

文章编号: 1000-0550(2009)03-0458-12

高分辨率层序地层学在储层宏观非均质性研究中的应用^① ——以松辽盆地朝阳沟油田朝 1—朝气 3 区块扶余油层为例

张世广 卢双舫 张雁 柳成志 赵荣 仲维维

(大庆石油学院 黑龙江大庆 163318)

摘要 运用高分辨率层序地层学原理和方法,在朝阳沟油田朝 1—朝气 3 区块扶余油层识别出 41 个短期、7 个中期基准面旋回及 2 个长期基准面半旋回。通过不同级次基准面旋回成因的沉积动力学分析和表征储层宏观非均质性的各项岩心化验、统计学数据定量分析,指出随着长期基准面的上升,各短期基准面旋回层内非均质性变强、各中期基准面旋回层间非均质性变弱、各短期基准面旋回平面非均质变强;随着长期基准面的下降,各变化趋势正好相反。指出基准面旋回及其伴随的可容纳空间变化所引起的沉积环境的变化是储层宏观非均质特征差异的决定因素。

关键词 高分辨率层序地层学 基准面旋回 松辽盆地 扶余油层 宏观非均质性

第一作者简介 张世广 男 1976 年出生 在读博士生 层序地层学及储层地质学 E-mail: zhangshiguang1976@163.com

中图分类号 P539.2 文献标识码 A

储层宏观非均质性是油田开发中后期的重要研究内容。国内学者主要从沉积环境对非均质性的控制作用^[1,2],非均质参数的数学方法再处理^[3,4],非均质性与剩余油^[5]、流动单元^[6]的关系,及基准面旋回对非均质性的控制^[7~11]等众多角度进行了论证,有利地推动了储层宏观非均质性的研究。沉积微相对非均质性的控制作用不容置疑,但沉积微相受基准面旋回的控制,相同的沉积微相可以发育于不同可容纳空间,单纯讨论沉积微相与非均质性的关系显然不能完全从成因上说明问题。非均质参数的数学方法再处理或者把众多非均质参数整合成一个新的参数或者优化了某一参数,前者隐藏了各非均质参数在表征非均质性的多样性方面的贡献,后者也没有从成因上说明问题。非均质性与剩余油、流动单元的关系研究仅在一些方面说明了非均质性研究的重要性。高分辨率层序地层学从沉积动力学角度分析不同可容纳空间内各基准面旋回的体积分配和相分异,可以更好地解释储层宏观非均质性的成因,是研究储层宏观非均质性新的重要手段。但该方法对松辽盆地大庆长垣以东地区扶余油层开发区块低孔、低渗储层非均质性的研究还没见到,而这又是该类油田增储上产的有益尝试。本次研究将高分辨率层序地层学原理应用到储层宏观非均质性的研究中,在探井标定的基础

上,有效利用 260 口密井网(平均井距 120~180 m)开发井资料建立了高精度层序地层格架,深入剖析了各级基准面旋回的特征及其对非均质性的控制作用,为综合调整提供了客观的依据。

研究区(图 1)目的层属于扶余油层,是松辽盆地坳陷早期发育的一套河流、浅水湖泊、三角洲沉积储层^[12,13]。泉头组三段中期(扶余油层沉积早期),气候湿润,雨量充沛,水域范围广大,形成湖泛沼泽;泉头组三段晚期至泉头组四段早期(扶余油层沉积中期),气候干燥,水域减小,发育三角洲及季节性河流沉积;泉头组四段晚期(扶余油层沉积晚期),气候转为湿润,盆地进入快速下沉的稳定坳陷期,蓄水面积增大,发育了三角洲及滨浅湖沉积,并迅速过渡到青山口组一段的半深湖—深湖沉积。气候变化是高频层序形成的主要影响因素^[14,15],且由于古地形坡降较缓,因此造成了明显的层序地层的多级次性。

1 高分辨率层序地层格架的建立

参考国内众多学者对高分辨率层序地层学的应用实例剖析^[17~19],本次研究从短期基准面旋回(SSC)的识别入手,再进行中期基准面旋回(MSC)的组合,最后结合区域标志层等进行长期基准面旋回(LSC)的识别。

①国家自然科学基金(批准号:40572079)资助。

收稿日期:2008-07-29 收修改稿日期:2008-11-21

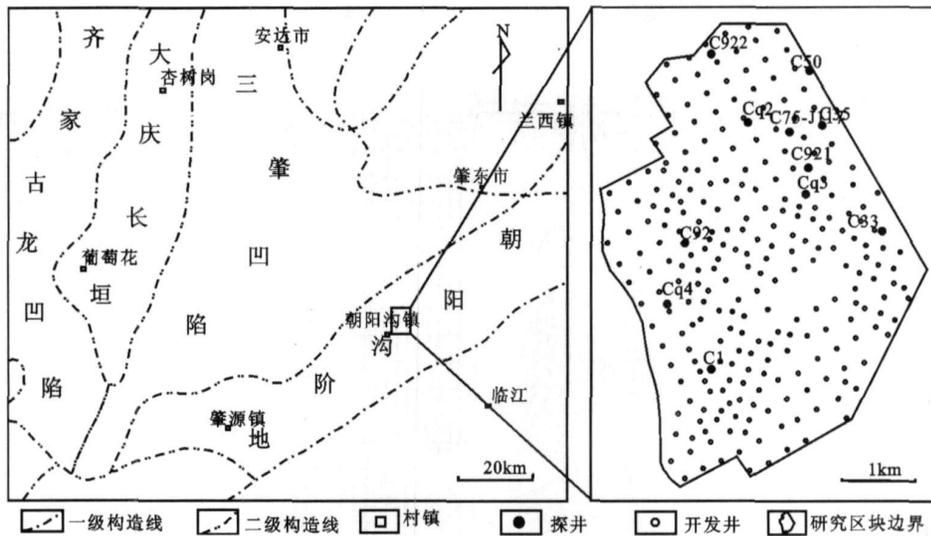


图 1 研究区构造位置及井网示意图

Fig 1 Tectonic position of the study area and well grid

1.1 短期基准面旋回的确定及其特征

短期基准面旋回一般是高分辨率层序地层格架的最小井间可对比单元,其时限跨度约为 $0.1 \sim 0.5$ Ma。各短期基准面旋回之间的区别是所处的基准面旋回位置不同,每个短期基准面旋回都是动态变化的可容纳空间(A)和沉积物补给(S)的综合响应。准确划分各短期基准面旋回的关键是其旋回顶底界面和内部转换面的识别。本次研究利用岩心、录井特别是密井网测井资料,在目的层共识别出不同可容纳空间向上“变深”、向上“变浅”、对称型七类共 41 个短期基准面旋回(图 2)。

(a) 高可容纳空间条件下向上“变深”的非对称型短期基准面旋回(F111、F112、F113)

主要发育在长期基准面上升半旋回的晚期(所属中期基准面上升半旋回的中、晚期),此时可容纳空间较大,物源补给较少,且 A/S 不断增大,造成其顶界面多为饥饿面,在本区为以滨浅湖泥为主的沉积环境。单个短期基准面旋回厚度较小,一般 2 m 左右。岩性组合自下而上多为薄层泥质粉砂岩、粉砂质泥岩与泥岩组合,泥岩颜色多为绿色、多具水平层理。自然伽马(GR)曲线和微电位(RMN)、微梯度(RMG)曲线组合自下而上多为尖峰状或正旋回。F111的顶界面是本次研究目的层的顶界面,为一大型湖泛面,且其上的“上部油页岩标志层 1、2”(图 3)全区稳定发育,容易辅助 F111 的顶界面追踪对比;F111 与 F112、F112 与 F113 之间均为基准面由下降到上升的转换面。

(b) 中等可容纳空间条件下向上“变深”的非对称型短期基准面旋回(F152)

主要发育在长期基准面上升半旋回的中期(所属中期基准面上升半旋回的早期)。此时一般是次一级的可容纳空间从小变大的开始阶段,水动力较强,物源供给相对充分。F152 是以曲流点坝微相相对较发育为特征的曲流河沉积环境,与其下的 F161(泛滥平原广泛发育的曲流河沉积环境)呈突变接触,其分界面多为河道冲刷面;与其上的 F151(曲流点坝、河漫滩比例基本均等为特征的曲流河沉积环境)呈突变或渐变接触,其分界面由于可容纳空间的持续增大而使冲刷现象不明显。F152 旋回厚度多为 2~5 m,岩性组合自下而上多由粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩组成,粉砂岩具有小型交错层理。GR 曲线和 RMN、RMG 曲线组合形态为中高幅微齿化“箱形”或“钟形”。

(c) 低可容纳空间条件下向上“变深”的非对称型短期基准面旋回(F21、F162)

主要发育在长期基准面上升半旋回的早期(所属中期基准面上升半旋回的早期或中期)。此时可容纳空间相对最小、水动力最强,物源供给特别充分。F21 是以大型曲流点坝为主的高能曲流河沉积环境,与其下的 F221(泛滥平原广泛发育的曲流河沉积环境)呈突变接触,其分界面多为较大型河道冲刷面;与其上的 F172(泛滥平原广泛发育的曲流河沉积环境)呈突变或渐变接触,其分界面冲刷现象变弱。F21 旋回厚度多为 3~10 m,岩性相对最粗,一般以棕

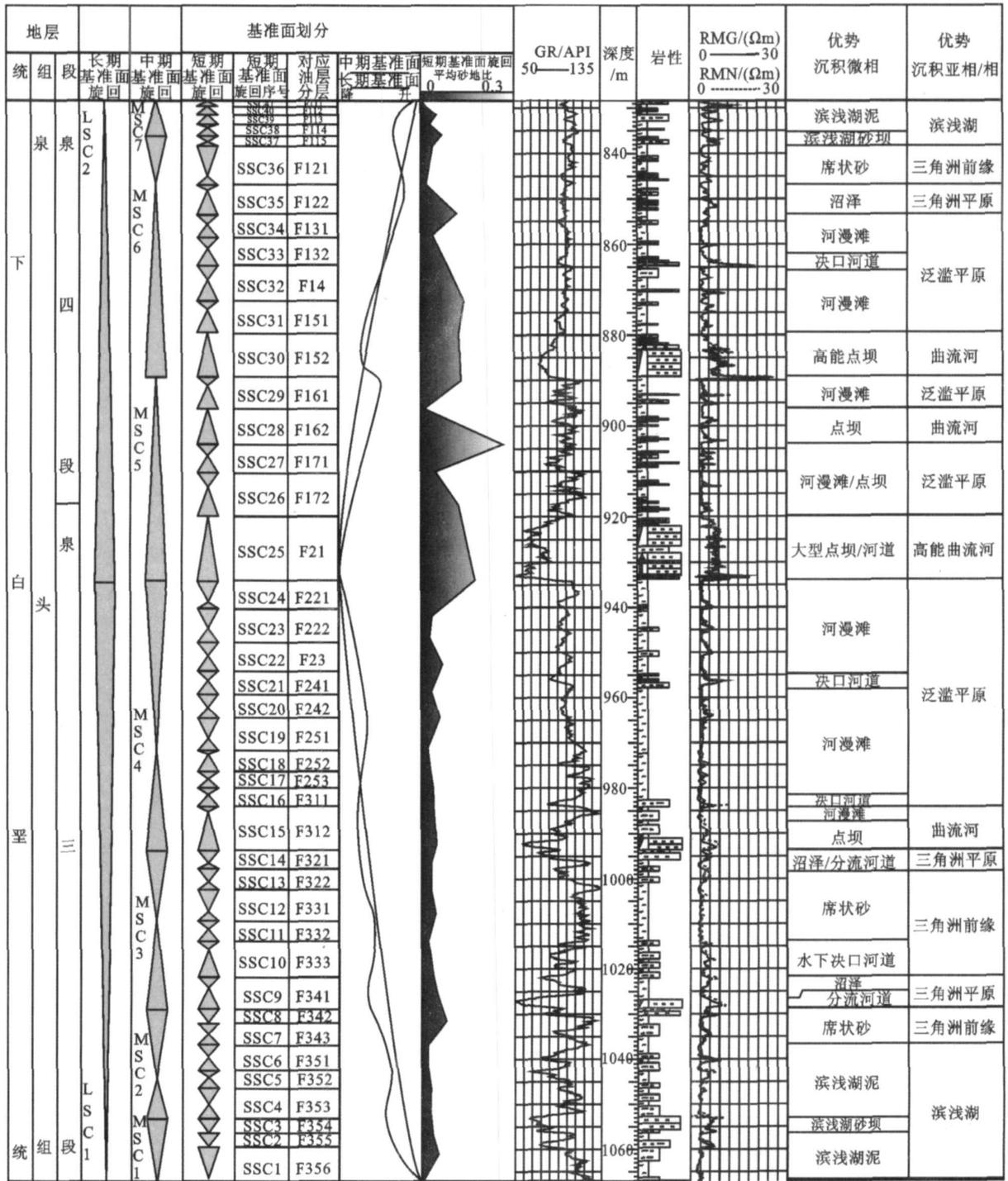


图 2 基准面旋回综合模式图 (C75-J117 井)

Fig 2 Synthetic pattern of base-level cycle (Well C75-J117)

色粉砂岩为主、向上变细不明显、多具交错层理，内部泥质夹层颜色多为氧化色。GR 曲线和 RMN、RMG 曲线组合形态为高幅“箱形”。

(d) 高可容纳空间条件下向上“变浅”的非对称型短期基准面旋回 (F342, F354, F355, F356)

主要发育在长期基准面下降半旋回的早期 (所属中期基准面下降半旋回的各个时期)，此时可容纳空间总体较大，但与物源补充相比可容纳空间减小速度更快，形成底界面多为饥饿面、顶界面多为岩性突变的向上“变浅”的岩性组合，在本区为以滨浅湖

泥为主的沉积环境, 旋回厚度较小, 多为 2~4 m。自下而上多为薄层暗色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩的岩性组合, 泥岩多具水平层理。GR 曲线和 RMN、RMG 曲线组合自下而上多为尖峰状或反旋回。

(e) 高可容纳空间条件下对称型短期基准面旋回 (F114 至 F131、F321 至 F341、F343 至 F353)

主要发育在长期基准面上升半旋回的晚期或长期基准面下降半旋回的早至中期 (所属中期基准面上升、下降半旋回的各个时期), 此时可容纳空间仍较大, 物源补给相对不充分, 在本区主要为三角洲前缘、三角洲平原或滨浅湖亚相, 砂体总体不发育。该类旋回发育完整, 自下而上由基准面上升半旋回和基准面下降半旋回构成, 其内部可划分出基准面由上升到下降的转换面。从下至上一般是泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩互层。在长期基准面下降半旋回中, 此类短期基准面旋回的泥岩颜色自下而上一般由暗色变为偏氧化色; 在长期基准面上升半旋回中, 此类短期基准面旋回的泥岩颜色自下而上一般由偏氧化色变为暗色。在 GR、RMN、RMG 测井曲线组合上多为复合旋回。

(f) 中等可容纳空间条件下对称型短期基准面旋回 (F132、F14、F151、F252 至 F312)

主要发育在长期基准面上升、下降半旋回的中期 (所属中期基准面上升半旋回的各个时期), 一般上升、下降半旋回的厚度大致相当。此时可容纳空间变化与沉积物补给相对均衡, 上升及下降半旋回都易于保存, 其内部可划分出基准面由上升到下降的转换面。从下至上一般是粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩互层, 泥岩颜色为绿色或偏氧化色, 属于泛滥平原广泛发育的曲流河沉积环境, 并由于河流自旋回的原因而导致测井曲线形态有较大变化, 在 GR、RMN、RMG 测井曲线组合上多为复合旋回。

(g) 低可容纳空间条件下对称型短期基准面旋回 (F161、F171、F172、F221 至 F251)

主要发育在长期基准面上升半旋回的早期和长期基准面下降半旋回的晚期 (所属中期基准面上升、下降半旋回的各个时期)。在长期基准面下降期间, 总体上以可容纳空间的持续减少为特点, 因此, 该类短期基准面旋回下降半旋回的厚度大于上升半旋回的厚度。在长期基准面上升期间, 总体上以可容纳空间的持续增大为特点, 因此, 该类短期基准面旋回上升半旋回的厚度大于下降半旋回的厚度。岩性组合

从下至上一般是粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩组合, 泥岩颜色多为氧化色, 砂岩多发育平行层理。属于泛滥平原较发育的曲流河沉积环境, 在 GR、RMN、RMG 测井曲线组合上多为复合旋回。

1.2 中期基准面旋回的确定及其特征

中期基准面旋回是长期基准面变化过程中特定叠加样式的短期基准面旋回的组合^[17]。按照短期基准面旋回的结构类型、叠加样式及其在中期基准面旋回中的分布规律^[18], 确定了中期基准面旋回相转换面及层序界面。共识别出具等时对比意义的七个中期基准面旋回, 从下至上依次为 MSC1 至 MSC7 (图 2、图 3), 它们的叠加样式和识别标志如下:

(1) 进积型

MSC1 属于这种类型。MSC1 是目的层最底部的中期基准面旋回, 由三个 d 型短期基准面旋回构成 (图 2、图 3), 自下向上形成一个进积的序列、单层砂岩厚度逐渐增厚、砂泥比逐渐增大, 测井曲线组合特征呈近似漏斗型, 反映了基准面持续下降的过程。其底界面为湖泛面, 顶界面多为小型水进冲刷面。其底界面由于“底部钙质标志层”及“下部标志层 1、2、3”的全区可对比性而容易追踪对比。

(2) 退积型

MSC5 和 MSC7 属于这种类型。MSC5 由 2 个 c 型和 3 个 g 型短期基准面旋回叠加而成 (图 2、图 3), 其底界面是大型高能曲流河道冲刷面, 顶界面是曲流河冲刷面。反映了长期基准面上升半旋回早期可容纳空间由小逐渐增大的情况下、物源补给充分的典型河流沉积环境。MSC5 不发育中期基准面下降半旋回的原因是长期基准面上升早期可容纳空间由总体较小至持续增大过程中主要以河流作用为主的短期基准面旋回叠加呈退积样式, 而短暂的中期基准面下降过程不明显。MSC7 由 1 个 e 型和 3 个 a 型短期基准面旋回叠加而成 (图 2、图 3)。此时处于长期基准面上升半旋回的晚期, 可容纳空间已经很大, 物源补给不充分, 在本区所属环境为滨浅湖亚相; 在持续的可容纳空间增长过程中, 形成总体呈退积的短期基准面旋回叠加样式。其顶界面为湖泛面, 识别特征与 a 型短期基准面旋回顶界面相同。底界面为沉积序列转换面, 沉积方式由底界面之下的进积短期基准面旋回组合变为底界面之上的退积短期基准面旋回组合。

(3) 对称型

MSC2、MSC3、MSC4、MSC6 属于这种类型。这几

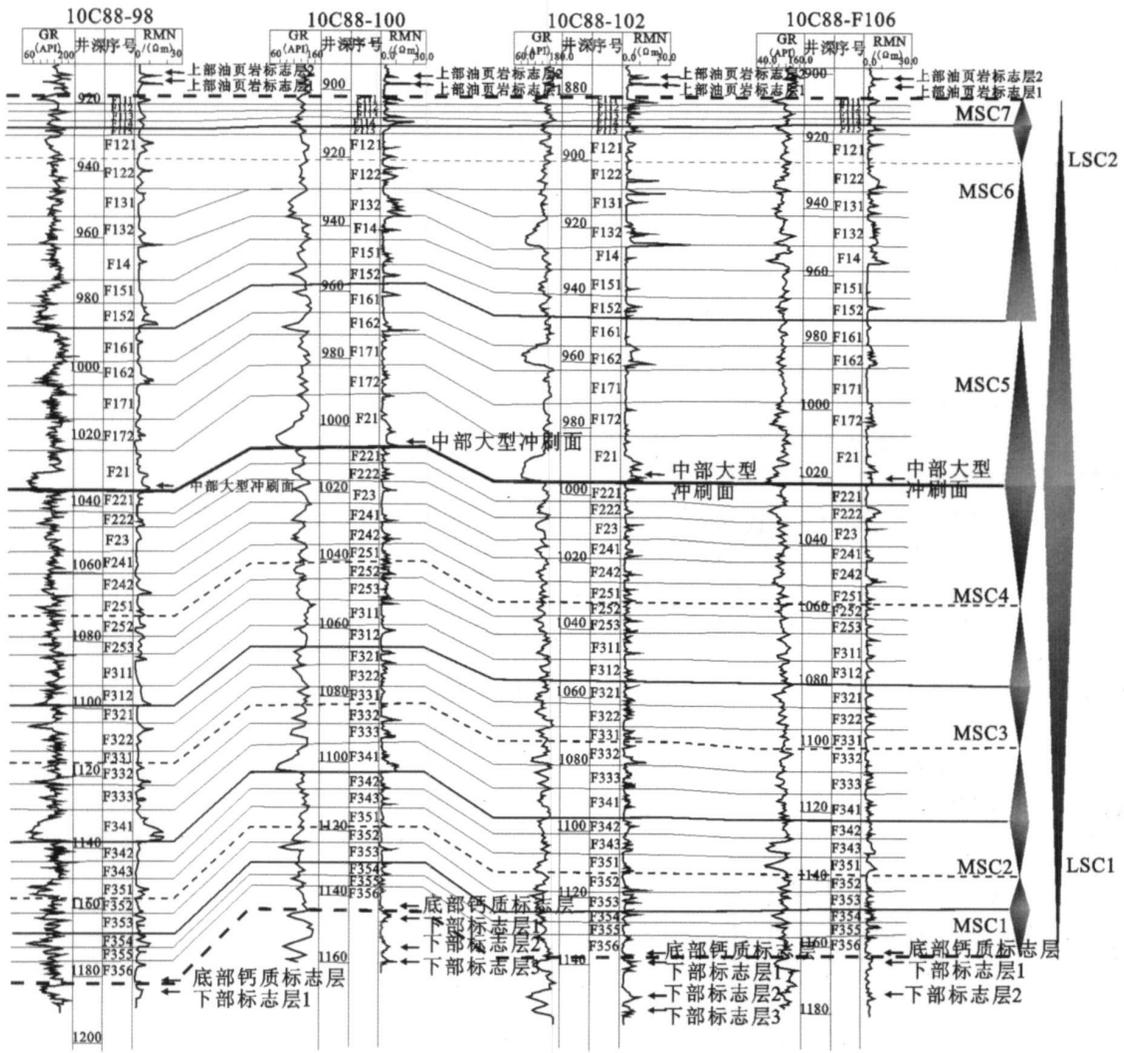


图 3 长期基准面旋回关键界面识别标志及密井网层序地层对比示意图

Fig 3 Recognition marks of key surface of long-term base-level cycles and stratigraphic sequence correlation of dense well pattern schematic diagram

个中期基准面旋回均由基准面上升半旋回和基准面下降半旋回构成, 形成机制大致相似。以 MSC3 为例, MSC3 为一个近乎完全对称型旋回。其基准面上升半旋回由 3 个自下而上形成退积序列的 e 型短期基准面旋回叠加而成; 其基准面下降半旋回由 3 个自下而上形成进积序列的 e 型短期基准面旋回叠加而成 (图 2、图 3), 反映了缓慢水进和缓慢水退的过程。其顶界面部分地区为曲流河河道侵蚀面, 其底界面为相序转换面。MSC3 各短期基准面旋回自下而上形成三角洲平原、三角洲前缘、三角洲平原的沉积格局, 与其上部的以泛滥平原广泛发育为特征的 MSC4 和其下部的以三角洲前缘和滨浅湖为特征的 MSC2 有较明显区别。同时, MSC6 底部出现的局部削截现象

主要是因为 F152 较大型曲流河河道侧向迁移过程中对下伏地层的侵蚀作用造成的。

1.3 长期基准面旋回的确定及地层格架的建立

受拗陷期盆地整体构造及气候变化等因素的影响, 本区扶余油层之上青山口组底部发育的三套油页岩是松辽盆地的一级标志层, 如图 3 所示的“上部油页岩标志层 1、2”在自然伽马和微电位曲线中形成明显的“高尖”^[19, 20], 整个工区都能追踪对比, 是长期基准面上升到最大时的响应。同时, 如图 3 所示扶余油层底部发育的自然伽马和微电位曲线组合形态呈“V”字形且“底部钙质标志层”、“下部标志层 1、2、3”都是在整个工区能够追踪对比的重要标志层。上述两处标志层分别相当于 (近似相当于) 研究区目的层

的长期基准面由上升到下降的沉积转换面(最大可容纳空间)时期沉积的地层,给中期和短期基准面旋回提供了宏观等时对比界面。而扶余油层中部广泛发育的大型高能曲流河沉积伴生的“中部大型冲刷面”是可容纳空间最小时期的产物,也是长期基准面由下降转至上升的沉积转换面^[19],即层序界面。因此,结合短、中期基准面旋回的识别,本区目的层的层序自下而上可划分为一个长期基准面下降半旋回 LSC1 和一个长期基准面上升半旋回 LSC2 (图 2 图 3)。在上述各级基准面旋回识别的基础上,充分利用河流、浅水湖泊、三角洲相储层的沉积特点,在顶底标志层的控制下结合密井网测井曲线特征对全区 200 余口开发井进行闭合对比,建立了全区等时层序地层格架(图 3)。

2 各级基准面旋回与非均质性的关系

2.1 短期基准面旋回与层内非均质性的关系

层内非均质性研究主要指的是对某一单位的储层(小层、沉积时间单元、短期基准面旋回)内部垂向上储层性质变化进行研究,属单层规模的描述。不同类型的短期基准面旋回其层内非均质性变化很大。在研究区目的层中, F21 和 F152 的砂体相对较发育

且有代表性,重点讨论这两种类型:

1) 低可容纳空间条件下向上“变深”的非对称型短期基准面旋回(F21)

该短期基准面旋回发育期间可容纳空间小,物源补给充分,造成砂体间切叠严重,细粒沉积物保留少,沉积方式主要以加积、侧积为主,发育多段多韵律序列或复合沉积序列;随着短期基准面的上升,水动力总体逐渐减弱,相应地形成下粗上细的沉积韵律,且造成物性总体向上变差(图 4a),但总体上物性向上变差程度并不明显,这也主要是因为可容纳空间变化不明显造成的。其平均孔隙度为 18.10%,平均渗透率为 $18.76 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。从图 4a 中可以看出,4.2 m 的砂体由 17 个含油性不同的单元组成,平均单个含油性单元的厚度为 0.25 m。物性与含油性有较好的对应关系,孔隙度大、渗透率高的物性韵律单元一般含油级别好,孔隙度小、渗透率低的物性单元一般含油级别变差。含油性的不同主要是因为物性总体向上变差的整体趋势下,有很多小的物性韵律单元(沉积韵律单元),频率达到每米 4 个,物性韵律单元之间大多是砂质夹层(物性夹层)。正是这些叠置的各自相对独立的不同物性韵律单元造成了含油性的不同。

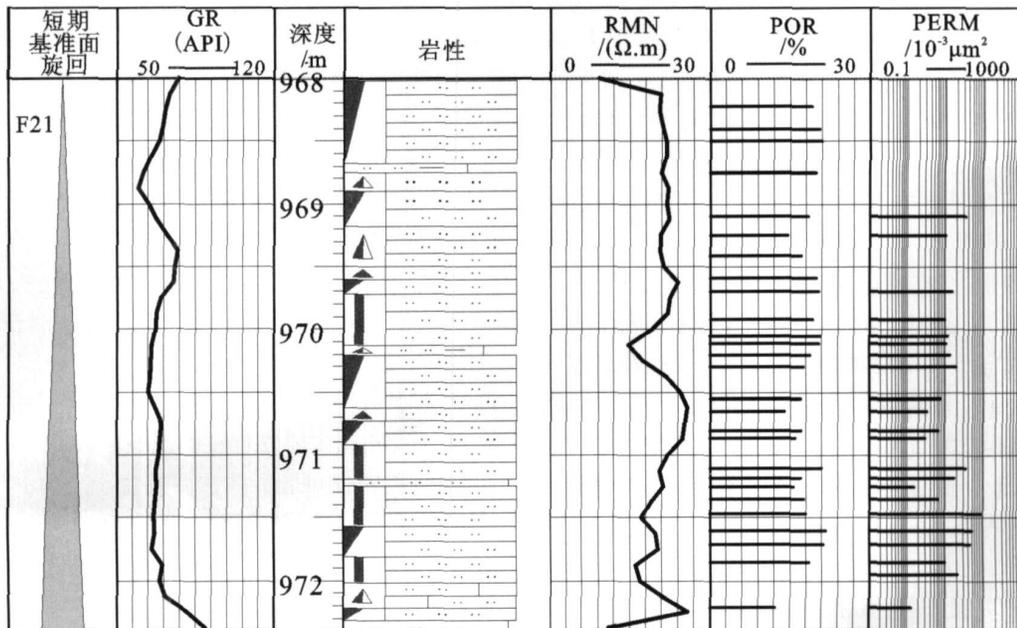


图 4a 长期基准面上升半旋回早期发育的向上变深的短期基准面旋回层内非均质模式(C921井)

Fig 4a In-layer heterogeneity pattern of upward-darken short term base-level cycles of early long-term base-level cycles (Well C921)

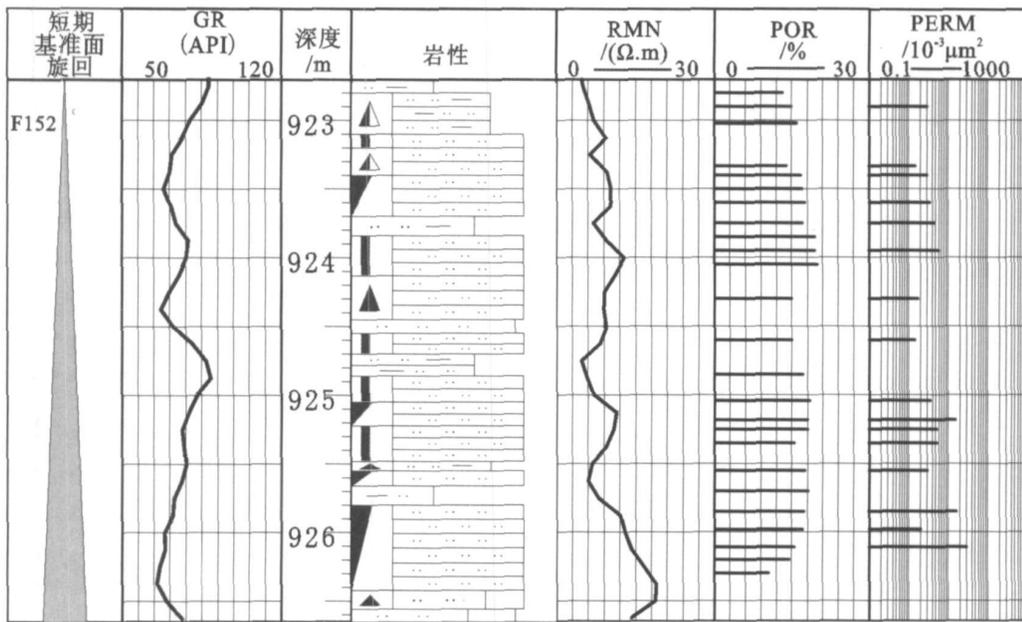


图 4b 长期基准面上升半旋回中期发育的向上变深的短期基准面旋回层内非均质模式 (C921 井)

Fig 4b In-layer heterogeneity pattern of upward-darken short-term base-level cycles of middle long-term base-level cycles (Well C921)

2) 中等可容纳空间条件下向上“变深”的非对称型短期基准面旋回 (F152)

这样的短期基准面旋回是可容纳空间从较小逐渐增至中等的情况下新的一期相对较强的水动力、相对充分的物源供给环境下形成的,同时也是一个新的中期基准面旋回初期阶段的产物。此时的可容纳空间已经相对中等,水动力已不如 F21 时强,砂体主要发育于曲流点坝微相,砂体之间的切叠不如低可容纳空间 (F21) 时明显,细粒沉积物有一定保留,沉积方式主要以侧积为主,且随着短期基准面的上升,水动力继续减小,在自旋回和可容纳空间变化共同作用下相应地形成向上变细的沉积韵律,且造成物性总体向上变差 (图 4b)。其平均孔隙度为 16.53%, 平均渗透率为 $6.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。从图 4b 中可以看出, 3.1 m 的砂体由 14 个含油性不同的单元组成, 平均单个含油性单元的厚度为 0.22 m 该厚度与 F21 的厚度相比略有下降, 是水动力总体减小的结果。物性与含油性有较好的对应关系, 孔隙度大、渗透率高的物性韵律单元一般含油级别好, 孔隙度小、渗透率低的物性单元一般含油级别变差。含油性的差异同样主要是因为有很多小的物性韵律单元 (沉积韵律单元) 频

率达到每米 4-5 个, 物性韵律单元之间虽然多是砂质夹层, 但泥质夹层明显比低可容纳空间条件下发育。

另外, 受沉积环境制约的层内夹层的展布及其侧向连续性可使层内渗透率的各向异性更明显, 影响油水运动规律及厚油层内的压力分布。从前面的分析可知, 在可容纳空间较小的情况下 (F21) 以高能曲流点坝为主的曲流河沉积环境砂体发育, 其砂体内的岩性及物性夹层由于砂体之间的严重切叠变得多不能大范围内连续展布; 且由于砂体厚度大, 夹层厚度与砂岩厚度的比值很小, 夹层钻遇率低、夹层密度小 (见图 5c 图 5 由研究区 200 余口密井网开发井数据所得), 所以夹层侧向连续性大多不好, 对层内流体的流动影响相对较小。在可容纳空间中年的时候 (F152) 砂体主要发育在曲流点坝微相 (在可容纳空间更大的时候可能砂体主要发育于三角洲分流河道、席状砂等微相) 在自旋回和可容纳空间变化共同作用下相应的砂体之间切叠不如 F21 时严重, 单一旋回砂体厚度小, 夹层平均厚度与砂岩厚度的比值较大, 且夹层多能在一定范围内连续展布, 夹层钻遇率高、夹层密度大 (图 5c), 所以夹层侧向连续性大多很好, 甚至形成“泥包砂”的格局, 对层内流体的流动影

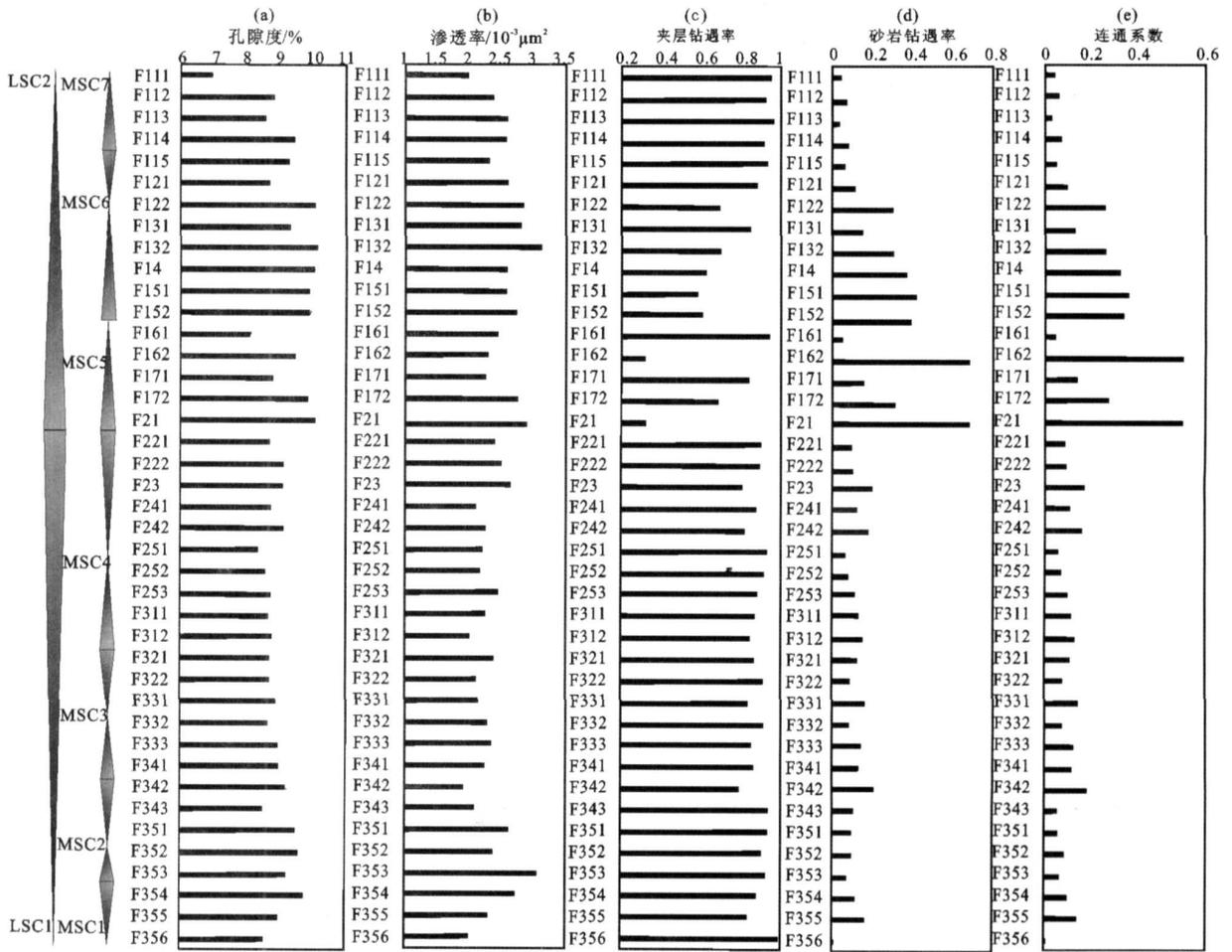


图 5 层内、平面非均质参数与基准面旋回的关系

Fig 5 The relationship between in-layer heterogeneity parameters and that in plane and the base-level cycles

响相对较大。更进一步的夹层分析必须在层序格架控制下结合基准面旋回变化,分不同沉积微环境进行建筑结构分析^[21]。

F152与F21的主要差别在于各自处于不同的基准面旋回位置,各自的可容纳空间和物源补给不同,体积分配和相分异作用造成各自的沉积环境不同,自然砂体类型不同,所以其层内非均质性有相应变化。同样,在长期基准面下降(LSC1)期间,随着长期基准面的下降,可容纳空间总体上逐渐减小、物源补给总体上逐渐增加,造成各短期基准面旋回所处的水动力环境总体上逐渐变强,砂地比总体上逐渐变大,进而使各短期基准面旋回的层内非均质性相应变好。

从图 5a b c可知,随着长期基准面的上升,各短期基准面旋回表征层内非均质性的参数如砂岩孔隙度层内的变化、渗透率层内的变化、夹层密度层内的变化等基本都呈现出非均质性逐渐变强的趋势;随着

长期基准面的下降,各短期基准面旋回表征层内非均质性的上述参数基本都呈现出非均质性逐渐变弱的趋势。

结合本区典型沉积单元砂体特征、沉积微相、沉积方式、沉积序列、层内夹层等及各短期基准面旋回孔隙度、渗透率、夹层密度与基准面、可容纳空间演化关系的分析可知,在长期基准面上升半旋回早期发育的短期基准面旋回其层内非均质性较弱、且随着基准面的上升有逐渐增强的趋势。在长期基准面的下降期间正好相反,即随着长期基准面的下降,层内非均质性有逐渐减弱的趋势。

2.2 中期基准面旋回与层间非均质性的关系

层间非均质性是指垂向上各种环境的砂体交互出现的规律性,以及作为隔层的泥质岩在剖面上的发育和分布情况,是对一套砂泥岩含油层系的总体研究,属于层系规模的储层描述。

高频率的多旋回沉积是陆相湖盆储层一般多砂层、层间非均质性比较突出的根本原因,其不但决定了油气的充注与成藏^[22],更是引起注水开发过程中层间干扰、水驱差异和单层突进的内在原因。不同基准面旋回位置的体积分配和相分异造成本区变化较快的不同沉积环境的砂体在剖面上的频繁交错叠合分布,形成众多含油气层系。各中期基准面旋回从成因上有较大区别,之间大多有稳定的隔层,可以把各中期基准面旋回当作一套开发层系。因此,本次研究中层间非均质性以中期基准面旋回为有效研究单元。

表 1 是由研究区 200 余口密井网开发井数据所得的各中期基准面旋回层间非均质性表征参数。从中可知随着长期基准面的下降,从 MSC1 到 MSC4 其分层系数、砂岩密度、有效厚度系数、隔层厚度、变异系数、突进系数、极差总体上逐渐增大;随着长期基准面的上升,从 MSC5 到 MSC7 其分层系数、砂岩密度、有效厚度系数、隔层厚度、变异系数、突进系数、极差总体上逐渐减小,且 MSC5 的分层系数、砂岩密度、有效厚度系数、隔层厚度、变异系数、突进系数、极差是 LSC1 和 LSC2 中最大的。说明随着长期基准面的下降,层间非均质性逐渐增强;随着长期基准面的上升,层间非均质性逐渐减弱,且在 MSC5 时期层间非均质性最强。

2.3 长期基准面旋回与平面非均质性的关系

平面非均质性是指一个储层砂体的几何形态、规模、连续性,以及砂体内孔隙度、渗透率的平面变化引起的非均质性。平面非均质性的研究单元是各短期基准面旋回,可通过统计学参数如砂体连续性、砂体连通性及编制沉积微相、孔隙度平面等值线图来表征其变化规律。

砂体连续性可通过砂体的规模(砂岩钻遇率)来表示。从图 5d 可以看出,随着长期基准面的下降,砂

岩钻遇率总体逐渐升高,表明砂体连续性逐渐变好,平面非均质性变差;随着长期基准面的上升,砂岩钻遇率总体逐渐降低,表明砂体连续性逐渐变差,平面非均质性变强。

砂体连通性可以通过连通系数(砂岩厚度大于平均厚度的井数与总井数的比值,该值越接近 1,说明砂层厚度变化小、连通程度高)来表征。从图 5e 可以看出,在长期基准面下降半旋回中,随着基准面的下降,总体上连通系数不断增大,砂体连通性不断变好,平面非均质性变弱。在长期基准面上升半旋回的早期,连通系数很大,砂体的连通性明显很好;随着长期基准面的上升,连通系数逐渐变小,砂体连通性明显变差,平面非均质性变强。

从图 2 和图 6 可知,随着长期基准面的下降,沉积环境总体上由滨浅湖逐渐变为曲流河,砂体连续性和连通性逐渐变好;随着长期基准面的上升,沉积环境总体上由大型曲流河逐渐变为滨浅湖,砂体连续性和连通性逐渐变差。孔隙度平面展布主要受砂体平面展布的控制,砂体发育的地方其孔隙度比砂体不发育的地方孔隙度大,也就是孔隙度平面展布受沉积微相的控制。因此,沉积微相对平面非均质性有较好的控制作用。

上述分析表明在长期基准面上升半旋回早期各短期基准面旋回平面非均质性较弱,随着基准面的上升,各短期基准面旋回平面非均质性逐渐增强;在长期基准面下降半旋回期间则正好相反。

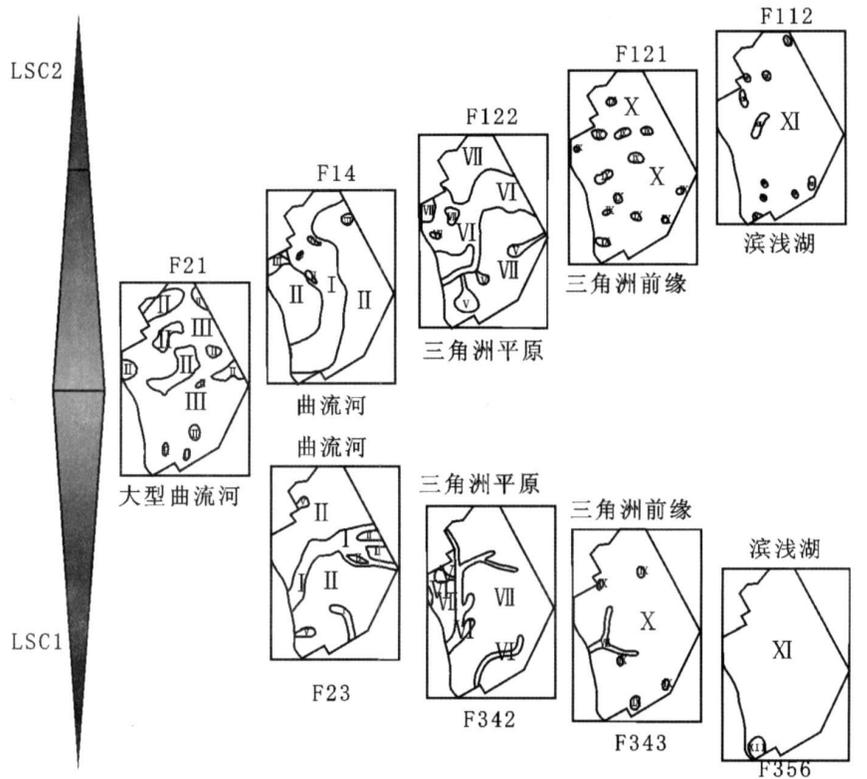
3 结论

(1) 识别出 41 个短期基准面旋回、7 个中期基准面旋回及 2 个长期基准面半旋回。对各类基准面旋回的识别标志和划分依据进行了成因机制的沉积动力学分析。

表 1 层间非均质参数统计表

Table 1 The statistics of interlayer heterogeneity parameters

长期基准面旋回	中期基准面旋回	分层系数	砂岩密度	有效厚度系数	隔层厚度/m	变异系数	突进系数	级差
LSC2	MSC7	1.00	0.0410	0.47	1.98	0.04	1.09	230.05
	MSC6	1.23	0.0867	0.57	6.68	0.15	1.38	492.30
	MSC5	1.25	0.1239	0.61	8.16	0.18	1.47	1072.33
LSC1	MSC4	1.09	0.0406	0.63	5.71	0.07	1.16	386.16
	MSC3	1.06	0.0370	0.60	5.51	0.06	1.13	228.67
	MSC2	1.04	0.0365	0.52	5.14	0.05	1.1	235.53
	MSC1	1.00	0.0307	0.49	5.07	0.05	1.12	112.8



I 曲流河河道 II 泛滥平原 III 大型曲流河河道 IV 废弃河道 V 决口扇 VI 水上分流河道 VII 沼泽 VIII 水下分流河道 IX 河口坝 X 席状砂 XI 滨浅湖泥 XII 滨浅湖砂坝

图 6 沉积微相随长期基准面旋回变化的规律

Fig 6 The laws between sedimentary facies with changing long-term base level cycles

(2) 不同可容纳空间下发育的短期基准面旋回控制了层内非均质性、中期基准面旋回控制了层间非均质性、长期基准面旋回控制了平面非均质性的演化。随着长期基准面的上升,各短期基准面旋回层内非均质性变强、各中期基准面旋回层间非均质性变弱、各短期基准面旋回平面非均质变强;随着长期基准面的下降,各变化趋势正好相反。

(3) 基准面旋回及其伴随的可容纳空间变化所引起的沉积环境的变化是储层宏观非均质特征差异的决定因素。

参考文献 (References)

1 张琴, 朱筱敏, 李桂秋. 东营凹陷古近系沙河街组碎屑岩储集层非均质性与油气意义 [J]. 古地理学报, 2007 9(6): 661-668 [Zhang Qin, Zhu Xiaomin, Li Guiqiu. Heterogeneity of clastic reservoir of the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag and its hydrocarbon significance [J]. Journal of Palaeogeography 2007 9(6): 661-668]

2 陈占坤, 于兴河, 李胜利. 渤海湾盆地曙光油田曙 266 油藏沉积微相及储层的非均质性研究 [J]. 地质力学学报, 2006 12(1): 91-95 [Chen Zhankun, Yu Xinghe, Li Shengli. Sedimentary microfacies and

heterogeneity in fault block reservoir Shu266 Shuguang oilfield Bohai Gulf basin [J]. Journal of Geomechanics 2006 12(1): 91-95]

3 岳大力, 林承焰, 吴胜和, 等. 储层非均质定量表征方法在礁灰岩油田开发中的应用 [J]. 石油学报, 2004 25(5): 75-79 [Yue Dali, Lin Chengyan, Wu Shenghe et al. Application of quantitative method for characterizing reservoir heterogeneity to the development of reef limestone reservoir [J]. Acta Petroli Sinica, 2004, 25(5): 75-79]

4 王谦, 吴志芳, 张汉泉, 等. 随机分形在刻画储层非均质特性中的应用 [J]. 吉林大学学报, 2005 35(3): 340-345 [Wang Qian, Wu Zhifang, Zhang Hanquan et al. The application of statistical fractals to describing the reservoir heterogeneity [J]. Journal of Jilin University 2005 35(3): 340-345]

5 窦之林, 董春梅, 林承焰. 孤东油田七区中馆 4 馆 6 砂层组储层非均质性及其对剩余油分布的控制作用 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002 26(1): 8-10 [Dou Zhilin, Dong Chumei, Lin Chengyan. Controlling function of reservoir heterogeneity for remaining oil distribution in Guan 4-6 sand bed set in the center of seventh district of Gudong Oilfield [J]. Journal of the University of Petroleum China Edition of Natural Science, 2002 26(1): 8-10]

6 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): 90-95 [Yao Hefa, Lin Chengyan, Jin Xiujie et al. Study on multi-parameters discrimination method for flow units

- [J. *Acta Sedimentologica Sinica* 2006 24(1): 90-95]
- 7 尹太举, 张昌民, 李中超, 等. 层序地层学在油田开发中的应用实践 [J. *沉积学报*, 2005 23 (4): 664-671 [Yin Taiju Zhang Changmin Li Zhongchao et al. Application of sequence stratigraphy to improving mature oil field recovery [J. *Acta Sedimentologica Sinica* 2005 23 (4): 664-671]
 - 8 龙国清, 邓宏文, 刘斌, 等. 宝浪油田三工河组基准面旋回与储层宏观非均质性 [J. *石油地质与工程*, 2007 21 (2): 13-17 [Long Guoqing Deng Hongwen Liu Bin et al. Base level cycle and reservoir macroscopic heterogeneity of Sangonghe formation in Baoliang oilfield [J. *Petroleum Geology and Engineering* 2007 21 (2): 13-17]
 - 9 靳松, 朱筱敏, 钟大康. 基准面旋回对储层宏观非均质性的控制以胡状集油田沙三中 6-8 油层组为例 [J. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2007 21 (2): 48-52 [Jin Song Zhu Xiaomin Zhong Dakang Controls of base level cycles on the macroscopic heterogeneity of reservoir taking the sixth to the eighth units in the middle of Es₃ of Huzhuangji Oilfield as an example [J. *Journal of Xi'an Shiyou University Natural Science Edition* 2007 21 (2): 48-52]
 - 10 柯光明, 郑荣才, 高红灿, 等. 珠江口盆地珠海组 韩江组 基准面旋回与储层非均质性的关系 [J. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2007 34 (1): 41-46 [Ke Guangming Zheng Rongcai Gao Hongcan et al. Control of stratigraphic sequence over the reservoir heterogeneity of the Zhuhai-Hanjiang Formation in the Zhujiangkou basin China [J. *Journal of Chengdu University of Technology Science & Technology Edition* 2007 34 (1): 41-46]
 - 11 倪新锋, 陈洪德, 田景春, 等. 短期基准面旋回充填样式与储层宏观非均质性关系一以陇东地区三叠系延长组长 6-长 7 浊积扇为例 [J. *油气地质与采收率*, 2007 14 (2): 57-65 [Ni Xin Feng Chen Hongde Tian Jinchun et al. Relation between infilling patterns of short-term base-level cycle and macroscopic reservoir heterogeneity Taking Chang 6 to Chang 7 turbidite fan of Yanchang Formation in Longdong area as an example [J. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency* 2007 14 (2): 57-65]
 - 12 吕晓光, 李长山, 蔡希源, 等. 松辽大型浅水湖盆三角洲沉积特征及前缘相储层结构模型 [J. *沉积学报*, 1999 17(4): 572-576 [Lv Xiaoguang Li Changshan Cai Xiyuan et al. Depositional characteristics and front facies reservoir framework model in Songliao Shallow lacustrine delta [J. *Acta Sedimentologica Sinica* 1999 17(4): 572-576]
 - 13 韩晓东, 楼章华, 姚炎明, 等. 松辽盆地湖泊浅水三角洲沉积动力学研究 [J. *矿物学报*, 2000 20(3) 305-313 [Han Xiaodong Lou Zhanghua Yao Yaming et al. Analysis of the sedimentary dynamic process of the shallow water lake delta in the Songliao Basin North-east China [J. *Acta Mineralogica Sinica* 2000 20(3) 305-313]
 - 14 王嗣敏, 刘招君, 董清水, 等. 陆相盆地层序地层形成机制分析——以松辽盆地为例 [J. *长春科技大学学报*, 2000 30(2): 139-144 [Wang Simin Liu Zhaojun Dong Qinghui et al. The mechanism of formation analysis of continental sequence stratigraphy [J. *Journal of Changchun University of Science and Technology* 2000 30 (2): 139-144]
 - 15 刘占红, 李思田. 沉积记录中的古气候周期及其在高频层序形成中的意义 [J. *地质科技情报*, 2007 26(2): 30-34 [Liu Zhanhong Li Sitian Paleoclimatic cycles of depositional record and their control over the formation of high-frequency sequences [J. *Geological Science and Technology Information* 2007 26(2): 30-34]
 - 16 刘春慧, 金振奎, 张鑫, 等. 高分辨率层序地层学理论在准噶尔盆地勘探中的应用 [J. *沉积学报*, 2008 26 (2): 249-256 [Liu Chunhui Jin Zhenkui Zhang Xin et al. Application of the theory of high resolution sequence stratigraphy to Junggar Basin [J. *Acta Sedimentologica Sinica* 2008 26 (2): 249-256]
 - 17 王洪亮, 邓宏文. 基准面原理在湖相储层预测中的应用 [J. *石油与天然气地质*, 1997 18(2): 96-102 [Wang Hongliang Deng Hongwen Application of base-level principle in prediction of lacustrine reservoir [J. *Oil and Gas Geology*, 1997, 18 (2): 96-102]
 - 18 郑荣才, 尹世民, 彭军. 基准面旋回结构与叠加样式的沉积动力学分析 [J. *沉积学报*, 2000 18(3): 369-375 [Zheng Rongcai Yin Shimin Peng Jun Sedimentary dynamic analysis of sequence structure and stacking pattern of base-level cycle [J. *Acta Sedimentologica Sinica* 2000 18(3): 369-375]
 - 19 邓宏文, 吴海波, 王宁, 等. 河流相层序地层划分方法——以松辽盆地下白垩统扶余油层为例 [J. *石油与天然气地质*, 2007 28(5): 621-627 [Deng Hongwen Wu Haibo Wang Ning et al. Division of fluvial sequence stratigraphy-an example from the Lower Cretaceous Fuyou oil-bearing layer the Songliao Basin [J. *Oil and Gas Geology* 2007 28 (5): 621-627]
 - 20 冯志琨, 张兴金, 马世忠, 等. 低渗透砂岩油田开发地质分析 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1994: 4-30 [Feng Zhikun Zhang Xingjin Ma Shizhong et al. Development Geological Analysis in Low Permeability Sandstone Oil Fields [M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press 1994: 4-30]
 - 21 马世忠, 吕桂友, 闫百泉, 等. 河道单砂体“建筑结构控三维非均质模式”研究 [J. *地质学前沿*, 2008 15(1): 57-64 [Ma Shizhong Lv Guiyou Yan Baiquan et al. Research on three dimensional heterogeneous model of channel sandbody controlled by architecture [J. *Earth Science Frontiers* 2008 15(1): 57-64]
 - 22 曾溅辉, 王洪玉. 层间非均质砂层石油运移和聚集模拟实验研究 [J. *石油大学学报: 自然科学版*, 2000 24(4): 108-111 [Zeng Jianhui Wang Hongyu Experimental study on oil migration and accumulation in the heterogeneous sand beds of different porosity and permeability [J. *Journal of the University of Petroleum China* 2000 24(4): 108-111]

Application of High-Resolution Sequence Stratigraphy in the Study of the Reservoir Macro-heterogeneity: Taking the Fuyu oil layer of Chao 1-Chaoqi 3 blocks in Chaoyanggou oil reservoir of Songliao Basin as an example

ZHANG Shi-guang LU Shuang-fang ZHANG Yan

LIU Cheng-zhi ZHAO Rong ZHONG Wei-wei

(Daqing Petroleum Institute Daqing Heilongjiang 163318)

Abstract In application to high-resolution sequence stratigraphy principles and methods, forty one short-term base-level cycles and seven middle-term base-level cycles and two long-term base-level semi-cycles in Fuyu oil layer of Chao 1-Chaoqi 3 blocks of Chaoyanggou oil field are identified. By the sedimentary dynamics analysis of genesis of multiage base-level cycles, quantitative analysis of the core testing and statistical data which characterize the macroscopic heterogeneity of the reservoir, we point out that with the uprising of the long-term base-level cycle, in-layer heterogeneity of short-term base-level cycles becomes stronger, and interlayer heterogeneity of middle-term base-level cycles becomes weaker, and plane heterogeneity of short-term base-level cycles becomes stronger. With the subsiding of the long-term base-level cycle, every trend is contrary. By analysis, the changes of sedimentary environment that are caused by the changes of base-level cycles and associated accommodation are the determinative factors for feature differences of reservoir macroscopic heterogeneity.

Key words high-resolution sequence stratigraphy, base-level cycle, Songliao Basin, Fuyu oil layer, macroscopic heterogeneity