

塔里木盆地库车坳陷中秋1井区白垩系巴什基奇克组砂质辫状河有利岩相组合发育模式与意义

高志勇¹, 吴永平², 刘兆龙¹, 魏 聪², 张永忠¹, 王翠丽², 刘群明¹

(1. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油 塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 734000)

摘要:塔里木盆地库车坳陷中秋1井深层白垩系巴什基奇克组天然气虽获得高产,但由于钻井数量少、埋藏深度大、储层非均质性,致使该区有利储层评价及对不同井产能差异控制作用分析存在较大困难。通过开展岩心沉积相分析与相标志识别,基于洪泛面等时性特征,建立了巴什基奇克组等时地层格架,内部3个沉积单元由下至上发育辫状河三角洲前缘—平原—冲积平原辫状河的进积(湖平面下降)演化过程。中秋1井区产能差异层段主要处于最大洪泛面之上巴什基奇克组二段上部—巴什基奇克组一段的冲积平原砂质辫状河沉积环境,不同时期主河道发育位置不同。综合沉积微相、碎屑颗粒粗细结构、孔隙类型与特征、孔隙度与渗透率大小及裂缝发育与否等,将巴什基奇克组砂质辫状河沉积体划分为9种岩相组合类型,沉积微相差异是形成不同岩相组合的基础,其中I—V类为有利岩相组合。建立了中秋1井区巴什基奇克组砂质辫状河有利岩相组合发育模式,有利岩相组合所占比例在该区具有东高西低特征,控制了含气性的差异。预测沿东部中秋101井—中秋1井—中秋104井,向西部中秋102井—中秋2井一线的南、北区域为有效规模储层发育区,尤以北侧和东北侧更好。

关键词:砂质辫状河;产能差异;岩相组合;深层;巴什基奇克组;白垩系;中秋1井区;库车坳陷

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Development model and significance of favorable lithofacies association of sandy braided river facies of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression, Tarim Basin

GAO Zhiyong¹, WU Yongping², LIU Zhaolong¹, WEI Cong², ZHANG Yongzhong¹, WANG Cuili², LIU Qunming¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Exploration and Development Research Institute of Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 734000, China)

Abstract: The deep Cretaceous Bashijiqike Formation in well Zhongqiu 1 in the Kuqa Depression tested high flow rate of natural gas. However, due to the small number of wells, large burial depth, and strong reservoir heterogeneity, it is difficult to evaluate the favorable reservoirs in the area and analyze the control factors of differential well productivity. Based on the isochronous characteristics of flood surface, we establish an isochronous stratigraphic framework of Bashijiqike Formation through the analysis of core sedimentary facies and identification of facies markers. The evolution process of progradation (lake level descending) of braided river delta front, plain, and alluvial plain braided river is established from bottom to top in the three internal sedimentary units. In Zhongqiu 1 well block, the reservoir intervals showing productivity difference occur in the upper Ba 2 Member and Ba 1 Member which are mainly deposited in the sandy braided rivers on alluvial plain above the maximum flooding surface, and the main river channel has been in different positions in different periods during their deposition. Taking into account factors such as sedimentary microfacies, coarse and fine structure of detrital particles, pore types and characteristics, porosity and permeability data, and fracture intensity, the sandy braided river sedimentary bodies of the Bashijiqike Formation can be divided into nine types in terms of lithofacies combination, with the differences in sedimentary microfacies serving as the basis, and

收稿日期:2023-02-15;修回日期:2023-05-10。

第一作者简介:高志勇(1974—),男,高级工程师,油气储层地质学。E-mail: gzybox@163.com。

基金项目:中国石油股份公司项目(2022KT0704,041021090127,041022120151)。

types I—V being favorable lithofacies combinations. A favorable lithofacies combination development model is built for the sandy braided river facies of the Bashijiqike Formation in the Zhongqiu 1 well block. The proportion of favorable lithofacies combinations in this area featuring high in the east and low in the west, serves to determine the differences in gas bearing properties. It is predicted that the SN-trending area between the eastern line across wells Zhongqiu 101, Zhongqiu 1, and Zhongqiu 104 and the western line across wells Zhongqiu 102 and Zhongqiu 2, is favorable for the development of large-scale effective reservoir, especially on the north and northeast sides.

Key words: sandy braided river, productivity difference, lithofacies combination, deep sequence, Bashijiqike Formation, Cretaceous, Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression

引用格式:高志勇,吴永平,刘兆龙,等.塔里木盆地库车坳陷中秋1井区白垩系巴什基奇克组砂质辫状河有利岩相组合发育模式与意义[J].石油与天然气地质,2023,44(5):1141–1158. DOI:10.11743/ogg20230506.

GAO Zhiyong, WU Yongping, LIU Zhaolong, et al. Development model and significance of favorable lithofacies association of sandy braided river facies of the Cretaceous Bashijiqike Formation in Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1141–1158. DOI:10.11743/ogg20230506.

深层油气成为重要的能源勘探与开发的接替领域^[1],近年在塔里木盆地库车坳陷秋里塔格构造带天然气勘探取得重大突破。中秋1井在白垩系巴什基奇克组深度6 073~6 182 m井段的测试获得高产工业气流,发现了该构造带最大的整装凝析气藏^[2-4]。随着勘探开发的逐步深入,在后续气藏评价过程中出现了明显的产能差异。弄清该区有利储层储集性差异的成因及其对产能差异的控制作用,是需要解决的关键问题之一。再者,虽然前人对库车坳陷白垩系巴什基奇克组沉积相及大面积砂体展布开展了大量研究,认为其是在干旱气候条件下的扇三角洲-辫状河三角洲、季节性辫状河等粗粒沉积^[5-15],但前人的研究尺度较宏观,多以整个库车坳陷作为研究单元,而具体到中秋1井区的精细研究则认识较少,从而制约了该区有效储集体的评价与分布预测,以及支撑天然气增储上产的研究工作。因此,针对库车坳陷深层-超深层由于钻井数量少、埋藏深度大、储层非均质性强,造成有利储层评价及对不同井产能差异控制作用分析存在较大困难的问题,本研究形成了一套可行的储层精细评价研究的思路与方法。首先,由于等时地层格架是储层精细评价研究的基础,虽然在陆相地层中等时地层格架的建立较为困难^[16],但基于洪泛面的等时性特征,通过对研究区中秋1井区的中秋101井、中秋1井、中秋104井、中秋102井和中秋2井最大洪泛面识别与对比,建立了该区等时地层格架。其次,通过岩心精细描述及物性、裂缝特征等分析,明确有利岩相组合特征及类型,及其对不同井产能差异的控制因素。最后,建立了有利岩相组合发育模式,预测深层有效储层发育区,为该区天然气的增储上产提供依据,为深层-超深层碎屑岩天然气地质评价研究提供有益参考。

1 地质概况

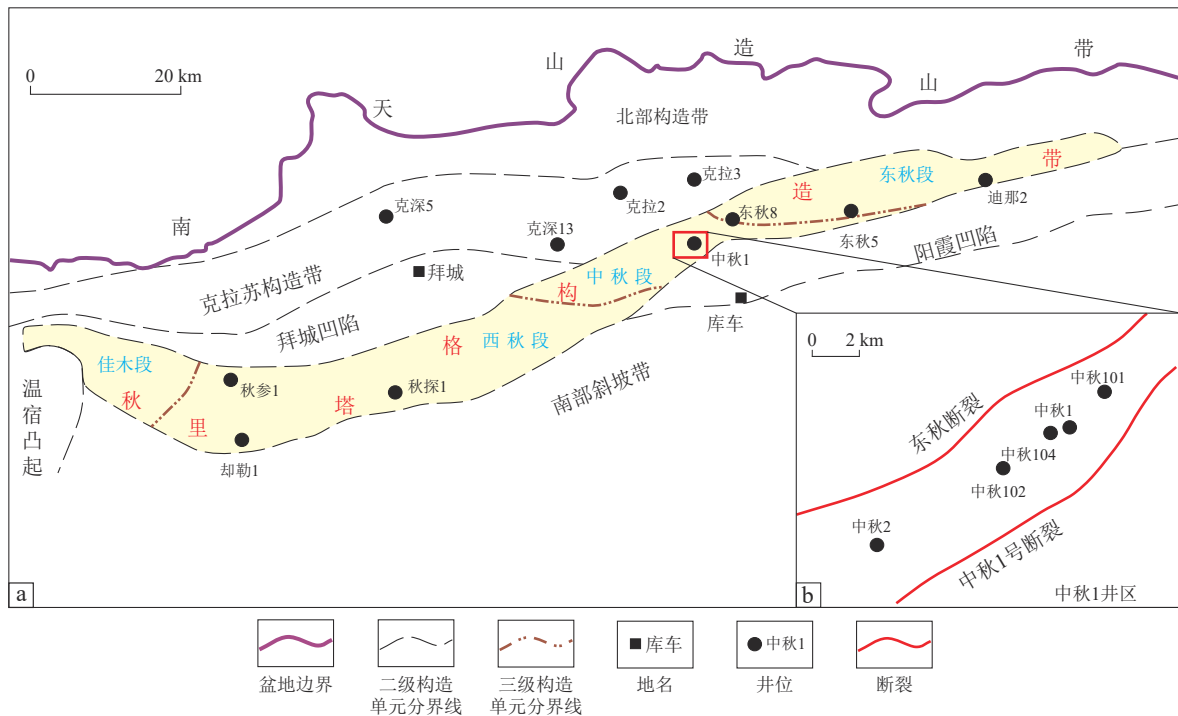
塔里木盆地库车坳陷秋里塔格构造带位于新疆阿克苏地区,区域构造位置位于库车坳陷南部,呈NEE向展布,北邻拜城凹陷、克拉苏构造带,南部与南部斜坡带和阳霞凹陷相接(图1),东西长300 km,南北宽10~30 km^[4]。根据构造变形特征,将秋里塔格构造带自东向西划分为东秋段、中秋段、西秋段和佳木段^[17]。受喜马拉雅期中、晚期南天山强烈隆升与快速挤压推覆作用,盆地内盐下白垩系形成了一系列强烈变形逆冲冲断带,发育大量盐下背斜及断鼻构造^[4],秋里塔格构造带油气主要分布在下白垩统巴什基奇克组砂岩中^[4,18-19]。根据地层岩性-电性组合特征,巴什基奇克组自下而上划分为巴什基奇克组三段(巴三段)、巴什基奇克组二段(巴二段)和巴什基奇克组一段(巴一段)^[20],秋里塔格构造带主力储层段为巴一段和巴二段,巴一段遭受不同程度剥蚀,地层厚度相差较大^[4]。

2 中秋1井区沉积相特征与砂体展布

2.1 岩心相标志与沉积相特征

通过对中秋1井区的中秋101、中秋102和中秋2等3口井60余米的白垩系巴什基奇克组岩心沉积特征分析、描述以及相标志识别,得出以下结论。

位于研究区东部的中秋101井岩心分别属于巴二段上部和巴一段,认为其整体上以砂质辫状河道沉积为主,属于暴露于湖水面之上、非湖水面之下沉积

图1 塔里木盆地库车坳陷区域构造及研究区分布平面图^[3]Fig. 1 Map showing the tectonic units and the study area in the Kuqa Depression, Tarim Basin^[3]

a. 库车坳陷构造分区与秋里塔格构造带分段; b. 中秋1井区井位分布

体。依据如下:①深度为6 330.0~6 338.0 m的巴二段上部岩心,主要发育水上沉积环境的辫状河道沉积。如位于巴二段上部深度为6 337.2 m的岩心,主要为褐色粉砂质泥岩与细砂岩互层,在褐色泥岩中见贯入构造,充填物为灰色砂岩与细砾,砾石成分较多,有远源搬运而来的火山岩小砾石,并见泥砾,判断其成因可能是辫状河道两侧漫滩上泥质干裂后,细砾与砂岩侵入所致,显示暴露于地表之上(图2a,b)。②深度为6 283.0~6 299.0 m的巴一段岩心,同样为水上环境的辫状河道沉积,如深度在6 292.3 m左右的岩心为褐色粉细砂岩,呈正韵律河道沉积特征,上部发育膏质结核(图2c)。在深度为6 288.8 m的河道砂体顶部的褐色泥岩中,同样发育膏质团块,属暴露环境(图3)。

位于研究区中部的中秋102井岩心分别属于巴二段下部和巴一段(图3),巴二段下部主要为湖水面之下沉积环境,巴一段显示湖水面之上的正韵律辫状河道-废弃河道沉积特征。依据如下:①深度为6 388.0~6 393.0 m的巴二段下部岩心主要为中细砂岩与粉砂质泥岩互层沉积,有冲刷侵蚀特征。在深度为6 389.4 m处的褐色粉砂质泥岩内见虫迹发育(图2e),在深度为6 204.2 m处的褐色细砂岩内发育沙纹层理(图2g),整体上表现为辫状河三角洲前缘水下分流河

道沉积(图3)。②深度为6 203.0~6 219.5 m的巴一段,整体以辫状河道砂体、废弃河道与漫滩沉积为主。下部主要为河道沉积的中粗砂岩冲刷切割褐色泥粉砂岩,冲刷面发育,上部则为褐色粉砂质泥岩、泥粉砂岩互层的废弃河道与漫滩沉积(图3)。

位于研究区西部的中秋2井岩心属于巴二段下部和巴二段上部,巴二段下部主要为湖水面之下沉积环境,巴二段上部则显示水下、水上间歇暴露沉积环境(图3)。依据如下:①深度为6 422.0~6 426.0 m的巴二段下部岩心整体为辫状河三角洲前缘分流河道沉积,发育褐色中细砂岩,灰色中细砂岩的河道砂体底部发育褐色泥砾,个体大小2 cm左右,呈棱角状、不规则状。②深度为6 327.0~6 343.8 m的巴二段上部整体上以辫状河道沉积为主,向上逐步有水下、水上的间歇暴露特征。如深度在6 343.3 m的褐色块状泥粉砂岩与粉砂质泥岩内有生物扰动,生物遗迹呈灰绿色,虫孔有水平状、竖直状,属废弃河道、越岸沉积环境(图2i)。深度在6 330.7 m的褐色泥岩中发育膏质结核,属暴露沉积环境(图2k)。

2.2 岩相特征

前人运用岩心和岩石薄片等资料对砂砾岩岩相开展了研究,并综合岩石类型、岩石结构及裂缝发育情况



图2 塔里木盆地库车坳陷中秋1井区各井岩心的沉积特征照片

Fig. 2 The sedimentary characteristics shown in the cores from all the wells in Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 中秋101井,埋深6 337.2 m,褐色泥岩中的贯入构造(纵剖面,黄色箭头);b. 中秋101井,埋深6 337.2 m,褐色泥岩中的贯入构造与黄色箭头所示的小砾石(横剖面);c. 中秋101井,埋深6 292.3 m,褐色泥粉砂岩中膏质结核(黄色箭头);d. 中秋101井,埋深6 285.0 m,砾岩冲刷侵蚀砂岩,冲刷面(黄色箭头);e. 中秋102井,埋深6 389.4 m,褐色粉砂质泥岩内虫迹(黄色箭头);f. 中秋102井,埋深6 209.2 m,褐色中细砂岩中张开缝(黄色箭头);g. 中秋102井,埋深6 204.2 m,褐色细砂岩内沙纹层理与裂缝内方解石充填(黄色箭头);h. 中秋2井,埋深6 424.3 m,褐色中细砂岩内的裂缝(黄色箭头);i. 中秋2井,埋深6 343.3 m,褐色泥粉砂岩中生物扰动(黄色箭头);j. 中秋2井,埋深6 335.8 m,冲刷面(黄色箭头);k. 中秋2井,埋深6 330.7 m,褐色泥岩中的膏质结核(黄色箭头)

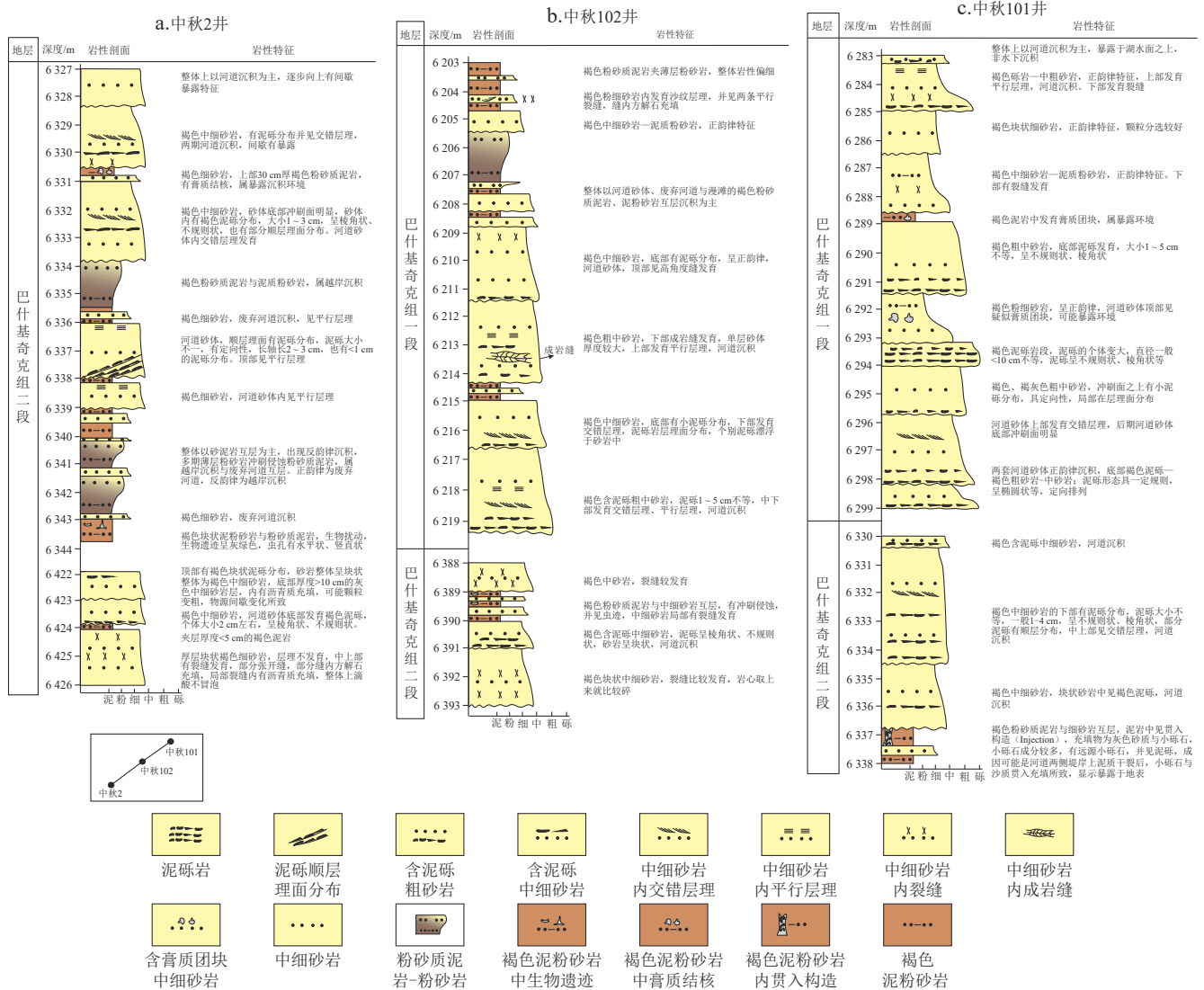


图3 塔里木盆地库车坳陷中秋101井—中秋102井—中秋2井巴什基奇克组岩心沉积特征柱状图

Fig. 3 Columnar sections showing the sedimentary characteristics of the cored interval of the Bashijiqike Formation in wells Zhongqiu 101, Zhongqiu 102 and Zhongqiu 2 in the Kuqa Depression, Tarim Basin

等对岩相进行分类^[21-22]。通过对中秋1井区各井岩心描述与分析,综合沉积微相、显微镜下碎屑颗粒粗细结构、孔隙类型与特征等,将巴什基奇克组砂泥岩沉积岩划分为如下6种岩相类型。

2.2.1 粗中粒含泥砾河道砂岩相

此类岩相在中秋101井巴一段和巴二段上部、中秋102井巴一段和巴二段下部、中秋2井的巴二段上部普遍发育(图3)。砂体类型主要为冲积平原辫状河河道砂体,少量为辫状河三角洲前缘分流河道砂体,单层砂体厚0.8~4.0 m。岩石类型为粗粒、粗中粒岩屑长石砂岩,含泥砾粗中粒岩屑长石砂岩。储层中以残余原生孔为主,发育少量的长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔。

2.2.2 中细粒含泥砾河道砂岩相

此类岩相主要在中秋101井和中秋102井的巴一段、中秋2井的巴二段上部发育(图3)。砂体类型主要为冲积平原辫状河河道砂体,单层砂体厚1.6~2.6 m。岩石类型为中粒、中细粒岩屑长石砂岩,储层中以残余原生孔为主,发育少量的长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔。

2.2.3 中细粒河道砂岩相

此类岩相主要在中秋102井和中秋2井的巴二段下部、中秋102井的巴一段发育(图3)。砂体类型为辫状河三角洲前缘河道砂体、冲积平原辫状河河道砂体,单层砂体厚1.0~2.5 m。岩石类型为中粒、细中粒岩

屑长石砂岩,储层中以残余原生孔为主,发育少量的长石及粒间溶孔。

2.2.4 细粒河道砂岩相

此类岩相在中秋101井巴一段、中秋2井巴二段上部及巴二段下部均有发育(图3)。砂体类型主要为冲积平原辫状河道砂体,少量辫状河三角洲前缘分流河道砂体,单层砂体厚0.8~2.1 m。岩石类型为细粒岩屑长石砂岩,储层中以残余原生孔为主,发育少量的长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔。

2.2.5 细粒废弃河道砂岩相

此类岩相在中秋101井巴一段和巴二段上部、中秋102井巴一段和巴二段下部、中秋2井巴二段上部均有发育(图3)。砂体类型主要为冲积平原辫状河废弃河道砂体,少量辫状河三角洲前缘分流河道砂体,单层砂体厚0.3~1.1 m。岩石类型为细粒岩屑长石砂岩,储层中以残余原生孔为主,发育少量的长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔。

2.2.6 隔夹层泥粉砂岩相

此类岩相在中秋1井区均有发育(图3),主要为冲积平原辫状河漫滩、落淤层,以及辫状河三角洲前缘分流间湾沉积等,岩层厚0.2~1.8 m。

2.3 等时地层格架

裘亦楠等^[23]指出,地层对比的标准层是一些化石

层、稳定泥质岩层和特殊岩性层,它们不仅在剖面上岩性特殊、平面上分布稳定,而且在测井曲线上易于识别,这样在对比中才能起到等时控制的标准层作用。由此,基于洪泛面的等时性特征,对中秋101井区5口井的巴什基奇克组最大洪泛面进行了识别与对比。洪泛面指基准面升至最高位、湖域面积和水位达最大值时,洪水泛滥作用形成的弱补偿或欠补偿沉积界面^[24]。最大洪泛面为长期旋回(三级层序)基准面上升达最高点位置时由洪泛作用形成的弱补偿或欠补偿沉积界面,也代表相对水位最高和沉积速率最低的一个界面,该界面同时也代表进积-退积序列折向加积-进积序列的相转换面。在陆相地层中,一般由具有不同环境意义的暗色泥岩组成,剖面上位于大套泥岩的中、上部或顶部^[24]。洪泛面在测井曲线中识别标志非常清晰,洪泛面特别是最大洪泛面大多数表现为单向移动或脉动性移动达低幅极限位置后折向幅度增高的转换面。与其对应的电性特征为低电阻、低电位和高伽马及高声波时差,在垂向序列上表现为“细脖子”段^[24]。

通过图4对各井自然伽马曲线及岩性特征综合分析,钻遇的巴什基奇克组最大洪泛面位于巴二段中部的高伽马值段(表1),最大洪泛面的岩性以厚层褐色泥岩、粉砂质泥岩为主。同时,将此最大洪泛面拉平,并由最大洪泛面开始,分别向下和向上进行小层砂岩、泥岩对比,进而形成了以位于巴二段中部的最大洪泛面、巴一段与巴二段分界线为等时地层格架的两条分界线,将巴什基奇克组划分为3个等时地层单元(图4)。

表1 塔里木盆地库车坳陷中秋1井区各井等时地层格架下不同岩性厚度及占比

Table 1 Thickness and percentage of different lithology under the isochronous stratigraphic framework of Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression, Tarim Basin

井号	地层	最大洪泛面 深度/m	等时地层 格架深度/m	泥岩-粉砂岩 厚度/m	细砂岩-砾岩 厚度/m	地层 总厚度/m	细砂岩-砾岩厚度 占地层比例/%
中秋1	巴一段		6 074.0~6 105.0	6	25.0	31.0	80.6
	巴二段	6 183	洪泛面之上 6 105.0~6 183.0	9	69.0	78.0	88.5
			洪泛面之下 6 183.0~6 316.0	37	96.0	133.0	72.2
中秋101	巴一段		6 262.5~6 306.0	7	36.5	43.5	83.9
	巴二段	6 395	洪泛面之上 6 306.0~6 395.0	11	78.0	89.0	87.6
			洪泛面之下 6 395.0~6 500.0	20	85.0	105.0	80.9
中秋102	巴一段		6 193.0~6 229.0	6	30.0	36.0	83.3
	巴二段	6 315	洪泛面之上 6 229.0~6 315.0	15	71.0	86.0	82.6
			洪泛面之下 6 315.0~6 415.0	21	79.0	100.0	79.0
中秋104	巴一段		6 008.0~6 042.0	8	26.0	34.0	76.5
	巴二段	≥6 125	洪泛面之上 6 042.0~6 125.0	19	64.0	83.0	77.1
中秋2	巴一段		6 267.0~6 312.5	6	39.5	45.5	86.8
	巴二段	6 390	洪泛面之上 6 312.5~6 390.0	12	65.5	77.5	84.5
			洪泛面之下 6 390.0~6 456.0	11	55.0	66.0	83.3

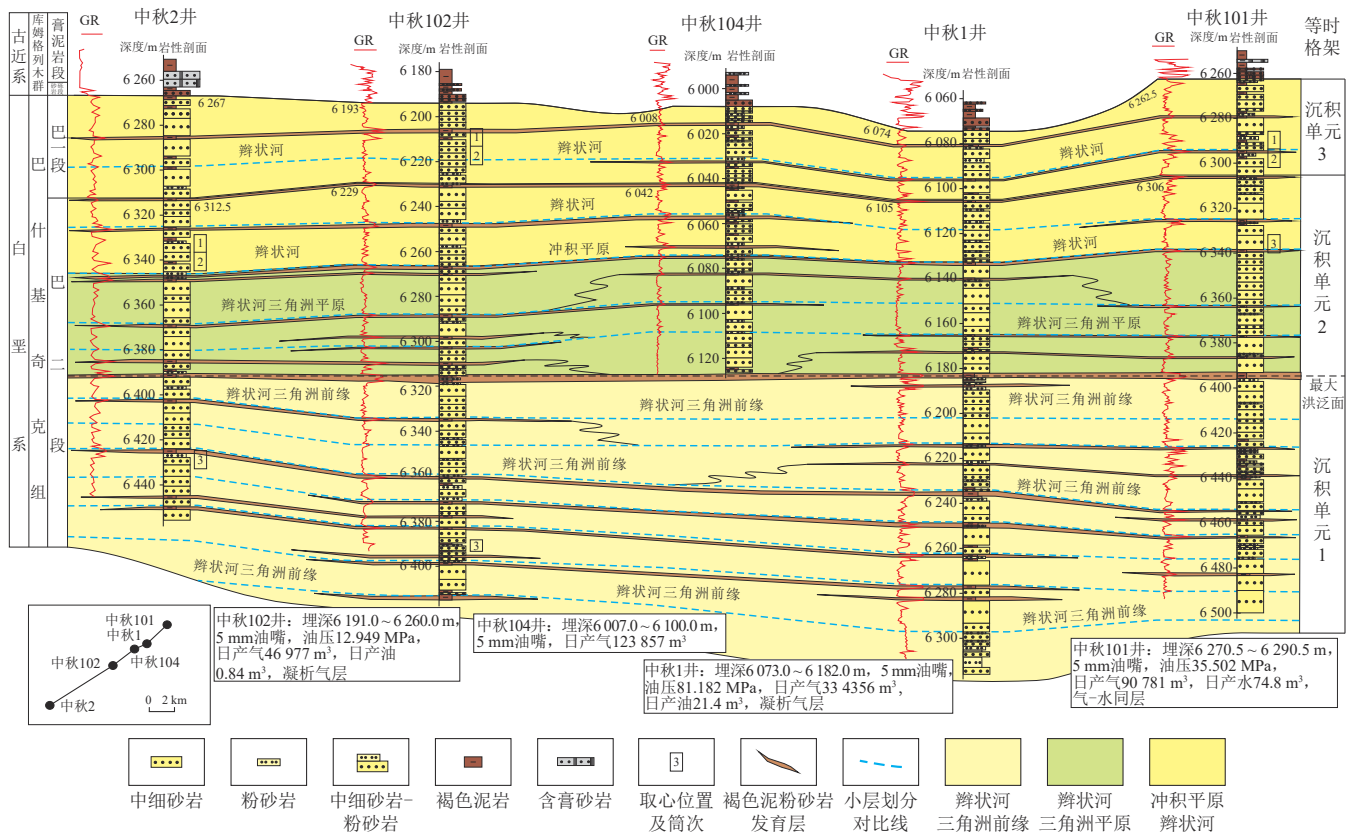


图4 塔里木盆地库车坳陷中秋1井区等时地层格架下沉积相特征对比剖面

Fig. 4 Correlation of the sedimentary facies characteristics under the isochronous stratigraphic framework in Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression, Tarim Basin

由上述的岩心沉积相分析可知,中秋1井区巴什基奇克组由巴二段下部至巴一段,整体发育辫状河三角洲前缘—平原—冲积平原辫状河的湖平面下降、进积演化过程。

2.4 沉积砂体平面展布

关于巴什基奇克组沉积相特征,前人认为属于干旱气候条件下的扇三角洲—辫状河三角洲、季节性辫状河的粗粒沉积体系,沉积物源为来自北部的古天山,在整个库车坳陷内大面积展布^[5-15]。前已述及,通过各井岩心相标志识别与沉积相分析,巴什基奇克组由巴二段下部至巴一段,整体经历了辫状河三角洲前缘—平原—冲积平原辫状河的湖平面下降演化过程。由表1、图4和图5可知,在沉积单元1(巴二段下部)发育时期,中秋1井区主要发育辫状河三角洲前缘沉积,各井区泥岩及粉砂质泥岩累积厚度较大,达11~37 m。细砂岩—砾岩厚度大,达85~96 m,细砂岩—砾岩厚度占地层厚度的72.2%~83.0%,主要发育在中秋101井—中秋1井。中秋102井—中秋2井区细砂岩—砾岩岩性厚度相对薄,为55~79 m,因此判断辫状河三角洲

前缘水下分流河道主要位于中秋1井—中秋101井及其北侧,中秋102井—中秋2井区为一般的水下分流河道发育区(图5)。

在沉积单元2(巴二段上部)发育时期,中秋1井区主要发育辫状河三角洲平原—冲积平原辫状河的过渡沉积,细砂岩—砾岩厚度具有由西向东增大特点,由中秋2井的65.5 m增大至中秋101井的78.0 m,该时期辫状河三角洲平原的主要辫状河道位于中秋1井—中秋101井及其北侧,中秋2井为一般辫状河道发育区(图5)。

在沉积单元3(巴一段)发育时期,中秋1井区发育冲积平原上的辫状河沉积,各井的细砂岩—砾岩厚度较均衡,占地层百分比皆大于80.0%,只有中秋104井细砂岩—砾岩厚度减薄,只有76.5%,分析其可能是辫状河道侧翼沉积,其他井为辫状河道沉积,中秋1井—中秋101井—中秋2井及其北侧辫状河道发育程度相近。整体上,在3个沉积单元的等时格架下,由下至上经历了辫状河三角洲前缘—平原—冲积平原辫状河的进积(湖平面下降)演化过程,平面上不同时期主河道位置不同(图5)。

表 2 塔里木盆地库车坳陷中秋 1 井区巴什基奇克组 9 种岩相组合特征数据

Table 2 Characteristic statistics of the 9 types of lithofacies combinations in Zhongqiu 1 well block in the Kuqa Depression, Tarim Basin

岩相组合分类	岩相组合名称	发育井与层位	沉积微相	厚度/m	裂缝特征	岩性	孔隙类型	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)
I 类	高孔渗裂缝发育粗中粒含泥砾河道砂岩相	中秋 101 井巴一段	冲积平原辫状河河道	单层砂体厚 1.6	裂缝发育	粗中粒岩屑长石砂岩、含泥砾粗中粒岩屑长石砂岩	残余原生孔为主,少量溶孔	普遍大于 10,最高可达 16	1.0~20.0,最高可达 182
II 类	高孔渗裂缝发育中细粒河道砂岩相	中秋 102 井和中秋 2 井巴二段下部,中秋 102 井巴一段	辫状河三角洲前缘水下分流河道、冲积平原辫状河河道	单层砂体厚 1.0~2.5	裂缝发育	中粒、细中粒岩屑长石砂岩	残余原生孔为主,少量长石及粒间溶孔	普遍大于 10,最高可达 14	0.2~9.0
III 类	高孔含裂缝中细粒含泥砾河道砂岩相	中秋 101 井和中秋 102 井巴一段,中秋 2 井巴二段上部	冲积平原辫状河河道	单层砂体厚 1.6~2.6	裂缝较发育	中粒、中细粒岩屑长石砂岩	残余原生孔为主,少量长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔	普遍大于 10,最高可达 15	0.3~3.0
IV 类	高孔含裂缝细粒河道砂岩相	中秋 101 井巴一段	冲积平原辫状河河道	单层砂体厚 2.1	裂缝较发育	细粒、中细粒岩屑长石砂岩	残余原生孔为主,少量长石内溶孔及粒间溶孔	普遍大于 8,最高可达 14	0.1~2.0
V 类	高孔渗无裂缝粗中粒含泥砾河道砂岩相	中秋 101 井巴一段、巴二段上部,中秋 102 井巴一段、巴二段下部,中秋 2 井的巴二段上部	冲积平原辫状河河道,少量辫状河三角洲前缘水下分流河道	单层砂体厚 0.8~4.0	裂缝不发育	粗粒、粗中粒岩屑长石砂岩	残余原生孔为主,少量长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔	10~16	0.3~20.0
VI 类	高孔低渗粗中粒含泥砾河道砂岩相	中秋 101 井和中秋 102 井巴一段	冲积平原辫状河河道	单层砂体厚 0.8~2.9	裂缝不发育	粗粒、粗中粒岩屑长石砂岩	残余原生孔为主,少量长石内溶孔及粒间溶孔	5~13	0.2~2.5
VII 类	高孔低渗细粒河道砂岩相	中秋 101 井巴一段,中秋 2 井巴二段上部、巴二段下部	冲积平原辫状河河道,少量辫状河三角洲前缘水下分流河道	单层砂体厚 0.8~1.8	裂缝不发育	细粒岩屑长石砂岩	残余原生孔为主,少量长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔	5~13,个别达 15	0.2~2.5
VIII 类	低孔渗细粒废弃河道砂岩相	中秋 101 井巴一段、巴二段上部,中秋 102 井巴一段、巴二段下部,中秋 2 井巴二段上部	冲积平原辫状河废弃河道,少量辫状河三角洲前缘水下分流河道	单层砂体厚 0.3~1.1	裂缝不发育	细粒岩屑长石砂岩	残余原生孔为主,少量长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔	3~11	0.1~2.0
IX 类	隔夹层泥粉砂岩相	中秋 1 井区均有发育	冲积平原辫状河漫滩、落淤层,辫状河三角洲前缘分流间湾	岩层厚 0.2~1.8	裂缝不发育	泥质粉砂岩、粉砂质泥岩	残余原生孔、次生溶蚀孔	2~6,一般<5	0.1~2.0,一般<1.0

储层中以残余原生孔为主,发育少量的长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔(图 9),孔隙度普遍大于 10%,最高可达 15%,渗透率主要在 0.3×10⁻³~3.0×10⁻³ μm²。

3.1.4 IV 类岩相组合

高孔含裂缝细粒河道砂岩相。此类岩相组合主要

发育在中秋 101 井巴一段(图 6),砂体类型为冲积平原辫状河河道砂体,单层砂体厚 2.1 m 左右,裂缝较发育。岩石类型为细粒、中细粒岩屑长石砂岩,储层中以残余原生孔为主,发育少量的长石内溶孔及粒间溶孔(图 9),孔隙度普遍大于 8%,最高可达 14%,渗透率主要在 0.1×10⁻³~2.0×10⁻³ μm²。

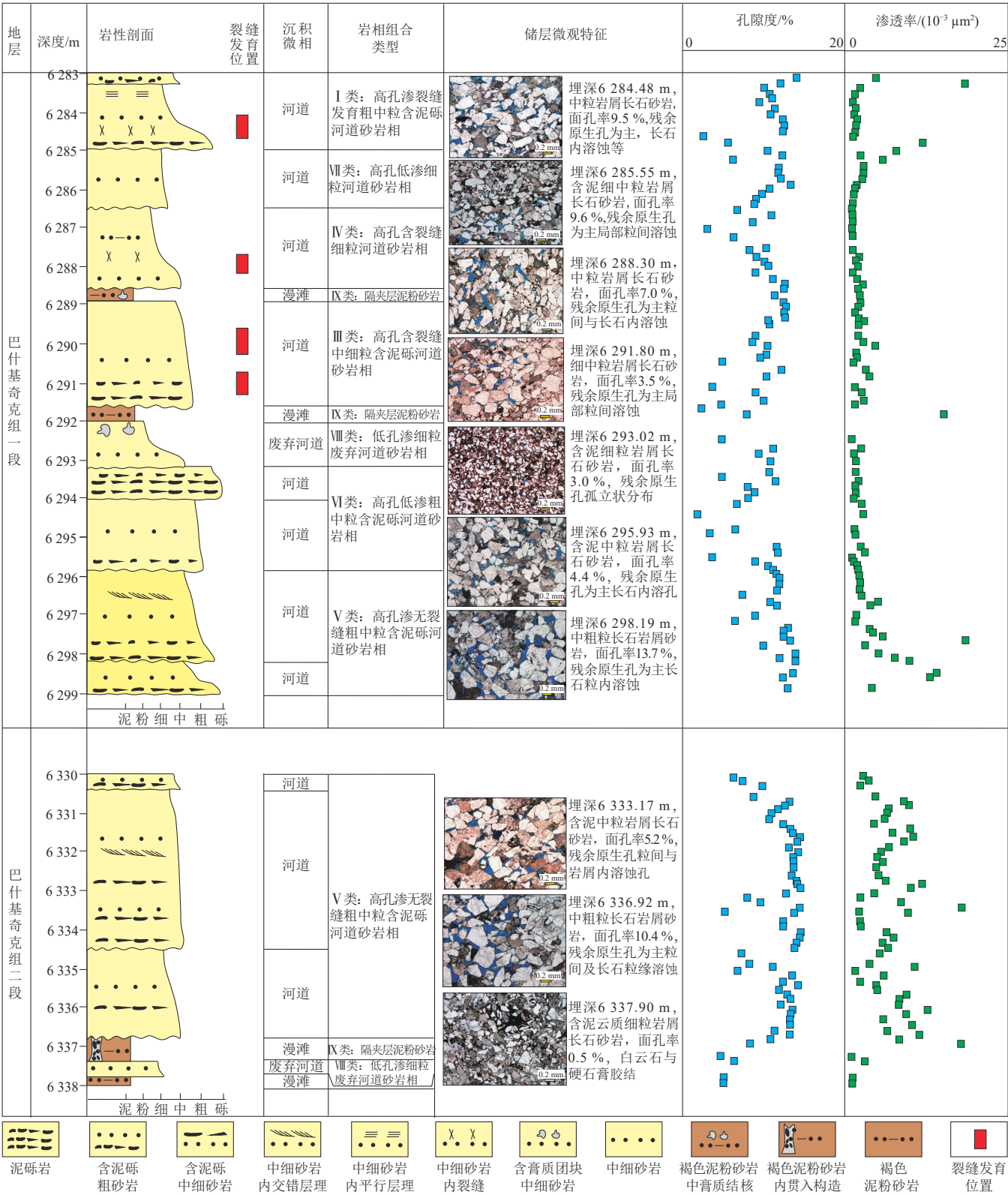


图6 塔里木盆地库车坳陷中秋1井区中秋101井岩心的岩相组合特征

Fig. 6 Lithofacies combination characteristics of the cored interval in well Zhongqiu 101 in Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression, Tarim Basin

3.1.5 V类岩相组合

高孔渗无裂缝粗中粒含泥砾河道砂岩相。此类

岩相组合在中秋101井巴一段和巴二段上部、中秋102井巴一段和巴二段下部、中秋2井的巴二段上部普遍发育(图6—图8)。砂体类型主要为冲积平原辫

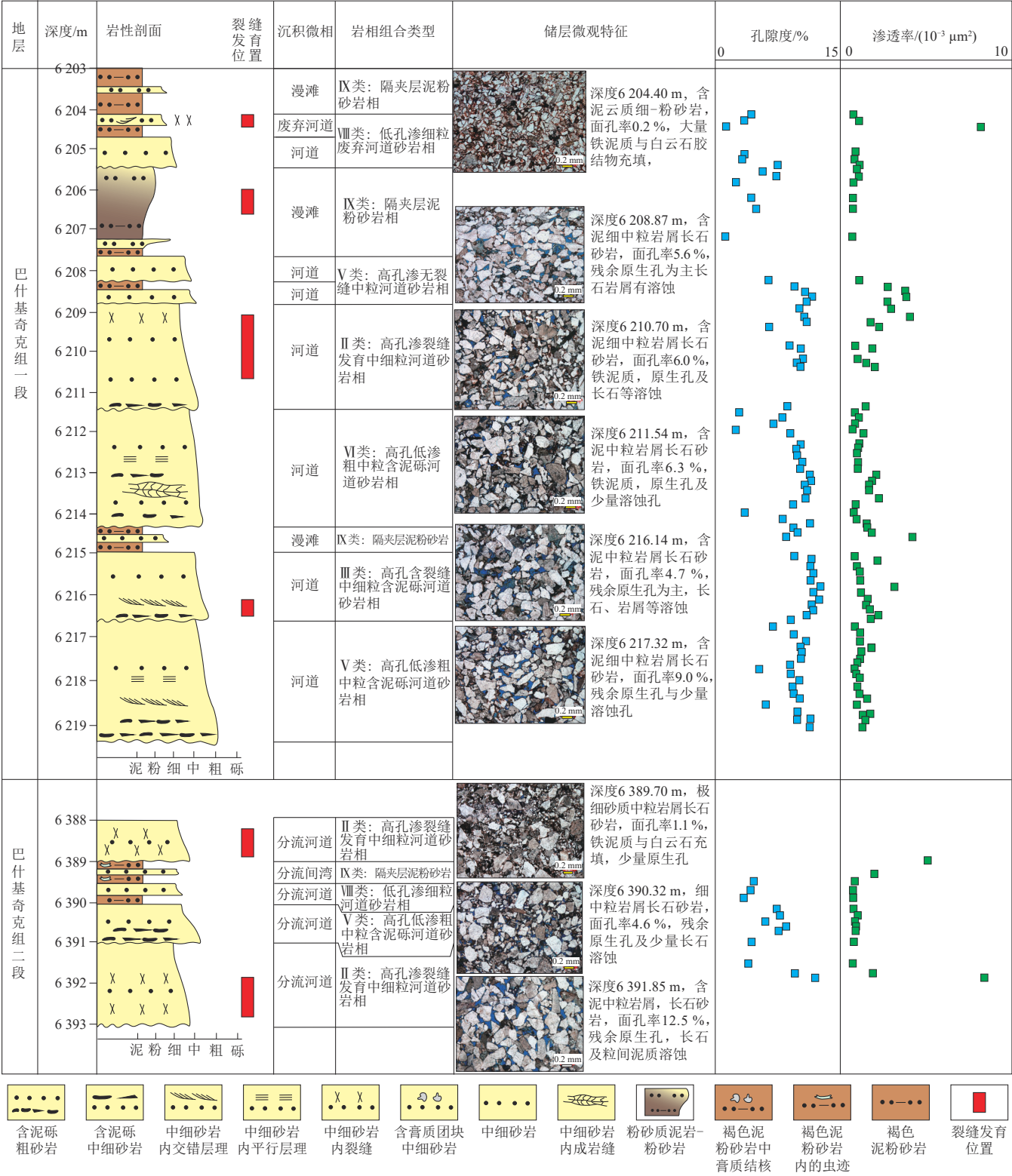


图7 塔里木盆地库车坳陷中秋1井区中秋102井岩心的岩相组合特征

Fig. 7 Lithofacies combination characteristics of the cored interval in well Zhongqiu 102 in Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression, Tarim Basin

状河河道砂体,少量为辫状河三角洲前缘分流河道砂体,单层砂体厚0.8~4.0 m,裂缝不发育。岩石类型为粗粒、粗中粒岩屑长石砂岩,储层中以残余原生孔为主,发育少量的长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔(图9),孔隙度主要为10%~16%,渗透率主要在0.3×10⁻³~20.0×10⁻³ μm²,整体上物性好。

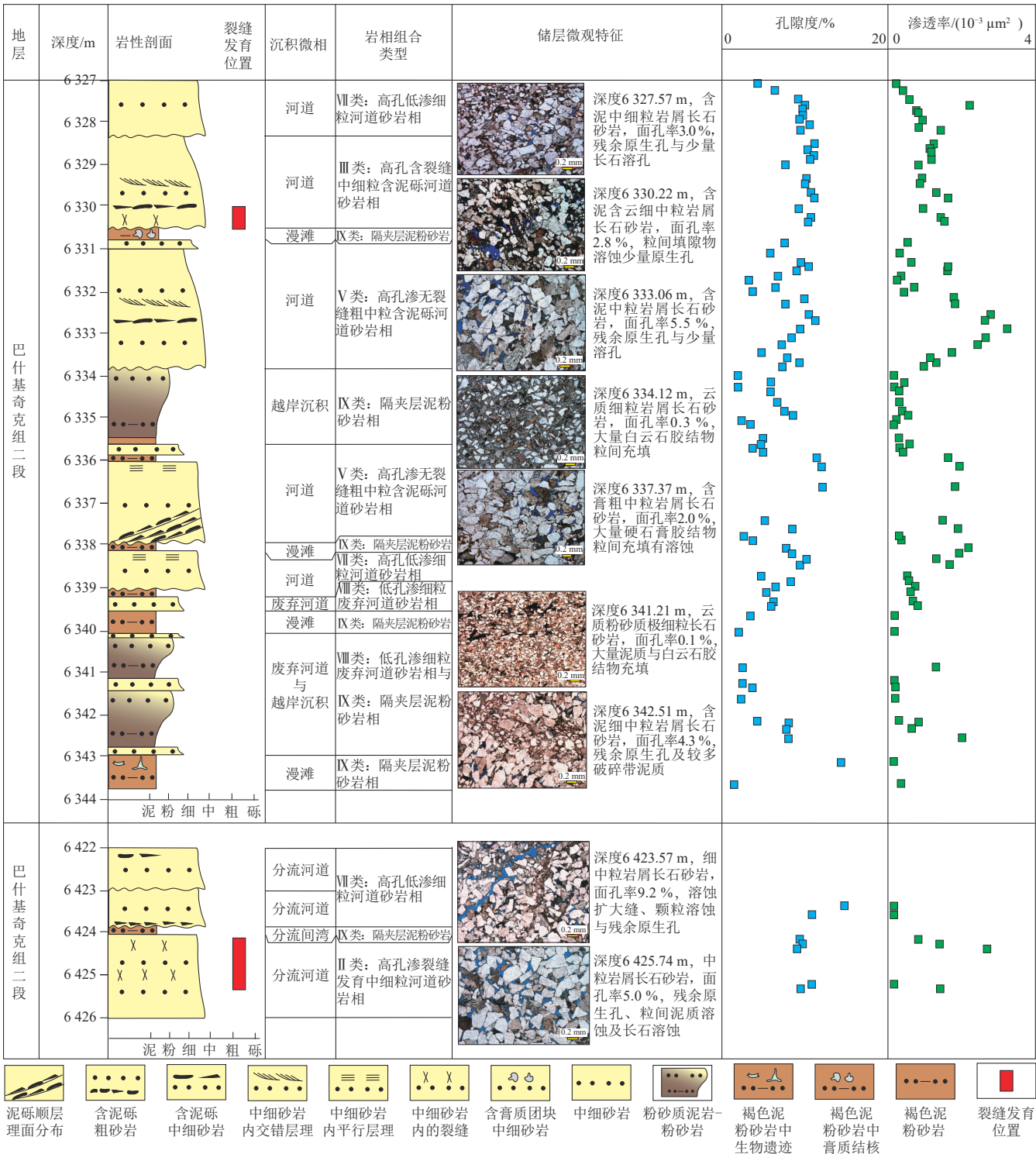


图8 塔里木盆地库车坳陷中秋1井区中秋2井岩心的岩相组合特征

Fig. 8 Lithofacies combination characteristics of the cored interval in well Zhongqiu 2 in Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression, Tarim Basin

3.1.6 VI类岩相组合

高孔低渗粗中粒含泥砾河道砂岩相。此类岩相组合在中秋101井巴一段和中秋102井巴一段发育(图6,图7)。砂体类型主要为冲积平原辫状河河道砂

体,单层砂体厚0.8~2.9 m,裂缝不发育。岩石类型为粗粒、粗中粒岩屑长石砂岩,储层中以残余原生孔为主,发育少量的长石内溶孔及粒间溶孔(图9),孔隙度主要为5%~13%,渗透率主要在 $0.2 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

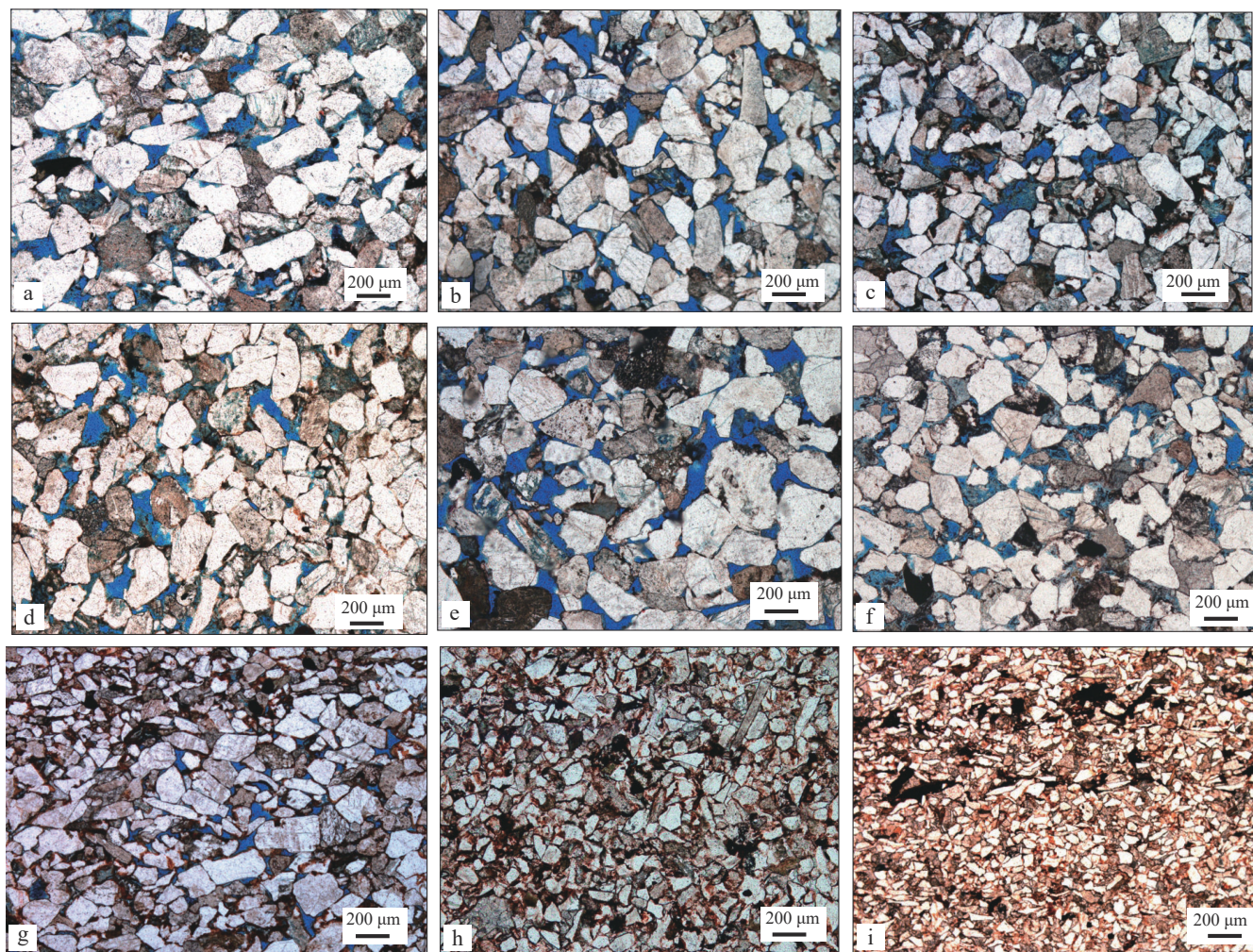


图9 塔里木盆地库车坳陷中秋1井区白垩系巴什基奇克组9种岩相组合储层岩石铸体薄片照片

Fig. 9 Microscopic reservoir characteristics of the 9 types of lithofacies combinations of the Cretaceous Bashiji qike Formation in Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression, Tarim Basin

a. I类岩相组合, 中秋101井, 埋深6 284.48 m, 中粒岩屑长石砂岩, 面孔率9.5%, 残余原生孔为主, 长石内溶蚀等; b. II类岩相组合, 中秋102井, 埋深6 391.85 m, 含泥中粒岩屑长石砂岩, 面孔率12.5%, 残余原生孔, 长石及粒间泥质溶蚀; c. III类岩相组合, 中秋102井, 埋深6 216.14 m, 含泥中粒岩屑长石砂岩, 面孔率4.7%, 残余原生孔为主, 长石、岩屑等溶蚀; d. IV类岩相组合, 中秋101井, 埋深6 288.30 m, 中粒岩屑长石砂岩, 面孔率7.0%, 残余原生孔为主, 粒间与长石内溶蚀; e. V类岩相组合, 中秋101井, 埋深6 298.19 m, 中粗粒长石岩屑砂岩, 面孔率13.7%, 残余原生孔为主, 长石粒内溶蚀; f. VI类岩相组合, 中秋101井, 埋深6 295.93 m, 含泥中粒岩屑长石砂岩, 面孔率4.4%, 残余原生孔为主, 长石内溶孔; g. VII类岩相组合, 中秋2井, 埋深6 327.57 m, 含泥中细粒岩屑长石砂岩, 面孔率3.0%, 残余原生孔与少量长石溶孔; h. VIII类岩相组合, 中秋102井, 埋深6 204.40 m, 含泥云质细-粉砂岩, 面孔率0.2%, 大量铁泥质与白云石胶结物充填; i. IX类岩相组合, 中秋2井, 埋深6 341.21 m, 云质粉砂质极细粒长石砂岩, 面孔率0.1%, 大量泥质与白云石胶结物充填

3.1.7 VII类岩相组合

高孔低渗细粒河道砂岩相。此类岩相组合在中秋101井巴一段、中秋2井巴二段上部 and 下部均有发育(图6,图8)。砂体类型主要为冲积平原辫状河河道砂体, 少量辫状河三角洲前缘分流河道砂体, 单层砂体厚0.8~1.8 m, 裂缝不发育。岩石类型为细粒岩屑长石砂岩, 储层中以残余原生孔为主, 发育少量的长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔(图9), 孔隙度主要为5%~13%, 个别达15%, 渗透率主要在 $0.2 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.1.8 VIII类岩相组合

低孔渗细粒废弃河道砂岩相。此类岩相组合在中秋101井巴一段和巴二段上部、中秋102井巴一段和巴二段下部、中秋2井巴二段上部均有发育(图6—图8)。砂体类型主要为冲积平原辫状河废弃河道砂体, 少量辫状河三角洲前缘分流河道砂体, 单层砂体厚0.3~1.1 m, 裂缝不发育。岩石类型为细粒岩屑长石砂岩, 储层中以残余原生孔为主, 发育少量的长石、岩屑内溶孔及粒间溶孔(图9), 孔隙度主要为3%~11%, 渗透

率主要在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.1.9 IX类岩相组合

隔夹层泥粉砂岩相。此类岩相组合在中秋1井区均有发育(图6—图8),主要为冲积平原辫状河漫滩、落淤层,以及辫状河三角洲前缘分流间湾沉积等。岩层厚 $0.2 \sim 1.8 \text{ m}$,裂缝不发育。孔隙度主要为 $2\% \sim 6\%$,一般小于 5% ,渗透率主要在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,一般小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.2 有利岩相组合厚度占所在层岩心厚度比例及分布

由上述9种岩相组合特征分析可知,I—V类为有利岩相组合,其主要特征为单层砂体厚度 $1.6 \sim 4.0 \text{ m}$ 的粗中粒(含泥砾)河道砂岩,或者有裂缝改造过的此类砂岩。分析中秋101等3口井的I—V类岩相组合厚度占所在层位整体岩心总厚度比例可知,中秋101井巴一段有利岩相组合厚度的占比为 60.00% ,巴二段上部为 85.00% ;中秋102井巴一段有利岩相组合厚度的占比为 47.85% ,巴二段下部为 80.00% ;中秋2井巴二段上部有利岩相组合厚度的占比为 42.26% ,巴二段下部为 50.00% 。由此表明,就有利岩相组合厚度占比而言:①中秋1井区巴什基奇克组由下至上巴二段下部辫状河三角洲前缘沉积相带内,东部的中秋102井高于西部的中秋2井;②巴二段上部辫状河三角洲平原—冲积平原辫状河过渡相带内,东部的中秋101井远高于西部的中秋2井;③巴一段冲积平原辫状河相带内,东部的中秋101井高于中秋102井,更高于西部的中秋2井。可见中秋1井区巴什基奇克组有效储层规模及储集性自东部的中秋101井和中秋1井,向西部的中秋104井、中秋102井及中秋2井逐渐减少和变差。

4 有利岩相组合发育模式及对产能差异的控制

4.1 砂质辫状河有利岩相组合发育模式

中秋1井区巴二段上部—巴一段主要为冲积平原辫状河沉积,属砂质辫状河。辫状河通常河谷较平直,弯曲度低,坡降较大,洪泛间歇性大,流量变化很大,碎屑物粗,在整个河谷内形成很多心滩,河道围绕心滩分叉又合并^[26]。平面上,辫状河沉积砂体展布范围广,形成大面积分布的复合储集体。垂向上常常呈无规则

粒度变化,粒度的变化反映了各次洪泛事件能量波动的大小及所携带沉积物的粗细。河道与河道沙坝的频繁迁移是辫状河最主要的特点^[27]。

前人关于辫状河砂体构型特征开展了较多研究^[28-32],通过现代与古代野外露头解剖,建立了辫状河砂体构型模式。砂质辫状河中发育5种典型的构型单元,即河道、心滩、边滩、废弃河道和漫溢沉积^[28]。河道构型单元剖面呈顶平底凹透镜状,宽/厚比为 $25 \sim 30$;心滩构型单元呈底平顶凸透镜状,宽/厚比为 $30 \sim 35$ 。心滩构型单元的宽度、宽/厚比明显大于河道构型单元^[28]。砂质辫状河内部夹层按成因分为心滩坝内落淤层、坝间夹层、道坝转换夹层和串沟等多种类型^[29,33]。

由图4中各井产能测试分析数据可知,钻井射孔主要位于最大洪泛面之上的巴二段上部—巴一段的冲积平原辫状河亚相带中。分析上述9种岩相组合特征,位于中秋1井区东部的中秋101井巴一段岩心主要为粗中粒的辫状河河道砂体沉积,发育I—VII—IV—IX—III—IX—VIII—VI—V类岩相组合,有利岩相组合厚度的占比为 60.00% ;巴二段岩心同样发育辫状河河道砂体沉积,岩相组合类型为V—IX—VIII类,有利岩相组合厚度占比为 85.00% ;中秋102井的巴一段岩心主要为粗、中粒的辫状河河道砂体沉积,其上部发育废弃河道与漫滩(落淤层)等粒级偏细沉积物。岩相组合类型为IX—VIII—IX—V—II—VI—IX—III—V类,有利岩相组合厚度占比为 47.85% ;中秋2井巴二段上部岩心主要为中、细粒的辫状河河道砂体沉积,其下部发育废弃河道与漫滩(落淤层)等粒级偏细沉积物。岩相组合类型为VII—III—IX—V—IX—V—IX—VII—VIII—IX—VIII—IX类,有利岩相组合厚度占比为 42.26% 。

再者,依据兰朝利^[34]等通过运用岩心交错层组的平均厚度预测辫状河河道带宽度的方法,对中秋1井区砂质辫状河带宽度等进行了预测(表3)。

由此,建立了中秋1井区巴什基奇克组砂质辫状河有利岩相组合发育模式(图10),中秋1井区砂质辫状河构型单元包括:①河道。I—VII类岩相组合均属河道沉积,河道砂体在剖面上通常呈透镜状(顶平底凹)或因压实作用而呈近似板状^[28]。②心滩。在剖面上多呈底平顶凸透镜状,构型单元内部泥质夹层少,在心滩顶部通常因后期短暂强水流冲越而存在小型冲沟现象。但此构型单元在岩心分析中较难识别。③边滩。在剖面上多呈楔形,构型单元内部常发育泥质夹层,此构型单元在岩心分析中较难识别。④废弃河道。VIII类岩相组合属废弃河道沉积,具有顶平底凹透镜状

表3 塔里木盆地库车坳陷中秋1井区依据岩心交错层组平均厚度预测辫状河道带宽度数据

Table 3 Data of braided channel belt width predicted based on average thickness of the cross bed set in the cores from Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression, Tarim Basin

井号	地层	岩心中交错层组平均厚度(S_m)/m	河道内平均沙丘高度(h_m)/m	平均满岸水流深度(d_m)/m	辫状河河道宽度(W_c)/m
中秋101	巴一段	0.85	0.824 6	4.95	1 065.90
	巴二段上部	0.75	0.699 0	4.01	729.60
中秋102	巴一段	0.80	0.761 2	4.57	923.16
	巴二段下部	0.70	0.638 1	3.83	671.71
中秋2	巴二段上部	0.70	0.638 1	3.83	671.71
	巴二段下部	0.60	0.520 7	3.12	464.41

注: $h_m=2.22(S_m/1.8)^{1.32}$; $d_m=6h_m$; $W_c=59.9d_m^{1.8}$ 。

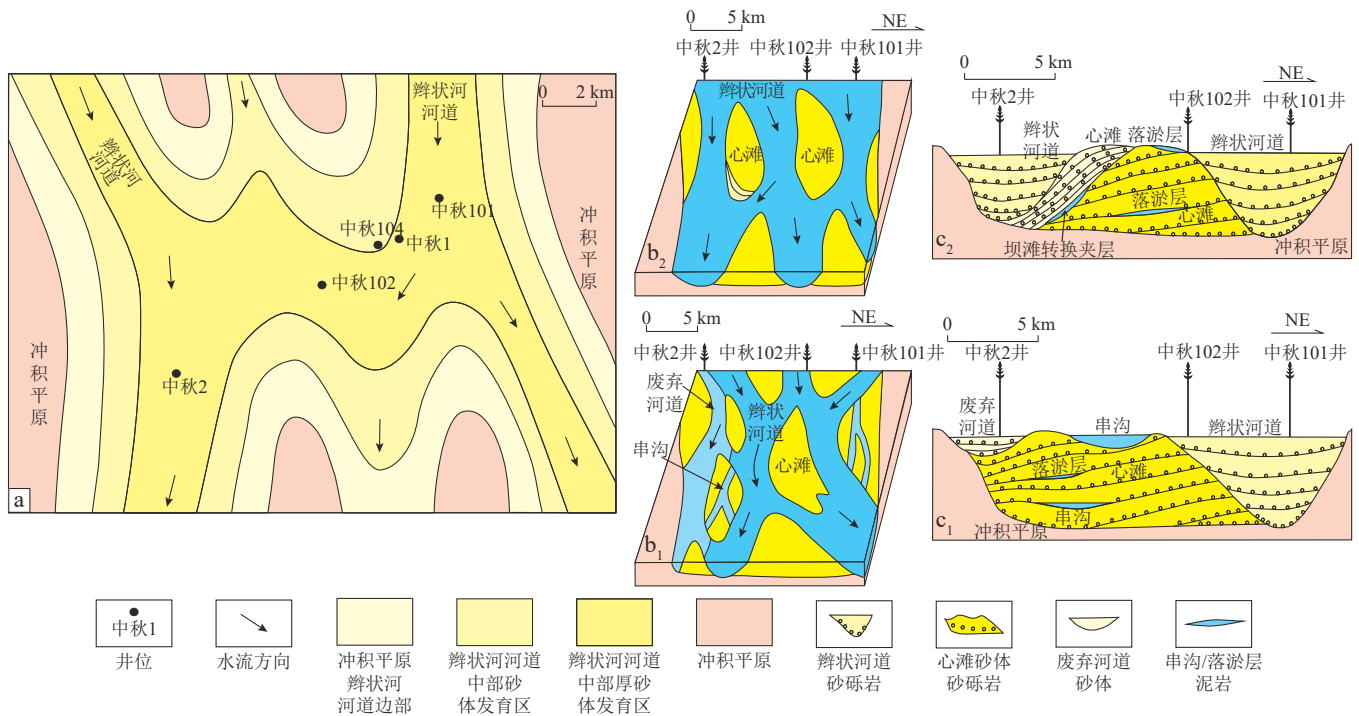


图10 塔里木盆地库车坳陷中秋1井区巴二段上部—巴一段砂质辫状河有利岩相组合发育模式^[32]

Fig. 10 Favorable lithofacies combination development pattern of the sandy braided river facies in the upper Ba 2 Member and Ba 1 Member in Zhongqiu 1 well block, Kuqa Depression, Tarim Basin^[32]

a. 巴一段沉积微相特征平面图; b_1, c_1 分别为中秋2井废弃河道及其东部辫状河道沉积模式的平面和剖面图; b_2, c_2 分别为中秋2井及其以东地区普遍发育的辫状河道沉积模式的平面和剖面图

的剖面形态,其上部发育细粒沉积物。废弃河道沉积成因有两种^[35],一是在河道中受地形影响,水流发生改道,局部形成静水环境,河道中-细粒悬浮物质自然沉积下来,主要为粉砂岩及黏土岩,粉砂岩中具交错层理,黏土岩中发育水平层理;二是洪水作用后期,河道废弃,沉积细粒物质。⑤漫溢沉积。Ⅸ类岩相组合属漫溢(漫滩)沉积,分布于河道构型单元两侧,以薄层砂岩与泥岩互层为特征,剖面上一一般呈平板状,厚度小、横向延伸距离远^[28]。

如图10所示,中秋1井区自东部中秋101井、中秋

1井、中秋104井巴二段上部—巴一段主要发育冲积平原辫状河道砂体,属典型的辫状河道长期发育区,辫状河道带宽730~1 065 m(表3),多期辫状河道砂体叠置,Ⅰ—Ⅴ类有利岩相组合比例高,规模有效储层厚度大、储集性好;中秋102井主要发育在辫状河道侧翼、心滩砂体等分布区域,辫状河道带宽度约为923 m(表3),Ⅵ—Ⅸ类岩相组合废弃河道、漫滩、落淤层等细粒沉积比例增加,Ⅰ—Ⅴ类有利岩相组合比例减小,规模有效储层厚度减薄、储集性较好;向西至中秋2井区,长期为辫状河道、废弃河道、漫滩等交替发

育区域。辫状河道带宽度减为670 m左右,Ⅵ—Ⅸ类岩相组合废弃河道、漫滩、落淤层等比例增大明显,辫状河道砂体比例降低,规模有效储层厚度减薄、储集性变差。

4.2 对产能差异控制作用

由图4可知,中秋1井射孔井段深度为6 073.0~6 182.0 m,5 mm油嘴,油压81.182 MPa,日产气334 356 m³,日产油21.4 m³,属凝析气层;中秋101井射孔井段深度为6 270.5~6 290.5 m,5 mm油嘴,油压35.502 MPa,日产气90 781 m³,日产水74.8 m³,为气-水同层;中秋102井射孔井段深度为6 191.0~6 260.0 m,5 mm油嘴,油压12.949 MPa,日产气46 977 m³,日产油0.84 m³,属凝析气层;中秋104井射孔井段深度为6 007.5~6 100.0 m,5 mm油嘴,日产气123 857 m³。

上述各井射孔井段位于巴二段上部—巴一段,即最大洪泛面之上的辫状河三角洲平原—冲积平原辫状河相带中。分析造成上述含气性差异的原因,主要是受沉积微相差异形成的有利岩相组合发育种类,以及所占整个岩心厚度比例高低不同控制,造成了巴什基奇克组有效储层规模及储集性自东部的中秋101井—中秋1井,向西部的中秋104井—中秋102井—中秋2井逐渐变差。同时,随着隔夹层泥粉砂岩由东向西逐渐增多,也导致了含气性的差异。预测沿中秋101井—中秋102井一线南北区域为有效规模储层发育区,尤以北侧、东北侧更好,原因是北侧、东北侧为辫状河河道上游区,沉积物颗粒粗,受构造应力作用更强,裂缝发育,I—V类为有利岩相组合发育的比例高。井区南侧则是向辫状河河道下游,颗粒逐渐变细。

5 结论

1) 通过对中秋1井区的中秋101井、中秋102井和中秋2井巴什基奇克组岩心沉积特征分析及相标志识别,并基于洪泛面的等时性特征,建立了巴什基奇克组等时地层格架。在由下至上3个沉积单元等时地层格架内,经历了辫状河三角洲前缘—平原—冲积平原辫状河的进积(湖平面下降)演化过程,平面上不同时期主河道发育位置不同。

2) 中秋1井区巴什基奇克组划分为9种岩相组合类型,沉积微相差异是形成不同岩相组合的基础,其中I—V类为有利岩相组合,其主要特征为单层砂体厚度1.6~4.0 m的粗中粒(含泥砾)河道砂岩,或者有裂缝改造过的此类砂岩。

3) 建立了中秋1井区巴什基奇克组砂质辫状河有利岩相组合发育模式,有利岩相组合厚度的占比在研究区具有东高西低特征,控制了含气性的差异。预测沿中秋101井—中秋102井一线南、北区域为有效规模储层发育区,尤以北侧、东北侧更好。由此形成的一套研究思路与方法,可为深层碎屑岩天然气地质评价研究提供有益参考。

参 考 文 献

- [1] 张东东,刘文汇,王晓锋,等. 深层油气藏成因类型及其特征[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1169-1180.
ZHANG Dongdong, LIU Wenhui, WANG Xiaofeng, et al. Genetic types and characteristics of deep oil and gas plays[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1169-1180.
- [2] 杜金虎,田军,李国欣,等. 库车坳陷秋里塔格构造带的战略突破与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 16-23.
DU Jinhu, TIAN Jun, LI Guoxin, et al. Strategic breakthrough and prospect of Qiulitag structural belt in Kuqa Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 16-23.
- [3] 刘春,徐振平,陈戈,等. 塔里木盆地中秋1凝析气藏成藏条件及演化过程[J]. 天然气工业, 2019, 39(4): 8-17.
LIU Chun, XU Zhenping, CHEN Ge, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and evolution process of the ZQ1 large condensate gas reservoir in the Qiulitage structural belt, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4): 8-17.
- [4] 陈戈,赵继龙,杨宪彰,等. 塔里木盆地秋里塔格构造带深部碎屑岩储层特征及控制因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(4): 18-27.
CHEN Ge, ZHAO Jilong, YANG Xianzhang, et al. Characteristics and controlling factors of deep-buried clastic reservoirs in the Qiulitage structural belt, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4): 18-27.
- [5] 贾进华. 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]. 地学前缘, 2000, 7(3): 133-143.
JIA Jinhua. Depositional sequence and reservoir of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa foreland basin[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 133-143.
- [6] 顾家裕,方辉,贾进华. 塔里木盆地库车坳陷白垩系辫状三角洲砂体成岩作用和储层特征[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 517-523.
GU Jiayu, FANG Hui, JIA Jinhua. Diagenesis and reservoir characteristics of Cretaceous braided delta sandbody in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 517-523.
- [7] 李忠,王道轩,林伟,等. 库车坳陷中-新生界碎屑组对物源类型及其构造属性的指示[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 655-666.
LI Zhong, WANG Daoxuan, LIN Wei, et al. Mesozoic-Cenozoic clastic composition in Kuqa Depression, northwest China:

- Implication for provenance types and tectonic attributes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 655-666.
- [8] 梅冥相, 于炳松, 靳卫广. 塔里木盆地库车坳陷白垩纪层序地层格架及古地理演化[J]. *古地理学报*, 2004, 6(3): 261-278. MEI Mingxiang, YU Bingsong, JIN Weiguang. Sequence stratigraphic framework and palaeogeography evolution of the Cretaceous in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(3): 261-278.
- [9] 严德天, 王华, 王家豪, 等. 库车坳陷东部白垩系沉积体系分析及有利油气勘探区带预测[J]. *地质学报*, 2006, 80(3): 382-389. YAN Detian, WANG Hua, WANG Jiahao, et al. Analysis of depositional systems and prediction of favorable regions of the Cretaceous in the east part of the Kuqa Depression, Tarim Basin, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 382-389.
- [10] 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.
- [11] 李宝帅. 库车坳陷克拉苏构造带深层致密砂岩气成藏机制[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(5): 17-22. LI Baoshuai. Accumulation mechanism of deep tight sandstone gas reservoir in Kelasu structural belt, Kuqa Depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(5): 17-22.
- [12] 高志勇, 冯佳睿, 周川闽, 等. 干旱气候环境下季节性河流沉积特征——以库车河剖面下白垩统为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1060-1071. GAO Zhiyong, FENG Jiarui, ZHOU Chuanmin, et al. Arid climate seasonal rivers deposition: A case of Lower Cretaceous in Kuche river outcrop[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1060-1071.
- [13] 高志勇, 周川闽, 冯佳睿, 等. 中生代天山隆升及其南北盆地分异与沉积环境演化[J]. *沉积学报*, 2016, 34(3): 415-435. GAO Zhiyong, ZHOU Chuanmin, FENG Jiarui, et al. Relationship between the Tianshan mountains uplift and depositional environment evolution of the basins in Mesozoic-Cenozoic[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 415-435.
- [14] 王珂, 张荣虎, 王俊鹏, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝分布特征及其成因——以塔里木盆地库车前陆冲断带克深气田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 338-353. WANG Ke, ZHANG Ronghu, WANG Junpeng, et al. Distribution and origin of tectonic fractures in ultra-deep tight sandstone reservoirs: A case study of Keshen Gas Field, Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 338-353.
- [15] 王胜军, 唐永亮, 朱松柏, 等. 塔里木盆地库车坳陷北部典型露头剖面白垩系巴什基奇克组三段高分辨率层序地层特征[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 804-822. WANG Shengjun, TANG Yongliang, ZHU Songbai, et al. High-resolution sequence stratigraphy of the third member of Cretaceous Bashijiqike Formation in a typical outcrop section, northern Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 804-822.
- [16] 卢志远, 何治亮, 马世忠, 等. 高能辫状河沉积特征及砂体分布——以苏东X密井网区为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(8): 1003-1014. LU Zhiyuan, HE Zhiliang, MA Shizhong, et al. Characteristics and sand distribution of high-energy braided river deposits: A case study of X tight well area in eastern Sulige region[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2021, 42(8): 1003-1014.
- [17] 李剑, 李谨, 谢增业, 等. 塔里木盆地秋里塔格构造带中秋1圈闭油气来源与成藏[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 512-522. LI Jian, LI Jin, XIE Zengye, et al. Oil and gas source and accumulation of Zhongqiu 1 trap in Qiulitage structural belt, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 512-522.
- [18] 王振彪, 孙雄伟, 肖香姣. 超深超高压裂缝性致密砂岩气藏高效开发技术——以塔里木盆地克拉苏气田为例[J]. *天然气工业*, 2018, 38(4): 87-95. WANG Zhenbiao, SUN Xiongwei, XIAO Xiangjiao. Efficient development technologies for ultra-deep, overpressured and fractured sandstone gas reservoirs: A cased study of the Kelasu Gas Field in the Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(4): 87-95.
- [19] 常宝华, 唐永亮, 朱松柏, 等. 超深层裂缝性致密砂岩气藏试井特征及认识——以塔里木盆地克深气田为例[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(3): 167-174. CHANG Baohua, TANG Yongliang, ZHU Songbai, et al. Well test characteristics and understandings of the ultra-deep fractured tight sandstone gas reservoirs: A case study on Keshen Gas Field in Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(3): 167-174.
- [20] 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 Petroli Sinica*, 2021, 42(3): 399-414.
- [21] 印森林, 陈恭洋, 陈玉琨, 等. 砂砾岩储层孔隙结构复杂模式差异机制[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(1): 1-17. YIN Senlin, CHEN Gongyang, CHEN Yukun, et al. Mechanism of complex modes of the pore structure of sandstone/conglomerate reservoirs[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2019, 41(1): 1-17.

- [22] 鲍怡晨, 刘强虎, 杜晓峰, 等. 基于砾石-基质-裂缝三元素的砂砾岩岩相划分[J]. 地球科学, 2021, 46(6): 2157-2171.
BAO Yichen, LIU Qianghu, DU Xiaofeng, et al. Division of glutenite lithofacies based on the trielement of gravel-matrix-fracture[J]. Earth Science, 2021, 46(6): 2157-2171.
- [23] 裴亦楠, 张志松, 唐美芳, 等. 河流砂体储层的小层对比问题[J]. 石油勘探与开发, 1987, 14(2): 46-52.
QIU Yinan, ZHANG Zhisong, TANG Meifang, et al. The detailed correlation of fluvial sandbody reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 1987, 14(2): 46-52.
- [24] 高志勇, 郑荣才, 罗平. 陆相高分辨率层序地层中洪泛面特征研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007, 34(1): 47-56.
GAO Zhiyong, ZHENG Rongcai, LUO Ping. A study of the flooding surface in the high-resolution stratigraphic sequence of continental deposit [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2007, 34(1): 47-56.
- [25] 于兴河, 李顺利, 谭程鹏, 等. 粗粒沉积及其储层表征的发展历程与热点问题探讨[J]. 古地理学报, 2018, 20(5): 713-736.
YU Xinghe, LI Shunli, TAN Chengpeng, et al. Coarse-grained deposits and their reservoir characterizations: A look back to see forward and hot issues[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(5): 713-736.
- [26] 裴亦楠. 河流沉积学中的河型分类[J]. 石油勘探与开发, 1985, 12(2): 72-74.
QIU Yinan. Classification of river types in fluvial sedimentology [J]. Petroleum Exploration and Development, 1985, 12(2): 72-74.
- [27] 张金亮. 河流沉积相类型及相模式[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 244-252.
ZHANG Jinliang. Fluvial facies styles and their sedimentary facies models [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 244-252.
- [28] 陈彬滔, 于兴河, 王天奇, 等. 砂质辫状河岩相与构型特征——以山西大同盆地中侏罗统云冈组露头为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 111-117.
CHEN Bintaoyao, YU Xinghe, WANG Tianqi, et al. Lithofacies and architectural characteristics of sandy braided river deposits: A case from outcrops of the Middle Jurassic Yungang Formation in the Datong Basin, Shanxi Province [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 111-117.
- [29] 王锐. 辫状河厚砂体内部夹层的识别及分布特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(3): 83-87.
WANG Rui. Identification and distribution characteristics of the internal interbeds in the thick sandbodies of the braided river [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(3): 83-87.
- [30] 陈修, 徐守余, 李顺明, 等. 基于支持向量机和主成分分析的辫状河储层夹层识别[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 22-31.
CHEN Xiu, XU Shouyu, LI Shunming, et al. Identification of interlayers in braided river reservoir based on support vector machine and principal component analysis [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(4): 22-31.
- [31] 何辉, 刘畅, 李顺明, 等. 基于支持向量机算法的辫状河储层砂体连通性定量评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 1-10.
HE Hui, LIU Chang, LI Shunming, et al. Quantitative evaluation of sand body connectivity in braided river reservoirs based on support vector machine algorithm [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2): 1-10.
- [32] 苏亚拉图, 李千, 张波, 等. 砂质辫状河砂体构型及剩余油分布模式[J]. 特种油气藏, 2020, 27(4): 10-18.
SU Yalatu, LI Qian, ZHANG Bo, et al. Sandy braided river sandbody configuration and remaining oil distribution pattern [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(4): 10-18.
- [33] 王敏, 赵国良, 冯敏, 等. 砂质辫状河储层隔夹层分布模式及其对边底水运移的影响——以南苏丹P油田Fal块为例[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(2): 8-14, 21.
WANG Min, ZHAO Guoliang, FENG Min, et al. Distribution pattern of intercalations and its impact on migration of edge and bottom water in sandy braided-river reservoirs——A case study of Fal structure in P Oilfield, South Sudan [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(2): 8-14, 21.
- [34] 兰朝利, 何顺利, 门成全. 利用岩心或露头的交错层组厚度预测辫状河河道带宽度——以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(2): 16-18.
LAN Chaoli, HE Shunli, MEN Chengquan. Prediction of braided channel belt width based on cross-stratum sets thickness measurements of cores or outcrops-taking Sulige Gas Field, Ordos Basin as an example [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(2): 16-18.
- [35] 张昌民, 尹太举, 赵磊, 等. 辫状河储层内部建筑结构分析[J]. 地质科技情报, 2013, 32(4): 7-13.
ZHANG Changmin, YIN Taiju, ZHAO Lei, et al. Reservoir architectural analysis of braided channel [J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(4): 7-13.

(编辑 梁 慧)