

基于高分辨率层序地层的储层流动单元研究

罗超¹, 罗水亮², 窦丽玮³, 程中疆⁴, 胡光明², 李林祥⁵

(1. 重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331; 2. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北武汉 430100; 3. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010; 4. 新疆油田黑油山有限责任公司, 新疆克拉玛依 834000; 5. 中国石化胜利油田分公司孤东采油厂, 山东东营 257000)

摘要:基于岩心分析、测井及生产资料, 针对马岭油田下侏罗统延 9 油层组辫状河储层纵横向相变快、非均质性强的特征, 通过确定层序格架内储层及渗流屏障空间分布, 优选参数将储层划分为 E、G、M、P 共 4 类流动单元, 结合测井交会分析、岩相相序解剖及沉积过程分析结果, 对层序格架内流动单元空间分布的控制因素进行研究。结果表明: 超短期旋回中, 储层颗粒的分选、粒度中值及杂基含量制约着延 9 储层的岩石物理性质与渗流能力, 使不同类型岩石相中沉积组构的差异特征控制着该级次流动单元的空间分布; 短期基准面旋回中的各类沉积微相内不同岩相的垂向组合影响着该级次流动单元的垂向差异分布; 沉积微相的平面分布与短期旋回内流动单元区带有良好的对应关系, 心滩、辫状河道沉积为 E、G 类优质流动单元分布优势区; 中期基准面旋回通过控制相序和相组合的变化, 使不同基准面位置处同类沉积微相呈现不同的砂体叠置样式及规模, 进而影响着各类流动单元相对比例的层间差异。

关键词:储层流动单元; 层序地层; 马岭油田; 延 9 油层组

中图分类号:TE 122

文献标志码:A

引用格式:罗超, 罗水亮, 窦丽玮, 等. 基于高分辨率层序地层的储层流动单元研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 22-32.

LUO Chao, LUO Shuiliang, DOU Liwei, et al. Research on flow units based on high resolution stratigraphic sequence [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(6): 22-32.

Research on flow units based on high resolution stratigraphic sequence

LUO Chao¹, LUO Shuiliang², DOU Liwei³, CHENG Zhongjiang⁴, HU Guangming², LI Linxiang⁵

(1. Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China;

2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

3. Research Institute of Liaohe Oil Company, CNPC, Panjin 124010, China;

4. Heiyoushan Company Limited, Xinjiang Oilfield, PetroChina, Karamay 834000, China;

5. Gudong Production Plant, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: The braided river reservoir of the 9th member of Yan'an Formation in Maling Oilfield had features of fast variation and strong heterogeneity. On the basis of core analysis, logging and production data, the spatial distribution of reservoir and barriers were determined in sequence stratigraphic framework. The reservoir was divided into E, G, M, P four types of flow units by preferred parameters. The controlling mechanism of flow units were analyzed in sequence stratigraphic framework, with the analysis result of well logging intersection, petrographic anatomy and depositional process. The results indicate that the petrophysics property and flowing ability are dominated by sorting, median grain size and matrix content, which contribute to the different sedimentary fabrics in different lithofacies of super-short cycles. The lithofacies association in different micro-

收稿日期: 2015-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472097); 重庆科技学院校内科研基金项目(CK2016B15)

作者简介: 罗超(1989-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为油气田开发地质。E-mail: lc_121989@163.com。

通讯作者: 罗水亮(1974-), 男, 副教授, 博士(后), 研究方向为油气藏描述与测井地质学。E-mail: luoshuiliang@sohu.com。

facies controls the flow unit variations in the vertical profile of short cycles. In the horizontal profile, the distribution of microfacies has an intern relationship with flow units. For instance, the bar and braided channel are advantageous microfacies relating with E and G flow units. Sand body stacked patterns and scales of similar microfacies are controlled by the sequence and facies association variation in middle-term cycles, which makes the interlayer differences in proportion of various flow units.

Keywords: flow units; stratigraphic sequence; Maling Oilfield; the 9th member of Yan'an Formation

流动单元是由非渗透层和层序界面分隔的,具有相同水动力条件和渗流特征的岩石体积单元^[1-3]。自1984年流动单元的概念及划分方法被提出以来,国内外学者不断探索从定性、半定量到定量的流动单元研究,目前发展趋势表现在:以多学科交叉为支点,动静态分析相结合,获取的全方位油藏信息为基础,并建立流动单元的三维乃至四维模型^[4-6]。中国学者在补充流动单元内涵、改进研究方法、扩大流动单元应用范围等方面做了大量有益尝试:吴胜和等^[7]总结了较为完整的陆相储层流动单元分析思路,陈烨非等^[8]应用随机模拟的方法进行了流动单元的井间预测,彭仕宓等^[9]提出基于不同阶段室内分析化验及生产动态资料的流动单元四维模型的建立,万琼华等^[10]提出基于储层构型的流动单元研究思路。更多的学者针对不同研究区探讨了模糊识别、主因子判别等储层流动单元划分方法及适用条件^[11-13],这些研究主要强调流动单元内影响流体渗流的地质参数间的差异性,对流动单元的空间分布、单元间渗流屏障及各级次地质界面的研究不够,未能从地质成因角度阐明流动单元空间分布规律。高分辨率层序地层学理论被广泛应用于小层对比、层序演化特征识别,因其技术方法的有效性,不少学者提出基准面旋回与流动单元间的层次对应关系^[14],但其研究的重心依然是层序格架内的流动单元划分过程,对各级次流动单元分布的控制机制未见详细阐述。由于流动单元反映的是特定的沉积环境下储层内部相似的储集特性和相对独立的流体运动规律,而不同级次基准面旋回是控制沉积物空间分配与储层形成的重要因素。通过层序边界的识别及等时沉积单元间的对比,将基准面旋回与流动单元的级次性一一对应,能将储集体划分成具有相近渗流及水淹规律的流动单元,并通过解释基准面旋回对流动单元的控制机制,对油田今后的剩余油挖潜工作有重要指导意义。笔者以马岭油田延9储层为例,依据384口井的钻井、测井、岩心及生产动态等

资料,通过层序地层分析确定层序格架内储层及渗流屏障空间分布,优选孔隙度和渗透率两个参数对流动单元分布进行研究,并结合测井交会分析、岩相相序解剖及沉积过程分析结果,分析各层次基准面升降变化对流动单元空间差异分布的控制作用。

1 区域地质概况

马岭油田位于鄂尔多斯盆地南部陕北斜坡构造带。受印支构造运动的控制,三叠系末期盆地区域性隆升,延长组被不均匀剥蚀^[15],形成洼地、残丘参差分布的古地貌特征。随着后期盆地的整体下降,到早侏罗世富县组发育了一套以填平补齐为特点的冲积扇—河流沉积体系,自下而上依次超覆于古残丘周缘。在下覆富县组沉积的基础上,继承性地发育了侏罗系延安组,自下而上按沉积旋回和岩性组合特征划分为延10、9、8、7、6、4+5共6个油组。主力含油层段为延9油层组,全区埋藏深度为1 299.8~1 636.0 m,为辫状河沉积储层。岩心物性分析、铸体薄片和压汞等资料表明,层序格架内延9储层岩性为中—细粒长石砂岩,颗粒分选较好,杂基含量约为15%,储层平均孔隙度为16.0%,平均渗透率为 $49.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为中孔、中—低渗储层。研究区拥有各类钻井384口,系统取心553 m,生产动态资料丰富。

层序地层学分析表明,延9与下部延10油层组构成一个完整的中期旋回,其中延9油层组为中期基准面旋回下降半旋回。延9内部发育数量丰富的冲刷面及河道底部滞留沉积,如取心井L128井1 425.3 m段,而类似L59井1 363.3 m段的洪泛泥岩构成了储层流动单元间的渗流屏障。根据短期、超短期旋回界面在岩心资料(冲刷侵蚀面、洪泛泥岩沉积)及测井剖面上的对比标志,将延9油层组至下而上划分为3个短期旋回(SSC1—SSC3),进一步识别出6个超短期(SSSC1—SSSC6)旋回(图1)。

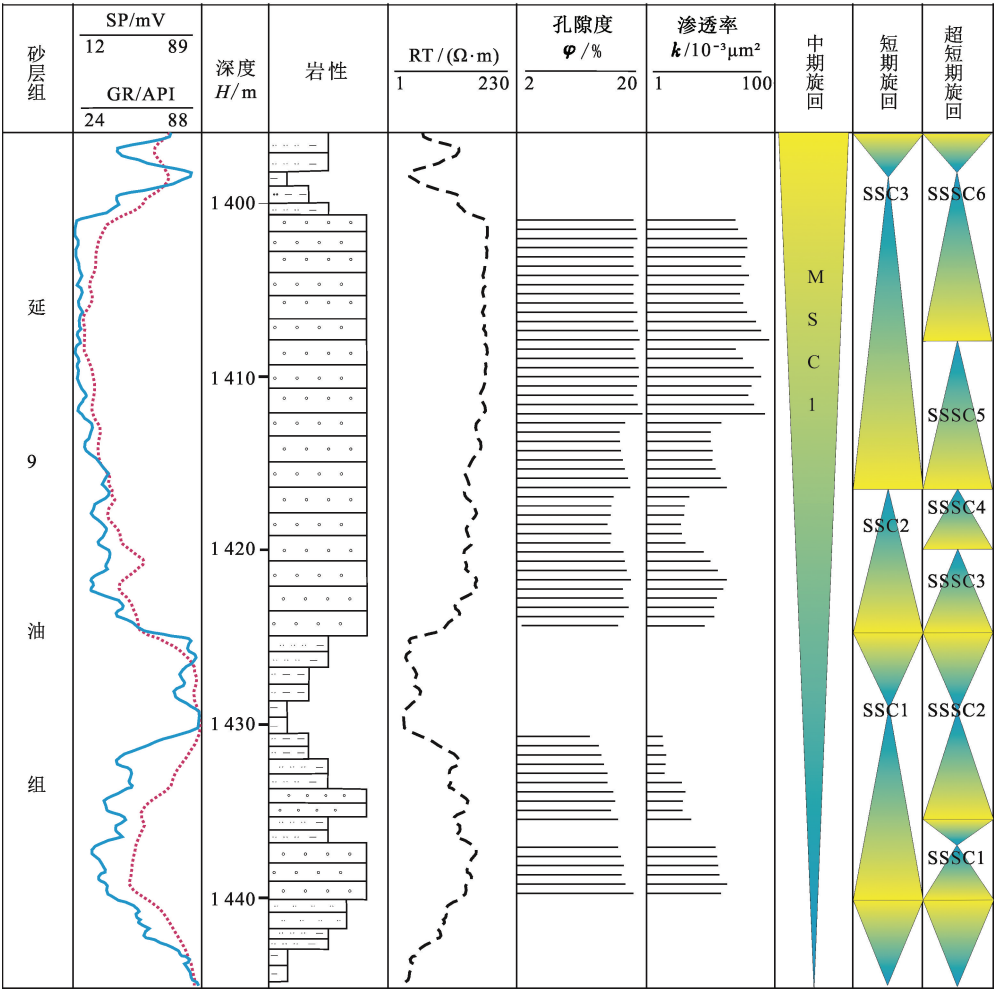


图1 L128 井高分辨率层序地层分析

Fig.1 High resolution stratigraphic sequence analysis of well L128

2 层序格架内的流动单元划分

流动单元的分类实质上是渗流单元的分类,与生产动态资料联系紧密。本文中结合马岭油田实际,基于层序格架内 L128、L59、L68 等 6 口取心井的分析化验数据及生产资料(每米采油指数),对各类参数与动态数据进行相关性分析以完成流动单元的划分。研究表明,孔隙度、渗透率与延 9 油层组生产数据相关性最好,其中渗透率的相关系数可达 0.9,因此在筛选各类分析化验数据时,仅取用孔隙度和渗透率,而未选用其他参数。原因在于孔隙度和渗透率是储层内部储集、渗流性能的综合反映,且与延 9 油层组生产实际的相关性最好、权重系数最大,可以有效地减少多种参数之间的相互干扰,同时渗透率、孔隙度数据的易获取性,使得流动单元划分的操作性更强。

在选定孔隙度、渗透率作为流动单元划分的定量参数后,首先以概率曲线作图法^[16]分析取心井样

品参数内孔、渗指标的分布及次总体分布,以界定 L128 等取心井流动单元分段特征及数量。以渗透率参数为例,渗透率概率关系曲线图上显示延 9 储层具有 4 种样本次总体的分布, $70\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、 $35\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、 $17\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 可大致作为流动单元间划分的界限(图 2),结合聚类分析的结果,将延 9 储层流动单元从优到劣划分为 E、G、M、P 共 4 类。

E、G、M、P 类流动单元在宏观、微观指标参数上的差异在压汞曲线、铸体薄片资料上有充分体现,从 E 类到 P 类流动单元随着渗流能力的降低,出现排驱压力增大、孔喉半径减小等特征。如 E 类流动单元渗透率大于 $70\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,孔隙度大于 18%;毛管压力曲线上显示排驱压力低于 0.03 MPa,且偏向于横坐标,呈较宽的平台特征;薄片资料可见颗粒间以点—线接触为主,孔喉半径大,且分布集中,分选、连通性好,歪度为正偏粗态,平均值为 $5.98\mu\text{m}$ 。G 类流动单元渗透率为 $(35\sim70)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,孔隙度一般为 15.8%~18%;毛管压力曲线平台较短,排驱压

力低于 0.05 MPa,孔喉连通性较好,分选好到中等,平均孔喉半径为 2.84 μm 。M 类渗透率为 $(17 \sim 35) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度大于 14.5%;毛管压力曲线平台较短或不明显,与 G 类在排驱压力特征上存在较大差别,一般大于 0.1 MPa,孔喉连通性、分选一般,平均孔喉半径为 2.01 μm 。P 类流动单元渗透率为 $(3 \sim 17) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度大于 12%;毛管压力曲线向右上方偏移,平台略发育,排驱压力远高于 0.1 MPa,孔隙虽发育,但喉道半径一般低于 1.11 μm ,整体以微细喉为主(图 3)。

明确取心井上 E、G、M、P 4 类流动单元的宏观、微观指标参数上的特征,建立各类流动单元的判别函数(表 1),样品点数据回判结果显示,E 类流动单元判定正确率均能达到 96.43%,G 类流动单元正判率为 97.44%,M 类流动单元正判率为 98.62%,P 类流动单元正判率为 96.88%,表明该方法适用于研究区流动单元划分(表 1)。从各单井的划分结果来看,流动单元的级次性与基准面升降有较好的对应关系:处于不同基准面旋回的同类微相,不同的叠置厚度特征,会造成流动单元类型及相对概率的差

异;不同微相不同的岩相组合特征,会导致不同流动单元组合的垂向叠加。

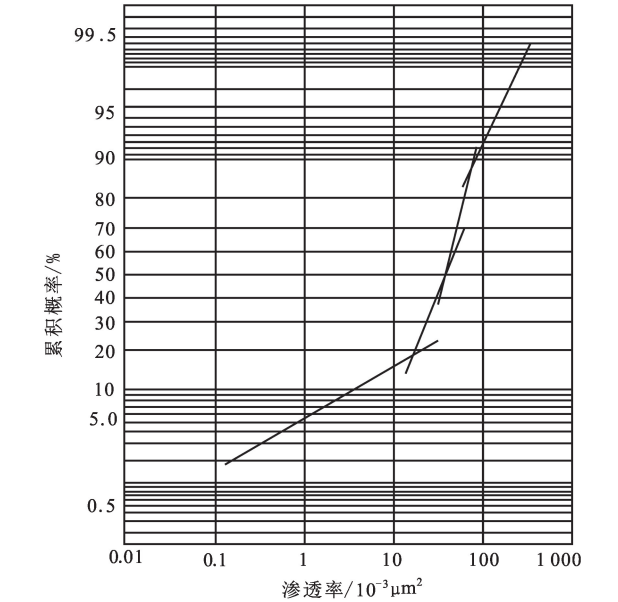


图 2 延 9 油层组渗透率分布概率曲线
Fig.2 Cumulative frequency curve of permeability in the 9th member of Yan'an Formation

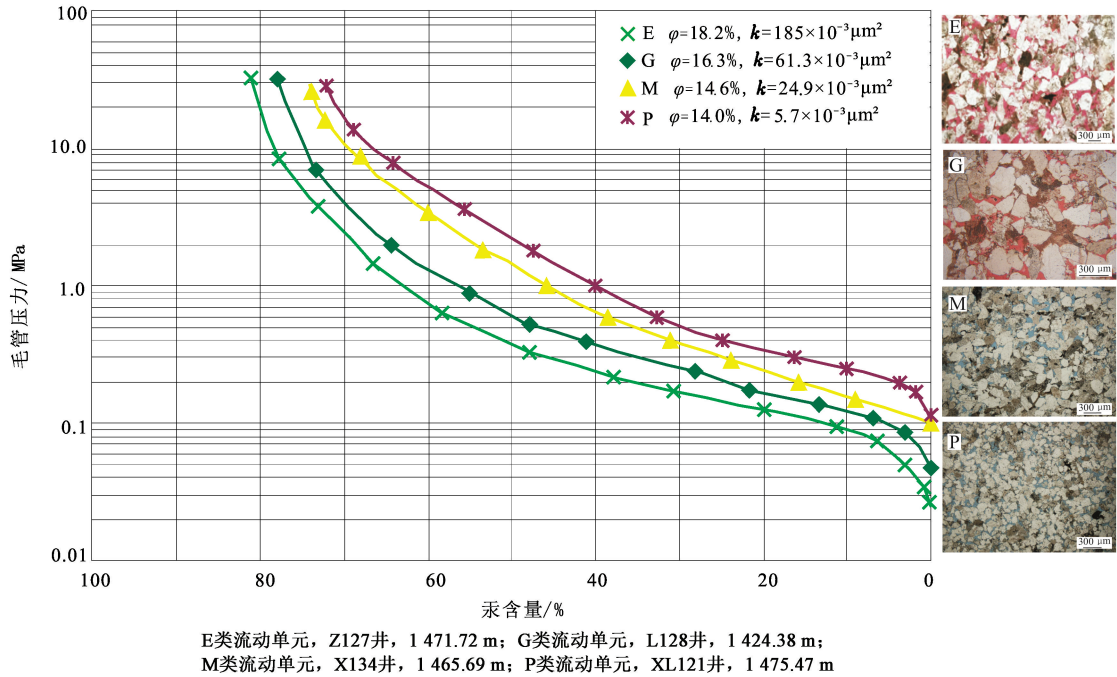


图 3 各类流动单元典型毛管压力曲线和镜下薄片
Fig.3 Typical capillary curves and photomicrographs in different flow units

表 1 各类流动单元判别函数

Table 1 Discriminate functions of various flow units

流动单元	判别函数	样品	误判	正确率/%
E 类	$Y=41.824\varphi-1.854k-312.10$	56	2	96.43
G 类	$Y=40.995\varphi-1.997k-290.48$	156	4	97.44
M 类	$Y=39.697\varphi-2.018k-270.14$	145	2	98.62
P 类	$Y=34.643\varphi-1.826k-205.09$	32	1	96.88

3 不同级次基准面旋回对流动单元的控制作用

基准面的升降转换导致可容纳空间与沉积物补给之间的相应变化^[17],使得相同沉积体系内沉积物的沉积过程、岩相组合及沉积结构也发生变化,而各级次的地层特征^[18]记录了各期次旋回的垂向组合过程,因此按照由小到大的旋回级次分析流动单元空间分布的规律。

3.1 超短期旋回对流动单元的控制作用

通过分析不同流动单元所对应的铸体薄片资

料,显示延 9 储层内的孔隙主要发育于颗粒间,边缘规则、分布均匀,为典型的原生孔隙特征(图 3)。统计孔隙类型构成情况,发现储集空间以粒间孔为主(占总孔隙度的 91%),其次为溶蚀孔(占总孔隙度的 5.8%)和晶间孔(占总孔隙度的 3.2%),裂隙孔几乎不发育。显然,超短期基准面旋回沉积序列内,在整体成岩作用强度差异性较小的情况下,储层的沉积组构特征(颗粒粒度中值、分选及填隙物等)对延 9 超短期旋回级次流动单元的空间差异性分布有明显控制作用。对延 9 油层组 91 个典型样品的沉积组构信息进一步分析表明,研究区各类流动单元内储层颗粒粒度中值越大、分选系数越小,储层孔隙度越高,流动单元中的储集能力越强,如分选系数小于 1.63(图 4(a))、粒度中值大于 0.35 mm(图 4(c))时,孔隙度值大于 16%。这主要是因为颗粒的粒径、分选与压实率呈明显的负相关性,颗粒粒度越粗、分选越好,则沉积后的压实强度越小,有利于粒

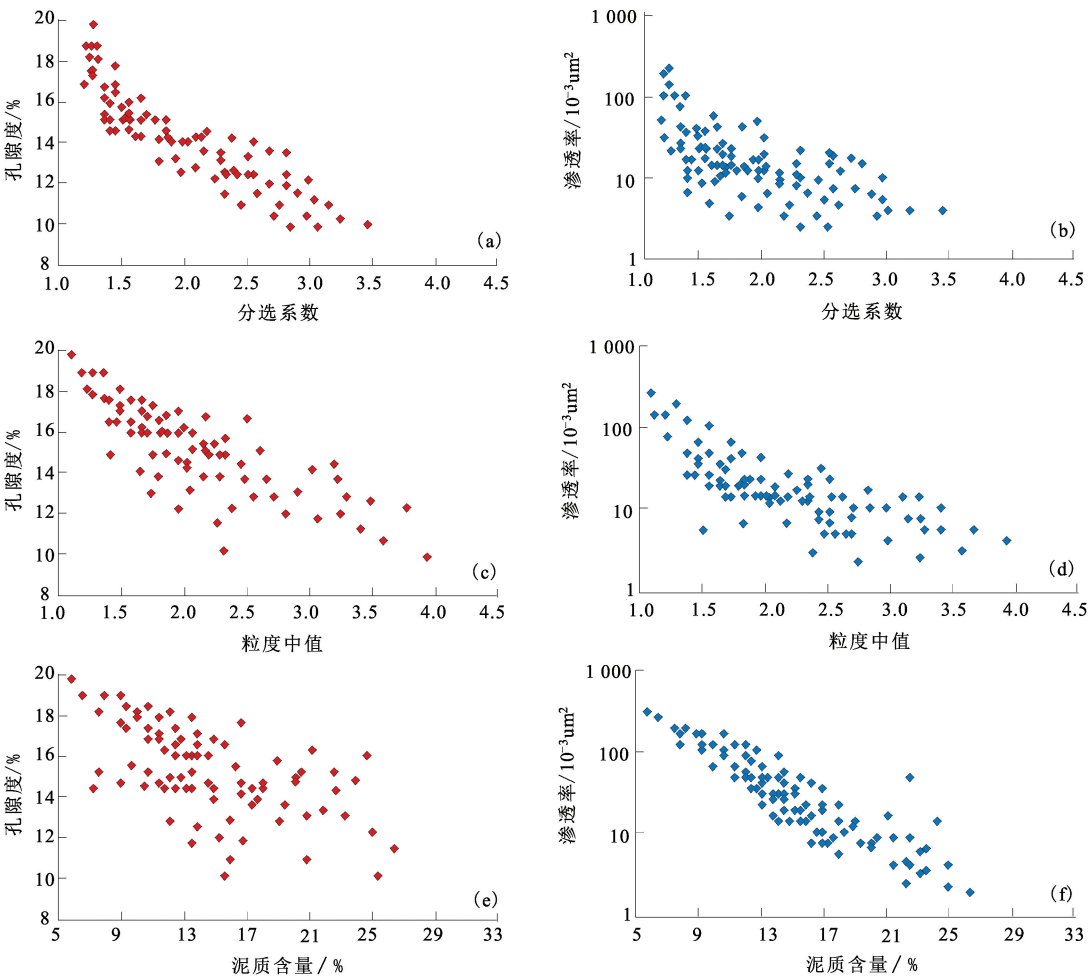


图 4 沉积组构与储层物性关系

Fig. 4 Relationship between deposited fabric and petrophysical parameters

间孔隙的有效保存。泥质含量与储层的孔隙度关系不甚明显(图 4(e)),对渗透率的影响却较大,随着泥质含量的增高,流动单元的渗流能力呈明显减弱的趋势,当泥质含量高于 26%(图 4(f))时,渗透率小于 $3\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。从薄片资料来看,这是因为塑性成分在压实过程中极易扭曲变形,挤入颗粒孔隙间堵塞喉道,极大地降低了流动单元的渗流能力。

超短期旋回由不同类型岩相构成,而各种岩相内的沉积组构差异是流动单元间特征差别的最好体现。L128 等取心井岩心资料显示,SSSC1—SSSC6 各超短期旋回内发育的 7 种岩相类型中,泥岩相(Mh)构成了超短期旋回内流动单元间的渗透屏障,块状砂岩相(Sm)位于超短期旋回底部与下部泥岩过渡层位,分选差、泥质含量高,渗流能力弱;而其他 5 种岩石相中的沉积组构特征、孔渗参数存在明显差异,其中孔隙度主要分布在 9.8%~21.3%,渗透率一般为 $(2.8\sim 98.7)\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ (表 2),使得流动单元间的储集、渗流特征呈较大的不同。

对 L128 等取心井 257 个样本进行归类统计表明,在流动单元储集性能方面,层理规模大、粒度较

粗的岩石相,其孔隙度明显好于层理规模小、粒度较细的岩石相。槽状交错层理砂岩相(St)粒度最粗、分选最好(粒度平均为 1.35,分选系数平均为 1.68),储集性最好(平均孔隙度 18.6%),往往构成 E、G 类流动单元;其次为板状交错层理砂岩相(Sp),而水平层理粉砂岩相(Fh)分选最差、粒度最细,孔隙度最低。

从流动单元渗流能力来看,以中砂为主的岩石相渗透率明显好于以细砂和粉砂为主的岩石相。这主要是因为中砂为主的岩石相在形成过程中河道能量高、杂基含量低,渗透率值高。6 种岩石相中,槽状交错层理砂岩相杂基含量最低、渗透率最高(杂基含量平均值为 13.4%,渗透率平均值为 $98.7\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$),其次为板状、平行层理砂岩相(平均杂基含量为 16.5% 和 18.5%,渗透率平均值分别为 $53.1\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 和 $36.4\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$);而波状层理砂岩相、水平层理粉砂岩相杂基含量较高、渗透率较低(杂基含量平均为 22.1% 和 25.6%,平均渗透率分别为 $16.3\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 和 $7.8\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$)。

表 2 不同类型岩石相的物性与组构特征

Table 2 Physical properties and fabric characteristics of lithofacies

岩石相	孔隙度/%		渗透率/ $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$		粒度中值		分选系数		杂基含量/%		流动单	样品
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	元类型	个数
块状砂岩相	6.7~13.1	10.2	0.1~9.8	2.8	0.73~1.15	0.91	1.78~3.65	2.74	19.1~28.7	24.3	P	15
槽状交错层理砂岩相	13.7~21.3	18.6	75.3~254.6	98.7	1.07~1.73	1.35	1.38~2.14	1.68	5.1~19.2	13.4	E、G	37
平行层理砂岩相	12.3~17.4	14.0	18.7~83.4	36.4	1.79~3.42	2.54	1.47~2.56	1.74	10.3~28.4	18.5	G、M	84
板状交错层理砂岩相	12.7~17.9	16.8	27.4~126.7	53.1	1.31~2.56	1.97	1.43~2.37	1.78	8.1~24.7	16.5	G、M	65
波状层理砂岩相	11.5~15.1	13.6	8.2~39.1	16.3	2.53~3.98	3.04	1.53~3.05	2.23	14.3~29.5	22.1	M、P	32
水平层理粉砂岩相	9.8~14.8	12.2	1.1~16.7	7.8	3.64~4.31	4.12	1.44~2.78	2.18	16.3~33.3	25.6	P	24

3.2 短期旋回对流动单元的控制作用

在旋回升降与水动力条件变化共同作用的过程中,短期旋回内 A/S 值规律性变化,制约着各类沉积微相内不同岩相的垂向组合,进而影响短期层序格架内的流动单元分布。研究区主要发育辫状河道、心滩、河道侧缘、漫溢沉积及泛滥平原 5 种沉积微相,其中泛滥平原沉积构成了短期旋回级次流动单元间的渗流屏障,剩余 4 类微相形成于不同的水动力环境,其内部岩石相类型与组合的差异导致了流动单元的分布差异。

3.2.1 辫状河道

辫状河道构成了延 9 储层 SSC1—SSC3 短期旋回内最主要的储层类型,整个微相内的岩相组合序列代表了短期基准面旋回内基准面 上升的旋回过程。短期基准面上升早期,沉积物供给充足,水动力

条件强,堆积系数高,形成厚度和规模较大的槽状交错层理、板状交错层理,流动单元类型以 G 和 M 为主。随着基准面的持续上升,A/S 值变化,由早期的强水动力条件变成水浅流急的水动力条件,层理样式及规模变小,以发育平行层理砂岩相、波状层理砂岩相为特征,沉积物变细、泥质变多,多发育 M 和 P 类的流动单元,由于后期河道沉积的冲刷、侵蚀作用,顶部的平行层理砂岩相、波状层理砂岩相往往缺失。末期发育一套具水平层理的泥岩沉积,作为下部流动单元与上部储层间的渗流屏障,也代表该期次河道沉积的终结。如 X134 井 1 475 m 深度段的辫状河道沉积(图 5(a)),整体具有向上变细的正韵律结构,形成“Sm—St—Sp—Sh—Sr”(块状砂岩相—槽状交错层理砂岩相—板状交错层理砂岩相—平行层理砂岩相—波状层理砂岩相)的垂向叠加序列,层

理规模向上变小。其中槽状、板状交错层理砂岩相两种岩相常占旋回序列总厚度的 55%,而块状砂岩相一般厚度较小,分布于组合的底部,与冲刷面伴生,整体垂向上构成“G+M”的流动单元组合样式。

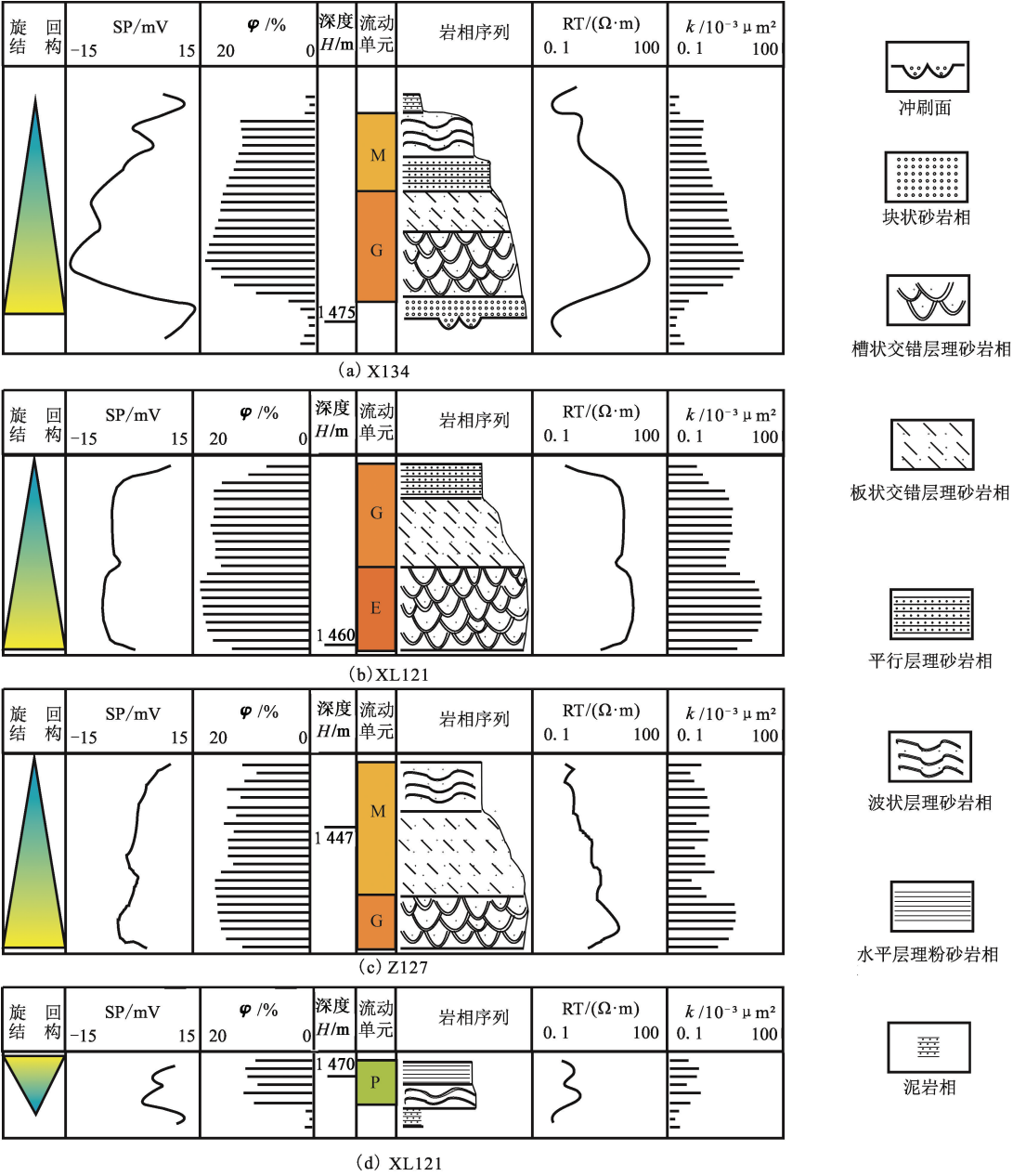


图 5 短期旋回中各沉积微相内岩相组合

Fig. 5 Association model of lithofacies in microfacies of short-term cycle

3.2.2 心 滩

心滩沉积岩性粒度粗,以粗—中砂岩为主,向上粒度变化不明显,整体呈现较均一的沉积韵律。自然电位和电阻率曲线以典型的中高幅箱型为主,反映了物源供给相对充足的稳定沉积环境。早期河道断面窄,水深流急,主要发育槽状、板状交错层理砂岩相,随着河道的加宽,水体深度、流量大小及沉积物供给等变小,岩相类型过渡为以平行层理砂岩相为主。沉积后期具有水浅流急的水动力条件,沉积

作用也由早期的顺流加积、侧积为主变为后期的垂向加积为主。如 XL121 井 1460 m 深度段的心滩沉积(图 5(b)),为“St-Sp-Sh”的垂向叠加序列,层内不稳定的泥质夹层发育较少,反映出较小的泥砂比,在砂岩结构特征上显示为基质充填物较少,颗粒分选性好,储层储集、渗流能力强,垂向上构成“E+G”的流动单元组合样式。

3.2.3 河道侧缘

河道侧缘是延 9 辫状河道沉积的边部,其岩相

序列与辫状河道有一定的相似性。由于水动力较弱,韵律段底部并不发育块状砂岩相及与之伴生的冲刷侵蚀面,反映强水动力的 St、Sp 岩相厚度及规模也明显小于辫状河道沉积,抗压实能力差,储层储集、渗流能力较弱,相对应的流动单元以 M 类为主。如 Z127 井 1 447 m 深度段的河道侧缘沉积(图 5(c))形成“St-Sp-Sr”的垂向叠加序列,M 类流动单元占据旋回厚度的 75%,G 类流动单元只在旋回底部发育。

3.2.4 漫溢沉积

漫溢沉积以小型波状层理的细砂岩及水平层理的粉砂岩沉积为主要特征,岩性粒度细、厚度薄,层序内部往往发育泥质夹层,常构成以 M、P 类流动单元为主的孤立分布特征,反映出水动力间歇式变化的沉积环境。可与辫状河道组合构成完整的短期基准面序列,由于后期河道的切割、充填作用,该类型的岩相组合较难保存。如 XL121 井 1 470 m 深度段的漫溢沉积(图 5(d)),形成“Sr-Fh”的垂向叠加序列,泥质含量高,使得这种类型的储层物性较低,以 P 类流动单元的样式孤立分布。

平面上,流动单元的展布特征受控于沉积微相的平面分布,各流动单元的边界范围、生产能力与微相边界有良好的对应关系。如图 6 所示,X24-20 井区短期旋回 SSC2 内的 E 类流动单元一般处于河道的中心部位或是心滩发育位置,常呈土豆状或窄带状小范围分布,连片程度差,原始含油饱和度高。处于该类流动单元内的油井累计产量高,开发后期水淹严重,如位于东北部的 X24-20 井,投产初期原油日产量 10.1 t,含水率 0.0%,目前累计产油 3.25 万 t,含水率约 95.8%。G 类流动单元在平面分布范围最大,与 E 类在平面上相邻,主要分布在主河道微相区,平面连片性好,呈宽带状分布。该类流动单元内储量动用较均匀,是主要的生产动用流动单元,位于该类流动单元中的井水淹程度相对较低,含有一定的剩余储量,为油田下一步剩余油挖潜的重点区带。如西南部 X31-16 井投产初期日产量 7.4 t,含水率 12.8%,累计生产原油 2.11 万 t,目前含水率 76.8%。M 类流动单元平面分布较广,其主要分布在河道侧缘,含油性较差,非均质性较强,但水洗程度较低。如 X34-20 井当前含水率 65%,具有较大的剩余油挖潜空间。该类流动单元分布范围较大,呈带状分布,由于动用程度低,为油田下一步剩余油挖潜的有利区带。P 类流动单元属于漫溢沉积及河道边部向泥质沉积过渡的区域,是渗流能力较差和

动用程度较低的流动单元,注水见效程度低,原始含油性较差,因而不是剩余油分布的主要区域。

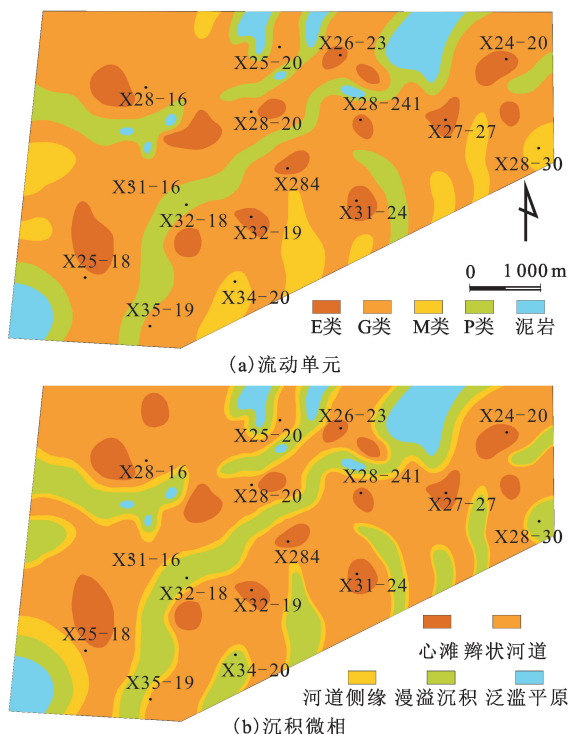


图 6 X24-20 井区短期基准面旋回 SSC2 内流动单元和沉积微相平面分布

Fig. 6 Planar distribution of flow units and microfacies in SSC2 of well X24-20 area

3.3 中期旋回对流动单元的控制作用

在中期旋回不同的基准面位置,基准面升降控制着相序和相组合的层间变化,使得同类沉积微相呈现不同砂体叠置样式及规模,进而控制着短期旋回间的储层流动单元分布差异。

以辫状河道微相砂体为例,在中期基准面旋回下降期早期 A/S 值较高,较低的沉积物供给能力使河道砂体厚度、规模较小,河道砂体的连续程度较差。统计表明在 SSC1 短期基准面旋回内,辫状河道砂体厚度分布呈现明显的双峰态,峰值分别为 2~4 m 和 6~8 m(图 7),平均厚度 5.9 m,砂体呈孤立透镜状分布,空间连续性较差。当基准面持续下降时,砂体的垂向厚度及平面展布范围增大,平面上呈连片状分布,沉积水体携带粗粒沉积物质的能力增强,造成同一口井位置后期发育的河道砂体较前期砂体粒度粗、分选性变好,因此在中期基准面下降中晚期 SSC2、SSC3 旋回内可容纳空间下降到最低过程中,沉积水流冲刷作用增强,不同期次的河道砂体在平面及空间上相互交叠、切割,储层连通性增强。此时切叠式河道砂体广泛发育,垂向上复合砂

体厚度大,厚度大于8 m的辫状河道砂体分别占53%和50%,砂体平均厚度分别为8.3和7.8 m。

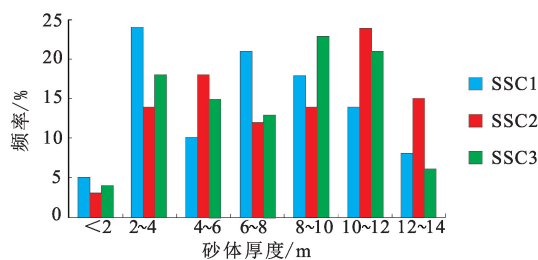


图7 延9油层组辫状河道砂体厚度分布直方图

Fig.7 Channel sandbody thickness block diagram in the 9th member of Yan'an Formation

同类沉积微相中,这种砂体厚度的垂向差异对

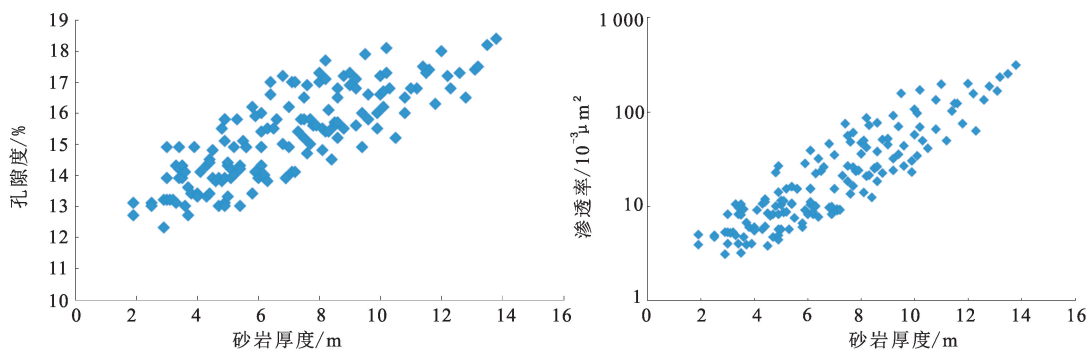


图8 辫状河道砂体厚度与储层物性关系

Fig.8 Relationship between braided river sandbody thickness and physical properties

进一步分析表明,基准面下降半旋回短期旋回SSC1中沉积特征与上升半旋回晚期有较好的继承性,可容纳空间变化率/沉积物供给比值较高,形成纵向上独立、横向上被分割的河道砂体及大面积分布的泛滥平原泥质沉积,流动单元区带纵横向受渗流屏障切割严重,分布零星,类型多以M、P为主。该时期E类流动单元仅占8%,G类流动单元占14%。短期旋回SSC2、SSC3沉积时期,基准面持续下降, $A/S \ll 1$,频繁的迁移在侵蚀河谷内形成纵横向相互叠置、拼接的复合砂体,流动单元类型以G、M为主,其中SSC2短期旋回中G类流动单元占46%,SSC3短期旋回中G类流动单元占39%,其中优质流动单元E、G的比例总和分别占58%和53%。

4 结论

(1)延9油层组储层内识别出E、G、M、P共4种类型流动单元,从E类到P类流动单元随着储集、渗流能力的降低,出现排驱压力增大、孔喉半径减小等特征。

流动单元类型分布具有较大的影响。图8为辫状河道砂体厚度与孔渗参数的关系图,如图所示:砂体厚度的增加使得辫状河道砂岩的孔渗参数有增大的趋势,流动单元类型由劣向优转换,E、G类流动单元所占比例增加。这是因为单一河道砂体的规模是有限的,厚层砂体是由多期次砂体叠加而成,厚度越大说明后期的辫状河道砂体对早期沉积物强烈冲蚀,下覆河道顶部的泥质渗流屏障和细粒沉积物被冲蚀殆尽,使得多期次砂体在空间叠置成厚度大、粒度粗的复合辫状河道砂体。同时,厚度更大的复合叠置砂体具有更强的抗压实能力,在成岩作用演化过程中保留更多的原始粒间孔,因而成为优质的流动单元分布层段。

(2)在超短期旋回级次,研究区储层内孔渗参数受控于颗粒的分选、粒度中值及泥质含量的高低,不同岩相内岩石物理参数及渗流特征上的差异影响着单层级别的流动单元分布。槽状、板状交错层理砂岩相及平行层理砂岩相颗粒粗、分选好,泥质含量低,构成有利的流动单元。

(3)研究区主要发育辫状河道、心滩、河道侧缘及溢岸4种沉积微相,不同微相内岩石相类型与组合的差异导致了短期旋回级次流动单元的分布差异,心滩及辫状河道微相分布区域构成了“E+G”、“G+M”垂向组合的优势流动单元带。

(4)中期基准面旋回通过控制内部不同位置同类微相砂体叠置样式及规模,影响砂组级别的流动单元分布。短期旋回SSC2、SSC3内发育叠置程度高、厚度较大的辫状河道沉积,E、G两类流动单元的比例总和占到58%和53%。

参考文献:

- [1] EBANKS W J. Flow unit concept-Integrated approach to reservoir description for engineering projects[J]. AAPG

- Bulletin, 1987, 71(5): 551-552.
- [2] TI G M, OGBE D O. Use of flow units as a tool for reservoir description: a case study [J]. SPE Formation Evaluation, 1995, 10(2): 122-128.
- [3] 徐守余, 刘太勋. 胜坨油田三角洲相储集层流动单元研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(1): 22-26.
- XU Shouyu, LIU Taixun. Flow units of delta reservoir in Shengtuo Oilfield [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(1): 22-26.
- [4] JAVAD Ghiasi Freez, ALI Kadhodaie Ilkhchi, MAN-SUR Ziaii. Improving the accuracy of flow units prediction through two committee machine models: an example from the South Pars gas field, Persian Gulf Basin, Iran [J]. Computers & Geosciences, 2012, 46: 10-23.
- [5] SAIBAL Bhattacharya, ALAN P Byrnes, WATNEY W Lynn, et al. Flow unit modeling and fine-scale predicted permeability validation in Atokan sandstones: Norcan East field, Kansas [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(6): 709-732.
- [6] HASAN A Nooruddin, HOSSAIN M Enamul. Modified Kozeny-Carmen correlation for enhanced hydraulic flow unit characterization [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 80: 107-115.
- [7] 吴胜和, 王仲林. 陆相储层流动单元研究的新思路 [J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 252-257.
- WU Shenghe, WANG Zhonglin. A new method of non-marine reservoir flow unit study [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 252-257.
- [8] 陈烨菲, 彭仕宓, 宋桂茹. 流动单元的井间预测及剩余油分布规律研究 [J]. 石油学报, 2003, 24(3): 74-77.
- CHEN Yefei, PENG Shimi, SONG Guiru. Inter-well prediction of flow units and remaining oil distribution [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(3): 74-77.
- [9] 彭仕宓, 周恒涛, 李海燕, 等. 分阶段流动单元模型的建立及剩余油预测: 以别古庄油田京 11 断块为例 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 216-221.
- PENG Shimi, ZHOU Hengtao, LI Haiyan, et al. Phased flow unit model establishment and remaining oil prediction: an example from Jing 11 block in Bieguzhuang Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 216-221.
- [10] 万琼华, 吴胜和, 陈亮, 等. 基于深水浊积水道构型的流动单元分布规律 [J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 306-313.
- WAN Qionghua, WU Shenghe, CHEN Liang, et al. Analysis of flow unit distribution based on architecture of deep-water turbidite channel systems [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 306-313.
- [11] 宁正福, 赵洋, 程林松. 基于因子分析的流动单元研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 107-112.
- NING Zhengfu, ZHAO Yang, CHENG Linsong. Study on flow units based on factor analysis [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(4): 107-112.
- [12] 姚合法, 林承焰, 靳秀菊, 等. 多参数判别流动单元的方法探讨 [J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 90-96.
- YAO Hefa, LIN Chengyan, JIN Xiuju, et al. Study on multi-parameters discrimination method for flow units [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1): 90-96.
- [13] 王夕宾, 钟建华, 王勇. 濮城油田南区沙二上 4-7 砂层组低渗透储层流动单元研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(1): 12-17.
- WANG Xibin, ZHONG Jianhua, WANG Yong. Flow units of low permeability reservoir of 4-7 sand sets in upper Es₂ in south of Pucheng Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(1): 12-17.
- [14] 唐民安, 孙宝玲. 大牛地气田下石盒子组基准面旋回与储层流动单元的层次性 [J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 39-48.
- TANG Min'an, SUN Baoling. Relationship between base-level cycles and hierarchy of reservoir flow units of lower Shihezi Formation in Daniudi Gas Field [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(1): 39-48.
- [15] 付国民, 郑荣才, 赵俊兴. 鄂尔多斯盆地环县地区延安组高分辨率层序地层学特征 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(3): 394-400.
- FU Guomin, ZHENG Rongcai, ZHAO Junxing. High resolution sequence stratigraphic characteristics of Yanan Formation in Huanxian County of Ordos Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(3): 394-400.
- [16] 唐海发, 彭仕宓, 史彦尧, 等. 洪积扇相厚层砾岩储层流动单元精细划分: 以克拉玛依油田八道湾组油藏为例 [J]. 石油实验地质, 2009, 31(3): 307-311.
- TANG Haifa, PENG Shimi, SHI Yanrao, et al. A novel method for discriminating flow units of thick proluvial fan conglomerate reservoir: taking Badaowan formation on Karamay oilfield as an example [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(3): 307-311.
- [17] 刘鹏, 张立强, 黄志佳, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷馆陶组层序地层格架及有利区带预测 [J]. 中国石油大学

学报(自然科学版),2014,38(2):17-24.

LIU Peng, ZHANG Liqiang, HUANG Zhijia, et al. Sequence stratigraphic framework and favorable zone prediction in Guantao formation of Raoyang sag, Bohai Bay basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(2):17-24.

- [18] 李志鹏,杨勇,侯加根,等. 渤南五区浊积水道砂体储层构型研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),

2015,39(5):36-42.

LI Zhipeng, YANG Yong, HOU Jiagen, et al. Reservoir architecture of turbidity channels in the 5th area of Bonan Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(5):36-42.

(编辑 徐会永)