

克拉玛依油田五2东区克上组扇三角洲储层构型分析

孙乐¹, 王志章^{2*}, 于兴河¹, 马海洋³, 曹茜¹

(1.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 3.中国石油长庆油田分公司第三采油厂,陕西延安 717600)

摘要: 克拉玛依油田五2东区克上组油藏经过20多年注水开发,油水关系复杂,提高油田开发效果已成为急需解决的问题。基于扇三角洲沉积模式、特征及沉积微相岩、电特征分析,对研究区克上组扇三角洲平原及前缘亚相,按照复合分流河道、单期分流河道、单一辫状(水下)分流河道、单一辫状分流河道砂体等级次进行储层构型单元的识别与划分。结果表明,研究区克上组单期分流河道界面主要包括泥质夹层、钙质夹层和河道冲刷界面;单一辫状(水下)分流河道具有4种识别标志,分别为河道间溢岸及泥质沉积、河道砂体顶面高程差异、河道砂体厚度差异和河道砂体测井响应差异。进而确定研究区基于储层构型分析的沉积微相分布特征:扇三角洲平原亚相辫状分流河道微相的厚度多大于4 m,宽度多大于300 m,最大可达1 500 m;扇三角洲前缘亚相水下分流河道微相的宽度为100~740 m,厚度为1~8 m;心滩微相在扇三角洲平原亚相中占主体地位,呈土豆状、块状分布,厚度为3~9 m,宽度为150~750 m,长度为200~800 m。综合分析储层构型单元及界面与剩余油饱和度模拟结果认为,研究区剩余油分布主要受储层构型单元、界面及构造因素综合控制,形成大量剩余油富集区。

关键词: 扇三角洲 储层构型 剩余油分布特征 上克拉玛依组 五2东区

中图分类号: TE112.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)04-0008-08

Study on reservoir architecture of fan delta in the Upper Karamay Formation of eastern Block Wu2, Karamay Oilfield

Sun Le¹, Wang Zhizhang^{2*}, Yu Xinghe¹, Ma Haiyang³, Cao Qian¹

(1.School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing City, 100083, China; 2.College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 3.No.3 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Yan'an City, Shaanxi Province, 717600, China)

Abstract: Due to years of water-injection development, the distribution of oil and water is complex in the Upper Karamay Formation of eastern Block Wu2, Karamay Oilfield. To improve the development efficiency is very urgent. Based on the depositional model and characteristics of fan delta and the rock-electricity features of the sedimentary microfacies in the study area, the reservoir architecture unit of fan-delta plain and front facies belt in the study area were identified and divided into four levels, which includes compound distributary channel, single period distributary channel, single braided channel (underwater) and single sandbody. The results show that in the study area, the single period distributary channel interfaces mainly include argillaceous interlayer, calcareous interlayer and erosion interface. Four types of distinguishing marks of single braided distributary channel (underwater) were established as follows: the overbank (muddy deposition), the difference of the height of the channel sand body, the thickness difference of the channel sand body and the difference of logging response characteristics of the channel sand bodies. And then the distribution characteristics of sedimentary microfacies were determined based on analysis of reservoir architecture in the study area. The results show that the thickness of braided distributary channel is more than 4 m and the width is 300-1 500 m. The width of single underwater distributary channel is

收稿日期: 2017-03-23。

作者简介: 孙乐(1988—),男,山东德州人,在读博士研究生,从事油气田开发地质及沉积储层方面的研究。联系电话: 15101148905, E-mail: geology_sunle@163.com。

*通讯作者: 王志章(1962—),男,山东寿光人,教授,博导。联系电话: (010)89733758, E-mail: whx3998@vip.sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“砾岩结构—成因分类、沉积成岩机理及其岩石物性响应模型”(41472091)。

100–740 m and its thickness is 1–8 m. The channel bar is potato-like or block-like, and it is 3–9 m thick, 150–750 m wide and 200–800 m long. Based on comprehensive analysis of the architecture interface and the simulation results of remaining oil saturation, it is concluded that the remaining oil distribution is comprehensively controlled by the architecture unit, interface and structure factors, forming a large amount of remaining oil accumulation areas.

Key words: fan delta; reservoir architecture; remaining oil distribution; the Upper Karamay Formation; eastern Block Wu2

克拉玛依油田五2东区上克拉玛依组(克上组)油藏于1959年发现,1989年采用350 m反七点面积注采井网开发,1990年全面投入注水开发,2012年末进行开发方案调整,新钻加密井130余口,历经试油试采和产能建设阶段、递减阶段、低速稳产阶段和方案调整阶段4个阶段。截至2014年6月,研究区共有采油井119口,注水井50口,过层井99口,平均井距为200 m,日产液量为440 t,日产油量为196 t,综合含水率为55.56%,采油速度为0.117%,累积产油量为 33.18×10^4 t,采出程度为6.64%,累积注采比为2.38,地层压力为21.96 MPa。研究区克上组储层为扇三角洲沉积,油层非均质程度高,剩余油分布呈现平面高度分散、局部集中的特征。如何改善剩余油开发效果已经成为五2东区油田开发迫切需要解决的问题,急需对研究区克上组储层构型进行深入的研究。

扇三角洲沉积砂体是目前五2东区克上组已发现的重要含油储层之一,与陆上其他成因的碎屑岩沉积相比,扇三角洲沉积中不同沉积亚相的沉积机制和特征具有较大差别,且储层的形态、规模、方向及叠置关系(即储层构型)十分复杂^[1-3]。Miall通过河流相储层构型研究,总结出河流相储层构型要素分析法^[4],随后诸多中外学者针对储层构型研究也取得了丰硕的成果^[5-9],极大地丰富了河流相沉积成因理论。但是对于扇三角洲平原及前缘亚相储层构型的研究却较少,特别是缺乏针对辫状(水下)分流河道和心滩微相的研究^[10-11]。为此,笔者利用研究区丰富的取心及钻井资料,按照复合分流河道、单期分流河道、单一辫状(水下)分流河道、单一辫状分流河道砂体等级次对五2东区克上组扇三角洲平原和前缘亚相进行储层构型分析;综合岩心、测井资料分析沉积环境,在建立等时地层格架和分析沉积模式的基础上,对复合分流河道进行垂向分期,识别单期分流河道,平面划分识别单一辫状(水下)分流河道,根据垂向分期、侧向划界、平面组合的原则识别单一辫状分流河道砂体^[12],进而综合剩余油饱和度模拟结果,分析各级次储层构型单元及界面对剩余油分布的控制作用^[13-14]。研究成果有利于指导研究区下步的剩余油挖潜,并可以为同类型

油气藏的勘探开发提供思路。

1 地质概况

克拉玛依油田五2东区三叠系克上组油藏位于准噶尔盆地西北缘,新疆维吾尔自治区克拉玛依市东约20 km。其北以克拉玛依断裂为界与一区相邻,东以南白碱滩断裂为界与七西区相邻,西南为五2西区,东南为八区(图1)。研究区位于克拉玛依—南白碱滩断裂的西南端,该断裂为长期活动性的同生断裂,勘探目的层位于断裂下降盘。由于克拉玛依—南白碱滩断裂具有封闭性,因此对研究区油气具有聚集作用^[15]。

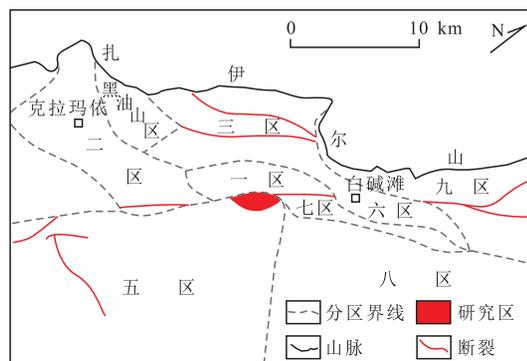


图1 克拉玛依油田五2东区地理位置

Fig.1 Geographical location map of eastern Block Wu2, Karamay Oilfield

准噶尔盆地西北缘发育二叠系—侏罗系充填序列,广泛发育冲积扇、水下扇、扇三角洲、湖底扇等砾质粗碎屑储集体,发育13套地层^[16]。五2东区三叠系中统克上组上覆地层为白碱滩组,下伏地层为下克拉玛依组,沉积厚度为160~250 m,平均沉积厚度为187 m;自上而下可进一步划分为S1, S2, S3, S4和S5共5个砂层组,且各砂层组地层厚度相当,扇三角洲沉积砂体主要发育于S1和S5砂层组,表现为水动力较强的水上或水下沉积环境, S2—S4砂层组砂体厚度较S1和S5砂层组小,表现为稳定的水下沉积环境。研究区克上组地层倾角为 $4^{\circ} \sim 8^{\circ}$,相邻井地层厚度变化较小,但河道砂体下切、叠置频繁,厚度变化较大,侧向相变较快,在地层对比分析沉积旋回时,参考地震剖面,应用等高程、前积、相变细分法将研究区克上组每个砂层组细分为

2个小层,每个小层再细分为2~3个单层。

2 沉积微相特征

五2东区克上组油藏位于克拉玛依—南白碱滩断裂下降盘,发育高山近源扇三角洲沉积。沉积物被高能阵发性洪流搬运,普遍发育粗碎屑,主要发育扇三角洲平原和前缘亚相^[17]。其中扇三角洲平原亚相分布于枯水线或低潮线以上,可细分为辫状分流河道、心滩、溢岸、河道间等微相,岩性主要为灰绿色、灰色砂质砾岩、砾状砂岩、泥岩等,发育交错层理、冲刷面、块状层理等沉积构造,分选较差,普遍含泥,在辫状分流河道中心滩微相发育,厚度较大;扇三角洲前缘亚相分布于岸线至正常浪基面之间的浅水区,为扇三角洲的主体部分,发育水下分流河道、溢岸、河道间等微相,岩性主要为灰绿色、灰色中—细砂岩、含砾砂岩与泥岩互层,以波状层理、水平层理和交错层理为主,分选较好,为中—弱强度牵引流水动力条件。

2.1 辫状(水下)分流河道微相

辫状分流河道微相的单砂体厚度较大,进入浅湖亚相后形成的水下分流河道极不稳定,随着水下分流河道向浅湖亚相推进,河道分叉增多。在剖面上,辫状(水下)分流河道微相呈顶平底凸的透镜状,河床中心砂体厚度最大。辫状分流河道微相的岩性以粗砂岩和中、细砾岩为主,分选较好,磨圆度中等,为次棱角状—次圆状;水下分流河道微相的岩性较细,以中砂岩为主。水下分流河道微相的垂向层序结构特征与陆上辫状分流河道微相相似,但颜色较暗,且河道下部以发育交错层理为主,其岩性及沉积构造特征反映出近物源、水动力较强及快速沉积等特征。辫状分流河道微相的自然电位曲线呈钟形或不规则箱形,具有底突变、顶渐变特征;电阻率曲线呈不规则箱形、钟形及高幅齿状,且电阻率值较高;水下分流河道微相的自然电位曲线一般呈钟形,自然伽马曲线形态与自然电位曲线相似,电阻率曲线呈高幅齿状及钟形,且电阻率值较高。

2.2 心滩微相

单一辫状分流河道砂体主要由心滩和河道砂体组成。心滩砂体是单一辫状分流河道砂体的主体,准确识别单一心滩砂体是研究辫状分流河道微相储层构型的重要内容。心滩微相以中—细砾岩、砂质砾岩、含砾砂岩和粗砂岩为主,岩性较均一,交错层理发育,表明沉积时水动力稳定,物源充足,其

砂体单层厚度较大,最大可达9 m。心滩微相的自然电位曲线呈箱形,且幅度较大。

2.3 溢岸微相

溢岸微相主要分布于辫状(水下)分流河道微相的前缘及侧缘,伴随沉积物的充分供应和河道的改道迁移,形成大片分布的厚层砂体。其岩性以细砂岩为主,分选较好,磨圆度中等—好,多为块状构造,也见波状层理。自然电位和电阻率曲线均呈指状,近似于小凸起,自然电位值较高,电阻率值较低。

2.4 河道间微相

河道间微相的粒度较细,横向分布稳定性差。其岩性主要为泥岩和粉砂岩,发育块状构造、波状层理和平行层理等。河道间微相的电阻率和自然电位曲线均比较平直,自然伽马值高,电阻率值低。

3 储层构型分析

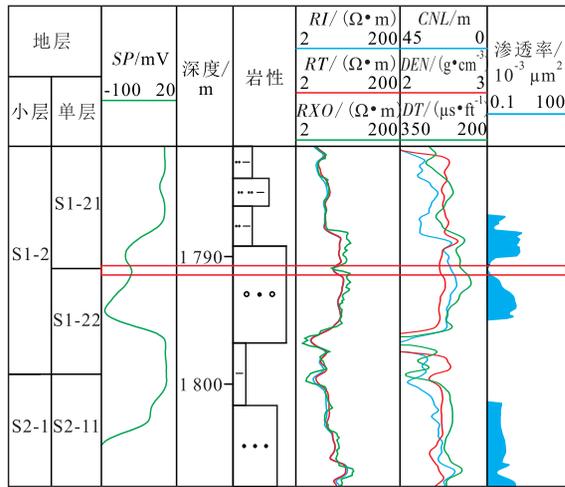
3.1 储层构型单元识别

3.1.1 单期分流河道识别

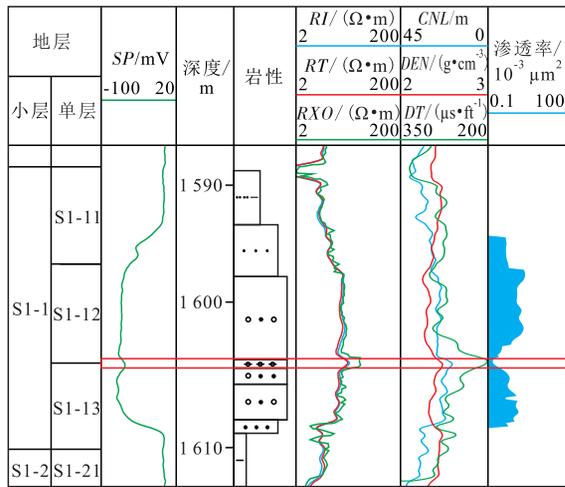
五2东区克上组分布面积约为7 km²,其各砂层组表现为单一的复合分流河道沉积,因此,针对研究区克上组的储层构型分析从单期分流河道识别入手。辫状(水下)分流河道的水动力较强,砂体较为发育。垂向划分单期分流河道时,明确单期分流河道的储层构型界面类型,建立各类型界面的识别模式。通过岩心描述、测井标定分析发现,五2东区克上组单期分流河道的界面主要为泥质夹层、河道冲刷界面和钙质夹层。

泥质夹层 岩心观察结果表明,研究区S1-2小层发育2期辫状分流河道,其间发育厚度为20 cm的河道间沉积,岩性主要由泥岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩组成。例如56063井S1-2小层2期辫状分流河道间发育典型泥质夹层,辫状分流河道岩性为灰色砂砾岩和含砾砂岩,其间夹有一套泥质夹层;其测井曲线响应特征表现为自然电位曲线贴近基线,电阻率曲线回返特征明显(图2a)。对研究区S1-2小层泥质夹层进行统计,结果表明,55%的井发育泥质夹层;该类夹层在油层中的出现频率最高,总体上均是由于水动力减弱、细粒悬移质沉积所形成,且分布不稳定。

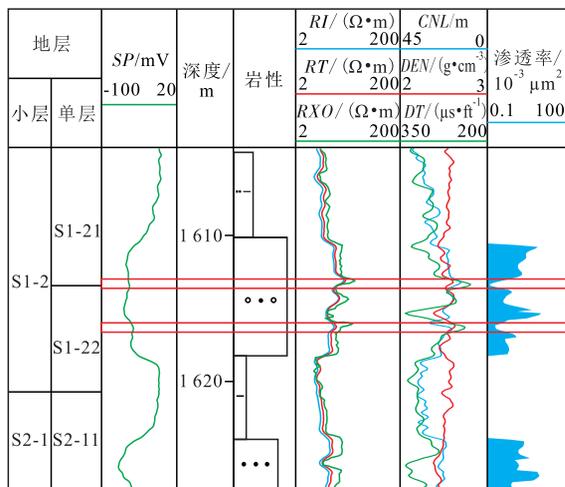
河道冲刷界面 河道冲刷界面是从上游搬运来以及就地侵蚀的泥砾、砂砾等物质在河道底部、河床冲刷面之上沉积,形成不连续分布的砂体透镜体,以泥砾为主。研究区56052井S1-1小层发育



a—56063井泥质夹层



b—56052井河道冲刷界面



c—56010井钙质夹层

图2 克拉玛依油田五2东区克上组单期分流河道界面特征

Fig.2 Interface characteristics of single period distributary channel of the Upper Karamay Formation in eastern Block Wu2, Karamay Oilfield

3期辫状分流河道,后期河道冲刷前期河道,发育河道底部滞留沉积,可见泥砾,厚度约为25 cm,自然电位及电阻率曲线回返特征不明显(图2b)。

钙质夹层 研究区钙质夹层大多分布于单期

分流河道厚砂岩底部,与沉积物碳酸盐胶结作用、溶解作用等成岩作用有关,导致碳酸盐岩充填孔隙并交代碎屑颗粒,为沉积阶段孔隙水或二氧化碳蒸发产生沉淀而形成。在潮湿气候条件下,孔隙水垂直下渗,在分流河道下部发生沉积和胶结;在较干燥气候区,蒸发作用引起孔隙水上升,在地表形成钙质夹层。钙质夹层的发育情况在一定程度上可以反映河道的发育期次,也是划分单期分流河道的标志。钙质夹层的自然电位曲线回返特征不明显,电阻率和声波时差曲线均表现为异常高值(图2c)。

3.1.2 单一辫状(水下)分流河道识别

单一辫状(水下)分流河道的识别不仅有利于储层构型级次识别的完整性,对剩余油挖潜也具有重要的指导意义。综合辫状(水下)分流河道沉积特征,确定研究区克上组单一辫状(水下)分流河道具有4种识别标志,分别为河道间溢岸及泥质沉积、河道砂体顶面高程差异、河道砂体厚度差异、河道砂体测井响应差异,可以根据这4种识别标志划分井间单一辫状(水下)分流河道边界。

河道间溢岸及泥质沉积 单期分流河道主要为宽浅型河道,河道砂体在平面上广泛分布,砂体间发育溢岸砂体、泛滥平原等河道间溢岸及泥质沉积(图3a,3b),可解释为2条分流河道的边界,且2条分流河道在空间上不接触,因此河道间溢岸及泥质沉积在研究区是单一辫状(水下)分流河道划分的重要标志。

河道砂体顶面高程差异 在同一沉积地层单元内,不同分流河道砂体在沉积时期上存在差异,进而导致不同时期形成的单一辫状(水下)分流河道砂体的顶面距地层界面(或标志性等时界面)的相对距离存在差异,即河道砂体顶面的相对高程存在差异(图3c)。在地层对比过程中,等时地层界面选取的准确性很大程度上取决于单一辫状(水下)分流河道界面的划分。

河道砂体厚度差异 在剖面上,如果同一沉积地层单元内分流河道砂体的厚度连续出现“厚—薄—厚”变化特征,则可以确定存在单一辫状(水下)分流河道界面。这种河道砂体厚度的变化特征主要是由2种分流河道砂体组合模式所形成。第1种砂体组合模式是2期分流河道平面切割,中间厚度较薄处为某一分流河道的边部(图3d);第2种砂体组合模式是由于中间部位发育1期小型分流河道,与两侧分流河道的规模存在差异。在实际储层构型级次划分过程中,应结合分流河道的规模与延伸长度,并综合平面和剖面的特征对单一辫状(水

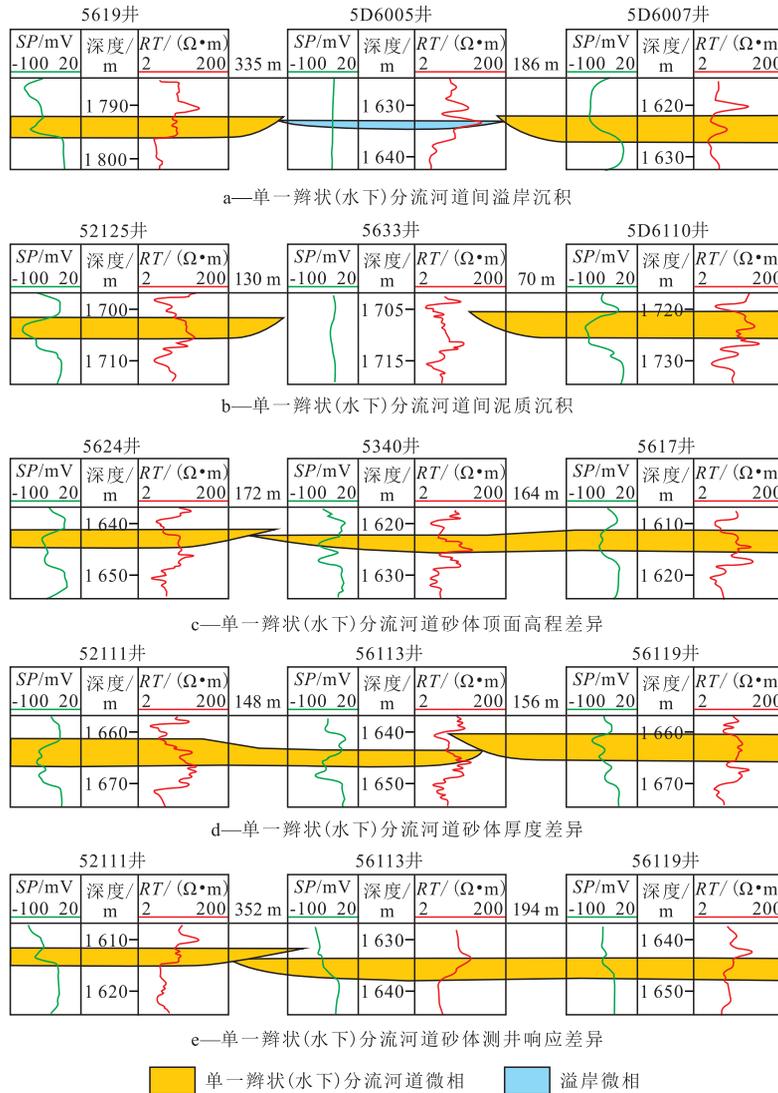


图3 克拉玛依油田五2东区单一辫状(水下)分流河道识别标志

Fig.3 Identification sign of single channel boundary in eastern Block Wu2, Karamay Oilfield

下)分流河道界面进行识别。

河道砂体测井响应差异 不同分流河道的水动力强度存在差异,因此造成测井曲线的响应特征亦存在差异。例如自然电位和电阻率曲线的形态、规模及幅度差异均反映出不同分流河道的水动力特点。尤其在分流河道主流线上测井曲线响应的差异是识别分流河道的显著标志(图3e)。

综上所述,在单一辫状(水下)分流河道识别过程中,首先,确定较明显的识别标志,并以该识别标志为控制点,在垂物源方向建立连井剖面。然后,对分流河道边界点进行合理地组合,并根据不同沉积亚相分流河道的特点,连接相邻同种类型分流河道识别标志作为同一分流河道边界。最后,将剖面上划分的单一辫状(水下)分流河道边界投影至平面,完成单一辫状(水下)分流河道的平面划分。

3.1.3 单一辫状分流河道砂体识别

单一辫状分流河道砂体主要由心滩和河道砂体组成。辫状分流河道的储层非均质性主要是由于心滩内部的夹层造成的,分析心滩和河道砂体以及二者之间的组合关系是研究区扇三角洲平原亚相储层构型分析的重要内容。单一水下分流河道砂体已是单一砂体规模,常呈条带状孤立分布,而多条水下分流河道砂体可呈侧向叠置发育,形成砂体连片分布。因此,笔者主要针对扇三角洲平原亚相单一辫状分流河道砂体进行识别。

综合单一辫状分流河道砂体的单井识别及平面划分标志,根据单井识别、侧向划界、平面组合的思路对单一辫状分流河道砂体进行识别。首先,根据单一辫状分流河道砂体的测井响应特征,进行单井砂体识别;心滩砂体是辫状分流河道的主体,其垂向韵律不明显,电阻率和自然电位曲线多呈箱

形,河道砂体为正韵律,其测井曲线形态多为钟形。然后,根据测井相和砂体厚度资料,预测心滩与河道砂体的边界;从辫状分流河道砂体成因上分析,心滩砂体为沉积物垂向加积形成,砂岩厚度大,河道砂体为河道充填形成,二者的砂岩厚度存在较大差别,心滩砂体的砂岩厚度与地层厚度的比值较大。最后,将预测的单一辫状分流河道砂体边界进行平面组合,根据沉积相模式以及现代沉积特征进行反复校正,确定单一辫状分流河道砂体。一般情况下,在密井网区利用上述思路即可识别单一辫状分流河道砂体,但研究区砂体厚度较大且分布较稳定,还存在未钻遇辫状分流河道的地区,因此以砂岩厚度与地层厚度比值较高的区域为中心,在扇三角洲沉积模式指导下预测心滩砂体边界^[18],进而预测单一辫状分流河道砂体的展布。

3.2 基于储层构型分析的沉积微相分布特征

基于单一辫状(水下)分流河道及单一辫状分

流河道砂体识别结果,对克拉玛依油田五2东区克上组各沉积微相进行平面组合及优化,明确不同沉积微相的形态特征及展布规律。结果表明,辫状分流河道微相发育多条单一辫状分流河道,且河道频繁改道迁移,其内部被心滩微相分割为多个河道砂体,呈条带状分布,具有较大的厚度和宽度,厚度多大于4 m,宽度多大于300 m,最大可达1 500 m。心滩微相呈土豆状、块状分布,厚度为3~9 m,宽度为150~750 m,长度为200~800 m。辫状分流河道入湖后形成水下分流河道,其发育不稳定,主要呈树枝状分布,在多个砂层组表现为侧向拼接,单一水下分流河道的宽度为100~740 m,厚度为1~8 m。溢岸微相在扇三角洲平原亚相中主要呈零星的条带状分布,在扇三角洲前缘亚相中呈条带状或席状分布。河道间微相在扇三角洲前缘亚相中广泛发育,主要以较短的条带状分布为主,局部连片发育(图4)。

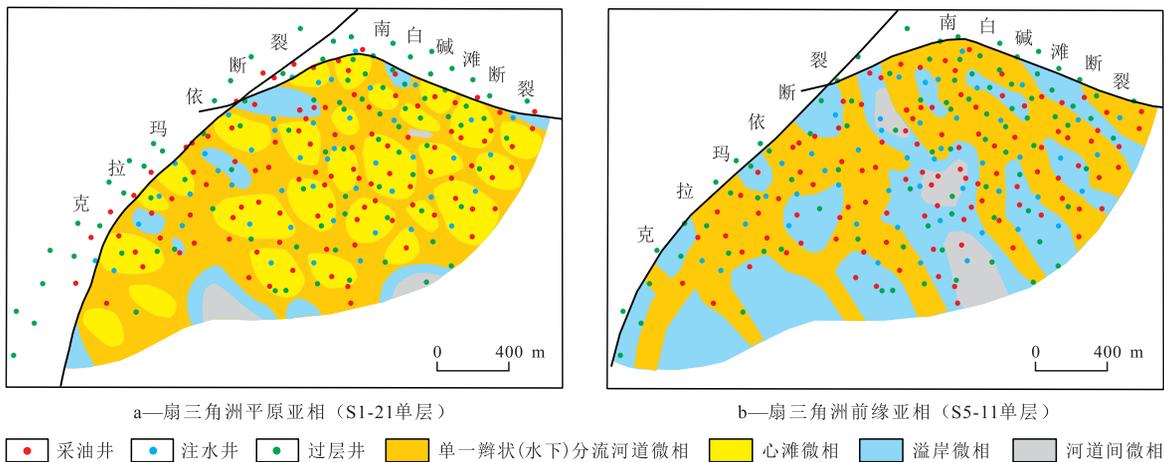


图4 克拉玛依油田五2东区不同沉积微相平面分布特征

Fig.4 Distribution of different sedimentary microfacies in eastern Block Wu2, Karamay Oilfield

4 剩余油分布特征

储层构型界面可能为垂向或侧向渗流屏障,从而影响流体渗流,导致注采不匹配,影响开发效果及剩余油分布^[19-23]。2012年以后,五2东区进行扩边调整,新钻加密井130余口,综合剩余油饱和度模拟结果,分析储层构型单元及界面对剩余油分布的控制作用。

受砂体边界控制,剩余油主要在砂体边部富集或呈透镜状富集。对于条带状的单一辫状(水下)分流河道砂体,其分布变化较快;有的河道砂体无井钻遇,油层保持原始状态;有的河道砂体仅有注水井而没有采油井,发育高压未动用油层;有的河

道砂体只有采油井而没有注水井,仅依靠天然能量开采出部分油气,发育低压基本未动用油层。

单一辫状(水下)分流河道砂体侧向叠合可形成砂体连片分布,各河道砂体往往具有不同的孔渗特征,后期形成的河道冲刷早期河道也可能发育一些泥砾沉积。注水井与采油井若钻遇不同河道砂体,则注水井与采油井连通性较弱,注采对应关系较差,导致剩余油在沉积微相边界富集(图5)。

通常情况下,剩余油的形成与分布不单受某一种因素控制,注入水常向低处扰流,若构造高部位无井钻探区,则可能形成水动力滞留区,注入水驱替不到形成剩余油富集区。造成边部剩余油分布较多的原因主要是构造高部位、砂体边界,二者共同影响形成水动力滞留,导致剩余油富集。

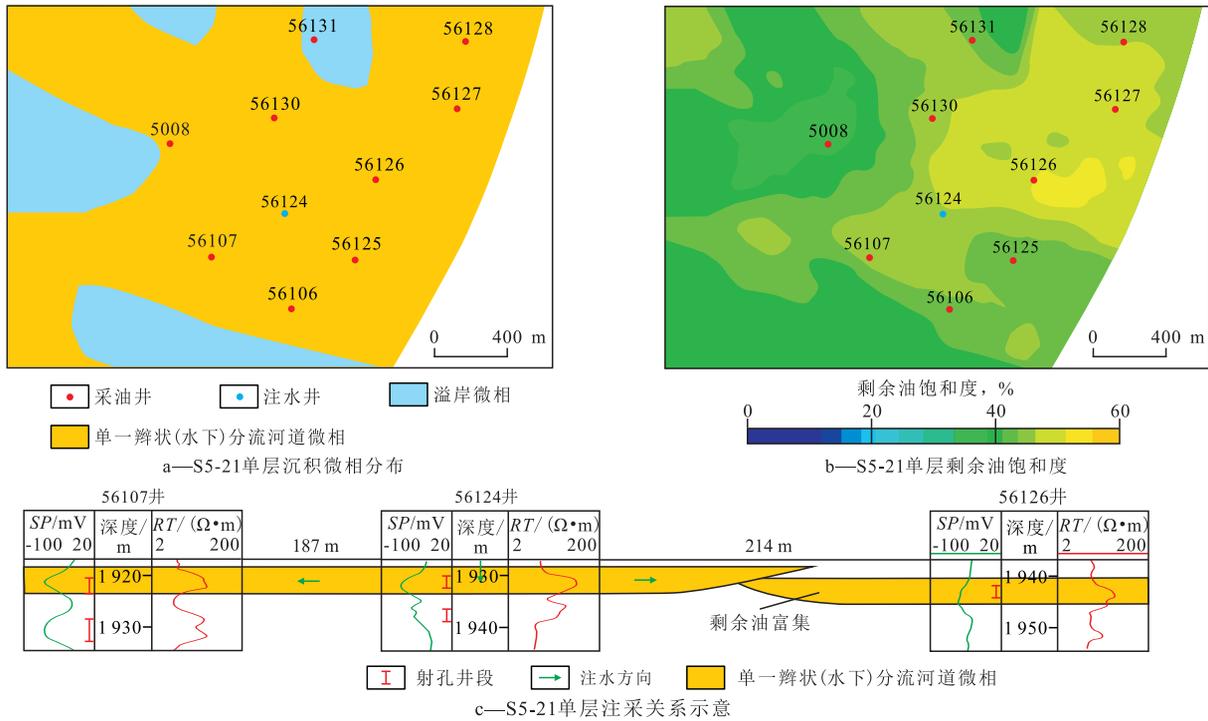


图5 克拉玛依油田五2东区单一辫状(水下)分流河道砂体边界导致的剩余油分布

Fig.5 Distribution of remaining oil based on single channel(underwater)sandbody boundary in eastern Block Wu2, Karamay Oilfield

5 结论

克拉玛依油田五2东区克上组油藏发育相对近物源的高山近源扇三角洲沉积,普遍发育粗碎屑,主要发育辫状(水下)分流河道、心滩、溢岸、河道间等微相。基于沉积微相岩、电特征分析,对研究区克上组扇三角洲平原及前缘亚相,分复合分流河道、单期分流河道、单一辫状(水下)分流河道、单一辫状分流河道砂体等级次进行储层构型分析。结果表明,五2东区克上组单期分流河道界面主要包括泥质夹层、钙质夹层和河道冲刷界面。针对单一辫状(水下)分流河道有4种识别标志:河道间溢岸及泥质沉积、河道砂体顶面高程差异、河道砂体厚度差异、河道砂体测井响应差异。单一辫状分流河道砂体厚度多大于4 m,宽度多大于300 m,最大达1 500 m;单一水下分流河道砂体厚度为1~8 m,宽度为100~740 m;心滩微相在扇三角洲平原亚相中占主体地位,呈土豆状、块状分布,厚度为3~9 m,宽度为150~750 m,长度为200~800 m。剩余油分布主要受储层构型单元、界面及构造因素控制,导致注采关系不完善,形成大量剩余油富集区。

参考文献:

[1] 贾爱林.中国储层地质模型20年[J].石油学报,2011,32(1):

181-188.

Jia Ailin.Research achievements on reservoir geological modeling of China in the past two decades[J].Acta Petrolei Sinica,2011,32(1):181-188.

[2] 古永红,王振宇,谭秀成.国内外扇三角洲研究综述[J].新疆石油地质,2003,24(6):590-593.

Gu Yonghong, Wang Zhenyu, Tan Xiucheng.A review of fan delta studies at home and abroad [J].Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(6):590-593.

[3] 董艳蕾,朱筱敏,耿晓洁,等.泌阳凹陷东南部核桃园组近岸水下扇与扇三角洲沉积特征比较及控制因素分析[J].石油与天然气地质,2015,36(2):271-279.

Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, Geng Xiaojie, et al.Sedimentary characteristics comparison and controlling factors analyses of near-shore subaqueous fan and fan delta in the Hetaoyuan Formation of southeastern Biyang Sag [J].Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 271-279.

[4] Miall A D.Architectural elements analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J].Earth Science Reviews, 1985, 22(4):261-308.

[5] Gabriela I Keeton, Matthew J Pranter, Rex D, et al.Stratigraphic architecture of fluvial deposits from borehole images, spectral-gamma-ray response, and outcrop analogs, Piceance Basin, Colorado [J].AAPG Bulletin, 2015, 99(10):1 929-1 956.

[6] 徐丽强,李胜利,于兴河,等.辫状河三角洲前缘储层构型分析——以彩南油田彩9井区三工河组为例[J].油气地质与采收率,2016,23(5):50-57,82.

Xu Liqiang, Li Shengli, Yu Xinghe, et al.Analysis of reservoir architecture in the braided river delta front: A case study of the Sangonghe Formation in Block Cai9 of Cainan oilfield [J].Petroleum

- Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(5):50-57, 82.
- [7] 于兴河.碎屑岩系油气储层沉积学[M].北京:石油工业出版社, 2008:339-341.
Yu Xinghe. Clastic reservoir sedimentology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008:339-341.
- [8] 王石, 万琼华, 陈玉琨, 等.基于辫状河储层构型的流动单元划分及其分布规律[J].油气地质与采收率, 2015, 22(5):47-51, 68.
Wang Shi, Wan Qionghua, Chen Yukun, et al. Flow units division and their distribution law based on braided river reservoir architecture [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(5):47-51, 68.
- [9] 刘卫, 路智勇, 牛栓文.东辛油田营13断块辫状河储层构型模式[J].油气地质与采收率, 2015, 22(4):33-37.
Liu Wei, Lu Zhiyong, Niu Shuanwen. An architecture model of braided river reservoir in Ying-13 fault block of Dongxin oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4):33-37.
- [10] 乔雨朋, 邵先杰, 接敬涛, 等.远源砂质辫状河储层构型及控制因素——以秦皇岛32-6油田为例[J].油气地质与采收率, 2016, 23(1):46-52.
Qiao Yupeng, Shao Xianjie, Jie Jingtao, et al. Architecture analysis and controlling factor on far source sandy braided river reservoir: A case study of Qinhuangdao32-6 oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1):46-52.
- [11] 陈程, 孙义梅, 贾爱林.扇三角洲前缘地质知识库的建立及应用[J].石油学报, 2006, 27(2):53-57.
Chen Cheng, Sun Yimei, Jia Ailin. Development and application of geological knowledge database for fan-delta front in the dense spacing area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2):53-57.
- [12] 操应长, 姜伟, 王艳忠, 等.准噶尔盆地西缘车排子地区侏罗系储层特征及控制因素[J].石油实验地质, 2016, 38(5):609-618.
Cao Yingchang, Jiang Wei, Wang Yanzhong, et al. Characteristics and controlling factors of Jurassic reservoirs in Chepaizi area, western Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(5):609-618.
- [13] 杨小丽, 房磊, 徐伟, 等.裂谷盆地高凝油藏扇三角洲沉积演化模式[J].特种油气藏, 2016, 23(2):18-21.
Yang Xiaoli, Fang Lei, Xu Wei, et al. Fan-delta deposition evolution of high pour-point oil reservoir in Albert Rift Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(2):18-21.
- [14] 赵凯鑫.特高含水期三类油层剩余油分布与挖潜[J].大庆石油地质与开发, 2014, 33(3):60-63.
Zhao Kaixin. Distribution and potential tapping for the remained oil in Class III reservoir at the extra high water cut stage [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(3):60-63.
- [15] 王辉, 解克萍, 胡戈玲, 等.相控储层预测技术在五2东克上组扩边中的应用[J].新疆石油天然气, 2014, 10(4):1-5.
Wang Hui, Xie Keping, Hu Geling, et al. Application of facies controlled reservoir prediction technique in the five2 Dong Group in the edge expansion [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2014, 10(4):1-5.
- [16] 蔚远江, 李德生, 胡素云, 等.准噶尔盆地西北缘扇体形成演化与扇体油气藏勘探[J].地球学报, 2007, 28(1):62-71.
Yu Yuanjiang, Li Desheng, Hu Suyun, et al. Fans sedimentation and exploration direction of fan hydrocarbon reservoirs in foreland thrust belt of the northwestern Junggar basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(1):62-71.
- [17] 王寿庆.双河扇三角洲沉积相及其模式[J].新疆石油地质, 1986, 7(3):22-30.
Wang Shouqin. Sedimentary facies and its model of fan delta in Shuanghe Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1986, 7(3):22-30.
- [18] 李海明, 王志章, 乔辉, 等.现代辫状河沉积体系的定量关系[J].科学技术与工程, 2014, 14(29):21-26.
Li Haiming, Wang Zhizhang, Qiao Hui, et al. Quantitative relation of sedimentary system of modern braided river [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(29):21-26.
- [19] 于兴河.油田开发中后期储层面临的问题与基于沉积成因的地质表征方法[J].地学前缘, 2012, 19(2):1-14.
Yu Xinghe. Existing problems and sedimentogenesis-based methods of reservoir characterization during the middle and later periods of oilfield development [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2):1-14.
- [20] 封从军, 鲍志东, 杨玲, 等.三角洲前缘水下分流河道储集层构型及剩余油分布[J].石油勘探与开发, 2014, 41(3):323-329.
Feng Congjun, Bao Zhidong, Yang Ling, et al. Reservoir architecture and remaining oil distribution of deltaic front underwater distributary channel [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3):323-329.
- [21] 徐中波, 申春生, 陈玉琨, 等.砂质辫状河储层构型表征及其对剩余油的控制——以渤海海域P油田为例[J].沉积学报, 2016, 34(2):375-385.
Xu Zhongbo, Shen Chunsheng, Chen Yukun, et al. Architecture characterization for sandy braided river reservoir and controlling factors of remaining oil distribution—a case study of P oilfield, Bohai offshore, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(2):375-385.
- [22] 赵伦, 梁宏伟, 张祥忠, 等.砂体构型特征与剩余油分布模式——以哈萨克斯坦南图尔盖盆地 Kumkol South 油田为例[J].石油勘探与开发, 2016, 43(3):433-441.
Zhao Lun, Liang Hongwei, Zhang Xiangzhong, et al. Relationship between sandstone architecture and remaining oil distribution pattern: A case of the Kumkol South oilfield in South Turgay Basin, Kazakstan [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3):433-441.
- [23] 岳大力, 吴胜和, 程会明, 等.基于三维储层构型模型的油藏数值模拟及剩余油分布模式[J].中国石油大学学报:自然科学版, 2008, 32(2):21-27.
Yue Dali, Wu Shenghe, Cheng Huiming, et al. Numerical reservoir simulation and remaining oil distribution patterns based on 3D reservoir architecture model [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(2):21-27.