

文章编号:1000-0550(2017)02-0358-13

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.02.013

吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层沉积相分析

张亚奇^{1,2}, 马世忠¹, 高阳², 李映艳², 张景², 王黎², 孙雨¹, 许方哲¹, 李杭¹

1. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318

2. 新疆油田公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000

摘要 利用岩芯、薄片、录井和测井等资料,在识别各级次基面旋回界面类型及特征的基础上,将准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组划分为1个长期旋回,6个中期旋回,44个短期旋回,建立高分辨率层序地层对比格架。在总结地球化学、岩性、沉积构造、电性特征的基础上,综合分析古生物化石、测井等资料,以识别沉积相标志为主,进行单井、连井及平面沉积相分析。研究结果认为,吉木萨尔凹陷芦草沟组为咸化湖泊—三角洲沉积体系,岩性复杂多变,在机械、化学、生物等沉积作用共同影响下,形成由细粒碎屑岩、泥岩、碳酸盐岩构成的混积岩层。芦草沟组发育上、下两个致密油甜点体,上甜点体(SSC37—SSC42)为咸化湖相沉积,微相类型以滩坝为主;下甜点体(SSC6—SSC17)以三角洲前缘沉积为主,微相类型为席状砂、远砂坝等。利用开发试验区及水平井部署区的井多、井密的有利条件,对沉积相边界进行控制,从而实现平面微相的精细刻画,研究表明芦草沟组优质甜点以滩坝主体微相为主,主要集中发育在凹陷中心低隆起处。

关键词 准噶尔盆地;吉木萨尔凹陷;芦草沟组;咸化湖;沉积相;致密油

第一作者简介 张亚奇,男,1990年出生,硕士,石油地质学与储层沉积学,E-mail:zhangyaqi_sy@163.com

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

致密油已成为北美页岩气之后又一战略性突破领域,美国巴肯致密油的发现更是引起了全世界的关注。我国致密油资源丰富,资源量超过106亿吨,广泛分布于四川盆地中—下侏罗系、准噶尔盆地二叠系芦草沟组、鄂尔多斯三叠系延长组、松辽盆地白垩系青山口组—泉头组等地层中,渤海湾、塔里木、柴达木等盆地也有不同程度的致密油资源^[1]。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组是该盆地致密油勘探开发的重点区域,自2010年开展吉木萨尔凹陷二叠系致密油勘探以来,多口井获得工业油流^[2],开采潜力巨大。吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层空间展布及非均质性复杂,对于这一含油新层系,如何精细刻画其展布特征及分析其演化规律对该区致密油勘探开发具有建设性的意义。前人对吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积环境和沉积相的研究存在争议,有学者认为吉木萨尔凹陷芦草沟组属于深湖—浅湖相沉积^[3-4];一些学者认为属于深湖—半深湖相及滨浅湖相沉积^[5-6];还有学者认为是一残留海封闭后的咸化湖盆,

普遍具有石膏晶体和古鲕鱼鳞化石等咸化沉积标志^[7-9]。虽然存在争议,但基本认为吉木萨尔凹陷及其邻区二叠系芦草沟组为盐度较高、还原环境下的湖相沉积。随着对吉木萨尔凹陷芦草沟组研究的不断深入,有学者认为芦草沟组主要为湖相及三角洲相沉积^[10],但其对吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积相展布特征及演化规律研究不全面,特别是沉积相展布特征仅停留在亚相阶段,对开展各小层沉积微相平面分布的研究较匮乏。吉木萨尔凹陷芦草沟组属于咸化湖泊—三角洲相沉积,笔者通过对A区重点钻井岩芯沉积构造特征的观察描述,结合A区水平井多、密的特点,充分利用水平井揭示的储层横向连续变化的优势,对致密油储层平面微相展布特征进行精细描述,以期对致密油储层的研究和勘探提供一定的帮助。

1 地质概况

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部的东南缘,东临奇台凸起,南以三台断裂为界限,西临老庄湾和西地断裂,北抵吉木萨尔断裂,是一个东高西低的箕状凹陷^[11-12](图1)。凹陷自下而上发育石炭系、二叠

收稿日期:2016-03-18;收修改稿日期:2016-05-27

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA064903);国家自然科学基金(41272153);国家科技重大专项(2011ZX05006-005)、黑龙江省普通高等学校青年学术骨干支持计划项目(1254G003)[Foundation: National High Technology Research and Development(863 Program), No.2013AA064903; National Natural Science Foundation of China, No.41272153; National Science and Technology Major Project, No.2011ZX05006-005; The High School Youth Academic Backbone Support program of Heilongjiang Province, No.1254G003]

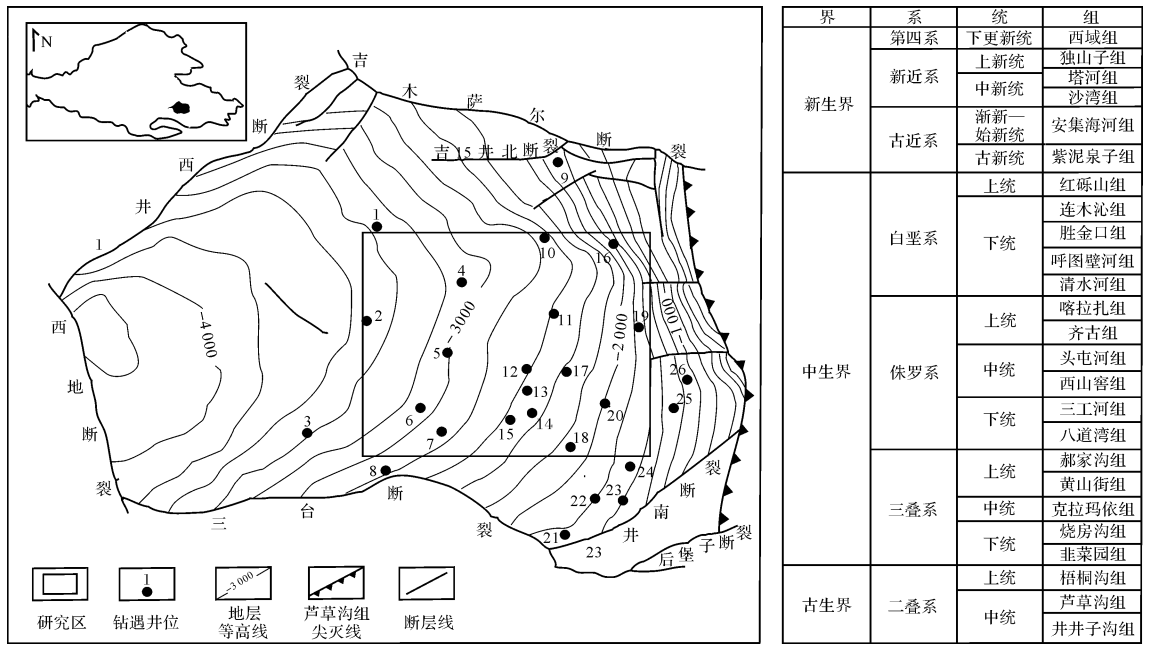


图1 吉木萨尔凹陷构造位置(左图)及地层柱状略图(右图)
Fig.1 Jimhsar sag, tectonic location(left) and stratigraphic column(right)

系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系及第四系地层^[13-14], 芦草沟组属于二叠系地层, 是准噶尔盆地东部重要的含油层系之一。芦草沟组自下而上可分为芦草沟组一段(P_2l_1)和芦草沟组二段(P_2l_2), P_2l_1 又分为一层组($P_2l_1^1$, 30~120 m)和二层组($P_2l_1^2$, 30~50 m), 在 $P_2l_1^1$ 内上半部发育一套致密储层, 即“下甜点”平均厚度 34.8 m, 以三角洲外前缘—前三角洲过渡亚相沉积为主; P_2l_2 也分为两个层组, 即一层组($P_2l_2^1$, 10~30 m)、二层组($P_2l_2^2$, 50~130 m), 在 $P_2l_2^2$ 内上半部发育一套致密储层, 称为“上甜点”平均厚度 24.8 m, 以咸化湖相碳酸盐岩类沉积为主。

2 芦草沟组高分辨率层序地层特征

2.1 各级次基准面旋回界面类型及特征

通过对吉木萨尔凹陷 A 区芦草沟组的岩芯、薄片、录井等资料分析, 确定该区基准面旋回界面可分为 2 种类型。

2.1.1 基准面下降至上升转换面

(1) 区域不整合面: 梧桐沟组与下伏地层芦草沟组岩性差异明显、界线清楚, 为不整合接触关系^[15], 界面之下以灰黑色深湖—半深湖相泥岩为主, 因地壳抬升, 遭到风化剥蚀, 形成区域不整合面, 之后在不整合面之上沉积了粒度较粗的湖底扇相砂砾岩。测井上, 声波时差(AC)曲线表现为整低到整高的突变面,

密度(DEN)曲线则与之相反; 电阻率曲线 RT、RXO 在整体低值背景下 RT-RXO 幅差由大变为接近于 0 的突变面, 区域不整合面可作为长期基准面旋回的界面(表 1e)。

(2) 岩性突变面: 不同岩石类型突变面反映了可容纳空间和沉积物供给关系的突变, 是一种沉积过程的突然中断, 可作为中、短期基准面旋回的下降至上升转换面, 吉木萨尔凹陷 A 区芦草沟组常见的几类岩性突变面有以下几种。

①灰质泥岩、泥岩构成的岩性突变面: 此类旋回界面之下为灰质泥岩, 该界面之上为泥岩沉积; 基准面下降期, 代表着有机质在相对深水环境下的沉积结束, 随着水深逐渐变浅, 陆源碎屑物质供给量减少, 以沉积灰质泥岩为主^[16], 之后基准面上升, 可容纳空间增大, 物源供给减小, 以泥岩沉积为主。此类基准面旋回主要分布在深湖——半深湖环境(表 1a)。

②白云岩、油页岩、泥岩构成的岩性突变面: 此类旋回界面之下为白云岩夹层增多的韵律层段, 该界面之上为泥岩、油页岩沉积; 基准面下降期, 藻类、菌类等微生物在光合作用下消耗 CO_2 和 HCO_3^- , 释放 O_2 , 破坏水体中 CO_2 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 PO_4^{3-} 等离子平衡系统, 使得 pH 值升高, 形成了褐色——灰黑色的具有水平层理、季节性纹层状泥晶白云岩、泥质白云岩、纹层白云岩等碳酸盐岩沉积^[17], 之后基准面上升,

水体的突然变深,导致生物大量死亡,有机质沉积的速率相对升高,形成了油页岩、泥岩沉积层段。此类基准面旋回界面主要发育在半深湖—浅湖环境(表1b)。

③泥岩与白云质粉砂岩、砂质云岩等这类过渡岩构成的岩性突变面:此类旋回界面之下为过渡岩,该界面之上为泥岩沉积;基准面下降期,酸盐岩生产和堆积的速率升高,外加陆源碎屑物质的供给,形成了此类过渡岩沉积;之后基准面上升,湖水突然加深导致碳酸盐岩停止生长,沉积物以泥岩为主。此类基准面旋回界面主要发育在浅湖滩坝环境(表1c,d)。

2.1.2 基准面上升至下降转换面

(1) 各级次湖泛面:基准面上升至最大位置时,可容纳空间最大,陆源碎屑物质供给少,沉积了一套稳定的黑灰色泥岩,测井上表现为一段整体高时差、

低密度、低电阻、高伽马的特征。

(2) 退积—进积作用转换面:界面之下由多个向上变深的不对称型短期旋回组成,界面之上由多个下降半旋回为主的不完全对称型或以向上变浅的不对称型短期旋回组成;其代表基准面上升向基准面下降的转换,为可容纳空间最大时期;该界面可作为中或短期基准面的界面。

2.2 各级次基准面旋回划分

通过对吉木萨尔凹陷A区芦苇沟组的岩芯、薄片、录井等资料分析,总结出该区各级次基准面旋回界面类型及特征,在此基础上将研究区芦苇沟油层划分为1个长期旋回(LSC1),6个中期旋回(自下为上为MSC1—MSC6),44个短期旋回(自下而上为SSC1—SSC44)(图2)。

表1 芦苇沟组各级次基准面旋回界面类型及特征

Table 1 Feature and types of sequence boundary surface of Lucaogou Formation

级次	测井特征				深度/m	岩性柱	短期	岩芯特征	薄片特征
	GR/(API)	RT/(Ω ·m)	AC/(μ s/ft)	DEN/(g/cm ³)					
a	50—130	0—500	60—120	2.1—2.7	3210—3215		短期	岩性突变面 (井13, 6-12-5)	灰质粉砂质泥岩 (井13, 3 213.5 m) ×100倍
b	50—130	0—500	60—120	2.1—2.7	3105—3110		短期	岩性突变面 (井13, 8-45-27)	泥晶云岩 (井13, 3 110.2 m) ×100倍
c	50—130	0—500	60—120	2.1—2.7	3135—3140		短期	岩性突变面 (井13, 6-61-57)	含粉砂质微晶云岩 (井13, 3 138.75 m) ×100倍
d	50—130	0—500	60—120	2.1—2.7	3310—3315		短期	岩性突变面 (井13, 11-44-6)	白云质粉砂岩 (井13, 3 310.18 m) ×100倍
e	50—130	0—500	60—120	2.1—2.7	3105—3110		短期	区域不整合面 (井13, 1-23-16)	砂质砾岩 (井13, 3 103.79 m) ×100倍

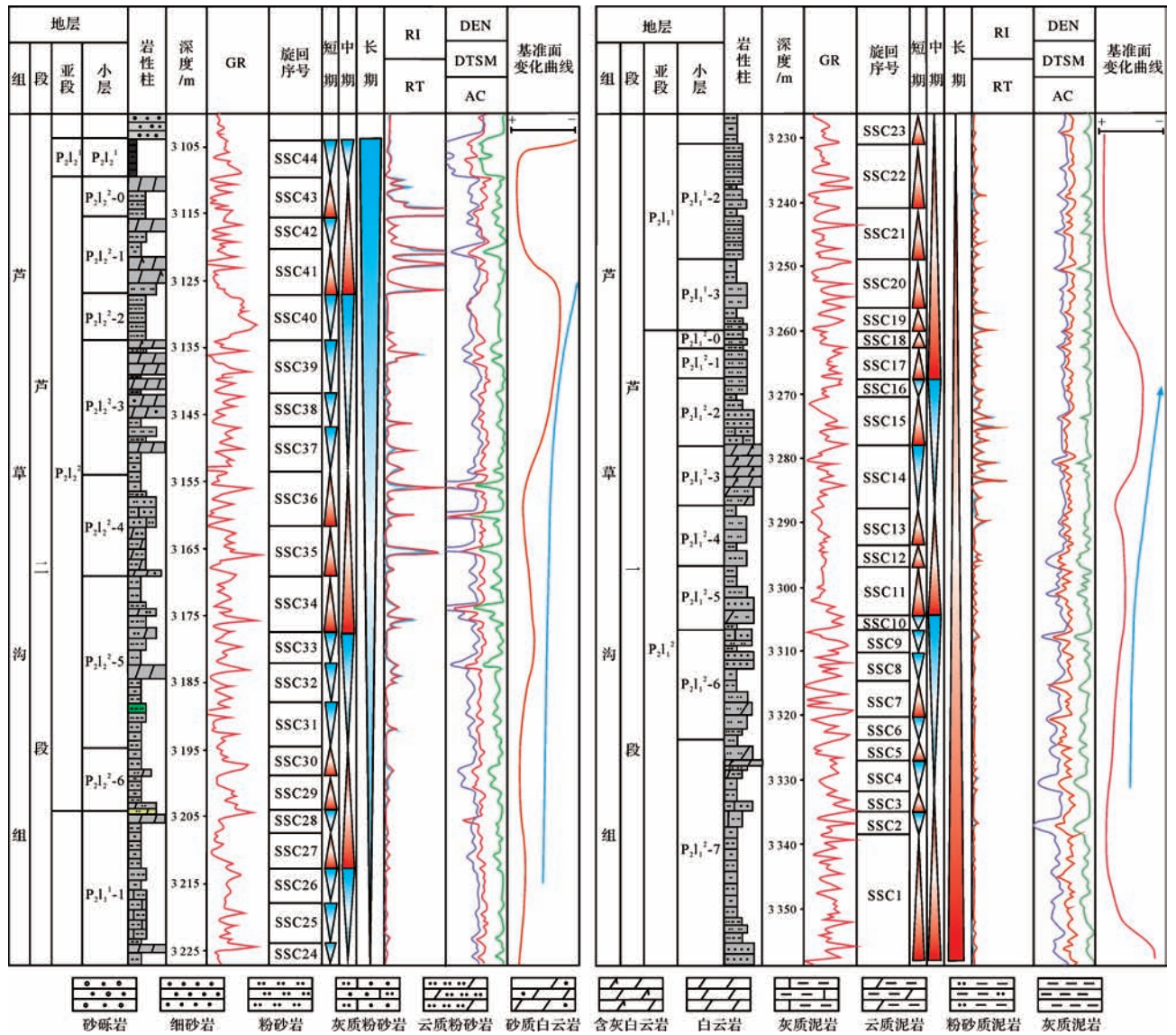


图2 芦草沟组高分辨率层序地层划分图

Fig.2 Lucaogou Formation of high-resolution sequence stratigraphic division

2.3 各级次基准面旋回层序对比

在各级次基准面旋回划分的基础上,依据 Cross^[18] 提出的高分辨率层序地层对比原则,应用“逐级标准等时面控制下的逼近层序界面闭合对比”方法^[19],建立了吉木萨尔凹陷芦草沟组高分辨率层序地层对比格架,在其控制之下,结合各级次旋回层序控制和地震、测井、岩芯、录井资料综合对比等手段,完成了全区各井间 44 个短期基准面层序精细对比(图 3)。

3 芦草沟组沉积特征分析

3.1 地球化学特征

利用地球化学标志可作为识别该区沉积相和沉

积环境的重要依据,如 Sr/Ba 可用来确定古盐度,一般淡水沉积物的 Sr/Ba 比值通常小于 1,而海相沉积物则大于 1^[20-22];Th/U 比值能够反映沉积时期的氧化—还原条件^[23]。通过对吉木萨尔凹陷 A 区芦草沟组井 13 微量元素分析(表 2),Sr/Ba 比值变化范围为 0.24~6.26,平均值为 1.43,Th/U 比值变化范围为 0.21~4.76,平均值为 1.61,据此推测该区是还原环境下的咸化湖相沉积。

3.2 岩性特征

吉木萨尔凹陷芦草沟组岩性复杂,矿物成分多样,依据 292 块全岩样品分析发现,矿物成分以斜长石和石英为主,白云石、方解石含量次之(图 4)。有

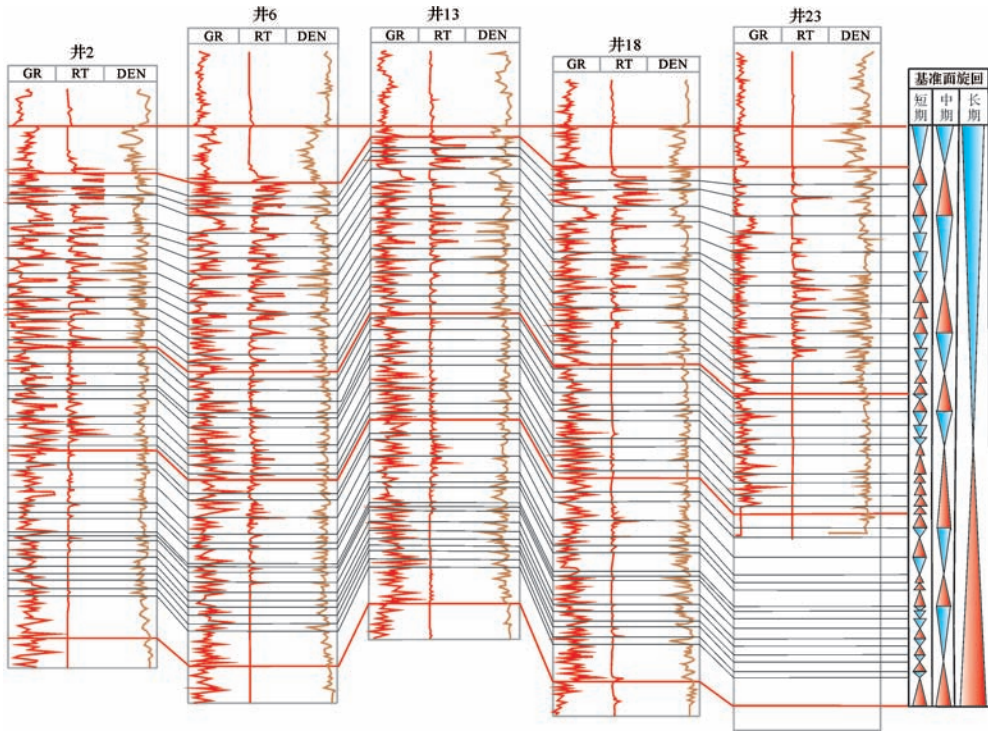


图 3 芦草沟组高分辨率层序地层格架

Fig.3 High resolution sequence stratigraphy of Lucaogou group

表 2 13 井芦草沟组微量元素分析

Table 1 Analysis of trace elements in Lucaogou Formation in Well J13

指标数值	Sr/Ba	B/Ga	V/Ni	V/(V+Ni)	V/Cr	Th/U
变化范围	0.24~6.26	1.53~18.79	1.02~22.81	0.5~0.96	1.08~4.33	0.21~4.76
平均值	1.43	7.75	3.66	0.75	2.36	1.61

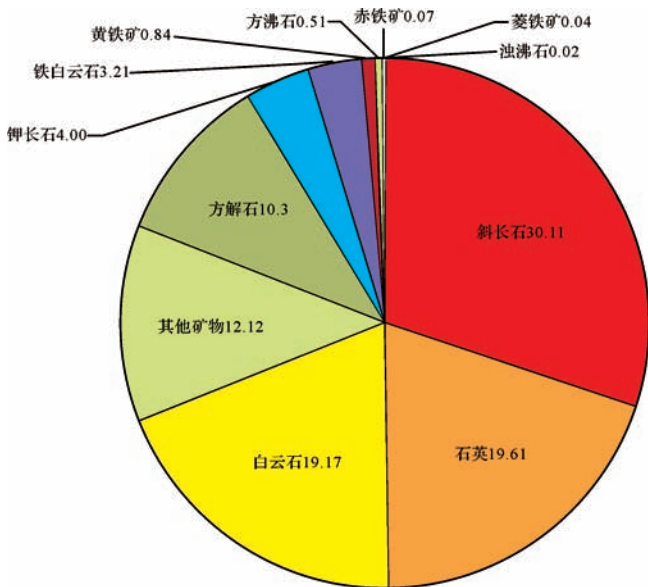


图 4 各类矿物所占百分含量图

Fig.4 The percentage of different minerals


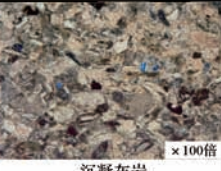

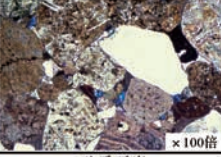

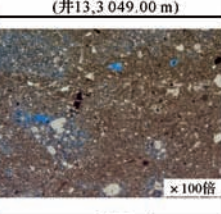

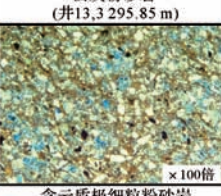

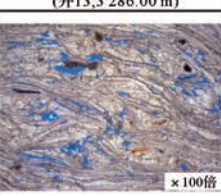
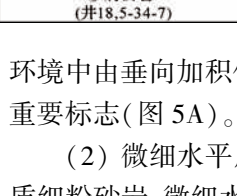
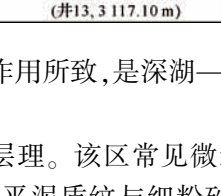
学者认为芦草沟组以灰黑色泥岩、碳酸盐岩和细碎屑岩三大类岩性为主^[24]。通过岩芯观察、薄片鉴定、全岩分析等资料相互印证,将 A 区芦草沟组岩性细分为 3 个大类,5 个亚类,32 个小类(表 3)。芦草沟组 SSC1—SSC28(P_2l_1)和 SSC29—SSC44(P_2l_2)岩性存在差异, P_2l_1 井段为 3 204~3 358 m,厚 154 m。其内上部以深灰色泥岩、灰色灰质泥岩、白云质泥岩为主夹薄层灰色灰质粉砂岩、白云质灰岩,中部以深灰色泥岩、灰色灰质泥岩、灰色灰质粉砂岩不等厚互层;下部为深灰色泥岩、灰色灰质泥岩夹薄层灰色灰质粉砂岩。 P_2l_2 井段为 3 104~3 204 m,厚 100 m。岩性以灰色、深灰色泥岩、灰质泥岩、白云质泥岩为主,夹灰色灰质粉砂岩、白云质灰岩、泥灰岩。

3.3 沉积构造特征

通过对吉木萨尔凹陷芦草沟组多口钻井岩芯观察,发现了丰富的原生沉积构造,包括水平层理、透镜

表 3 吉木萨尔凹陷芦草沟组岩性分类表

Table 3 Lithology classification table of Lucaogou Formation in Jimsar sag

岩类		岩石相类型	岩芯	薄片		
火山碎屑岩类	火山碎屑岩	沉凝灰岩				
		云质沉凝灰岩				
碎屑岩类	碎屑岩	细砂岩				
		粉砂岩				
		细粉砂岩			泥质极细粉砂岩 (井18,5-34-31)	沉凝灰岩 (井13,3 373.76 m)
		泥质细粉砂岩				
		细粉砂质泥岩				
		泥岩				
		云屑细砂岩				
	云/灰质碎屑岩	云质粉砂岩				
		含云粉砂岩				
		云质细粒砂岩				
		含云细粉砂岩				
		含云泥质细粉砂岩				
		含云细粉砂质泥岩				
		云质泥岩			砂屑云岩 (井18,4-33-22)	云质粉砂岩 (井13,3 295.85 m)
		含云泥岩				
		灰质粉砂岩				
		含灰粉砂岩				
		含灰泥质细粉砂岩				
		含灰泥岩				
		碳酸盐岩类			砂/泥质碳酸盐岩	粉砂质云岩
含细粉砂云岩						
泥质云岩						
含泥云岩						
粉砂质灰岩	砂屑云岩 (井18,3-22-8-10)		亮晶生屑灰岩 (井13,3 165.32 m)			
碳酸盐岩	粉晶云岩					
	微晶云岩					
	泥晶云岩					
	泥云岩					
	粉晶灰岩				砂屑云岩 (井18,5-34-7)	泥晶云岩 (井13,3 117.10 m)

状层理、小型交错层理、波状层理,同时还发育具有咸化湖环境特征的鱼类、双壳类、介形类等生物化石。这些沉积构造标志在判断芦草沟组沉积相时起到了非常重要的作用。

(1) 水平层理。准噶尔 A 区芦草沟组发育黑灰、深灰色水平层理泥岩,颜色较深的黑灰、深灰色代表着较强的还原环境,厚层或大套的水平层理泥岩是在比较稳定的水动力条件下,细粒泥质沉积物在静水

环境中由垂向加积作用所致,是深湖—半深湖沉积的重要标志(图 5A)。

(2) 微细水平层理。该区常见微细水平层理泥质细粉砂岩,微细水平泥质纹与细粉砂纹交互,亦是半深湖—浅湖过渡相沉积的重要标志(图 5F)。

(3) 微细水平波状、透镜状、小型交错层理。常见于 P₂l₁无定向无定形细粉砂岩中,亦是浅湖沉积的重要标志(图 5I)。

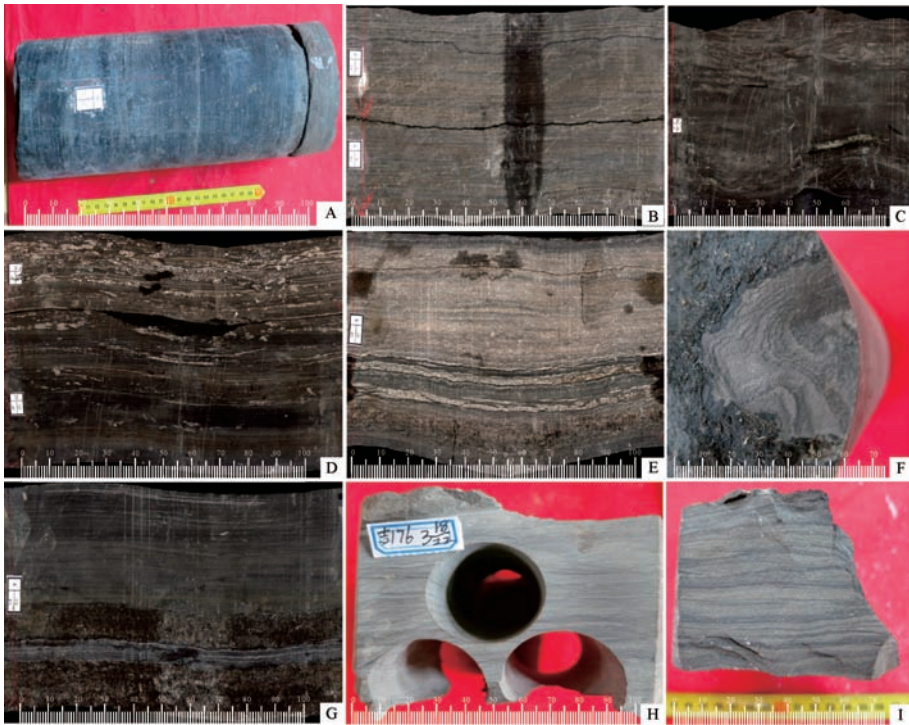


图5 芦草沟组沉积构造特征图

A.井 18,3 033.11 m,水平层理黑灰色泥岩;B.井 13,3 126.8 m,水平层理,微波状层理粉砂岩;C.井 13,3 321.72 m,绿灰色泥质粉砂岩夹深灰色含粉砂泥岩,下部局部含灰质,生物扰动强烈致层理欠清晰。下部见长条状(1 cm×8 cm)黄铁矿,见微细裂缝;D.井 13,3 322.35 m,深灰色含灰粉砂质泥岩夹白色斑点状灰质砂岩,向上夹层增多增厚,水平层理、波状层理,见顺层裂缝,下部见黄铁矿团块,顶面呈镜面状;E.井 13,3 150.24 m,浅灰色生物灰岩夹深灰色泥质灰岩,夹比 6:1,波痕层理,纹层状层理,断面见大量不完整化石碎片,主要为小型贝壳;F.井 18,3 148.51 m,微细水平层理泥质细粉砂岩;G.井 13,3 149.64 m,上部深灰色灰质泥岩与含泥生物灰岩不等厚互层,向上灰岩增多;下部见灰质泥岩夹灰色灰岩条带,内含大量小型贝壳化石;H.井 18,3 027.92 m,微细水平波状层理,泥质极细粉砂岩;I.井 18,3 037.4 m,微细水平波状、透镜状、小型交错层理细粉砂岩。

Fig.5 The sedimentary and tectonic characteristics of Lucaogou Formation

(4) 生物扰动构造。本区生物扰动构造有潜穴、逃逸构造、爬行迹等类型,在本区浅湖粉细砂岩沉积中较为常见(图 5C)。

(5) 波状交错层理及平行层理。亦是 A 区芦草沟组席状砂或远砂坝沉积的重要标志。

4 芦草沟组沉积相划分及特征

在总结 A 区芦草沟组地球化学、岩性、沉积构造、电性特征的基础上,综合分析古生物化石、测井等资料,以识别沉积相标志为主,参考本区沉积背景,认为吉木萨尔凹陷芦草沟组为咸化湖泊—三角洲沉积体系,进一步分为 2 类相、5 个亚相、10 种微相(表 4)。

4.1 咸化湖泊沉积

吉木萨尔凹陷 A 区芦草沟组沉积时期,构造运动活跃,湖盆由拉张作用下陷,此时对应湖盆扩张阶段^[25],以半深湖—浅湖亚相和浅湖亚相沉积为主,分

表 4 吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积相类型

Table 4 Sedimentary facies types of Lucaogou Formation in Jimsar depression

相	亚相	微相
咸化湖泊	浅湖	滩坝主体(碎屑岩型、过渡岩型、碳酸盐型)
		滩坝夹湖泥(碎屑岩型、过渡岩型、碳酸盐型)
	半深湖—浅湖	浅湖泥
		滩坝主体(碎屑岩型、过渡岩型、碳酸盐型)
三角洲	半深湖—浅湖	滩坝夹湖泥(碎屑岩、过渡岩、碳酸盐)
		半深湖—浅湖泥
	半深湖	半深湖泥
	三角洲前缘	席状砂
前三角洲	前三角洲	远砂坝
		前三角洲泥

布广泛。

浅湖亚相位于枯水期湖平面之下,浪基面以上的浅水地带。吉木萨尔凹陷 A 区芦草沟组浅湖亚相比较为发育,在“上、下甜点”内部和“上甜点”下部均有发

育,但厚度略有差异,在上甜点内部发育较好。芦草沟组浅湖亚相沉积以(含泥)灰质粉砂岩、云质粉砂岩、(含泥)粉砂质云岩为主,少量白云质粉砂岩夹粉砂质泥岩;常见微细水平波状、透镜状、小型交错层理、波状砂纹层理等典型沉积构造,生物扰动作用强烈,可见虫孔、爬行迹等。

半深湖—浅湖亚相位于浪基面之下相对浅水地带。芦草沟组半深湖—浅湖亚相沉积尤为发育,在“上、下甜点”内部及“上、下甜点”之间均有发育,其厚度变化较大。岩性以灰色泥晶云岩、灰质云岩、白云质泥岩、粉砂质泥岩为主,少量砂屑云岩。该区半深湖—浅湖亚相有微细水平层理、微细水平泥质纹与细粉砂纹交互等典型沉积构造。

半深湖亚相位于浪基面之下相对深水地带。芦草沟组半深湖相沉积主要集中发育在“上、下甜点体”之间,岩性以深灰、灰黑色泥岩、白云质泥岩为主,岩性横向上稳定,垂向上较单一,但沉积厚度较大。半深湖与深湖亚相通常难以区分,A区芦草沟组半深湖泥岩颜色的暗度及岩性的纯度(可见少量粉砂岩)要次于后者。该区半深湖亚相常发育水平层理及细波状层理,可见浮游生物化石及自生矿物黄铁矿。

4.2 三角洲相沉积

在二叠系晚期,吉木萨尔凹陷芦草沟组局部发育三角洲相沉积,以三角洲外前缘—前三角洲过渡亚相沉积为主,分布在吉木萨尔凹陷的东北、东南端,以凹陷东南端为主。

三角洲外前缘为三角洲前缘亚相中邻近前三角洲泥质沉积的部分。A区由于远离物源区,分流河道不发育,湖浪改造力逐渐增强,三角洲外前缘以厚层泥岩与薄层粉砂岩、泥质粉砂岩互层的沉积体为主。

三角洲外前缘—前三角洲过渡亚相为三角洲前缘亚相末端水下沉积环境,以发育席状砂和远砂坝微相为主,水下分流河道不发育。岩性以粉砂岩及细砂为主,少量云质粉砂岩、砂屑云岩及粉砂质泥岩;常见波状交错层理及平行层理。该区可见上部为块状构造灰绿色细砂岩,下部为水平层理及波状交错层理的灰色泥质粉砂岩层段,为席状砂或远砂坝沉积。

5 芦草沟组沉积相展布及演化

通过对吉木萨尔凹陷A区芦草沟组多口井进行岩芯观察,在沉积相标志研究的基础上,结合野外露头剖面等资料,对A区18口井的岩电关系及单井相进行研究,最终绘制了该区芦草沟组沉积相图,以下

便对上、下甜点内部各小层沉积微相的展布及演化特征做详细的阐述。

5.1 水平井控制下的沉积微相展布特征分析

通过分层差值与水平井轨迹校正控制下的单元级构造三维地质建模,模拟了水平井在各小层内的钻遇轨迹,通过模拟可基本确定水平井是否都钻遇了目的层段,研究发现A区共有8口水平井钻遇了SSC40小层,有多口井出现“局部钻遇”的情况,通过水平井三维地质模拟,确定水平井钻遇部位的平面展布位置,再重点分析水平井综合柱状图中泥岩及砂岩的不同测井响应特征来确定该钻遇段的沉积相类型(图6),利用多口水平井连井相分析,实现对沉积微相边界的控制,从而起到局部校正的作用。研究初期,井11、井12及井17在该小层的沉积微相类型一致,由于三口井井距较大,最长距离可达3.8 km,致使该沉积微相边界难以确定(图7A),通过对SPJ20、SPJ18两口水平井研究,SPJ20末端及SPJ18大部分钻遇部位均以岩屑长石粉细砂岩、泥质粉砂岩滩坝主体沉积为主,表明其范围可延伸至井11,由此在直井和水平井共同约束下,实现了小层内部沉积微相平面展布的精细描述(图7B)。

5.2 上“甜点”内小层沉积相展布及演化

上“甜点”(SSC37—SSC42)沉积时期,主要发育浅湖相沉积,微相类型以浅湖滩坝为主,浅湖滩坝的形成与波浪对其早期沉积物的改造和二次分配的影响有关,物源充足则利于碎屑岩滩坝的发育,物源匮乏则常形成碳酸盐岩滩坝^[26]。由于物源供给的匮乏,SSC37—SSC42以碳酸盐岩及过渡岩类滩坝沉积为主。其往往与湖岸线平行或斜交呈短窄的条带状、片状零散分布,在凹陷中心水下低隆起及构造坡折带也有分布。从SSC37—SSC42内各小层沉积相演化特征来看:自下而上,反映一次局部水退→水进的过程。水退期,基准面下降,SSC37、SSC38及SSC39沉积时由于物源相对匮乏,过渡岩及碳酸盐岩滩坝较为发育,零散分布于凹陷中心低隆起部位;SSC40沉积时期,物源供给量达到最大,物源的富集对碎屑岩滩坝的形成起到重要的作用,主要呈片状分布于凹陷构造坡折带及水下低隆起区域,厚度大,沉积范围广。之后水进期,基准面上升,水体不断变深,湖盆面积逐渐变大,物源供给逐渐匮乏,滩坝样式以过渡型及碳酸盐岩型为主,沉积范围变小,主要集中在凹陷的中心低隆起处。目前,上甜点体内优质储层以滩坝主体为主(图8)。

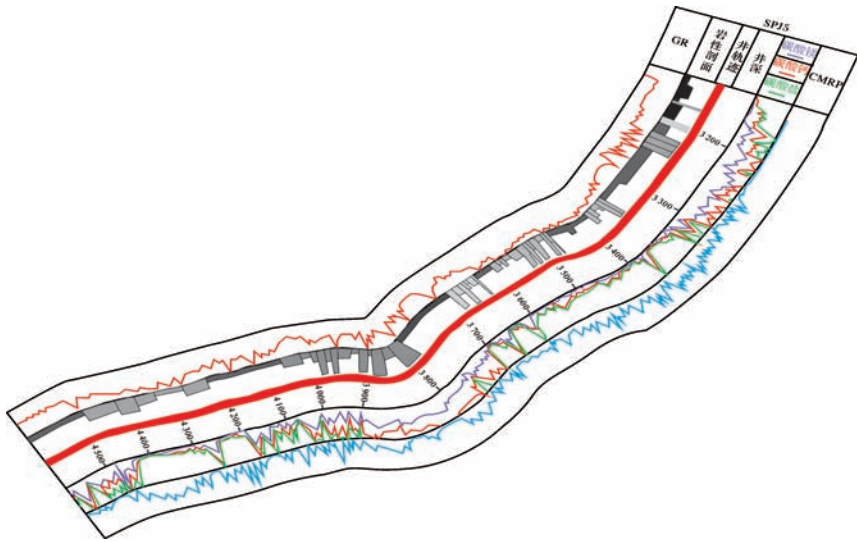


图 6 SPJ5 井综合柱状图

Fig.6 SPJ5 well integrated histogram

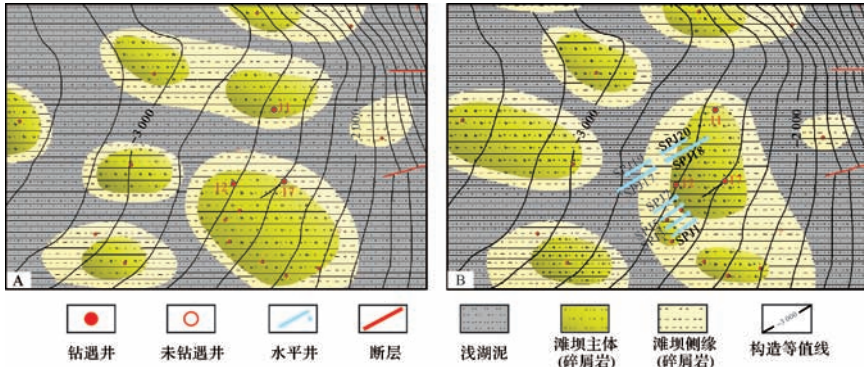


图 7 利用水平井局部校正 SSC40 沉积相图

Fig.7 Local correction SSC40 sedimentary facies by horizontal wells

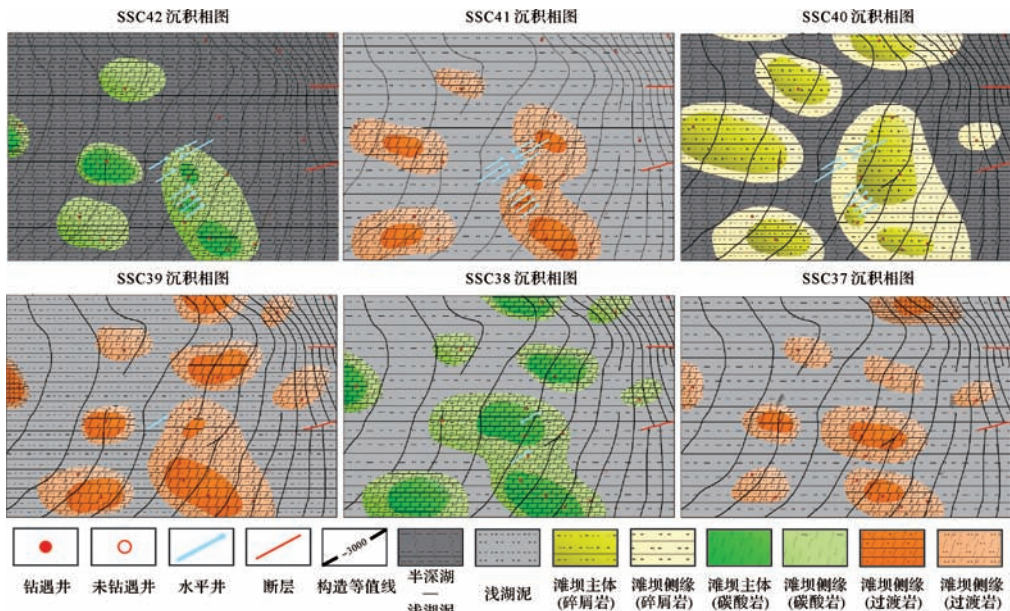


图 8 上甜点体各小层沉积微相图

Fig.8 The micro phase diagram of each layer in the upper part of the sweet spot

5.3 下“甜点”内各小层沉积相展布及演化

下“甜点”(SSC6—SSC17)沉积时期的岩相古地理与上“甜点”(SSC37—SSC42)沉积时期的格局相似,但盆地内湖水面积较小,受来自博格达山南部物源的影响,在凹陷南部发育三角洲外前缘—前三角洲过渡亚相沉积,在凹陷东北部紧邻吉木萨尔断裂也有小范围的分布。物源供给相对充足,SSC6—SSC17沉积物中砂岩(粉砂级、细砂级)含量增加,碳酸盐岩含量相对减少,在三角洲外前缘—前三角洲过渡亚相沉积区域发育席状砂和远砂坝微相,在浅湖地带发育砂质滩坝沉积。从SSC6—SSC17内各小层沉积相演化特征来看,自下而上:整体反映一次水退→水进→水

退的过程。初次水退期,基准面下降,水体逐渐变浅,湖水面积减小,发育三角洲外前缘—前三角洲过渡亚相沉积,沉积微相由碎屑岩滩坝向席状砂沉积过渡,受后期湖水波浪的改造,席状砂与湖岸线呈平行或斜交呈零散片状分布;水进期,水体突然变深,湖水面积增大,此时的物源供给相对充足,碎屑岩滩坝较为发育,主要分布于凹陷低隆起区域;最后又经历一次水退期,基准面下降,湖水面积变小,三角洲外前缘相较为发育,随着物源供给的相对减少,发育在凹陷水下低隆起及构造坡折带的远砂坝沉积规模逐渐变小。目前,下甜点体内优质储层以滩坝主体、席状砂微相为主(图9)。

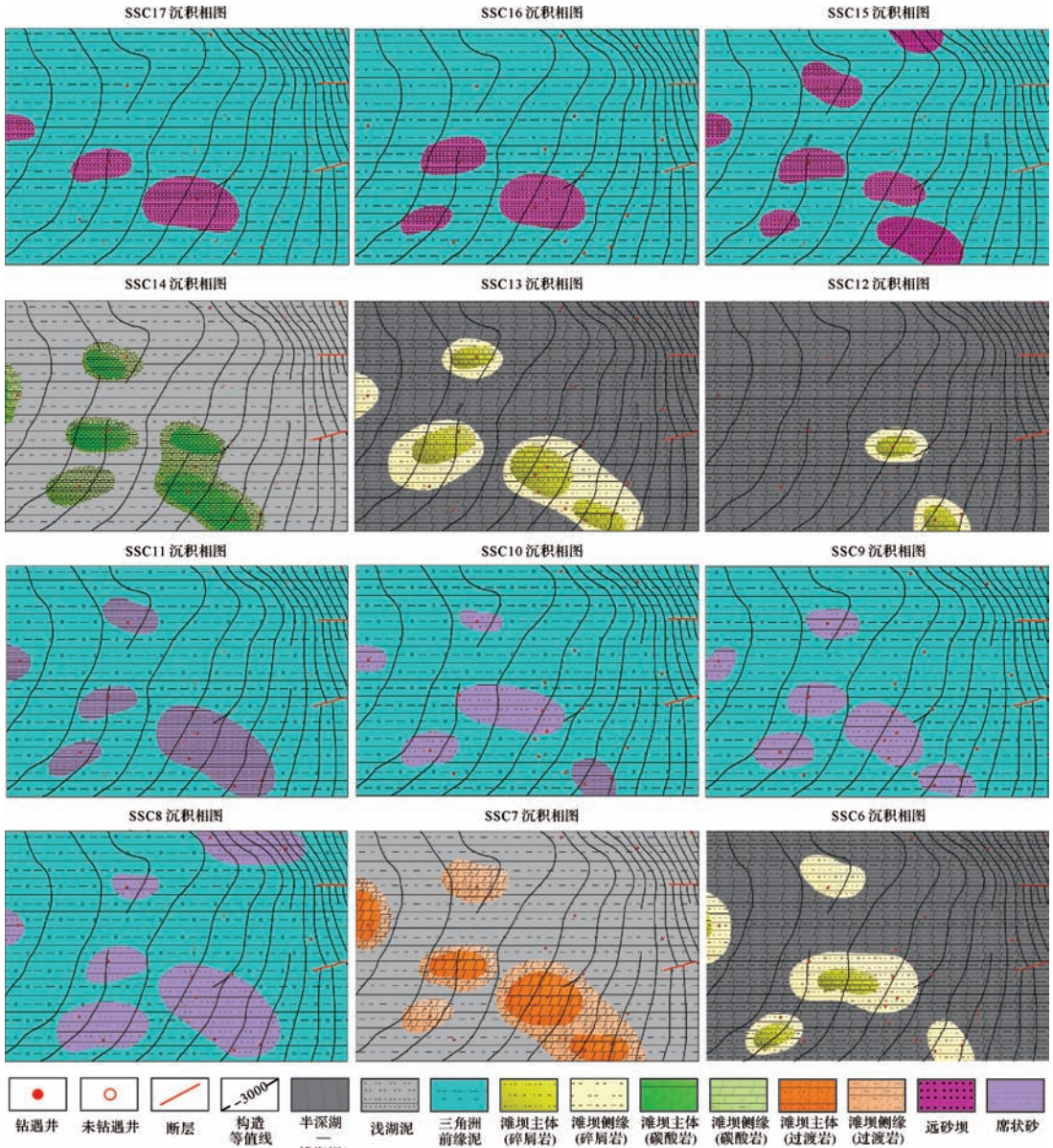


图9 下甜点体各小层沉积微相图

Fig.9 The micro phase diagram of each layer in the lower part of the sweet spot

6 芦苇沟组沉积相模式分析

在上述各小层沉积微相平面展布特征研究的基础上,参考本区构造特征及构造格局,建立了吉木萨尔凹陷A区芦苇沟组上甜点(SSC37—SSC42)和下甜点(SSC6—SSC17)沉积模式图(图10,11)。吉木萨尔凹陷芦苇沟组沉积时期受周围凹凸格局和强烈断裂活动的影响,盆地的沉积格局也发生着变化。芦苇沟组沉积期,物源主要来自北部和南部两个方向,受南部三台凸起升降运动及北部断褶带的影响,物源供给受到阻碍,水系相对不发育,三角洲外前缘—前三角洲过渡亚相的席状砂及凹陷湖盆中的滩坝沉积构成了本区主要的沉积微相类型,其岩性相对较粗、物性好,成为了有力的富油储集体。下甜点沉积期(SSC6—SSC17),三角洲沉积主要集中在凹陷南部及北部区域,浅湖相沉积在盆地也较为发育,在浅湖地带可形成具席状展布的砂质浅滩或局部砂质堆积加厚的滩坝沉积(图10)。上甜点沉积期(SSC37—SSC42),A区主要发育浅湖和半深湖—浅湖沉积,三角洲沉积仅邻物源区。此时湖盆扩张范围较大,浅湖沉积较为发育,占据凹陷大部分区域,半深湖—浅湖沉积的一套具有生烃潜力的页岩主要集中在凹陷的中东部,是重要的勘探相带(图11)。

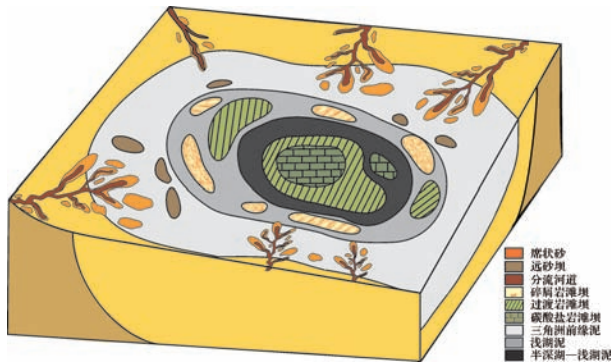


图10 吉木萨尔凹陷芦苇沟组下甜点沉积模式图

Fig.10 Depositional model of the lower part of the sweet spot in Lucaogou Formation of Jimusar sag

7 结论

(1) 芦苇沟组分上、下两段,依据不同级次基准面升降运动所导致的地层旋回性的变化和沉积学响应特征,将芦苇沟组划分为1个长期基准面旋回、6个中期基准面旋回合44个短期基准面旋回。

(2) 吉木萨尔凹陷A区芦苇沟组岩性包括火山碎屑岩、碎屑岩、碳酸盐岩3大类、5个亚类、32个小

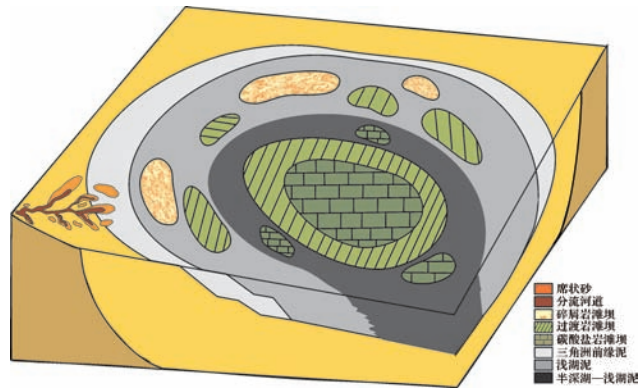


图11 吉木萨尔凹陷芦苇沟组上甜点沉积模式图

Fig.11 Depositional model of the upper part of the sweet spot in Lucaogou Formation of Jimusar sag

类;矿物成分多样,以斜长石和石英为主,白云石、方解石含量次之,整体粒度细、差异小。

(3) 芦苇沟组上、下甜点岩性存在差异,但岩性与电性吻合性较好。沉积微相类型多样,上甜点体(SSC37—SSC42)以碳酸盐岩类沉积为主,沉积微相有滩坝主体,依据岩性可分为以碳酸盐岩为主的滩坝主体、以过渡岩性为主的过渡岩滩坝主体、以碎屑岩为主的碎屑岩滩坝主体,及其依次相对应泥质含量较高的滩坝侧缘沉积、浅湖泥、半深湖—浅湖泥,滩坝主体是上甜点体最主要的沉积微相类型。下甜点体(SSC6—SSC17)沉积物中砂岩含量增加,碳酸盐岩含量相对减少,沉积微相有远砂坝、滩坝主体、滩坝侧缘等,席状砂为下甜点体最主要的沉积微相类型。

致谢 在论文撰写过程中感谢马世忠教授与孙雨教授的亲切指导,他们在后期修改中提出了建设性的意见,在此一并感谢,同时感谢新疆油田公司勘探开发研究院非常规组在项目研究过程中给予的支持和帮助。

参考文献 (References)

- [1] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报,2012,33(3):343-350. [Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.]
- [2] 匡立春,胡文瑄,王绪龙,等. 吉木萨尔凹陷芦苇沟组致密油储层初步研究:岩性与孔隙特征分析[J]. 高校地质学报,2013,19(3):529-535. [Kuang Lichun, Hu Wenxuan, Wang Xulong, et al. Research of the tight oil reservoir in the Lucaogou Formation in Jimusar sag: analysis of lithology and porosity characteristics[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(3): 529-535.]

- [3] 彭雪峰,汪立今,姜丽萍. 准噶尔盆地东南缘二叠系芦草沟组沉积环境分析[J]. 新疆大学学报:自然科学版,2011,28(4):395-400. [Peng Xuefeng, Wang Lijin, Jiang Liping. Analysis of sedimentary environment of the Permian Lucaogou Formation in southeastern margin of the Junggar Basin[J]. Journal of Xinjiang University: Natural Science Edition, 2011, 28(4): 395-400.]
- [4] 张健,刘楼军,黄芸,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷中—上二叠统沉积相特征[J]. 新疆地质,2003,21(4):412-414. [Zhang Jian, Liu Loujun, Huang Yun, et al. Sedimentary characteristics of Middle-Upper Permian in Jimusaer sag of Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(4): 412-414.]
- [5] 高智梁,康永尚,刘人和,等. 准噶尔盆地南缘芦草沟组油页岩地质特征及主控因素[J]. 新疆地质,2011,29(2):189-193. [Gao Zhiliang, Kang Yongshang, Liu Renhe, et al. Geological features and developmental controlling factors of Lucaogou oil shale in the southern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(2): 189-193.]
- [6] 王成云,匡立春,高岗,等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组泥质岩类生烃潜力差异性分析[J]. 沉积学报,2014,32(2):385-390. [Wang Chengyun, Kuang Lichun, Gao Gang, et al. Difference in hydrocarbon generation potential of the shaly source rocks in Jimusaer sag, Permian Lucaogou Formation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(2): 385-390.]
- [7] 张义杰,齐雪峰,程显胜,等. 准噶尔盆地晚石炭世和二叠纪沉积环境[J]. 新疆石油地质,2007,28(6):673-675. [Zhang Yijie, Qi Xuefeng, Cheng Xiansheng, et al. Approach to sedimentary environment of Late Carboniferous-Permian in Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(6): 673-675.]
- [8] 匡立春,唐勇,雷德文,等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,2012,39(6):657-667. [Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 657-667.]
- [9] 万敏,常秋生. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层成岩序列及孔隙演化[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2015,45(增刊1):866. [Wan Min, Chang Qiusheng. Analysis of diagenetic sequence and porosity evolution of the tight oil reservoir in the Lucaogou Formation in Jimusaer sag[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(Suppl.1): 866.]
- [10] 斯春松,陈能贵,余朝丰,等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层沉积特征[J]. 石油实验地质,2013,35(5):528-533. [Si Chunsong, Chen Nenggui, Yu Chaofeng, et al. Sedimentary characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(5): 528-533.]
- [11] 吴承美,郭智能,唐伏平,等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油初期开采特征[J]. 新疆石油地质,2014,35(5):570-573. [Wu Chengmei, Guo Zhineng, Tang Fuping, et al. Early exploitation characteristics of Lucaogou tight oil of Permian in Jimusaer sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(5): 570-573.]
- [12] 方世虎,宋岩,徐怀民,等. 构造演化与含油气系统的形成——以准噶尔盆地东部吉木萨尔凹陷为例[J]. 石油实验地质,2007,29(2):149-153,161. [Fang Shihu, Song Yan, Xu Huamin, et al. Relationship between tectonic evolution and petroleum system formation—Taking the Jimsar sag of eastern Junggar Basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(2): 149-153, 161.]
- [13] 杨和山,陈洪,卞保利. 吉木萨尔凹陷构造演化与油气成藏[J]. 内蒙古石油化工,2012(15):138-140. [Yang Heshan, Chen Hong, Bian Baoli. Structure modeling and geometry analysis in the western Fukang fault zone[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012(15): 138-140.]
- [14] 陈春勇,谭强,张金凤,等. 吉木萨尔凹陷二叠系梧桐沟组一段沉积演化规律[J]. 新疆石油地质,2015,36(2):169-173,213. [Chen Chunyong, Tan Qiang, Zhang Jinfeng, et al. Sedimentary evolution of the Member 1 of Permian Wutonggou Formation in Jimusaer sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(2): 169-173, 213.]
- [15] 朱键. 吉木萨尔凹陷东部二叠系梧桐沟组沉积相研究[D]. 荆州:长江大学,2013. [Zhu Jian. Research of sedimentary facies of the Permian Wutonggou Formation of Jimsar sag in eastern Junggar Basin[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2013.]
- [16] 董清水,崔宝琛,李想,等. 陆相层序地层划分及岩芯、测井高分辨率层序地层界面判识[J]. 石油实验地质,1997,19(2):121-126. [Dong Qingshui, Cui Baochen, Li Xiang, et al. A division of continental sequence stratigraphy and the identification of its interface with high resolution core analyses and well-logging[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1997, 19(2): 121-126.]
- [17] 孙钰,钟建华,袁向春,等. 惠民凹陷沙一段湖相碳酸盐岩层序地层分析[J]. 石油学报,2008,29(2):213-218. [Sun Yu, Zhong Jianhua, Yuan Xiangchun, et al. Analysis on sequence stratigraphy of lacustrine carbonate in the first member of Shahejie Formation in Huimin sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 213-218.]
- [18] Cross T A. High-resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation[C]//Proceedings of Northwestern European Sequence Stratigraphy Congress. 1994: 105-123.
- [19] 马世忠. 松辽盆地河流—三角洲体系高分辨率层序地层学、储层构形及非均质模型研究[D]. 北京:中国科学院大学,2003:99-109. [Ma Shizhong. Studies of high-resolution sequence stratigraphy, reservoir architecture and heterogeneity model in fluvial-delta system, Songliao Basin[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2003: 99-109.]
- [20] 同济大学海洋地质系. 海、陆相地层辨认标志[M]. 北京:科学出版社,1980. [Department of Marine Geology, Tongji University. Marine Facies Identification Marks[M]. Beijing: Science Press, 1980.]
- [21] 南京大学地质学系. 地球化学[M]. 北京:科学出版社,1979:361-363. [Department of Geology, Nanjing University. Geochemis-

- try[M]. Beijing: Science Press, 1979: 361-363.]
- [22] 孙立广, 谢周清, 赵俊琳. 南极阿德雷岛湖泊沉积物 Sr/Ba 与 B/Ga 比值特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(4): 43-46. [Sun Liguang, Xie Zhouqing, Zhao Junlin. The characteristics of Sr/Ba and B/Ga ratios in lake sediments on the Ardley Peninsula, Maritime Antarctic[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(4): 43-46.]
- [23] 王学军, 王志欣, 刘显阳, 等. 利用铀的测井响应恢复鄂尔多斯盆地古水深[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 46-48. [Wang Xuejun, Wang Zhixin, Liu Xianyang, et al. Restoring palaeo-depth of the Ordos Basin by using uranium from GR logging[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(7): 46-48.]
- [24] 匡立春, 孙中春, 欧阳敏, 等. 吉木萨尔凹陷芦苇沟组复杂岩性致密油储层测井岩性识别[J]. 测井技术, 2013, 37(6): 638-642. [Kuang Lichun, Sun Zhongchun, Ouyang Min, et al. Complication lithology logging identification of the Lucaogou tight oil reservoir in Jimusaer depression[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(6): 638-642.]
- [25] 时丕同. 吉木萨尔凹陷油藏地球化学研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2003. [Shi Peitong. Study on geochemical reservoirs in Jimsar sag[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2003.]
- [26] 姜在兴, 王俊辉, 张元福. 滩坝沉积研究进展综述[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 427-440. [Jiang Zaixing, Wang Junhui, Zhang Yuanfu. Advances in beach-bar research: a review[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 427-440.]

Depositional Facies Analysis on Tight Reservoir of Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin

ZHANG YaQi^{1,2}, MA ShiZhong¹, GAO Yang², LI YingYan², ZHANG Jing², WANG Li², SUN Yu¹, XU FangZhe¹, LI Hang¹

1. College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China

2. Xinjiang Oilfield Company Exploration and Development Institute, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: Using cores, thin section, log and well log data, based on the identification of every base types and characteristics of the cycle interface, the Permian Lucaogou Formation strata in Jimsar sag are divided into 1 long-term cycles, 6 medium-term cycles and 44 short-term cycles, the high resolution sequence stratigraphy correlation framework is established. On the basis of summarizing the geochemistry, lithology, sedimentary structure and electrical characteristics, comprehensive analysis of fossils and logging data to identify the sedimentary facies marks, single well, well connected and plane sedimentary facies analysis, the Permian Lucaogou Formation strata are mainly salified-lake facies, locally delta facies deposit, with the complex lithology formed by mechanical deposition, chemical deposition, and the deposition of fine clastic rocks, mud and carbonate rocks which are deposited under the influence of the deposition. Lucaogou Formation developed two tight oil body sweet spot, the upper body is a kind of salty lacustrine carbonate rocks, the types of micro facies in shallow lake dam; The inferior dessert is mainly based on the delta front to the former delta subfacies. Micro facies type is sheet sand and far sand dam. At the same time, the advantage of horizontal continuous change of reservoir in the area of the study area and the level of the well is to be revealed by the reservoir, control of planar micro facies boundary in tight oil reservoir, thus more accurately reflect the plane distribution characteristics of tight oil reservoir. Research shows that the quality of Lucaogou Formation near to the sweet spot is beach bar microfacies mainly developed in the center of the sag at low uplift.

Key words: Junggar Basin; Jimusaer sag; Lucaogou Formation; salified-lake; sedimentary facies; tight oil