

引用格式:李书琴,印森林,高阳,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混合细粒岩沉积微相[J].天然气地球科学,2020,31(2):235-249.

LI Shuqin, YIN Senlin, GAO Yang, et al. Study on sedimentary microfacies of mixed fine-grained rocks in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 235-249.

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2019.11.002

## 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组 混合细粒岩沉积微相

李书琴<sup>1,2</sup>, 印森林<sup>1,2</sup>, 高阳<sup>3</sup>, 张方<sup>3</sup>, 李映艳<sup>3</sup>, 彭寿昌<sup>3</sup>

(1. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉430100;

2. 长江大学录井技术与工程研究院, 湖北荆州434023;

3. 中石油新疆油田公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依834000)

**摘要:**准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组成为页岩油气勘探的重点区块,开展精细混积岩沉积层序及其相关研究具有十分重要的理论及实践意义。利用岩心、薄片、扫描电镜、测井曲线、XRF及XRD等资料,结合岩心相及其组合分析、测井曲线最小二乘法拟合和岩性随机模拟等技术,开展层序地层格架及沉积微相识别,建立研究区混积细粒岩沉积微相模式。研究发现:①芦草沟组可划分为5个中期旋回、9个短期旋回、33个超短期旋回。中期旋回对应段级别,短期旋回相当于一个砂组或小层(含多个单砂层),超短期旋回大体对应于单层;②研究区目的层为一套成化湖泊—三角洲沉积体系,岩性复杂,在各种沉积作用共同影响下,形成由细粒碎屑岩、碳酸盐岩、泥岩构成的混积细粒岩层。识别了储集层沉积微相类型,主要包括砂坝、前三角洲泥、沙滩、混合滩、云坪及湖相泥微相等;③吉木萨尔凹陷芦草沟组甜点段主要分布在 $P_2L_2^2$ 上段及 $P_2L_1^2$ 上段。综合分析提出吉木萨尔凹陷芦草沟组陆源碎屑—碳酸盐岩混合细粒岩沉积模式。基准面上升时,沉积环境由三角洲外前缘砂坝和浅湖沙滩沉积向浅湖—半深湖混合滩和云坪沉积转变,随着基准面继续上升至最大可容纳空间,深水环境黑灰色泥岩大面积沉积;基准面下降时,主要发育浅湖—半深湖混合滩和云坪沉积,随着基准面继续下降,发育浅湖亚相沙滩沉积和三角洲前缘砂坝沉积。

**关键词:**混积岩;沉积微相;页岩油;芦草沟组;吉木萨尔凹陷

中图分类号:TE121.3

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2020)02-0235-15

### 0 引言

页岩油已成为继北美页岩气之后油气工业又一战略性突破领域,美国巴肯页岩油的发现,则使得勘探开发页岩油气成为热点。我国页岩油气分布广、资源潜力大、开发前景良好,已受到越来越广泛的关注和重视<sup>[1-2]</sup>。随着近年来鄂尔多斯盆地上三叠统延长组、松辽盆地扶余油层、准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组等致密储层段非常规油气获

得勘探突破<sup>[3]</sup>,我国在非常规资源领域展现出巨大的勘探开发前景<sup>[4-7]</sup>。蕴藏有丰富非常规油气资源的细粒岩沉积环境的研究成为石油地质学家们当前的研究重点<sup>[8-9]</sup>。国外对于细粒岩的研究主要集中于海相<sup>[10-11]</sup>,与海洋对比,湖泊在气候的敏感性、沉积水动力学特征以及物源输入强度等方面都存在着较大差异。因此,研究湖相泥页岩,不能简单沿用海相泥页岩的相关认识。2010年以来,我国学者在湖相泥页岩的岩相划分以及沉积环境等方面

收稿日期:2019-10-14;修回日期:2019-11-18.

基金项目:国家自然科学基金(编号:41502126,41802123);长江大学地质资源与地质工程一流学科开放基金项目(编号:2019-YUGD26);国家科技重大专项(编号:2017ZX05008-006-004-002)联合资助。

作者简介:李书琴(1993-),女,陕西汉中,硕士研究生,主要从事沉积学与储层地质学研究.E-mail: 1322851073@qq.com.

通信作者:印森林(1983-),男,湖北仙桃人,博士,副教授,主要从事油气田开发地质研究.E-mail: yinxiang\_love@qq.com.

开展了较多研究<sup>[12-17]</sup>,并取得了相关认识。然而,对咸化湖相细粒岩的沉积环境及其控制因素的研究还较为薄弱,有待进一步研究。

近年来,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组页岩油勘探开发取得了一系列重大突破,多口井获得工业油流<sup>[18]</sup>,最新勘探显示,其储量规模为亿吨级油气田,开采潜力巨大。前人对吉木萨尔凹陷芦苇沟组沉积相的研究存在诸多争议,有学者认为其属于深湖—浅湖相沉积<sup>[19-20]</sup>;另一些学者认为其属于深湖一半深湖相及滨浅湖相沉积<sup>[21-22]</sup>;还有学者认为是敞流湖盆逐渐变为咸化的闭流湖盆<sup>[23-25]</sup>。而后随着对吉木萨尔凹陷芦苇沟组研究的不断深入,有学者认为芦苇沟组主要为湖相及三角洲相沉积<sup>[26]</sup>。受资料条件限制,其对研究区沉积相展布特征仅停留在亚相阶段,演化规律研究也不全面,沉积微相研究较少,如何开展各级次基准面旋回控制下咸化湖泊—三角洲相混积细粒岩分布规律研究存在较大难度。目前,关于混合细粒岩的沉积环境及其控制因素的研究较为薄弱,对其基准面旋回的类型、分布规律、识别标志、形成机理以及对比模式的研究才刚刚开始。因此,开展研究区混积岩沉积微相展布特征描述及分析其演化规律对该区页岩油勘

探开发具有指导意义。

基于上述问题,本文以吉木萨尔凹陷芦苇沟组混合细粒岩为研究对象,共收集48口井相关数据资料,包括测录井资料、分析化验资料和地震资料,扫描电镜、荧光薄片和铸体薄片资料等。XRD资料10口井、XRF资料7口井,现场扫描2口井(J174井、J10016井),约300 m(3 000个点)。现场观察描述4口井的岩心(J174井、J10016井、J10012井、J10022井),长度共计约500 m,岩心照片累计477张。这些资料为分析其岩石学特征、纹层成因和沉积环境等奠定了较好基础,将高分辨率层序地层学理论运用于咸化湖相层序地层分析中,在等时格架内研究各基准面的旋回演化规律,为研究页岩油的勘探开发提供地质依据。

## 1 区域地质概况

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部的东南缘,东靠奇台凸起,南以三台断裂为界限,西临西地断裂,北抵吉木萨尔断裂,构造单元面积约为1 278 km<sup>2</sup>,是一个东高西低的箕状断陷<sup>[27-28]</sup>[图1(a)]。凹陷自下而上发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系及第四系<sup>[29-30]</sup>,其中二叠系共可

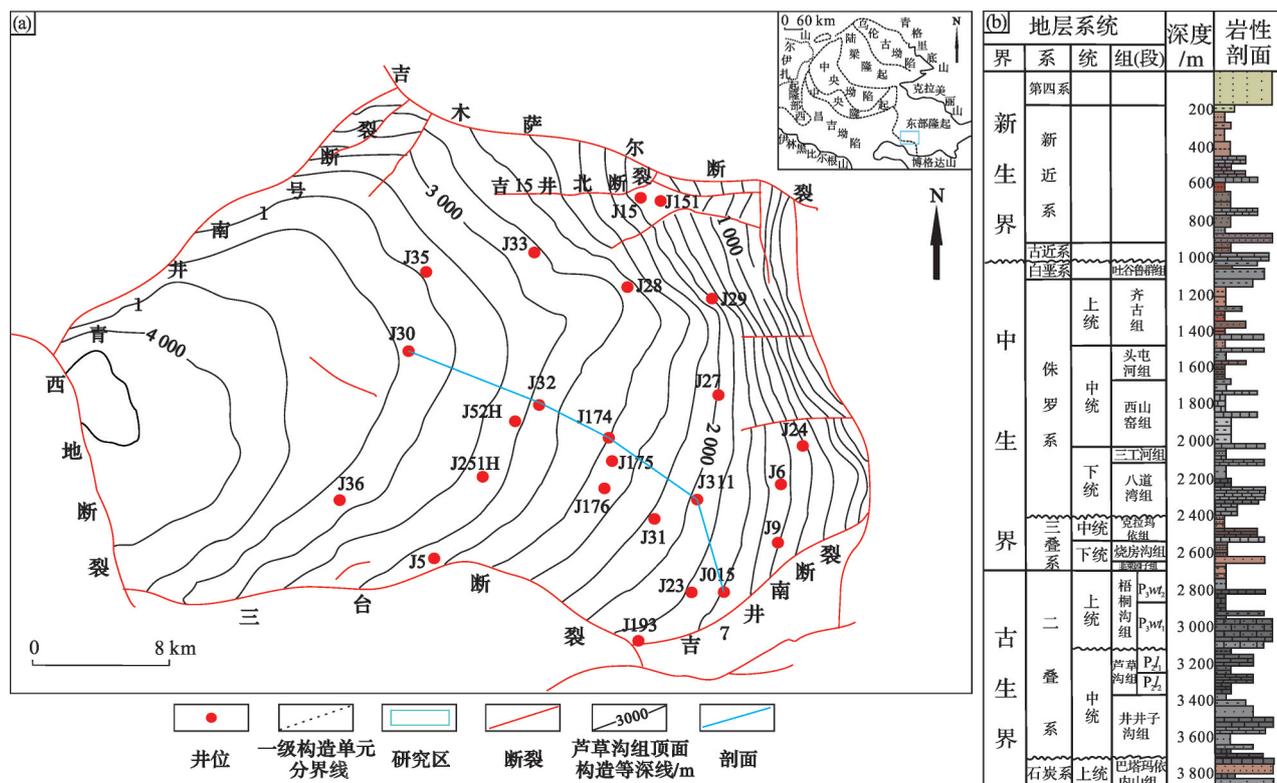


图1 吉木萨尔凹陷二叠系芦苇沟组构造概况(a)及地层柱状略图(b)

Fig.1 Structural overview of Permian Luchaogou Formation in Jimusar Sag (a) and stratigraphic histogram (b)

分为3个组,自下而上分别是井井子沟组、芦草沟组和梧桐沟组,芦草沟组是准噶尔盆地东部重要的含油层系之一。芦草沟组全凹陷发育,呈西厚东薄、南厚北薄的趋势,平均厚度约为200~350 m,具有源—储紧邻、近源成藏的特征。芦草沟组自上而下可划分为芦草沟组二段( $P_2L_2$ )和芦草沟组一段( $P_2L_1$ ),它们之间的储盖组合为砂泥岩正旋回组合,芦二段和芦一段又可分为2个层组,共发育上、下2个“甜点体”。上“甜点体”位于芦草沟组二段 $P_2L_2^2$ 砂组,岩性以灰黑色云屑砂岩、砂屑云岩、灰色长石岩屑粉砂岩为主,夹有黑灰色泥岩、云质泥岩。主要发育在凹陷东斜坡处,厚度为13.4~43.0 m,平均值为33 m,将芦草沟组二段 $P_2L_2^2$ 砂组划分为 $P_2L_2^{2-0}$ 、 $P_2L_2^{2-1}$ 、 $P_2L_2^{2-2}$ 、 $P_2L_2^{2-3}$ 、 $P_2L_2^{2-4}$ 共5个小层,整体以咸化湖相碳酸盐岩类沉积为主;下“甜点体”位于芦草沟组一段 $P_2L_1^2$ 砂组,岩性主要为土黄色粉细砂岩,灰黑色(含)云质粉砂岩,夹有泥质粉砂岩与黑灰色泥岩互层、黑灰色(含)云质粉砂岩或灰黑色泥岩。全凹陷均发育,厚度为17.5~67.5 m,平均值为42.8 m,将芦草沟组一段 $P_2L_1^2$ 砂组分为 $P_2L_1^{2-0}$ 、 $P_2L_1^{2-1}$ 、 $P_2L_1^{2-2}$ 、 $P_2L_1^{2-3}$ 、 $P_2L_1^{2-4}$ 、 $P_2L_1^{2-5}$ 、 $P_2L_1^{2-6}$ 、 $P_2L_1^{2-7}$ 共8个小层,整体以三角洲外前缘和浅湖一半深湖亚相沉积为主;将芦草沟组一段 $P_2L_1^1$ 砂组细分为3个小层( $P_2L_1^{1-1}$ 、 $P_2L_1^{1-2}$ 、 $P_2L_1^{1-3}$ ),总厚度为56 m,岩性主要为灰黑色泥质白云岩和白云质泥岩。

## 2 岩石矿物及沉积构造特征

### 2.1 岩石矿物特征

吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油储集层矿物成分复杂多样,有石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、黄铁矿、沸石及黏土等多种矿物类型,主要元素为K、Si、Al、Ca、Mg、Mn、S、Cu、Cl、Fe、Sr、Ba、V。各主要矿物含量比较平均,但黏土矿物含量较低,主要元素中除Si较高(含量超过50%),其他主要元素为K、Al、Ca、Mg等。芦草沟组为一套陆源碎屑和碳酸盐矿物的混合沉积,主要特征呈现出砂泥岩与白云岩的频繁互层。因此,用常规的定量岩性定名方法对芦草沟组的岩性命名比较困难。根据岩心样品的XRD和XRF结果,对不同岩石类型的矿物和元素含量特征进行了汇总,其含量范围如表1所示。本文研究认为芦草沟组主要岩石类型可分为6种,即泥岩、长石岩屑砂岩、粉细砂岩、云屑砂岩、砂屑云岩和泥晶白云岩(图2)。

#### 2.1.1 泥岩

黏土矿物含量较高,含量在20%以上。长石含量最高,介于20%~35%之间,平均含量大于30%,是主要组成矿物。石英、白云石含量相对较低。元素含量特征表现为:Ca、Mg元素含量相对较低。Al、K元素含量较高,Si元素含量最高[图2(a),图2(b)]。

#### 2.1.2 长石岩屑砂岩

长石含量较高,含量超过30%,平均含量为43%。石英含量介于20%~40%之间,平均含量为28%。黏土矿物总量在5%~20%之间。白云石含量相对较低,低于10%。其元素含量特征主要表现为:较高的Al元素含量以及相对较高的K元素含量。K元素含量介于3%~5%之间,Al元素含量介于15%~25%之间,而Si元素仍是元素含量中的主要成分,含量介于60%~75%之间,Mg、Ca等碳酸盐矿物中的主要元素相对含量较低。该岩类是目的层中的主要储集层[图2(c),图2(d)]。

#### 2.1.3 粉细砂岩

主要矿物为石英,含量超过40%,平均含量为47.7%。长石含量介于25%~35%之间。黏土矿物、白云石含量则低于10%。元素含量特征主要表现为极高的Si元素含量,平均含量高达75%。Al元素次之,介于10%~15%之间。Ca、Mg、K元素含量较低。该岩类矿物成分相对简单,但储层物性一般,非主要储集层岩性[图2(e),图2(f)]。

#### 2.1.4 云屑砂岩

陆源碎屑岩与碳酸盐岩的过渡性岩类。主要矿物为石英含量,略高于白云石,相对上述岩类,该岩类白云石含量明显增高。元素主要表现为Mg、Ca元素的含量有增高趋势,Mg元素含量介于6%~10%之间,Ca元素含量在10%左右。Si、Al、K元素含量变低。该岩类物性特征较好,也是相对较好的储集层岩性[图2(g),图2(h)]。

#### 2.1.5 砂屑云岩

白云石含量超过20%,为主要矿物成分,石英含量介于10%~30%之间,样品分析得知石英含量主要集中在20%左右。长石的含量相对较高,平均含量为32.5%。Mg元素含量介于10%~15%之间,而K、Al、Si等陆源碎屑元素含量较低。该岩类孔隙度较高,是相对良好的储集层岩类[图2(i),图2(j)]。

#### 2.1.6 泥晶白云岩

主要由白云石组成的碳酸盐岩,陆源碎屑含量

表1 芦草沟组6类岩性矿物和元素含量

Table 1 Contents of six types of lithological minerals and elements in Lucaogou Formation

|        |     | 黏土/%  | 长石/%  | 石英/%  | 白云石/% | K/%  | Al/%  | Si/%  | Ca/%  | Mg/%  |
|--------|-----|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 泥岩     | 范围  | >20   | 20~35 | 10~20 | <15   | 5~7  | 15~20 | 60~70 | <10   | <5    |
|        | 平均值 | 27.2  | 31.1  | 20.1  | 8.4   | 5.4  | 17.3  | 66    | 2.5   | 4.9   |
| 长石岩屑砂岩 | 范围  | 5~20  | >30   | 20~40 | <10   | 3~5  | 15~25 | 60~75 | <10   | <5    |
|        | 平均值 | 14.5  | 43.3  | 28    | 5.9   | 3.7  | 15.9  | 68    | 4     | 3.7   |
| 粉细砂岩   | 范围  | <10   | 25~35 | >40   | <5    | <3   | 10~15 | >65   | <5    | <5    |
|        | 平均值 | 7.9   | 30.5  | 47.7  | 1.9   | 2.6  | 13    | 75    | 3.4   | 1.03  |
| 云屑砂岩   | 范围  | 0~20  | 10~50 | 20~40 | 10~25 | <3   | 10~15 | 55~65 | 5~20  | 6~10  |
|        | 平均值 | 11    | 36    | 25.9  | 17.6  | 2.2  | 10.8  | 62.1  | 11.6  | 8.3   |
| 砂屑云岩   | 范围  | 0~20% | 10~40 | 10~30 | 20~40 | 1~4  | 5~10  | 40~60 | 10~35 | 10~15 |
|        | 平均值 | 11.2  | 32.5  | 21.6  | 29.8  | 1.7  | 7.98  | 52.76 | 19.4  | 12.8  |
| 泥晶白云岩  | 范围  | 0~15% | 0~30  | >20   | >40   | <2.5 | <5    | 20~50 | >20%  | >15   |
|        | 平均值 | 6.8   | 21.6  | 16.9  | 49.7  | 0.97 | 4.4   | 39.1  | 30.6  | 19    |

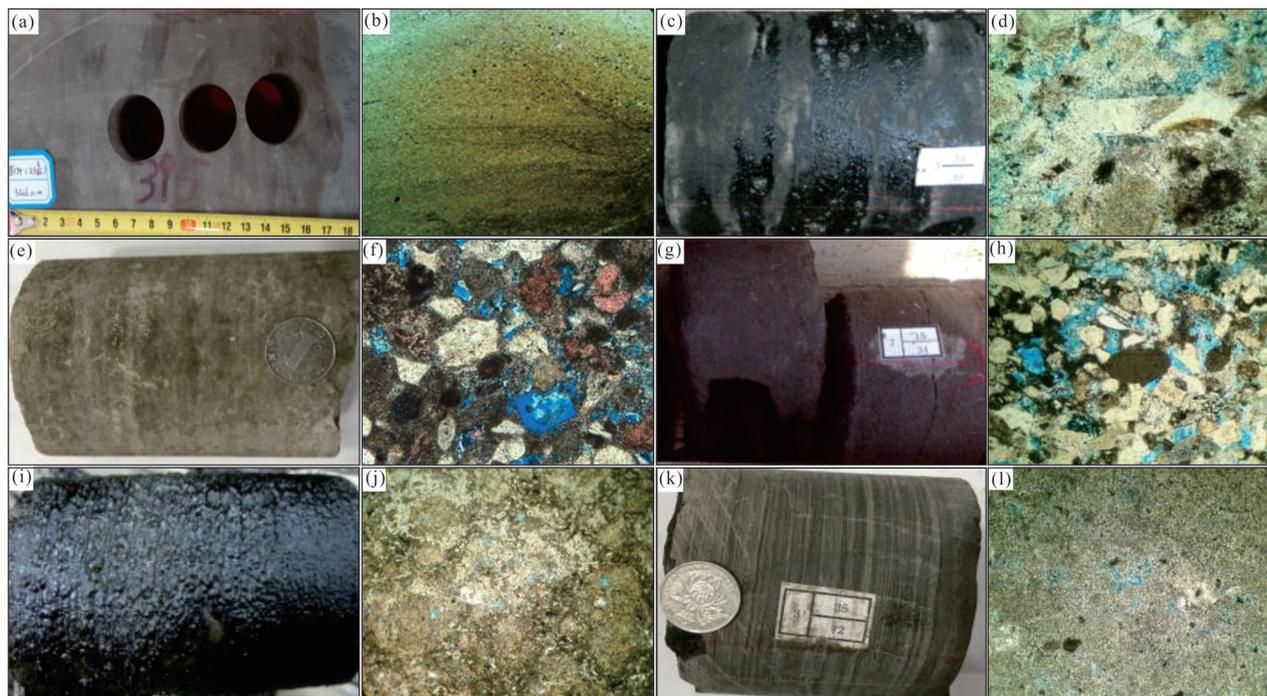


图2 吉木萨尔凹陷芦草沟组6类岩石的岩心照片和对应薄片

Fig.2 Core photos and thin slice of six types of rocks in Lucaogou Formation in Jimusar Sag

(a)泥岩, J174井, 3 109.4 m; (b) J174井, 3 130.76 m, (-)岩石薄片,  $\times 40$ ; (c)长石岩屑砂岩, J31井, 2 725.7~2 725.9 m; (d) J174井, 3 143.30 m, (-)蓝色铸体,  $\times 100$ ; (e)粉细砂岩, J10016井, 3 317.84 m; (f) J174井, 3 143.39 m, (-)蓝色铸体,  $\times 5$ ; (g)云屑砂岩, J176井, 3 048.48~3 049.14 m; (h) J174井, 3 143.30 m, (-)蓝色铸体,  $\times 100$ ; (i)砂屑云岩, J31井, 2 719.73~2 719.94 m; (j) J174井, 3 113.34 m, (-)蓝色铸体,  $\times 40$ ; (k)泥晶云岩, J10022井, 3 362.78~3 363.04 m; (l) J174井, 3 119.23 m, (-)蓝色铸体,  $\times 40$

极少,白云石的含量占主体。样品中该岩类的白云石含量平均超过40%,石英含量则小于20%。Mg元素含量超过15%, Si元素含量则低于50%。该岩类孔隙度低,非良好的储集层岩类[图2(k),图2(l)]。

## 2.2 沉积构造特征

通过对吉木萨尔凹陷芦草沟组取心井岩心观察和描述,发现沉积构造特征多样,包括砂纹层理

[图3(a)]、水平层理[图3(b),图3(i)]、小型交错层理[图3(c)]及波状层理[图3(d)]等,也可见小型浪成波痕[图3(h)]、块状构造[图3(j)]、干裂纹及泄水构造[图3(f)]等。同时还发育具有咸化湖环境特征的生物化石[图3(g),图3(k)]及黄铁矿[图3(e),图3(l)]。这些沉积构造标志为判断芦草沟组沉积相提供了重要的依据。

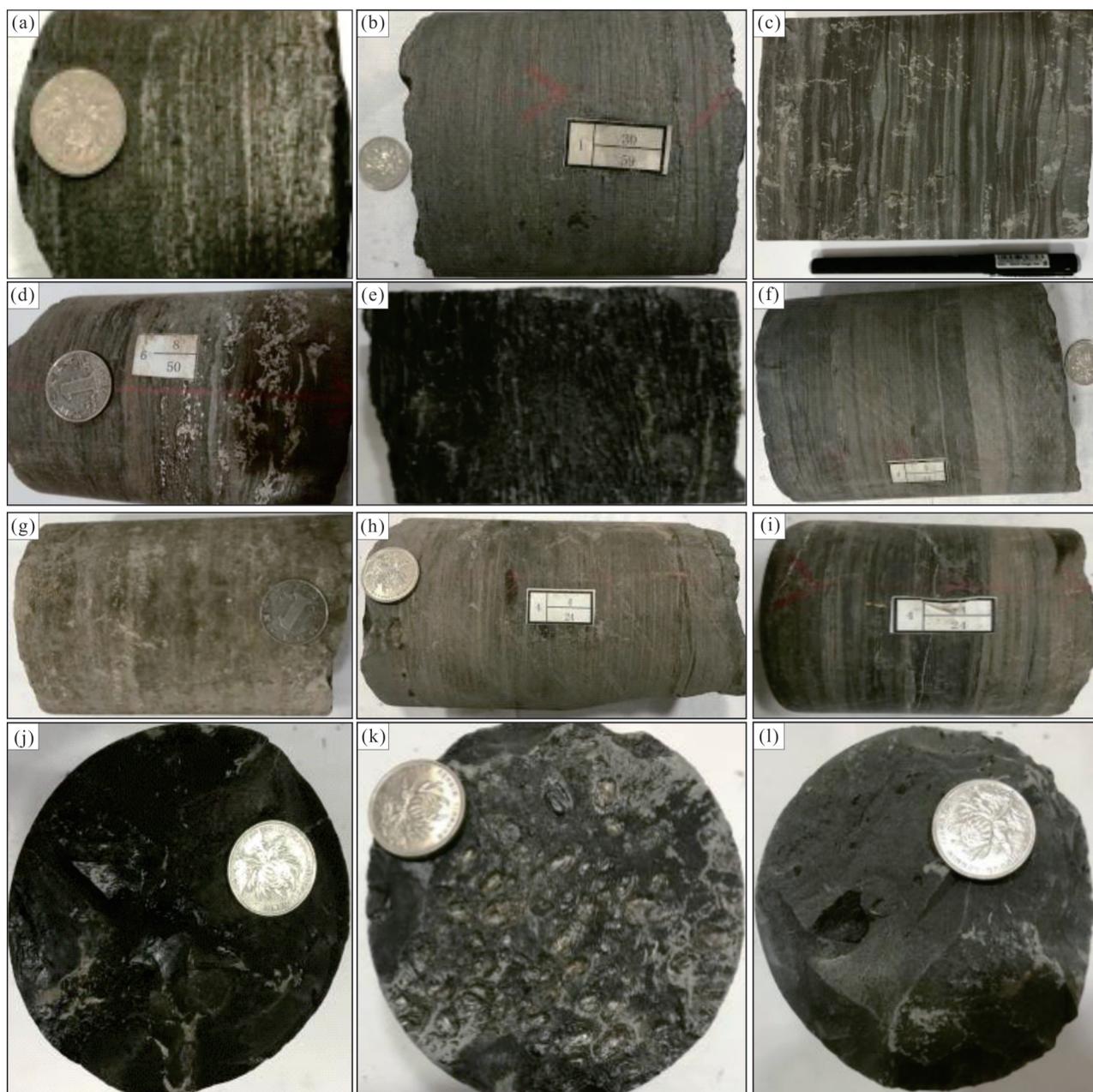


图3 吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积构造特征图版

Fig.3 Sedimentary structural features of Lucaogou Formation in Jimusar Sag

(a)灰黑色泥质云质粉砂岩,见砂质纹层,J10022井,3 346.99 m;(b)灰黑色长石岩屑砂岩,发育水平层理,底部见1~2 mm溶孔,有油气味,J10016井,3 304.89 m;(c)灰黑色泥质粉砂岩,发育水平层理、小型交错层理,波状砂纹层理,J10016井,3 307.25 m;(d)灰黑色云质泥岩,水平层理,波纹层理发育,钙质呈条带或团块状发育,J10012井,3 307.16 m;(e)黑色白云质泥岩,溶孔和黄铁矿发育,呈页状层理,J10016井,3 313.98 m;(f)灰黑色泥质云岩,水平层理发育,底部溶孔发育,见渗油,顶部见小型泄水构造,J10016井,3 451.39 m;(g)土黄色粉砂岩,块状构造,略显水平层理,见有渗油,J10016井,3 317.83 m;(h)土黄色泥质粉砂岩,见渗油,底部见分散状及团块状黄铁矿,水平层理、小型浪成波痕发育,见层理缝,J10016井,3 451.55 m;(i)灰黑色泥质白云岩,水平层理发育,见层理缝、裂缝,方解石充填,J10016井,3 452.85 m;(j)灰黑色泥晶云岩,发育黄铁矿,见钙质条带及生物介壳,J10022井,3 363.04 m;(k)灰黑色含泥质云岩,生物介壳沿层面发育,J10022井,3 339.59 m;(l)灰黑色泥晶云岩,底部见生屑,J10022井,3 353.72 m

吉木萨尔凹陷芦草沟组一段上部发育大套具有水平层理的黑灰色、灰黑色泥岩,是半深湖沉积的重要标志。研究区常见灰黑色微细水平泥质纹与细粉砂纹交互的泥质粉砂岩,亦是浅湖一半深湖

过渡相的沉积特征。微细水平波状、透镜状、小型交错层理常见于芦草沟组一段灰黑色粉细砂岩中,代表了浅湖沉积。研究区浅湖粉细砂岩沉积中常见生物扰动构造,有潜穴、逃逸构造、爬行迹等类

型。波状交错层理和平行层理及泄水构造,是芦苇沟组三角洲前缘砂坝沉积的重要标志。

### 3 基准面旋回特征

#### 3.1 基准面旋回曲线计算

在碳酸盐岩台地沉积层序的研究中,通过旋回计数和厚度测量,采用费希尔图解法解析高频米级旋回或副层序的叠置形式和空间结构,进而标定三级沉积层序的界面,是目前普遍采用的一个方法<sup>[31]</sup>。但是,这一方法目前在地下油气勘探区仍受到极大的限制,因此本文尝试一种新的方法。

根据J174井GR测井数据,利用Excel软件提供的函数程序,计算沉积旋回厚度并统计旋回个数,得到最终基准面旋回曲线(图4),其步骤如下:①首先

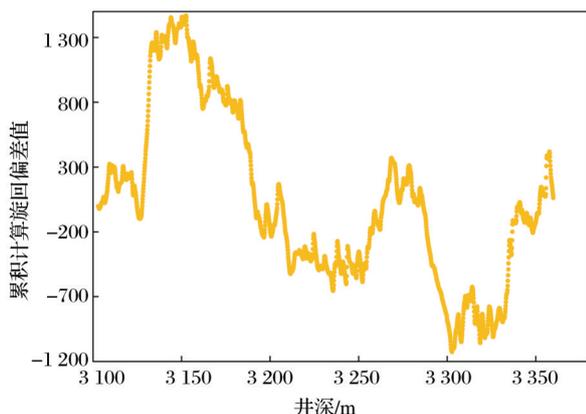


图4 J174井累积旋回厚度偏差散点图

Fig.4 Scatter diagram of cumulative cycle thickness deviation in Well J174

对原始数据进行处理,剔除无效值,获取目的层段数据序列A;②为了消除系统误差和测井曲线的长趋势偏移,采用最小二乘法对原始曲线进行拟合得到数据序列B;③数据序列B与数据序列A之差作为新数据序列C,对数据序列C进行数据累加得到厚度累计数据序列D;④由于预处理过程中采用参数的差异,可能造成计算结果的误差,因此再次采用最小二乘法对数据序列D进行拟合得到数据序列E,使数据中心化或归一化。实际计算过程采用一阶差分法处理,保证最终计算结果具有一致性;⑤最后采用逻辑判别函数,提取归一化自然伽马(GR)测井数据序列正负偏差数据,计算出沉积旋回厚度。

#### 3.2 基准面旋回划分

通过对吉木萨尔凹陷芦苇沟组岩心薄片、电性特征的综合分析,结合上述方法计算得到的旋回曲

线,将研究区芦苇沟油层划分为5个中期旋回(自下而上为MSC1—MSC5),9个短期旋回(自下而上为SSC1—SSC9),33个超短期旋回(图5)。

### 4 沉积相特征

在区域沉积演化背景的基础上,结合研究区岩心资料、地球化学及电性特征,以沉积相标志为主,认为吉木萨尔凹陷芦苇沟组为咸化湖泊—三角洲沉积体系,进一步分为2类相、5个亚相、6种微相(表2)。

#### 4.1 咸化湖泊相沉积

吉木萨尔凹陷芦苇沟组沉积时期,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,以浅湖亚相和浅湖一半深湖亚相沉积为主,浅湖亚相主要分布在 $P_2L_2^2$ 上段、 $P_2L_1^1$ 底部及 $P_2L_1^2$ 上部。浅湖一半深湖亚相在 $P_2L_2^2$ 、 $P_2L_1^1$ 、 $P_2L_1^2$ 层段均有发育,大段沉积在 $P_2L_2^2$ 中下部及 $P_2L_1^1$ 层段(图5)。

##### 4.1.1 浅湖亚相

浅湖亚相位于水深最浅的地带,以湖面处于枯水期最深水平面至浪基面中间。对应微相主要为砂滩,砂滩属于碎屑岩滩坝,其在“上、下甜点”内部均有发育(图5),但厚度略有差异。研究区砂滩沉积以粉砂岩、长石岩屑砂岩、(含泥)云质粉砂岩为主,少量泥质粉砂岩。该亚相主要矿物为石英、长石和部分黏土矿物,主要元素为Si、Al、K。常见波状砂纹层理[图3(a)]、微细水平波状、透镜状及小型交错层理[图3(c)]等典型沉积构造,常见虫孔、爬行迹等生物扰动构造。

##### 4.1.2 浅湖一半深湖亚相

浅湖一半深湖亚相位于浪基面之下相对浅水地带。对应微相主要为混合滩和云坪亚相。混合滩是云坪沉积和砂滩沉积的过渡地带,属于过渡型滩坝,岩性主要为白云质粉砂岩和粉砂质白云岩的频繁互层,夹薄层白云质泥岩、粉砂质泥岩,分布较广。物源匮乏时则形成云坪,云坪属于碳酸盐岩滩坝,此时岩性以泥晶白云岩夹少量粉砂质白云岩和白云质泥岩为主,含少量泥质粉砂质组分。该亚相中石英、白云石、长石为主要矿物,Mg、Ca、Si等元素为主要元素。混合滩和云坪在“上甜点”内部及“上、下甜点”之间均有发育,其厚度变化较大。研究区浅湖一半深湖亚相发育微细水平泥质纹与细粉砂纹交互[图3(a)]、水平层理[图3(b),图3(i)]等典型沉积构造。



表2 吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积相类型

Table 2 Types of sedimentary facies of Lucaogou Formation in Jimusar Sag

| 相    | 亚相     | 微相                | 主要岩石类型            | 主要矿物类型     | 主要元素类型   |
|------|--------|-------------------|-------------------|------------|----------|
| 咸化湖泊 | 半深湖    | 半深湖泥              | 泥岩、粉砂质泥岩、白云质泥岩    | 长石、黏土矿物    | Si、Al、K  |
|      | 浅湖—半深湖 | 混合滩、云坪<br>浅湖—半深湖泥 | 云屑砂岩、砂屑云岩、泥晶白云岩   | 石英、白云石、长石  | Mg、Ca、Si |
|      | 浅湖     | 沙滩、浅湖泥            | 长石岩屑砂岩、粉细砂岩、泥质粉砂岩 | 石英、长石、黏土矿物 | Si、Al、K  |
| 三角洲  | 三角洲前缘  | 砂坝                | 粉细砂岩、泥质粉砂岩        | 石英、长石      | Si、Al、K  |
|      | 前三角洲   | 前三角洲泥             | 泥岩、砂质泥岩           | 黏土矿物、石英    | Si、Al、K  |

#### 4.1.3 半深湖亚相

半深湖亚相位于浪基面之下相对深水地带。地处乏氧的弱还原—还原环境。目的层半深湖相沉积主要集中发育在芦草沟组一段,其沉积厚度较大,岩性以黑色、灰黑色泥岩为主,少量白云质泥岩和粉砂质泥岩。该亚相中主要矿物为长石和黏土矿物,主要元素为Si、Al、K。常发育水平层理及微细波状层理[图3(d)]等沉积构造,可见浮游生物化石及大量分散状或团块状黄铁矿[图3(e),图3(1)]。

#### 4.2 三角洲相沉积

研究区三角洲相沉积主要发育在 $P_2l^2$ 层段,以三角洲前缘亚相沉积为主,主要是三角洲前缘亚相中邻近前三角洲泥质沉积的部分。分布在吉木萨尔凹陷的东北、东南端,以凹陷东南端为主。由于离物源区较远,湖浪改造力逐渐增强,因此岩性以薄层粉砂岩为主,少量泥质粉砂岩与泥岩互层。主要矿物为黏土矿物、石英,主要元素为Si、Al、K。由于研究区均为细粒沉积且岩性复杂难以区分,本文将席状砂和远砂坝微相统称为砂坝微相。该沉积区可见块状构造土黄色粉细砂岩[图3(j)],常见波状交错层理及平行层理[图3(h)]。

### 5 沉积相平面展布与演化规律

#### 5.1 沉积相平面展布特征

芦草沟组整体可以分为9个短期旋回(SSC1—SSC9),认为自下而上经历了咸化湖泊相→三角洲相→咸化湖泊相→三角洲相→咸化湖泊相的沉积演化规律。由于目的层岩石类型复杂多样,并非只有碎屑岩,无法单纯按照砂地比等值线图作为依据编制沉积微相平面图。因此,本文采用序贯指示随机模拟的方法,建立了整个研究区的岩性模型,并根据该岩性模型对整个研究区的岩性平面分布特

征进行随机模拟。随机模拟岩性三维模型后,以网格岩性均值为该区域的岩性分布。然后,以岩性平面分布图为基础,在层序格架控制下,根据大量岩心观察和6类岩性特征等资料统计,以取心井段单井沉积相分析为基础,连井沉积相分析为格架,由点到线,由线到面,结合岩相平面分布特征,编制吉木萨尔凹陷芦草沟组各短期旋回的沉积微相平面分布图(图6)。

SSC1:基准面上升期,水体逐渐加深,物源供给量逐渐减少,沉积环境由浅湖亚相的沙滩沉积经历混合滩沉积,云坪沉积转为半深湖沉积,下半部分主要为白云质粉砂岩、砂质白云岩、少量泥晶白云岩,上半部分主要是大段厚层黑灰色泥岩沉积。东南部和北部沙滩微相发育,J221井附近则为混合滩,J35井西北部、J303井周围发育云坪,J30井、J173井周围则是半深湖泥岩沉积。

SSC2:基准面下降期,水体逐渐变浅,物源供给量增加,沉积环境由半深湖泥岩沉积向浅湖—半深湖云坪和混合滩沉积转变,沉积灰黑色泥晶白云岩、粉砂质白云岩、白云质粉砂岩。以浅湖—半深湖沉积为主,沉积微相类型主要为混合滩、云坪。此时,泥岩沉积范围明显减小,东南部J015井附近,东北部J33井、J151井和J174井附近主要发育泥坪、混合滩。

SSC3:基准面持续下降期,水体下降加快,物源供给更加充足,发育三角洲前缘亚相和浅湖亚相,微相类型主要是砂坝、前三角洲泥及沙滩,沉积土黄色、灰色粉细砂岩、泥岩及少量粉砂质泥岩和白云质粉砂岩。整个研究区东南部J40井、J173井和J29井附近大面积发育沙滩,南部J174井向东南方向延伸则发育砂坝,J30井附近则因为物源供给不够充足发育混合滩。

SSC4:基准面再次上升期,水体逐渐变深,物源

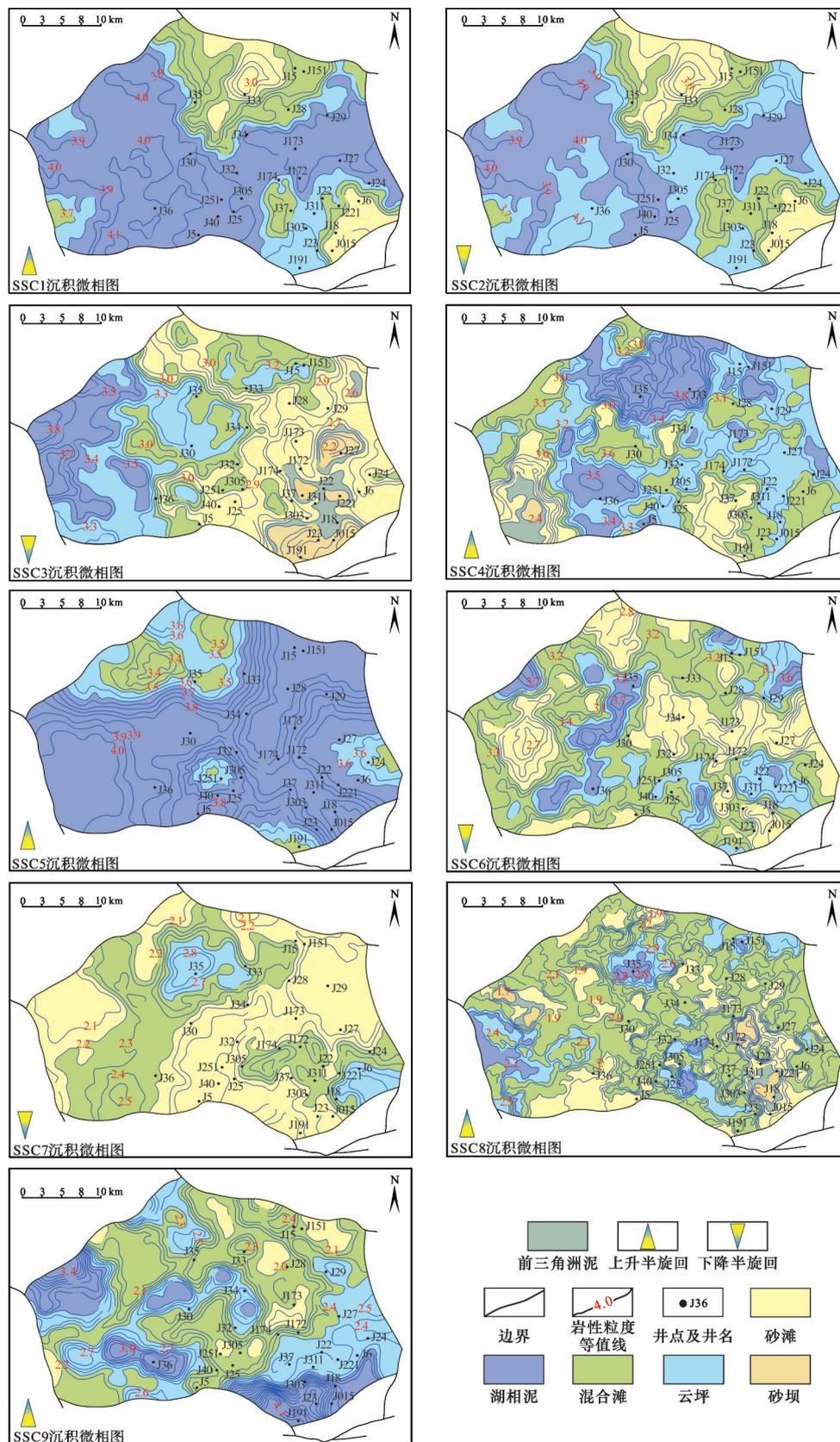


图6 芦草沟组各短期旋回沉积微相平面展布图

Fig.6 Plane layout of sedimentary microfacies of every period in Lucaogou Formation

供给量减少,沉积环境由浅湖较粗粒碎屑岩向浅湖一半深湖过渡岩类沉积转变,主要沉积黑灰色白云质砂岩、砂质白云岩及泥晶白云岩。此时,东南部三角洲已萎缩,南部仍有小范围沙滩沉积,中南部发育混合滩,云坪则主要发育在中东地区,其他区域多为半深湖泥岩沉积。

SSC5:基准面持续上升期,最大可容纳空间出现,沉积黑灰色纯泥岩段。沉积环境由浅湖一半深湖混合滩粉砂质白云岩和白云质粉砂岩沉积向半深湖深水环境转变。此时整个研究区大面积沉积半深湖泥岩,J24井周围发育云坪微相,J191井附近发育混合滩微相。

SSC6:基准面开始下降期,水体开始变浅,半深湖亚相向浅湖一半深湖亚相过渡,沉积微相主要为混合滩。J27井向西部延伸至J174井至J30井,东南部J015井、J37井周围,均发育沙滩微相,J22井、J40井和J29井附近发育云坪微相,其余井附近发育混合滩微相。

SSC7:基准面持续下降期,物源供给量增加,沉积环境由浅湖一半深湖亚相逐渐过渡到浅湖亚相,沉积微相主要为沙滩。南部和东北部大面积发育沙滩微相,J174井向东南部方向延伸至J221井附近发育混合滩微相,东南部J6井,北部J35井附近则发育云坪微相。

SSC8:基准面再次上升期,水体逐渐加深,陆源供给逐渐减少,混合滩沉积微相开始大量发育,过渡带岩石类型常见,粉细砂岩逐渐减少。东南部物源供给充足,J18井、J015井附近发育砂坝微相,东北部J15井、J151井附近发育云坪微相和半深湖泥岩沉积,其余大部分区域均为混合滩微相沉积。

SSC9:基准面持续上升期,可容纳空间增大,沉积黑灰色泥岩段,沉积环境转变为浅湖一半深湖的云坪沉积和深水环境的半深湖泥岩沉积。J174井向东部延伸至J24井、J27井、J30井、J32井、J34井和J29井附近均发育云坪沉积,南部J23井、西南部J36井附近大面积为半深湖泥岩沉积。J151井附近还发育小面积沙滩微相,其余区域大部分为混合滩沉积。

研究表明沉积相控制页岩油储层甜点分布,沉积相的展布受不同级次的基准面旋回叠加控制,进而控制了吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油储层的分布特征。页岩油储层甜点主要分布在短期旋回SSC3、SSC4、SSC7、SSC8中,而页岩油优质储层主

要分布在上升半旋回和下降半旋回的转换面处,上甜点主要为浅湖亚相沙滩微相沉积和浅湖一半深湖亚相混合滩沉积,岩性主要以粉砂岩、白云质粉砂岩、粉砂质白云岩为主,少量长石岩屑砂岩,夹(含泥)云质粉砂岩、粉砂质泥岩及白云质泥岩;下甜点主要是三角洲前缘亚相砂坝微相沉积和浅湖亚相沙滩微相沉积,其岩性主要以薄层粉砂岩为主,较多白云质粉砂岩,夹长石岩屑砂岩和薄层泥岩。

## 5.2 沉积相时空演化规律及沉积相模式

吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积时期物源主要来自于北部和南部,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,水系发育程度低<sup>[32]</sup>,沉积微相类型主要为三角洲前缘亚相的砂坝及湖盆中的滩坝沉积,其岩性相对较粗、物性相对较好,为有利储集相带。湖平面受气候周期性变化影响,变化频繁,进而湖盆发生周期性萎缩和扩张,因此,在吉木萨尔凹陷内形成了广泛发育的一套混积细粒岩层。

吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积早中期,发育2期水进—水退旋回,沉积晚期又发育一期水进旋回(图7)。整体而言,南部物源的供给强度和范围要强于北部。沉积早期湖盆水体较浅,陆源沉积物供给较强,南北2个三角洲在湖盆内均有较大范围的发育,随着湖平面的上升,南北两侧的三角洲逐渐萎缩,在湖盆中部发育大量的湖相泥岩;而后随着气候变干旱,湖盆水体变浅,湖平面逐渐下降,三角洲向湖盆内进积,该时期沉积物供给不足,湖盆萎缩且水体盐度升高,因此,下甜点体以粒度较细的泥晶白云岩夹薄层的白云质粉砂岩为主,湖盆边部则主要发育长石岩屑砂岩和泥质粉细砂岩;接着气候变得潮湿,湖平面再次上升,整个湖盆中部大范围发育湖相泥岩,南部则发育规模有限的云坪沉积和混合滩沉积;而后随着湖平面的再次下降,南部的物源向湖盆内部推进,湖盆的中部广泛发育泥晶白云岩,边部则发育较纯的粉细砂岩沙滩沉积;最后,湖平面又逐渐上升,物源供给减少,此时过渡岩类增多,开始发育混合滩及云坪沉积。

综上所述,整个芦草沟组沉积相发育特征与基准面变化息息相关。在研究区咸化湖相沉积体系中,基准面的发育过程可类比湖平面的升降过程,基准面上升类似湖平面上升过程,反之下降。因此,建立了吉木萨尔凹陷芦草沟组陆源碎屑—碳酸



盐岩的沉积模式图(图8)。当基准面上升时,A/S值增大,水体逐渐变深,物源供给量逐渐减少。沉积环境由三角洲外前缘砂坝和浅湖砂滩沉积向浅湖一半深湖混合滩和云坪沉积转变。此时,砂坝和砂滩微相分布面积逐渐减少,浅湖一半深湖亚相混合滩和云坪沉积广泛发育,粉细砂岩、长石岩屑砂岩减少,而过渡性岩类砂质白云岩、云质粉砂岩夹薄层粉砂质泥岩、白云质泥岩逐渐增多。随着基准面继续上升,A/S值继续增大到可容纳空间的出现,大面积沉

积半深湖黑灰色泥岩[图8(a)];当基准面开始下降时,A/S值逐渐减小,此时物源供给还不够充足,主要发育浅湖一半深湖混合滩和云坪沉积。半深湖泥岩沉积减少,而过渡性岩类粉砂质白云岩、云质粉砂岩夹薄层粉砂质泥岩、白云质泥岩逐渐增加。随着基准面持续下降,可容纳空间不断降低,沉积物供应强度和范围加大,沉积物不断向湖盆中心进积,形成了颗粒较粗的砂滩沉积和三角洲前缘砂坝沉积[图8(b)],成为重要的页岩油储层。

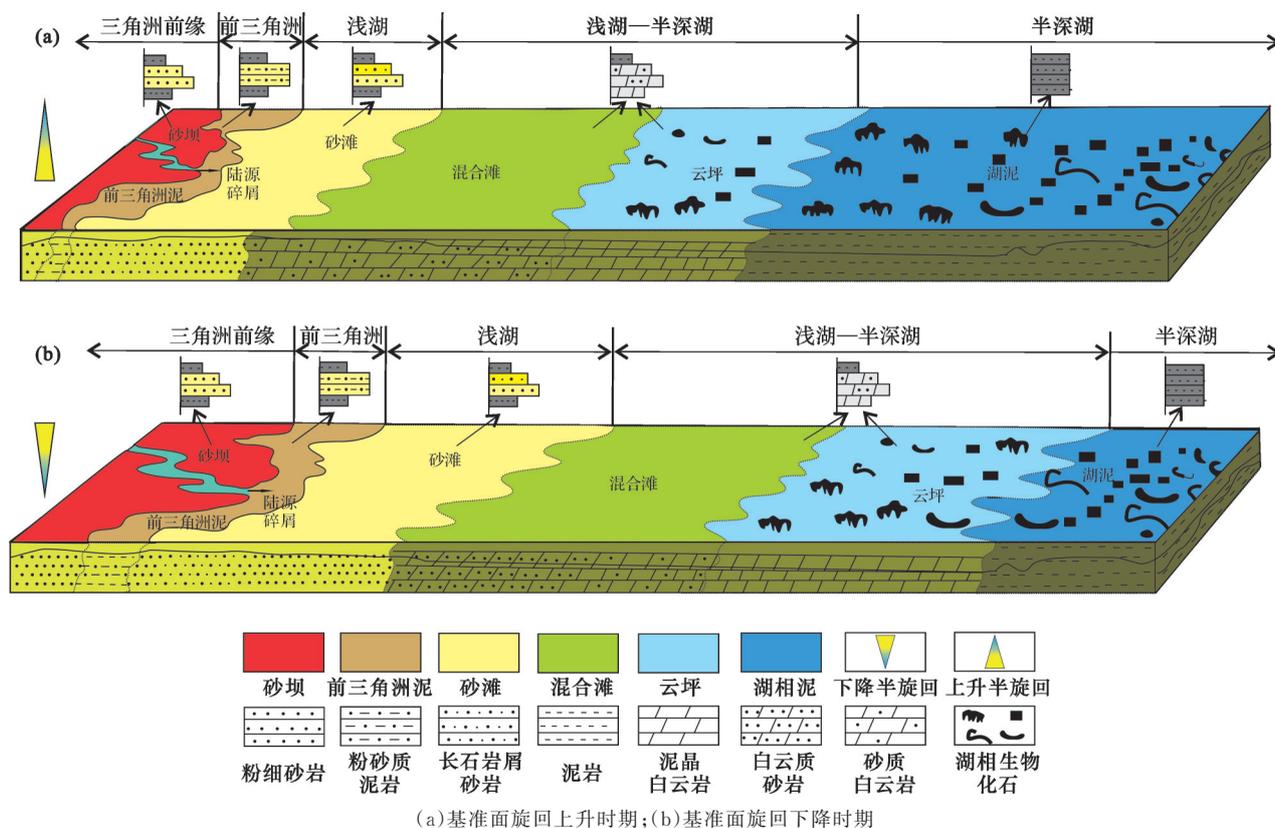


图8 吉木萨尔凹陷芦草沟组碎屑岩—碳酸盐岩沉积模式图

Fig.8 Sedimentary pattern of clastic rocks and carbonate rocks of Lucaogou Formation in Jimusar Sag

### 5.3 有利相带预测

通过上述分析,发现芦草沟组甜点体主要形成于高位体系域时期。下甜点体沉积期为SSC3—SSC4,此时,基准面旋回下降,水体减退,物源供给充足,在凹陷东南部及东北部区域,发育三角洲前缘亚相砂坝沉积,砂体不断向凹陷中心进积,浅湖亚相沉积在盆地也较为发育,在浅湖地带形成碎屑岩滩坝沉积。上甜点体沉积期为SSC7—SSC8,此时,湖盆扩张范围较大,主要发育浅湖亚相砂滩沉积和浅湖一半深湖亚相混合滩沉积,砂滩在东北部、中部及南部大面积发育,而混合滩主要集中在

凹陷的中东部,占据凹陷大部分区域,是重要的勘探相带。

## 6 结论

(1)吉木萨尔凹陷芦草沟组分上、下2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,将芦草沟组划分为5个中期基准面旋回,9个短期基准面旋回,33个超短期基准面旋回。

(2)吉木萨尔凹陷芦草沟组主要为一套陆源碎屑和碳酸盐矿物的混合沉积岩,岩性主要为长石岩

屑砂岩、粉细砂岩、泥岩、砂屑云岩、云屑砂岩及白云岩。矿物类型丰富,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。综合各类资料,识别出三角洲相、咸化湖泊相2种沉积相,三角洲前缘亚相、前三角洲亚相、浅湖亚相、浅湖—半深湖亚相及半深湖亚相共5种沉积亚相,砂坝、前三角洲泥、砂滩、混合滩、云坪及半深湖泥共6种主要沉积微相。

(3)提出研究区混积岩细粒沉积演化规律及沉积模式。芦草沟组沉积相发育特征受基准面旋回变化明显,当基准面上升时,沉积环境由三角洲外前缘砂坝和浅湖砂滩沉积向浅湖—半深湖混合滩和云坪沉积转变,粉细砂岩、长石岩屑砂岩减少,而过渡性岩类和泥晶白云岩逐渐增多;随着基准面继续上升,直至最大可容纳空间出现,大面积沉积深水环境黑灰色泥岩;当基准面下降时,主要发育浅湖—半深湖混合滩和云坪沉积,泥岩沉积减少,过渡性岩类砂质白云岩、云质粉砂岩夹薄层粉砂质泥岩、白云质泥岩逐渐增加;基准面继续下降,使得沉积物向湖盆深处进积,形成了以相对较粗的砂滩沉积和三角洲前缘砂坝沉积发育,为重要的页岩油储层甜点。

#### 参考文献 (References)

- [1] 邹才能,陶士振,袁选俊,等.连续型油气藏形成条件与分布特征[J].石油学报,2009,30(3):324-331.  
ZOU C N, TAO S Z, YUAN X J, et al. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations[J].Acta Petrolei Sinica, 2009,30(3):324-331.
- [2] 林森虎,邹才能,袁选俊,等.美国致密油开发现状及启示[J].岩性油气藏,2011,23(4):25-30.  
LIN S H, ZOU C N, YUAN X J, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication[J].Lithologic Reservoirs, 2011,23(4):25-30.
- [3] 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 L C, TANG Y, LEI D W, 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.
- [4] 赵政璋,杜金虎,邹才能,等.大油气区地质勘探理论及意义[J].石油勘探与开发,2011,38(5):513-522.  
ZHAO Z Z, DU J H, ZOU C N, et al. Geological exploration theory for large oil and gas provinces and its significance[J].Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 513-522.
- [5] 马中振,戴国威,盛晓峰,等.松辽盆地北部连续型致密砂岩油藏的认识及其地质意义[J].中国矿业大学学报,2013,42(2):221-229.  
MA Z Z, DAI G W, SHENG X F, et al. Tight sand oil reservoir of continuous type in northern Songliao Basin and its geological significance[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013,42(2):221-229.
- [6] 侯启军,赵占银,黄志龙.松辽盆地深盆油藏门限及勘探潜力[J].石油勘探与开发,2011,38(5):523-529.  
HOU Q J, ZHAO Z Y, HUANG Z L. Accumulation threshold and exploration potential of deep basin oil in the Songliao Basin[J].Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5):523-529.
- [7] 李玉喜,张金川.我国非常规油气资源类型和潜力[J].国际石油经济.2011,19(3):61-67.  
LI Y X, ZHANG J C. Types of unconventional oil and gas resources in China and their development potential[J]. International Petroleum Economics, 2011,19(3):61-67.
- [8] 张林晔,李政,朱日房,等.济阳拗陷古近系存在页岩气资源的可能性[J].天然气工业,2008,28(12):26-29.  
ZHANG L Y, LI Z, ZHU R F, et al. Resource potential of shale gas in Paleogene in Jiyang depression[J]. Natural Gas Industry, 2008,28(12):26-29.
- [9] 赵文智,董大忠,李建忠,等.中国页岩气资源潜力及其在天然气未来发展中的地位[J].中国工程科学,2012,14(7):46-52.  
ZHAO W Z, DONG D Z, LI J Z, et al. The resource potential and future status in nature gas development of shale gas in China[J]. China Engineering Science, 2012,14(7):46-52.
- [10] LOUCKS R G, RUPPEL S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007,91(4):579-601.
- [11] HAMMES U, HAMLIN H S, EWING T E. Geologic analysis of the Upper Jurassic Haynesville shale in east Texas and west Louisiana[J].AAPG Bulletin, 2011, 95(10):1643-1666.
- [12] 姜在兴,梁超,吴靖,等.含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J].石油学报,2013,34(6):1031-1039.  
JIANG Z X, LIANG C, WU J, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [13] 张金川,姜生玲,唐玄,等.我国页岩气富集类型及资源特点[J].天然气工业,2009,29(12):109-114.  
ZHANG J C, JIANG S L, TANG X, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2009,29(12):109-114.
- [14] 郭旭升,胡东风,李宇平,等.海相和湖相页岩气富集机理分析与思考:以四川盆地龙马溪组 and 自流井组大安寨段为例[J].地学前缘,2016,23(2):18-28.  
GUO X S, HU D F, LI Y P, et al. Analyses and thoughts on accumulation mechanisms of marine and lacustrine shale gas:

- A case study in shales of Longmaxi Formation and Da'anzhai section of Ziliujing Formation in Sichuan Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 18-28.
- [15] 杨超, 张金川, 唐玄. 鄂尔多斯盆地陆相页岩微观孔隙类型及对页岩气储渗的影响[J]. *地质前缘*, 2013, 20(4): 240-250.  
YANG C, ZHANG J C, TANG X. Microscopic pore types and its impact on the storage and permeability of continental shale gas, Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 240-250.
- [16] 朱彤, 龙胜祥, 王烽, 等. 四川盆地湖相泥页岩沉积模式及岩石相类型[J]. *天然气工业*, 2016, 36(8): 22-28.  
ZHU T, LONG S X, WANG F, et al. Sedimentary models and lithofacies types of lacustrine mud shale in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(8): 22-28.
- [17] 朱彤, 包书景, 王烽. 四川盆地陆相页岩气形成条件及勘探开发前景[J]. *天然气工业*, 2012, 32(9): 16-21.  
ZHU T, BAO S J, WANG F. Pooling conditions of non-marine shale gas in the Sichuan Basin and its exploration and development prospect [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(9): 16-21.
- [18] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 1-11.  
YANG H, LI S X, LIU X Y. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 1-11.
- [19] 匡立春, 胡文暄, 王绪龙, 等. 吉木萨尔凹陷芦草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 L C, HU W X, WANG X L, 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.
- [20] 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 X F, WANG L J, JIANG L P. 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.
- [21] 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 J, LIU L J, HUANG Y, et al. Sedimentary characteristics of Middle-Upper Permian in Jimusaer sag of Junggar Basin [J]. *Geology of Xinjiang*, 2003, 21(4): 412-414.
- [22] 高智梁, 康永尚, 刘人和, 等. 准噶尔盆地南缘芦草沟组页岩岩地质特征及主控因素[J]. *新疆地质*, 2011, 29(2): 189-193.  
GAO Z L, KANG Y S, LIU R H, 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.
- [23] 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 C Y, KUANG L C, GAO G, et al. Difference in hydrocarbon generation potential of the shaly source rocks in Jimusar Sag, Permian Lucaogou Formation [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 385-390.
- [24] 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 Y J, QI X F, CHENG X S, et al. Approach to sedimentary environment of Late Carboniferous-Permian in Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(6): 673-675.
- [25] 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 M, CHANG Q S. Diagenetic sequence and pore evolution of tight oil reservoirs in Lucaogou Formation in Jimusar sag [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2015, 45(s1): 866.
- [26] 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 C S, CHEN N G, YU C F, et al. Sedimentary characteristics of tight oil reservoirs in Permian Lucaogou Formation, Jimusar Sag [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(5): 528-533.
- [27] 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 C M, GUO Z N, TANG F P, 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.
- [28] 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 S H, SONG Y, XU H M, et al. Relationship between tectonic evolution and petroleum system formation: Taking the Jimusar sag of eastern Junggar Basin as an example [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(2): 149-153, 161.
- [29] 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 H S, CHEN H, BIAN B L. Structure modeling and geometry analysis in the western Fukang fault zone [J]. *Inner Mongolia Petrochemical*, 2012(15): 138-140.
- [30] 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 C Y, TAN Q, ZHANG J F, 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.
- [31] 蔡忠贤, 蔡华, 秦玉娟. 鄂尔多斯盆地南缘早古生代碳酸盐岩

高频沉积旋回分析[J].地球科学:中国地质大学学报,1997,22(5):504-510.

CAI Z X, CAI H, QIN Y J. High-frequency carbonate cycles of early Paleozoic in the southern margin of Ordos Basin [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1997,22(5):504-510.

[32] 邵雨,杨勇强,万敏,等.吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组沉积特征及沉积相演化[J].新疆石油地质,2015,36(6):635-641.

SHAO Y, YANG Y Q, WAN M, et al. Sedimentary characteristic and facies evolution of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015,36(6):635-641.

## Study on sedimentary microfacies of mixed fine-grained rocks in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin

LI Shu-qin<sup>1,2</sup>, YIN Sen-lin<sup>1,2</sup>, GAO Yang<sup>3</sup>, ZHANG Fang<sup>3</sup>, LI Ying-yan<sup>3</sup>, PENG Shou-chang<sup>3</sup>

(1. College of Geoscience, Yangtze University, Wuhan 434000, China;

2. Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

3. Research Institute for Exploration and Development of Xinjiang Oilfield Branch, Karamay 834000, China)

**Abstract:** The composition of the Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin is a key block for shale oil and gas exploration. It is of great significance to carry out the study of fine mixed rock sedimentary sequences and related research. Using core, thin section, scanning electron microscope, well logging curve, XRF, XRD and other data, combined with core phase and its combination analysis, log curve least squares fitting and lithology random simulation, etc., the sequence stratigraphic framework and sedimentary microfacies identification established a microfacies model of mixed fine-grained sediments in the study area. (1) Lucaogou Formation can be divided into 5 medium-term cycles, 9 short-term cycles and 33 ultra-short-term cycles. The medium-term cycle corresponds to the segment level, and the short-term cycle is equivalent to one sand group or small layer (including multiple single sand layers), and the ultra-short-term cycle generally corresponds to a single layer. (2) The target layer of the study area is a salt lake-delta sedimentary system with complex and variable lithology. Under the joint influence of mechanical, chemical, biological and other sedimentary effects, a mixed fine-grained rock formation composed of fine-grained clastic rocks, mudstones and carbonate rocks is formed. The sedimentary microfacies types of the reservoir mainly include sand dam, prodelta mud, sand bank, mixed bank, dolomitic flat and lacustrine mud. (3) The desert section of Lucaogou Formation in Jimsar Sag is mainly distributed in the Upper p2l22 and p2l12. The sedimentary model of terrigenous clastic-carbonate mixed fine-grained rocks in Lucaogou Formation is put forward. When the datum surface rises, the sedimentary environment changes from the delta outer leading sand dam and the shallow lake sand bank sediment to the shallow lake-semi-deep lake mixed bank and dolomitic flat sediment, and a large area of black gray mudstone is deposited as the datum surface continues to rise to the maximum accommodating space; When the datum is declining, the shallow lake-semi-deep lake mixed bank and dolomitic flat sediment are mainly developed. As the datum continues to decline, shallow lake subfacies sand bank and delta front sand dam deposits are developed.

**Key words:** Mixed rock; Sedimentary microfacies; Shale oil; Lucaogou Formation; Jimsar Sag

**Foundation items:** Supported by the National Natural Science Foundation for Young Scholar of China (Grant Nos.41502126, 41802123); The Open Foundation Project of Top Disciplines in Yangtze University (Grant No. 2019-YUGD26); The China National Science and Technology Major Project (Grant No. 2017ZX05008-006-004-002).