

文章编号: 0253-2697(2015)07-0858-13 DOI:10.7623/syxb201507010

冲积扇储层窜流通道及其控制的剩余油分布模式

——以克拉玛依油田一中区下克拉玛依组为例

冯文杰¹ 吴胜和¹ 许长福² 夏钦禹¹ 伍顺伟² 黄梅¹ 景亚菲¹

(1. 中国石油大学地球科学学院 油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;

2. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院 新疆克拉玛依 834000)

摘要:准噶尔盆地西北缘克拉玛依油田三叠系下克拉玛依组发育典型的干旱冲积扇储层,储层非均质性强,在长期注水开发过程中形成了多种窜流通道,并控制剩余油的形成和分布。从冲积扇储层构型解剖入手,综合应用测井、岩心、现代沉积等资料建立了冲积扇储层构型模式,在此基础上利用动、静态数据分析研究区窜流通道的类型和分布样式,冲积扇储层内部发育有别于其他碎屑岩储层的窜流通道类型,根据窜流通道的物性特征可分为大孔高渗通道和相对低渗通道2类。不同沉积相带内部发育不同成因的窜流通道:扇根内带为流沟系统,扇根外带为片流朵体骨架,扇中为高能水道。不同类型窜流通道的分布样式及其对剩余油分布特征的控制作用差异明显。流沟分布于单期槽流砾石体的上部,流沟之间相互交叉汇合形成“树状”组合,剩余油分布于槽流砾石体未被流沟切割的部位;片流朵体骨架在片流带内孔、渗性能最好,在三维空间内呈“发束状”发散,剩余油分布于单一片流朵体侧缘和上部;扇中高能水道为高孔、高渗的宽带状储集体,单一水道切割叠置频繁,剩余油富集在物性较差、规模较小的低能水道内;扇缘储层构型样式单一,径流水道规模小且多孤立分布,剩余油主要受控于开发井网与措施的完善程度。

关键词:冲积扇储层;储层构型模式;窜流通道;大孔道;相对低渗通道;剩余油

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Water flooding channel of alluvial fan reservoir and its controlling distribution pattern of remaining oil: a case study of Triassic Lower Karamay Formation, Yizhong area, Karamay oilfield, NW China

Feng Wenjie¹ Wu Shenghe¹ Xu Changfu² Xia Qinyu¹ Wu Shunwei² Huang Mei¹ Jing Yafei¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum; State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Xinjiang Karamay 834000, China)

Abstract: Typical arid alluvial fan reservoirs are developed with strong heterogeneity in the Triassic Lower Karamay Formation of Karamay oilfield at the northwest margin of Junggar Basin. In the long-term process of water flooding development, a large number of water flooding channel were formed to control the formation and distribution of remaining oil. Based on architecture analysis of alluvial fan reservoirs, well logging, coring, modern sediments and other data were comprehensively used to establish the reservoir architecture model. On this basis, the type and distribution pattern of water flooding channels were analyzed using static and dynamic data. The water flooding channels developed in alluvial fan reservoirs are different from those in other clastic reservoirs. According to physical characteristics, these channels can be divided into two types, i. e., high-porosity and high-permeability channel, and relatively low permeability channel. The water flooding channels with diversified geneses were developed within different sedimentary facies belts, i. e., flow channel system in inner zone of root fan, sheet-flow lobe framework in outer zone of root fan and high energy channel in mid-fan zone. Significant differences exist in the distribution patterns of various water flooding channels and their controls on distribution characteristics of remaining oil. The flow channels are located in the upper part of single-phase channel flow gravels, mutually intersected and confluent to form a "tree-shaped" assemblage, while remaining oil is distributed in the section of channel-

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41372116)和国家重大科技专项(2011ZX05030-005-02,2011ZX05009-003)资助。

第一作者:冯文杰,男,1988年10月生,2011年获长江大学学士学位,现为中国石油大学(北京)地球科学学院博士研究生,主要从事储层地质学、油藏表征与建模研究工作。Email: fengwenjie1017@163.com

通信作者:吴胜和,男,1963年10月生,1983年获华东石油学院学士学位,1998年获石油大学(北京)博士学位,现为中国石油大学(北京)教授,主要从事储层地质学、油藏表征与建模的教学与科研工作。Email: reser@cup.edu.cn

flow gravels, where no flow channel incision occurs. The sheet-flow lobe framework present the optimal porosity and permeability in sheet-flow zones, shown as "hair bundle-shaped" divergence in 3D space, while remaining oil exists at the lateral margin and upper part of single sheet-flow lobe. In the mid-fan zone, high-energy channels are high-porosity and high-permeability broad band-like reservoirs, where single channel incisions are frequently superimposed, while remaining oil is enriched in small-scale low-energy channels with lower physical properties. At the fan edge, the reservoirs are characterized by simple architecture pattern, where run-off channels are small in scale and mostly isolated, while remaining oil mainly depends on the improvement of well development network and measures.

Key words: alluvial fan reservoir; reservoir architecture pattern; water flooding channel; large-pore channels; relatively low permeability channel; remaining oil

引用:冯文杰,吴胜和,许长福,夏钦禹,伍顺伟,黄梅,景亚菲.冲积扇储层窜流通道及其控制的剩余油分布模式——以克拉玛依油田一中区下克拉玛依组为例[J].石油学报,2015,36(7):858-870.

Cite:Feng Wenjie, Wu Shenghe, Xu Changfu, Xia Qinyu, Wu Shunwei, Huang Mei, Jing Yafei. Water flooding channel of alluvial fan reservoir and its controlling distribution pattern of remaining oil: a case study of Triassic Lower Karamay Formation, Yizhong area, Karamay oilfield, NW China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 858-870.

窜流通道又称为大孔道,一般认为是由于注水开发过程中,油层内部优势水进方向上长期受注入水的浸泡和冲刷作用,在强烈的水洗作用下形成的条带状高孔、高渗通道。窜流通道的形成导致注入水驱油效率快速降低甚至失效^[1]。前人从油田开发地质实际出发,认为大孔道是油层水窜的主要通道^[2-4],并从大孔道的成因^[5-6]、大孔道对剩余油的控制作用^[7-8]、大孔道识别与预测^[9-14]、大孔道的描述与工程封堵^[15-18]等方面做了大量工作。窜流通道的形成原因复杂,分布模式多样,并造成剩余油聚集特征复杂,严重影响油藏开发效果,一直是储层沉积学研究的热点和难点。

目前,对于窜流通道的研究还存在3方面的不足:

①国内外学者研究窜流通道的主要对象为河流相、三角洲相等类型的砂岩、粉砂岩储层,对于冲积扇、扇三角洲等类型砂砾岩储层的研究几乎空白^[19,20]。冲积扇砂砾岩储层非均质性极强,油水运动规律复杂,储层构型是控制油-水运动的重要因素之一^[21-23],但储层构型对窜流通道的控制作用研究并未得到足够的重视。②大多数学者将大孔道等同于高渗通道或者窜流通道^[24,25],这种认识来源于目前研究较为成熟的砂岩储层,而孔、渗非均质性突出的冲积扇储层内部尚存在非大孔道性质的窜流通道,并在生产实际中得到证实,相对低渗但孔、渗非均质性较低的储层同样可形成窜流通道。③冲积扇储层内部的窜流通道作为影响剩余油形成的主控因素,尚未得到足够的重视,当前冲积扇储层剩余油研究主要关注岩石相、沉积相等因素的作用^[26-30],储层构型和窜流通道对剩余油形成和分布的控制机制和剩余油的分布模式还有待研究。

本文采用丰富的取心、密井网及现代沉积等资料,通过对储层构型精细解剖,建立了合理的冲积扇储层构型模式,并在此基础上研究了冲积扇储层不同亚相环境内发育的窜流通道类型,分析了窜流通道形成的

主控因素、分布特征及其对剩余油分布的控制作用机理,最后总结了不同类型窜流通道控制的剩余油分布模式,为冲积扇油藏开发和剩余油挖潜提供一定依据。

1 研究区地质概况

克拉玛依油田一中区位于克拉玛依市东南12 km处,为一近矩形的区域,长约2.4 km,宽2.3 km。研究区分别与一东区、三(3)区、一西区相邻。一中区下克拉玛依组(克下组)油藏位于克-乌断裂带克拉玛依断裂东段上盘边缘断块内,北临北黑油山断裂,整体为一NW—SE向倾斜的单斜构造,地层倾角 $3^{\circ}\sim 6^{\circ}$,工区内部断层较少(图1)。

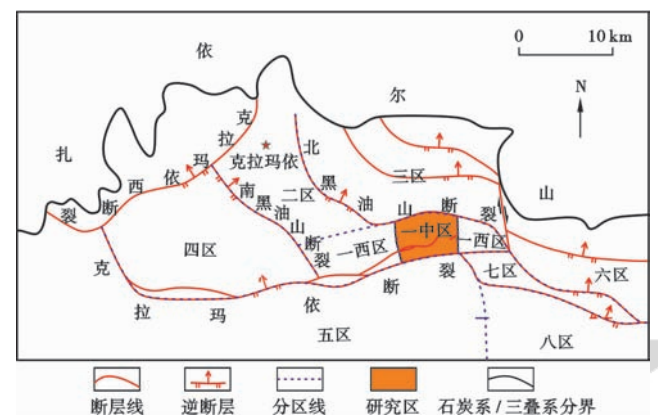


图1 研究区构造位置

Fig. 1 Location and structure settings of the study area

目的层三叠系克下组厚30~45 m,厚度分布较为稳定。垂向上可划分为 S_6 和 S_7 两个砂层组,进一步可划分10个单层(S_6^1 、 S_6^2 、 S_7^1 、 S_7^{2-1} 、 S_7^{2-2} 、 S_7^{2-3} 、 S_7^{3-1} 、 S_7^{3-2} 、 S_7^{3-3} 、 S_7^4),其中 $S_7^2-S_7^4$ 小层为主力油层。克下组发育干旱型冲积扇沉积^[31],形成一套砂砾岩为主的储层。储层岩性以不等粒砾岩、砂砾岩、含砾砂岩、中—粗砂岩为主,细砂岩含量较低。重矿物以钛铁矿

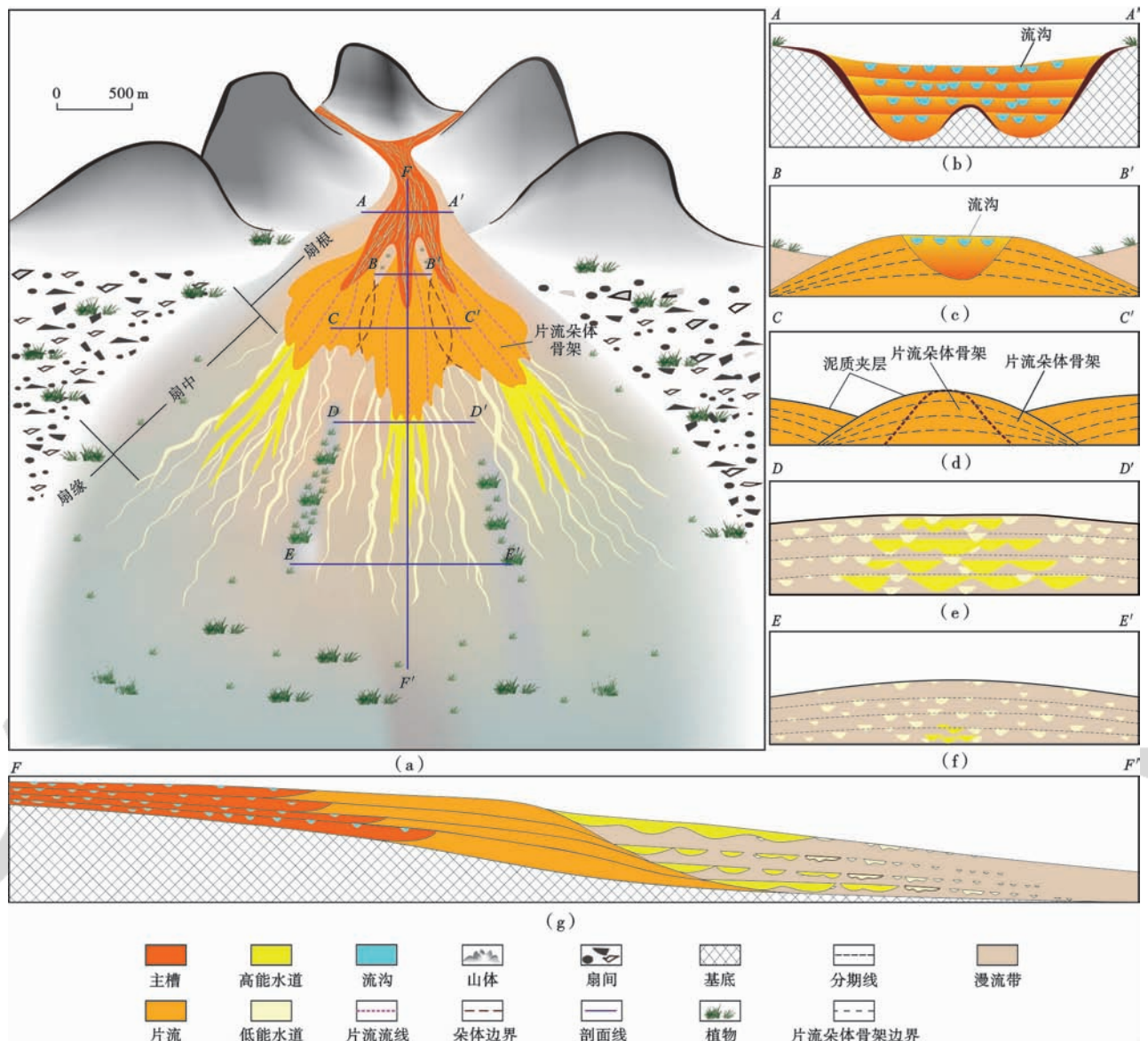
和褐铁矿为主,表明该区存在近物源沉积和快速堆积的特征。克下组属于一个三级层序的低位与湖侵体系域,由下至上,碎屑颗粒粒度由粗变细、分选性由差变好、磨圆程度逐渐增强(棱角状一次圆状),总体上呈现正旋回特征。泥岩由棕红色渐变为深灰色,表明在基准面不断上升的过程中,沉积环境由干旱—强氧化型逐渐向潮湿—弱还原型转变。此外,通过取心井观察,研究区内发现洪积层理、泥石流沉积等反映冲积扇沉积特征的沉积构造。综合分析认为,克下组属于冲积扇沉积,冲积扇的主体经过研究区中部^[26]。经过50余年的开发历程,目前研究区存在综合含水率高、产水量高、采收率较低、水驱效率低等问题。研究区目的层剩余油高度分散、分布规律复杂,挖潜难度较大。

2 冲积扇储层构型与储层质量差异分布

冲积扇储层总体上以碎屑流成因的砂砾岩和牵引流成因的砂岩为主,平面上和垂向上亚相分带性明显、各亚相之间沉积特征差异突出^[32-35],储层非均质性强。

2.1 冲积扇储层构型

干旱型冲积扇平面上按距离物源的远近可依次分为扇根、扇中、扇缘3个亚相,各亚相内沉积环境与沉积机制存在较大差别。通过研究区密井网解剖结合现代沉积分析,在单井构型要素识别的基础上进行了构型平面展布分析,确定了不同亚相带内的沉积特征,明确了不同亚相带之间的差异性,并总结了冲积扇储层构型模式(图2)。



(a) 冲积扇储层构型模式; (b) — (g) 冲积扇各部位剖面特征。

图2 冲积扇储层构型模式
Fig. 2 Reservoir model of alluvial fan

扇根主要形成于洪水事件的早—中期,碎屑流沉积物在出山口附近快速堆积而成,其主要的构型要素(5级)有槽流砾石体、片流砂砾体和漫洪沉积。这3种主要的构型要素均由沉积物快速地混杂堆积而成。前人研究中根据沉积特征差异和古地形差异将扇根进一步分为扇根内带(由槽流沉积形成)和扇根外带(由片流沉积形成)^[36]。

扇根内带槽流砾石体发育于山间沟槽之中。笔者认为,槽流砾石体由多个不同期次的槽流沉积在垂向上叠置而成。其岩性以中砾岩、细砾岩为主,并夹少量中细砂岩。槽流砾石体内部发育流沟(3级构型要素)。在洪水事件的后期或间洪期,小规模牵引流对前期堆积的碎屑流沉积进行冲刷改造形成小规模分支汇合状水道系统,并充填较细粒、分选较好的砂体,形成流沟沉积[图2(a)、图2(b)]。洪水事件之前,如果沟内空间未完全充填,则导致古地形起伏,后续沉积与流沟沉积无关。流沟沉积体岩性为中—细砂岩,测井曲线上,流沟砂体的地层电阻率为35~45 Ω·m,略低于槽流砾石体,显示为一定程度的曲线回返。

扇根外带片流沉积以片流朵体(5级)为基本单元,由多个不同期次的片流朵体(4级)在垂向上逐期叠加、侧向上来回摆动形成。片流沉积的岩性以细砾岩、小砾岩、粗砂岩为主。由于片流砾石体搬运距离较远,分选、磨圆更佳,其物性较槽流砾石体好。不同期次的片流朵体间往往存在泥质隔夹层[图2(a)、图2(d)]。单一期次的片流沉积呈平面上朵状,由槽流沉积末端撒开而成。在撒开过程中,碎屑物质在惯性和重力作用的控制下,水体快速撒开,水动力骤减。较粗的小砾、粗砂优先在朵体中心部位沉积,中—细砂、泥等较细碎屑物质则进一步向朵体边部搬运、沉积,并在片流朵体内部形成了明显的岩性和物性变化:由朵体中心向边部,岩性逐渐变细、泥质含量增加。岩心分析数据表明,朵体中轴部位的岩性较粗,孔隙度、渗透率均明显高于片流朵体边部。因此,笔者将片流朵体进一步划分为朵体骨架(3级)和朵体侧缘(3级)。片流朵体骨架沿古水流方向(片流朵体长轴方向)展

布,宽度约占片流朵体短轴的1/3,片流朵体侧缘分布在朵体外侧[图2(a)、图2(d)]。

扇中构型要素以辫流水道为主,由多期辫状水道复合而成。辫状水道发育于洪水事件中后期,此时碎屑流强度降低,牵引流占主导地位。由于洪水事件中后期与后期牵引流的水动力条件有所差异,且扇中不同部位沉积体对应的搬运距离存在较大差异,扇中辫流水道之间存在较大差异。在靠近片流朵体末端的部位,洪水尚未完全撒开,水流受惯性作用沿坡降最大的方向继续流动,形成水动力强于一般水道的高能牵引流沉积体,笔者称之为高能水道,相应地,水动力较低条件下形成低能水道。高能水道呈宽条带状发育于扇中沉积的近物源端[图2(a)、图2(e)],其岩性以中—粗砂岩为主,属于高孔、高渗储层。

随着洪水规模的进一步减小,到洪水事件后期,水动力减弱,高能水道消失,小股水道成为扇中沉积的主体。这一时期的水道在水动力强度、沉积物粒度、水道规模均明显有别于高能水道,笔者称之为低能水道[图2(a)、图2(e)和图2(f)],其岩性以细砂岩为主。

扇缘发育径流水道、漫流砂体、漫流细粒沉积等构型要素。扇中辫流水道在向远端延伸的过程中,水道逐渐分叉并在扇面上铺开,水道规模逐渐减小,单位面积内流量显著降低。水道进入扇缘环境之后规模明显小于扇中低能水道,且基本不存在交叉汇合的样式[图2(a)],前人研究称之为径流水道^[36]。由于不同期次洪水事件的规模存在差异,较大规模的洪水事件中,扇中低能水道可进一步延伸到扇缘,并切割先期沉积的径流水道。鉴于径流水道与低能水道并无本质区别,在此不作进一步讨论。

2.2 构型控制的储层质量差异分布

冲积扇储层属于粗碎屑岩储层,不同亚相环境下沉积物的粒度、分选、磨圆等特征均存在较大差异,因此,冲积扇储层具有较强的孔、渗非均质性。笔者在储层构型要素划分的基础上,对200余个分析化验数据进行统计分析,明确了克拉玛依油田冲积扇储层不同构型单元对应的储层质量的差异特征(表1)。

表1 冲积扇储层主要构型单元储层质量差异统计

Table 1 Reservoir quality statistics of the main architecture elements in alluvial fan

构型要素		孔隙度/%		渗透率/mD		
5级	4级	3级	均值	级差	均值	级差
槽流带	槽流砾石体	槽流砾石坝	15.68	3.62	79.02	217.23
		流沟	11.87	1.59	15.24	20.89
片流带	片流朵体	朵体骨架	18.78	1.35	253.78	60.53
		朵体侧缘	16.92	2.19	75.37	145.54
辫流带	辫流水道	高能水道	20.23	1.78	270.43	29.40
		低能水道	9.90	2.11	23.65	75.14
漫洪/流带	漫流砂体		8.13	2.43	6.04	118.57

根据岩心取样分析化验数据结合储层构型解剖成果分析,将冲积扇储层构型单元按物性优劣程度分为3个级次:①高孔、高渗型,即高能水道、片流朵体两类由高能牵引流沉积形成的构型单元。该类储层孔、渗性能最佳,且孔、渗非均质性总体较低。②中孔、中渗型,即碎屑流成因的槽流砾石体,该类孔、渗性能总体较好,但储层孔、渗非均质性突出,特别是渗透率级差达217.23,远高于其他构型要素。③低孔、低渗型,主要为低能牵引流成因的流沟、低能水道与漫流砂体,该类储层单元孔隙度、渗透率最低,且孔、渗存在一定的非均质性。

此外,值得注意的是,片流朵体(4级)内部同一成因的3级构型单元之间仍然存在明显的物性差异,朵体骨架的渗透率明显高于朵体侧缘,且朵体骨架的孔、渗非均质性较弱。

3 窜流通道类型与发育特征

3.1 窜流通道的分类

根据储层构型模式和储层质量差异的分布特征,结合油田生产实际,可将研究区窜流通道分为:大孔高渗通道和相对低渗通道。

3.1.1 大孔高渗通道

大孔高渗通道一般具有高孔隙度、高渗透率、分选好、非均质程度低的特征,在各类油藏中较为普遍。在冲积扇中该类储层形成于洪水事件中期,碎屑沉积物由山谷冲出口并沿扇体辐射方向撒开,并造成水动力骤降。水动力骤降导致较粗粒的碎屑物质(细砾、粗

砂、中砂)迅速沉积在出山口附近的扇根外带和扇中部位,形成较粗粒、分选好、初始孔隙度高的牵引流砂体。这类砂体在成岩过程中抗压能力强,在胶结作用弱的克下组储层中可形成大孔高渗通道。在注水开发过程中,该类储层最易形成窜流通道。

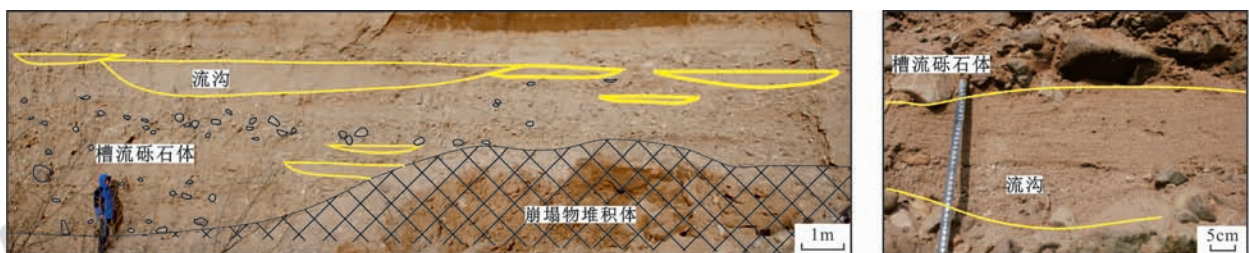
3.1.2 相对低渗通道

相对低渗通道是研究区冲积扇储层内发育的一类特殊的窜流通道,主要发育于冲积扇扇根内带。这类窜流通道本身相对于同一相带内其他类型的储集体而言,一般并不具有渗透率的优势,但往往分选较好、连通性强、非均质程度低。这类砂体粒度较细、原始孔隙度不高、抗压能力较弱,在成岩作用中孔隙度进一步减小,取样分析化验的渗透率也明显低于周围其他成因砂体。但该类砂体内部非均质程度较低,侧向上稳定夹层较少,平面上在顺古水流方向具有良好的连通性。因此,注水开发过程中,该类砂体经历一定时间的水洗作用后形成稳定的窜流通道。这类窜流通道规模往往较小,但能够控制大量的剩余油。

3.2 冲积扇不同部位窜流通道的类型与展布模式

3.2.1 扇根内带窜流通道

扇根内带储层以槽流砾石体为主,由于碎屑流沉积物堆积速度快、分选差、泥质含量高等原因,槽流砾石体内部非均质性极强[图3(a)]。通过岩心分析化验,槽流砾石体孔隙度和渗透率的平均值都较高,但槽流砾石体内孔、渗分布非均质性极高(表1),这主要是由分选极差的碎屑流沉积物快速堆积造成的。注水开发过程中槽流砾石体(砾石坝)内注入水波及范围通常较小。



(a) 冲积扇槽流砾石体内部的流沟,自下而上为一期槽流沉积体

(b) 流沟内部沉积构造,呈不明显的平行层理

图3 第四系冲积扇槽流砾石体与流沟分布特征

Fig. 3 Distribution of trench flow gravel-sand body and stream flow channels in a Quaternary alluvial fan

流沟是发育于槽流砾石体内部的3级构型要素,也是扇根内带的主要窜流通道砂体,其岩性以中—细砂岩为主。牵引流成因的流沟沉积物具有良好的磨圆性、分选性,泥质含量较低。因此,流沟沉积虽然孔隙度较低,但平面上顺古水流方向连续性强,孔、渗非均质程度低[图3(b)]。

在水驱开发过程中,流沟砂体一直受到注入水的稳定冲刷,受到一定时间的驱替后易形成窜流通道(图4)。此外,单期次槽流砾石体往往存在正韵律特征[图3(a)],

底部粒度最粗、分选磨圆性最差,孔、渗非均质性最强,向上粒度逐渐变细、分选磨圆性逐渐变好,孔、渗非均质性有所降低,造成垂向上储层吸水能力由下至上逐渐增强,进一步增强了流沟砂体遭受水洗的程度。流沟水道规模通常较小(厚1~3m,宽4~10m),一般位于各期槽流沉积的顶部。剖面上呈透镜状;平面上则呈“树枝状”,在主槽中呈窄带状交织,并向外逐渐发散,在出山口处形成逐级分支的交织水道系统。

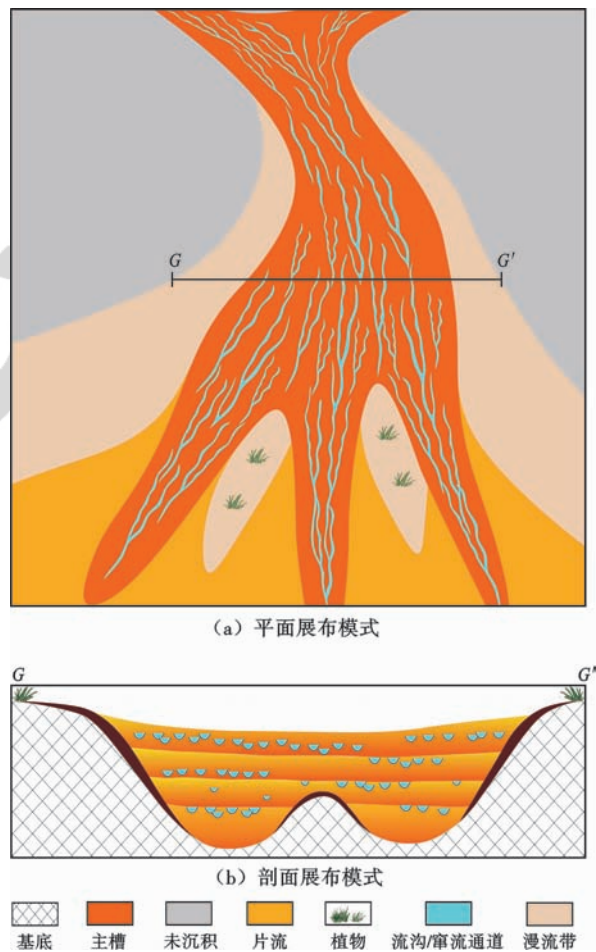


图 4 流沟分布特征

Fig. 4 Distribution of stream channels in proximal fan

3. 2. 2 扇根外带窜流通道

扇根外带的窜流通道是片流朵体骨架(3 级)。该类构型单元沉积的砂砾岩体由于碎屑颗粒粒度粗、分选、磨圆较好等原因,具有非常高的渗透性,砂砾岩体规模大,且具有较低的孔、渗非均质性,属于高孔、高渗的连片状储层(图 5)。

在开发中后期井距较小的情况下,注入水优先沿着片流朵体骨架突进,并快速形成窜流通道,而片流朵体边部往往由于朵体间夹层隔挡和自身物性较低影响,导致注入水难以波及,并加剧了朵体骨架的窜通程度。片流朵体骨架的发育受朵体的堆积过程控制。随着片流朵体的侧向迁移和垂向堆积,片流朵体骨架在平面上由各期槽流砾石体末端沿古水流方向呈辐射状撒开,在三维空间中,片流朵体骨架一般呈“发束状”顺源散开(图 5)。

单一片流朵体的规模受控于槽流沉积末端水动力的强度,研究区内片流朵体长轴约 600 m、短轴约 350 m。片流朵体内窜流通道一般沿朵体长轴方向呈椭球状展布,窜流通道的长轴与朵体长轴相当、短轴约为片流朵体短轴长度的 1/3。

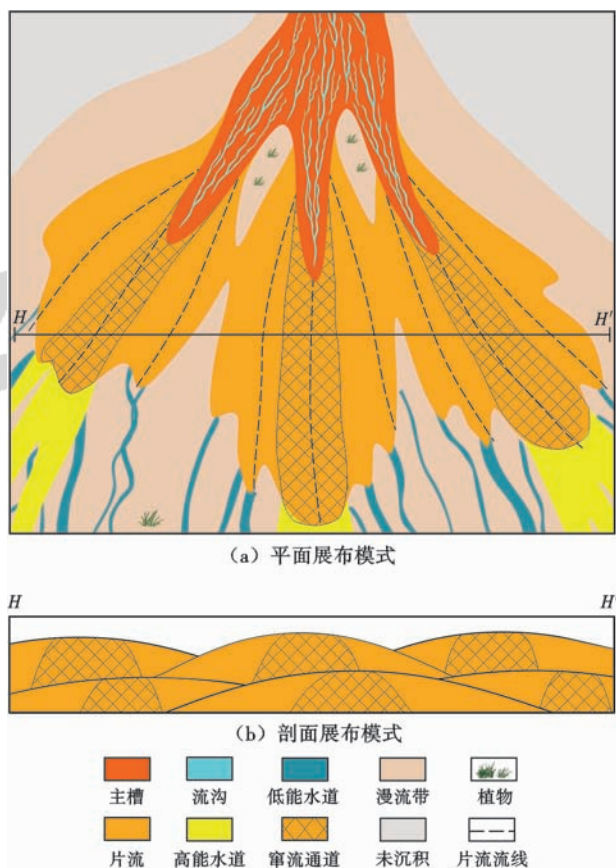


图 5 片流砂砾岩体内部窜流通道分布特征

Fig. 5 Internal flooding channel distribution of sheet-flooding sand-gravel body

3. 2. 3 扇中窜流通道

扇中亚相内多期辫流水道(高能水道和低能水道)在平面上分叉汇合、垂向上切割叠置。由于高能水道具有高孔隙度、高渗透性(表 1),且规模较大、钻遇率高,在水驱开发过程中,这类砂体将优先被水淹并形成稳定的窜通关系,并造成注入水旁超,注入水驱替范围减小,水驱采油效率降低。油田生产实践证明,钻遇高能水道的井普遍存在注水井吸水量高或采油井产液量大、含水率高的现象。平面上,高能水道呈“指状”发散,垂向上,高能水道切割叠置(图 6)。

高能水道属于片流沉积在扇中的延伸,其延伸范围最远可达扇中宽度的 2/3。研究区内高能水道规模较大,宽约 100 m、深约 5 m,是最主要的窜流通道类型。在沿冲积扇辐向撒开过程中,高能水道规模逐渐减小。

4 窜流通道控制的剩余油富集规律

剩余油的形成和分布受到多方面因素的共同控制,总体上分为内因和外因 2 种:①内因即储层非均质性;②外因为开发手段的局限性和开发过程与储层特征的非耦合性。在一定的开发井网和开发措施下,储层

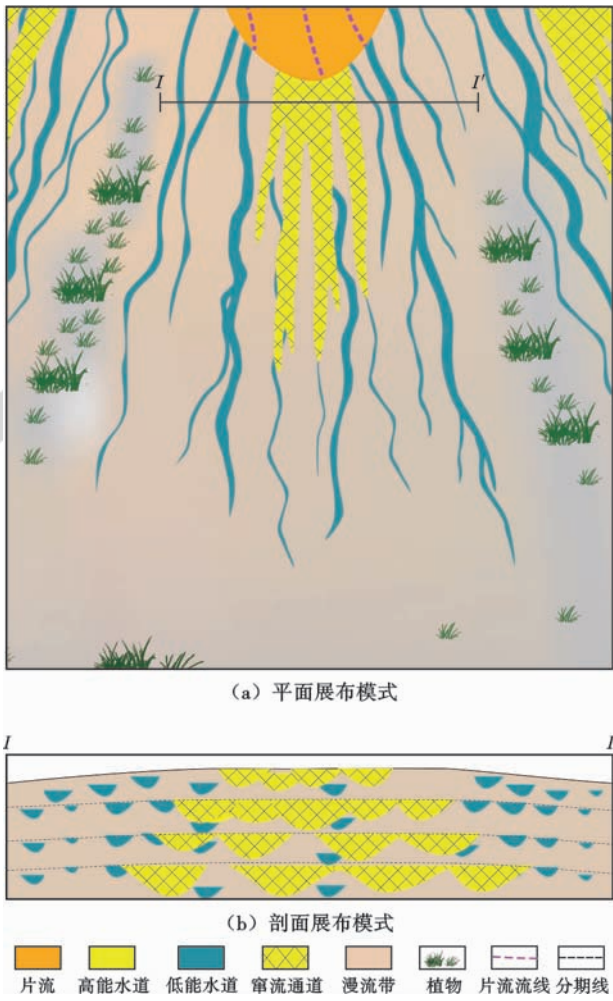


图6 扇中窜流通道展布模式

Fig. 6 Water flooding channel distribution model of middle fan

构型及其控制的储层质量差异是影响剩余油分布的主控因素,窜流通道在两者共同作用下形成^[37]。因此,本文以窜流通道为切入点,从层间和平面两个次级分析了不同类型的窜流通道对剩余油形成和分布的控制作用。

研究区下克拉玛依组主力层为 $S_7^4-S_7^{3-2}$ 。根据前文建立的储层构型模式,采取“层次分析、模式拟合、多维互动、动态验证”方法对各层进行储层构型解剖,分析窜流通道控制的剩余油分布特征,总结剩余油分布规律。

4.1 层间剩余油分布特征

储层层间非均质性是造成层间剩余油形成的主要控制因素。垂向上同一口井钻遇不同类型的储层(包括窜流通道砂体和非窜流通道砂体),在生产过程中,窜流通道具有较高的吸水能力或产液能力。在注水井中,窜流通道往往只需要较低的压力即可吸水,且吸水能力强,而此时非窜流通道砂体由于砂体规模小、物性较差等不同原因,导致不能吸水或者吸水量明显低于窜流通道砂体,并由此导致非窜流通道内剩余油富集。而在采油井中,由于窜流通道具有更高的孔渗性和稳

定的供液,其产液所需要的生产压力明显低于一般储层,也就导致窜流通道产液量高,经过长期水洗后,窜流通道的孔渗性进一步提高,导致油井高含水。因此,窜流通道是造成层间干扰的主要原因,层间剩余油主要分布于薄砂层、低孔渗层等层内,窜流通道对应的砂层内部也有不同程度的剩余油分布。

以一中区 T10174 井为例,该井钻遇低能水道、高能水道、片流砂砾岩体、槽流砾石体,并同时对片流砂砾岩体、低能水道进行射孔,各射孔段厚度相当。在生产过程中,片流砂砾岩体作为窜流通道已经达到高含水状态,片流砂砾岩射孔段产液量占 3 个射孔段的 81%,片流砂砾岩层的含水率达到 87.02%,远高于低能水道射孔段的含水率(10.39%和 76.87%)。在后续的生产过程中,生产措施不改变,该井含水率在投产后的第一个月内进一步迅速上升至 92%(图 7)。

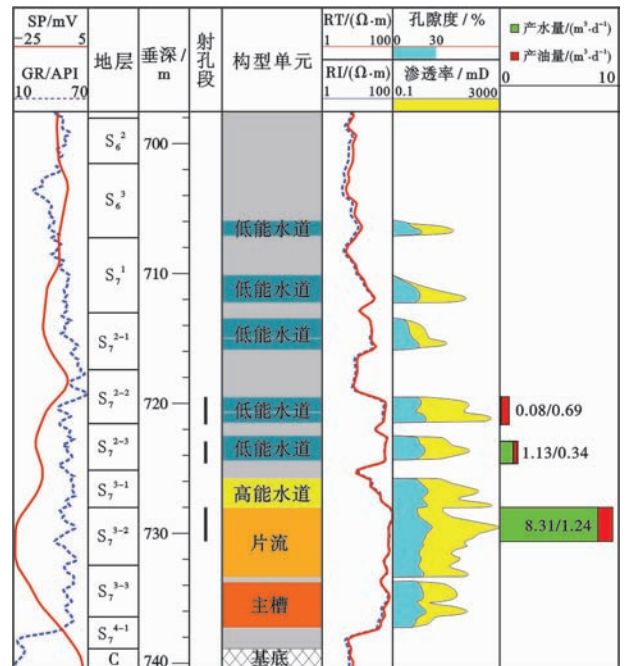


图7 一中区 T10174 井综合柱状图

Fig. 7 Column map showing stratigraphy, architecture elements, reservoir quality and production test of Well T10174

4.2 平面剩余油分布特征

4.2.1 扇根内带剩余油富集规律

扇根内带的窜流通道为流沟,平面上树状分布的流沟体系将槽流沉积“切分”成多个独立的砂砾岩体。以 S_7^4 小层为例,分析了窜流通道对油水运动与剩余油形成的控制作用。 S_7^4 小层内主槽流向为 NW—SE 向,主槽宽度约 2 km,深度 2~12 m,剖面上呈透镜状。主槽内发育网状交织的流沟,构成了网状的窜流通道系统,流沟宽度约 50 m,深约 0.8 m。槽流沉积体两侧的“坡”上发育漫流(漫洪)沉积[图 8(a)]。

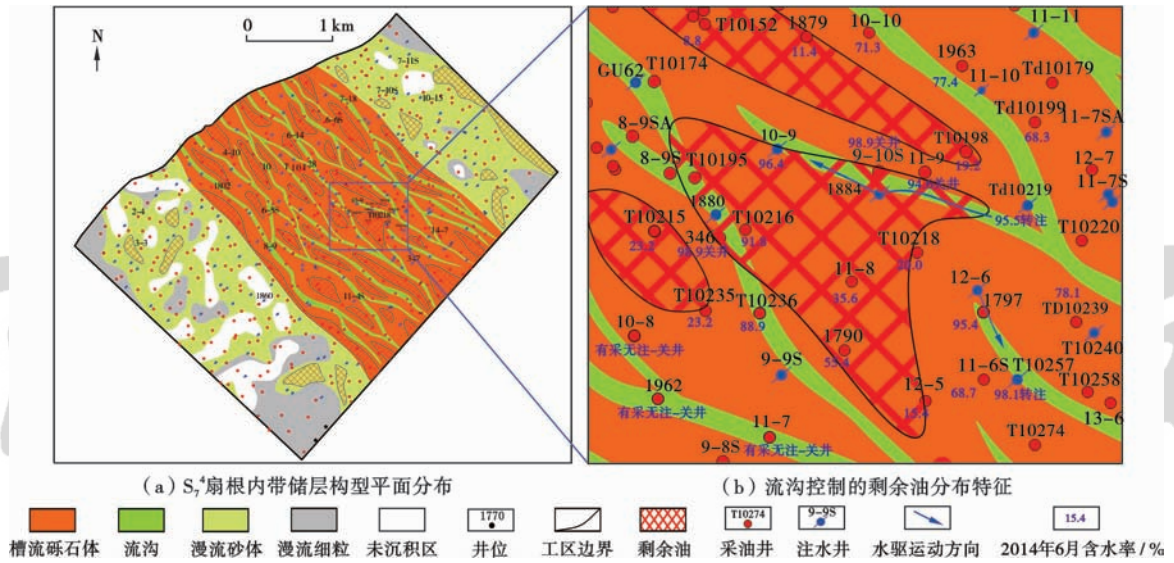


图 8 扇根内带窜流通道控制的剩余油分布

Fig. 8 Remaining oil distribution controlled by water flooding channels of the proximal fan

以 T10218 井为例,该井为 2012 年底新钻井,钻遇槽流砂砾岩体并射孔。距离该井约 300 m 的 SE 和 NW 向各有一口注水井 1884 井和 12-6 井,这 2 口注水井均在 2009 年之前开始持续注水,由于这 2 口注水井钻遇流沟或临近流沟,注入水沿流沟水窜,注水井波及面积小,位于槽流砾石坝内的 11-8 井不受效。T10218 井投产后,初期产油量为 8 t/d(其中 S_7^4 单层产油量 5.4 t/d,含水率为 25%),稳产 15 d 后维持在产油量 1 t/d 以下,注入水依然优先沿流沟水窜[图 8(b)],同样的现象还见于 T10215、T10235、T10198、T10152、12-5 井区,总体上,在采油井存在注采对应关系的条件下,离流沟越近的井水淹程度越高,远离流沟的部位往往存在剩余油连片富集[图 8(a)]。由此可见,注入水优先在流沟内突进导致了槽流砂砾体内剩余油富集。根据以上实例总结了剩余油分布特征,即平面上剩余油主要富集于砾石坝中部[图 9(a)]。

垂向上,单期次的槽流沉积往往呈正韵律,但槽流沉积底部孔、渗非均质性极强,导致槽流沉积体底部的注入水波及范围有限。而槽流沉积顶部储层孔、渗非均质性较低,注入水波及范围相对较大。更主要的是,流沟主要分布于槽流砂砾岩体的顶部,在流沟窜通的情况下,槽流砂砾岩体下部往往无法受效,因此,垂向上槽流砂砾岩体底部易形成剩余油富集[图 9(b)]。

4.2.2 扇根外带剩余油富集规律

扇根外带总体上连片性强、物性较好,平面上影响油水运动的主要因素是片流朵体内部的窜流通道及单一片流朵体顶部的泥质隔夹层。在储层构型解剖的基础上分析了扇根外带的剩余油富集规律。

经分析, S_7^{3-3} 层发育典型的扇根外带砂砾岩,扇根外带由多个片流朵体侧向叠加而成[图 10(a)],根据

前文对窜流通道类型和分布特征的研究,确定了该层窜流通道的平面分布[图 10(a)]。动态资料显示,位于单一片流朵体中部的窜流通道[图 10(c)]内的生

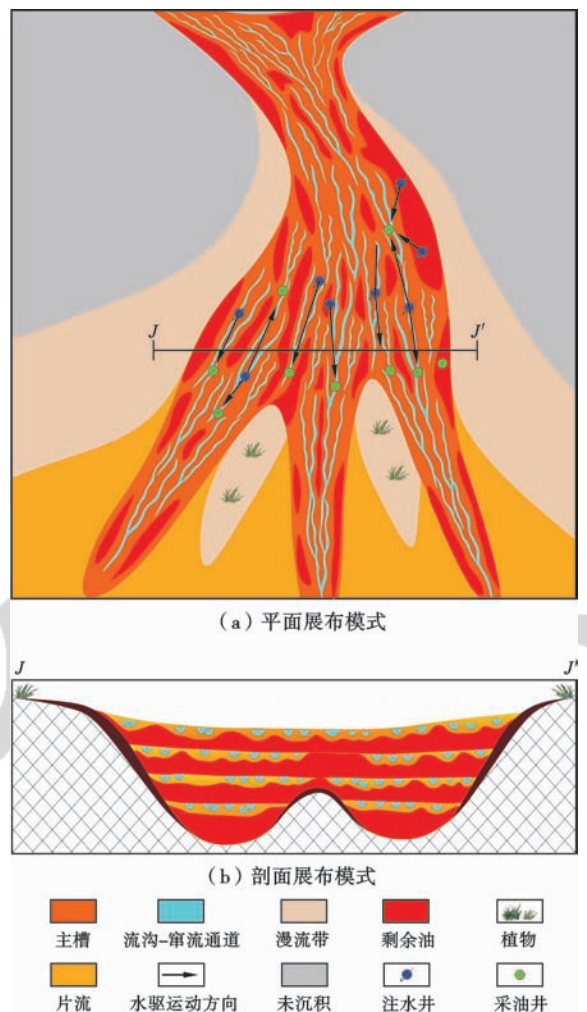


图 9 主槽内部剩余油分布特征

Fig. 9 Remaining oil distribution of the internal trench flow body

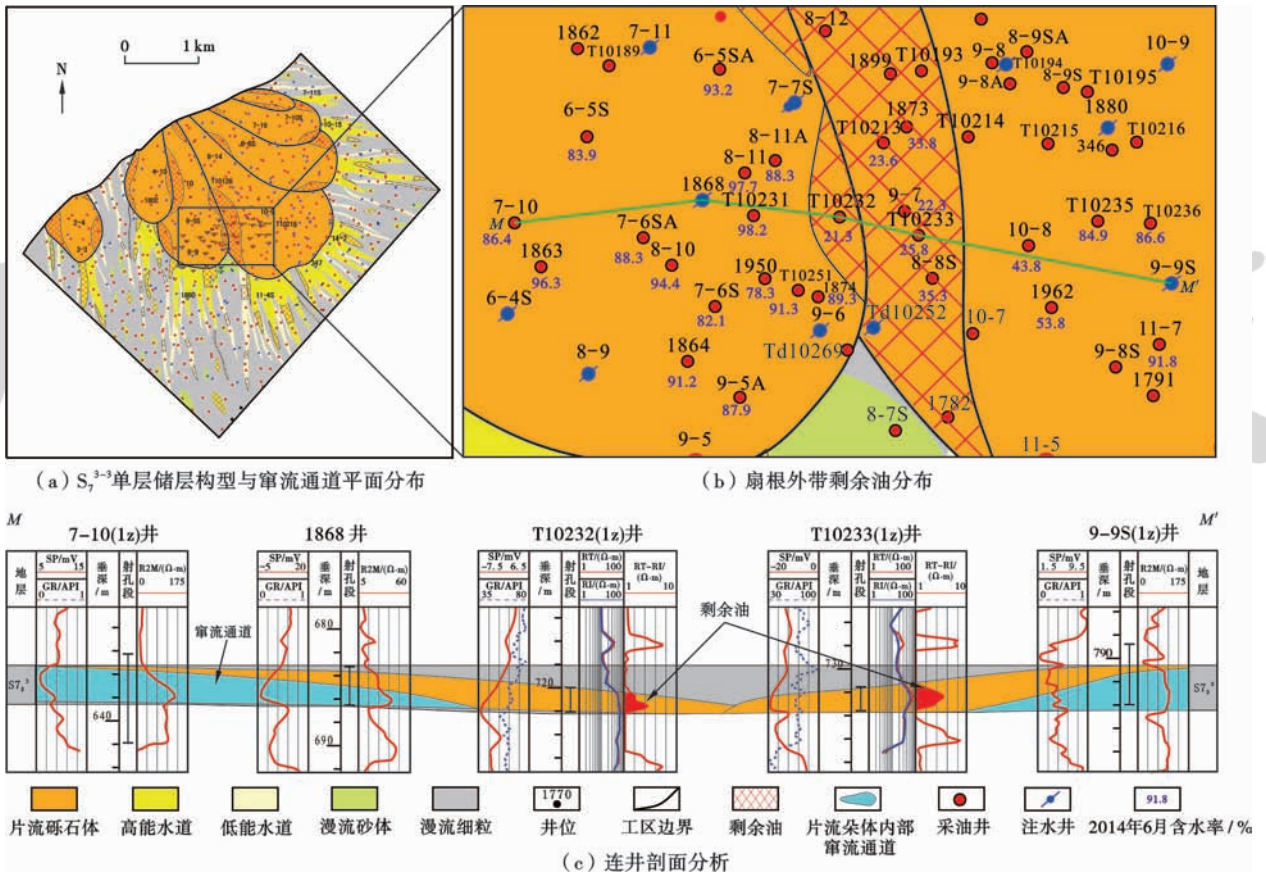


图 10 片流带剩余油动静态分析

Fig. 10 Reservoir architecture and production features analysis of sheet-flooding belt

产井月含水率平均达到 85% 以上,而位于单一片流朵体边部的采油井平均含水率低于 30%。以新检查井 (T10232 井、T10233 井) 为例进行分析,以上 2 口井于 2013 年投产,初期具有较低的初产含水率(含水仅 20%),深、浅侧电阻率曲线差值显示以上 2 口井钻遇的砂体内含油饱和度较高[图 10(c)],由此证明,在扇根外带,在片流朵体内部窜流通道的作用下,剩余油大量富集于单一片流朵体的边部。截至 2014 年 6 月含水率上升不明显[图 10(b)],显示在现有井网条件下注入水主要顺窜流通道优先突进,而位于窜流通道之外的部位往往驱替不足,造成该部位剩余油富集。

根据以上分析,总结了扇根外带剩余油富集规律(图 11),在片流朵体内部窜流通道(片流朵体骨架)的作用下,注入水由窜流通道快速流动,储层物性较差的片流朵体边部剩余油富集程度高,是剩余油挖潜的一个重要对象。垂向上,由于片流砂砾岩体总体上物性较好,孔、渗非均质性较弱,因此,注入水在重力作用下,存在着向朵体底部运动的趋势,朵体上部往往是剩余油富集的主要场所之一(图 11)。

4. 2. 3 扇中、扇缘剩余油分布规律

扇中高能水道属于窜流通道,相比于低能水道该类储层具有高孔、高渗、高连续性、砂体规模大等特点。

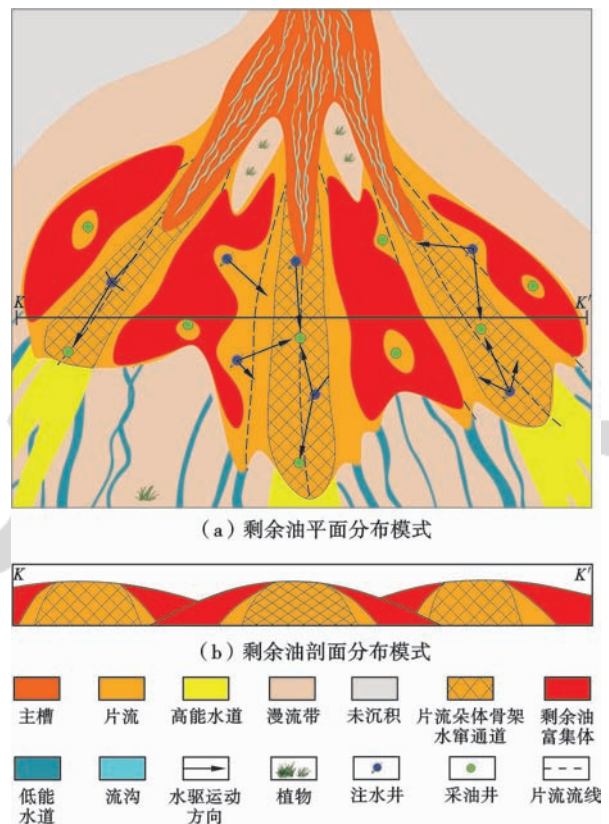


图 11 片流带剩余油分布模式

Fig. 11 Remaining oil distribution model of sheet-flooding belt

S₇³⁻² 单层以扇中沉积为主体, 发育高能水道、低能水道、漫流砂体 3 类储层 [图 12(a)]。根据前文对扇中窜流通道类型和分布特征的研究, 确定了该层窜流通道的平面分布, 高能水道沿着扇体的辐射方向发育, 形成指状分枝的窜流通道系统。

动态资料显示, 在高、低能水道切割叠置部位进行注水 [图 12(b)、图 12(c)], 9-6 井注入水沿着高能水道快速

水窜, 造成后续的检查井 T10269(1z) 井、TD10252(1z) 井 (2012 年投产) 钻遇部位水淹程度高, 达到强水淹级别 (含水饱和度达 86%) ; 而与此同时, 附近钻遇低能水道的 T10251 井剩余油饱和度较高 (含水仅 16%), 且在生产过程中产液能力较差, 2013 年单层测试显示, 该层产油量为 0.5t/d, 而含水率仅为 18%, 截至 2014 年含水率仍然保持在 30% 以下。

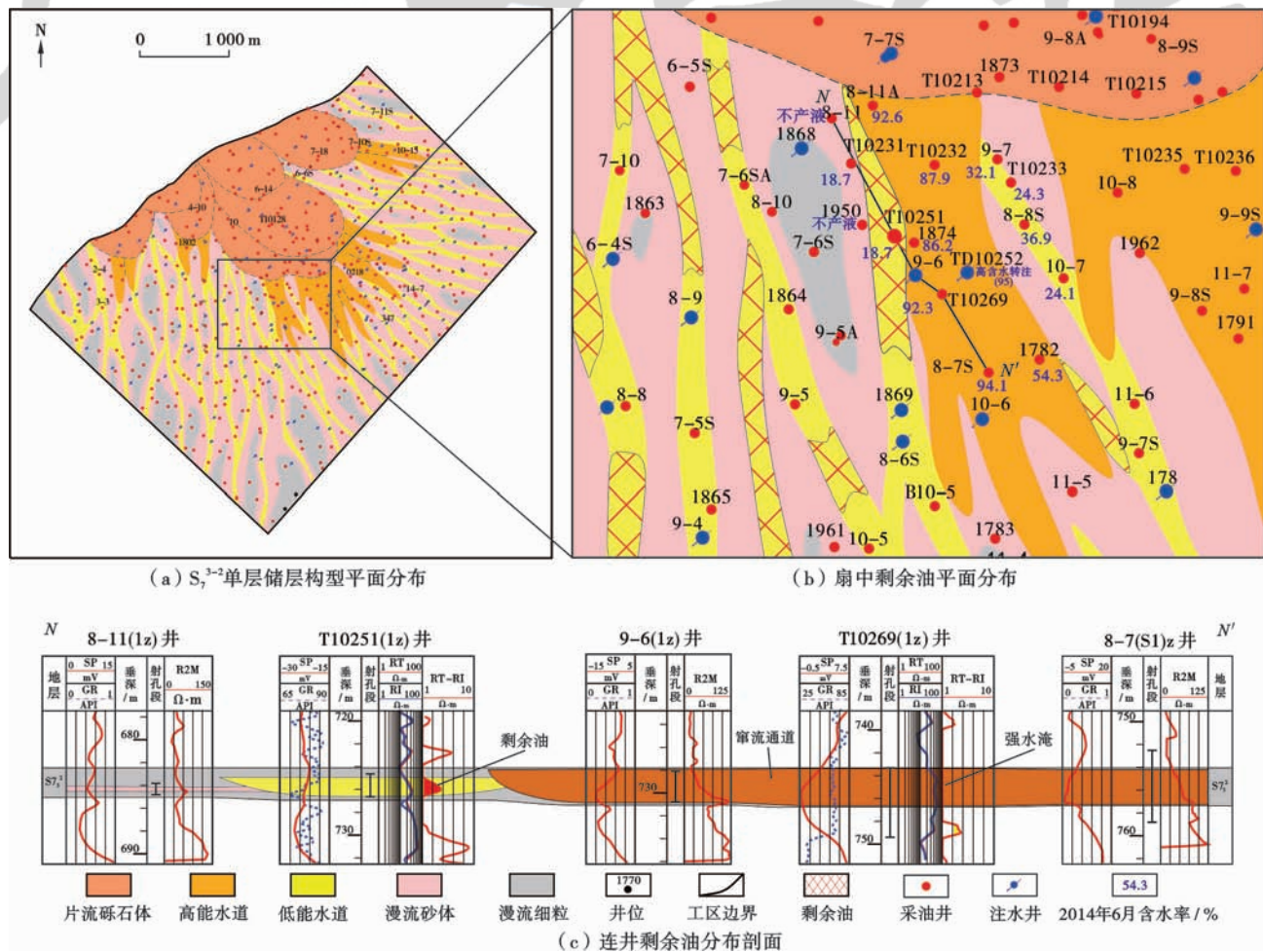


图 12 扇中、扇缘剩余油动静态分析

Fig. 12 Reservoir architecture and production features analysis of middle fan and distal fan

注入水一般沿着高能水道快速突进, 而低能水道成因的砂体和高能水道边部砂体则被旁超, 低能水道内部和高能水道边部易形成剩余油富集。根据以上分析, 总结了扇中、扇缘剩余油分布规律: 平面上, 扇中部位剩余油一般富集于高能水道附近的低能水道内和高能水道边部, 剩余油的平面分布范围受控于高能水道的分布特征, 主要发育于靠近扇根的扇中近端 [图 13(a)]。

垂向上, 高能水道一般位于期次面的底部, 注水开发过程中, 由于受到重力和储层质量差异 (孔隙度、渗透率垂向上呈正韵律特征) 的综合作用, 注入水优先水淹下部高能水道, 导致剩余油主要富集在同一期次扇

中沉积上部的低能水道中 [图 13(b)]。在生产实际中, 关闭钻遇高能水道的高含水井后, 其邻近范围内的井的生产状况能够得到有效改善。

扇缘部位剩余油主要分布于径流水道内部, 由于径流水道一般不存在交叉汇合的现象, 所以, 剩余油形成和分布的主控因素主要为注采井网完善程度。

5 结论

(1) 通过深入分析冲积扇储层构型模式, 重点研究了干旱型冲积扇扇中高能和低能 2 类水道的形成机制、特征和片流带片流朵体的叠置样式及其内部朵体

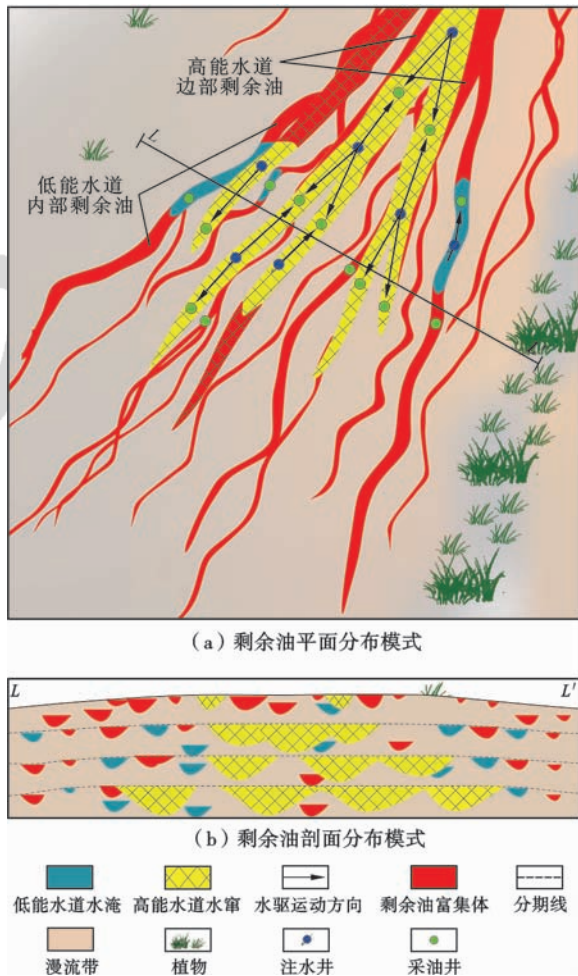


图 13 扇中、扇缘剩余油分布模式

Fig. 13 Remaining oil distribution model of middle and distal fan

骨架与侧缘的结构样式。在此基础上分析了不同储层构型要素的质量差异,冲积扇储层内各构型要素的孔隙度总体上差异不大(约 18%),而渗透率和孔、渗分布的非均质性差异明显。其中片流砂砾岩体和高能水道渗透率最大,约 100~1000 mD,储层孔、渗非均质性较弱;槽流砾石体、低能水道次之,约 10~100 mD,储层孔、渗非均质性较强;径流水道、漫流砂体孔渗性最差,储层孔、渗非均质性居中。除此之外,片流朵体骨架和侧缘存在明显的物性差异。

(2) 通过分析储层构型要素接触、叠置关系和不同构型要素储层质量差异共同控制的窜流通道类型,将窜流通道分为大孔高渗通道和相对低渗通道。其中大孔高渗通道主要分布于扇根外带和扇中,相对低渗通道主要集中于扇根内带。

(3) 分析了不同相带内窜流通道的类型和展布特征。扇根内带窜流通道为流沟,平面上具有“树枝状”分叉特征,由山间峡谷至槽流砾石体末端方向,流沟数量逐渐减少,流沟规模亦逐渐减小。扇根外带窜流通道为片流朵体骨架,片流朵体骨架在平面上由各期槽

流砾石体末端沿古水流方向呈辐射状撒开,在三维空间中,片流朵体骨架一般呈“发束状”分布。扇中发育的窜流通道为高能水道,主要分布于靠近片流朵体的扇中近端,平面上,高能水道呈“指状”发散,沿古水流方向高能水道规模逐渐减小,剖面上,高能水道呈透镜状,多期高能水道切割叠置频繁。

(4) 明确了扇根内带、扇根外带、扇中 3 个相带内窜流通道控制的剩余油形成和分布模式。在扇根内带,剩余油主要富集于槽流砾石体内部,平面上呈多个独立的片状展布,垂向上主要分布于每一期槽流沉积的下部;在扇根外带,剩余油主要富集于片流朵体侧缘,平面上主要位于单一期次片流砂砾岩体边部和不同期次片流砂砾岩体的复合部位,垂向上主要位于单一期次片流砂砾岩体物性较差的上部;扇中剩余油主要富集于注采对应差的低能水道内部和高能水道边部,平面上呈条带状分散于高能水道之间,而垂向上主要分布于同一期次扇中沉积上部的低能水道中。

参 考 文 献

- [1] 彭仕宓,史彦尧,韩涛,等. 油田高含水期窜流通道定量描述方法[J]. 石油学报,2007,28(5):79-84.
Peng Shimi, Shi Yanyao, Han Tao, et al. A quantitative description method for channeling-path of reservoirs during high water cut period[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 79-84.
- [2] 冯其红,齐俊罗,尹晓梅,等. 大孔道形成与演化过程流固耦合模拟[J]. 石油勘探与开发,2009,36(4):498-502.
Feng Qihong, Qi Junluo, Yin Xiaomei, et al. Simulation of fluid-solid coupling during formation and evolution of high-permeability channels[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 498-502.
- [3] 李中超,陈洪德,余成林,等. 严重非均质油藏注水开发流体动力地质作用[J]. 石油勘探与开发,2013(2):209-214.
Li Zhongchao, Chen Hongde, Yu Chenglin, et al. Hydrodynamic geology effect during the waterflooding of seriously heterogeneous reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013(2): 209-214.
- [4] 毛振强,谷建伟,董平志. 疏松砂岩油藏大孔道形成机理与预测[J]. 油气地质与采收率,2011,18(1):77-79.
Mao Zhenqiang, Gu Jianwei, Dong Pingzhi. Study on occurrence mechanism and prediction of big channels in loose cemented sandstone reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(1): 77-79.
- [5] 杨春梅,陆大卫,张方礼,等. 蒸汽吞吐后期近井地带储层的变化及其对油田开发效果的影响[J]. 石油学报,2005,26(3):74-77.
Yang Chunmei, Lu Dawei, Zhang Fangli, et al. Reservoir characteristics in the near region of thermal recovery wells and their effects on development of oilfield in the later period of steam stimulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3): 74-77.

- [6] 钟大康,朱筱敏,吴胜和,等.注水开发油藏高含水期大孔道发育特征及控制因素——以胡状集油田胡12断块油藏为例[J].石油勘探与开发,2007,34(2):207-211.
Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Wu Shenghe, et al. Characteristics and controlling factors of high capacity channels of reservoirs at high water cut stage: a case from Block Hu 12 of Huzhuangji oil-field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 207-211.
- [7] 彭红利,周小平,姚广聚,等.大孔道油藏聚驱后微观剩余油分布规律及提高采收率实验室研究[J].天然气勘探与开发,2005,28(3):62-65.
Pen Hongli, Zhou Xiaoping, Yao Guangju, et al. Laboratory research on microscopic distribution of residual oil after polymer driving and how to improve recovery factor for reservoirs with big porous channels[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2005, 28(3): 62-65.
- [8] 尹文军,陈永生,王华,等.水力探测大孔道和剩余油饱和度解释模型的建立[J].油气地质与采收率,2005,12(1):63-65.
Yin Wenjun, Chen Yongsheng, Wang Hua, et al. Building of the interpretation model of the large channels and remaining oil saturation by hydraulic survey[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(1): 63-65.
- [9] 窦之林,曾流芳,张志海,等.大孔道诊断和描述技术研究[J].石油勘探与开发,2001,28(1):75-77.
Dou Zhilin, Zeng Liufang, Zhang Zhihai, et al. Research on the diagnosis and description of wormhole[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(1): 75-77.
- [10] 谢峰,马艳,邓志展,等.下二门油田非均质大孔道油藏聚合物驱油矿场试验[J].石油勘探与开发,2001,28(4):86-88.
Xie Feng, Ma Yan, Deng Zhizhan, et al. A polymer flooding pilot test in a strongly heterogeneous reservoir of Xiaermen oil field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(4): 86-88.
- [11] 张士奇,卢炳俊,张美玲,等.水淹储层大孔道存在的分析与识别[J].大庆石油地质与开发,2008,27(6):76-79.
Zhang Shiqi, Lu Bingjun, Zhang Meiling, et al. Analysis and recognition of existed high-permeability belts in watered-out reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(6): 76-79.
- [12] 冯其红,史树彬,王森,等.利用动态资料计算大孔道参数的方法[J].油气地质与采收率,2011,18(1):74-76.
Feng Qihong, Shi Shubin, Wang Sen, et al. Identification of thief zones based on dynamic data[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(1): 74-76.
- [13] 牛世忠,胡望水,熊平,等.红岗油田高台子油藏储层大孔道定量描述[J].石油实验地质,2012,34(2):202-206.
Niu Shizhong, Hu Wangshui, Xiong Ping, et al. Quantitative description of high-capacity channels in Gaotaizi reservoir of Honggang oil field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 202-206.
- [14] 马代鑫,温鸿滨,赵明宸,等.水驱开发油藏流体通道描述及定量封堵技术[J].油气地质与采收率,2012,19(1):104-106.
Ma Daixin, Wen Hongbin, Zhan Mingchen, et al. Fluid channel description and quantitative sealing technique for water flooding oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(1): 104-106.
- [15] 戴彩丽,赵娟,姜汉桥,等.低渗透砂岩油藏注入阴阳离子聚合物深部调剖技术研究[J].石油学报,2010,31(3):440-444.
Dai Caili, Zhao Juan, Jiang Hanqiao, et al. Alternative injection of anionic and cationic polymers for deep profile control in low-permeability sand body reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 440-444.
- [16] 梁开芳,解通成,安炳生,等.示踪剂在胜坨油田封堵大孔道中的应用[J].石油勘探与开发,1993,20(1):100-104.
Liang Kaifang, Xie Tongcheng, An Bingsheng, et al. The application of tracer in the plugging of large pore channels in Shengtuo oil fields[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(1): 100-104.
- [17] 马佳,姜汉桥.聚合物驱区块窜流通道封堵技术界限研究[J].石油地质与工程,2009,23(4):116-118.
Ma Jia, Jiang Hanqiao. Study on technical limits for channeling the flow of road closure in polymer block[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009, 23(4): 116-118.
- [18] 郑强,刘慧卿,李芳,等.油藏注水开发后期窜流通道定量识别方法[J].石油钻探技术,2012,40(4):92-95.
Zheng Qiang, Liu Huiqing, Li Fang, et al. Quantitative identification of breakthrough channel in water flooding reservoirs at later stage[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 92-95.
- [19] 洪金秀,胥伟,涂国萍.河流-三角洲沉积储层大孔道形成机理及DLS测井曲线识别方法[J].大庆石油地质与开发,2006,25(4):51-53.
Hong Jinxiu, Xu Wei, Tu Guoping, et al. Generation mechanism of high permeability interbed in fluvial-delta depositional reservoir and DLS logging identification[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(4): 51-53.
- [20] 白振强.河流-三角洲储层大孔道形成机理研究[J].断块油气田,2007,14(4):7-9.
Bai Zhenqiang. Macroscopic throats forming mechanism of fluvial delta reservoir[J]. Fault-block Oil and Gas Field, 2007, 14(4): 7-9.
- [21] 商晓飞,侯加根,孙福亭,等.砂质滩坝储集层内部结构特征及构型模式——以黄骅坳陷板桥油田古近系沙河街组为例[J].石油学报,2014,35(6):1160-1171.
Shang Xiaofei, Hou Jiagen, Sun Futing, et al. Architectural characteristics and sedimentary models of beach-bar sandstone reservoirs: a case study of the Paleogene Shahejie Formation in Banqiao oilfield, Huanghua depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1160-1171.
- [22] 孙天建,穆龙新,吴向红,等.砂质辫状河储层构型表征方法——以苏丹穆格莱特盆地 Hegli 油田为例[J].石油学报,2014,35(4):715-724.
Sun Tianjian, Mu Longxin, Wu Xianghong, et al. A quantitative method for architectural characterization of sandy braided-river reservoirs: taking Hegli oilfield of Muglad Basin in Sudan as an

- example[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(4): 715-724.
- [23] 林承焰, 孙廷彬, 董春梅, 等. 基于单砂体的特高含水期剩余油精细表征[J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1131-1136.
Lin Chengyan, Sun Tingbin, Dong Chunmei, et al. Fine characterization of remaining oil based on a single sand body in the high water cut period[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1131-1136.
- [24] 丁圣. 特高含水期油藏剩余油形成与分布研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
Ding Sheng. The formation and distribution of remaining oil at extra high water-cut stage[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [25] 张红玲, 刘慧卿, 王晗, 等. 蒸汽吞吐汽窜调剖参数优化设计研究[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 105-108.
Zhang Hongling, Liu Huiqing, Wang Han, et al. Optimization design of profile control parameters for steam stimulation wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 105-108.
- [26] 朱志良, 熊迪, 岳渊洲, 等. 克拉玛依油田—东区克拉玛依组沉积相与剩余油分布关系研究[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(3): 112-118.
Zhu Zhiliang, Xiong Di, Yue Yuanzhou, et al. Relationship between sedimentary facies and remaining oil distribution of Karamay Formation in eastern block 1 of Karamay oilfield[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(3): 112-118.
- [27] 何辉, 宋新民, 蒋有伟, 等. 砂砾岩储层非均质性及其对剩余油分布的影响——以克拉玛依油田二中西区八道湾组为例[J]. *岩性油气藏*, 2012, 24(2): 117-123.
He Hui, Song Xinmin, Jiang Youwei, et al. Heterogeneity of sandy conglomerate reservoir and its influence on remaining oil distribution: a case study from Badaowan Formation in the mid-west of block II in Karamay oilfield[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2012, 24(2): 117-123.
- [28] 王晓光, 贺陆明, 吕建荣, 等. 克拉玛依油田冲积扇构型及剩余油控制模式[J]. *断块油气田*, 2012, 19(4): 493-496.
Wang Xiaoguang, He Luming, Lv Jianrong, et al. Configuration of alluvial fan and control mode on remaining oil in Karamay oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2012, 19(4): 493-496.
- [29] 白振强, 吴胜和, 付志国. 大庆油田聚合物驱后微观剩余油分布规律[J]. *石油学报*, 2013, 34(5): 924-931.
Bai Zhenqiang, Wu Shenghe, Fu Zhiguo. The distribution of microcosmic remaining oils after polymer flooding in Daqing oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(5): 924-931.
- [30] 侯健, 邱茂鑫, 陆努, 等. 采用 CT 技术研究岩心剩余油微观赋存状态[J]. *石油学报*, 2014, 35(2): 319-325.
Hou Jian, Qiu Maoxin, Lu Nu, et al. Characterization of residual oil microdistribution at pore scale using computerized tomography[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(2): 319-325.
- [31] 印森林, 吴胜和, 冯文杰, 等. 冲积扇储集层内部隔夹层样式——以克拉玛依油田—中一区克下组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(6): 757-763.
Yin Senlin, Wu Shenghe, Feng Wenjie, et al. Patterns of inter-layers in the alluvial fan reservoirs: a case study on Triassic Lower Karamay Formation, Yizhong area, Karamay oilfield, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 757-763.
- [32] Bull W B. The alluvial-fan environment[J]. *Progress in Physical Geography*, 1977, 1(2): 222-270.
- [33] Hornung J, Pflanz D, Hechler A, et al. 3-D architecture, depositional patterns and climate triggered sediment fluxes of an alpine alluvial fan (Samedan, Switzerland) [J]. *Geomorphology*, 2010, 115(3/4): 202-214.
- [34] Miall A D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 1985, 22(4): 261-308.
- [35] Stanistreet I G, McCarthy T S. The Okavango fan and the classification of subaerial fan systems[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 85(1/4): 115-133.
- [36] 吴胜和, 范峥, 许长福, 等. 新疆克拉玛依油田三叠系克下组冲积扇内部构型[J]. *古地理学报*, 2012, 14(3): 331-340.
Wu Shenghe, Fan Zheng, Xu Changfu, et al. Internal architecture of alluvial fan in the Triassic Lower Karamay Formation in Karamay oilfield, Xinjiang[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(3): 331-340.
- [37] 岳大力, 陈德坡, 徐樟有, 等. 济阳拗陷孤东油田曲流河河道储集层构型三维建模[J]. *古地理学报*, 2009, 11(2): 233-240.
Yue Dali, Chen Depo, Xu Zhangyou, et al. Channel reservoir architecture 3D modeling of meandering fluvial reservoir in Gudong oilfield, Jiyang depression[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(2): 233-240.

(收稿日期 2014-11-19 改回日期 2015-03-24 编辑 王培玺)