO Lu, ZHAO Xin, ZHAO Fei, LI Yuhang, ZHU Shifa, WANG Guiwen, LIU Hongkun. Genesis and logging evaluation of deep to ultra-deep high-quality clastic reservoirs: a case study of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(4): 612-625.

深层—超深层现已成为中国陆上油气勘探的重要接替领域^[1-5]。中国东部盆地一般将埋深为 3 500~4 500 m 的地层定义为深层,埋深大于 4 500 m 的地层为超深层;西部盆地则将埋深为 4 500~6 000 m 的地层定义为深层,埋深大于 6 000 m 的地层为超深层^[6-7]。深层—超深层是中国石油工业未来重要的发展领域之一,也是引领未来油气勘探与开发的战略现实领域^[4,8]。进入 21 世纪,陆续在东部的松辽盆地、渤海湾盆地和中西部的四川盆地、鄂尔多斯盆地的深层—超深层取得一系列重大突破^[4,9-10];在西部塔里木盆地库车坳陷建成并投产克拉 2、迪那 2、大北、克深和博孜等储量超千亿立方米的深层碎屑岩大气田,成为“西气东输”的重要气源地^[11-14]。其中,克深气田是目前中国埋深最大的陆相碎屑岩大气田,其探明天然气地质储量近 $7000 \times 10^8 \text{ m}^3$,产层平均深度超 7 000 m^[15]。库车坳陷克深 9 井、博孜 8 井钻遇的碎屑岩储层最大埋深超过 8 000 m,地层温度高达 190 °C,地层压力超过 140 MPa^[16-17]。

深层—超深层碎屑岩储层在漫长的地质历史时期经历了复杂的成岩作用和构造改造,现今往往表现出岩性致密、储集物性差和孔隙结构复杂的特征^[18]。因此,寻找发育异常高孔带的优质储层是深层—超深层油气勘探的关键^[4,19],优质储层的形成机理分析及储层评价与预测研究至关重要^[20],亟需明确深层—超深层储层品质的主控因素,并建立配套的优质储层综合评价与测井预测方法^[21-22]。岩石学、储集物性、储集空间及微观孔喉等静态特征的精细描述与刻画是储层成因机理分析和优质储层评价的前提。通常认为有利沉积相是形成优质储层的基础^[1,23],成岩作用及其演化(成岩相)是形成优质储层的关键,而构造作用对优质储层主要起调整作用,即构造、沉积和成岩“三元控储”^[24-25]。

深层—超深层油气勘探开发面临岩心等基础地质资料匮乏等难题,而地下地球物理测井资料作为储层地质信息的综合响应,包含了岩性、物性、储集空间、流体性质、岩石蚀变作用结果等多重信息,可以为储层评价及优质储层预测提供技术支撑^[26-28]。在阐明深层—超深层碎屑岩储层地质成因基础上,建立不同成因优

质储层的测井评价方法,对深层—超深层优质储层分布规律的预测具有重要现实意义。

笔者以库车坳陷白垩系巴什基奇克组深层—超深层碎屑岩储层为例,在前人研究基础上,充分利用岩心、岩石薄片和扫描电镜、激光共聚焦、高压压汞、核磁共振等分析测试资料,系统描述与刻画了深层—超深层碎屑岩储层的岩石学、物性、微观孔喉特征及其与微裂缝配置等静态特征。从构造、沉积相和成岩相等角度分析阐明了深层—超深层优质储层的主控因素。基于沉积微相、成岩相、裂缝相和地应力耦合建立了一套适合于深层—超深层碎屑岩储层的综合评价与优质储层发育预测方法,以期对深层—超深层油气勘探与开发提供理论指导与方法支持。

1 深层—超深层碎屑岩储层特征

库车坳陷白垩系储层表现为超深埋(普遍超过 6 000 m,图 1)、超高压(地层流体压力系数普遍大于 1.6)、超高温(普遍高于 130 °C)、基质超低渗(覆压渗透率普遍小于 0.1 mD)及裂缝发育的特征^[5,29]。白垩系沉积背景复杂、砂体岩相变化快,其中,巴什基奇克组以近物源、相对快速堆积的扇三角洲和辫状河三角洲前缘沉积体系为主^[30-31],岩石成分成熟度低而结构成熟度中等,决定了其独特的致密化机理和孔隙演化特征。巴什基奇克组储层孔隙类型多样,且极不规则、大小相差悬殊、孔径分布不均匀、孔喉细小、孔隙连通性差,储集空间类型包括原生粒间孔、粒内溶孔、黏土矿物微孔隙及微裂缝,以原生粒间孔隙和粒内溶蚀孔隙为主,高压压汞分析显示孔喉之间连通性相对较好(图 2)。巴什基奇克组非储层段多为压实致密层段或碳酸盐胶结作用强烈层段,孔隙基本不发育,高压压汞分析显示其孔喉连通性非常差^[3](图 2)。

喜马拉雅运动以来,库车坳陷白垩系持续遭受强烈挤压,岩石破裂形成大规模裂缝^[16,29](图 3)。岩心、岩石薄片、激光共聚焦和成像测井资料均指示白垩系巴什基奇克组裂缝较发育,以高角度裂缝和网状裂缝为主,成像测井资料解释缝宽为 10~100 μm ,线密度

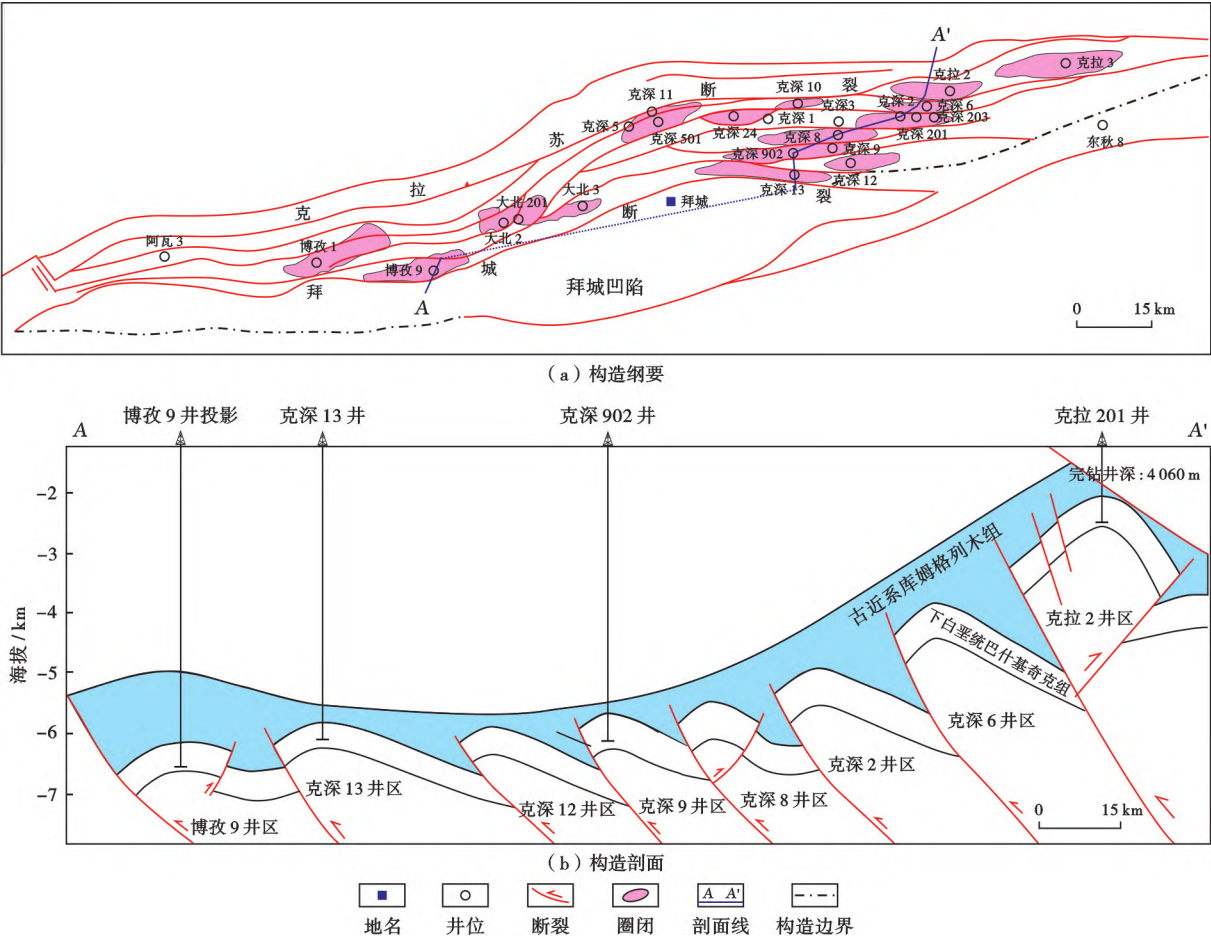


图 1 库车坳陷克拉苏构造带地质剖面(据文献[7]修改)

Fig.1 Geological profile of Kelaasu structural belt in Kuqa depression

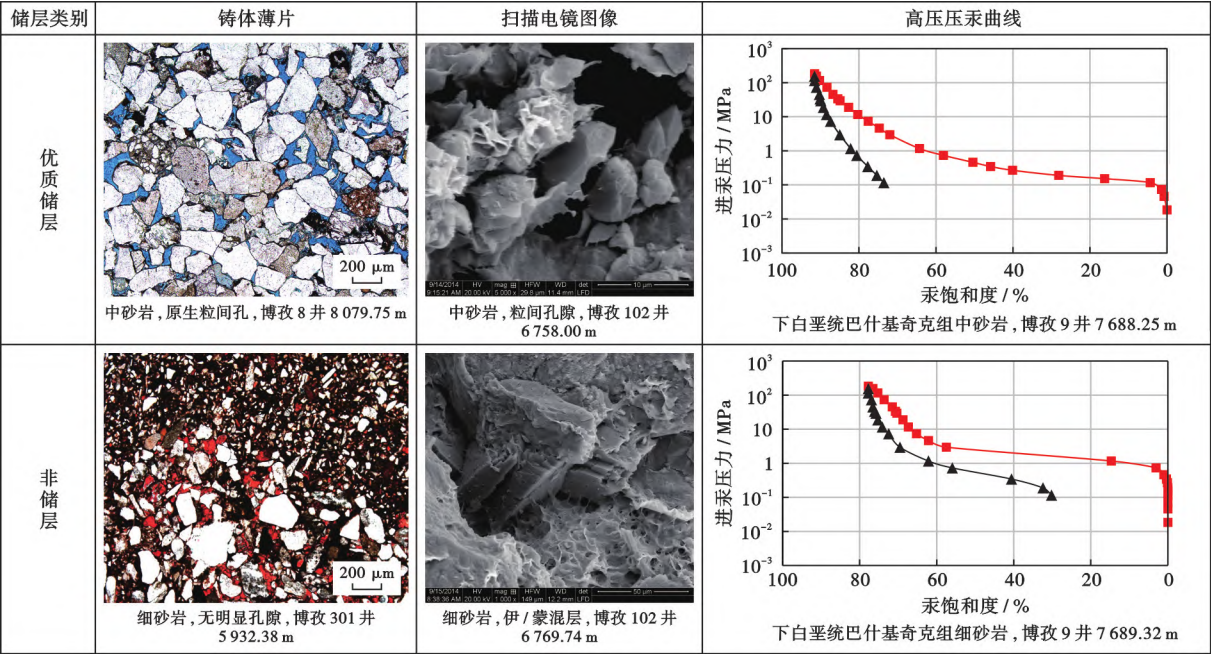


图 2 库车坳陷深层—超深层碎屑岩特征及其地质表征方法

Fig. 2 Characteristics and geological characterization method of deep to ultra-deep sandstone reservoirs in Kuqa depression

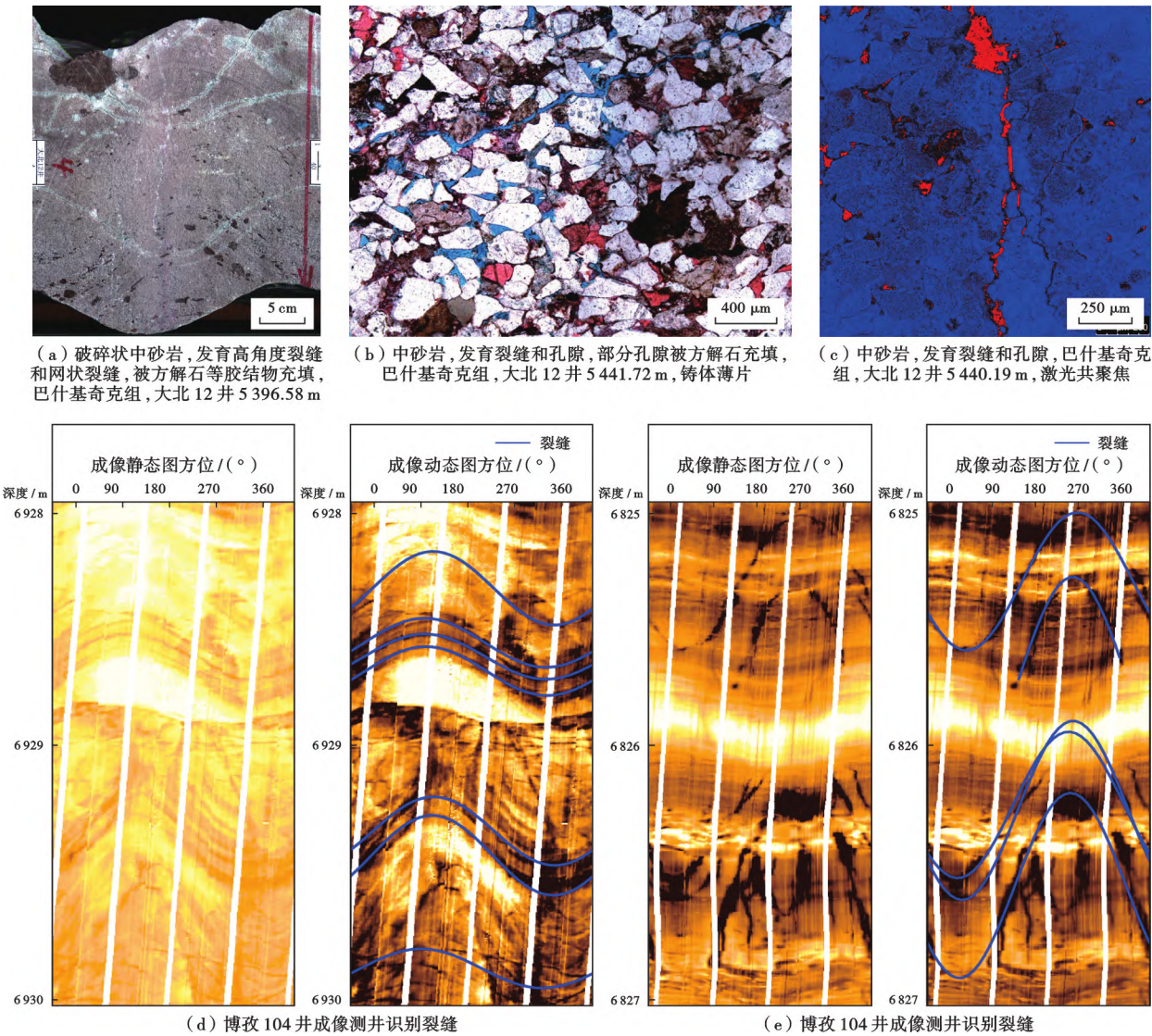


图 3 库车坳陷白垩系巴什基奇克组裂缝发育特征

Fig. 3 Fracture characteristics of the Cretaceous Bashihe Formation in Kuqa depression

可达 3~12 条/m,不同产状裂缝相互切割成网状,岩心甚至呈破碎状(图 3)。张裂缝开度较大,但延伸较短,易被方解石等胶结物充填,而剪切裂缝则延伸较远,可切穿矿物颗粒,但其开度较小(图 3)。

2 深层—超深层碎屑岩成储机制

优质储层的形成与发育受沉积相、成岩相和构造作用共同控制,即“三元控储”^[32]。其中,沉积相是优质储层形成的基础;成岩相是控制优质储层发育的关键;而构造作用一方面可通过构造挤压降低储层储集物性。另一方面可形成裂缝、改善储层品质^[24,32](图 4)。通过沉积微相、成岩相和裂缝相叠加(即岩石物理相)可预测有利孔渗发育带^[24](图 4)。但深层—超深层构造样式和应力场复杂,现今地应力对储层品质也具有重要影响^[16,32]。因此,在开展库车坳陷深层—超深层

碎屑岩储层评价与预测工作时,需综合考虑沉积相、成岩相、裂缝和地应力 4 个因素的影响。

2.1 沉积微相、成岩相约束下基质孔隙发育

辫状河三角洲砂岩形成于高能水体环境,其颗粒粒度较粗、分选较好,在埋藏过程中刚性颗粒能抵御一部分压实作用的影响,从而保留部分原生孔隙;而泥质砂岩和泥岩形成于相对低能的沉积水体,其抗压能力弱,在埋藏过程中被压实致密。后期溶蚀作用、流体超压、黏土矿物膜发育等因素均有利于优质储层的发育;而压实致密和强烈碳酸盐胶结作用不利于优质储层的发育(图 4)。

2.2 裂缝发育控制储层渗透率和产能

除基质孔隙外,裂缝是改善储层渗透率和油气井产能的重要因素^[33-34]。裂缝可以连通孤立分布的孔隙,显著改善储层渗流性能,并降低有效储层的物性下限,天然裂缝是改善库车坳陷白垩系巴什基奇克组深

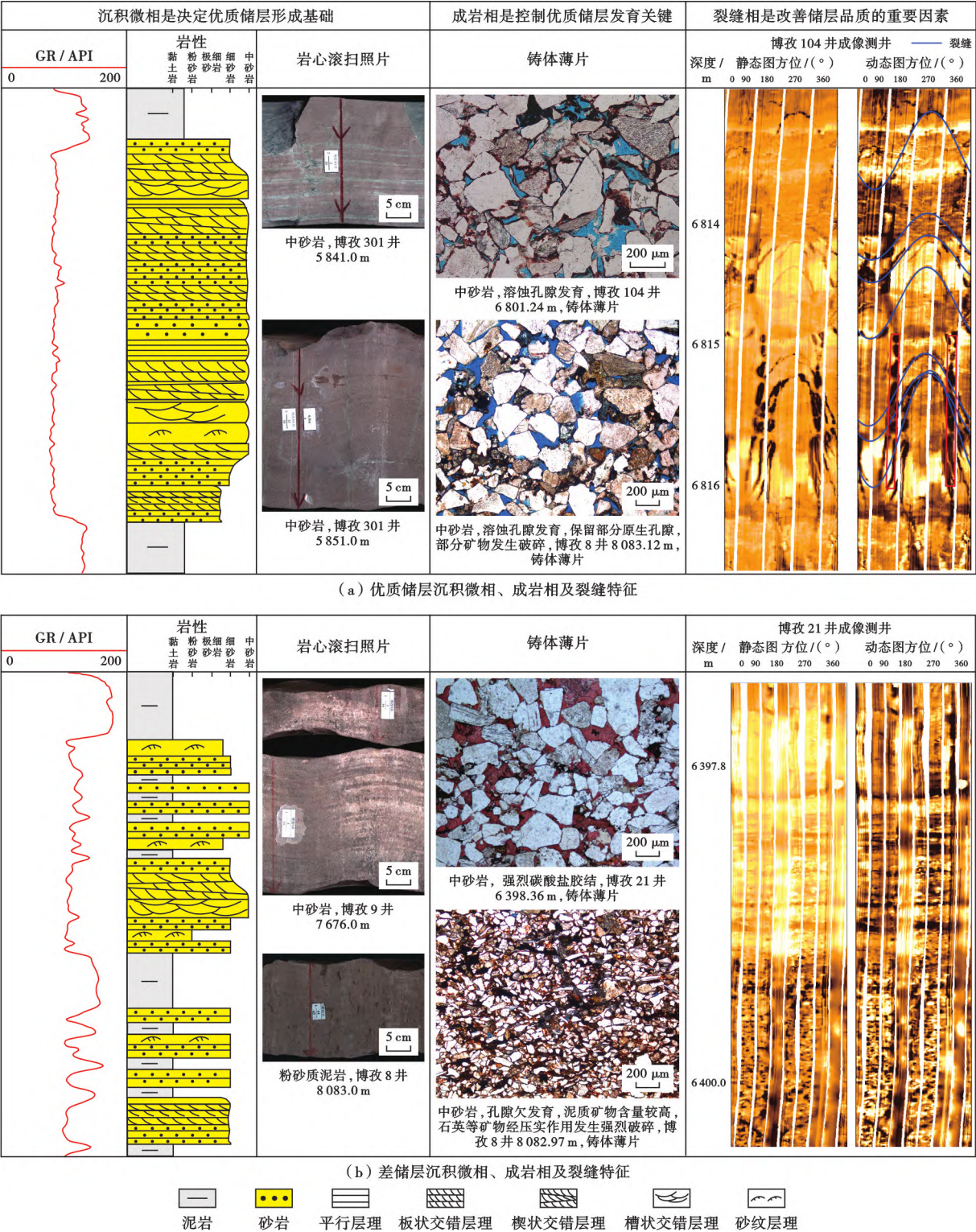


图 4 巴什基奇克组基于沉积微相、成岩相和裂缝相叠加的“三元控储”

Fig. 4 Three factors controlling the Bashijiqi Formation reservoir quality by integrating depositional microfacies, diagenetic facies and fracture

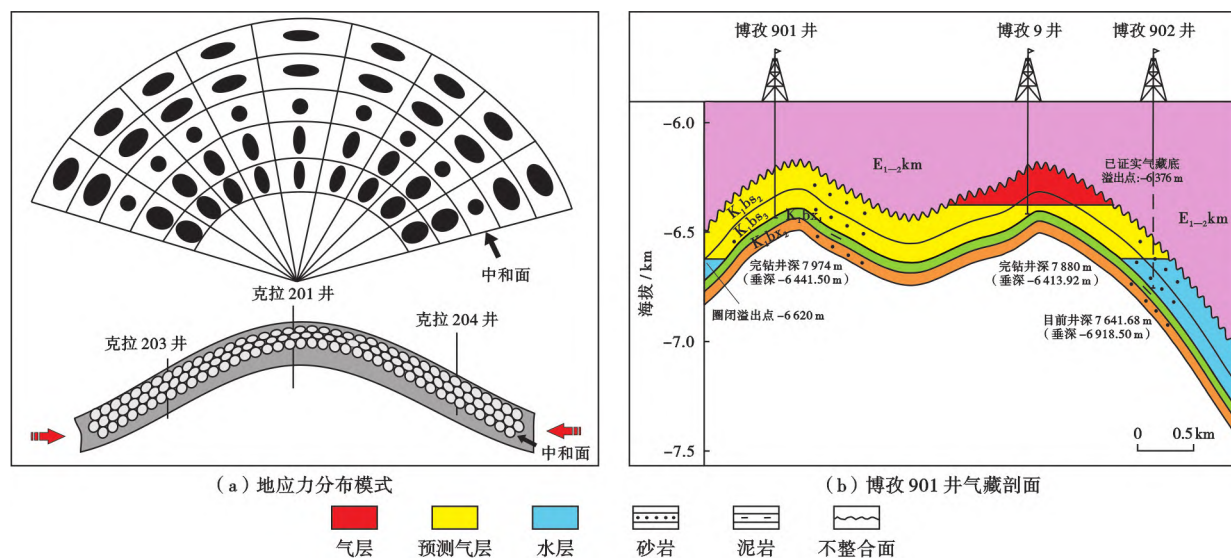
层—超深层储层渗透性和流体流动能力的重要因素, 优质储层通常发育有天然裂缝(图 4)。

2.3 构造样式与地应力耦合控制基质孔隙及裂缝的有效性

前人利用沉积微相、成岩相和裂缝相叠加, 有效预测了鄂尔多斯盆地上三叠统延长组大型内陆坳陷型湖盆河流—三角洲沉积体系的优质砂岩储集体^[24]。与延长组相比, 库车坳陷深层—超深层构造样式复杂、地应力分布非均质性较强, 不同应力场环境对储层品质具有重要控制作用^[35-37]。典型背斜构造“中和面”上方

的背斜外弧向外弯曲,派生出局部附加张应力场,有利于张裂缝发育带形成和储集体发育;“中和面”下方的背斜内弧向内弯曲,派生出局部挤压应力场,不利于储层发育,这种应力分布的非均质性导致了储层的非均一性^[38-39](图5)。相应地,构造应力场纵向上可划分为张性段、过渡段和压扭段^[40]。现今应力场可以分解

成垂向应力(S_v)、水平最大主应力($S_{H_{max}}$)和水平最小主压应力($S_{H_{min}}$),根据三者数值的相对大小可以将现今构造应力场划分为拉张应力场($S_v > S_{H_{max}} > S_{H_{min}}$)、挤压应力场($S_{H_{max}} > S_{H_{min}} > S_v$)和走滑应力场($S_{H_{max}} > S_v > S_{H_{min}}$)^[41]。库车坳陷白垩系现今地应力场为典型的走滑断层应力状态^[29,42-43]。



注: $K_1 bs_2$ —下白垩统巴什基奇克组二段; $K_1 bs_3$ —下白垩统巴什基奇克组三段; $K_1 bx_1$ —下白垩统巴西盖组一段; $K_1 bx_2$ —下白垩统巴西盖组二段; $E_{1-2} km$ —古近系库姆格列木群。

图5 不同构造样式地应力分布及博孜901井气藏剖面(据文献[38]修改)

Fig. 5 In-situ stress distribution within various structure patterns and gas reservoir profile of Well Bozi901

博孜901井钻遇白垩系巴什基奇克组背斜气藏(图5),该井巴什基奇克组二段处于张应力段,水平两向主应力差($S_{H_{max}} - S_{H_{min}}$)相对较小,约为20 MPa,岩石薄片上可见不同程度发育的原生粒间孔隙得以较好保存,反映了张性应力场背景下储集层孔隙的保存机理(图6)。巴什基奇克组三段(巴三段)的两向主应力差逐渐增大,表明应力场由张性段逐渐变为压扭段,岩石薄片上可见颗粒间为线接触,孔隙欠发育,表明该段经历了较强的压实作用,岩性致密(图6)。燕山期和喜马拉雅期的古应力场变化使巴什基奇克组岩石易于破裂形成裂缝^[44]。现今应力场则主要作用于岩石骨架和裂缝面,影响储层品质^[42]。裂缝走向多与现今 $S_{H_{max}}$ 平行,裂缝面承受的正应力最小,有利于其保持开启。总体上,库车坳陷深层—超深层致密储层的发育与形成受沉积、成岩、裂缝及地应力场4个因素共同控制(图6)。

3 深层—超深层碎屑岩储层测井评价方法

3.1 沉积微相、成岩相测井识别

库车坳陷白垩系沉积体系以辫状河(扇)三角洲沉

积体系为主,发育水下分流河道、河口坝等骨架砂体,骨架砂体之间被水下分流间湾及湖相泥岩分隔。当前,针对沉积微相、成岩相的测井识别与评价已经形成了较为完整的流程^[45-47]。研究区白垩系水下分流河道砂体的自然伽马测井曲线为钟型或低幅度齿化箱型,岩性主要为中砂—细砂岩和砂砾岩,不同类型的交错层理发育;河口坝骨架砂体自然伽马测井曲线为典型的漏斗型,平行层理和板状交错层理发育,岩性多以细砂岩为主。基于常规测井和成像测井可以实现单井沉积微相的连续判别(图7)。

刘宏坤等^[48]根据成岩作用强度、岩石矿物组合等特征将研究区白垩系致密储层划分为碳酸盐胶结相、压实致密相、中等压实弱胶结相等不同成岩相类型。利用薄片深度归位并刻度测井资料等方法可以总结不同成岩相的测井曲线特征^[18]。碳酸盐胶结相通常具有低自然伽马值、高岩石密度值和高电阻率值;中等压实弱胶结相具有低自然伽马值、低岩石密度值和中—高电阻率值,深、浅探测电阻率存在幅度差;压实致密相具有中—高自然伽马值、高岩石密度值和中—低电阻率值(图7)。此外,成岩综合系数(C_g)可以用来判别不同成岩相类型:压实致密相 C_g 值一般 $<0.5\%$,碳

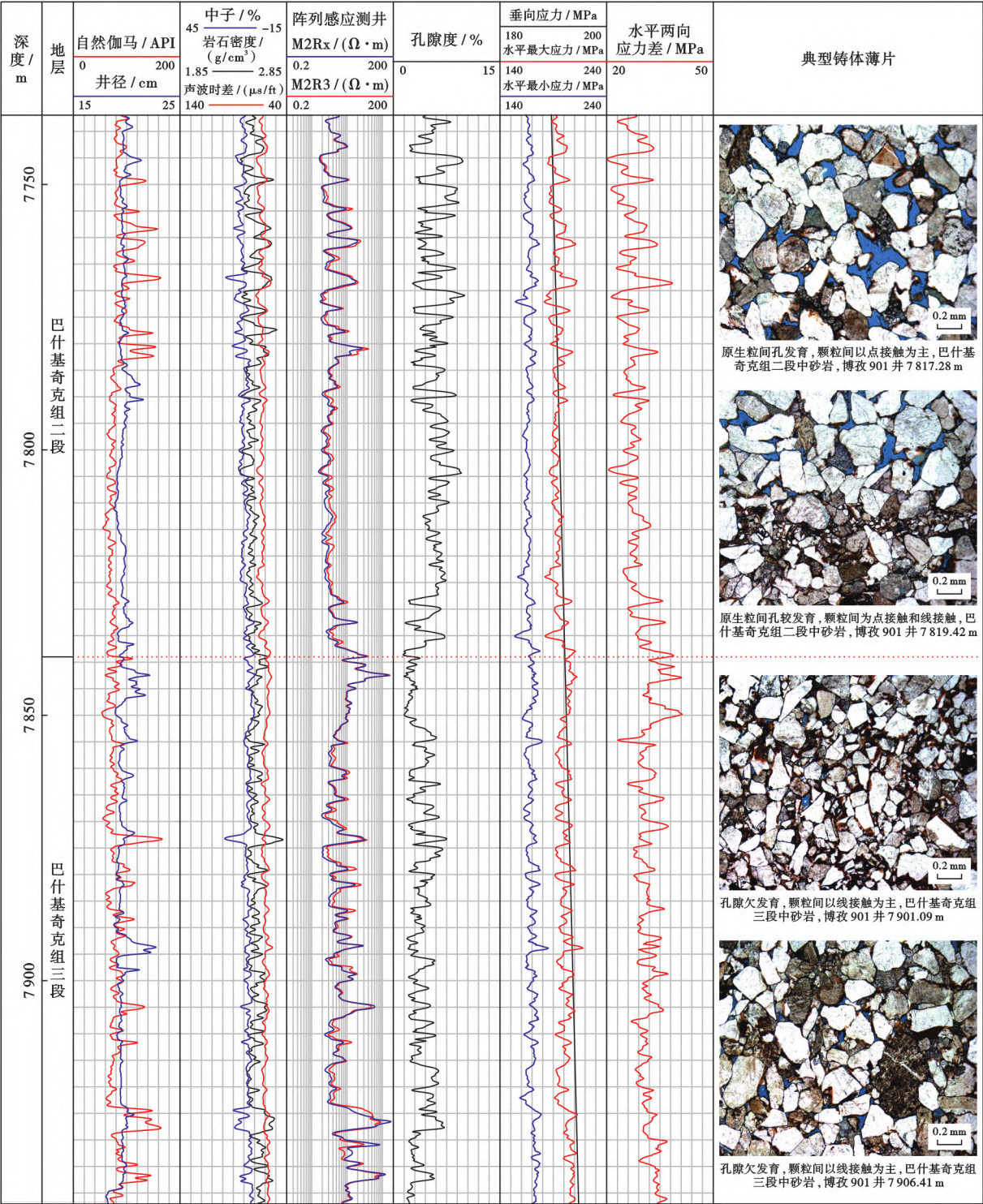


图 6 库车坳陷博孜 901 井三轴应力及其与优质储层发育相关性

Fig. 6 Three components of in-situ stress and their coupling relationship with high quality reservoirs in Well Bozi901 in Kuqa depression

酸盐胶结相 C_g 值一般为 0.5%~1.0%，中等压实弱胶结相 C_g 值 $>1.0\%$ 。 C_g 值与测井曲线相关性分析发现，博孜地区白垩系孔隙度(ϕ)与泥质含量(V_{sh})的比值(ϕ/V_{sh})与 C_g 值具较明显的正相关性，因此，可以利用测井曲线来计算 C_g 值，进而开展单井成岩相的连续、定量划分^[48]。

$$C_g = 3.09 \cdot \phi/V_{sh} \tag{1}$$

其中， ϕ 值可以利用岩石密度测井曲线建立的模型求取， V_{sh} 通过 GR 相对系数法求取。

分析发现，不同沉积微相 C_g 的分布范围往往不同，指示不同成岩改造强度。其中，水下分流河道砂体的 C_g 最大，反映其抗压实能力强，后期成岩阶段易被溶蚀改造；河道间泥岩的 C_g 最小，表明其经历了较强的压实等成岩改造(图 7)。

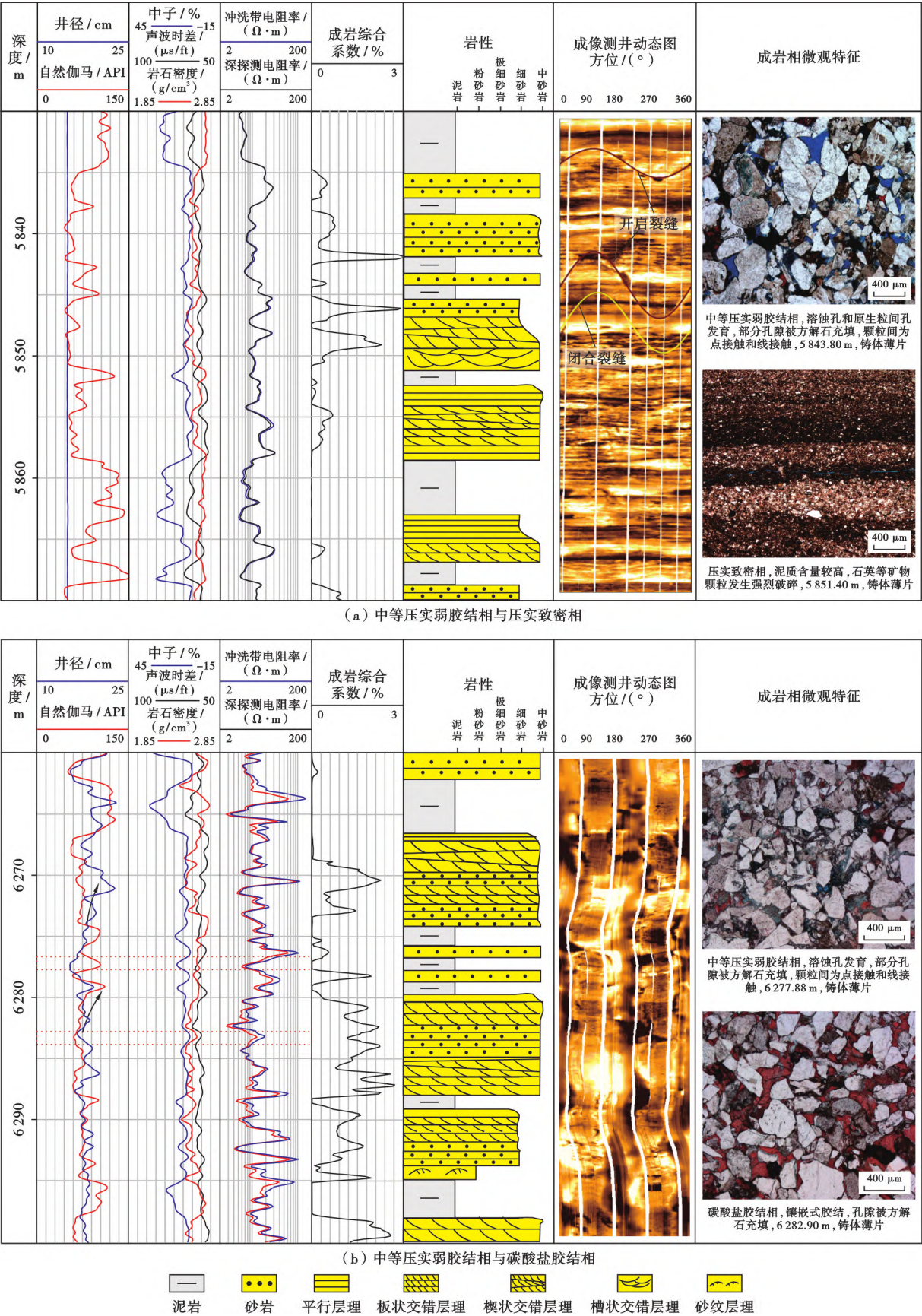


图 7 库车坳陷白垩系沉积微相和成岩相测井评价

Fig. 7 Well logging interpretation of depositional microfacies and diagenetic facies of the Cretaceous in Kuqa depression

3.2 裂缝测井识别与评价

裂缝是深层—超深层重要的储集空间类型,地球物理测井是开展裂缝识别与评价的重要手段。常规测井响应方面,裂缝发育带通常表现出高声波时差、低电阻率(深、浅电阻率存在幅度差)、岩石密度略微降低和井径扩径等特征^[33,49-50];地层倾角测井的4条微电阻率曲线及双井径曲线对裂缝具有较好的指示意义;阵列声波测井可以依据波形扰动及声波变密度图像上的“V”字形干涉条纹来识别裂缝^[33,49-50]。相较而言,电成像测井在裂缝测井识别与评价中具有明显的优势:一方面,成像测井经岩心刻度后可直观地拾取裂缝面发育形态(包括裂缝面的倾向和倾角),与岩心资料相比具有连续性好、定向性强等优势;另一方面,成像测井经与浅侧向电阻率等刻度后,在水基泥浆背景下可以求出裂缝的密度、长度、开度(1 m井段中裂缝轨迹宽度的平均值)和孔隙度(通常小于0.5%^[51])4个参数。综合利用常规测井、成像测井及其与岩心观察结果的相互刻度,可以定性识别裂缝发育带,并定量计算裂缝发育参数,从而实现深层—超深层储层裂缝的精细描述与评价^[33,49]。库车坳陷白垩系储层中裂缝广泛发育,有利于流体流动和后期溶蚀改造,在坳陷强挤压背景下部分裂缝仍有较高开度。

3.3 地应力测井评价

目前,针对现今地应力方向判断已经形成了比较完善的方法技术流程,利用成像测井资料可以拾取井壁崩落、诱导缝的方位,二者分别指示现今最小、最大水平主应力的方向^[49]。笔者综合考虑了岩石弹性模量对地应力的影响,采用中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院地球物理所建立的三轴应力测井计算模型^[36-37]:

$$S_v = \int_0^H \rho g dH \quad (2)$$

$$S_{H_{\max}} = \frac{\nu}{1-\nu} S_v + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha p_p + \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_H + \frac{E\nu}{1-\nu^2} \epsilon_h \quad (3)$$

$$S_{h_{\min}} = \frac{\nu}{1-\nu} S_v + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha p_p + \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_h + \frac{E\nu}{1-\nu^2} \epsilon_H \quad (4)$$

式中, p_p 利用伊顿法求取, E 、 ν 基于岩石密度和声波时差求取, ϵ_H 、 ϵ_h 通过室内实验和井场地应力测试分析刻度获得^[36-37]。

侧向挤压是形成低孔致密砂岩储层不可忽视的减孔因素,侧向挤压应力越强,储层的压实减孔量也越大^[52]。现今水平两向主应力差 $\Delta\sigma$ 是控制储层品质和裂缝开度的重要参数。研究发现,随着水平两向主应力差值增大,对应解释层段的实测孔隙度明显降低(图8)。

当 $\Delta\sigma \geq 35$ MPa,对应储层的孔隙度基本小于6.0%,表明强挤压应力区基本难以形成优质储层;高孔隙度($>9.0\%$)储层发育带的 $\Delta\sigma$ 通常小于35 MPa,甚至小于30 MPa(图8)。此外, $\Delta\sigma$ 对裂缝有效性也具有明显控制作用,随着 $\Delta\sigma$ 的增大,成像测井资料解释的裂缝孔隙度和裂缝开度均减小(图9)。古应力场环境中形成的天然裂缝在现今强挤压应力作用下可能发生开度减小甚至闭合的现象,因此,在开展库车坳陷深层—超深层储层测井评价时需考虑地应力对储层基质孔隙和裂缝发育的耦合影响。

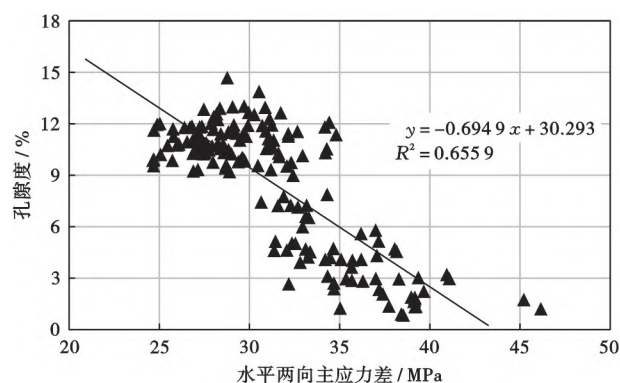


图8 库车坳陷白垩系储层孔隙度与现今水平两向地应力差值相关性

Fig.8 Relationship between the porosity and in-situ stress magnitude of the Cretaceous reservoirs in Kuqa depression

4 “三元控储”优质储层测井预测典型实例

基于“三元控储”机理分析及储层参数(储集物性及孔隙结构)定量评价的耦合,建立了库车坳陷深层—超深层储层的品质分类标准(表1)。当裂缝发育级别较高时,基质孔隙度较低的储层也可以形成优质储层;裂缝发育级别较低时,只有基质孔隙相对发育的储层才可能形成优质储层(表1)。张惠良等^[2]将6.0%定为研究区巴什基奇克组优质储层的孔隙度下限值,将3.5%定为有效储层的孔隙度下限值。

综合常规测井曲线形态和成像测井资料拾取的沉积构造等特征,开展了研究区白垩系巴什基奇克组单井沉积微相划分;基于常规测井响应组合、 C_g 定量计算及其与岩心相互刻度,分析了巴什基奇克组单井成岩相的垂向展布特征(图10)。分析发现,单井成岩相的垂向非均质性较强,同一套砂体的不同部位可能被不同溶蚀作用和胶结作用改造,而泥质沉积的抗压实能力弱,整体表现为压实致密的特征(图10)。利用测井资料解释孔隙度可以有效判别基质孔隙发育特征,高能水动力条件、弱挤压应力环境、弱胶结作用等有利

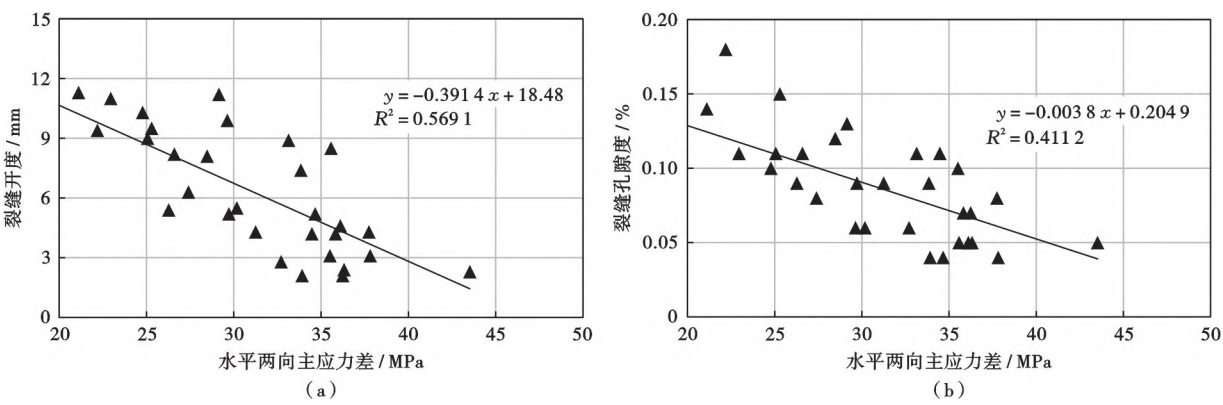


图 9 库车坳陷白垩系地应力与裂缝参数对应关系

Fig. 9 Relationship between the in-situ stress and fracture parameters of Cretaceous in Kuqa depression

表 1 基于巴什基奇克组储层控制因素分析和参数表征的储层类型划分

Table 1 Reservoir type division of Bashijiqike Formation based on the controlling factors analysis and the characterization parameters

储层类型	沉积相带	成岩相	裂缝孔隙度/%	水平两向主应力差/MPa	孔隙度/%	渗透率/mD
I 类	水下分流河道	中等压实弱胶结相	>0.10	<30	>9.0	>1.000
II 类	水下分流河道、河口坝	中等压实弱胶结相	0.05~0.10	30~40	6.0~9.0	0.500~1.000
III 类	水下分流河道、河口坝	碳酸盐胶结相、致密压实相	0.05~0.10	30~40	3.5~6.0	0.036~0.500
IV 类	水下分流河道间、滨—浅湖	压实致密相	<0.05	>40	<3.5	<0.036

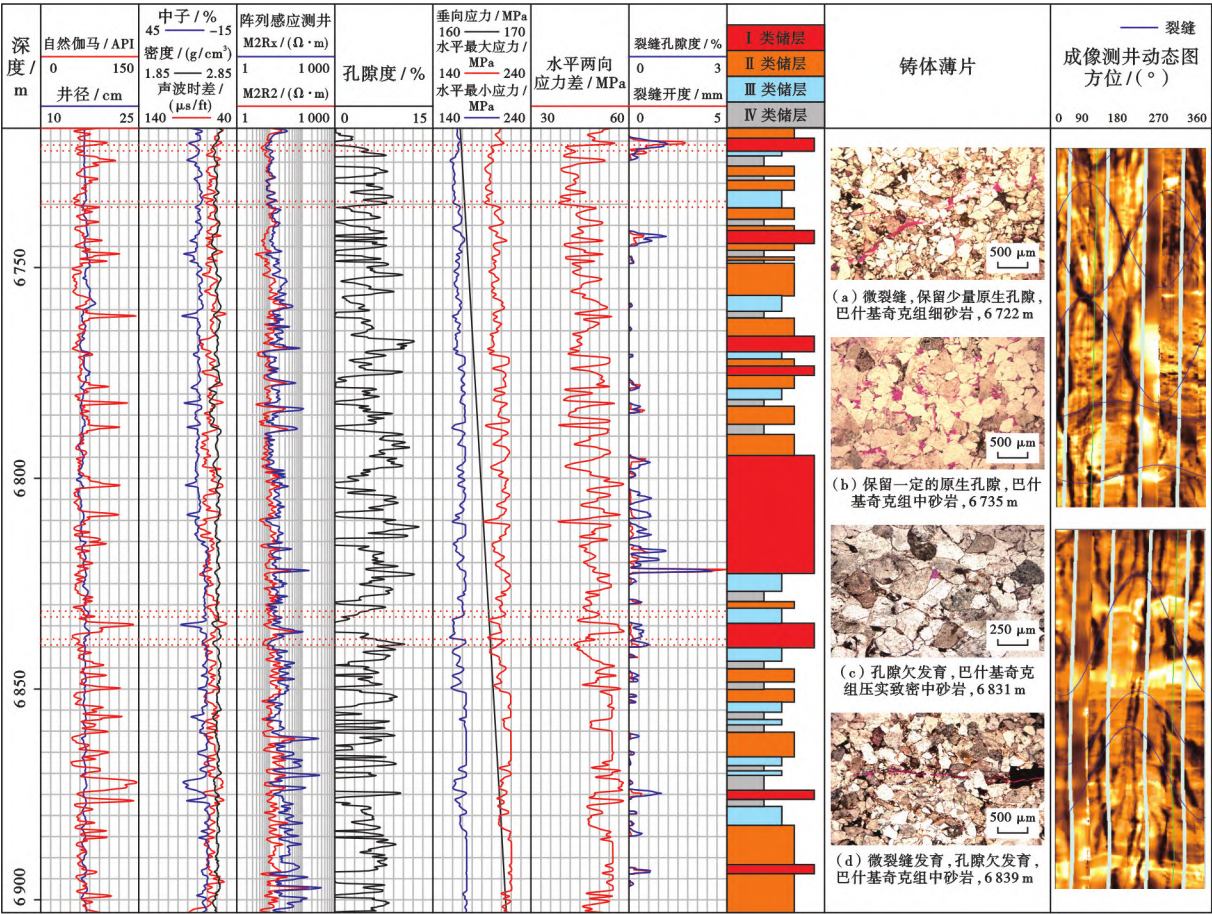


图 10 库车坳陷 KS8 井基于沉积-成岩-裂缝-地应力“三元控储”优质储层测井评价

Fig. 10 Well logging interpretation of high quality reservoir of Well KS8 based on the “three factors control reservoir quality” method using the depositional microfacies, diagenetic facies, fracture and in-situ stress

的沉积-成岩条件利于高基质孔隙度储层发育,而低能水动力条件、强挤压应力环境及强胶结作用会破坏基质孔隙、降低储层质量(图10)。

有效裂缝是改善深层—超深层致密砂岩储层产能的关键因素,有效基质孔隙发育带是深层—超深层致密砂岩气藏稳产的基础,只有当气井同时穿越孔隙发育带和裂缝发育带时,才能实现天然气高产和稳产^[53-55]。库车坳陷KS8井巴什基奇克组6717.0~6903.0m段储层类型以I类和II类为主,基质孔隙度多大于6.0%,且高角度裂缝和网状裂缝发育,采用8mm油嘴,在89.66MPa生产压差下实现天然气产量726921m³/d,累积生产天然气261.8669×10⁴m³。

基质孔隙度、裂缝开启性和裂缝孔隙度受现今地应力场的影响较明显。同等埋藏条件下,泥岩层通常被压实致密且塑性较强不易形成裂缝,因而具有最大 $\Delta\sigma$ 和最差的储集物性(图10)。水下分流河道砂岩(GR测井曲线呈箱型或钟型)和河口坝砂岩(GR测井曲线呈漏斗型)的裂缝发育段通常具有较小的 $\Delta\sigma$,这主要是由于其内部聚集的地应力可通过裂缝释放,整体处于相对低应力场环境,可形成有利的储集体。对于地应力相对集中的砂岩段,其虽具有利的沉积背景和成岩条件,但由于基质孔隙保留较少且裂缝不发育,因此难以形成I类和II类有利储集体,通常划分为III、IV类储层甚至非储层(图10)。

5 结 论

(1) 有利沉积相是深层—超深层碎屑岩优质储层形成的基础,优势成岩相是优质储层形成的关键,构造则主要通过形成裂缝和地应力场改善储层储集物性。高能水动力沉积背景、低地应力场环境、弱—中等压实作用、弱胶结作用、明显溶蚀改造和裂缝发育等要素的耦合有利于优质砂岩储层的形成。地应力场对深层—超深层砂岩储层的基质孔隙保存及裂缝有效性具有重要控制作用。

(2) 综合常规测井曲线形态和成像测井图像可以开展沉积微相测井判别,其中,水下分流河道骨架砂体和河口坝骨架砂体的GR测井曲线表现为箱型、漏斗型,成像测井上可见不同类型的交错层理。综合常规测井组合特征及成岩综合系数定量计算可以实现压实致密相、碳酸盐胶结相、中等压实弱胶结相等不同成岩相的测井识别与评价。利用成像测井资料可以拾取裂缝面的形态、计算裂缝的孔隙度和开度等参数;岩石力学模型可用于地应力的定量计算。

(3) 综合“三元控储”机理和沉积微相、成岩相、裂缝、地应力4要素耦合以及典型储层表征参数,建立了

巴什基奇克组深层—超深层砂岩储层类型的划分标准。其中,相对优质储层(孔隙度>6.0%)具有利的沉积环境、优势成岩相、相对较低的地应力,且裂缝发育;有效储层(孔隙度>3.5%)表现为裂缝发育,或裂缝不发育但具有高能水动力沉积背景且经历了中等压实和弱胶结成岩改造。“三元控储”认识对于开展深层—超深层优质砂岩储层的评价与预测具有重要意义。

符号注释: H —埋藏深度,m; ρ —岩石密度,kg/m³; g —重力加速度,9.8m/s²; $\Delta\sigma$ —水平最大主应力与水平最小主应力的差值,MPa; p_p —孔隙流体压力,MPa; E —杨氏模量,GPa; ν —泊松比; ϵ_H —水平最大主应力校正系数; ϵ_h —水平最小主应力校正系数。

参 考 文 献

- [1] 贾承造,庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报,2015,36(12):1457-1469.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1457-1469.
- [2] 张惠良,张荣虎,杨海军,等. 超深层裂缝-孔隙型致密砂岩储集层表征与评价——以库车前陆盆地克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组为例[J]. 石油勘探与开发,2014,41(2):158-167.
ZHANG Huiliang, ZHANG Ronghu, YANG Haijun, et al. Characterization and evaluation of ultra-deep fracture-pore tight sandstone reservoirs: a case study of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kelasu tectonic zone in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 158-167.
- [3] XIN Yi, WANG Guiwen, LIU Bingchang, et al. Pore structure evaluation in ultra-deep tight sandstones using NMR measurements and fractal analysis[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 211: 110180.
- [4] 孙龙德,邹才能,朱如凯,等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发,2013,40(6):641-649.
SUN Longde, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 641-649.
- [5] LAI Jin, WANG Guiwen, CHAI Yu, et al. 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, 2017, 101(6): 829-862.
- [6] 郭旭升,胡东风,黄仁春,等. 四川盆地深层—超深层天然气勘探进展与展望[J]. 天然气工业,2020,40(5):1-14.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, HUANG Renchun, et al. Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin: progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(5): 1-14.
- [7] 魏国齐,王俊鹏,曾联波,等. 克拉苏构造带盐下超深层储层的构造改造作用与油气勘探新发现[J]. 天然气工业,2020,40(1):20-30.
WEI Guoqi, WANG Junpeng, ZENG Lianbo, et al. Structural re-

- working effects and new exploration discoveries of subsalt ultra-deep reservoirs in the Kelasu tectonic zone[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(1): 20-30.
- [8] 张光亚, 马锋, 梁英波, 等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进步[J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1156-1166.
- ZHANG Guangya, MA Feng, LIANG Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1156-1166.
- [9] 金凤鸣, 张凯逊, 王权, 等. 断陷盆地深层优质碎屑岩储集层发育机理——以渤海湾盆地饶阳凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(2): 247-256.
- JIN Fengming, ZHANG Kaixun, WANG Quan, et al. Formation mechanisms of good-quality clastic reservoirs in deep formations in rifted basins: a case study of Raoyang sag in Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 247-256.
- [10] LAI Jin, LIU Shichen, XIN Yi, et al. Geological-petrophysical insights in the deep Cambrian dolostone reservoirs in Tarim Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2021, 105(11): 2263-2296.
- [11] 寿建峰, 张惠良, 沈扬, 等. 中国油气盆地砂岩储层的成岩压实机制分析[J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2165-2170.
- SHOU Jianfeng, ZHANG Huiliang, SHEN Yang, et al. Diagenetic mechanisms of sandstone reservoirs in China oil and gas-bearing basins [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2165-2170.
- [12] 王俊鹏, 张荣虎, 赵继龙, 等. 超深层致密砂岩储层裂缝定量评价及预测研究——以塔里木盆地克深气田为例[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(11): 1735-1745.
- WANG Junpeng, ZHANG Ronghu, ZHAO Jilong, et al. Characteristics and evaluation of fractures in ultra-deep tight sandstone reservoir: taking Keshen gasfield in Tarim Basin, NW China as an example [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(11): 1735-1745.
- [13] JIN Zhijun, YANG Minghui, LU Xiuxiang, et al. The tectonics and petroleum system of the Qiulitagh fold and thrust belt, northern Tarim Basin, NW China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(8): 767-777.
- [14] ZHU Guangyou, WANG Huitong, WENG Na, et al. Geochemistry, origin and accumulation of continental condensate in the ultra-deep-buried Cretaceous sandstone reservoir, Kuqa depression, Tarim Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 65: 103-113.
- [15] 贾爱林, 何东博, 位云生, 等. 未来十五年中国天然气发展趋势预测[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(1): 17-27.
- JIA Ailin, HE Dongbo, WEI Yunsheng, et al. Predictions on natural gas development trend in China for the next fifteen years [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(1): 17-27.
- [16] 徐珂, 田军, 杨海军, 等. 塔里木盆地库车坳陷超深层现今地应力对储层品质的影响及实践应用[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(1): 13-23.
- XU Ke, TIAN Jun, YANG Haijun, et al. Effects and practical applications of present-day in-situ stress on reservoir quality in ultra-deep layers of Kuqa depression, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(1): 13-23.
- [17] 杨威, 谢武仁, 俞俊杰, 等. 四川盆地上三叠统须家河组致密砂岩溶蚀实验及地质意义[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 655-663.
- YANG Wei, XIE Wuren, YU Lingjie, et al. Dissolution experiments and geological implications of tight sandstones in the Xujiahe Formation of Upper Triassic, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 655-663.
- [18] 赖锦, 王贵文, 信毅, 等. 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*, 2014, 25(7): 1019-1032.
- LAI Jin, WANG Guiwen, XIN Yi, et al. Diagenetic facies analysis of tight sandstone gas reservoir of Bashijiqike Formation in Kuqa depression [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(7): 1019-1032.
- [19] WORDEN R H, BUKAR M, SHELL P. The effect of oil emplacement on quartz cementation in a deeply buried sandstone reservoir [J]. *AAPG Bulletin*, 2018, 102(1): 49-75.
- [20] 马永生, 何治亮, 赵培荣, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. *石油学报*, 2019, 40(12): 1415-1425.
- MA Yongsheng, HE Zhiliang, ZHAO Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(12): 1415-1425.
- [21] 朱光有, 张水昌, 陈玲, 等. 天然气充注成藏与深部砂岩储集层的形成——以塔里木盆地库车坳陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(3): 347-357.
- ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, CHEN Ling, et al. Coupling relationship between natural gas charging and deep sandstone reservoir formation: a case from the Kuqa depression, Tarim Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(3): 347-357.
- [22] STRICKER S, JONES S J, SATHAR S, et al. Exceptional reservoir quality in HPHT reservoir settings: examples from the Skagerrak Formation of the Heron cluster, North Sea, UK [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 198-215.
- [23] BJØRLYKKE K. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins [J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 301: 1-14.
- [24] 赖锦, 王贵文, 陈敏, 等. 基于岩石物理相的储集层孔隙结构分类评价——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油层组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(5): 566-573.
- LAI Jin, WANG Guiwen, CHEN Min, et al. Pore structures evaluation of low permeability clastic reservoirs based on petrophysical facies: a case study on Chang 8 reservoir in the Jiyuan region, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 566-573.
- [25] 张荣虎, 姚根顺, 寿建峰, 等. 沉积、成岩、构造一体化孔隙度预测模型[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(2): 145-151.
- ZHANG Ronghu, YAO Genshun, SHOU Jianfeng, et al. An integration porosity forecast model of deposition, diagenesis and structure [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(2): 145-151.
- [26] 赖锦, 庞小娇, 赵鑫, 等. 测井地质学研究中的典型误区与科学思维[J]. *天然气工业*, 2022, 42(7): 31-44.
- LAI Jin, PANG Xiaojiao, ZHAO Xin, et al. Typical misunderstandings and scientific ideas in well logging geology research [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(7): 31-44.
- [27] 赖锦, 王贵文, 庞小娇, 等. 测井地质学前世、今生与未来——写在《测井地质学·第二版》出版之时[J]. *地质评论*, 2021, 67(6):

- 1804-1828.
- LAI Jin, WANG Guiwen, PANG Xiaojiao, et al. The past, present and future of well logging geology—to celebrate the publication of second edition of “Well Logging Geology”[J]. *Geological Review*, 2021, 67(6): 1804-1828.
- [28] 李宁, 徐彬森, 武宏亮, 等. 人工智能在测井地层评价中的应用现状及前景[J]. *石油学报*, 2021, 42(4): 508-522.
- LI Ning, XU Binsen, WU Hongliang, et al. Application status and prospects of artificial intelligence in well logging and formation evaluation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(4): 508-522.
- [29] 冯建伟, 赵力彬, 王焰东. 库车坳陷克深气田超深层致密储层产能控制因素[J]. *石油学报*, 2020, 41(4): 478-488.
- FENG Jianwei, ZHAO Libin, WANG Yandong. Controlling factors for productivity of ultra-deep tight reservoirs in Keshen gas field, Kuqa depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 478-488.
- [30] 杜金虎, 王招明, 胡素云, 等. 库车前陆冲断带深层大气区形成条件与地质特征[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(4): 385-393.
- DU Jinhu, WANG Zhaoming, HU Suyun, et al. Formation and geological characteristics of deep giant gas provinces in the Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 385-393.
- [31] 张荣虎, 王俊鹏, 马玉杰, 等. 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*, 2015, 26(4): 667-678.
- ZHANG Ronghu, WANG Junpeng, MA Yujie, et al. The sedimentary microfacies, palaeogeomorphology and their controls on gas accumulation of deep-buried cretaceous in Kuqa depression, Tarim Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(4): 667-678.
- [32] 史超群, 许安明, 魏红兴, 等. 构造挤压对碎屑岩储层破坏程度的定量表征——以库车坳陷依奇克里克构造带侏罗系阿合组为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(2): 205-215.
- SHI Chaoqun, XU Anming, WEI Hongxing, et al. Quantitative characterization on the clastic reservoir destruction by tectonic compression: a case study of the Jurassic Ahe Formation in Yiqikelike structural belt, Kuqa depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(2): 205-215.
- [33] 赖锦, 王贵文, 孙思勉, 等. 致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(4): 1712-1724.
- LAI Jin, WANG Guiwen, SUN Simian, et al. Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(4): 1712-1724.
- [34] 杨海军, 张荣虎, 杨宪彰, 等. 超深层致密砂岩构造裂缝特征及其对储层的改造作用——以塔里木盆地库车坳陷克深气田白垩系为例[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(7): 942-950.
- YANG Haijun, ZHANG Ronghu, YANG Xianzhang, et al. Characteristics and reservoir improvement effect of structural fracture in ultra-deep tight sandstone reservoir: a case study of Keshen gasfield, Kuqa depression, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(7): 942-950.
- [35] 赖锦, 凡雪纯, 黎雨航, 等. 苏北盆地古近系阜宁组页岩七性关系与三品质测井评价[J]. *地质论评*, 2022, 68(2): 751-768.
- LAI Jin, FAN Xuechun, LI Yuhang, et al. Well logging evaluation of seven kinds of relationships and three types of properties of Paleogene Funing Formation oil shales in Subei Basin[J]. *Geological Review*, 2022, 68(2): 751-768.
- [36] 徐珂, 杨海军, 张辉, 等. 克拉苏构造带博孜 1 气藏现今地应力场和高效开发[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(6): 726-734.
- XU Ke, YANG Haijun, ZHANG Hui, et al. Current in-situ stress field and efficient development of Bozi-1 gas reservoir in Kelasu structural belt[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(6): 726-734.
- [37] 张辉, 尹国庆, 王志民, 等. 库车坳陷深层裂缝性砂岩气藏可压裂性评价[J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(1): 108-115.
- ZHANG Hui, YIN Guoqing, WANG Zhimin, et al. Fracability evaluation of deep-burial fractured sandstone gas reservoir in Kuqa depression[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(1): 108-115.
- [38] 韩登林, 李忠, 寿建峰. 背斜构造不同部位储集层物性差异——以库车坳陷克拉 2 气田为例[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(3): 282-286.
- HAN Denglin, LI Zhong, SHOU Jianfeng. Reservoir property difference between structural positions in the anticline: a case study from Kela-2 gas field in the Kuqa depression, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(3): 282-286.
- [39] 赵军, 蒲万丽, 王贵文, 等. 测井信息在前陆挤压区地应力分析中的应用[J]. *地质力学学报*, 2005, 11(1): 53-59.
- ZHAO Jun, PU Wanli, WANG Guiwen, et al. Application of logging information in the analysis of the ground stress in the foreland compressive area[J]. *Journal of Geomechanics*, 2005, 11(1): 53-59.
- [40] 杨海军, 李勇, 唐雁刚, 等. 塔里木盆地克深气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2021, 42(3): 399-414.
- YANG Haijun, LI Yong, TANG Yangang, et al. Accumulation conditions, key exploration and development technologies for Keshen gas field in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(3): 399-414.
- [41] ZOBACK M D, BARTON C A, BRUDY M, et al. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(7/8): 1049-1076.
- [42] LAI Jin, LI Dong, WANG Guiwen, et al. Earth stress and reservoir quality evaluation in high and steep structure: the Lower Cretaceous in the Kuqa depression, Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 101: 43-54.
- [43] LAI Jin, LI Dong, AI Yong, et al. Structural diagenesis in ultra-deep tight sandstones in the Kuqa depression, Tarim Basin, China[J]. *Solid Earth*, 2022, 13(6): 975-1002.
- [44] 张荣虎, 杨海军, 王俊鹏, 等. 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*, 2014, 35(6): 1057-1069.
- ZHANG Ronghu, YANG Haijun, WANG Junpeng, et al. The formation mechanism and exploration significance of ultra-deep, low-porosity and tight sandstone reservoirs in Kuqa depression, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(6): 1057-1069.
- [45] 赖锦, 韩能润, 贾云武, 等. 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, 2018, 45(2): 304-318.
- LAI Jin, HAN Nengrun, JIA Yunwu, et al. Detailed description of the sedimentary reservoir of a braided delta based on well logs [J]. *Geology in China*, 2018, 45(2): 304-318.
- [46] 赖锦, 刘秉昌, 冯庆付, 等. 鄂尔多斯盆地靖边气田马家沟组五段白云岩沉积微相测井识别与评价[J]. *地质学报*, 2020, 94(5): 1551-1567.
- LAI Jin, LIU Bingchang, FENG Qingfu, et al. Well logging identification and evaluation of depositional microfacies in dolostones from the 5th Member of the Ordovician Majiagou Formation in the Jingbian gas field, Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(5): 1551-1567.
- [47] 冉治, 王贵文, 赖锦, 等. 利用测井交会图法定量表征致密油储层成岩相——以鄂尔多斯盆地华池地区长7致密油储层为例[J]. *沉积学报*, 2016, 34(4): 694-706.
- RAN Ye, WANG Guiwen, LAI Jin, et al. Quantitative characterization of diagenetic facies of tight sandstone oil reservoir by using logging crossplot: a case study on Chang 7 tight sandstone oil reservoir in Huachi area, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(4): 694-706.
- [48] 刘宏坤, 艾勇, 王贵文, 等. 深层、超深层致密砂岩储层成岩相测井定量评价: 以库车坳陷博孜一大北地区为例[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(1): 299-310.
- LIU Hongkun, AI Yong, WANG Guiwen, et al. Quantitative well logging evaluation of diagenetic facies of deep and ultra deep tight sandstone reservoirs: a case study of Bozi-Dabei area in Kuqa depression [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(1): 299-310.
- [49] LAI Jin, WANG Guiwen, WANG Song, et al. A review on the applications of image logs in structural analysis and sedimentary characterization [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 95: 139-166.
- [50] LAI Jin, WANG Guiwen, FAN Qixuan, et al. Geophysical well-log evaluation in the era of unconventional hydrocarbon resources: a review on current status and prospects [J]. *Surveys in Geophysics*, 2022, 43(3): 913-957.
- [51] ZENG Lianbo, LI Xiangyang. Fractures in sandstone reservoirs with ultra-low permeability: a case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(4): 461-477.
- [52] 王珂, 张荣虎, 曾庆鲁, 等. 库车坳陷博孜一大北地区下白垩统深层—超深层储层特征及成因机制[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(2): 311-328.
- WANG Ke, ZHANG Ronghu, ZENG Qinglu, et al. Characteristics and Formation mechanism of Lower Cretaceous deep and ultra-deep reservoir in Bozi-Dabei area, Kuqa depression [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(2): 311-328.
- [53] 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(6): 707-714.
- CAI Xiyuan. Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone: an example from gas exploration in the Xujiache Formation of the western Sichuan depression, the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(6): 707-714.
- [54] 曾联波. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征[J]. *地质科学*, 2004, 39(1): 11-17.
- ZENG Lianbo. Fissure and its seepage characteristics in low-permeable sandstone reservoir [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(1): 11-17.
- [55] ZENG Lianbo, SU Hui, TANG Xiaomei, et al. Fractured tight sandstone oil and gas reservoirs: a new play type in the Dongpu depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(3): 363-377.

(收稿日期 2022-04-25 改回日期 2023-02-10 编辑 肖 飞)