文章编号:1000-0550(2013)01-0077-12

鄂尔多斯盆地延长组长9砂体的垂向结构及主控因素分析①

赵云翔[1] 陈景山[1] 王建峰[1] 丁 熊[1] 姚泾利[2] 李士祥[2] 李 宁[3]
(1. 西南石油大学资源与环境学院 成都 610500;2. 长庆油田公司勘探开发研究院 西安 710021;
3. 大港油田滩海开发公司 天津 300280)

摘 要 近年来随着对鄂尔多斯盆地油气地质条件的重新认识,在上三叠统延长组下部的长9油层组中获得了新发现、新突破,该油层组成为油气勘探重要的战略接替层系。通过露头剖面、钻井、岩芯、测井及分析化验等资料的综合研究,结合沉积古地理背景分析,以沉积特征和指相标志的识别为依据,认为盆地内长9砂体的成因类型主要包括三角洲环境与牵引流作用有关的陆上与水下的分流河道、天然堤、决口扇、三角洲前缘的河口坝、远砂坝、席状砂等砂体,滨浅湖环境与湖浪和湖流改造作用有关的砂质滩坝、席状砂等砂体。根据岩芯剖面精细描述及沉积微相分析,结合测井曲线解释,指出长9单砂体主要发育B、C、I、F、D五种基本垂向结构类型,多层砂体的垂向叠加样式复杂多变,常见的有BB、CC、CB、II、CI、BC、BI、FF等类型。砂体垂向结构的主控因素分析表明,沉积环境、沉积相以及基准面升降旋回是控制单砂体垂向结构、多层砂体垂向叠加样式及分布的主要地质因素。

关键词 垂向结构 叠加样式 砂体 三角洲 长9油层组 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 赵云翔 男 1984年出生 博士研究生 矿产普查与勘探 E-mail: 469913829@qq.com

中图分类号 TE121.3 **文献标志码** A

0 引言

上三叠统延长组是鄂尔多斯盆地最重要的产油层系之一,近年来随着对鄂尔多斯盆地油气地质条件的重新认识,在其下部的长9油层组中获得了新发现,勘探取得了较大突破,如峰2、胡148、元152、旺9等探井均获得了工业油流,显示该油层组具有良好的勘探前景[1~3],成为该盆地延长组石油勘探重要的战略接替层系。然而,有关全盆地长9沉积相及砂体发育特征等基础性研究,尽管前人已做过一些工作,并取得了一些已用于指导油气勘探与开发的重要研究成果[4~6],这为随后的研究提供了必要的支撑,但由于早期勘探在盆地内钻穿长9油层组的探井较少,可用的资料也有限,某些认识显然有待于进一步深化。因此,以新资料、新观点重新认识全盆地长9油气地质基本特征,尤其是沉积相和储集砂体的结构特征,是进一步提升全盆地长9油气勘探成功率的需求。

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组根据岩性组合和含油特征,通常划分为5个岩性段10个油层组[6]。位于延长组下部的长9油层组主要由陆相砂、泥岩地层组成,岩性复杂多变,主要为浅灰、褐灰、绿灰色砂砾岩、粗粒—细粒砂岩、灰色粉砂岩与黑灰、深灰色泥岩、页岩的不等厚互层,间夹灰黑色碳质泥岩、煤线或薄煤层,东部地区还夹灰褐色油页岩、浅灰色凝灰岩和凝灰质泥岩,厚度一般在80~120 m之间,分别与下伏长10和上覆长8油层组成整合接触。通过露头剖面、钻井、岩芯、测井及分析化验等资料的综合研究,结合沉积古地理背景分析,以沉积特征和指相标志的识别为主要依据,在鄂尔多斯盆地延长组长9油层组中识别出冲积扇、辫状河、曲流河、辫状河三角洲、曲流河三角洲、湖泊等6种主要的沉积相类型。勘探成果与研究结果表明,盆地内长9储集砂体几乎全部分布于三角洲沉积体系内,其成因类型繁多,规模大小不等,形状千姿百态,由于其成分、粒度、分选性、泥质含量、规模等本身固有的特征各有千秋,再加上后期成岩作用的差异改造,导致其储集性能千差万别,有的砂体甚至几乎完全丧失作为储集体的功能。因此,从砂体的成因、垂向结构及叠加样式的角度来研究长9砂体,不仅有助于沉积环境的正确解释,深化对储集砂体的认识,判断砂体中优质储层发育的位

①四川省重点学科建设项目(编号:SZD0414)资助
收稿日期:2011-12-11;收修改稿日期:2012-03-14

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

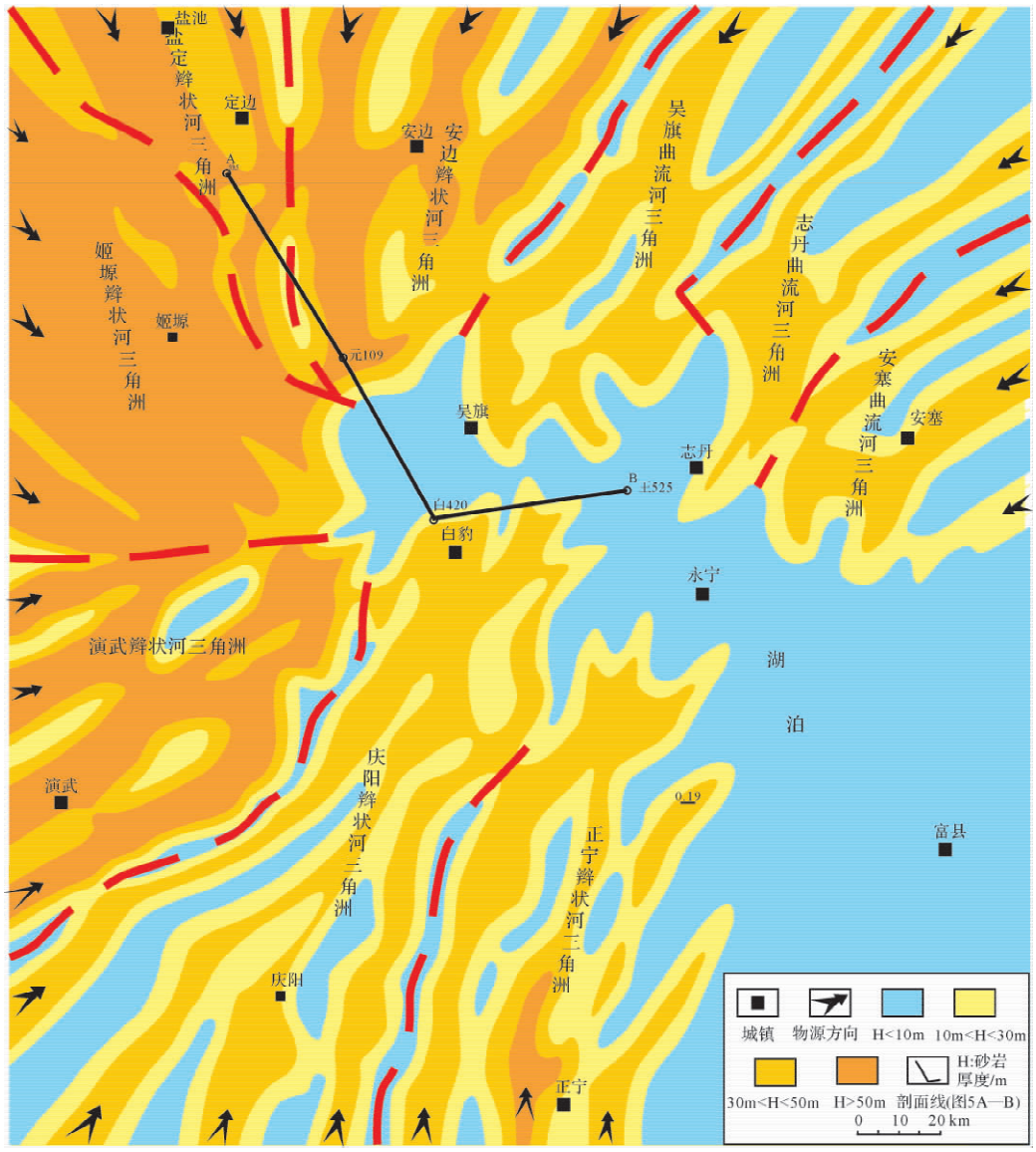

图1 鄂尔多斯盆地延长组长9砂岩厚度和三角洲相平面分布简图

Fig. 1 Diagrammatic map showing sandstone thickness and delta distribution of Chang 9, Yanchang Formation in Ordos Basin

置,并且也可以提高储集砂体油气勘探与开发的实效[7]。

1 砂体分布及成因类型

根据300多口钻井、测井资料的分析和数据统计,研究区长9砂岩的累积厚度分布于0~114 m之间,一般为10~50 m,总体上显示出西北厚、东南薄的变化趋势(图1),为鄂尔多斯盆地晚三叠世主要成砂时期之一。在多水系、多物源供给的影响下,长9砂体总体上以众多的厚砂体呈伸长状向心式从湖盆边缘朝湖盆中心延伸分布为特征,盆地西北、西南、东北、北部、南部皆有砂体分布,以西北部的砂体最为发育,厚度也最大。长9砂体的这种发育分布格局显然与当时发育"多三角洲环湖"的沉积格局密切相关。

如图1所示,在多水系、多物源供给的影响下,长9时期盆地内以发育"多三角洲环湖"的沉积格局为特色[8]。东北部分布北东—南西向延伸的吴旗、志丹和安塞三个规模较大的曲流河三角洲;从西北部到西南部,以发育呈马蹄形连续分布的辫状河三角洲为特征,主要有:近北南向延伸的安边辫状河三角洲、北西—南东向延伸的盐定和姬塬两个辫状河三角洲、南西—北东向延伸的演武和庆阳两个辫状河三角洲、近南北向延伸的正宁辫状河三角洲。这些三角洲均呈向湖盆方向积极推进的伸长状、舌状、朵状或鸟足状,

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

相邻的两个三角洲之间彼此交错连接。盆地西北部和西部表现出三角洲砂岩相对较厚和砂多泥少的特征,砂岩累积厚度一般大于 50 m,局部井区可厚达 114 m,砂岩/地层厚度比值大于 0.5; 东部则显示出砂岩相对较薄和泥多砂少的特点,砂岩累积厚度一般小于 50 m,砂岩/地层厚度比值普遍小于 0.5。稳定的湖域主要分布于吴旗—永宁—富县一带,长 9 早期主要表现为滨浅湖,晚期伴随盆地沉降和湖侵,发展成以"李家畔页岩"为代表的半深湖—深湖环境[9]。由此可以看出,盆地内长 9 砂体主要形成于辫状河三角洲、曲流河三角洲以及滨浅湖环境。按形成砂体的沉积环境与沉积相,长 9 砂体的成因类型可分为以下三类: (1) 三角洲平原环境与牵引流作用有关的砂体,主要是分流河道、决口扇、天然堤、洪泛席状砂等砂体类型; (2) 三角洲前缘环境与牵引流作用有关的砂体,主要包括水下分流河道、河口坝、远砂坝、水下决口扇、水下天然堤、前缘席状砂等砂体类型; (3) 滨浅湖环境与湖浪和湖流改造作用有关的砂体,主要为漫流席状砂体和砂质滩坝砂体。在这些不同成因类型的砂体中,陆上与水下分流河道、大中型决口扇、河口坝、砂质滩坝等砂体的沉积物较粗,厚度一般较大,因此具有较好的储集潜力; 其它成因类型的砂体,由于其粒度一般较细,泥质含量较高,分布面积与厚度往往较小,储集潜力有限。

2　单砂体垂向结构的基本类型与特征

砂体垂向结构是指砂体内部的碎屑组分、沉积结构、沉积构造、测井响应等特征在垂向上的变化样式即沉积序列或沉积韵律。这是对砂体沉积时物源供给、沉积水动力等沉积环境要素随时间发生有规律变化的沉积响应[10,11]。根据岩芯剖面精细描述及沉积微相分析,结合岩芯标定的测井曲线解释(图 2),长 9 单砂体的垂向结构样式主要发育以下五种基本结构类型(表 1,图 3),并以垂向结构形态的英文名称第一个字母作为其代码。

(1) B 型结构

B 型垂向结构以单砂体发育略显向上变细的沉积序列并具有箱形测井曲线形态为典型特征(图 3),也可称为箱形结构。底为明显的冲刷突变面,顶为突变或弱渐变。砂体以粗颗粒组分占优势,主要由砂砾岩、粗粒砂岩、中粒砂岩以及细粒砂岩等组成,明显缺乏细粒层,沉积构造以块状层理、大型交错层理和平行层理为主,显然是对沉积水动力较强的高能环境的沉积响应,其垂向结构既可以表现为下粗上细的、泥质含量变化不大的正韵律(图 3 Ⅰ),也可以显示出粒度和泥质含量从下到上均无显著变化的块状体(图 3

表 1　鄂尔多斯盆地长 9 单砂体垂向结构的基本类型与特征

Table 1　Basic types and characteristics of vertical structure of Chang 9 individual sandbody of Yanchang Formation in Ordos Basin

类型	GR 响应曲线	结构特征	岩性特征	代表性分布	储层有利发育位置
B 型 (Box shape)	箱形	底为明显的冲刷突变面,顶为渐变或突变,有的发育向上变细序列	主要为砂砾岩、粗粒—细粒砂岩	三角洲陆上与水下主分流河道	全部
C 型 (Campaniform)	钟形	底为冲刷突变面,顶为渐变,发育典型的向上变细的沉积序列	主要为砂砾岩、粗粒—细粒砂岩及粉砂岩	三角洲陆上与水下分流河道	下、中部
I 型 (Infundibuliform)	漏斗形	底为渐变,顶为突变,发育典型的向上变粗的沉积序列	主要为泥质粉砂岩、粉砂岩、细粒砂岩至中粒砂岩	三角洲前缘远砂坝—河口坝复合体	上部
F 型 (Finger)	指形	粒度和泥质含量由下向上均无显著变化,既可表现为正韵律,也可显示出反韵律,层厚较薄	主要为细粒砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩	三角洲平原和前缘的决口扇、天然堤、席状砂,滨浅湖小型滩坝、漫流席状砂	基本上不利于储层发育
D 型 (Dentoid)	粗齿形	粒度和泥质含量由下向上均无显著变化,既可表现为正韵律,也可显示出反韵律,层厚较薄	主要为细粒砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩	三角洲平原和前缘的决口扇、天然堤、席状砂,滨浅湖漫流席状砂	不利于储层发育

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

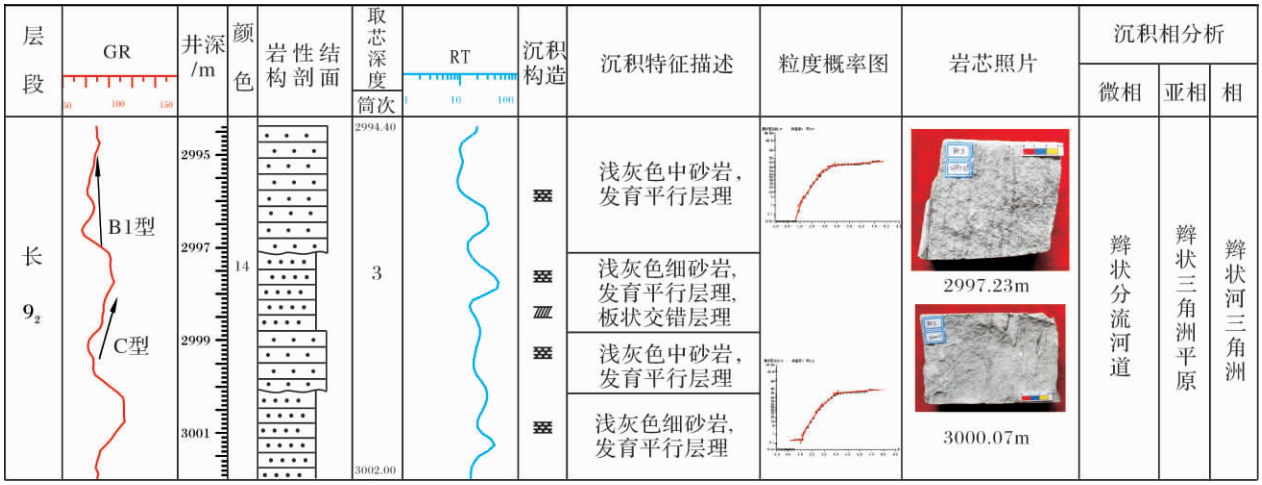

图2 环3井岩芯分析与测井曲线标定图

Fig. 2 The profile showing core analysis and log calibration of Huan 3 Well

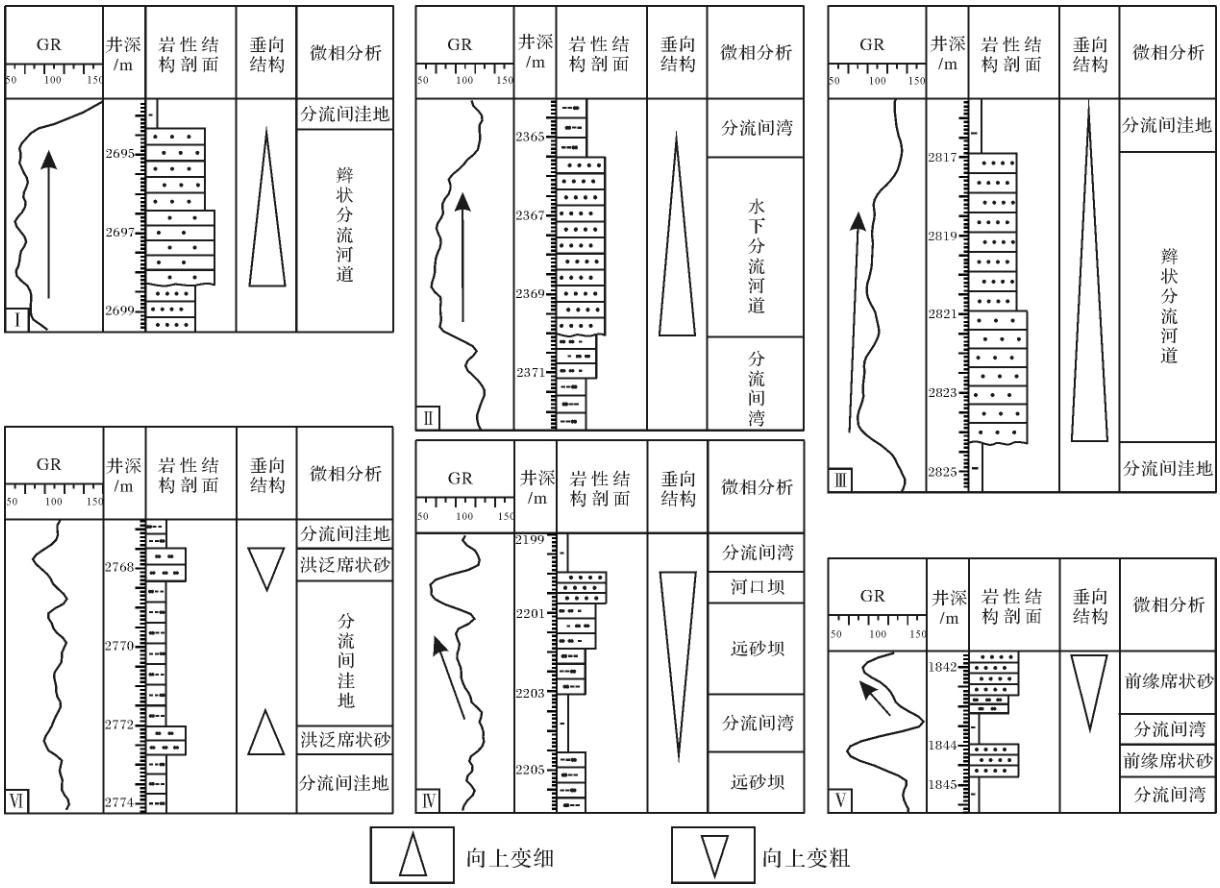

图3 鄂尔多斯盆地长9单砂体垂向结构基本类型与特征的剖面图

Ⅰ：B_1型结构（池89井）；Ⅱ：B_2型结构（元428井）；Ⅲ：C型结构（池56井）；Ⅳ：I型结构（元430井）；Ⅴ：F型结构（宁36井）；Ⅵ：D型结构（黄14井）

Fig. 3 The profile showing basic types and characteristics of vertical structure of Chang 9 individual sandbody in Yanchang Formation, Ordos Basin

Ⅱ）。具有这种垂向结构的单砂体多见于河流—三角洲环境，通常是水深流急的主河道和主分流河道的沉积产物。砂体上部细粒层的缺失，或者是由于后期河道强水流对下伏砂体上部冲刷而造成的侵蚀缺失，

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

或者与陆上和水下天然堤、决口扇微相不发育造成的沉积缺失有关。长 9 辫状河三角洲和曲流河三角洲的陆上与水下的主分流河道砂体通常具有这种 B 型垂向结构,由于其岩性较粗,泥质含量普遍很低,应该是最有利于储层发育的砂体类型。

(2) C 型结构

C 型垂向结构以单砂体发育向上变细的沉积序列为典型特征,底为明显的突变面,冲刷面上堆积粗粒碎屑沉积物,向上颗粒逐渐变细、泥质含量不断增多,顶为渐变关系(图 3Ⅲ),也可称为钟形结构。在发育完整的单砂体垂向剖面中,从下到上可见砂砾岩、粗粒砂岩、中粒砂岩、细粒砂岩至粉砂岩的、由粗到细的沉积序列或者正韵律,沉积构造显示出冲刷面、块状层理、大型交错层理和平行层理到砂纹层理的、规模由大到小的变化趋势,对应的 GR 测井曲线往往表现为钟形或齿化钟形(图 3Ⅲ)。单砂体的这种垂向结构显然与沉积环境中水动力由强到弱的逐渐变化有关,多发育于河流—三角洲环境,通常反映了从河床、边滩或心滩、至堤岸微相的沉积序列。长 9 辫状河三角洲和曲流河三角洲的陆上与水下分流河道砂体往往具有这种 C 型垂向结构,其下部和中部由于岩性较粗,泥质含量较低,应该是储层的有利发育位置。

(3) I 型结构

I 型垂向结构以单砂体发育向上变粗的沉积序列为典型特征,底为渐变,顶为突变,由下往上沉积颗粒逐渐变粗、泥质含量不断降低(图 3Ⅳ),也可称为漏斗形结构。在发育完整的单砂体垂向剖面中,从下到上可见泥质粉砂岩、粉砂岩、细粒砂岩至中粒砂岩的、由细到粗的沉积序列或者反韵律,相应的沉积构造显示出水平层理、砂纹层理、小型交错层理到大型交错层理、平行层理或块状层理、规模由小到大的变化趋势。这显然是对沉积水动力由弱变强的沉积响应。对应的 GR 测井曲线往往表现为漏斗形或倒三角形(图 3Ⅳ)。单砂体的这种垂向结构明显与沉积环境中水动力由弱到强的变化有关,多发育于滩坝沉积环境,通常是三角洲前缘环境中远砂坝 + 河口坝进积序列或者滨浅湖环境砂质滩坝沉积的响应。长 9 辫状河三角洲前缘和曲流河三角洲前缘的远砂坝 + 河口坝砂体往往具有这种垂向结构,其上部岩性较粗,泥质含量较低,应该是储层的有利发育位置。

(4) F 型结构

这种类型的垂向结构以单砂体具有指形测井曲线形态为典型特征(图 3Ⅴ),指形体可以是对称的,也可以是不对称的(即刺刀形)。砂体主要由细粒砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩等组成,沉积构造以水平层理、砂纹层理和小型交错层理为主,显然是对沉积水动力较弱的中、低能环境的沉积响应,其垂向结构既可以表现为下粗上细的正韵律,也可以显示出下细上粗的反韵律,还可以是粒度和泥质含量从下到上均无显著变化的对称型。具有这种 F 型结构的单砂体,其成因类型多样,可以发育于多种不同的沉积环境中,在长 9 三角洲的陆上、水下、以及湖泊环境中均有产出,例如,三角洲平原上的洪泛席状砂、天然堤、决口扇砂体,三角洲前缘的水下天然堤、水下决口扇、前缘席状砂、远砂坝等砂体,滨浅湖的漫流席状砂、小型滩坝等砂体,往往可以发育这种 F 型垂向结构,由于其岩性一般较细,泥质含量通常较高,层厚较薄,多小于 2 m,应该是不利于储层发育的砂体类型。

(5) D 型结构

D 型垂向结构以单砂体具有粗齿形测井曲线形态为典型特征(图 3Ⅵ),齿形体可以是对称的,也可以是不对称的。砂体主要由细砂、粉砂、泥质粉砂等较细的颗粒组成,沉积构造以水平层理、砂纹层理和小型交错层理为主,显然是对沉积水动力较弱的中、低能环境的沉积响应,其垂向结构既可以表现为下粗上细的正韵律(正向齿形),也可以显示出下细上粗的反韵律(反向齿形),还可以是粒度和泥质含量从下到上均无显著变化的对称型。具有这种 D 型结构的单砂体,成因类型多样,可以发育于多种不同的沉积环境中,在长 9 三角洲的陆上、水下、以及湖泊环境中均有产出,例如,三角洲平原上的洪泛席状砂、天然堤、小型决口扇砂体,三角洲前缘的水下天然堤、水下决口扇、前缘席状砂、远砂坝等砂体,滨浅湖的漫流席状砂、小型滩坝等砂体,往往可以发育这种 D 型垂向结构,由于其岩性一般较细,泥质含量通常较高,层厚较薄,多小于 2 m,应该是不利于储层发育的砂体类型。

3　多层砂体垂向叠加样式

砂体垂向叠加样式是指单砂体在垂向上依次叠复的形式,也即多层砂体(multistory sandbodies)的垂向结构。在研究区的长 9 钻井剖面中,可以见到以上述 5 种基本单砂体垂向结构类型为基础叠加成多姿多彩的、复杂多变的、储集性能各异的多层砂体。下面以岩芯剖面和测井曲线为依据论述长 9 油层组中

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

常见的几种砂体垂向叠加样式或多层砂体垂向叠加结构。

(1) BB 型叠加样式

这种垂向叠加样式由两个或两个以上的、具有 B 型(即箱形)结构的单砂体在垂向上依次叠加而成,主要特征表现为:岩性较粗,通常由砂砾岩、粗粒砂岩、中粒砂岩或者细粒砂岩等组成;上、下相邻的两个单砂体之间多以明显的冲刷面分隔开;对应的测井曲线形态总体上呈典型的多层楼形态(图4Ⅰ)。显然,具有这种叠加结构的多层砂体一般是沉积水动力持续较强的河道型高能环境的产物,往往是三角洲中陆上和水下主分流河道微相的典型反映,也是对主分流河道微相在原地稳定持续沉积的响应。每个河道砂体上部原来沉积的细粒层,由于随后强水流的冲刷、侵蚀而缺失,造成上、下相邻的两个河道型砂体以冲刷面接触,其间没有明显可见的泥质隔层或夹层,上、下相邻的砂体实际上是连通的。在盆地西部的长9辫状河三角洲中,经常可见多个具 B 型结构的单砂体在垂向上连续叠加,形成厚度在 10 m 以上的厚砂体,可以池89井 2 694.35 ~2 707.70 m 井段岩芯为代表(图4Ⅰ)。具有 BB 型多层叠加结构的砂体,由于岩性粗,泥质含量低,厚度大,有利于形成厚度较大的砂岩储层。

(2) CC 型叠加样式

这种垂向叠加样式由两个或两个以上的、具 C 型(即向上变细的钟形)结构的单砂体在垂向上依次叠加而成,主要特征表现为:岩性较粗,通常由含砾砂岩、粗粒砂岩、中粒砂岩或者细粒砂岩等组成;上、下

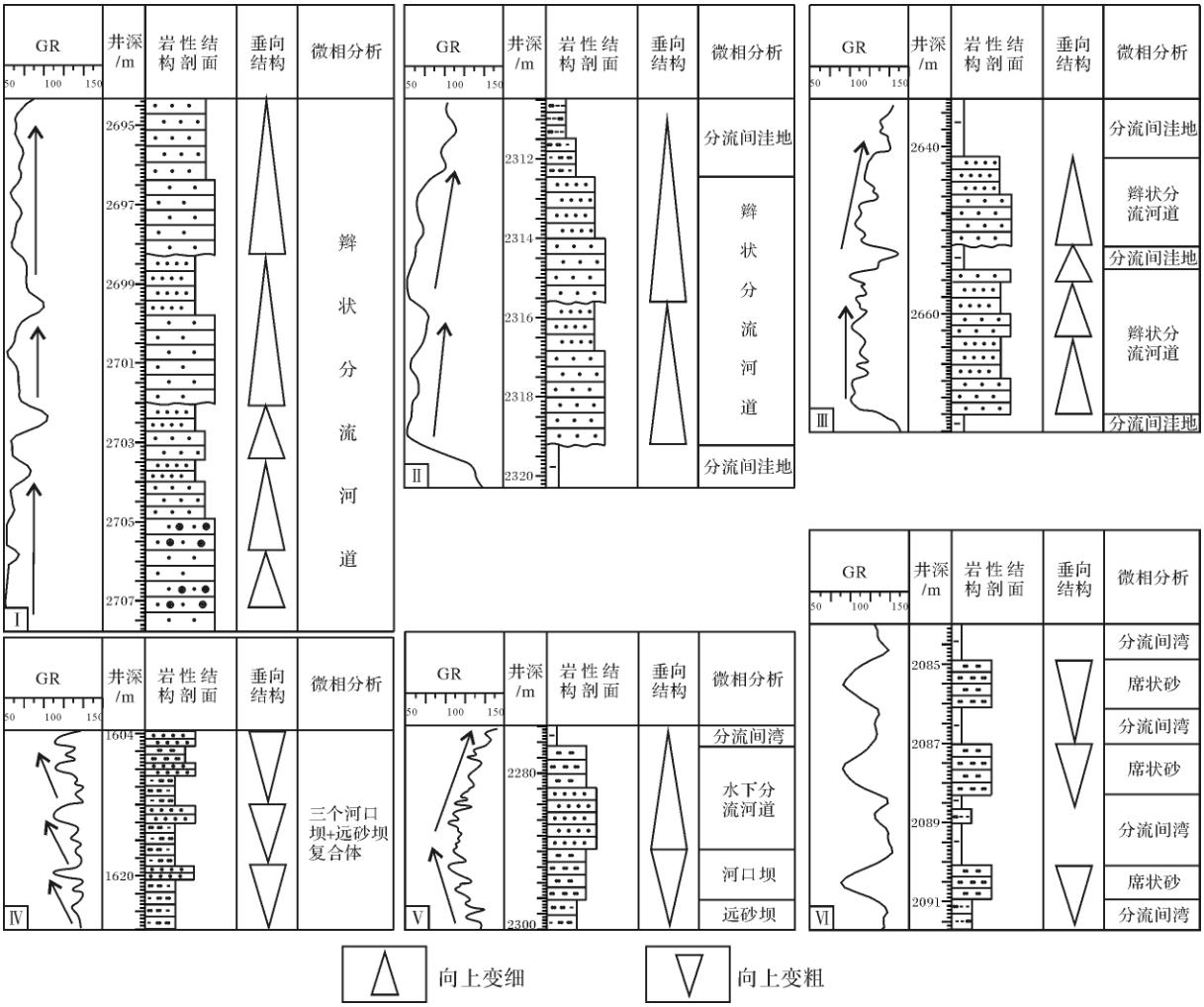

图4 长9砂体垂向叠加样式

Ⅰ:BB 型叠加样式(池89井);Ⅱ:CC 型叠加样式(定38井);Ⅲ:CB 型叠加样式(黄49井);Ⅳ:II 型叠加样式(桥29井);Ⅴ:CI 型叠加样式(白286井);Ⅵ:FF 型叠加样式(新255井)

Fig. 4 Profiles showing stacking pattern of Chang 9 sandbodies

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

相邻的两个单砂体之间多以明显的冲刷面分隔开; 对应的测井曲线形态总体上类似于圣诞树形。显然,具有这种叠加结构的多层砂体一般是沉积水动力较强的河道型高能环境的产物,往往是三角洲中陆上和水下分流河道微相的典型反映,也是对分流河道微相在原地稳定持续沉积的响应。每个河道砂体上部原来沉积的细粒层,由于随后强水流的冲刷、侵蚀而保存不全,造成上、下相邻的两个河道型砂体以冲刷面接触,其间很少有明显可见的泥质隔层或夹层,上、下相邻的砂体基本上是连通的。在长 9 三角洲中,经常可见多个具 C 型结构的单砂体在垂向上连续叠加,形成厚度在 10 m 以上的厚砂体,可以定 38 井2 312.95 ~2 319.70 m 井段岩芯为代表(图 4 Ⅱ) 。具有 CC 型多层叠加结构的砂体,由于岩性一般较粗,泥质含量往往较低,厚度大,有利于形成厚度较大的储层。

(3) CB 型叠加样式

这种垂向叠加样式由上部的一个具 C 型结构(即向上变细的钟形结构) 的单砂体叠加在下部的一个具 B 型结构(即箱形结构) 的单砂体之上,其主要特征呈现出: 岩性一般较粗,通常由含砾砂岩、粗粒砂岩、中粒砂岩或者细粒砂岩等组成,顶部岩性相对较细,总体上显示下粗上细的沉积序列或正韵律; 上、下相邻的两个单砂体之间多以明显的冲刷面分隔开; 对应的测井曲线形态总体上呈底宽顶尖的葫芦形(图 4 Ⅲ) 。显然,具有这种叠加结构的多层砂体一般是沉积水动力由强变弱的河道型环境的产物,往往是三角洲中陆上和水下主分流河道微相的反映。在下部河道型单砂体的上部,原来沉积的细粒层受到随后强水流的冲刷而缺失,造成上、下相邻两个河道型砂体以冲刷面接触,或者残存了薄的泥质夹层。上部河道型单砂体发育比较完整,呈现下粗上细的正韵律。在长 9 三角洲的陆上和水下分流河道沉积中,有时可见这种 CB 型叠加样式的砂体,厚度一般在 5 m 以上,可以黄 49 井 2 640 ~2 672 m 井段为代表(图 4 Ⅲ) 。这类砂体的中部和下部,由于岩性一般较粗,泥质含量较低,砂体间连通性较好,通常为有利于储层发育的位置。

(4) II 型叠加样式

这种垂向叠加样式由两个或两个以上的、具有 Ⅰ 型(即向上变粗的漏斗形或倒三角形) 结构的单砂体在垂向上依次叠加而成,其主要特征为: 岩性一般较细,通常由细粒砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩等组成; 上、下相邻的两个单砂体之间多以薄层状泥质隔层或夹层分隔开; 对应的测井曲线形态总体上呈大小不一的似串珠状(图 4 Ⅳ) 。显然,具有这种结构的多层砂体一般是沉积水动力发生周期性强弱交替变化的沉积产物,上、下相邻砂体之间多有厚度不等的泥质隔、夹层,连通性不好,甚至是不连通的。在长 9 三角洲前缘和滨浅湖沉积环境中,可见二、三个具 Ⅰ 型结构的单砂体在垂向上叠加,可以桥 29 井 1 604 ~1 626 m 井段为代表(图 4 Ⅳ) 。由于这类砂体的岩性一般较细,泥质含量较高,单砂体间连通性不好,不利于形成厚度大的储层,一般仅在单砂体的上部有利于储层的形成。

(5) CI 型和 BI 型叠加样式

这种垂向叠加样式由上部的一个具 C 型结构的单砂体叠加在一个具 Ⅰ 型结构的单砂体之上。由此组合而成的多层砂体,顶、底均为渐变关系,中间往往有一个冲刷突变面分隔两个相邻的、但性质不同的沉积序列,对应的测井曲线以中部凸出的齿化橄榄形为特征(图 4 Ⅴ) 。具有这种叠加结构的砂体实际上是由两个不同微相的砂体在垂向上叠置而成的,相邻的上、下两个砂体之间没有明显可见的隔层或夹层,实际上是连通的,可以白 286 井 2 274 ~2 300 m 井段为代表。下部的砂体以发育向上变粗的沉积序列为典型特征,底为渐变,顶为冲刷突变,由下往上沉积颗粒逐渐变粗、泥质含量不断降低,在发育完整的垂向剖面中,从下到上可见泥质粉砂岩、粉砂岩到细粒砂岩的、由细到粗的沉积序列或者反韵律,反映沉积水动力由弱到强的变化,往往是对远砂坝 + 河口坝微相的沉积响应。上部的砂体以发育向上变细的沉积序列为典型特征,底为明显的突变面,冲刷面上堆积粗粒碎屑沉积,向上颗粒逐渐变细、泥质含量不断增多,顶为渐变关系,在发育完整的垂向剖面中,从下到上可见粗粒砂岩、中粒砂岩、细粒砂岩至粉砂岩的、由粗到细的沉积序列或者正韵律,反映沉积水动力由强到弱的变化,一般是对分流河道微相的沉积响应。砂体的这种垂向叠加样式显然与沉积环境中水动力的强、弱变化有关,多发育于三角洲前缘环境,通常反映了沉积环境从远砂坝、河口坝到水下分流河道、甚至陆上分流河道微相的演变。因此,这种 CI 型叠加结构可以作为三角洲前缘环境判识的一个可靠标志。这类砂体的中部,岩性一般较粗,泥质含量通常较低,连通性较好,应该是储层的有利发育位置,而砂体的下部和上部,岩性往往较细,泥质含量较高,不利于好储层的发育。类似地,由上部的一个具箱形结构的分流河

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

道砂体叠加在下部的一个具有向上变粗的漏斗形结构的河口坝+远砂坝砂体之上，组合成BI型叠加样式。这两种叠加结构均与分流河道向湖泊方向延伸的进积作用有关。

除上述几种常见的叠加结构外，长9中还发育有其它多种类型的砂体叠加样式，例如，由上部的一个具箱形结构的分流河道砂体叠加在下部的一个具有向上变细的钟形结构的分流河道砂体之上的BC型叠加样式；由一个具F型结构的席状砂或决口扇砂体叠加在下部的一个具C型结构的分流河道砂体之上的FC型叠加样式；由两个或两个以上的、具指形结构（即F型结构）的单砂体在垂向上依次叠加组成的FF型叠加样式，测井曲线一般呈多指形或者梳状形态；也可以由具指形结构的砂体与具粗齿形结构的砂体组合而成的FD型或DF型叠加样式等。然而，值得指出的是，具指形或粗齿形结构的单砂体，由于岩性一般较细，厚度较小，由它们叠加组成的多层砂体，规模通常不大，内部泥质隔、夹层往往较多、较厚（图4Ⅵ），一般难以形成优质的厚储层。

4 砂体垂向结构的主控因素分析

从前面有关长9砂体成因类型及垂向结构的分析可以看出，控制和影响砂体发育的地质因素很多，诸如盆地基底的相对升降变化、湖平面相对升降变化、基准面升降变化、沉积环境与沉积相、物源供应、水动力强弱变化等众多沉积地质要素都不同程度地控制和影响砂体的形成、分布、类型及结构特征[12~15]。下面仅从沉积环境、沉积相、基准面升降旋回的角度探讨它们对长9砂体垂向结构的影响。

4.1 沉积环境与沉积相决定砂体垂向结构的类型与特征

沉积环境与沉积相是控制砂体发育的先天性地质因素。不同的沉积环境与沉积相必然形成成因类型不同的砂体，并且往往具有特征不同的沉积序列。研究表明，长9的沉积微相、砂体成因类型、砂体垂向结构之间存在着密切的相关关系。众所周知，河流相沉积以发育“二元结构”和向上变细的沉积序列为典型特征[16]，其中的河道环境是粗粒碎屑沉积物和具有正韵律砂体的主要堆积场所。因此，长9三角洲沉积体系中以发育向上变细沉积序列为典型特征的、具有B型或C型垂向结构的单砂体应该是对水动力较强的三角洲陆上和水下分流河道环境的沉积响应。远砂坝+河口坝复合体是三角洲前缘环境中最具特色的沉积单元，在进积背景下以发育向上变浅、变粗的沉积序列为典型特征[16]。因此，所形成的单砂体必然以具有I型垂向结构为特征，这是对水体由深变浅、水动力由弱变强的沉积响应，类似的砂体特征也产于滨浅湖的砂质滩坝环境中。F型和D型垂向结构往往与粒度较细、厚度较薄的单砂体有关，三角洲陆上与水下的天然堤、小型决口扇、席状砂、滨浅湖的小型滩坝、漫流席状砂等小型砂体一般以发育这两种类型的垂向结构为特征。需要强调指出的是，单砂体的垂向结构类型与沉积微相之间并不存在一一对应的关系，而是具有多解性，必须根据实际资料加以解释。

发育于盆地西部的辫状河三角洲，在物源充足、古沉积斜坡较陡、沉积水动力较强等沉积地质因素的影响下，其陆上与水下分流河道砂体，沉积物较粗，以中粗粒、中细粒砂岩为主，堆积速度较快，往往以形成多个单砂体连续叠加的厚层砂体为特征。单砂体厚度一般超过2m，通常显示出B型或C型垂向结构；多层叠加的砂体可达十几米厚，往往具有BB型、CC型、CB型、BC型等叠加样式；砂岩/地层厚度比值普遍大于0.5，具有“砂多泥少、砂包泥”的结构特征。在辫状河三角洲前缘环境，河口坝砂体往往与较细粒的远砂坝砂体叠置，组成向分流间湾或前三角洲下超的进积复合体，顶部则被向湖盆方向延伸的水下分流河道截切超覆，或者被分流间湾细粒沉积物覆盖，以发育向上变浅、变粗的典型沉积序列为特征，单砂体厚度一般为2~4 m，多具有I型结构，多层叠加时可达8 m，呈现出II型、CI型、BI型等叠加样式。在陆上与水下天然堤、决口扇、分流间洼地、分流间湾等微环境中，由于沉积水动力相对较弱，所形成的砂体主要由粉砂岩和少量细砂岩组成，规模一般较小，单砂体厚度很少超过2 m，多具F型和D型结构。

发育于盆地东北部的曲流河三角洲，在物源供应充足但距离较远、古沉积斜坡较平缓、河道水深较大、沉积水动力相对较弱等沉积地质因素的影响下，其陆上与水下分流河道砂体，沉积物相对较细，以中细粒砂岩为主，单砂体厚度一般较厚，往往超过4 m，通常具有B型或C型垂向结构；多层叠加的砂体可达十几米厚，往往表现出BB型、CC型、CB型、BC型等叠加样式；砂岩/地层厚度比值普遍小于0.5，具有曲流河沉积典型的“泥多砂少、泥包砂”的结构特征。在三角洲前缘环境，河口坝砂体往往与下部较细粒的远

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

砂坝砂体叠置,组成向分流间湾或前三角洲下超的进积复合体,以发育向上变浅、变粗的典型沉积序列为特征,单砂体厚度一般小于 3 m,多具有 I 型结构,受高速堆积作用引起的前缘堆积坡度减小、湖水变浅、以及河流延伸入湖的距离加大等的影响,三角洲进积序列中先期堆积的前缘远砂坝 + 河口砂坝进积复合体,常受到向湖泊方向延伸的后期水下分流河道冲刷截切而保存不完整,少见分流河道与河口坝砂体叠加而成的多层砂体[17,18]。同样地,在陆上与水下天然堤、决口扇、分流间洼地、分流间湾等微环境中,由于沉积水动力相对较弱,所形成的砂体主要由粉砂岩和少量细砂岩组成,规模一般较小,单砂体厚度很少超过 2 m,多具 F 型和 D 型结构。

4.2　基准面旋回对砂体叠加样式的控制

以地层基准面原理、体积划分原理、相分异原理以及旋回等时对比法则为理论基础的高分辨率层序地层学[19],以其理论的系统性、先进性和实用性受到普遍的关注和广泛的应用[4,11,20]。由基准面上升到下降构成的基准面旋回,主要受构造沉降、湖(或海)平面升降变化、沉积负荷补偿、沉积物供给量、沉积地形等地质因素的联合制约[7,10,11,19~22]。通过图 5(剖面平面位置参见图 1)所示的池 5 井—元 109 井—白 420 井—王 525 井代表性连井横剖面的高分辨层序地层及砂体叠加样式的实际分析,探讨超短期基准面旋回层序对长 9 砂体的垂向结构、叠加样式及分布的控制(图 6)。

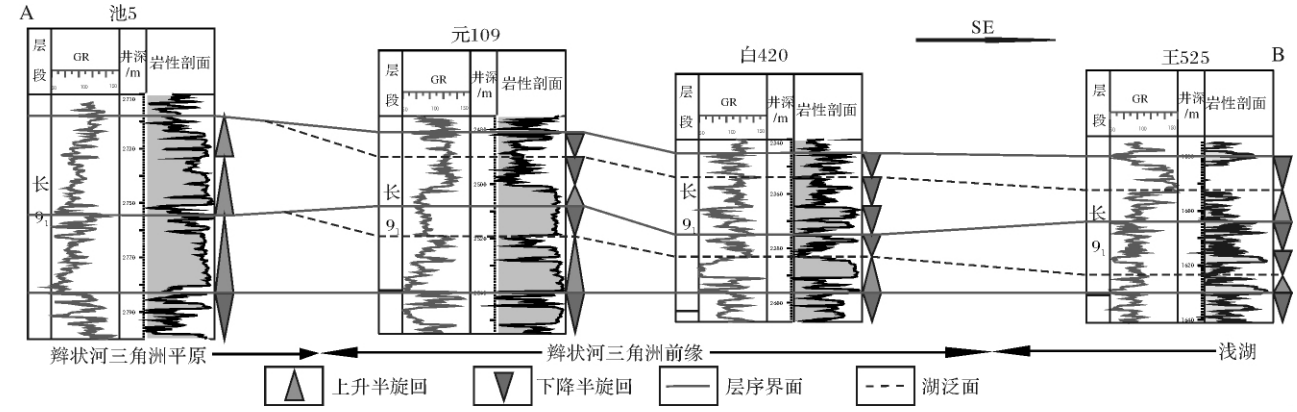

图 5　池 5—元 109—白 420—王 525 连井横剖面的高分辨层序地层及砂体叠加样式

Fig. 6　The high-resolution sequence stratigraphy and stacking pattern of sandbodies of the lateral section of Chi5—Yuan109—Bai420—Wang525 Wells

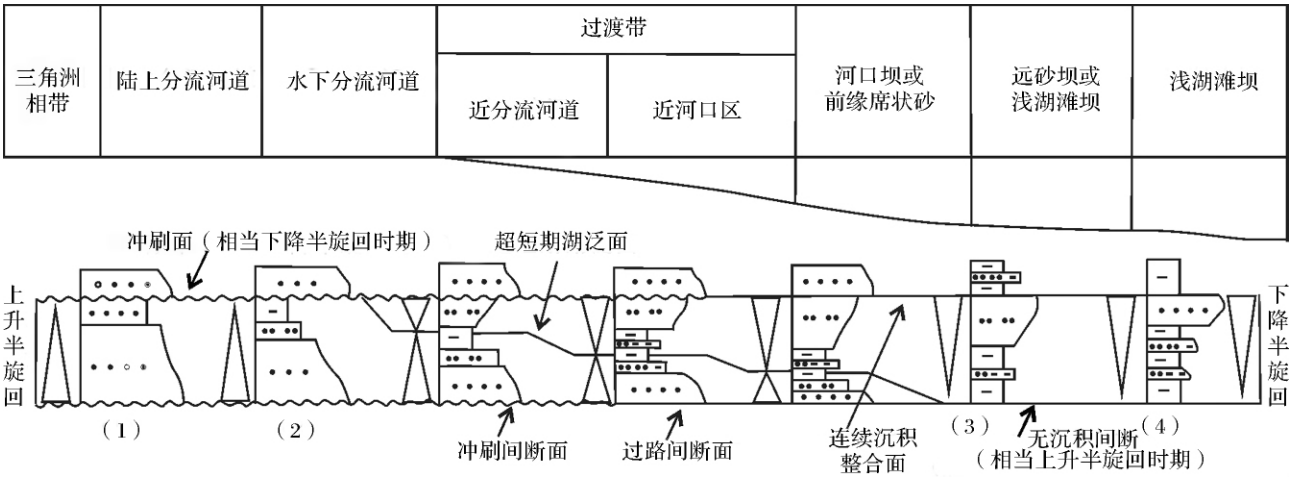

图 6　长 9 不同沉积相带超短期基准面旋回中砂体的垂向结构、叠加样式及分布模式(据参考文献[22]修改)

Fig. 6　The sketch showing vertical structure, stacking pattern and distribution model of Chang 9 sandbodies in the different depositional facies zones, ultra-short-term base-level cycle(Modified from References [22])

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(1) 在可容纳空间远小于沉积物供给量的低可容纳空间($A/S \ll 1$ 的基准面上升半旋回)的沉积背景下,在三角洲的陆上与水下分流河道中所形成的砂体多具向上变细的沉积序列,底、顶均为冲刷面。其成因是由于基准面上升过程中,因沉积速率远大于可容纳空间增长率,致使可容纳空间始终处于充满与进积状态,上升半旋回主要由底部冲刷面及其之上粒度较粗的块状砂体或向上变细的分流河道砂体组成,一般具有C型结构。当基准面一旦下降,沉积物即遭受冲刷侵蚀,造成上升半旋回上部的细粒沉积物侵蚀缺失或仅保存中下部的较粗粒部分,同时形成层序顶部的冲刷面,对应的砂体呈现出B型结构。这一过程如在低可容纳空间背景中重复进行,可导致多个相互切割的分流河道砂体的连续叠加,形成具BB型、CC型或CB型等叠加样式的多层砂体(图6)。

(2) 在可容纳空间由小于至接近于沉积物供给量的高可容纳空间($A/S < 1$ 向 $A/S \leqslant 1$ 的基准面上升半旋回)的沉积背景下,在三角洲沉积体系中,自下而上发育冲刷面(或砂、泥岩性突变面)→水下分流河道砂体→分流间湾沉积或前缘席状砂→前三角洲沉积组成的、向上加深、变细、变薄的上升半旋回正韵律结构,或者形成冲刷面→陆上分流河道砂体→堤岸沉积→分流间洼地沉积组成的、向上变细的上升半旋回正韵律结构,对应的砂体常显示出C型结构,具有从进积向加积和退积转化的特征,底、顶均为弱冲刷面或无沉积间断面。其成因大概是由于基准面上升过程中,因沉积速率由大于向接近于可容纳空间增长率转化,形成充满可容纳空间的进积-退积序列,基准面下降时沉积界面或处于弱冲刷状态,或处于无沉积状态。周而复始,亦可形成多个间夹较厚泥岩的分流河道砂体的不连续叠加,显示出类似于CB型或CC型的垂向叠加样式(图6)。

(3) 在可容纳空间相对较小和 A/S 值从大于1向小于1转化的基准面下降半旋回背景下,在三角洲前缘的远砂坝—河口坝地区,由远砂坝→河口坝或者前三角洲泥→远砂坝(或河口坝)沉积形成向上变浅、变粗的下降半旋回反韵律结构,底为无沉积间断面,顶为弱冲刷面或整合界面,对应的砂体多呈I型结构(图6)。其成因可能是由于基准面上升期处于沉积物供给量极少或呈水进冲刷状态,基准面下降过程中随着可容纳空间减小和沉积物供给量增多变粗,在可容纳空间中形成加积→弱进积序列。尤其是河口坝沉积区,由可容纳空间减小和沉积物增多变粗作用,常导致河口坝向湖盆方向的强烈进积作用,顶部发育有基准面下降至最低点位置时形成的冲刷面,如此往返可形成多个进积河口坝砂体或滩坝砂体的叠加,多具有II型叠加样式(图6)。

(4) 在可容纳空间相对较大及 A/S 值始终大于1的基准面下降半旋回背景下,在三角洲前缘的水下分流河道环境中,由前三角洲泥→远砂坝→河口坝砂岩或者滨浅湖泥→漫流席状砂沉积组成的弱进积层序,发育向上变浅、略变粗的、下降半旋回的反韵律结构(图4),单砂体一般表现为I型或F型结构。底为无沉积间断面,顶或为无沉积间断面,或为整合界面,抑或为弱冲刷面。其成因是由于基准面上升期因远离物源区,沉积物补给很少或没有补给而处于无沉积状态,下降期则因沉积物补给量趋于增多和略变粗,持续处在小于可容纳空间状态,因而发育欠补偿—弱补偿的加积—弱进积作用。

从图6所示的长9超短期基准面旋回层序及其砂体叠加样式的分布模式图中可以看出,当基准面处于上升状态时,沉积作用主要发生在三角洲平原-前缘沉积区,多发育向上变细的、具有B型或C型垂向结构的砂体,沉积速率自分流河道上游经下游至河口坝、远砂坝方向减小,厚度明显减薄,逐渐进入非补偿沉积状态,在前三角洲区则出现欠补偿沉积形成的饥饿面,更远处甚至发育无沉积作用的间断面,无砂体发育。当基准面处于下降状态时,沉积作用主要发生在近河口的水下分流河道至远离河口的远砂坝—河口坝沉积区,以发育向上变细的、具I型或F型结构的砂体为特征,沉积速率以河口坝沉积区为最高。当基准面大幅度下降时,陆上与水下分流河道沉积区主体处于冲刷侵蚀状态,缺失砂体,也无沉积记录。

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长9砂体的成因类型主要包括与辫状河三角洲和曲流河三角洲环境有关的陆上与水下的分流河道、天然堤、决口扇、三角洲前缘的河口坝、远砂坝、席状砂等砂体,与滨浅湖环境有关的砂质滩坝、席状砂等砂体。

(2) 单砂体主要发育B、C、I、F、D五种基本垂向结构类型,多层砂体的垂向叠加样式复杂多变,常见的有BB、CC、CB、II、CI、BC、BI、FF等类型。

(3) 沉积环境、沉积相以及基准面升降旋回是控制单砂体垂向结构、多层砂体垂向叠加样式及分布的主要地质因素。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献(References)

1 周进高，姚根顺，邓红婴，等. 鄂尔多斯盆地延长组长 9 油层组勘探潜力分析 [J]. 石油勘探与开发，2008，35(3): 289-293 [Zhou Jingao, Yao Genshun, Deng Hongying, *et al*. Exploration potential of Chang 9 Member, Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 289-293]

2 段毅，于文修，刘显阳. 鄂尔多斯盆地长 9 油层组石油运聚规律研究 [J]. 地质学报，2009，83(6): 855-860 [Duan Yi, Yu Wenxiu, Liu Xianyang, *et al*. Oil migration and accumulation rules of Chang-9 Oil-Bearing Formation in the Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6): 855-860]

3 刘显阳，邓秀芹，赵彦德，等. 姬源地区长 9 油层组油气运移规律及模式探讨 [J]. 岩性油气藏，2011，23(5): 9-15 [Liu Xianyang, Deng Xiuqin, Zhao Yande, *et al*. Hydrocarbon migration law and model of Chang 9 Reservoir in Jiyuan area, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(5): 9-15]

4 杨华，傅强，付金华. 鄂尔多斯晚三叠世盆地沉积层序与油气成藏 [M]. 北京: 地质出版社，2007 [Yang Hua, Fu Qiang, Fu Jinhua. Sedimentary Sequence and Hydrocarbon Accumulation of Late Triassic Ordos Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007]

5 杨华，田景春，王峰，等. 鄂尔多斯三叠纪延长组沉积期湖盆边界与底形及事件沉积研究 [M]. 北京: 地质出版社，2009 [Yang Hua, Tian Jingchun, Wang Feng, *et al*. Research on Lake Boundary, Bottom Topographic and Event Deposits of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009]

6 杨俊杰，裴锡古. 中国石油天然气地质学(卷 4) 鄂尔多斯盆地 [M]. 北京: 石油工业出版社，1996 [Yang Junjie, Pei Xigu. China Petroleum Natural Gas Geology (Vol. 4) Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996]

7 倪新峰，陈洪德，田景春，等. 胡尖山-姬塬地区长 6 油层组层序叠加样式与砂体成因类型关系 [J]. 石油天然气学报，2006，28(4): 176-179 [Ni Xinfeng, Chen Hongde, Tian Jingchun, *et al*. Relation between stacking patterns and type of sandbody genesis in Hujianshan-Jiyuan Region [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(4): 176-179]

8 蔺宏斌，侯明才，陈洪德，等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组沉积体系特征及演化 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版，2008，35(6): 674-680 [Lin Hongbin, Hou Mingcai, Chen Hongde, *et al*. Characteristics and evolution of the sedimentary system of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2008, 35(6): 674-680]

9 王党国，石尊应，郑向光. 陕北油页岩地质特征、成矿规律及开发条件 [J]. 陕西地质，2009，27(2): 53-60 [Wang Dangguo, Shi Zunying, Zheng Xiangguan. Ore formation and development condition of oil shales in North of Shaanxi Province [J]. Geology of Shaanxi, 2009, 27(2): 53-60]

10 郑荣才，彭军，尹世民. 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, Peng Jun, Yin Shimin. Sedimentary dynamic analysis of sequence structure and stacking pattern of base-level cycle [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 369-375]

11 Armentrout J M. Sequence Stratigraphy as An Exploration Tool: Concepts and Practices in the Gulf Coast [M]. Houston, Texas: Adam's Mark Hotel, 1991: 379-388

12 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社，2002 [Yang Junjie. Tectonic Evolution and Oil-gas Distribution of Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002]

13 姜在兴，刘晖. 古湖岸线的识别及其对砂体和油气的控制 [J]. 古地理学报，2010，12(5): 589-598 [Jiang Zaixing, Liu Hui. Lacustrine palaeoshoreline and its controls on sandbodies and hydrocarbon [J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(5): 589-598]

14 付锁堂，邓秀芹，庞锦莲. 晚三叠世鄂尔多斯盆地湖盆沉积中心厚层砂体特征及形成机制分析 [J]. 沉积学报，2010，28(6): 1081-1089 [Fu Suotang, Deng Xiuqin, Pang Jinlian. Characteristics and mechanism of thick sandbody of Yanchang Formation at the centre of Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(6): 1081-1089]

15 宋凯，吕剑文，杜金良，等. 鄂尔多斯盆地中部上三叠统延长组物源方向分析与三角洲沉积体系 [J]. 古地理学报，2002，4(3): 59-66 [Song Kai, Lü Jianwen, Du Jinliang, *et al*. Source direction analysis and delta depositional systems of Yanchang Formation of the Upper Triassic in the Central Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(3): 59-66]

16 朱筱敏. 沉积岩石学(第四版) [M]. 北京: 石油工业出版社，2008: 257-275, 291-318 [Zhu Xiaomin. Sedimentary Lithology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 257-275, 291-318]

17 梅志超，林晋炎. 湖泊三角洲的地层模式和骨架砂体的特征 [J]. 沉积学报，1991，9(4): 1-11 [Mei Zhichao, Lin Jinyan. Stratigraphic pattern and character of skeletal sand bodies in lacustrine deltas [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1991, 9(4): 1-11]

18 曾少华. 陕北三叠系延长统湖盆三角洲沉积模式的建立 [J]. 石油与天然气地质，1992，13(2): 229-235 [Zeng Shaohua. Establishment of lake delta sedimentary model from Yanchang Series in North Shaanxi [J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(2): 229-235]

19 Cross T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perception of base-level cycles and sediment accommodation [C] // Proceeding of Northwestern Europian Sequence Stratigraphy Congress, 1994, 105-123

20 Cross T A. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata [J]. Geoscience Frontier, 2000, 7(4): 322-350

21 Cantalamessa G, Di Celma C. Sequence response to syndepositional regional uplift: insights from hight-resolution sequence stratigraphy of late Early Pleistocene strata, Periadriatic Basin, central Italy [J]. Sedimentary Geology, 2004, 164(3-4): 283-309

22 彭军，郑荣才，陈景山，等. 百色盆地那读组短期基准面旋回层序分析 [J]. 沉积学报，2002，20(2): 203-209 [Peng Jun, Zheng Rongcai, Chen Jingshan, *et al*. Short-term base-level cycle sequence analysis of Nadu Formation in Baise Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 203-209]

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Vertical Structure and Dominating Factors of Chang 9 Sandbody from Yanchang Formation in Ordos Basin

ZHAO Yun-xiang[1] CHEN Jing-shan[1] DING Xiong[1]
YAO Jing-li[2] LI Shi-xiang[2] LI Ning[3]

(1. Resources and Environment School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500;
2. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710021;
3 Shallowwater Development Company of Dagang Oilfield, Tianjin 300280)

Abstract: With the re-understanding of hydrocarbon geological conditions in Ordos Basin, a new discovery and breakthrough have been found in Chang 9 Reservoir Group form the lower part of Upper Triassic Yanchang Formation in recent years, and it has become the important succeed layer of strategic exploration. Through comprehensive study of outcrop section, drilling, core, well logging and tests, combining with the background analysis of sedimentary paleogeography, based on sedimentary characteristics and facies marker, it is considered that the genetic types of Chang 9 sandbody within the basin mainly include onshore and underwater distributary channel, natural levee, crevasse splay, sheet sand and other sandbodies associated with traction current effect in delta environment, the river-mouth bar, distal bar, sheet sand and other sand bodies in delta front, and the sandy shoal and bar, sheet sand and other sand bodies related to lake-wave and lake-flow reworking in shore to shallow lake environment. According to the detailed description of core sections and the analysis of sedimentary microfacies, combined with logging interpretation, it is pointed out that Chang 9 single sand body mainly develops B, C, I, F and D basic vertical structure types and multistory sandbodies have complicated and variable vertical stacking patterns, with BB, CC, CB, II, CI, BC, BI and FF as the common types. It is indicated that sedimentary environment, depositional facies and base-level fluctuating cycle are main geologic factors controlled on vertical structure of individual sandbody, vertical stacking pattern and distribution of multistory sandbodies from the analysis of dominating factors of vertical structure of Chang 9 sandbodies.

Key words: vertical structure; stacking patterns; sandbody; delta; Chang 9 Reservoir Group; Ordos Basin

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net