

断陷盆地扇三角洲朵叶“叠置型”沉积样式 及其油气地质意义

——以海拉尔盆地苏德尔特构造带兴安岭组Ⅰ、Ⅱ油组为例

崔鑫^{1,2}, 李江海², 姜洪福³, 王运增³, 齐林海³, 杨少英³

(1.核工业北京地质研究院,遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室,北京 100029;

2.北京大学地球与空间科学学院,北京 100871;

3.中国石油大庆油田有限责任公司海拉尔石油勘探开发指挥部,黑龙江 大庆 163453)

摘要:综合运用单井岩性分析、测井特征对比,粒度分选特征分析,典型相标志识别等手段,结合前人研究,确定海拉尔盆地苏德尔特构造带下白垩统兴安岭组Ⅰ、Ⅱ油组为扇三角洲前缘沉积环境。有利于储层砂体发育的沉积微相包括:水下分流河道、水下天然堤、河口坝、前缘席状砂和浊积砂等。其中水下分流河道微相为主力储层砂体发育相。Ⅰ、Ⅱ油组存在3种砂体沉积样式,分别为“孤立型”“接触型”和“叠置型”。“孤立型”沉积样式主要发育在物源供给不足,但沉积空间充足的B28井区,具有扇体朵叶分散,河道砂体独立的特征;“接触型”沉积样式主要发育在物源供给充足且沉积空间充足的B14井区,具有朵叶侧向接触,河道砂体侧向相切的特征;“叠置型”沉积样式主要发育在物源供给充足且“窄而深”的B16井区,具有多期发育的扇体朵叶垂向叠置,侧向加积,河道砂体上下叠置,侧向相切的特征。建立区内扇三角洲“叠置型”沉积相模式,认为断陷盆地内“叠置型”沉积样式最有利于发育优质储层并储存油气。

关键词:“叠置型”沉积样式;扇三角洲;油气意义;苏德尔特构造带;海拉尔盆地

中图分类号: TE122.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-1926(2018)05-0682-14

引用格式: Cui Xin, Li Jianghai, Jiang Hongfu, *et al.* The “superimposed sedimentary type” of sandstone in fan delta in faulted-basin and its petroleum geologic significance: A case study of oil groups I and II in Xing'anling Formation of the Sudeerte structural belt, Hailar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(5): 682-695. [崔鑫, 李江海, 姜洪福, 等. 断陷盆地扇三角洲朵叶“叠置型”沉积样式及其油气地质意义——以海拉尔盆地苏德尔特构造带兴安岭组Ⅰ、Ⅱ油组为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(5): 682-695.]

0 引言

我国东北地区发育渤海湾盆地、二连盆地、松辽盆地、海拉尔盆地等众多陆相断陷盆地^[1-3], 这些断陷湖盆砂体常形成于水体规模小、坡度陡、同沉积构造强烈、气候条件季节性变化大的构造沉积背景

下^[4]。海拉尔盆地先后经历断陷期、拗陷期和构造反转期等多期叠合改造作用^[5,6], 形成了“碎”“断”“窄”的构造特征^[6]。相比其他断陷盆地, 海拉尔盆地砂体沉积叠置关系更为典型与独特, 具有极强的代表性。盆地中部苏德尔特构造带兴安岭组储层具有多物源、窄相带、短流程、快速沉积的特点^[6,7]。

收稿日期: 2017-10-18; **修回日期:** 2018-03-19.

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司项目“苏德尔特油田兴安岭、布达特油层已开发外扩潜力研究”(编号: DQYT-0516002-2014-JS-635); 中国地质调查局国土资源航空物探遥感中心项目“准噶尔盆地东北缘航空高光谱油气信息提取示范及异常查证”(编号: 遥 DC1707)联合资助。

作者简介: 崔鑫(1985-), 男, 黑龙江大庆人, 工程师, 博士, 主要从事石油地质、构造地质与遥感地质等研究. **E-mail:** cuixin8868@163.com.

储层横、纵沉积相序变化快,非均质性强,砂体叠置关系复杂,同一套油组,砂体厚度差异可达近百米^[7-9]。这种独特的储层特征为研究砂体叠置沉积关系提供了天然的研究条件。另一方面,作为海拉尔盆地的主力油田,苏德尔特油田勘探开发程度高,具有丰富的测井、岩心等资料和全覆盖的三维地震数据,为研究区开展构造精细解释、储层精细描述等研究提供了良好的基础。

前人对于研究区兴安岭储层的沉积关系进行过大量的研究:徐振中等^[9]对苏德尔特构造带兴安岭组沉积特征分析研究,认为该区主要发育辫状河三角洲沉积,并指出水下分流河道和河口砂坝微相砂体是油气聚集区。王建平等^[7]认为研究区兴安岭组为扇三角洲相沉积环境,通过对下白垩统地层沉积基准面旋回变化过程研究,认为基准面控制了砂体厚度、连续性和储层物性。李占东等^[5]分析海拉尔盆地中部断陷带沉积填充与构造活动关系,认为下白垩统地层存在辫状河三角洲、扇三角洲和冲积扇的复式沉积相组合,断裂坡折带控制沉积体系。

苏德尔特构造带断裂发育、沉积环境时空变化快、不同井区地层厚度及砂体岩性岩相变化大,造成该区兴安岭组储层砂体横向连续性差,纵向组合关系复杂,油水关系复杂多变,油气产能差异巨大^[8,10]。目前,研究区缺乏统一的沉积相认识,缺少主力井区砂体横—纵向接触关系分析及合理的相模式解释。为此,本文以海拉尔盆地苏德尔特构造带兴安岭组Ⅰ、Ⅱ油组为目的层,从大量的岩心、测井及地震资料入手,通过单井岩、电特征对比,粒度分布及分选特征分析,明确研究区沉积环境、相类型及特征;根据Ⅰ、Ⅱ油组砂体平面展布特征,连井砂组精细对比,确定区内不同井区砂体的侧向分布特征及垂向叠置关系。参考研究区构造演化史,沉积演化过程,确定扇三角洲朵叶沉积样式及对应砂体叠置关系。结合勘探实际,论述不同类型的砂体叠置关系对于油田勘探开发的实际意义。为苏德尔特油田的后续开发提供参考和依据。同时,尝试讨论复杂陆相断陷盆地内储层砂体沉积样式及其油气地质意义的科学问题。

1 区域地质概况

1.1 研究区地质背景

海拉尔盆地是位于我国东北的一个中生代断陷型含油气盆地。盆地先后经历了断陷期、拗陷期和反转期3个主要的构造演化阶段^[11,12],盆地主要

沉积中—新生代沉积地层,岩性包括变质火山岩、砂岩和凝灰质砂岩等。下白垩统兴安岭组(K_1x)为一套由砂岩、泥质细砂岩和凝灰质砂岩组成的陆相碎屑岩沉积地层^[7]。其上主体沉积地层包括南屯组(K_1n)、大磨拐河组(K_1d)、伊敏组(K_1y)和青元岗组(K_2q)等^[13,14]。盆地先后经历了中—晚侏罗世的右旋张扭作用,白垩纪早期北西—南东向的区域拉伸作用,白垩纪中期北西西—南东东向的区域性伸展作用,以及白垩纪末期的左旋压扭反转作用^[15,16],盆地构造活动一直持续至晚白垩世盆地才最终定型。贝尔凹陷和乌尔逊凹陷是海拉尔盆地的2个最为重要生烃洼陷^[17]。

本文研究区苏德尔特构造带为贝尔凹陷中部的一个北东向展布的继承古隆起,夹持在贝西和贝中两大生油洼陷之间。构造带被北东向和近东西向断层切割,形成数10个大小不等的复杂断块,整体呈现出南北分带、东西分块的构造格局。构造带平面上分为北、西、南部断阶带和中央断垒带4个部分(图1)。下白垩统兴安岭组是苏德尔特油田的主要油气产出层位^[8,10],根据构造特征和油气产能情况,构造带被分为B28、B14、B16共3个主要产油区,沿隆起带自西向东分布(图1)。

1.2 地层特征

根据地层岩电特征,研究区兴安岭组被分为5个主要油组(图2),本文重点研究的Ⅰ、Ⅱ油组是该套地层的主力产油层位[图2(a)]。Ⅰ油组主要为凝灰质砂岩沉积,电阻率曲线表现为尖峰状、自下而上电阻率由低到高;Ⅱ油组以凝灰质砂砾岩的进积型沉积为主,电阻率曲线表现为尖峰状、自下而上电阻率由高到低[图2(b)]。对B28、B14和B16共3个井区的连井地层对比可以看出[图2(b)],Ⅰ、Ⅱ2套油组普遍发育短期旋回,连续性较好,厚度相对稳定。其中B16井区沉积厚度最大,向B28井区一侧油组厚度逐渐减薄。

2 扇三角洲沉积背景

扇三角洲多形成于活动大陆边缘或是断陷湖盆的陡坡边缘,物源供给充足和快速堆积是其重要的沉积条件^[18-20]。本文通过典型井的粒度分布及分选特点、岩心特征、岩性组样式及典型沉积构造识别等方法来确定研究区的沉积环境。

2.1 粒度分布特征

碎屑岩粒度分布及分选性是衡量沉积介质能量的度量尺度,是判别沉积时自然地理环境以及水动

力条件的良好标志^[20-22]。分析粒度概率曲线图可知[图 3(a)]:兴安岭组粒度概率曲线多数含悬浮总体和跳跃总体 2 个部分,仅有少量存在滚动组分总体。跳跃总体在部分样品数据表现为弧形特点,类似多段特征,分选中等—较差,悬浮总体也较为发育。粒度概率曲线呈近45°或低于45°斜率,表明搬运砂砾

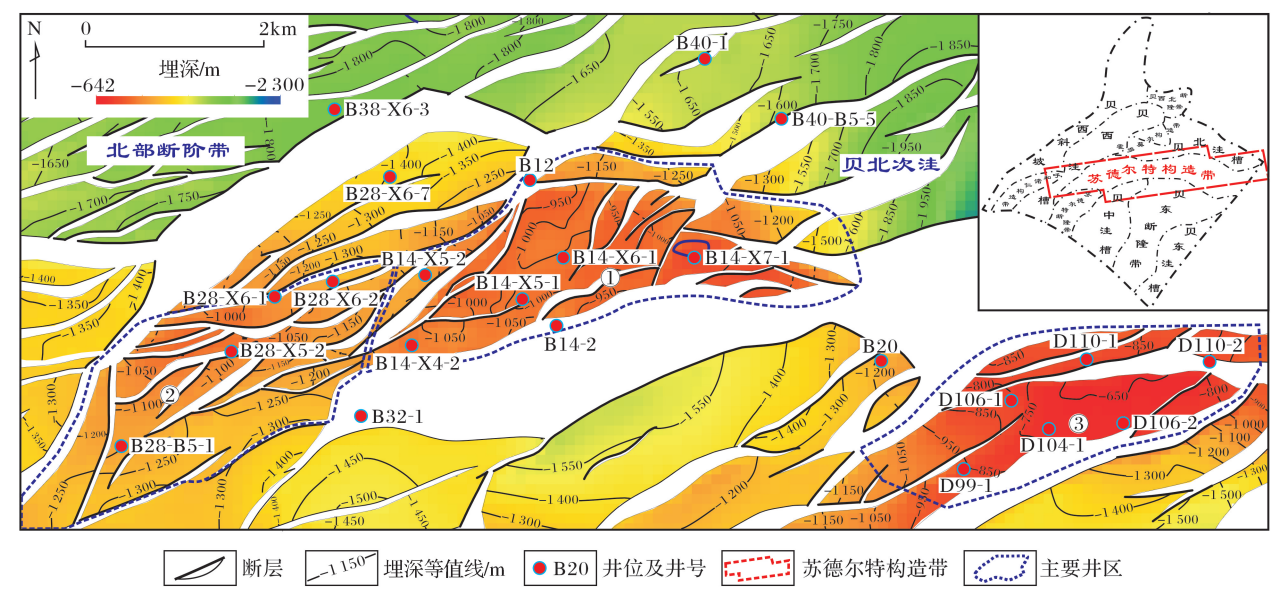


图 1 海拉尔盆地苏德尔特构造带位置及构造纲要(①B14 井区; ②B28 井区; ③B16 井区)

Fig.1 The location and structure map of Sudeerte structural belt, Hailar Basin

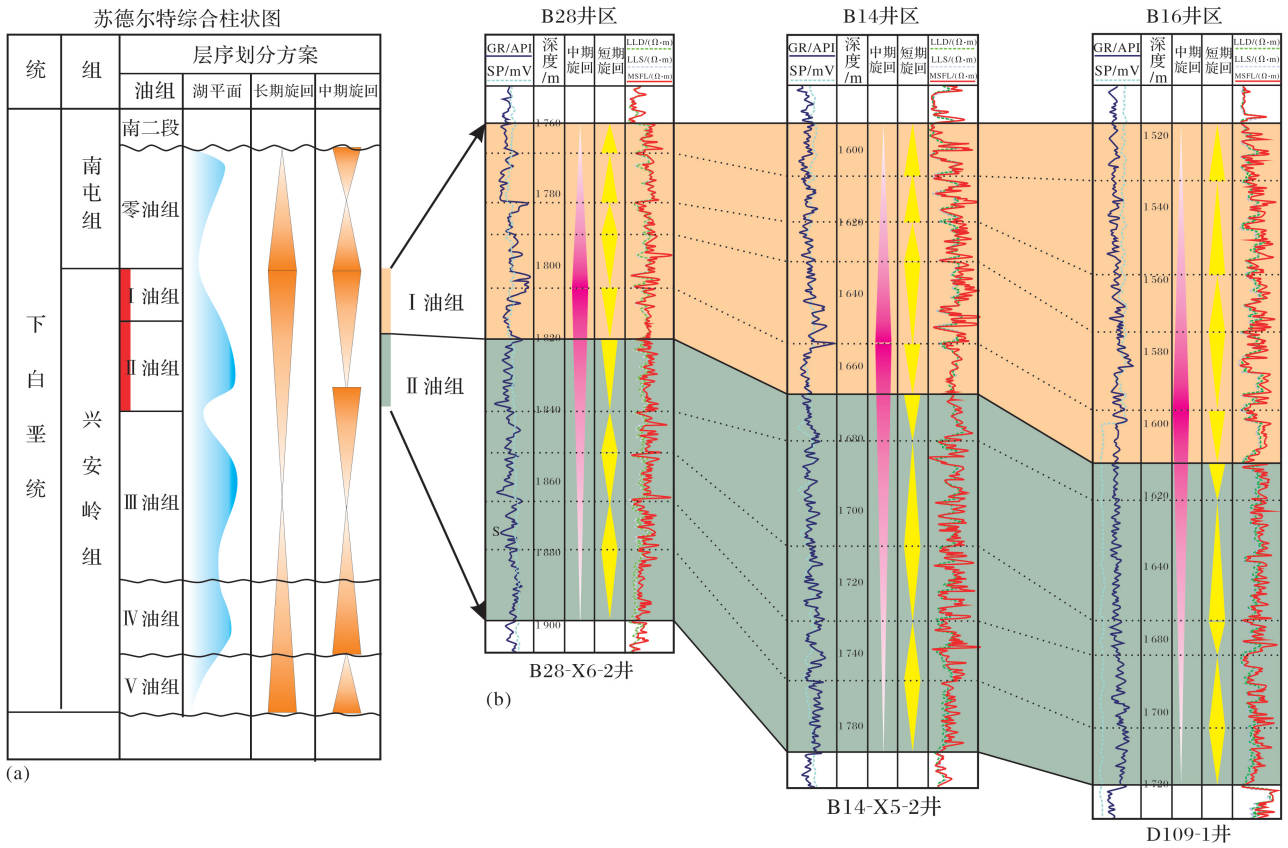


图 2 海拉尔盆地苏德尔特构造带兴安岭组主力油组次级基准面旋回划分方案(a)及地层对比柱状图(b)

Fig.2 Generalized stratigraphic column of the Lower Cretaceous strata in Xing'anling Formation of the Sudeerte structural belt, Hailar Basin

岩体的水动力条件很强,表现为河流与湖浪等多种营力共同作用的牵引流与重力流沉积体系^[4,20]。

利用C—M图可对碎屑物质的搬运沉积条件作出判断^[20-23]。从苏德尔特兴安岭组粒度C—M图可以看出[图3(b)]:点群集中分布在平行于C—M基线的长条带范围内,宽度不大,表明C值与M值是成比例地增加,这是递变悬浮沉积物的一个最大特点^[21],即C值与M值相应变化。递变悬浮主要指示一种强水流环境^[22]。点群在QR段和RS段均有发育[图3(b)]。QR段代表递变悬浮沉积,常

是由于涡流发育造成的,部分样品投点集中此段,说明该区域砂体沉积时发生迅速滚动,指示强水流的沉积过程。RS段为均匀悬浮沉积,指示上层水流搬运特征,符合牵引流沉积搬运环境特征^[23]。C—M图说明了研究区相对明显的重力流与牵引流并存的沉积环境,但整体粒度中值很少有大于200的数据点,这可能受分析化验取样点所限。

粒度概率曲线图和C—M图中的粒度分布特征说明研究区兴安岭组具有牵引流与重力流同时并存的沉积环境,符合扇三角洲沉积特征^[4,20-23]。

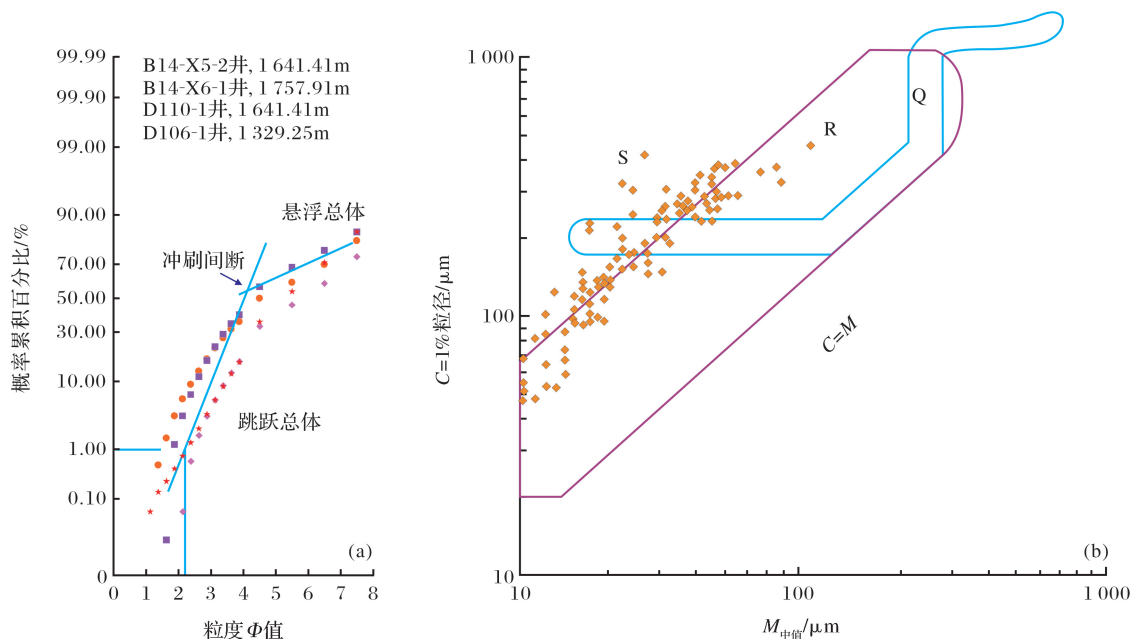


图3 海拉尔盆地苏德尔特构造带兴安岭组扇三角洲沉积物累计概率曲线及C—M分析
Fig.3 C—M diagram and grain size analyses of selected samples from Xing'anling Formation of Sudeerte structural belt, Hailar Basin

2.2 典型沉积相标志

依据岩心观察(具体井位见图1),本区各类砂岩均有发育,岩性包括:灰色砂砾岩、含砾粗砂岩、粗砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、杂色砂砾岩及凝灰质砂岩等。局部发育炭屑、炭质泥岩和灰色深灰色泥岩(图4)。常见砂岩与泥岩互层[图4(a),图4(c),图4(d)]。砂岩颗粒成分分选性一般,磨圆度中等—较差,结构成熟度低;含砾段多,并且各类型砂岩和泥岩都有含砾情况,砾石成分复杂,分选、磨圆较差[图4(c),图4(d)]。表明本区为水体动荡明显,岩性复杂多变的沉积环境。

B16井区D106-1井1377.1m处岩心发现保存完好的植物化石[图4(b)],这表明该地区沉积时经历快速堆积过程,暗示该区近物源、快速堆积的沉积

特点。B14井区多处岩心发育交错层理、波状层理、平行层理及相互组合的复合层理[图4(d),图4(e)],并常见冲刷面和递变粒序层理,这些特征综合反映了浅水高能的沉积环境^[24,25]。这与扇三角洲发育大型交错层理和重力流成因的混杂沉积特征相吻合^[26]。

结合区域地质背景^[4,5,26],认为该区兴安岭组沉积地层主要为扇三角洲沉积体系。

2.3 典型沉积微相分析

研究区砂砾岩多具有明显的冲刷特征,发育交错层理、平行层理和水平层理等。砂层顶部为正粒序,粉砂岩发育沙纹层理。测井曲线多表现为箱形、钟形和漏斗形等,具有典型水下分流河道砂及河道侧缘溢岸等微相特征(图5)。通过测井曲线形态及

相标志特征分析,认为研究区主要发育扇三角洲前缘亚相和前扇三角洲亚相,其下又分为 6 个沉积微相(表 1)。

2.3.1 水下分流河道

砂岩颜色一般为浅灰色,主要是细砂岩、中—粗砂岩、含砾细砂岩、含砾粗砂岩等,部分夹薄层泥质粉砂岩,常见冲刷面。从深到浅,岩石粒度由粗变细。自然伽马低值,曲线表现为箱状、钟状或齿化的箱状、钟状,幅度较大,正粒序特征显著。

2.3.2 河道侧缘溢岸

河道侧缘溢岸微相是水下天然堤微相和溢岸砂微相组合。仍然以河流能量为主,受湖浪改造,有时呈现对称的韵律。主要是灰色、深灰色粉砂岩、泥质粉砂岩、粗砂岩。波状层理、水平层理发育;见变形构造、炭屑纹层。电性组合特征表现为单元厚度要比水下分流河道小,但要好于河间薄层砂和席状砂,

自然伽马曲线形态为低幅齿状或低幅漏斗状。

2.3.3 河口坝

砂岩颜色为浅灰色,主要是粗砂岩、含砾粗砂岩、粉砂岩,少量粉砂质泥岩、泥岩,见炭屑纹层。本区河口坝发育较少,粒度特征表现为反旋回。自然伽马曲线形态为低幅指状。

2.3.4 河道间砂

砂岩颜色为灰绿色、灰色、深灰色。主要是泥质粉砂岩、粉砂质泥岩,水平层理,见变形构造。自然伽马曲线形态为低幅齿状或低幅钟状。

2.3.5 席状砂

岩性特征与远砂坝相似,主要以泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主,是河口坝砂受波浪和岸流的淘洗和筛选,发生侧向迁移,使之呈席状或带状分布于三角洲的前缘,席状砂砂质纯,分选好,常见交错层理,自然伽马曲线形态为低幅指状或低幅漏斗状。

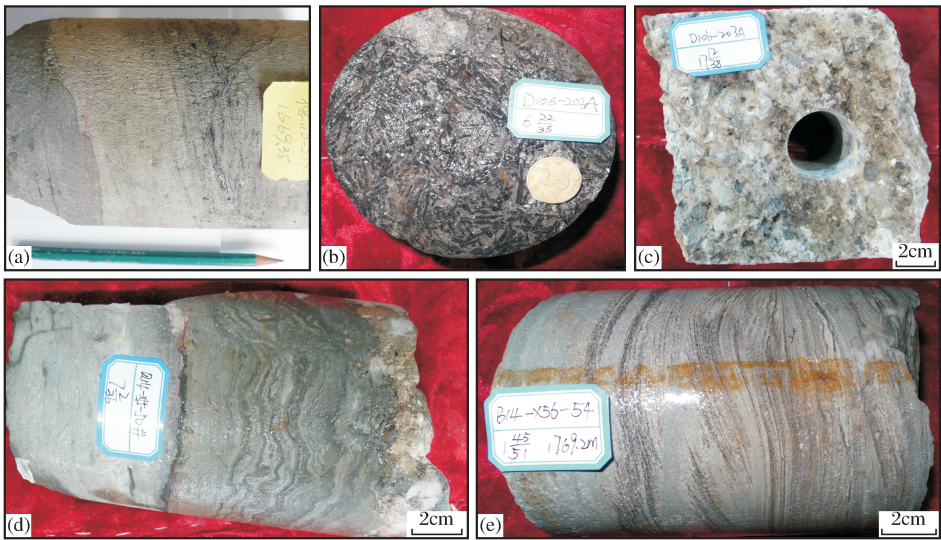


图 4 海拉尔盆地苏德尔特构造带兴安岭组特征岩心和沉积构造照片

Fig.4 Core photographs showing diagnostic lithological and sedimentary features in Xing'anling Formation of Sudeeret structure belt, Hailar Basin

(a)D110-1 井,1 669.35m,砂岩和泥岩中间突变接触;(b)D106-1 井,1 377.1m,植物化石;(c)B14-X5-1 井,1 671.6m,粗粒砂岩和砾石胶结;
(d)B14-X5-1,井 1 645m,发育揉皱构造;(e) B14-X6-1 井,1 769.2m,发育波状层理

2.3.6 浊积砂岩

岩性主要为灰色和深灰色粉砂岩,粒度细,分选较好,水平层理发育。自然伽马曲线低起伏特征明显,形态为低幅指状。

3 扇体“叠置型”沉积关系

3.1 主力油组砂体展布特征

在地层厚度、砂体厚度的基础上,通过单井砂体厚度矫正,得到苏德尔特构造带及邻区 I、II 油组砂

体厚度平面分布图(图 6),可以发现 I、II 油组砂体分布受控于苏德尔特构造带走向,砂体主要分布在苏德尔特构造带上,多呈朵叶状和片状分布(图 6)。砂体展布趋势上,呈现出“南厚北薄”的特征,这表明了兴安岭组砂体自南部和东南部向北部推进的沉积过程。结合前人^[5,6,9]的研究成果,可以断定研究区兴安岭组砂体物源来自南部及东南部的贝东断隆带。砂体的厚度上,II 油组砂体厚度明显大于 I 油组砂体厚度;同一油组,东侧 B16 井区砂体厚度最大,其

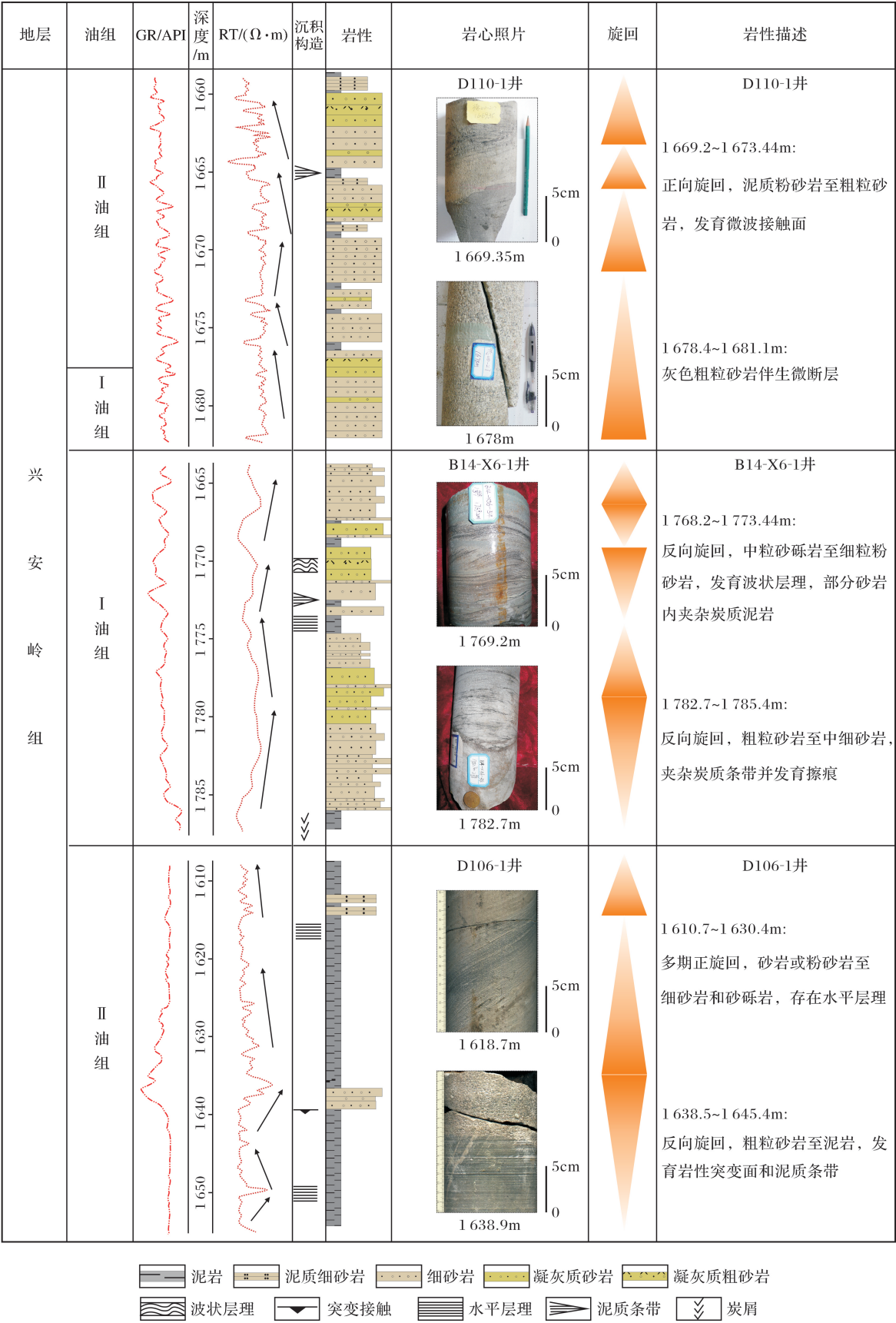


图 5 海拉尔盆地苏德尔特构造带兴安岭组典型井位测井曲线、岩性柱状图以及对应特征岩心照片

Fig.5 The mainly oil group of sand body distribution diagram of Xing'anling Formation, Sudeert structural belt, Hailar Basin

表 1 海拉尔盆地苏德尔特构造带兴安岭组 I、II 油组砂体沉积微相类型及特征

Table 1 The microfacies characteristics and types of I and II oil groups of Xing'anling Formation, Sudeert structural belt, Hailar Basin

亚相	微相类型	水道	岩性	分选	电性	自然伽马/API	电位/mV
扇三角洲前缘亚相	水下分流河道	有水道	中粗砂岩、含砾砂岩或砂砾岩	较好	中高箱状或齿状电阻	低	异常明显
	河道侧缘溢岸砂	有水道	中细—粉砂岩相	较好	中齿状电阻	微低、起伏	微异常
	河道间砂	无水道	粉砂岩、泥岩	中等	微齿状电阻	低平	低平
	席状砂	无水道	粉砂岩、泥质粉砂岩	好	中齿状电阻	低起伏明显	异常较明显
	河口坝	无水道	中粗砂岩、含砾砂岩或砂砾岩	好	漏斗状中高箱状电阻	低	异常明显
前扇三角洲亚相	浊积砂岩	无水道	细粉砂岩	好	中齿状电阻	低起伏明显	异常较明显

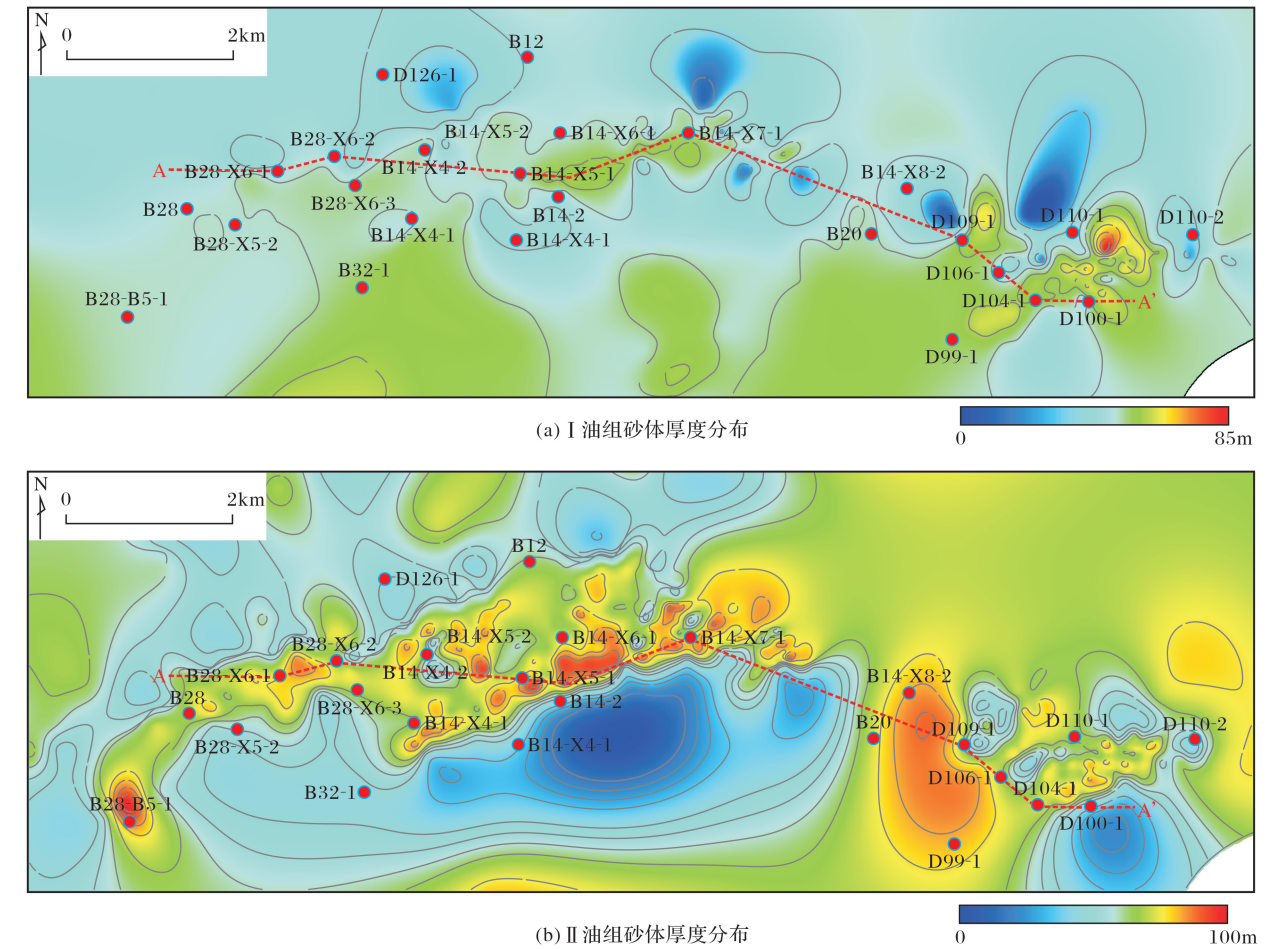


图 6 海拉尔盆地苏德尔特构造带 I、II 油组砂体展布关系

Fig.6 The sand body distribution diagram of I and II oil groups of Sudeerte structural belt, Hailar Basin

次为 B14 井区,再次为 B28 井区。砂岩厚度自南向北逐渐减薄,这说明扇体自南向北发育的特征。

对比 B28 井区、B14 井区和 B16 井区东—西向连井剖面, I、II 油组砂体在垂向和侧向上具有多期、多套砂体叠置沉积的特点,不同井区的砂体在叠置样式和连续程度上明显不同(图 7)。B28 井区垂向上的砂体厚度相对较薄,侧向上砂体相对孤立,连续性差;B14 井区砂体侧向具有一定连续性,且具有

一定叠置关系,但是砂体垂向厚度相对较小;B16 井区砂体侧向大套连片发育,连续性好,垂向上砂体厚度较大,叠置关系明显。

3.2 扇体内砂体沉积关系

基于研究区储层平面砂体展布特点、沉积相特征、联井砂体对比等,在平面上和剖面上对砂体的展布特征进行精细刻画(图 8),结合前人^[27-31]对单砂体接触样式的研究,总结出研究区扇体朵叶沉积接

触关系及样式:

3.2.1 扇体朵叶“孤立型”沉积

“孤立型”沉积样式主要发育在 B28 井区(图 8 中 AA’)。扇体形态上表现为孤立的朵叶,扇体之间无垂向、侧向接触关系[图 8(a)]。单井上表现为分流间湾泥、水下天然堤以及水下分流河道等沉积微相的正粒序组合,连井上表现为被分流间湾泥岩分隔的不连续分布的水下分流河道中细粉砂岩与砂砾岩,井间砂体多成孤立状。

3.2.2 扇体朵叶“接触型”沉积

“接触型”沉积样式主要发育在 B14 井区(图 8 中 BB’)。扇体形态上表现为朵叶侧部的相互叠加,

垂向叠加或侧向堆叠[图 8(a)]。单井上表现为水下分流河道微相的垂向叠置,连井上表现为后期的河道沉积的含砾砂岩直接叠加在前期分流河道沉积的中—细砂岩之上,侧向多期河道砂体切割式接触。

3.3.2 扇体朵叶“叠置型”沉积

“叠置型”沉积样式主要发育在 B16 井区近物源处(图 8 中 CC’)。扇体形态上表现为朵叶相互叠置,后期形成的朵叶不断叠积在早期形成的朵叶之上(图 8)。单井上表现为多期水下分流河道微相的垂向组合,连井上可以看出后期的河道沉积的含砾砂岩直接叠加在前期分流河道沉积的中—细砂岩之上,井间砂体成片连通。

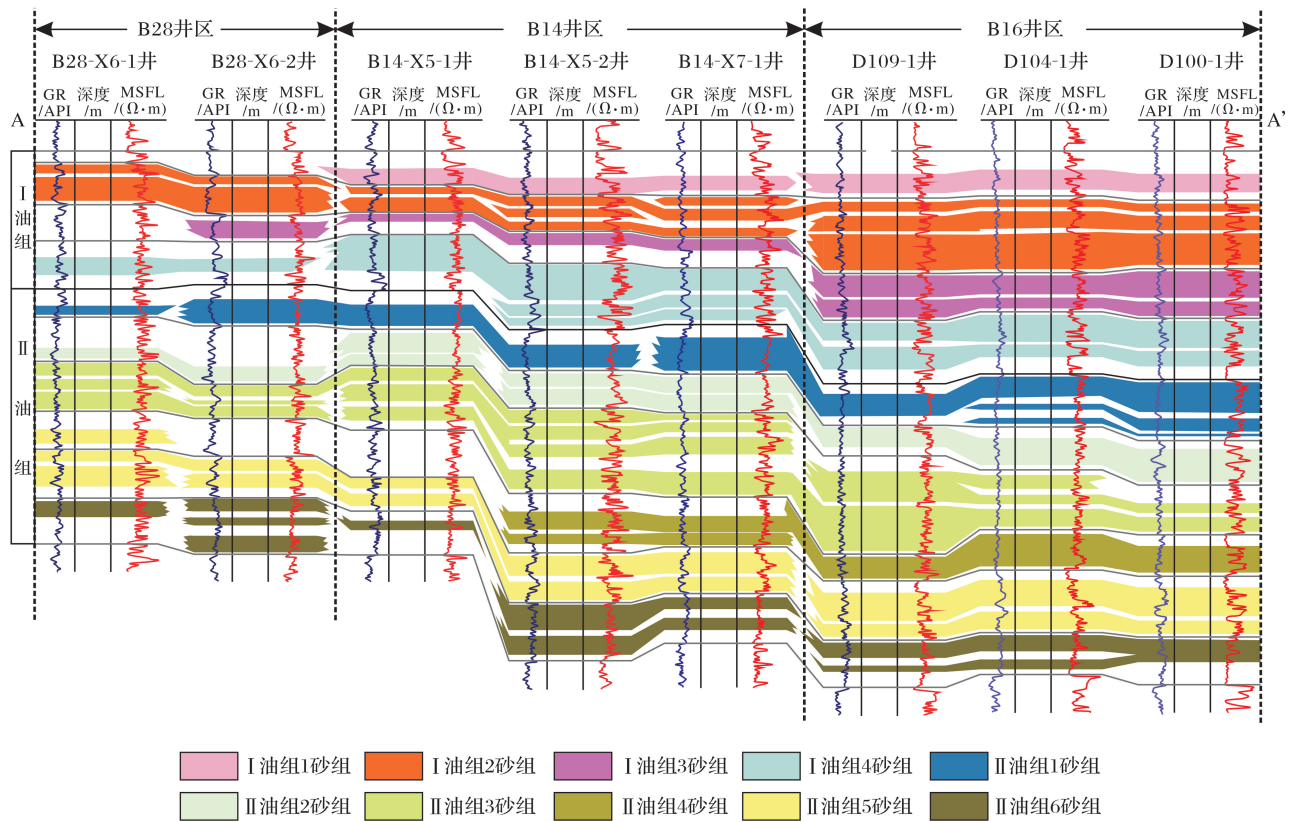


图7 海拉尔盆地苏德尔特构造带 B28 井区、B14 井区和 B16 井区近东—西向连井剖面[剖面位置见图 6(a)]

Fig.7 Well cross-section of B28, B14, B16 well block in Sudeert structure belt, Hailar Basin[marked on Fig.6(a)]

苏德尔特构造带不同井区的扇体平面分布形态和垂向叠置关系受控于可容纳空间(A)与物源补给通量(S)的比值(A/S)变化^[27-30]。从苏德尔特构造带顶面构造三维图可以看出,构造带具有“西宽东窄”的展布特征,通过层位拉平方式,对比 B14 井区和 B16 井区兴安岭组沉积时期的可容纳空间。分别选取过 B14 井区(AA’)和 B16 井区(BB’)的 2 条剖面(相同深度和比例尺),将剖面零油组顶面拉平(图 9)。拉平面视为兴安岭组沉积时期的湖平面,

此时的底面形态可近似认为沉积前的古地貌特征。这种方法虽然无法精确地定量恢复兴安岭组沉积时期苏德尔特构造带的古地貌特征,但是在相同变量条件下,可以定性比较 B14 井区与 B16 井区的可容纳空间大小。从图 9 中可以看出,相比 B14 井区,B16 井区的可容纳空间具有“窄而深”的特点。物源供给量上,通过砂体沉积厚度图可以直观发现(图 6),B16 井区砂体厚度最大,其次为 B14 井区,B28 井区最小,这也从侧面说明了砂体供给量上,自

西向东逐渐减少。

早白垩世兴安岭组沉积时期,盆地处于断陷期^[16,31,32],研究区受到北东向右旋张扭走滑作用^[33,34],南部和东南部地区受到遭受风化剥蚀、淋

滤等作用产生大量碎屑物源,为 B16 井区和 B14 井区提供了充足的物源供给。沉积物在向低洼区迁移的过程中下切侵蚀,后期形成的朵叶不断叠加到早期形成的朵叶上,具体表现为后期河道叠置在早期

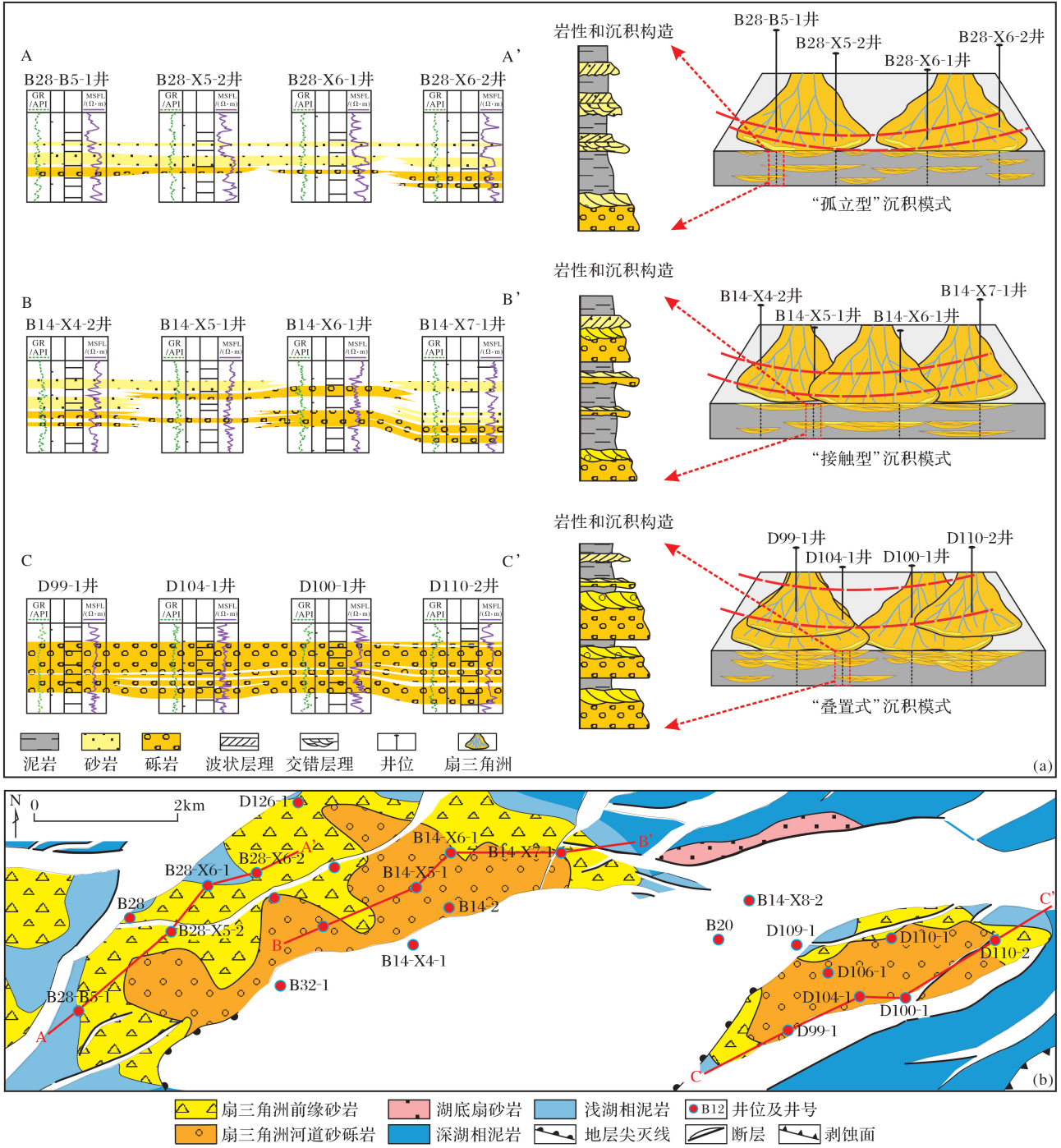


图 8 海拉尔盆地苏德尔特构造带兴安岭组主力油组扇体平面分布、扇体叠置样式及连井砂体垂向分布特点
Fig.8 The borehole correlation profiles showing vertical sand body sedimentary characteristic and three typical sandstone superimposed depositional pattern of Xing'anling Formation,Sudeert structural belt,Hailar Basin

形成的河道上。

早白垩世盆地的构造运动造成地层强烈拉张及

快速沉降^[2,15],研究区湖平面在剧烈构造作用下反复升降,河道不断左右摆动,造成扇体朵叶间相互侵

蚀叠置(图 8)。B14 井区沉积环境相对宽阔,具有足够的可容纳空间形成大片的朵叶,朵叶之间部分搭接($A/S>1$);相比 B14 井区宽阔的沉积环境,B16 井区更加的“窄而深”(图 9),虽然可以提供足够的沉积深度,但平面空间相对狭小,最终导致多期

的朵叶间在平面上相互侵蚀,垂向上相互叠置,内部相互连通($A/S<1$)。多余的沉积物源,在更远处的湖底形成湖底扇沉积。B28 井区虽然具有充足的可容纳空间,但是处于古地貌的低势区,物源供给有限,仅仅形成部分孤立的扇体朵叶($A/S\gg 1$)。

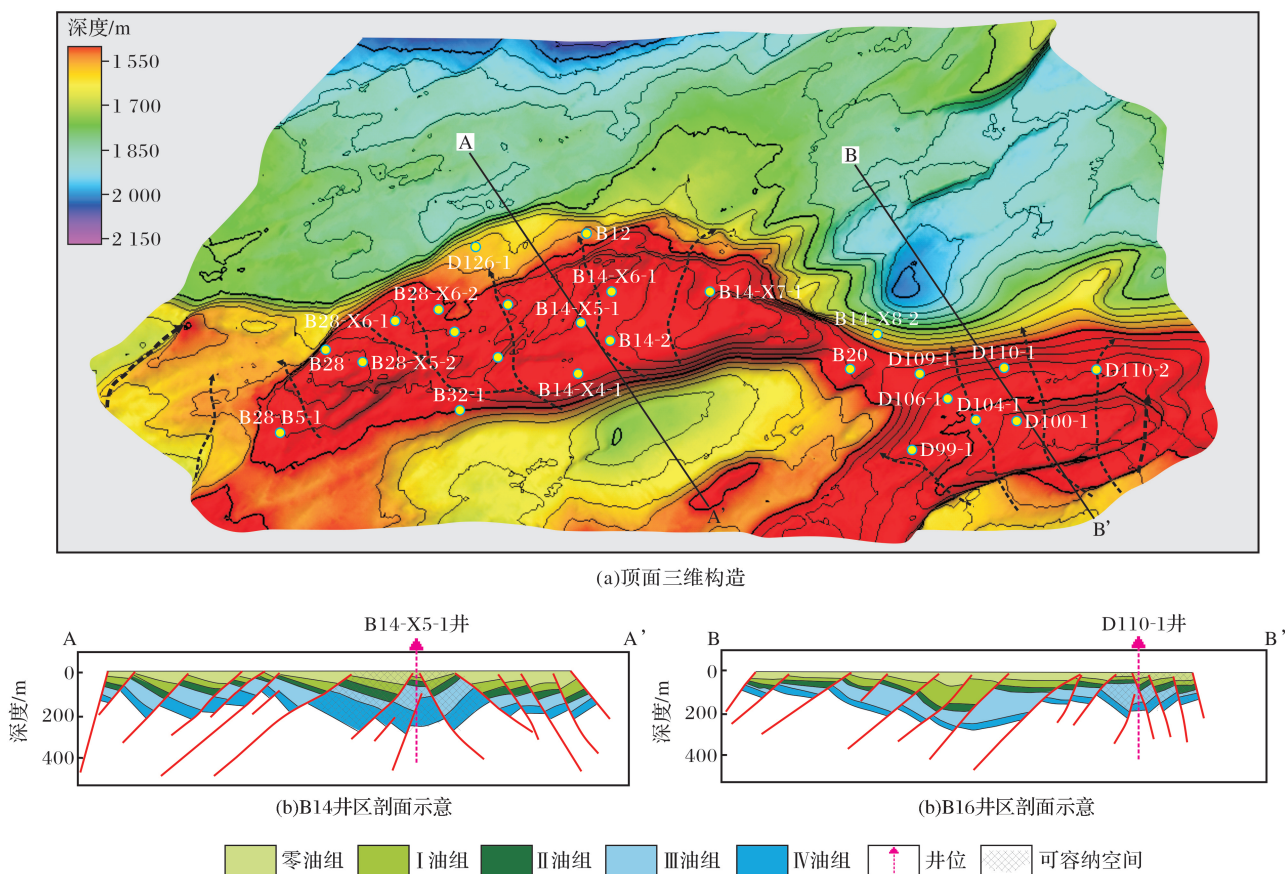


图 9 海拉尔盆地苏德尔特构造带顶面三维构造及 B14 井区和 B16 井区剖面示意

Fig.9 The 3D top structural map and sections of B16 and B14 well blocks of Sudeert structural belt, Hailar Basin

4 扇体“叠置型”沉积的油气地质意义

苏德尔特油田储层非均质性强,物性整体偏差,平均孔隙度为 16.1%,平均渗透率只有 $0.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ [10]。储层物性明显受控于扇体朵叶叠置样式和砂体组合(图 10)。B16 井区平均渗透率为 $89.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 22.85%。B14 井区平均渗透率为 $0.47 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 15.9%,B28 井区平均渗透率为 $1.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 8.6%,这与前面分析的各井区储层砂体叠置规律相吻合(图 10)。

这点在实际勘探上也得到了证实:产量统计上,B16 井区对应的油气产量最高;B28 井区储层发育最差,油气产量最低。B14 井区储层相对发育,油气

产量介于 B28 井区与 B16 井区之间。从贝 14 井区 I、II 油组各个主要小层动用情况可以看出,兴安岭 II 油组小层砂体产采量最高,主要由于扇体朵叶规模大、主水道垂向交切连片,垂向叠置。同时,同一扇体内部朵叶形态决定该区油水的运动规律。注水区受效井多集中在单扇体内部、优势沉积连通方向上。排除井区部分井人工裂缝的影响,主要是由于单朵叶形成过程中的等时性和同源性,导致扇体内部物性差异小,有利于油水的整体运动。

勘探实践表明,对于复杂陆相断陷盆地,油气产能受控于沉积微相、扇体(包括扇三角洲、辫状河三角洲或洪积扇等)叠置关系和砂体组合方式等因素 [5,27,28]。沉积微相控制储层质量,例如水下分流河道、河口坝及席状砂储集物性相对较好,其他相

带物性较差。扇体叠置关系控制砂体分布特征;砂体组合方式则控制储层的孔、渗物性。在储层沉积

过程中,在物源充足的情况下“窄而深”的古地貌环境最有利于扇体的空间叠置,从而形成有利的储层

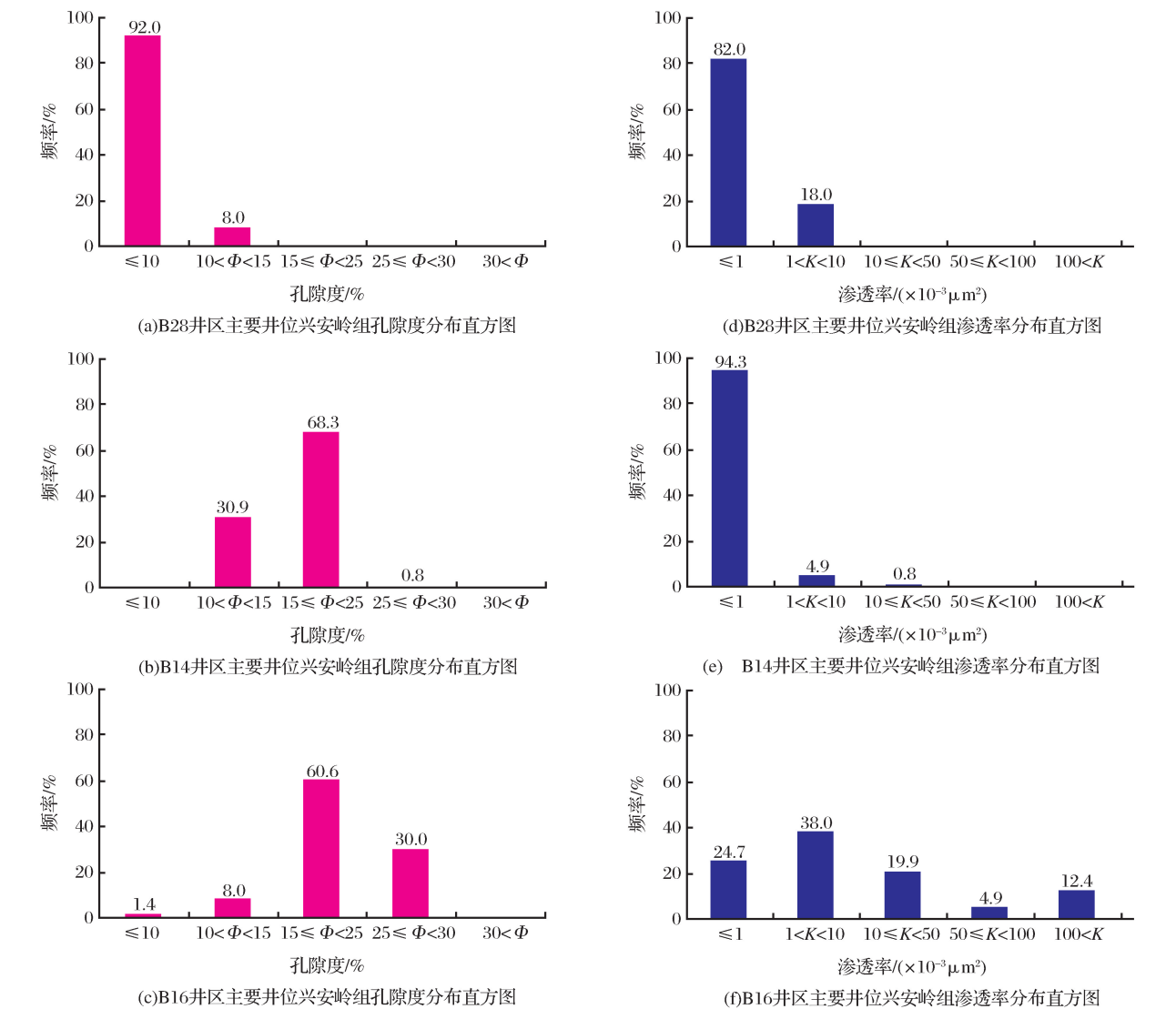


图 10 海拉尔盆地苏德尔特构造带 B28 井区、B14 井区和 B16 井区不同叠置关系对应的储层物性柱状图

Fig.10 The reservoir physical properties from B28,B14 and B16 well blocks show the different reservoir characteristics caused by the sandstone superimposed depositional patterns

发育模式。

5 结论

(1)海拉尔盆地苏德尔特构造带兴安岭组以扇三角洲沉积体系为主要特征,主物源方向来自南部隆起及东南部;发育以扇三角洲水下分流河道为主要代表的沉积微相类型。Ⅰ、Ⅱ油组沉积微相包括水下分流河道、水下天然堤、河口坝、前缘席状砂和浊积砂相。其中水下分流河道和河道侧缘溢岸为主力砂体发育微相。

(2)海拉尔盆地苏德尔特构造带区内存在 3 种

砂体沉积样式,分别为“孤立型”“接触型”和“叠置型”。“孤立型”沉积样式主要发育在物源供给不足,但沉积空间充足的地区,扇体朵叶分散,河道砂体独立;“接触型”沉积样式主要发育在物源供给充足且沉积空间充足的地区,多期朵叶侧向接触,河道砂体侧向相切;“叠置型”沉积样式主要发育在物源供给充足且“窄而深”的沉积环境,多期发育的扇体朵叶垂向叠置,侧向加积,河道砂体侧向相切,上下交错叠置。

(3)3 种叠置关系中,“叠置型”沉积样式主要发育在 B16 井区,最有利于储层发育,对应的油气产

量最高;B28 井区扇体为“孤立型”沉积样式,储层发育最差,油气产量最低。“接触型”沉积样式主要发育在 B14 井区,储层相对发育,油气产量介于 B28 井区与 B16 井区之间。对于复杂陆相断陷盆地,在储层沉积过程中,在物源充足的情况下“窄而深”的古地貌环境最有利于扇体的空间叠置,从而形成有利的储层发育模式。

致谢:两位审稿专家对于论文给予了专业中肯的指导意见,极具建设性,在此深表感谢!同时感谢北京大学地空学院刘仲兰博士、王殿举博士、许丽硕士、张红伟硕士、王辉硕士对于论文研究工作的帮助与支持!

参考文献(References)

- [1] Sun Yonghe, Han Yuping, Feng Zhipeng, *et al.* Fault systems and its control on hydrocarbon migration and accumulation in Beier Sag, Hailar Basin[J]. *Geological Review*, 2011, 57(1): 89-100.
孙永河, 韩钰萍, 冯志鹏, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷断裂系统及其对油气运聚的控制作用[J]. *地质论评*, 2011, 57(1): 89-100.
- [2] Zhou Y, Ji Y, Pigott J D, *et al.* Tectono-stratigraphy of Lower Cretaceous Tanan Sub-Basin, Tamtsag Basin, Mongolia: Sequence architecture, depositional systems and controls on sediment infill[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 49(49): 176-202.
- [3] Fu Xiaofei, Dong Jing, Lv Yanfang, *et al.* Fault structural characteristics of Wuerxun-Beier Depression in the Hailar Basin and their reservoir-controlling mechanism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(6): 877-889.
付晓飞, 董晶, 吕延防, 等. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷断裂构造特征及控藏机理[J]. *地质学报*, 2012, 86(6): 877-889.
- [4] Yuan Jing, Wang Wei, Zhu Jianfeng, *et al.* Research on provenance and sedimentary facies of Yingcheng Formation in Lower Cretaceous in Longfengshan Subsag, Changling fault depression, Songliao Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(1): 93-105.
袁静, 王尉, 朱建峰, 等. 松辽盆地长岭断陷龙凤山次凹下白垩统影城组物源与沉积相研究[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(1): 93-105.
- [5] Li Zhandong, Bao Chuhui, Wang Dianju, *et al.* Controlling effect of structure palaeogeomorphology for sand bodies of Wuerxun-Beier Sag in Hailar Basin[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2016, 47(7): 2357-2365.
李占东, 鲍楚慧, 王殿举, 等. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷构造—古地貌对沉积砂体的控制[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2016, 47(7): 2357-2365.
- [6] Li Zhangdong, Yu Peng, Shao Biying, *et al.* Response analysis of sedimentary filling evolution and tectonic activity in complicated faulted basin an example of middle rift belt in Hailar-Tamtsag Basin[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2015, 44(5): 989-996.
李占东, 于鹏, 邵碧莹, 等. 复杂断陷盆地沉积充填演化与构造活动的响应分析——以海拉尔—塔木察格盆地中部断陷带为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(5): 989-996.
- [7] Wang Jianping, Fan Tailiang, Wang Hongyu, *et al.* Reservoir heterogeneity characteristics in the framework of multi-grade base level cycle of the oil layers of Tongbomiaoyao and Nantun Formations in the Sudeerte Oilfield[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 141-150.
王建平, 樊太亮, 王宏语, 等. 苏德尔特油田铜钵庙组—南屯组油层多级次基准面旋回格架中的储层非均质性特征[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 141-150.
- [8] Chen Jiecheng, Jiang Hongfu, Lei Youzhong, *et al.* Study on miscible CO₂ flooding test in strong water-sensitive reservoirs in Sudert Oilfield[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(6): 694-696.
程杰成, 姜洪福, 雷友忠, 等. 苏德尔特油田强水敏储层 CO₂ 混相驱试验[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(6): 694-696.
- [9] Xu Zhenzhong, Yao Jun, Wang Xibin, *et al.* Sedimentary microfacies and gas oil distribution in I oil formation in Xing'anling Group, Sudeerte Oilfield[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(5): 680-684.
徐振中, 姚军, 王夕宾, 等. 海拉尔盆地苏德尔特油田兴安岭群 I 油层组沉积微相及其含油性[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(5): 680-684.
- [10] Jia Zhenzhen, Lin Chengyan, Ren Lihua, *et al.* Diagenesis and reservoir quality evolution of low permeability tuffaceous sandstones in Suderte Oilfield[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2016, 46(6): 1624-1636.
贾珍臻, 林承焰, 任丽华, 等. 苏德尔特油田低渗透凝灰质砂岩成岩作用及储层质量差异性演化[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2016, 46(6): 1624-1636.
- [11] Allen M B, Macdonald D I M, Xun Z, *et al.* Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohai Basin, northern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 14(7/8): 951-972.
- [12] Chen Congyang, Gao Youfeng, Wu Haibo, *et al.* Zircon U-Pb chronology of volcanic rocks in the Hailar Basin, NE China and its geological implications[J]. *Earth Science*, 2016, 41(8): 1259-1274.
陈崇阳, 高有峰, 吴海波, 等. 海拉尔盆地火山岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球科学*, 2016, 41(8): 1259-1274.
- [13] Ping Guidong, Lv Yanfang, Fan Limin, *et al.* Rules and main controlling factors of hydrocarbon enrichment of Wuerxun-Beier Depression, Hailar Basin[J]. *Journal of Central South*

- University: Science and Technology, 2013, 44(10): 4167-4178.
- 平贵东, 吕延防, 范立民, 等. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷油气富集规律及主控因素分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(10): 4167-4178.
- [14] Liu Zhihong, Wan Chuanbiao, Ren Yanguang, *et al.* Geological features and the rule of oil and gas accumulation of Urxun-Beier Depression in Hailaer Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(4): 527-534.
- 刘志宏, 万传彪, 任延广, 等. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷的地质特征及油气成藏规律[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(4): 527-534.
- [15] Cui Xin, Li Jianghai, Wang Yunzeng, *et al.* Characteristic and control factors of fracture development in the basement of Sudeerte structural belt, Hailaer Basin[J]. Geological Review, 2016, 62(5): 1257-1269.
- 崔鑫, 李江海, 王运增, 等. 海拉尔盆地苏德尔特构造带基底裂缝特征及控制因素[J]. 地质论评, 2016, 62(5): 1257-1269.
- [16] Sun Xiaomeng, Lu Baoliang, Zhang Meisheng, *et al.* Typical structural styles and deformation sequence in outcrop area of Hailaer Basin and its margin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(supplement 1): 1-8.
- 孙晓猛, 鲁宝亮, 张梅生, 等. 海拉尔盆地及盆缘露头区典型构造样式及变形序列[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(增刊 1): 1-8.
- [17] Zhang Junlong, Meng Qian, Qi Jiafu. Multi-stage structural deformation features and hydrocarbon accumulation in faulted basin: A case study in Nanbeier Sag of Hailar-Tamtu Sag Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(4): 368-375.
- 张君龙, 蒙启安, 漆家福. 断陷盆地多期构造变形特征与油气聚集——以海拉尔—塔木察格盆地南贝尔凹陷为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(4): 368-375.
- [18] Nemec W, Steel R J, Gjølberg J, *et al.* Anatomy of collapsed and re-established delta front in Lower Cretaceous of eastern spitsbergen: Gravitational sliding and sedimentation processes[J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(4): 454-476.
- [19] Normark W R, Dickson F H. Sublacustrine fan morphology in Lake Superior[J]. AAPG Bulletin, 1976, 60(7): 1021-1036.
- [20] Zhu Xiaomin. Sedimentary Petrology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [21] Passega R. Grain size representation by CM patterns as a geological tool[J]. Journal of Sedimentary Research, 1964, 34(4): 830-847.
- [22] Passega R, Byramjee R. Grain-size image of clastic deposits[J]. Sedimentology, 1969, 13(3/4): 233-252.
- [23] Tan C, Yu X, Li S, *et al.* Sedimentology and stratigraphic evolution of the fan delta at the Badaowan Formation (Lower Jurassic), southern Junggar Basin, northwest China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(2): 115.
- [24] Moustafa A R, Abdine S A. Tectonic Evolution and Structural Setting of the Suez Rift [C] // Interior Rift Basins. AAPG Memoir 59. Tulsa: AAPG, 1994: 9-54.
- [25] Reading H G, Richards M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(5): 792-822.
- [26] Jia J, Liu Z, Miao C, *et al.* Depositional model and evolution for a deep-water sublacustrine fan system from the syn-rift Lower Cretaceous Nantun Formation of the Tanan Depression (Tamtsag Basin, Mongolia) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 57(2): 264-282.
- [27] Tian Jingchun, Zhang Xingliang, Wang Feng, *et al.* Quantitative characterization of superimposition relationship and distribution of reservoir sandbodies in the Upper Palaeozoic of Gaoqiao region, the Ordos Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(6): 737-742.
- 田景春, 张兴良, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界储集砂体叠置关系及分布定量刻画[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 737-742.
- [28] Feng Congjun, Bao Zhidong, Dai Chunming, *et al.* Superimposition patterns of underwater distributary channel sands in deltaic front and its control in remaining oil distribution: A case study from K₁q₄ in J19 block, Fuyu Oilfield [J]. Oil and Gas Geology, 2015, 36(1): 128-135.
- 封从军, 鲍志东, 代春明, 等. 三角洲前缘水下分流河道单砂体叠置机理及对剩余油的控制——以扶余油田 J19 区块泉头组四段为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 128-135.
- [29] Ren Shuangpo, Yao Guangqing, Mao Wenjing. Genetic types and superimposition patterns of subaqueous distributary channel thin sandbodies in delta front: A case study from the IV-VI reservoir of H3 in Biqian 10 area of Gucheng Oilfield [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(3): 582-593.
- 任双坡, 姚光庆, 毛文静. 三角洲前缘水下分流河道薄层单砂体成因类型及其叠置模式——以古城油田泌浅 10 区核三段 IV—VI 油组为例[J]. 沉积学报, 2016, 34(3): 582-593.
- [30] Yin Yanshu, Liu Yuan. Analysis of the reservoir architecture of thick sandbody and its control on remaining oil in middle nearshore subaqueous fan-taking the 4th layer, 3rd member, Hetaoyuan Formation, eocene, in Zhaowu Oilfield, Miyang Sag, Nanxiang Basin as an example [J]. Geological Review, 2017, 63(3): 703-718.
- 尹艳树, 刘元. 近岸水下扇扇中厚砂体储层构型及对剩余油控制——以南襄盆地泌阳凹陷古近系核桃园组三段四砂组 2 小层为例[J]. 地质论评, 2017, 63(3): 703-718.
- [31] Corella J P, Loizeau J L, Kremer K, *et al.* The role of mass-transport deposits and turbidites in shaping modern lacustrine deepwater channels [J]. Marine and petroleum geology, 2016, 77: 515-525.
- [32] Meng Qian, Wan Chuanbiao, Zhu Defeng, *et al.* Age assignment and geological significance of the “Budate Group” in the

Hailar Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 5(5): 779-788.

蒙启安, 万传彪, 朱德丰, 等. 海拉尔盆地“布达特群”的时代归属及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 5(5): 779-788.

- [33] Cui Xin, Li Jianghai, Jiang Hongfu, *et al.* Hydrocarbon accumulation in rifted basin tectonic units: A case study of Huoduomoer tectonic zone in the Hailaer Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2016, 38(1): 40-47.

崔鑫, 李江海, 姜洪福, 等. 断陷盆地内构造带对油气聚集的控制作用——以海拉尔盆地霍多莫尔构造带为例[J]. 石油实验地质, 2016, 38(1): 40-47.

- [34] Shan Jingfu, Ji Youliang, Jin Lihong, *et al.* Sedimentary facies characteristic of Nantun Formation in Tarnan-Southbell Depression[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(1): 241-250.

单敬福, 纪友亮, 金利红, 等. 塔南—南贝尔凹陷沉南屯组沉积相特征[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(1): 241-250.

The “superimposed sedimentary type” of sandstone in fan delta in faulted-basin and its petroleum geologic significance: A case study of oil groups Ⅰ and Ⅱ in Xing'anling Formation of the Sudeerte structural belt, Hailar Basin

Cui Xin^{1,2}, Li Jiang-hai², Jiang Hong-fu³, Wang Yun-zeng³, Qi Lin-hai³, Yang Shao-ying³

(1. National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Image Analysis Technique,

Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC, Beijing 100029, China;

2. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China;

3. CNPC Hailar Exploration and Development Administration, Daqing Oilfield Company, Daqing 163453, China)

Abstract: Based on well rock electrical characteristics analysis, particle size analysis, phase typical sign recognition, combined with previous studies, the Cretaceous Xing'anling Formation oil groups Ⅰ and Ⅱ in the Sudeerte structure belt were determined as fan delta front sedimentary environment. The main reservoir sands development includes underwater distributary channel microfacies, underwater natural levee, mouth bar, front sheet sand and turbidite sands phase. The underwater distributary channel microfacies are the developmental facies of the main reservoir sand body. Three major depositional patterns of fan lobes can be identified within this depositional system: (a) isolated lobes, (b) contact lobes and (c) superimposed lobes. The isolated lobes mainly developed in the B28 block, which was caused by the scarcity of sand and slowly increasing accommodation space. The contact lobes mainly developed in the B14 well block, which was caused by sufficient sediment supply and steadily increasing accommodation space across a wide area. The superimposed lobes mainly developed in the B16 block, which was caused by a sufficient sediment input, and steadily increasing accommodation space within a restricted area. In the whole study area, the superimposed lobe pattern is the most favorable depositional pattern forming the highest-quality reservoirs, because of the high degree of sand body connectivity.

Key words: Superimposed sedimentary; Fan delta; Petroleum geologic significance; Sudeerte structural belt; Hailar Basin