

文章编号: 1000-0550(2014)02-0334-10

贝尔凹陷下白垩统层序格架下砂体分布特征^①

李文科 张研 方杰 王君 高日胜

(中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要 以层序地层学理论为指导,综合地震、测井、岩芯以及古生物等资料,对贝尔凹陷下白垩统层序格架下砂体的分布特征进行研究。研究表明:在三级层序格架下,不同沉积期沉积体系的空间展布和配置关系有明显差异, SQ_A层序为初始裂陷型层序,主要发育冲积扇、近岸水下扇等粗碎屑沉积体系; SQ_B~SQ_C层序为伸展裂陷型层序,发育近岸水下扇、湖底扇、扇三角洲和半深湖相等沉积体系; SQ_D~SQ_F层序为裂陷收敛型层序,发育三角洲、滨浅湖和半深湖以及河流、沼泽相等沉积体系。低位域砂体为岩性圈闭的形成提供有利条件,其时空展布主要受幕式构造运动及其产生的构造坡折带的类型和样式控制。在垂向上,构造坡折带类型控制不同类型低位域砂体的形成和分布,其中断崖型坡折带形成近岸水下扇,断阶型坡折带形成浊积扇以及断坡型坡折带形成扇三角洲砂体;在平面上,构造坡折带平面样式控制低位域砂体的空间展布特征,尤其是砂体的形态及规模受断层调节带控制。受同沉积断层组合样式的控制,平面上主要形成断弯型、断接型、断沟型以及交叉型等4种基本砂体分布类型以及断弯—交叉型、断弯—对接型、断弯—断沟型、对接—交叉型、对接—断沟型和交叉—断沟型等6种复合砂体分布类型。低位域砂体在洼槽区相互叠置、连片分布,为各类岩性—地层圈闭的形成创造条件。

关键词 层序地层 沉积体系 低位域砂体 断层调节带 贝尔凹陷

第一作者简介 李文科 男 1985年出生 博士研究生 岩性地层油气藏储层 E-mail: liwenke_2010@petrochina.com.cn

中图分类号 P539.2 文献标识码 A

0 引言

砂、砾岩体岩性油气藏勘探已成为海拉尔盆地贝尔凹陷油气勘探的主要领域之一,特别是低水位体系域期间形成的砂、砾岩体储层物性好,直接被水进体系域泥岩封盖,为岩性圈闭的形成提供了有利条件。因此,分析和研究低位域砂体的分布特征对于寻找岩性圈闭至关重要。前人对贝尔凹陷下白垩统层序地层格架、层序界面特征^[1-7],以及构造对层序建造和沉积体系的控制^[8,9]作了较为深入的研究,但主要集中在对主要目的层(南屯组)层序地层的划分,而对层序格架下砂体的分布特征和控制因素研究较少。因此,笔者在前人研究工作的基础上,运用构造—层序分析的方法,依据地震、钻井、岩心等资料所反映的地层界面特征,建立贝尔凹陷下白垩统的层序地层格架,进而对层序格架下低位域砂体的分布特征进行研究,以期对贝尔凹陷岩性油气藏有利储层的分布和预测有重要的指导意义。

1 区域地质背景

海拉尔盆地位于大兴安岭山脉以西,内蒙古自治区中北部,大地构造位置处于西伯利亚板块与塔里木—中朝板块拼接处的大兴安岭—内蒙古弧形褶皱带的东翼,是在内蒙古—大兴安岭海西期多旋回、软碰撞褶皱基底上发育起来的中、新生代沉积盆地,属拉张型断陷盆地^[10](图1)。盆地由4个凸起和16个相对独立的凹陷组成^[11],其中凹陷均以单断式为主,每个凹陷彼此长期分割,但又曾短期连通,具有各自独立的沉积体系。

贝尔凹陷是海拉尔盆地贝尔湖拗陷内的一个二级构造单元,位于内蒙古自治区新巴尔虎左旗和新巴尔虎右旗之间,凹陷西部以磋岗隆起为界,东部为巴彦山隆起,向南延伸至蒙古国境内,北与乌尔逊凹陷相邻,形态宽缓,面积3 010 km²,是盆地内最大的一个凹陷。贝尔凹陷构造演化主要经历了引张裂陷期、裂陷期和裂后期,裂陷期先后经历初始裂陷幕、伸展

^①国家重大专项“岩性地层油气藏成藏规律、关键技术及目标评价”(编号:2011ZX05001)资助
收稿日期:2013-03-28;收修改稿日期:2013-08-10

裂隙幕和裂隙收敛幕。沉积地层以下白垩统地层为主,主要为初始裂隙幕冲积河流—浅湖相充填(铜钵庙组)、伸展裂隙幕浅湖—半深湖相和深湖相盆地充填(南屯组)以及裂隙收敛幕的开阔浅湖—半深湖相(大磨拐河组)和开阔浅湖(伊敏组)相充填。

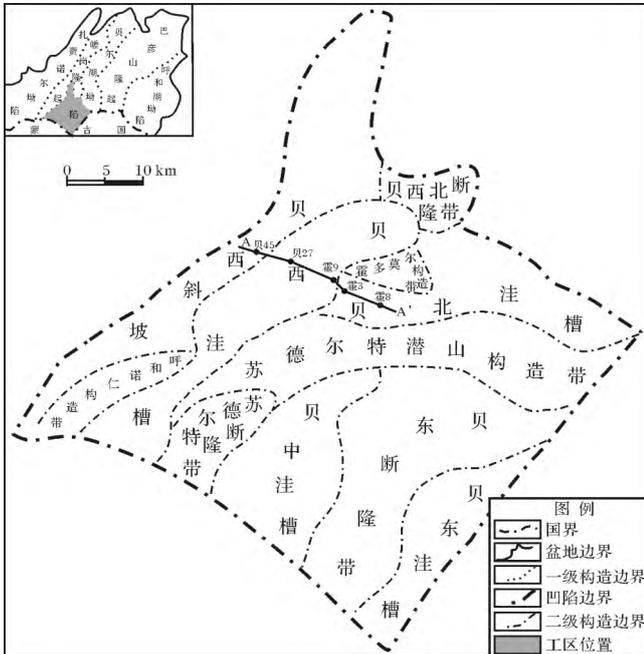


图 1 贝尔凹陷区域构造位置图

Fig.1 Regional structural location of Beier depression

2 层序地层特征与层序格架

2.1 层序划分与界面特征

以海拉尔盆地为代表的中小型断陷湖盆裂陷期幕式构造活动明显,早白垩世断陷经历了初始裂隙幕、裂隙伸展幕和裂隙收敛幕 3 幕构造运动。而断陷盆地不同级别的层序是盆地幕式构造运动的结果,其一、二级层序界面是与幕式构造运动相对应的规模较大的区域不整合^[11],而由主控断裂活动所形成的局部不整合往往为三级层序界面^[12-15]。综合利用地震、测井、岩心以及古生物等资料,以不同规模的各级不整合面、区域性冲刷面或沉积间断面为界,把下白垩统划分为 1 个一级层序、3 个二级层序、6 个三级层序(图 2)。整个下白垩统可看作一个一级层序,层序界面为盆地范围的构造不整合面 T_{04} 和 T_5 反射界面。在地震剖面上反射特征明显,底界面 T_5 显示为较连续的强反射轴,可观察到明显的角度不整合接触关系,界面之上表现为上超,之下为削截;顶界面 T_{04} 显示为连续的中—强反射轴,可观察到明显的削截现象(图 3)。根据构造沉降幕、二级气候旋回和物源供给

因素导致的沉积基准面二级升降旋回所产生的不整合及与之对应的界面,可以将下白垩统构造层序(TSQ_2)可划分为 3 个二级层序组,即初始裂隙层序 SQ_I (铜钵庙组 K_1t)、伸展裂隙层序 SQ_{II} (南屯组 K_1n)以及裂隙收敛层序 SQ_{III} (大磨拐河组 K_1d 、伊敏组 K_1y)。层序界面为全区可以连续追踪和对比的 T_3 、 T_{22} 反射界面,在地震剖面上主要表现为低角度—平行不整合接触,界面之上表现为大面积上超,之下为削截、下切。在二级层序控制下,可将断陷内翘倾和块断等构造活动、三级气候旋回和物源供给因素影响所导致的沉积基准面三级升降旋回而产生的不整合或与之对应的整合面作为三级层序界面,可以划分出 6 个三级层序,即 SQ_A (铜钵庙组 K_1t)、 SQ_B (南一段 K_1n_1)、 SQ_C (南二段 K_1n_2)、 SQ_D (大一段 K_1d_1)、 SQ_E (大二段 K_1d_2)和 SQ_F (伊敏组 K_1y)。在三级层序内部体系域的划分过程中,主要通过准层序组叠加形式的转换面以及泥岩颜色的变化面两种方法进行划分和对比^[7]。通过上述方法,建立了研究区体系域级别的高精度层序地层格架,共识别和划分出 14 个体系域。

2.2 层序格架与体系域构成特征

在幕式构造运动的控制下,贝尔凹陷早白垩世的沉积充填演化经历了初始裂隙期冲积河流—浅湖相充填(铜钵庙组)、伸展裂隙期浅湖—半深湖相盆地充填(南屯组)、裂隙收敛期早期的开阔浅湖—半深湖相(大磨拐河组)以及晚期河流—冲积平原相充填的沉积演化。通过大量岩芯观察描述,结合地震、测井、录井及分析化验等资料综合分析的结果表明,贝尔凹陷下白垩统发育的沉积体系类型主要有冲积扇体系、扇三角洲体系、辫状河三角洲体系、湖底扇体系以及河流体系。

初始裂隙期主要发育初始裂隙型层序(SQ_A)相当于铜钵庙组沉积期。继晚侏罗世大规模火山喷发之后,在强烈块断运动下以充填式沉积为主。在初始裂隙期,由于物源多、凹陷窄、水体较浅且相互分隔,同沉积断层断面较陡,凹陷内主要发育冲积扇、近岸水下扇等粗碎屑沉积体系。低水位体系域主要发育近岸水下扇。水进体系域的粗碎屑体系以扇三角洲沉积为主,但向物源方向有所退缩,滨浅湖沉积面积扩大。高水位体系域与水进期的沉积相类型相似,但部分砂体分散体系向凹陷中部推进。 SQ_A 层序砂体的走向垂直于凹陷长轴方向,砂体成群分布于洼槽内。

伸展裂隙期主要发育伸展裂隙型的层序,包括早期伸展裂隙型层序(SQ_B)和晚期伸展裂隙型层序

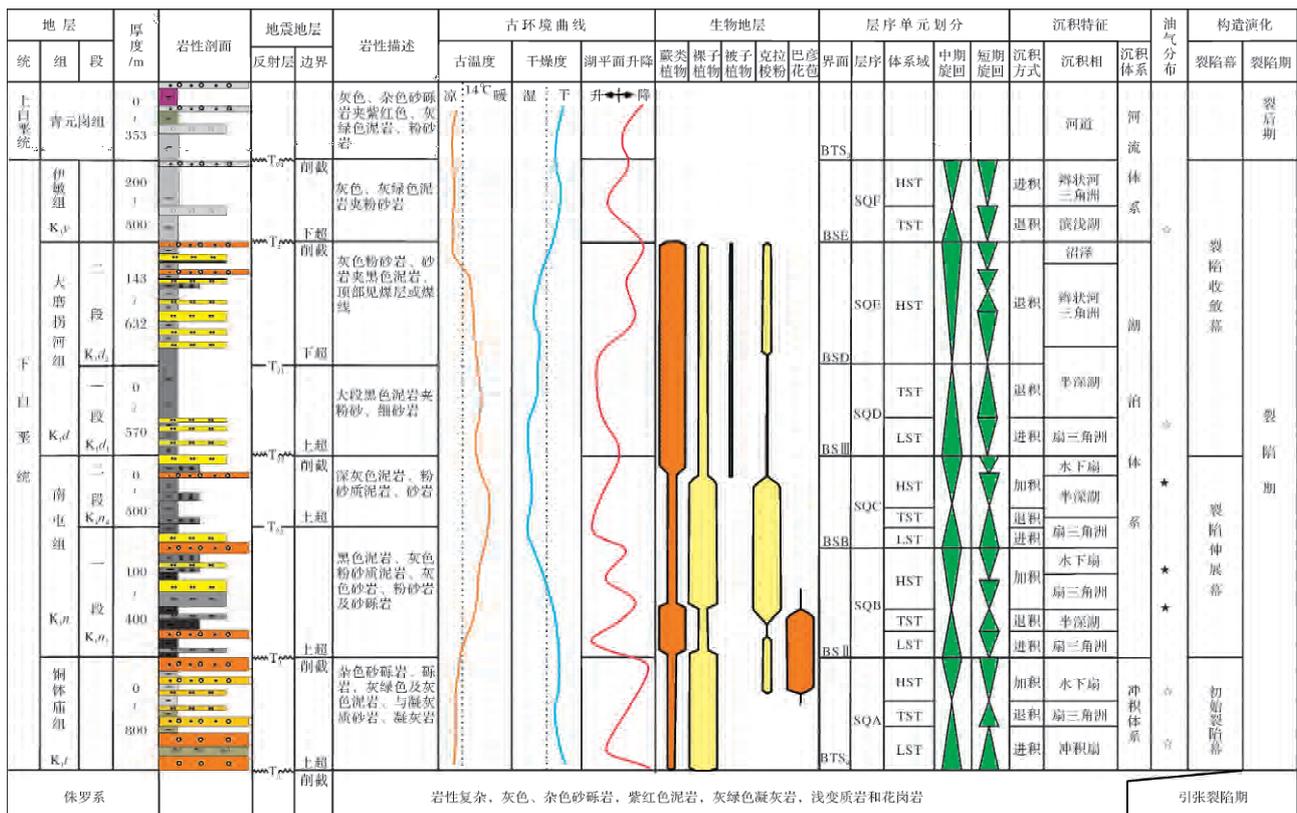


图 2 贝尔凹陷下白垩统层序地层划分综合柱状图

Fig.2 Comprehensive sequence subdivision column of the Lower Cretaceous in Beier depression

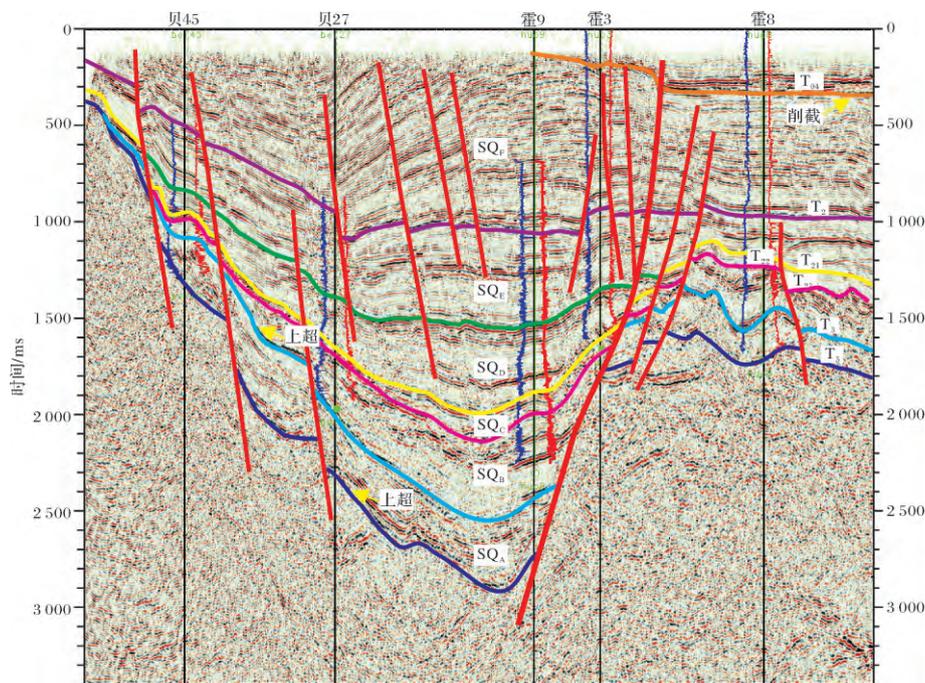


图 3 贝 45—霍 8 井连井地震层序格架剖面 (位置见图 1 ,AA')

Fig.3 Well correlation section of seismic sequences across Bei45 Well to Huo8 Well

(SQ_C)。早期伸展裂陷型层序(SQ_B)相当于南一段沉积。继铜钵庙组沉积之后,盆地整体抬升回返,形成区域性不整合面T₃。低水位体系域沉积期,水体较浅,大部分地区处于隆起剥蚀状态。在隆起区具有陆上可容纳空间地带常见冲积扇、辫状河道等体系,在深洼处可发育辫状水道、扇三角洲等沉积体系,体现了地形高差大、多物源、多水系的地貌特征。随着湖盆的不断沉降,湖平面上升,湖水越过斜坡和边界断层形成水进体系域沉积,在滨、浅湖亚环境中发育沙滩、砂坝等沉积体系,大多数平行于古岸线分布,以北向、北北东向为主。水进体系域深湖—半深湖环境下形成的暗色泥岩沉积是主要的烃源岩,可作为低位域砂体良好的区域性盖层。高水位体系域以扇三角洲体系发育为特征,在局部半深湖亚环境发育近岸浊积扇、湖底扇体系,在滨、浅湖亚环境偶见沙滩、砂坝等沉积体系。早期伸展裂陷型层序格架下,砂体走向在陡坡垂直于凹陷长轴方向,缓坡侧斜交于凹陷长轴方向,砂体呈扇状、裙带状沿湖岸线分布;晚期伸展裂陷型层序(SQ_C)相当于南二段沉积。该期由于同沉积断裂活动的减弱,造成可容空间减小,湖盆遭受充填,低水位体系域主要发育扇三角洲沉积体系。水进体系域粗碎屑体系明显退缩,以在半深湖中发育为主。高水位体系域近岸水下扇和扇三角洲广泛发育,但砂体规模较小(图4)。

裂陷收敛期主要发育裂陷收敛型层序,包括早期裂陷收敛型层序(SQ_D~SQ_E)和晚期裂陷收敛型层序(SQ_F)。早期裂陷收敛型层序(SQ_D~SQ_E)相当于大磨拐河组沉积,这一时期湖盆伸展速率较慢。低水位体系域沉积期湖泊水域不大,以滨、浅湖亚相为主,发育低位扇沉积体系。在隆起剥蚀区,偶见冲积扇、辫状河道等沉积体系。水进体系域沉积时,由于水体不

断加深,出现了连通性较好的半深湖及深湖亚环境,在滨、浅湖亚环境发育了沙滩、砂坝等沉积体系,平行于古岸线分布,以北向、北北西向为主。高水位体系域以三角洲、浊积扇、扇三角洲体系发育为特征,在深水环境中发育少量近岸水下扇、湖底扇体系,滨、浅湖亚环境见沙滩、砂坝等沉积体系。高水位体系域晚期,由于沉积物不断充填湖盆,湖泊范围逐渐缩小,逐渐形成湖沼、沼泽以及冲积平原沉积体系;晚期裂陷收敛型层序(SQ_F),即伊敏组沉积时期,盆地整体隆升萎缩,沉积环境以河流、沼泽相为主,以含煤地层为特点。低水位体系域沉积期同沉积断裂作用减弱,形成的可容纳空间有限,水体较浅,多以冲积扇、滨浅湖扇三角洲、湖沼—沼泽沉积体系为主。高水位体系域以河流沼泽沉积体系为特点,此时期沉积区面积大大缩小,湖区范围逐渐收缩、消失,形成河流沼泽、河流—冲积平原沉积体系。

3 低位域砂体分布特征

低位域砂体是沉积层序低位体系域内发育的不同成因类型砂体的总称^[16]。低水位体系域期间形成的砂体储层物性好,直接被水进体系域泥岩封盖,为岩性圈闭的形成提供了有利的条件。因此,分析和研究低位域砂体的分布特征对于寻找岩性圈闭至关重要。通过对贝尔凹陷SQ_A~SQ_F层序低位域沉积体系研究发现,该凹陷低位域主要发育在SQ_A~SQ_C层序中,而SQ_D~SQ_F层序分布则较少,砂体类型主要为辫状水道、近岸水下扇、扇三角洲以及湖底扇等几种类型,单层厚度较大且层数较多,受多物源控制,砂体错叠连片,广泛分布。低位体系域是发育在层序界面之上,首次水泛面之下的一套沉积体系,被坡折带和首次水泛面所限定,其发育主要受幕式构造运动及其产

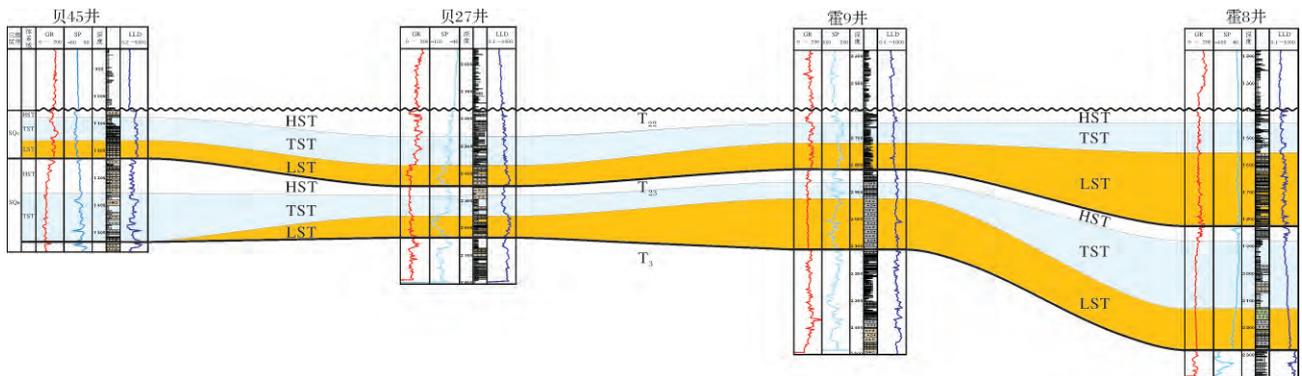


图 4 贝 45—霍 8 井连井层序格架剖面(位置见图 1, AA')

Fig.4 Well correlation section of sequences across Bei45 Well to Huo8 Well

生的构造坡折带的类型和样式控制。在垂向上,构造坡折带的类型控制了不同低位域砂体的形成和分布;在平面上,构造坡折带的样式控制低位域砂体的形态和空间展布,特别是砂体的平面展布主要受断裂带的控制,而砂体的分布形态主要受不同级别、不同类型的断层相互组合形成的断层调节带的控制。

3.1 低位域砂体剖面分布特征

在垂向上,盆地强烈或持续沉降期断裂坡折带发育特征显著地制约着盆地沉积体系的类型与分布,由于同沉积断裂活动规模、性质以及强度的不同,所控制的古地形可以形成 3 种构造坡折带类型,即断崖型、断阶型和断坡型^[17](图 5)。

(1) 断崖型坡折带与近岸水下扇

断崖型坡折带的形成一般受形成时间较早、长期活动、规模较大的基底断裂控制,多发育在凹陷的陡坡一侧。贝尔凹陷贝西北洼槽属于“单断型箕状”凹陷,控陷断层断面较陡,活动时间长,与洼槽区构成陡岸地形。靠近霍多莫尔凸起一侧为深水湖区。受控陷断层长期活动的影响,霍多莫尔构造带成为洼槽区物源补给区。来自该构造带上的水系所携带的沉积物沿控陷断层入湖后直接在断层的上盘沉积,形成近岸水下扇沉积体系。这类沉积体系规模小、相带窄,主要沿断裂走向呈裙边状分布。

(2) 断阶型坡折带与缓坡扇

断阶型坡折带的形成往往与呈阶梯状分布的次级断裂有关,常出现在凹陷较缓坡一侧。断阶的存在使凸起与凹陷之间呈缓坡相接,可容纳空间相对较小,易形成斜坡扇浊流沉积体系,这类沉积体系主要发育在贝西斜坡。由于贝西斜坡发育多组垂直斜坡走向、呈阶梯状分布的顺向断层,为从物源区来的斜坡扇浊流体系的推进增加了动力,使沉积物沿斜坡向下搬运一定的距离,在阶梯断层的下降盘形成浊积扇体。浊积扇的规模、沉积粒度、延伸距离与物源补给强度、斜坡梯度有关。

(3) 断坡型坡折带与扇三角洲—湖底扇

断坡型坡折带的形成也与较大的基底断裂有关,但断层的断面倾角较断崖型略缓,多发育在凹陷的陡坡一侧。靠近断裂部位盆底地形较陡,或前方又发育伴生断层。冲积扇入湖后,可在凸起前缘形成扇三角洲或近岸水下扇,然后沉积物又发生滑塌作用,在前方地形低洼处堆积形成湖底扇。贝西洼槽陡坡带受霍多莫尔控陷断层断面倾角的变化,在断面倾角较缓的地方发育(霍 3—霍 9 井区)扇三角洲—湖底扇沉

积体系。

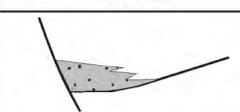
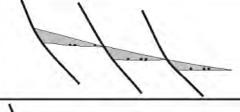
名称	剖面示意图	发育砂体类型	典型实例
断崖型		近岸水下扇	贝西陡坡 (霍3井区)
断阶型		斜坡浊积扇	贝西斜坡 浊积扇 (贝31井区)
断坡型		扇三角洲— 近岸水下扇 —湖底扇	贝西洼槽 (霍3—霍9井区)

图 5 断裂坡折带类型与砂体类型模式图

Fig.5 Model of slope break types and controlled sandbodies

3.2 低位域砂体平面分布特征

3.2.1 断层调节带控砂

在中小型断陷盆地中,构造坡折带的平面分布相当复杂,特别是一些低序级同沉积断裂,受控于构造应力场、早期断裂体系再活动及重力调节作用,具有多种组合样式。不同的组合样式所形成的断层调节带具有特定的构造地貌特征,从而控制砂体分散体系及砂体分布样式。断层调节带是指两条断裂结合部因断距等运动学和应力场的变化导致断层间新生一系列次级断层而形成的特殊构造现象^[18-20],它对河流入湖和砂体分布有明显的控制作用。对海拉尔盆地贝尔凹陷典型低位域砂体的解剖表明,在平面上,不同展布样式断层调节带控制着凹陷内不同类型砂体的空间展布。按断层的组合样式可以划分为 4 种基本类型,即断弯型、断接型、断沟型和交叉型和 6 种复合类型。

(1) 断弯型

沿着断层的走向方向,由于岩性、应力方向的变化,断层走向发生弯曲。在弯曲部位,由于断面倾角变缓,地势较低,是水流携带砂体的流经之路。砂体沿断面变缓部位的上升盘向下降盘延伸,在断层的下降盘形成“朵状”分布的砂体,且厚度和面积较大(图 6)。

(2) 断接型

在两条侧列断层的对接处,由于断层断距逐渐变小,地形坡度变缓,形成的调节带常常是水流携带碎屑物质注入湖盆的流经之地,水系携带的大量沉积物沿两条断层对接处向低部位卸载,形成辫状河三角洲、扇三角洲或湖底扇沉积,平面上呈“叶片状”或“朵状”分布。按照断层倾向的不同,断接型可以分

为两种: 同向对接型和反向对接型。前者由同向断层侧列对接形成, 后者则是由倾向相反的断层对接形成, 由于对接部位形成的障碍, 使得水流变缓, 砂体总是向断层下降盘地势低洼的部位散开, 一般砂体厚度和面积比较大(图 6)。

(3) 断沟型

在同沉积断层的上升盘, 最大断距部位由于挠曲上升形成较高地形, 沿断裂中部向末端地形变低, 形成断裂末端的构造低地, 同时由于流水的冲刷和侵蚀作用, 往往会沿断层的下降盘形成一些深沟。水流所携带的沉积物顺冲沟沿断层的走向散开, 常形成低位扇复合体, 砂体沿断层呈长条状分布(图 6)。受断层断距和物源的控制, 断沟型调节带在洼槽区通常形成长轴展布的砂体。

(4) 交叉型

在两条不同走向断层的交叉处, 往往形成断槽。受两条断层的夹限, 水流所携带的沉积物沿断槽沉

积, 砂体通常呈“叶片状”或“长条状”分布。按照断层倾向的不同, 交叉断层型可以分为两种: 同向交叉型和反向交叉型。前者为两条倾向相同断层的相交, 类似于断阶, 形成的断槽较浅。后者为两条倾向相反的断层相交, 形成的断槽较深, 砂体的厚度和面积相对较大(图 6)。

3.2.2 复合断层调节带控砂

在中小型断陷湖盆内, 构造活动频繁, 断裂发育, 断层调节带往往形成多种复合样式, 控制着凹陷内不同类型砂体的空间展布。对海拉尔盆地贝尔凹陷和二连盆地乌里雅斯太凹陷高频层序格架下砂体的平面展布形态研究表明, 中小型断陷湖盆发育 6 种复合断层调节带控砂模式, 即断弯—交叉型、断弯—对接型、断弯—断沟型、对接—交叉型、对接—断沟型和交叉—断沟型(图 7), 进而形成梳状断裂系、叉形断裂系和帚状断裂系等断裂带^[3], 不同类型的砂体受断裂带控制砂体成带状连片分布。

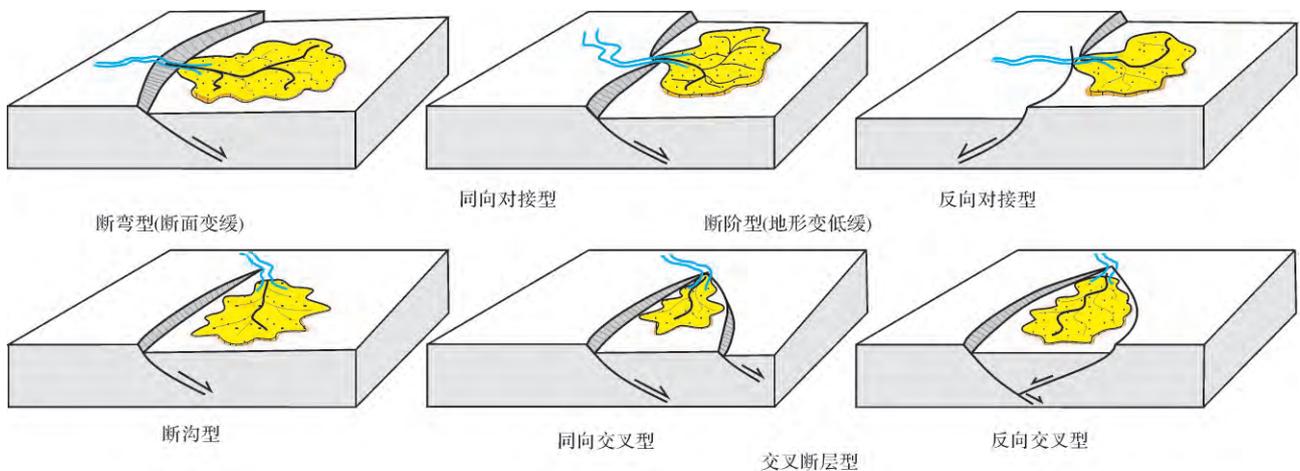


图 6 断层调节带控砂模式图

Fig.6 The controlling sandbodies models of fault-accommodation zones

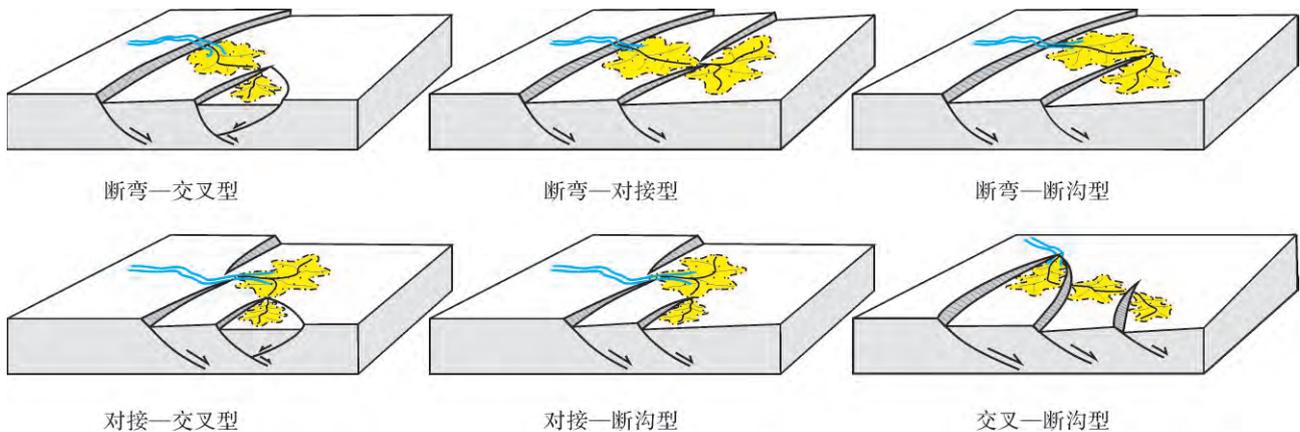


图 7 复合断层调节带控砂模式图

Fig.7 The controlling sandbodies models of fault-accommodation combinations

在体系域级别的高精度层序格架内,受断层级别和断层调节带复合样式的控制,砂体的大小形态不同,且多沿断层的走向呈裙带状展布。贝尔凹陷 SQ_B 层序低位域时期,为滨浅湖—半深湖相沉积,主要发育扇三角洲、近岸水下扇和浊积扇等沉积相带。其中缓坡一侧主要发育扇三角洲,陡坡一侧则发育近岸水下扇和扇三角洲,而洼槽区浊积扇较为发育,同时与来自不同物源区的扇三角洲砂体相互叠置在一起,砂体厚度较大(图 8)。低位域砂体的分布主要受断层调节带控制,在陡坡一侧,由于发育断阶,形成多个断弯型断层调节带;缓坡一侧,由于发育反向断层,主要形成断弯型、断沟型和交叉型断层调节带。由于凹陷范围窄,湖盆水体浅,低位域砂体极为发育,受几种断层调节带的控制,砂体沿断层呈条带状展布,在洼槽区相互叠置(图 9)。

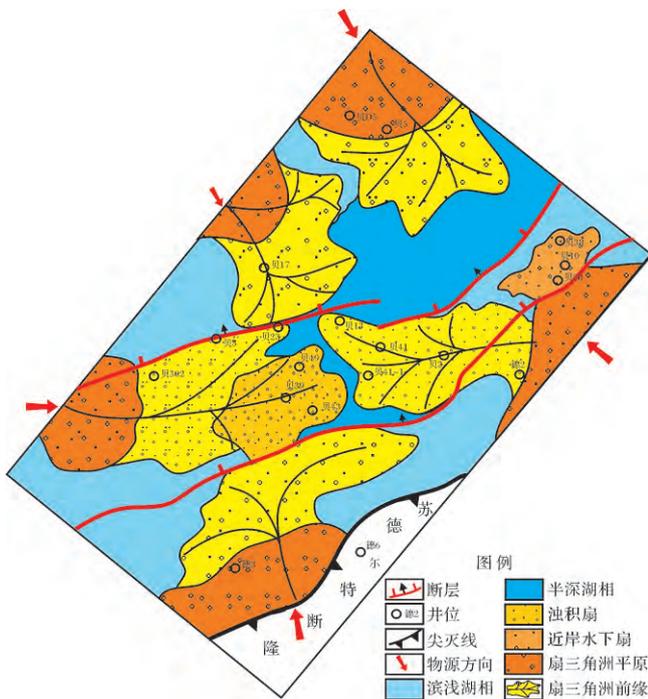


图 8 贝西南次凹 SQ_B 层序低位域沉积相图

Fig.8 Sedimentary facies of Sequence SQ_B in southwestern Beixi sub-depression

4 结论

(1) 贝尔凹陷下白垩统地层可划分为与 3 幕断陷作用所对应的 3 个二级层序,初始裂陷层序 SQ_I (铜钵庙组 K_1t)、伸展裂陷层序 SQ_{II} (南屯组 K_1n) 以及裂陷收敛层序 SQ_{III} (大磨拐河组 K_1d); 6 个三级层序,即 SQ_A (铜钵庙组 K_1t)、 SQ_B (南一段 K_1n_1)、 SQ_C (南二段 K_1n_2)、 SQ_D (大一段 K_1d_1)、 SQ_E (大二段

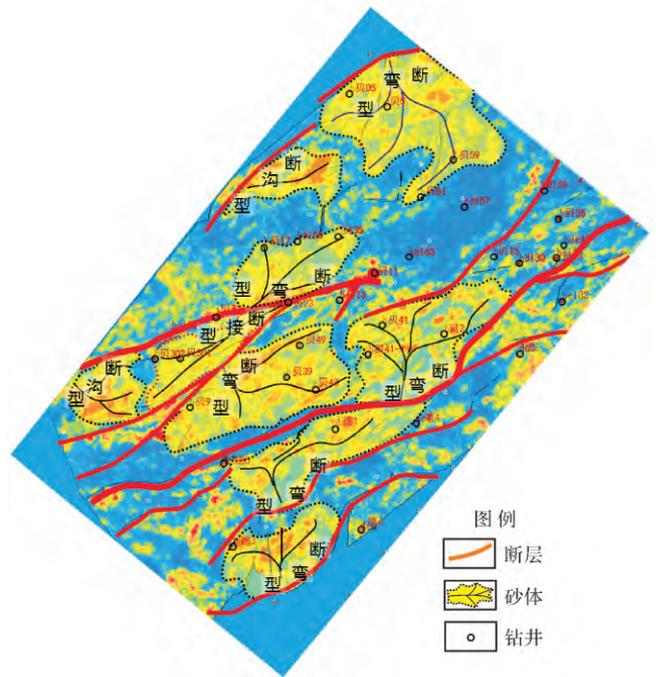


图 9 贝西南次凹 SQ_B 层序低位域砂体分布
Fig.9 Lowstand sandbodies distribution of SQ_B southwestern in Beixi sub-depression

K_1d_2) 和 SQ_F (伊敏组 K_1y) 以及 14 个体系域。

(2) 在三级层序格架下,不同沉积期沉积体系的空间展布和配置关系有明显区别, SQ_A 层序为初始裂陷型层序,主要发育冲积扇、近岸水下扇等粗碎屑沉积体系; $SQ_B \sim SQ_C$ 层序为伸展裂陷型层序,发育近岸水下扇、湖底扇、扇三角洲和半深湖等沉积体系; $SQ_D \sim SQ_F$ 层序为裂陷收敛型层序,发育三角洲、滨浅湖、浅湖和半深湖以及河流、沼泽相等沉积体系。

(3) 低位域砂体储层物性好,与水进体系域泥岩形成良好的储盖组合,为岩性圈闭的形成提供了有利条件。贝尔凹陷低位域砂体主要发育在 $SQ_A \sim SQ_C$ 层序中,而 $SQ_D \sim SQ_F$ 层序分布则较少。砂体类型主要为辫状水道、近岸水下扇、扇三角洲以及湖底扇等几种类型,单层厚度较大且层数较多,受多物源控制砂体错叠连片,广泛分布。

(4) 低位域砂体的发育主要受幕式构造运动及其产生的构造坡折带的类型和样式控制。在垂向上,构造坡折带类型控制了不同类型低位域砂体的形成和分布,其中断崖型坡折带形成近岸水下扇,断阶型坡折带形成浊积扇以及断坡型坡折带形成扇三角洲砂体;在平面上,构造坡折带的平面样式控制低位域砂体的形态和空间展布特征,尤其是砂体的形态及规

模受断层调节带控制。受同沉积断层组合样式的控制,在平面上主要形成断弯型、断接型、断沟型以及交叉型等4种基本砂体分布类型以及断弯—交叉型、断弯—对接型、断弯—断沟型、对接—交叉型、对接—断沟型和交叉—断沟型等6种复合砂体分布类型。低位域砂体在洼槽区相互叠置、连片分布,为各类岩性—地层圈闭的形成创造条件。

致谢 感谢审稿专家及编辑部老师提供的修改建议,感谢冯有良高级工程师在论文成文及修改过程中给予的指导和帮助。

参考文献(References)

- 雷燕平,林畅松,刘景彦,等. 海拉尔盆地贝尔凹陷下白垩统层序地层与沉积体系分析[J]. 石油地质与工程, 2007, 21(5): 11-15 [Lei Yanping, Lin Changsong, Liu Jingyan, et al. Research of depositional system and sequence stratigraphic in Lower Cretaceous in Beier sag, Hailaer Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21(5): 11-15]
- 渠永宏,廖远慧,赵利华,等. 高分辨率层序地层学在断陷盆地中的应用——以海拉尔盆地贝尔断陷为例[J]. 石油学报, 2006, 27(增刊): 31-37 [Qu Yonghong, Liao Yuanhui, Zhao Lihua, et al. Application of high-resolution sequence stratigraphy in rift basin: Taking Beier fault-depression of Hailaer Basin as example [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(Suppl.): 31-37]
- 王雅宁,鲍志东,彭仕宓,等. 贝尔凹陷关键层序识别与油气意义[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(8): 11-16 [Wang Yaning, Bao Zhi-dong, Peng Shimi, et al. Characteristics and hydrocarbon significances of key sequences in Beier sag [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(8): 11-16]
- 李椿,赵亮,李晓峰,等. 贝西斜坡北部南屯组层序地层格架的建立[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(5): 10-13 [Li Chun, Zhao Liang, Li Xiaofeng, et al. Establishment of the group sequence stratum rack of the southern area in northern Beixi slope [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007, 31(5): 10-13]
- 李占东,卢双舫,周件林. 海拉尔盆地贝西斜坡北部白垩系南屯组层序界面识别与地层格架研究[J]. 地层学杂志, 2009, 33(2): 169-176 [Li Zhandong, Lu Shuangfang, Zhou Jianlin. Identification of sequence boundaries and establishment of sequence stratigraphic framework in the Cretaceous Nantun Formation in the northern Beixi slope area of the Hailaer Basin [J]. Journal of Stratigraphy, 2009, 33(2): 169-176]
- 李军辉,卢双舫,柳成志,等. 贝尔凹陷贝西斜坡南屯组层序特征及其油气成藏模式研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(2): 306-311 [Li Junhui, Lu Shuangfang, Liu Chengzhi, et al. Sequence characteristics and hydrocarbon accumulation model of Nantun Formation in Beixi slope of Beier sags [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(2): 306-311]
- 杨婷,金振奎,张雷,等. 海拉尔盆地贝尔凹陷贝西地区南屯组层序地层特征[J]. 吉林大学学报: 自然科学版, 2011, 41(3): 629-638 [Yang Ting, Jin Zhenkui, Zhang Lei, et al. Sequence stratigraphic characteristic of the Nantun Formation in the western area of Beier depression, Hailaer Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(3): 629-638]
- 雷燕平,林畅松,刘景彦,等. 贝尔凹陷下白垩统构造对沉积充填和砂体分布的控制[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(2): 25-29 [Lei Yanping, Lin Changsong, Liu Jingyan, et al. Sedimentary filling and sand body distribution controlled by structures in Lower Cretaceous in Beier depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(2): 25-29]
- 冯有良,高广胜,鲁卫华. 贝尔断陷层序建造及岩性油气藏发育特征[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(4): 1-7 [Feng Youliang, Gong Guangsheng, Lu Weihua. Development characteristics of lithologic reservoirs and sequence architecture in Beier Rift [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(4): 1-7]
- 宋建国,龚立荣,等. 中国东部中生代盆地分析和含油气系统[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 68-69 [Song Jianguo, Dou Li-rong, et al. Mesozoic Basin Analysis and Petroleum System in Eastern China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 68-69]
- 冯志强,孙国昕,蒙启安,等. 海拉尔盆地贝中次凹—残留型叠合小断陷盆地油气勘探的成功案例[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 551-561 [Feng Zhiqiang, Sun Guoxin, Meng Qi'an, et al. Beizhong sub-depression in the Hailer Basin: A successful case for oil exploration in small residual superimposed rift basins [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 551-561]
- Embry A F. Sequence boundaries and sequence hierarchies: Problems and proposals [G]//Steel R J, Felt V L, Johannessen E P, et al. Sequence stratigraphy on the Northwest European Margin. Norwegian Petroleum Society Special Publication 5, 1995: 1-12
- Lin C S, Eriksson K, Li S T, et al. Sequence architecture, depositional systems, and controls on development of lacustrine basin fills in part of the Erlian Basin, northeast China [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(11): 2017-2043
- 任建业,陆永潮,张清林. 断陷盆地构造坡折带形成机制及其对层序发育的控制作用[J]. 地球科学, 2004, 29(5): 596-603 [Ren Jianye, Lu Yongchao, Zhang Qinglin. Forming mechanism of structural slope-break and its control on sequence style in faulted basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 29(5): 596-603]
- 冯有良,李思田,解习农,陆相断陷盆地层序地层形成动力学与层序地层模式[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 119-132 [Feng Youliang, Li Sitian, Xie Xinong. Dynamics of sequence generation and sequence stratigraphic model in continental rift subsidence basin [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 119-132]
- 冯有良,李思田. 东营凹陷沙河街组三段层序低位域砂体沉积特征[J]. 地质论评, 2001, 47(3): 278-286 [Feng Youliang, Li Sitian. Depositional characteristics of lowstand sandbodies of the third member of the Shahejie Formation in the Dongying depression and the significance in petroleum geology [J]. Geology Review, 2001, 47(3): 278-286]
- 邓宏文,王红亮,王敦刚. 古地貌对陆相裂谷盆地层序充填特征的控制——以渤中凹陷西斜坡区下第三系为例[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 293-296 [Deng Hongwen, Wang Hongliang, et al. Control of paleogeography on sequence filling characteristics of continental rift basins: A case study of the lower Tertiary in the western slope of the Bohai Bay Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 293-296]

- Wang Dungan. Control of paleo-morphology to stratigraphic sequence in continental rift basins: Take lower Tertiary of western slope in Bozhong depression as an example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2001, 22 (4): 293-296]
- 18 Dahlstrom C D A. Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains [J]. *Bull of Canadian Petroleum Geology*, 1970, 18(3): 332-406
- 19 Elena K A, Harris L B, Poulin J, *et al.* Transfer zones and fault reactivation in inverted rift basins: Insights from physical modeling [J]. *Tectonophysics*, 2007, 441: 1-26
- 20 Faults J E, Varga R J. 1998. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes [G]// Faults J E, Stewart J H. *Accommodation zones and transfer zones: The regional segmentation of the basin and range provinces*. Boulder Colorado: the Geology Society of America: 323: 1-45

Distribution of Sandbodies in a Sequence Stratigraphic Framework in Lower Cretaceous of Beier Depression

LI Wen-ke ZHANG Yan FANG Jie WANG Jun GAO Ri-sheng

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083)

Abstract: Hailaer Basin, featured by frequent structural movement, simple depositional cycle, multi-and near-sources, coarse clastic, narrow-sedimentary facies and more fans, is Mesozoic Early Cretaceous fault depressed lacustrine basin developed on the Hercynian geosyncline folded base in northeast China. After its formation, Hailaer Basin had gone through three tectonic phases, including rift initiation, rift extension and post-rift episodes, and each phase has its own depositional system. Based on the theory of sequence stratigraphy and used all data such as seismic, well log, core analysis and palaeophyte, this paper focuses on sandbodies distribution in a sequence stratigraphic framework in Lower Cretaceous of Beier depression. Studies show that there are three second-order sequence correspond to three tectonic phases, including rift initiation sequence SQ_I (Tongbomiao group K_1t), rift extension sequence SQ_{II} (Nantun group K_1n) as well as post-rift sequence SQ_{III} (Damoguaihe group K_1d), and six third-order sequence including SQ_A (Tongbomiao Group K_1t), SQ_B (Nanyi member K_1n_1), SQ_C (Nan'er member K_1n_2), SQ_D (Dayi member K_1d_1), SQ_E (Daer member K_1d_2) and SQ_F (Yimin Group K_1y) as well as fourteen systems tracts. In the third-order sequence stratigraphic framework, the spatial distributions and sedimentary assemblages of depositional system are varying significantly in different depositional stage. In the depositional period of sequence SQ_A (formed in the rift initiation episode), which developed the coarse clastic sedimentary assemblage as alluvial fan and subaqueous fan. During the depositing period of sequence $SQ_B \sim SQ_C$ (formed in the rift extension episode), which developed the sedimentary assemblage as subaqueous fan, turbidite fan, fan delta and semi-deep. While during the depositing period of sequence $SQ_D \sim SQ_F$ (formed in post-rift episode), which developed the sedimentary assemblage as delta, shore-shallow lacustrine and semi-deep, as well as fluvial and paludal facies.

Lowstand system tracts sandbodies were mostly distributed in rift extension sequence SQ_{II} with favorable reservoir conditions. Meanwhile, the above thick claystone in transgressive and highstand system tracts act as cap rocks at the same time. So they can form favorable reservoir-seal assemblage and lithologic-stratigraphic traps. Studies also show that lowstand system tracts sandbodies are mainly distributed in the depositing period of sequence $SQ_A \sim SQ_C$, while few in $SQ_D \sim SQ_F$. The main types of sandbodies are braided river channel, subaqueous fan, turbidite fan, fan delta and so on, which are featured by multi-layers with thick single layers. Controlled by multi sources, lowstand system tracts sandbodies had superposed and jointed in most of the depression.

The sandbodies controlling factors are very complicate in these kinds of basins. From the aspects of analyzing the function of structure controlling depositional system, synsedimentary structures often play an important part in sandbodies deposition and its distribution. Especially, lowstand system tracts sandbodies, of which spatial distribution are mainly influenced by episodic tectonic movements and the types of structural slope break zone formed by many differ-

ent level and types of faults , is the most important reservoirs for lithologic traps. The formation and distribution of low-stand system tracts sandbodies is mainly controlled by the types of structural slope break zone vertically. Three types of structural slope break zone developed on the basin margin , resulting in three types of depositional systems. Nearshore subaqueous fan system resulted from faulted scarp type break in-slope; slope fans system developed on faulted terrace type break in-slope; fan-deltas and sub-lake fan system developed on steep slope type break in-slope. While in plane , sandbodies , featured by thin thickness , small range of extension , a rapid horizontal variation and along fault strike in bands or apron shape , are controlled by the style of faulted slope-break zone. Especially , the shape and scale of sandbodies is controlled by fault-accommodation zones. Four basic types fault-accommodation zones including fault-bend , fault-connect , fault-valley and fault-intersect , and six complex types fault-accommodation zones including fault-bend and fault-intersect , fault-bend and fault-connect , fault-bend and fault-valley , fault-connect and fault-intersect , fault-connect and fault-valley , and fault-intersect and fault-valley are concluded by genesis. As a result , different kinds of sandbodies tend to be superposed and jointed in middle sag , which are the material basis of lithologic-stratigraphic traps-forming.

In system tracts sequence stratigraphy framework , controlled by fault-accommodation zones and their combinations , sandbodies have various scales and shapes and show striped distribution along fault strike in Beier depression. During the depositing period of lowstand system tracts of sequence SQ_B , sedimentary facies of this area is shore-shallow lacustrine to semi-deep lake sediments. The lowstand system tracts of Nanyi member mainly develop fan delta , subaqueous fan and turbidite fan. Especially , in southwestern Beixi sub-depression , fault-intersect type mostly developed in steep slope for fault terrace , while fault-bend and fault-connect types in gentle slope for many consequent faults. For small deposition area and shallow water , this area has many kinds of lowstand system tracts sandbodies , which are controlled by fault-accommodation zones and show striped distribution along the long axis direction of Beier depression.

Key words: sequence stratigraphy; depositional system; lowstand system tracts sandbodies; fault-accommodation zones; Beier depression