

秦皇岛32-6油田南区明下段 I 油组 3 小层河道砂体叠置类型及其动态响应特征

秦润森, 廖新武, 冯鑫, 别旭伟, 党胜国

(中海石油(中国)有限公司天津分公司 勘探开发研究院, 天津 300452)

摘要: 秦皇岛32-6油田南区明下段 I 油组 3 小层($Nm^{\text{F}} I^3$ 小层)为多期叠置而成的河道砂体, 精细解剖砂体的叠置特征是进一步挖潜的重点。基于高分辨率层序地层学原理, 对该小层多期河道沉积期次进行了划分与对比, 在此基础上, 对同一期次砂体沉积微相特征、不同期次砂体之间的夹层特征进行了研究。结果表明, 该小层河道砂体可划分为切叠河道型、叠置河道型、单一河道型 3 种主要叠置类型。由实验井组示踪剂追踪结果可知, 不同期次砂体之间的水驱前缘推进速度低于同一期次砂体的推进速度, 而同期次砂体之间的水驱前缘推进速度也存在差异。示踪剂跟踪实验证实, 对于多期河道叠置砂体而言, 叠置类型、单一砂体微相特征及夹层分布共同影响了开发效果。当注采层位分布于不同期次砂体时, 其连通关系首先取决于砂体的叠置类型及夹层分布; 而当注采层位分布于相同期次砂体时, 其连通关系主要取决于沉积微相的变化。

关键词: 河道砂体 多期叠置 沉积微相 夹层 秦皇岛32-6油田

中图分类号: TE112.221

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)03-0015-05

河流相是油气富集的一种重要的沉积相带, 河道砂体是其最主要的储集类型。由于河流的频繁迁移、改道, 河道砂体在平面上表现出较强的非均质性。受沉积环境变化及物源供给差异的影响, 河道砂体往往不是以单期河道的沉积方式存在, 而是表现为多期河道砂体叠置的多旋回结构样式。Cross 认为这类河道砂体的叠置类型与可容空间及沉积物的供给相关^[1], 与此有关的不同期次河道砂体之间的接触方式也已受到重视。Miall 把河流相的建筑结构划分为 8 个级别^[2], 不同期次河道之间的界面被定义为四级界面, 相当于高分辨率层序地层的超短期旋回界面。河流相油田开发实践已经证实, 这种多期叠置的河道砂体虽然在一定范围内表现为连片拼接的厚储层, 但剩余油的分布特征却与常规厚层状砂体存在明显差别。秦皇岛 32-6 油田南区明下段 I 油组 3 小层($Nm^{\text{F}} I^3$ 小层)是该油田重要产层, 由已钻井揭示的地质特征及三维地震资料可以发现, 其储层平面变化快, 垂向厚度变化大, 表现出典型的多期河道砂体叠置的沉积特征。生产动态跟踪显示, 井距为 200 m 的相邻 2 口井表现出完全不同的生产效果。目前, 如何解剖多期复杂河道砂体叠置类型以及砂体层间和层内的

非均质性已成为该油田开发过程中的重点及难点, 也是此类油田剩余油分布规律研究^[3-4]及下一步挖潜的重要方向。

1 河道砂体期次划分及其叠置类型

河道砂体由于受多期叠置的影响, 其整体具有层次性和结构性特征。层次性是指因晚一期河道沉积对早一期河道砂体改造强度不一所表现出的砂体叠置特征。当晚一期河道砂体部分切蚀早一期河道砂体, 不同期次河道的韵律性保留较为明显, 因而表现出不同沉积期次河道之间具有一定的层次性。但是, 当晚一期河道砂体完全切叠早一期河道砂体时, 这种砂体之间的层次性却并不明显。叠置砂体的结构性主要包括 2 层涵义, 即不同期次砂体之间的叠置方式及砂体内部的结构特征。由于不同期次河道砂体沉积水动力条件不尽相同, 砂体的叠置类型可以表现为侧向拼接及纵向加积等类型^[5]。而同一期次河道沉积也会因为沉积环境差异而表现出不同的内部结构形态。例如随着基准面的上升, 河道沉积可以依次表现为辫状河、曲流河、网状河等沉积特征, 其砂体的分布形态、沉积微

相、河道沉积内部结构也存在差异。要明确河道砂体的层次性及结构性,储层对比是基础。

1.1 河道砂体期次划分

在油田开发阶段,基于高分辨率层序地层学原理,储层对比主要体现在中期旋回对比格架下的短期旋回对比。但是当研究对象是局部沉积范围内且成因上具有一定联系的河道叠置砂体(组合)时,在短期旋回的层序地层对比格架下,其超短期旋回仍具很强的对比性。由于超短期旋回代表最小成因地层单元的单一岩性或相关岩性的叠置样式^[6-7],因此研究中将其作为单一河道识别的基础,相当于Miall的四级构型单元。

秦皇岛32-6油田 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层可划分出3个超

短期旋回,分别代表 $Nm^{\text{下}}I^{3-1}$, $Nm^{\text{下}}I^{3-2}$, $Nm^{\text{下}}I^{3-3}$ 共3个时期河道沉积(图1)。在超短期层序地层对比的基础上,可研究同一期河道砂体的平面分布特征,对比不同期河道砂体的差异。不同时期河道沉积的规模及砂体的分布形态与可容空间(A)、沉积物供给(S)的相对关系有关。在第1个($Nm^{\text{下}}I^{3-3}$)及第2个($Nm^{\text{下}}I^{3-2}$)超短期旋回沉积时期,处于短期旋回早期,A/S小于1,河道的侧向侵蚀作用促使河道不断地决口改道而形成规模较大的片状河道砂体沉积。此时,由于河道的曲流化作用,平面上点坝不断拼接而无法表现出单一河道的形态。而第3个($Nm^{\text{下}}I^{3-1}$)超短期旋回沉积时期,正处于短期上升半旋回的晚期到下降半旋回早期,A/S正处

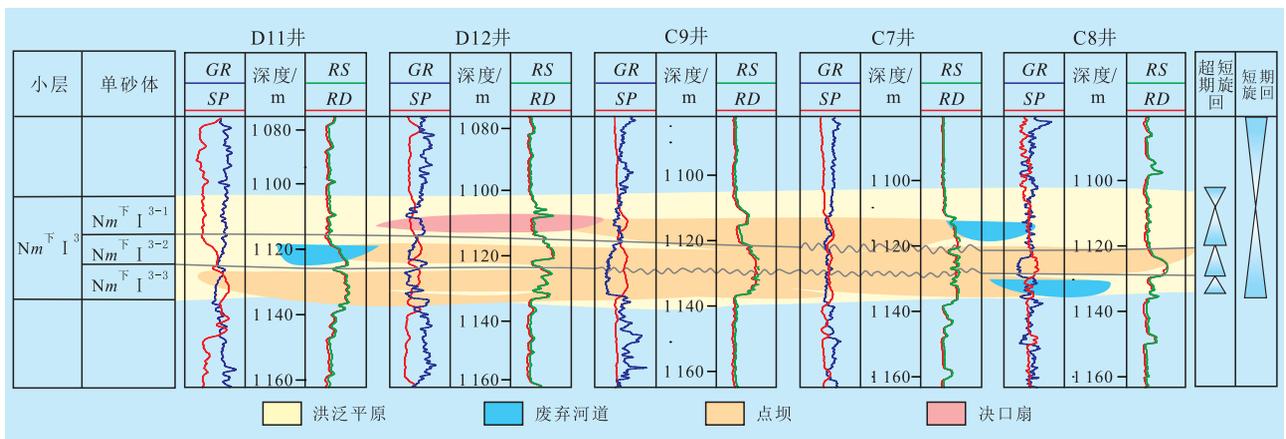


图1 秦皇岛32-6油田 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层河道砂体期次划分与对比

于从小于1转变为大于1的演化过程中,河道的沉积主要表现为垂向侵蚀,平面上往往表现为条带状沉积特征。

1.2 河道砂体叠置类型

在超短期基准面地层格架对比的基础上,可进一步细分单井砂体的叠置类型。 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层的河道砂体可以划分出3种叠置类型(图2):①切叠河道型,即晚期河道砂体较为严重地切割早期河道砂体。此类型多见于短期基准面上升早期,沉积区域物源供应远大于可容空间的增加。当超短期基准面下降,上升半旋回上部细粒部分被完全侵蚀,仅保存中下部粗粒部分,表现为极不完整的上升半旋回组合,此时2期河道砂体的区分并不明显,如图1中C7井,其曲线特征可以表现为钟型—箱型复合韵律或箱型等单一韵律特征。此类型复合砂体厚度往往较大,在 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层均可见20 m以上的厚层砂体。由于不同期次砂体之间较大的切割关系,不发育泥岩夹层,因而不同期次河道砂体之间的界线往往不明显。此类型是第1期河道($Nm^{\text{下}}I^{3-3}$)与

2期河道($Nm^{\text{下}}I^{3-2}$)之间砂体叠置的主要类型。②叠置河道型,晚期河道砂体部分切割早期河道砂体,因而2期河道砂体各自的正韵律结构都比较完整。此类型多存在于短期基准面上升早期—中期,沉积区域物源供应大于可容空间的增加,当超短期

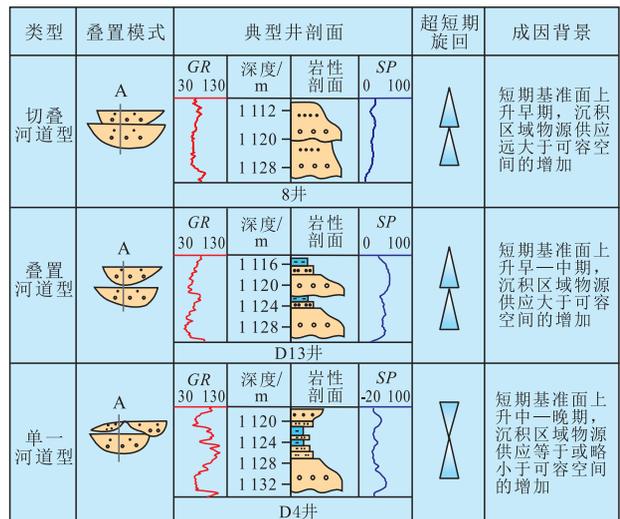


图2 秦皇岛32-6油田南区 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层河道砂体主要叠置类型

基准面下降,上升半旋回上部细粒部分被少量侵蚀,保存向上变细的相对完整的上升半旋回组合。此时2期河道砂体间往往存在1~3 m的泥岩或粉砂质泥岩夹层,把2期河道明显地区分开。该类型是第1期河道($Nm^{\text{下}}I^{3-3}$)与第2期河道($Nm^{\text{下}}I^{3-2}$)之间砂体叠置的另一主要类型。③单一河道型。所谓“单一”,是指2期河道砂体的叠置关系并不明显,早期表现为单一河道砂体的沉积特征,晚期则表现为与河道沉积相伴生的沉积特征,如决口扇、洪泛平原沉积等。此类型常见于短期基准面上升中期—晚期,沉积区域物源供应等于或略小于可容空间的增加,超短期基准面上升半旋回保存完整序列。而当超短期基准面下降时,下降半旋回较少被侵蚀,因此表现为向上变深复又变浅的旋回组合。此时下降半旋回河道砂体相对不发育,因此剖面上多表现为单一河道特征。此类型多见于第2期河道($Nm^{\text{下}}I^{3-2}$)砂体与第3期河道($Nm^{\text{下}}I^{3-1}$)砂体之间。

2 叠置河道砂体水驱动态响应影响因素

多期叠置河道砂体的水驱动态响应与其叠置的层次性和结构性有关。砂体虽为多期叠置,但每期砂体沉积过程中都具备非均质性。由于同期河道沉积可进一步细分为不同沉积微相,因而对沉积微相的认识是描述同期砂体内部非均质性的依据之一。同时,对于不同叠置类型,砂体之间夹层发育程度有所区别,如叠置河道型夹层往往较为发育,对剩余油的影响也显而易见。因此,在研究多期叠置河道砂体的水驱动态响应时,单期河道沉积微相的精细刻画,以及明确不同叠置类型下夹层的分布特征是研究的重点。

2.1 沉积微相

综合岩心、测井、地震等相关资料,对秦皇岛32-6油田南区 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层各超短期旋回的沉积微相进行精细的刻画,研究区主要包括点坝、决口扇、废弃河道和洪泛平原4种沉积微相。点坝岩性以细砂岩和粉砂岩为主,只在底部的滞留层段发育厚度较薄的中砂岩,主要发育槽状交错层理和板状交错层理,分选较好。决口扇是洪水期河水冲决天然堤,部分水流由决口流向河漫滩,砂、泥物质在决口处堆积而成的扇形沉积体。废弃河道多表现为渐弃的沉积特征,河道上部沉积了泥岩、泥质粉砂岩或者粉砂质泥岩;或者是锯齿状的粉砂岩和泥岩互

层段,下部沉积一定厚度的砂岩。洪泛平原即洪水期的泥岩沉积。

以第2期河道沉积为例(图3),点坝是该超短期旋回内发育的主要沉积微相,受河道曲流化作用,平面上单一的点坝横向拼接为一个整体,其他沉积微相较少发育。点坝内部发育少量的废弃河道,其受单井平面沉积微相组合及河工参数的约束,河工参数的统计结果为:河道宽度为200~400 m,弯曲度为1.5~3。此外,在拼接点坝内部,可以识别出小范围未受曲流化改造的决口扇,如D4和D16区域等。

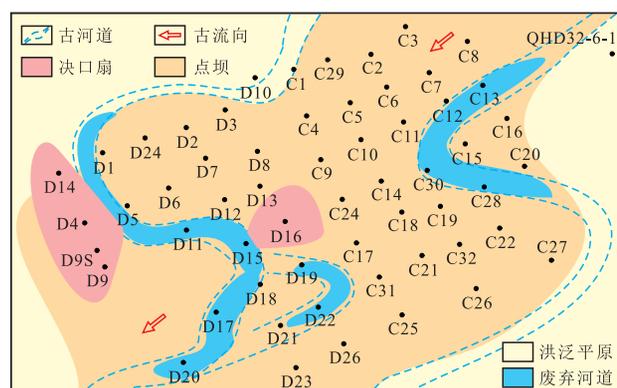


图3 秦皇岛32-6油田南区 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层第2期河道沉积微相平面分布

2.2 夹层分布

目前,夹层主要分为物性夹层和岩性夹层2类,后者比前者一般更具有遮挡意义。对于多期叠置的河道砂体而言,岩性夹层往往相对发育。岩性夹层的形成与层序界面存在成因联系,因而可以根据层序界面级别与夹层的相对关系对夹层进行分类。多期叠置的河道砂体存在2类重要夹层,一类是与点坝内部侧积体之间界面相关的侧积泥质夹层,即与Miall三级界面相对应的夹层。从中外研究成果来看,此类夹层往往分布在储层的中上部,且延伸范围相对有限,主要控制储层中上部剩余油的分布^[8-9]。在 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层中,此类夹层一般较薄,多小于1 m,在测井曲线上的回返并不明显,多难以准确识别。相对于侧积泥质夹层,与超短期旋回界面相关的夹层对于具有多期叠置特征的河道砂体更具有现实意义。它代表了垂向上不同期次点坝(及其相关的沉积微相)之间的岩性、岩相转变,往往具备很好的连续性及对比性。其上部即为超短期旋回底部侵蚀冲刷面,其厚度取决于顶部侵蚀冲刷的强度,因在测井曲线上有明显的回返,易于识别。从前面的研究可以看出,叠置河道型常与此类夹层

发育相关,而单一河道型也可能发育。在 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层不同期次河道砂体之间,与超短期旋回有关的夹层表现为以下2个特点:①主要分布在叠置河道型砂体发育区域,边界局部扩展至单一河道型区域;②这类夹层厚度分布相对比较均一,大多为1~3 m。物性特征研究表明,这种夹层具备较好的遮挡作用,孔隙度为0.01~0.25,绝大多数小于0.1;渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 55 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,绝大多数小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}$,岩性多以泥质为主,与超短期旋回基准面转化有关。

3 叠置河道砂体水驱动态响应特征

叠置河道砂体动态响应与河道砂体的叠置类型密切相关,后者直接决定了开发井之间的连通方式。当前,示踪剂实验是表征砂体动态响应的重要方法^[10-11]。研究过程中,在 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层选取D5井组进行微量物质示踪剂(Er)跟踪实验,从而判断砂体之间的连通方式。由储层对比栅状分布(图4)及沉积微相(图3)分析可知,除D1井仅发育 $Nm^{\text{下}}I^{3-3}$

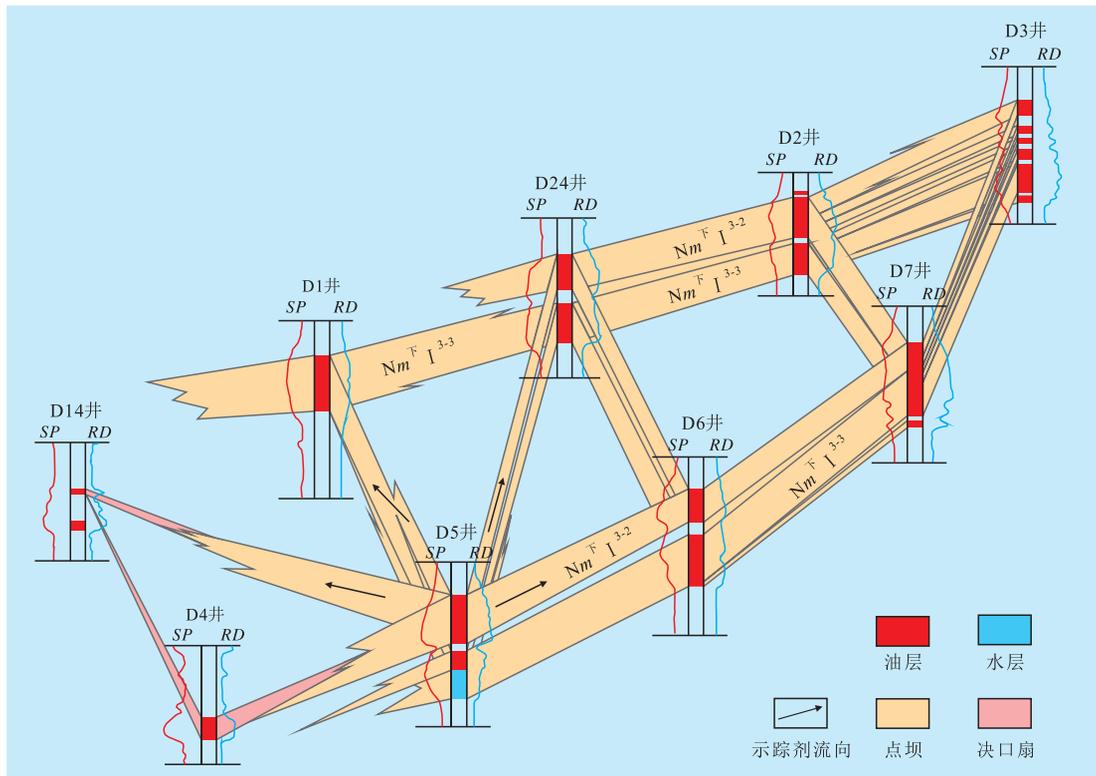


图4 秦皇岛32-6油田D5井组储层对比栅状分布

期砂体外,D5井与周边井均发育 $Nm^{\text{下}}I^{3-2}$ 期砂体,注采对应关系明显。但D5与D14和D4井间存在沉积微相的变化,D5与D24和D6之间为点坝拼接。

实验选取 $Nm^{\text{下}}I^{3-2}$ 期小层为示踪剂注入层,示踪剂注入井为D5井。示踪剂监测井包括D4,D1,D14,D24,D6,D2,D7和D3井。注入井与监视井之间的连通性可以用受益井的水驱前缘推进速度来标定。一般而言,水驱前缘推进速度越快,说明注采井间的连通性越好,反之连通性越差。实验结果表明:在注入井D5井1个井距之内,除D4井由于其他原因无法正常检测示踪剂外,其他井均正常检测。由水驱前缘推进速度(图5)可以看出,各受益井在 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层水驱前缘推进速度普遍较高,达到80~90 m/d,说明D5井组存在大孔道及高渗透

层,但是突破速度却有差别。D1井与D5井之间属于不同期次砂体之间的注采对应关系,其水驱前缘推进速度低于同一期次砂体内部的推进速度,考虑到该区 $Nm^{\text{下}}I^{3-3}$ 与 $Nm^{\text{下}}I^{3-2}$ 这2个期次砂体之间存在一定范围的夹层,河道的叠置类型从D5井的叠置

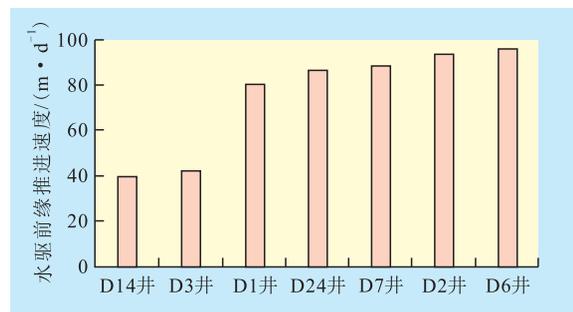


图5 D5井区受益井示踪剂水驱前缘推进速度对比

河道型过渡到D1井的单一河道型,可以推断示踪剂在D5井 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层注入后先沿夹层推进,直至夹层不发育部位进入 $Nm^{\text{下}}I^3$ 砂体之内。同时,虽然总体上同一叠置类型、同一期次河道砂体之间示踪前缘推进速度差异不大,如D6, D7, D24和D2井均测到了相近的推进速度;但砂体内部沉积微相变化却可能导致推进速度的异常,如同一井距内的D14井比其他井的前缘推进速度低。从 $Nm^{\text{下}}I^3$ 的沉积微相平面分布(图3)可以看出, D5井与D14井之间存在微相变化,从点坝过渡到决口扇引起的储层物性的变化可能是造成D14井示踪剂推进速度差异的重要原因。

通过 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层示踪剂跟踪实验可以看出,在油藏开发过程中,对于多期河道叠置型砂体而言,其多期砂体的叠置类型、单一砂体沉积微相变化及夹层分布特征共同影响了开发效果。而在实际开发过程中,注采层位与其所在砂体的沉积期次又存在不同的耦合关系,影响开发效果的主控因素存在差异。当注采层位分布于不同期次砂体时,其连通关系首先取决于砂体的叠置类型及夹层分布;而当注采层位分布于相同期次砂体时,其连通关系主要取决于沉积微相的变化。这对于剩余油的挖潜具有一定的指导意义。

4 结论

秦皇岛32-6油田南区 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层可以划分为3个超短期旋回,代表3期河道砂体沉积。 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层包括3期河道砂体叠置,其叠置类型可以划分为切叠河道型、叠置河道型、单一河道型3种,其中切叠型与叠置型是 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层3期河道砂体叠置的主要类型。

以超短期旋回为基础,对 $Nm^{\text{下}}I^3$ 小层各超短期旋回的沉积微相及不同期河道砂体之间的夹层

分布特征进行精细刻画。多期叠置河道砂体内夹层多发育于叠置河道型发育区域,且发育稳定。

$Nm^{\text{下}}I^3$ 小层示踪剂跟踪实验证实,对于多期河道叠置型砂体而言,叠置类型、单一砂体沉积微相及夹层分布共同影响开发效果。注采层位与其所在砂体的沉积期次在不同的耦合条件下,影响开发效果的主控因素存在差异。

参考文献:

- [1] Cross T A. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata[J]. Earth Sciences Frontiers, 2000, 7(4): 322-350.
- [2] Miall A D. Architectural elements and bounding surface in fluvial deposits of Kayenta Formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado[J]. Sedimentary Geology, 1988, 55(6): 233-262.
- [3] 王鸣川, 朱维耀, 董卫宏, 等. 曲流河点坝型厚油层内部构型及其对剩余油分布的影响[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(3): 14-17.
- [4] 刘建民, 徐守余. 河流相储层沉积模式及对剩余油分布的控制[J]. 石油学报, 2003, 24(1): 58-62.
- [5] 龙国清, 韩大匡, 田昌炳, 等. 油藏开发阶段河流相基准面旋回划分与储层细分对比方法探讨[J]. 现代地质, 2009, 23(5): 963-967.
- [6] 郑荣才, 彭军, 吴朝容, 等. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 249-255.
- [7] 王宝成, 白连德. 河流相地层层序发育特征及构成模式[J]. 特种油气藏, 2008, 15(4): 13-16.
- [8] 马世忠, 杨清彦. 曲流点坝沉积模式、三维构形及其非均质模型[J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 241-247.
- [9] 陈雨茂, 邓文秀, 滕彬彬. 曲流河点坝内部构型精细解剖——以垦西油田垦71断块馆陶组为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(4): 25-27.
- [10] 李爱芬, 陈月明. 示踪剂扩散常数的测定及数据解释方法[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(3): 87-89.
- [11] 于金彪, 宋道万, 秦学杰, 等. 井间示踪剂解释模型研究[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(6): 42-44.

编辑 刘北羿

欢迎广大科技人员踊跃投稿