

东到桃利庙,西达定探 1 井,北起伊 9 井,南至安边,东西宽 100 km,南北长 196 km,总面积约 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$,构造形态为由北东向西南方向倾斜的单斜,区内除有少数鼻状构造外,大都十分平缓。苏 6 井区位于苏里格气田中部(图 1),属于该气田最有利的天然气富集区和重点开发区,其上古气藏储层主要发育于中二叠统下石盒子组盒 8 下段、盒 8 上段和盒 7 段等层位,地层厚度一般为 80~100 m,以盒 8 段为主力产层。

该井区范围内下石盒子组为一套大型河流—冲积平原沉积体系,岩石类型主要为含细砾粗砂岩和中—粗粒岩屑石英砂岩、粉砂岩和泥岩的互层组合(图 2),局部夹炭质页岩和煤层^[5]。储集砂体的成因类型以河流相的心滩和边滩砂体为主,厚度为 40~60 m,作为优质烃源岩的炭质页岩和煤层的最大累积厚度分别为 25~30 m 和 15~20 m,具备十分优越的生、储、盖组合条件。

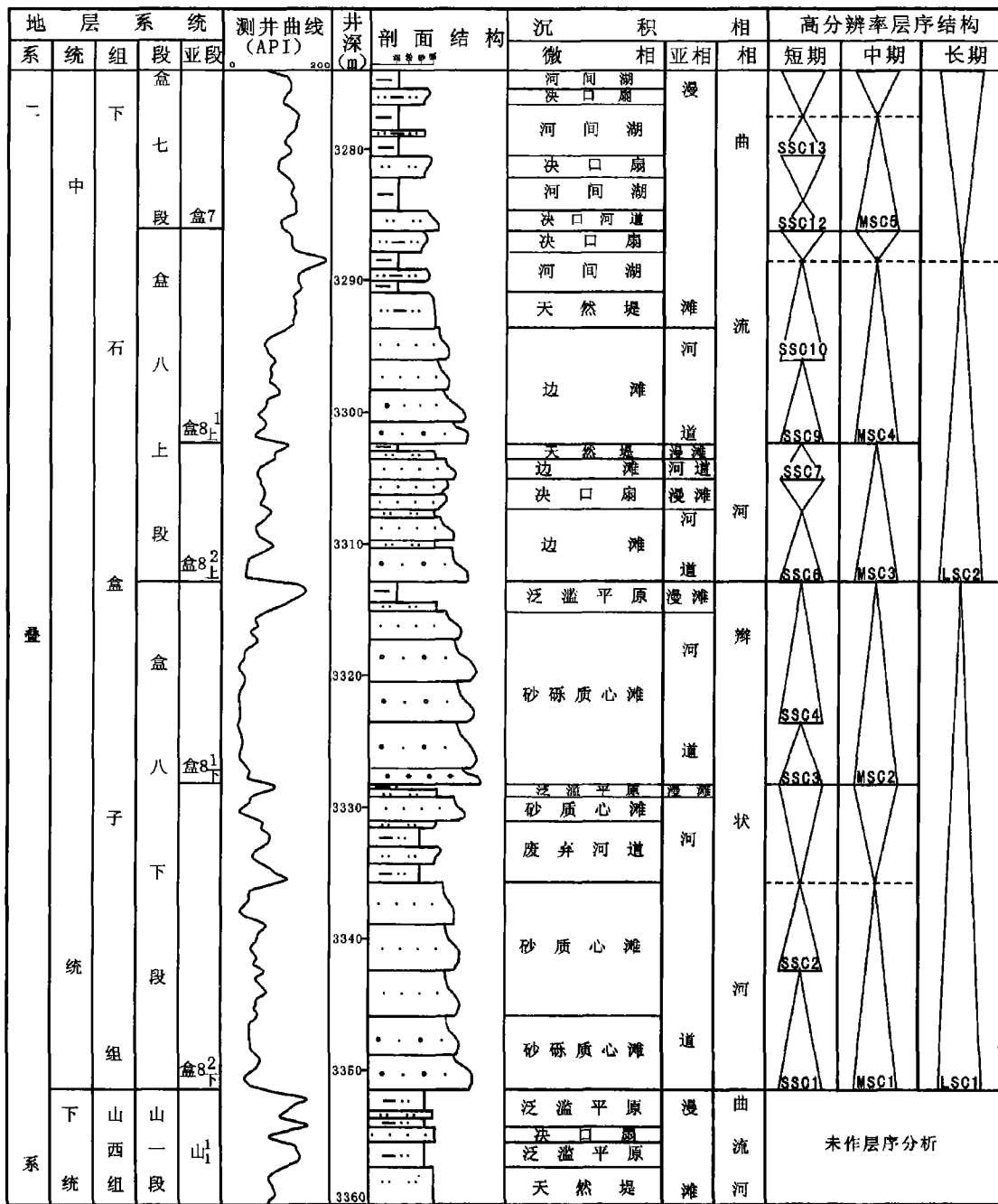


图 2 苏 6 井盒 8 段沉积相和高分辨率层序地层综合柱状图

Fig 2 The sedimentary facies and high-resolution sequence comprehensive column of the 8th member of Shihezi Formation of Su-6 well

主。砂体之间不发育泥、粉砂质隔层,因而砂体的连通性极好,为最有利储层发育的短期层序结构。A型形成于水较深但流动较急的缓慢湖进—快速湖退和 $A/S < 1$ 的沉积条件下,层序的岩性组合相对较复杂,主要由底冲刷面河道砂体天然堤粉砂岩泛滥平原或河道间泥岩(或夹煤层、煤线)组成,或由辫状河道砂体与废弃河道泥粉砂岩的互层组成。与 A_1 型比较,此类型不仅位于层序中下部的河道砂体保存较完整,而且位于砂体上部细粒的溢岸沉积往往也得到不同程度的保存,储集砂体主要出现在层序的中下部,而上部为局部泥、粉砂岩隔层发育位置,也为一类非常有利于储层发育的短期层序结构。

2.1.2 对称型旋回结构(简称 C型)

此类型层序形成于沉积物供给率等于或略小于可容纳空间增长率 ($A/S \geq 1$) 的条件下,为下石盒子组河流—冲积平原沉积体系中另一类最为发育的短期旋回层序结构类型,主要特点有:层序具有较完整的基准面上升和下降半旋回沉积记录,往往具有由粗变细复变粗的韵律性旋回,其上升半旋回通常由河道心滩或边滩砂体夹漫滩粉砂岩和泥岩组成,下降半旋回往往由泛滥平原(或河间湖泊、沼泽)与决口扇(或决口河道)粉砂岩与泥岩互层组成;层序中发育有两种界面类型,其一为层序的底、顶的为小型冲刷面或相关整合界面,其二为层序内的短期洪泛面;

按层序中的上升半旋回与下降半旋回厚度变化状况,可进一步细分为对称性变化各不相同的 3 个亚类型,其一为上升半旋回为主的不完全对称型 (C_1 型),其二为上升半旋回与下降半旋回近于相等的近完全—完全对称型 (C_2 型);其三为下降半旋回为主的不完全对称型 (C_3 型)。

2.1.3 短期旋回层序的分布模式

在苏 6 井区下石盒子组河流沉积体系的不同相带位置,同一时间段的短期旋回沉积序列、结构类型和叠加样式在纵、横向上变化都很大(图 4),但上述 2 种基本类型和 5 个亚类型层序的结构在不同相带位置的空间分布、演化规律和相互之间的对比关系完全遵循可容纳空间机制所确定的 A/S 比值条件。在物源供给充沛的河流沉积体系中,由于短期旋回地层过程主要处在 $A/S < 1$ 的条件下,基准面上升期为有效可容纳空间的主要堆积期,不但为河道砂体的主要沉积充填期和泛滥平原溢岸洪流的广泛堆积期,而且沉积界面始终处在与上升的基准面并进状态,因此,一旦进入下降期,沉积界面即被基准面穿越而发生广泛的侵蚀作用,其中以河道的下切侵蚀作用最为强烈,此时有限的沉积作用仅发生在早期泛滥平原和河间湖泊、沼泽等相对低洼的沉积区,因此, A 型结构短期旋回层序主要分布在河道沉积区, C 型广泛发育在泛滥平原和河道间洼地沉积区,从而在同一河流沉积体系的不同部位,出现河道砂体的 A 型至泛滥平原的 C_1 型和河道间湖泊、沼泽的 C_2 型,偶见 C_3 型短期旋回。

2.2 中期旋回层序

中期旋回层序相当于 Vail 的 1 级旋回或准层序组^[7],属于长期旋回层序地层过程中次一级的沉积旋回产物,大多数具有较完整的水进—水退旋回结构。苏 6 井区盒 8 段的中期旋回厚度普遍较薄,一般在 15~25 m 之间,很少超过 30 m,仅相当于一个河道旋回的带状沉积充填序列,究其原因,应与鄂尔多斯盆地晚古生代的沉积作用发生在非常稳定的克拉通盆地中有关,由于盆地的构造沉降幅度很小、很平缓,而冲刷与侵蚀作用极其频繁,因而在漫长的地质

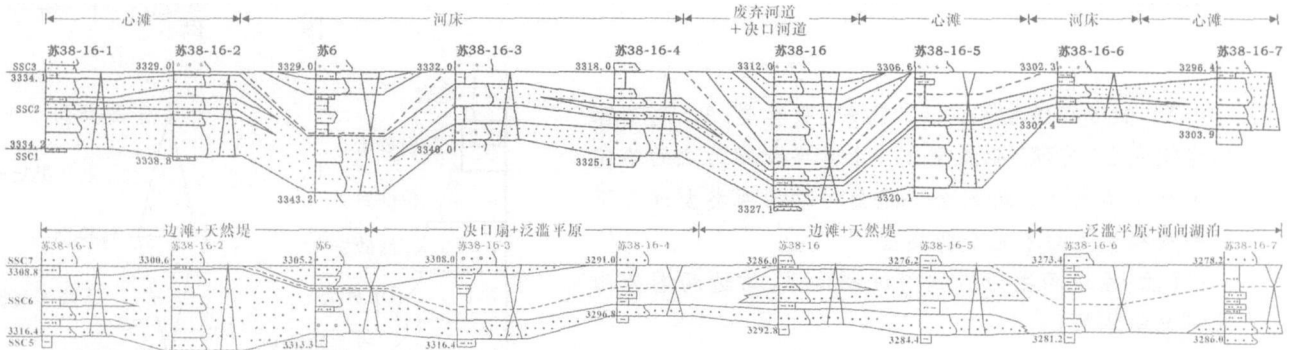


图 4 苏 6 井区下石盒子组河流沉积体系不同相带的短期旋回层序结构、剖面分布和对比关系

A 盒 8_{T2} 亚段 MSC1—SSC2 层序辫状河沉积体系的短期旋回层序结构类型、剖面分布和对比关系

B 盒 8_{T2} 亚段 MSC3—SSC7 层序曲流河沉积体系的短期旋回层序结构类型、剖面分布和对比关系

Fig 4 Short-term cyclic sequence structure, distribution in section and correlation of different microfacies in river sedimentary system of lower Shixiezi Formation in Su-6 well area

历史中所能得到保存的沉积记录非常有限有关。其基本特点为: 一般由 2~3 个短期旋回层序叠加组成; 非对称的 A 型中期旋回由若干 A 型和 A 型与 C_1 型短期旋回层序叠置而成, 主要发育在辫状河和曲流河的河道砂体中; 在对称的 C 型中期旋回层序中, 上升半旋回主要由 C_1 型和 C_2 型短期旋回叠加组成向上连续加深的序列, 较少出现 A 型; 而下降半旋回则主要由 C_2 型和 C_3 型叠加组成向上连续变浅的序列, 偶尔出现 A 型和 C_1 型; 河流沉积体系不同部位的中期旋回层序结构变化所反映的中期基准面升、降过程, 同样具有类似短期旋回层序的沉积学响应特征; 从基准面升、降变化与沉积物保存状况关系来看, 以中期上升早期与下降晚期发育的“A 型”和“ C_1 型”两类短期旋回结构中的下层砂体粒度更粗、分选更好、而泥质含量相对较低, 为有利储层发育位置。

2.3 长期旋回层序

苏 6 井区下石盒子组中的 LSC1 和 LSC2 两个长期旋回层序相当于 Vail 的 Ⅱ 级旋回层序^[7], 厚度不大, 在 30~50 m 之间, 但都以大型底冲刷面为层序的底界面和具有特征的区域性缓慢水进—高速水退的旋回性(图 2)。其中 LSC1 由 MSC1 和 MSC2 两个中期旋回叠加组成, 大多数属于上升半旋回厚度远大于下降半旋回的 C_1 型旋回层序, 部分为仅发育上升半旋回的向上变深的非对称 A 型旋回层序。LSC2 由 MSC3~MSC5 三个中期旋回叠加组成, 部分属于 C_1 型旋回层序, 部分为上升与下降半旋回近于相等的对称 C_2 型。苏 6 井区下石盒子组长期旋回层序结构特征表明其主要形成于 $\Delta S < < 1$ $\Delta S < 1$ 的基准面缓慢上升和高速下降的地层旋回过程中, 沉积界面与基准面主要处于并进状态, 层序的顶部界面往往由基准面发生大幅度下降和穿越沉积界面时所形成的广泛侵蚀暴露面所组成, 此特征也与河流相层序中以保存基准面上升半旋回的沉积记录为主, 而下降半旋回以侵蚀作用为主的地质特征是相一致的, 因此, 有利储层发育的河道砂体主要出现的长期基准面上升半旋回的早中期, 储集砂体大多呈带状和团块状产出。洪泛期以发育溢岸沉积的泥、粉砂岩和湖泊、沼泽微相的炭质泥岩和煤层为主, 为隔层或烃源岩主要的产出位置, 对带状和团块状产出的储集砂体有强烈的分隔作用。而上升半旋回除了在低洼的河间湖泊、沼泽仍为继承性的炭质泥岩和煤层组合的隔层产出位置, 其余地区以暴露侵蚀作用为主, 不利于储层的发育。

3 层序地层格架及砂体分布

在众多钻井岩芯及测井剖面精细沉积相和高分辨率层序分析的基础上, 以地震信息为约束条件, 运用旋回等时对比法则^[1], 以长、中期旋回层序的二分时间单元(即基准面上升和下降两个半旋回时间单元)分界线(即层序界面和洪泛面)为优选时间地层等时对比位置, 以最具等时对比意义的中期旋回层序为等时地层对比单元, 对研究区内二叠系下石盒子组进行高分辨率层序地层等时对比, 并建立了等时层序地层格架, 将单井一维地层和岩相信息转化为三维地层和岩相信息(图 5), 在此基础上分析苏 6 井区下石盒子组河流—冲积平原沉积体系砂岩储层分布与不同级别的基准面旋回的关系, 有如下几个特点: 最有利储层发育的砂体为辫状河心滩和曲流河边滩砂体, 此两类砂体通常出现在中、长期旋回层序的界面上, 在层序地层格架中大多数具有较好的等时对比性, 并以普遍发育 A_1 型、 A_2 型和 C_1 型短期旋回层序结构为显著特征; A 型和 C_1 型的中、长期旋回层序上升半旋回, 大多数由连续叠置的河道砂体组成, 砂体之间常被底冲刷面分割, 而泥、粉砂岩夹层少, 大多数具有稳定的拼合板状储层结构, 砂体的垂向和纵向、侧向连通性较好; 在 C_2 或 C_3 型中、长期旋回层序中, 出现在上升半旋回中下部的砂体也具有被冲刷面分割的特点, 但砂体之间薄的泥、粉砂岩夹层明显增多, 砂体的纵向连通性较好, 但垂向和侧向连通性变差, 大多数具有非稳定的“迷宫状”储层结构。

4 岩相古地理编图与砂体分布预测

采用以高分辨率层序分析为核心的层序—岩相古地理编图技术, 将岩相古地理研究和编图与沉积学和层序地层学的研究紧密结合起来, 利用层序界面和其它关键界面划分的地质单元为等时地层编图单元编制反映岩相古地理特征的沉积相图和砂体分布图, 预测有利储集砂体横向分布。实现过程为: 在层序地层格架中对相当短期旋回层序级别的小层砂体进行劈分并按其成因类型和产出层序标定在各自的对比剖面中, 然后结合短期旋回结构类型与砂体发育状况的关系进行等时追踪对比, 精细描述砂体的井间边界位置、几何形态、分布规模、连续性、方向性和组合特征。砂体的等时追踪既可采用已知相类型的“相控模式预测法”进行描述, 也可采用“砂岩密度法”进行连线, 投影到平面上, 在沉积体系模式约束下, 实现沉

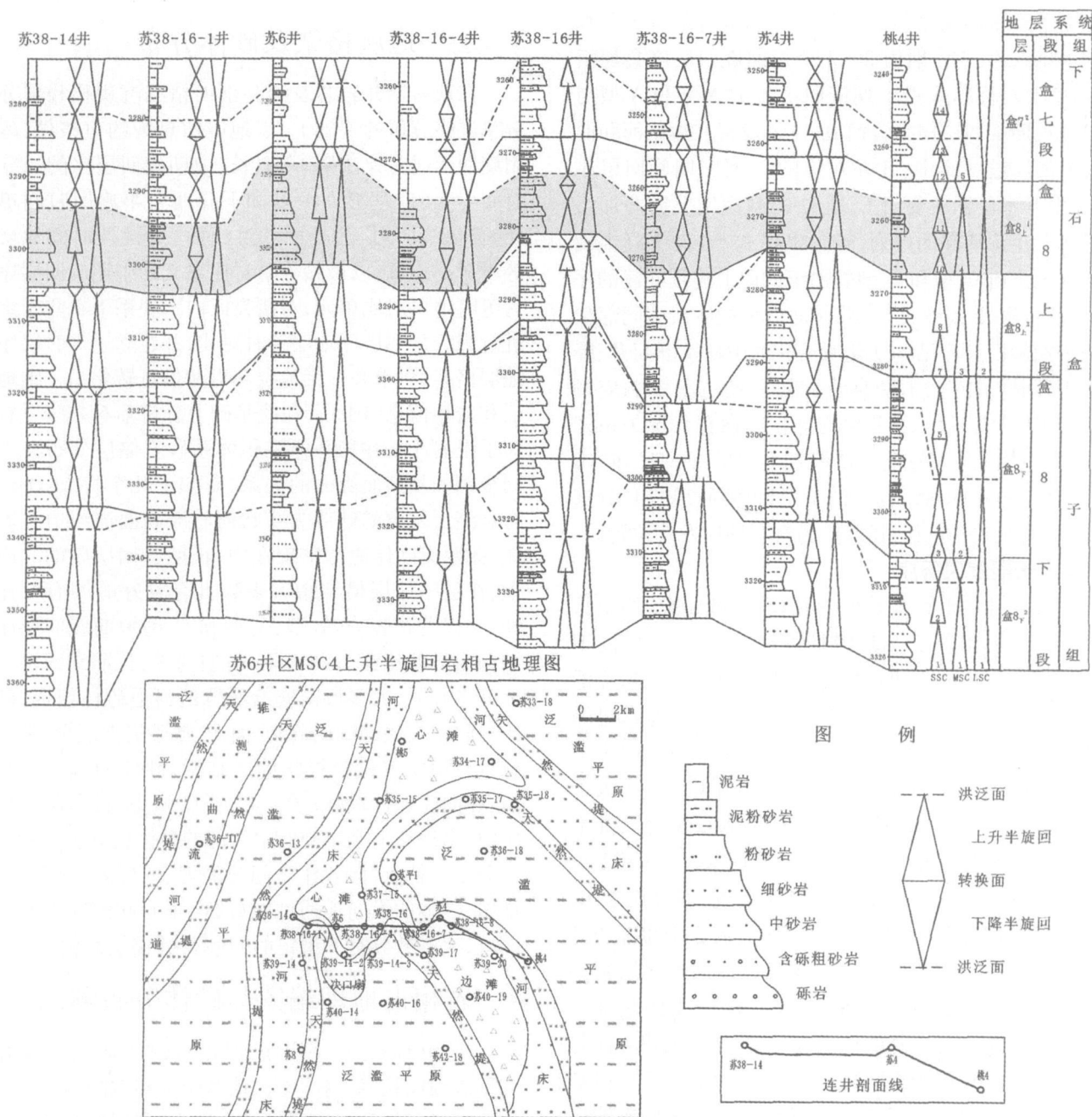


图 5 苏 6 井区下石盒子组等时层序地层格架及岩相古地理图

Fig 5 The chrono-stratigraphic framework and lithofacies-palaeogeographical map in the lower Shihezi Formation in Su 6 well area

积微相和砂体横向分布图的编制。

为进一步的储层精细描述提供依据, 分别以中期基准面上升半旋回相域(相当水进体系域)和下降半旋回相域(相当水退体系域), 以及短期基准面上升半旋回相域为两种时间尺度的等时地层编图单元, 编制苏 6 井区盒 8 上段各中、短期基准面上升、下降半旋回沉积微相和砂体分布图, 中期半旋回编图以适用

于详勘和开发早期阶段, 反映沉积微相和不同成因类型的砂体平面分布特征和厚度变化规律为主要编图内容, 重点突出以砂层为目标的有利相带和区块分布特征, 短期半旋回编图适用于开发阶段, 主要研究最有利储层发育的中期旋回早期的短期旋回内储集砂体、隔层平面和剖面分布特征为重点内容。

勘探实践表明, 相当于短期旋回的单砂体的分布

是控制苏 6 井区下石盒子组岩性气藏分布的关键因素, 因此, 短期旋回中砂体分布值得开发部署重视, 依据上述方法编制的沉积相和砂体分布图较好地刻画了砂体分布, 为下一步勘探部署提供了依据 (图 6)。

5 主要认识

通过上述对苏 6 井区下石盒子组高分辨率层序地层研究, 得出如下认识:

基准面旋回层序主要形成于 $A/S \ll 1$ $A/S < 1$ 的基准面缓慢上升和高速下降的地层旋回过程中, 以发育上升半旋回厚度远大于下降半旋回的不完全对

称型 (C_1 型) 和仅保存上升半旋回的向上“变深”非对称型结构 (A 型) 的长、中、短期旋回结构类型为主。

有利于储层发育的河道砂体主要出现在长期基准面上升半旋回的早中期, 中期基准面上升早期与下降晚期发育的“A 型”和“C 型”两类短期旋回结构中。

储集砂体大多呈带状和团块状产出, 单个河道砂体的规模小, 洪泛期泥、粉砂质隔层对侧向和垂向叠置河道砂体之间的连通性和储层非均质性的影响严重, 导致岩性气藏分布主要受相同中、短期旋回中砂体分布的控制, 因此, 勘探开发方案制定应以中、短期旋回砂体为主要依据。

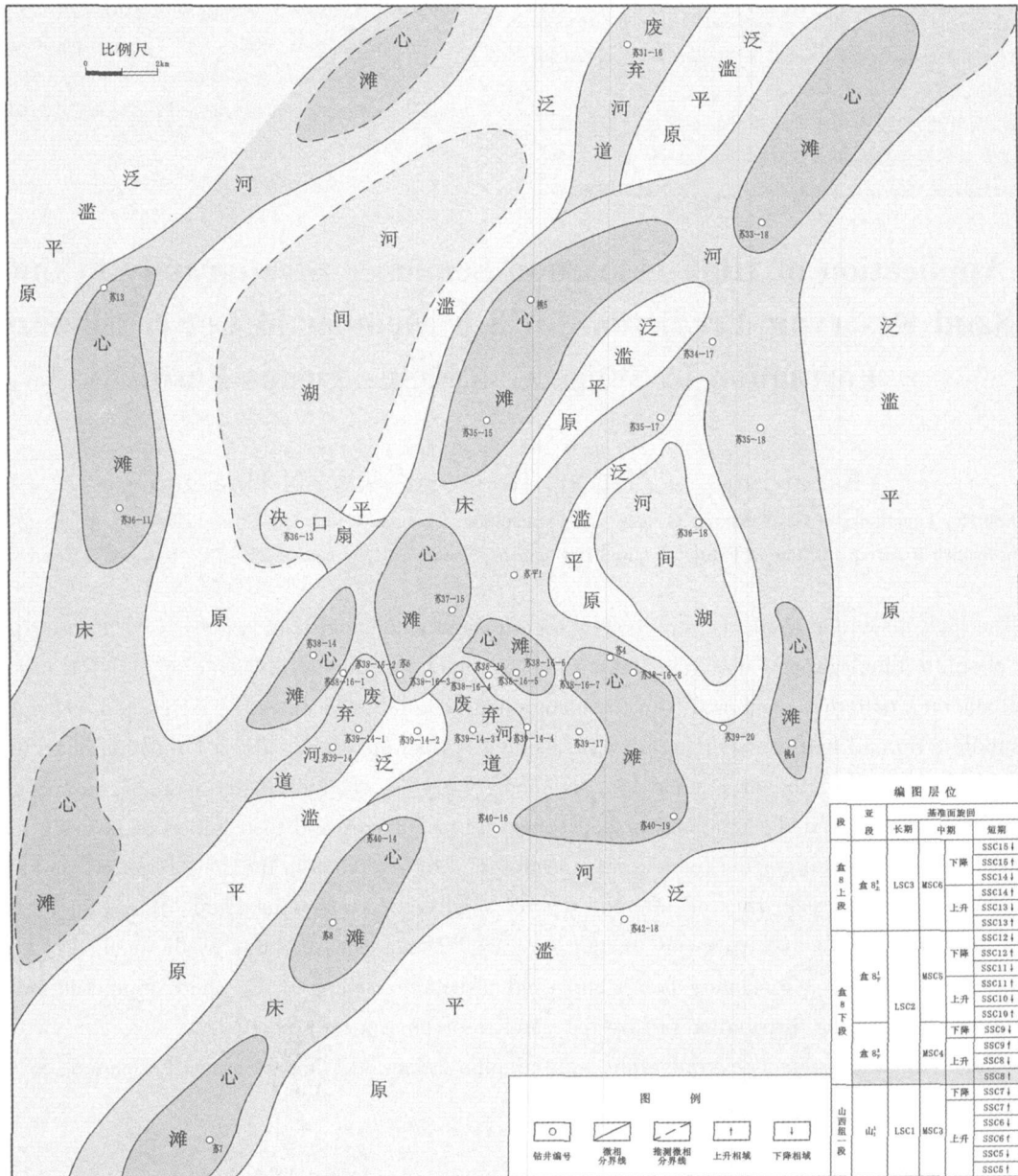


图 6 苏 6 井区 MSC4-SSC8 上升半旋回沉积相和砂体分布图

Fig 6 The sedimentary facies and sandbody distribution map of the rising hemicycle of 8th short-term cyclic sequences in Su 6 well area

参考文献 (References)

- 1 Posamentier H W, Jercey M J, Vail P R. Eustatic controls on elastic deposition conceptual framework. In *Sea-level Changes an Integrated Approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, SEPM, 1988 42: 109~ 124
- 2 Cross T A and Lessenger M A. Sediment volume partitioning rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation. Accepted for publication in *Nonwegian Petroleum - Forening Conference Volume "Predictive High-Resolution Sequence Stratigraphy"*. 1994
- 3 郑荣才, 彭军, 彭光明, 等. 高分辨率层序分析在油藏开发工程中的应用. 沉积学报, 2003, 21(4): 654~ 662 [Zheng Rongcai, Peng Jun, Peng Guangming *et al*. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy and its application in development of oil reservoir. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(4): 654~ 662]
- 4 郑荣才, 吴朝容, 叶茂才. 浅谈陆相盆地高分辨率层序地层研究思路. 成都理工大学学报, 2000 27(3): 241~ 244 [Zheng Rongcai, Wu Chaorong, Ye Mao cai. Research Thinking of high-resolution sequence stratigraphy about a terrigenous basin. *Journal of Chengdu Technology University*, 2000 27(3): 241~ 244]
- 5 侯中健, 陈洪德, 田景春, 等. 苏里格气田盒 8 段高分辨率层序结构特征. 成都理工大学学报, 2004 31(1): 46~ 52 [Hou Zhongjian, Chen Hongde, Tian Jingchun *et al*. Characteristics of high-resolution sequence structure for Member 8 of Shihezi Formation in Sulige gas field of Ordos Basin. *Journal of Chengdu Technology University*, 2004, 31(1): 46~ 52]
- 6 邓宏文, 王洪亮, 李熙喆. 层序地层基准面的识别、对比技术及应用. 石油与天然气地质, 1996 17(3): 177~ 184 [Deng Hongwen, Wang Hongliang, Li Xi zhe. Identification and correlation techniques of sequence stratigraphic base-levels and their application. *Oil & Gas Geology*, 1996 17(3): 177~ 184]
- 7 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义. 沉积学报, 2001, 19(2): 249~ 255 [Zheng Rongcai, Peng Jun, Wu Chaorong. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 249~ 255]

Application of High-resolution Sequence Stratigraphy to the Sand Reservoir Prediction for 8th Member of Lower Shihezi Formation in Sulige Gas Field, Ordos Basin

YE Tai-ran^{1,2} ZHENG Rong-cai¹ WEN Hua-guo¹

(1. State Key Laboratory of Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;

2. Deyang Branch Research Institute of Exploration and Development, Southwest Company, SINOPEC, Deyang Sichuan 618000)

Abstract The high-resolution sequence stratigraphy theories and technologies are widely used in the exploration and exploitation of subtle lithologic gas reservoir taking it as a direction, through dynamic analysis on base-level cycle structure and stacking pattern, combined with the comprehensive studies of outcrops, cores and well logs, two long-term, five middle-term and fourteen short-term cyclic sequences from the lower Shihezi Formation of Su 6 well area in Sulige gas field are classified. The structure types, sedimentary cycles, stacking patterns of short-term, middle-term, long-term cyclic sequences and the relationship between cyclic sequences and distribution of favoring sand are discussed in detail. A chrono-stratigraphic framework is established by reference to the long-term and middle-term cycle sequences in which the characteristics of different type of sand are discussed in detail. Based on the division and correlation of individual sandbody correspond to short-term cyclic sequence, directing by the method of lithofacies-paleogeographical mapping, the sedimentary facies and sand distribution maps of the short or middle-term cyclic sequences come into being, the distribution of favoring sand reservoir can be predicted.

Key words high-resolution sequence stratigraphy, stratigraphic framework, lower Shihezi Formation, Su 6 well area, reservoir prediction