

DOI: 10.13745/j.esf.yx.2017-5-2

# 湖相细粒混合沉积岩岩石类型划分:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例

张少敏<sup>1</sup>, 操应长<sup>1,2,\*</sup>, 朱如凯<sup>3</sup>, 苾克来<sup>1,2</sup>, 王健<sup>1,2</sup>, 朱宁<sup>1</sup>, 户瑞宁<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

ZHANG Shaomin<sup>1</sup>, CAO Yingchang<sup>1,2,\*</sup>, ZHU Rukai<sup>3</sup>, XI Kelai<sup>1,2</sup>, WANG Jian<sup>1,2</sup>, ZHU Ning<sup>1</sup>, HU Ruining<sup>1</sup>

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

2. Evaluation and Detection Technology Laboratory of Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

ZHANG Shaomin, CAO Yingchang, ZHU Rukai, et al. Lithofacies classification of fine-grained mixed sedimentary rocks in the Permian Lucaogou Formation, Jimsar sag, Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4): 198-209

**Abstract:** In this study, lithofacies types and characteristics were analyzed in detail through examination of the tight fine-grained sedimentary rocks of Permian Lucaogou Formation in the Jimsar sag, Junggar Basin by methods of core observation, thin section identification, SEM (scanning electron microscope) and physical property testing. The results show that: (1) The tight fine-grained sedimentary rocks have a complex mineral composition of multiple components including terrigenous detrital, pyroclastic debris and carbonate components, representing a type of transitional diamicton. (2) Based on factors such as component, sedimentary structure and organic carbon, the mixed sedimentary rock lithofacies can be divided into two types, namely the uni-component lithofacies and multi-components mixed lithofacies. The former is mainly massive lithofacies and the later consists of massive, stripped-lumpy and laminated lithofacies. (3) There are six major lithofacies types that can be identified in the Lucaogou Formation: massive micritic dolostone, massive silty dolarenite, massive tuffaceous siltstone, stripped tuffaceous dolostone, laminated silty/argillaceous tuffites and laminated dolomitic mudstone. Different lithofacies types have different reservoir qualities, pore-throat structures and reservoir spaces. And the massive tuffaceous siltstone, stripped tuffaceous dolostone and laminated silty tuffites are the favorable lithofacies.

**Key words:** mixed fine-grained sedimentary rock; lithofacies division; reservoir characteristic; Lucaogou Formation; Jimsar sag

**摘要:**通过岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜分析、物性测试等技术手段,以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密细粒沉积岩为研究对象,开展了岩相类型及特征的精细分析。研究结果表明:(1)致密细粒沉积岩矿物成分复杂、岩石组分多样,包括陆源碎屑组分、火山碎屑组分和碳酸盐组分,是一种过渡类型的混合沉积岩;(2)综合物质组分、沉积构造、有机质特征等因素,划分细粒混合沉积岩岩相类型,主要包括单一组分岩相和多组分混

收稿日期:2017-01-05;修回日期:2017-04-27

基金项目:国家自然科学基金石油化工联合基金重点项目(U1762217);国家重点基础研究发展计划“973”项目(2014CB239002);中央高校基本科研业务费专项(15CX06009A)

作者简介:张少敏(1989—),女,博士研究生,石油地质学专业。E-mail:zhangshaomin0813@126.com

\*通讯作者简介:操应长(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事沉积学及油气储层地质学方面的教学与科研工作。E-mail:cyc8391680@163.com

杂岩相两种类型,每一类岩相具有多种沉积构造,包括块状、条带-团块状和纹层状等类型;(3)研究区主要发育块状泥晶云岩相、块状粉砂质砂屑云岩相、块状凝灰质粉砂岩相、条带状含凝灰云岩相、纹层状粉砂质/泥质沉凝灰岩相和纹层状云质泥岩相等,不同岩相类型的储集物性、孔喉结构特征以及储集空间类型存在差异,其中块状凝灰质粉砂岩相、条带状含凝灰云岩相和纹层状粉砂质沉凝灰岩相为最有利岩相类型。

关键词:细粒混合沉积岩;岩相划分;储集特征;芦草沟组;吉木萨尔凹陷

中图分类号:P618.130.21 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2018)04-0198-12

随着非常规油气勘探开发不断取得突破,油气勘探逐渐向湖盆中心推进,湖相细粒混合沉积岩分布广泛,地质资源量大,已成为油气地质研究的热点领域<sup>[1-2]</sup>。近年来,在我国准噶尔盆地二叠系、柴达木盆地古近系—新近系、四川盆地侏罗系、渤海湾盆地古近系沙河街组、酒西盆地白垩系等湖相混合沉积岩以及美国威斯利顿盆地 Bakken 组和墨西哥湾盆地 Eagleford 等海相混合沉积岩的勘探中取得重大突破<sup>[1-7]</sup>。随着国内外学者对细粒混合沉积岩及储层研究的不断深入,在细粒混合沉积岩的基本特征<sup>[8-12]</sup>、沉积成因<sup>[13-14]</sup>、分布特征<sup>[15-16]</sup>及致密储层特征<sup>[17-19]</sup>等方面取得了重要进展。这些成果认识丰富了细粒沉积岩理论,对页岩油(气)及致密油(气)的勘探和开发具有重要的指导意义,但是在细粒混合沉积岩的精细岩相类型划分、微观结构剖析、储层特征等方面尚显薄弱,并且现有的研究认识存在争议。

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组由陆源碎屑、湖相碳酸盐及火山物质混杂而成,是一种矿物成分复杂、岩石类型多样的细粒混合沉积岩。近年来,作为致密油储层勘探开发的典型区块,取得了重要进展,多口井获得工业油流<sup>[20-21]</sup>。但是,该区细粒混积岩的基础地质研究较为薄弱,尤其是岩石类型精细分类及储层特征研究的不足直接制约了此类“源储一体”型致密储层的勘探。因此,以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒混合沉积岩为研究对象,结合最新的勘探开发成果,对细粒混合沉积岩的岩石类型及主要岩相的宏观和微观特征进行研究,这对该区细粒混积岩致密储层油气的勘探和开发具有重要指导意义。

## 1 区域地质概况

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部隆起的西南缘,北以吉木萨尔断裂为界,南以三台断裂为界,西以老庄湾断裂和西地断裂为界,向东逐渐过渡为古西凸起,为一个中石炭统褶皱基底上沉积起来的西深东浅、西断东超的箕状凹陷(图 1),构造单元面积

1 278 km<sup>2</sup><sup>[10,22-23]</sup>。吉木萨尔凹陷自下而上发育石炭系巴塔玛依内山组(C<sub>2b</sub>),二叠系井井子沟组(P<sub>2j</sub>)、芦草沟组(P<sub>2l</sub>)、梧桐沟组(P<sub>3wt</sub>),三叠系韭菜园组(T<sub>1j</sub>)、烧房沟组(T<sub>1s</sub>)、克拉玛依组(T<sub>2k</sub>),侏罗系八道湾组(J<sub>1b</sub>)、三工河组(J<sub>1s</sub>)、西山窑组(J<sub>2x</sub>)、头屯河组(J<sub>2t</sub>)、齐古组(J<sub>3q</sub>),白垩系吐谷鲁群(K<sub>1tg</sub>),古近系(E),新近系(N),第四系(Q)等地层。

吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组处于单斜背景,地层厚度大、分布广,表现为源储一体与源储互层的良好源储匹配关系,近源成藏或源内成藏,纵向上整体含油,是凹陷内主要的烃源岩层系和致密油勘探层段<sup>[19]</sup>。二叠系芦草沟组沉积时期是典型的欠补偿的咸化湖盆,气候干旱,沉积物粒度较细,且该时期湖盆周围火山活动频繁<sup>[24]</sup>,形成的细粒沉积岩具有多组分来源混合沉积的特征。目前,全区共完钻 40 余口井,并在全区范围内发育上、下两套“甜点”段,均获得工业油流,其中下“甜点”段平均厚度为 38.4 m,上“甜点”段平均厚度为 24.8 m,具有良好的勘探开发前景。

## 2 细粒混合沉积岩石分类

目前,国内学者主要针对陆相湖盆发育的陆源碎屑与碳酸盐组分混合的混积岩进行研究<sup>[3, 25-27]</sup>,国外学者主要研究海相硅质碎屑与碳酸盐组分的混合沉积<sup>[28-29]</sup>,对混合沉积岩的分类和命名仍存在分歧。而研究区吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组发育陆源碎屑、火山物质和盆内碳酸盐三种组分混合沉积的复杂岩石类型,丰富了陆相湖盆混积岩的类型。本文基于对细粒混合沉积岩矿物学、岩石学等特征的详细观察和研究,提出了吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组混合沉积岩的分类方案。

在吉木萨尔凹陷致密储层勘探中,芦草沟组取心连续,重点井段取心长,其中重点井吉 174 井、吉 251 井分别在二叠系芦草沟组全井段连续取心 256 m、102.1 m,薄片、扫描电镜、X 射线衍射、荧光薄片、有

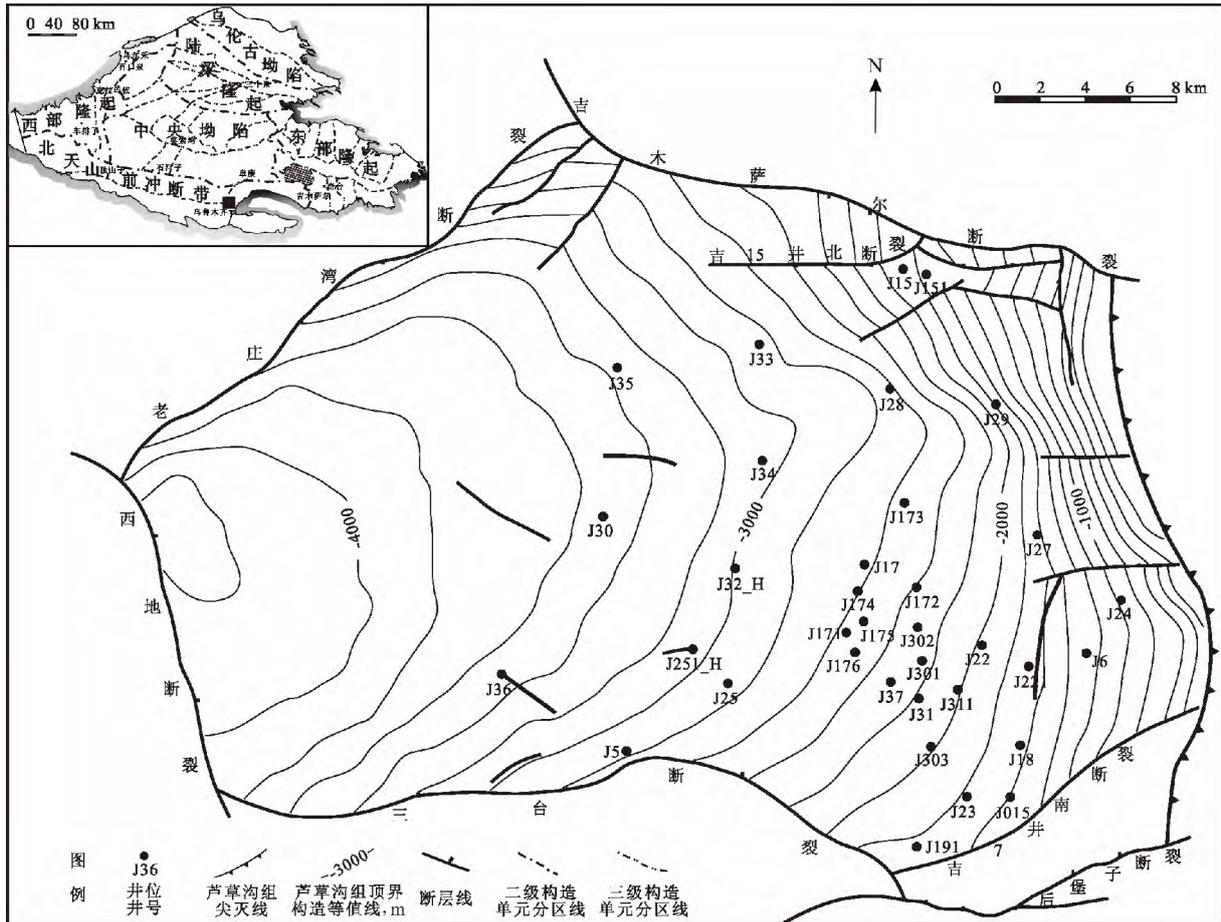


图1 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组构造概况

Fig.1 Geological setting of the Permian Lucaogou Formation in Jimsar sag

机地化等分析测试资料齐全,纵向连续性好,为开展工区细粒混合沉积岩岩石类型及特征研究提供了丰富的资料保障。

2.1 矿物成分特征

薄片鉴定及 X 射线衍射全岩矿物分析结果表明,吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒混积岩矿物成分多样,主要包括长石、石英、白云石、方解石、黏土矿物、黄铁矿及沸石等多种矿物类型(图 2),并具有多种产状和成因来源。吉 174 并在芦草沟组全井段取心,根据其连续取样的 235 块样品的 X 射线衍射数据绘制了二叠系芦草沟组岩石矿物成分纵向分布特征图(图 2),可见,芦草沟组纵向上各类矿物含量差异较大,并随深度频繁变化,表明研究区具有极其复杂的岩石类型及组合规律。

研究区长石平均含量最高,包括钾长石和斜长石,其中钾长石含量较少,分布范围为 0~23.4%,主要集中在 0~5%,平均为 4.0%;斜长石以钠长石为主,相对含量变化范围广,在 0~73.5% 都有分布,主

要集中在 10%~35%,平均为 24.6%(图 3)。研究区长石主要存在四种组构类型,即陆源长石碎屑颗粒、岩屑中的长石矿物、火山来源的钠长石晶屑以及充填于孔隙中的自生钠长石晶体。其中,通过显微镜薄片鉴定及扫描电镜观察分析,陆源长石碎屑以单晶颗粒存在,具有一定的磨圆,表面略污浊,粒度总体上较其他类型长石大;研究区大量发育的中基性火山岩岩屑中富含长石斑晶,以钠长石为主,其次沉积岩岩屑也常见长石矿物;钠长石晶屑分散于火山灰中,晶体磨圆差、棱角-次棱角状且较为干净,颗粒较小。石英相对含量分布在 4.6%~52%,主要集中在 15%~30%,平均含量为 20.81%(图 3)。通过薄片及扫描电镜观察,研究区石英主要有陆源石英碎屑颗粒、自生石英、生物来源石英及火山来源的石英晶屑四种存在形式。其中,陆源石英碎屑颗粒具有一定的磨圆,主要存在于研究区的粉细砂岩中;自生石英沉淀包括充填孔隙自生石英单晶和石英自生加大边;研究区生物来源石英主要为放射虫等产生

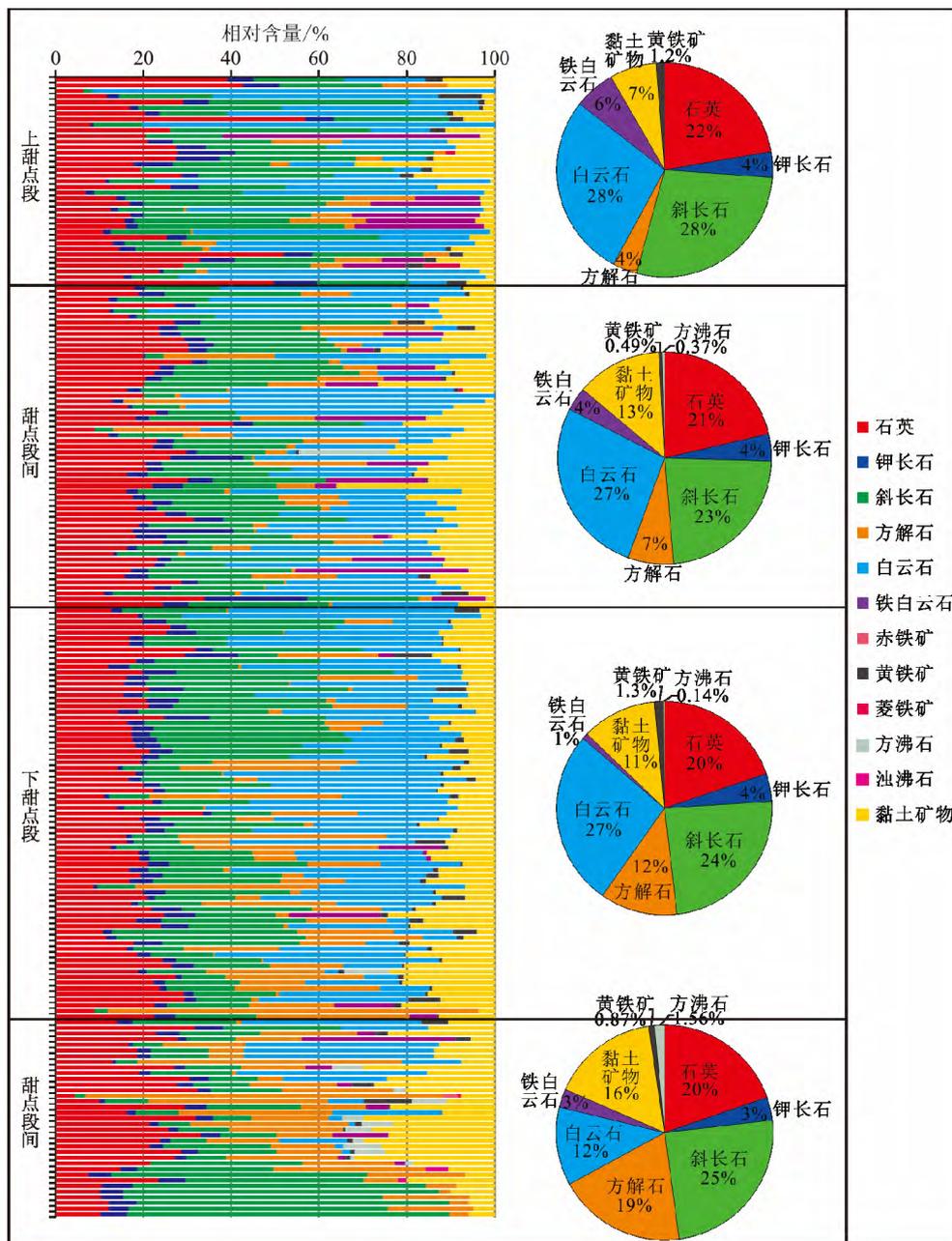


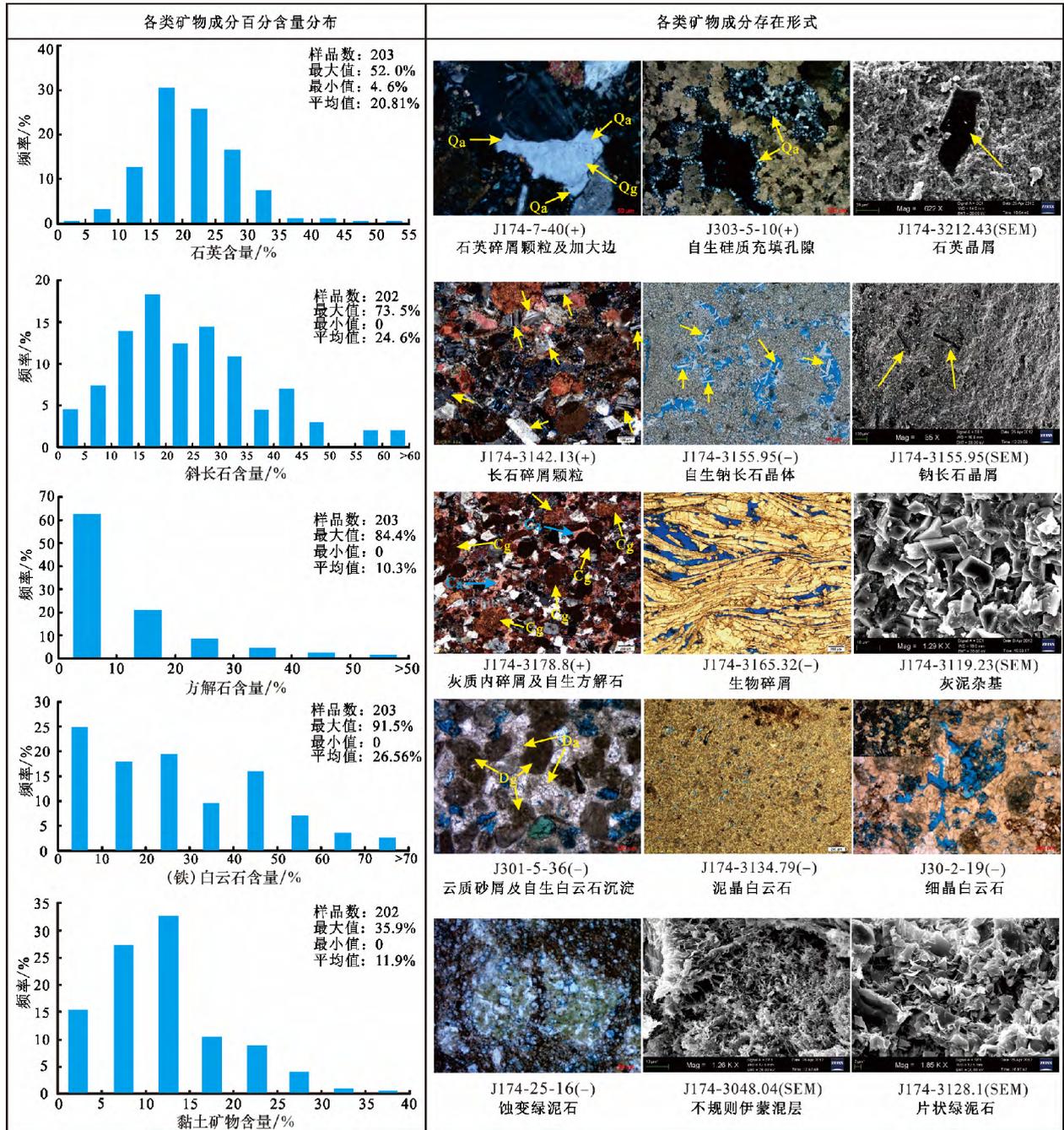
图 2 二叠系芦草沟组岩石矿物成分纵向分布特征

Fig.2 Vertical distributions of mineral composition of rocks in Permian Lucaogou Formation

的生物硅,常以板条状联晶聚集形式存在;火山凝灰质中的石英晶屑则较为干净,呈棱角-次棱角状,以斑晶形态分布于火山灰中或存在于火山岩岩屑中。研究区方解石相对含量变化较大,在 0~84.4% 均有分布,主要集中在 0~20%,平均为 10.3%(图 3)。方解石可见灰质岩屑或内碎屑、灰泥杂基及自生方解石沉淀等类型,同时可见灰质生物碎屑。研究区白云石分布广泛、含量高,相对含量变化较大,在 0~91.5% 区间都有分布,主要集中在 0~50%,平均为 26.56%(图 3)。白云石主要存在云质岩屑或内

碎屑、自生白云石沉淀以及云泥等形式。研究区黏土矿物含量较低,但类型多样,相对含量主要集中在 0~15%,平均为 11.9%(图 3),主要包括蒙皂石、伊蒙混层、绿蒙混层、少量伊利石与绿泥石。黄铁矿在研究区普遍存在,但含量低,分布范围在 0~11%,平均为 1.0%。研究区以自生黄铁矿为主,包括莓球状、纤柱状和它形粒状黄铁矿三种产状。

该区复杂的矿物成分及含量变化与其他盆地的细粒沉积岩存在明显差异,反映了研究区为陆源碎屑、化学沉积和火山碎屑混合沉积的过渡型岩类。



Qg—碎屑石英颗粒; Qa—自生石英晶体; Cg—灰质内碎屑; Ca—自生方解石沉淀; Dg—云质砂屑/内碎屑; Da—自生白云石沉淀。

图3 二叠系芦草沟组主要矿物含量分布特征及存在形式

Fig.3 Distribution of different rock components contents and main existing form

### 2.2 岩石类型划分

研究区二叠系芦草沟组细粒混积岩岩石组分复杂,通过岩心及薄片观察分析,研究区细粒沉积岩主要由陆源碎屑、内源碳酸盐以及火山碎屑三种来源的组分混合沉积。根据吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒混积岩的特征,在岩石类型划分时遵循以下原则:(1)界线清晰,区分标志明显,表达含义明确;(2)考虑各组分的结构特征,即陆源碎屑明确粒级,

如粉砂、泥等,碳酸盐岩体现晶粒及结构组分特征,如泥晶与粉晶、砂屑、生物碎屑等;(3)尊重传统的岩石学命名原则,在此基础上,体现湖盆细粒混积岩的成分多样性。在前人对混合沉积岩分类命名的基础上<sup>[10,30]</sup>,将陆源碎屑含量、碳酸盐含量和火山碎屑含量分别作为三个端员,遵循三级命名原则,根据组分含量(10%、25%、50%),对研究区细粒混合沉积岩进行分类(图4)。

利用薄片分析鉴定, 定量统计岩石中陆源碎屑、火山碎屑和碳酸盐的相对含量, 将结果在分类三角图上投点(图4), 得到二叠系芦草沟组细粒沉积岩的主要岩石类型。研究区以碳酸盐岩类、火山碎屑岩类和混积岩类为主, 在芦草沟组整体发育。其中白云岩类是研究区最为发育的岩石类型, 火山碎屑岩在下甜点段集中发育; 其次为陆源碎屑岩, 主要发育在上甜点段, 且陆源碎屑岩以粉砂岩薄层为主。

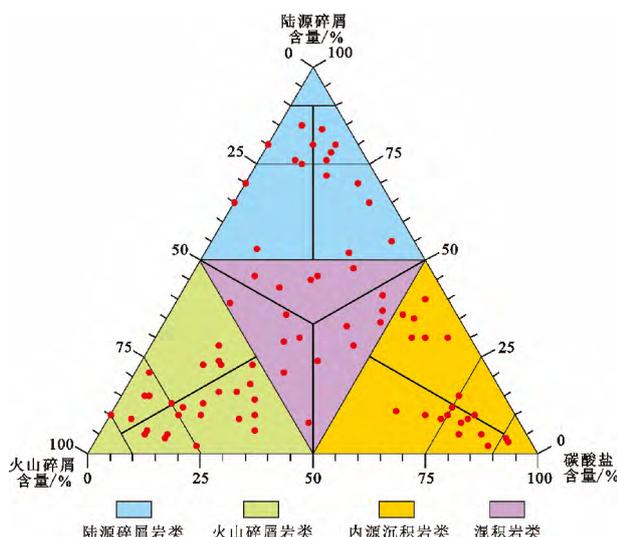


图4 芦草沟组致密细粒沉积岩岩石类型三角图解

Fig.4 Rock types triangle diagram of fine-grained sedimentary rock in Permian Lucaogou Formation

### 3 致密细粒储层岩相类型

国外针对细粒沉积岩的研究以海相泥页岩及碳酸盐岩为主, 多通过矿物成分、原始沉积构造和生物扰动构造等特征重建原始沉积环境<sup>[8,31-34]</sup>, 如 Loucks 等<sup>[32]</sup>根据矿物成分、结构、生物及层理构造等特征对海相泥页岩进行岩相划分。相对于海相泥页岩, 陆相湖盆细粒混积岩具有矿物成分及产状多样、岩石类型复杂、物源丰富、垂向叠置关系多样以及受气候变化更为敏感等特征, 这也使得海相泥页岩的岩相划分方案不适用于陆相湖盆细粒混积岩<sup>[12,35]</sup>。因此, 针对吉木萨尔凹陷芦草沟组细粒混合沉积岩, 选择能够反映沉积条件和沉积环境的岩石学特征及古生物学标志作为岩相划分的标志: (1) 矿物成分和岩石组分是导致岩石类型多样的关键因素; (2) 沉积构造是对沉积介质的应力及流动状态的直观反映, 对沉积构造的详细剖析有助于对沉积事件、湖盆气候变化

等沉积环境进行研究; (3) 有机质组分在岩石中普遍存在, 对源储一体的致密细粒沉积岩的成岩作用和含油性具有重要影响。因此, 综合考虑以上三个划分依据, 结合气候变化与事件性沉积等因素, 对吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积岩进行岩相划分。

#### 3.1 沉积构造特征

研究区纹层构造丰富, 通过岩心观察及薄片鉴定, 芦草沟组细粒沉积岩主要发育以下单一纹层类型(图5)。

(1) 陆源碎屑富集纹层。它主要包括粉砂级长英质纹层和黏土纹层。其中, 粉砂级长英质纹层厚度较大, 约为 0.2~1 mm, 常含黏土矿物和自生碳酸盐矿物, 纹层底部多为突变, 与上部纹层突变或粒序渐变接触, 常受底流影响具有侵蚀界面; 黏土纹层在研究区较少, 厚度较薄, 约为 0.02~0.8 mm, 黏土纹层中纹理特征不明显, 或呈断续纹层状, 常见黏土纹层与富有机质黏土纹层互层。该类纹层为陆源向湖盆进积的产物, 受沉积物重力流或底流的影响。

(2) 碳酸盐富集纹层。纹层较厚, 单个纹层厚度约为 0.2~1 mm, 以密集的泥晶白云石为主, 少量微晶白云石层, 纹层平直或呈条带状、透镜状, 或由碳质定向排列形成碳酸盐纹层, 形成于低能、安静环境中。

(3) 火山碎屑富集纹层。纹层厚度为 0.1~0.5 mm, 主要由玻屑和长石、石英晶屑组成, 纹层较为平直或透镜状, 为季风或水流携带中基性火山物质在湖盆中沉积形成。火山碎屑富集纹层包括粉级凝灰质(粒径为 0.1~0.01 mm)和细火山尘纹层两类(粒径<1/32 mm), 整体上该类纹层孔隙较发育。

#### 3.2 细粒混合沉积岩分类

吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为一套由陆源碎屑、火山物质与内源碳酸盐组成的混合沉积岩, 针对不同组构类型的岩石, 其成分、结构与沉积构造各有差异, 对于单一组分岩石类型, 主要为块状构造, 而对于多组分混合的岩石类型, 主要包括块状均一混杂的组构型混合、条带-团块状分布的断续型混合及成层偶合的纹层型混合(图6)。

##### 3.2.1 单一组分沉积岩石类型

由单一来源的组分(含量>90%)形成的岩石, 多为较均一的块状, 厚度较大, 组分均匀分布, 在研究区以块状泥晶云岩最为常见, 其次为块状沉火山尘凝灰岩, 少量块状黏土岩和粉砂岩。此类岩石有机质含量较少, 可见少量有机质碎片分散或定向分布。

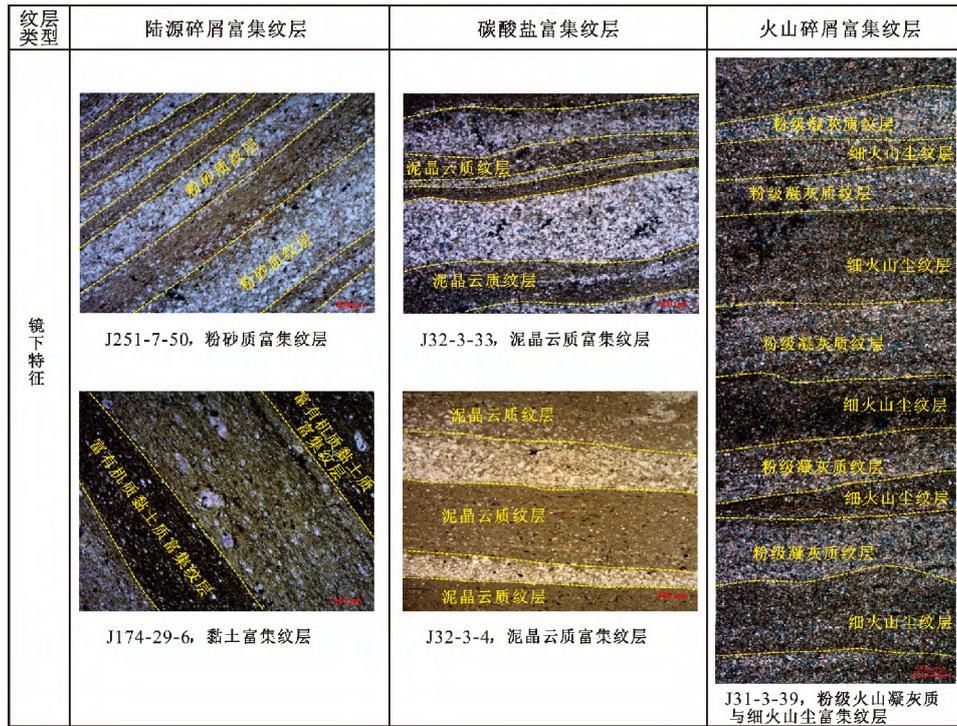


图5 二叠系芦草沟组细粒混合沉积岩纹层特征

Fig.5 Lamina characteristics of fine-grained mixed sedimentary rocks in in Permian Lucaogou Formation

3.2.2 多组分混积岩石类型

多组分混积岩主要为火山物质、碳酸盐以及陆源碎屑组分两两混积或三者混积的过渡类型。如果为两种组分混积,则其中一种组分含量为 50%~90%,另一种组分含量为 10%~50%;如果是三种组分混积,则包括一种组分含量大于 50%且另外两种组分含量均为 10%~50%和每种组分的含量均小于 50%两种情况。

(1)均一块状多组分组构型混合。它包括三种或其中两种不同来源的物质组分均匀分散混积:  
 ①火山物质与云质混积。在沉降过程中,火山灰形成颗粒和火山玻璃集簇,以集合体形式沉降,在岩石中表现为火山碎屑团块<sup>[36]</sup>。火山物质与白云石均匀混杂的岩相主要包括两种产状,其一为泥晶云质或云质砂屑夹杂火山碎屑团块,另一种为火山碎屑与白云石分散混杂的形式,研究区主要形成块状含凝灰云岩和块状云质沉凝灰岩。  
 ②陆源碎屑与云质混积。云质包括云质砂屑和泥晶白云石两种形式,因此,此类块状混积岩主要包括云质砂屑与粉砂颗粒混积、泥晶白云石与粉砂碎屑颗粒混积、泥晶白云石与黏土混积等三种类型。根据组分相对含量的差异,该类岩相主要形成块状云质粉砂岩、块状粉砂质砂屑云岩、块状粉砂质云岩和块状云质泥岩。  
 ③火

山物质与陆源碎屑混积。粉砂级或泥级碎屑颗粒与火山物质分散混积,或火山物质呈团块状分散于粉砂颗粒间,其中火山物质粒度较细,主要为火山凝灰质。根据两种组分相对含量的多少,此类混积岩主要形成块状粉砂质沉凝灰岩、块状泥质沉凝灰岩、块状凝灰质粉砂岩及块状凝灰质泥岩 4 种类型。  
 ④陆源碎屑、火山物质及云质混积。其为陆源碎屑、火山凝灰质和云质三种组分分散混杂的组构型混合,少量火山碎屑呈团块状。根据三种组分相对含量的差异,该类混积岩包括块状火山碎屑型混积岩、块状陆源碎屑型混积岩和块状碳酸盐型混积岩。

(2)条带-团块状多组分断续型混合。火山碎屑常呈团块状平行排列、顺层沉积,或呈较宽的条带状,夹于泥晶云质中,形成断续条带状的含凝灰云岩。由于浊流、底流等水动力的变化,陆源输入增多,粉砂质陆源碎屑以透镜状或团块状的小型砂体分布在泥晶云质中,根据陆源输入和盆内碳酸盐沉积的相对多少,形成断续层状粉砂质云岩或云质粉砂岩相。

(3)成层偶合状多组分纹层型混合。由于季节变化、火山活动、物源输入等原因,陆源碎屑物质、火山物质的间歇性频繁注入,导致了碳酸盐质纹层、火

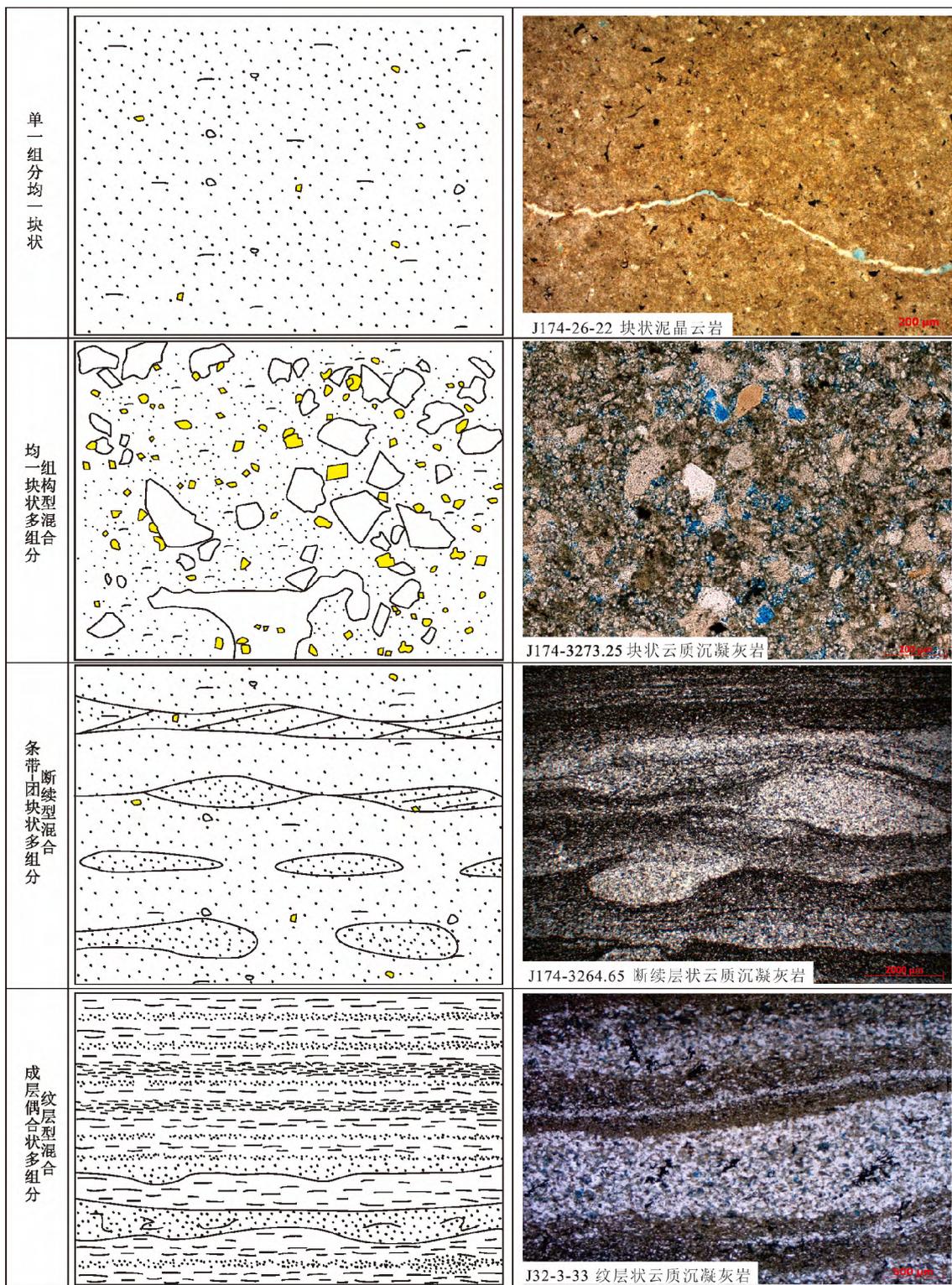


图 6 细粒混合沉积岩相分类原则

Fig.6 Lithofacies division of fine-grained mixed sedimentary rocks

山碎屑、陆源粉砂质和泥质纹层频繁交替出现, 沉积韵律明显。多组分纹层型混积岩在研究区最为发育, 纹层多呈平直状或微波状偶合出现, 可见两种或三种组分构成的二元纹层结构和三元纹层结构类

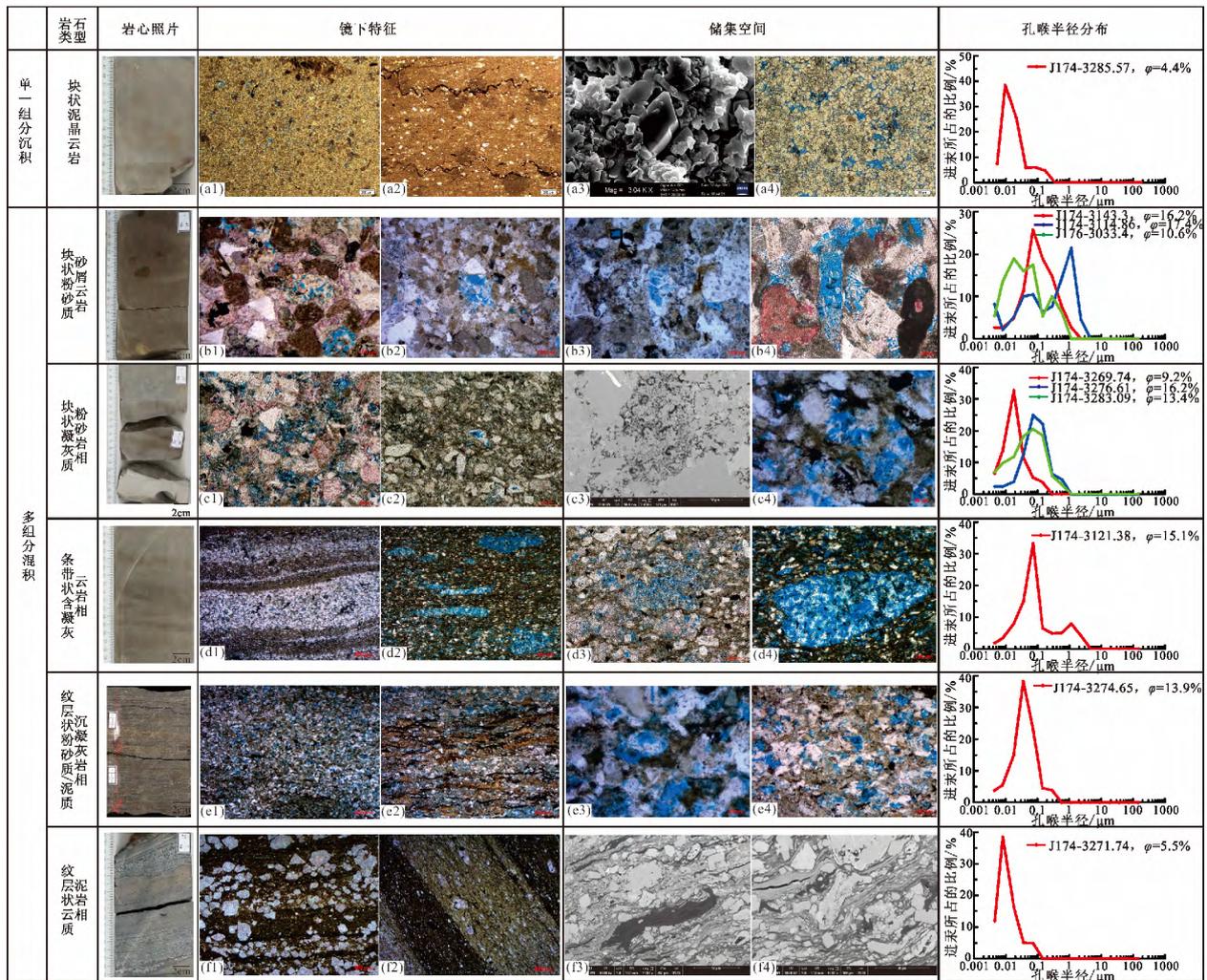
型。二元纹层结构主要包括碳酸盐(云质)纹层+火山碎屑纹层、陆源粉砂级颗粒+细/粉级凝灰质纹层、黏土+凝灰质纹层、陆源粉砂级颗粒+碳酸盐纹层等。三元纹层结构在研究区较为少见。



(1) 块状泥晶云岩相。该岩相在芦草沟组广泛发育, 上甜点段尤为发育。岩心为灰色-深灰色, 整体为均一块状, 压实作用较强, 缝合线发育。较纯的泥晶云岩致密程度高, 溶蚀作用弱, 储集空间不发育, 少量晶间微孔, 少量粉晶云岩中可见重结晶形成的晶间孔(图 7a1~4)。有机碳含量中等, 总体上块状泥晶云岩相储层较为致密, 物性较差, 孔隙度为 1.2%~5.8%, 平均为 4.9%, 渗透率平均为  $0.049 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 孔喉半径小, 主要分布在  $0.004 \sim 0.03 \mu\text{m}$ , 含油性较差, 以荧光-油迹为主。

(2) 块状粉砂质砂屑云岩相。该岩相集中发育

于芦草沟组二段( $P_2L_2$ )的上甜点段, 岩心呈浅灰色、均一块状, 镜下观察显示, 云质砂屑与粉砂级长英质碎屑混合, 少量凝灰质; 分选好, 云质砂屑磨圆较好, 粉砂质陆源碎屑磨圆较差, 呈次棱角-次圆状; 有机碳含量低, 主要为贫有机质岩石类型。当粉砂碎屑含量增高时, 逐渐向砂屑粉砂岩过渡。压实作用中等, 长石及凝灰质溶蚀较强, 粒间充填方解石胶结物, 储集空间为长石颗粒溶蚀形成的粒内孔隙及少量凝灰质强烈溶蚀的粒间孔(图 7b1~4), 储层物性好, 孔隙分布 10.6%~17.4%, 平均为 14.73%, 渗透率为  $(0.245 \sim 1.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 孔喉半径主要分布



(-) 单偏光; SEM—扫描电镜图像; BSEM—背散射图像。a1—泥晶白云石, J174-3134.79(-); a2—泥晶白云石, 缝合线发育, J174-3131.65(-); a3—白云石晶间孔, J174-3282.14(SEM); a4—白云石晶间孔, J174-3134.79(-); b1—块状粉砂质砂屑云岩, 碳酸盐胶结较强, J176-7-15(-); b2—岩屑溶蚀, 残余钠长石斑晶 J174-4-52(-); b3—凝灰质溶蚀孔, J174-4-52(-); b4—长石溶蚀孔, J174-3142.13(-); c1—凝灰质粉砂岩, 凝灰质溶蚀, J174-3308.18(-); c2—凝灰质粉砂岩, J174-3274.65(-); c3—凝灰质溶蚀孔, J174-27-31(BSEM); c4—长石及凝灰质溶蚀孔, J174-5-45(-); d1—条带状云质凝灰岩, J32-3-33(-); d2—团块状凝灰质-云质混积岩, J303-5-15(-); d3—凝灰质溶蚀孔隙, J174-3319.96(-); d4—团块状凝灰质强烈溶蚀, J303-5-15(-); e1—纹层状粉砂质泥质凝灰岩, J174-6-8(-); e2—纹层状泥质沉凝灰岩, J37-3-8(-); e3—长石及凝灰质溶蚀孔隙, J174-6-8(-); e4—长石及凝灰质溶蚀孔隙, J37-3-8(-); f1—纹层状云质泥岩, 斑状方解石, J174-27-7(-); f2—纹层状云质泥岩, J174-29-6(-); f3—有机质孔隙, J174-29-11(BSEM); f4—微裂缝, J174-29-11(BSEM)。

图 7 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒混合沉积岩岩相类型及特征

Fig.7 Lithofacies and reservoir characteristics of fine-grained mixed sedimentary rocks in Permian Lucaogou Formation, Jimsar sag

在  $0.01 \sim 1.5 \mu\text{m}$ , 为研究区内含油性最好的一种岩相类型, 整体油斑-油浸。

(3) 块状凝灰质粉砂岩相。该岩相在研究区上下甜点体都较为发育, 岩心上总体为灰色-深灰色, 镜下可见火山碎屑与粉砂级碎屑颗粒分散混积, 少量黏土矿物, 有机碳含量较低。当陆源粉砂含量逐渐减少, 凝灰质含量增多时, 逐渐过渡为块状粉砂质沉凝灰岩相。镜下可见凝灰质及长石颗粒强烈溶蚀, 形成粒内、粒间孔隙, 为主要的储集空间(图 7c1~4), 储层物性较好, 孔隙度平均为  $12.93\%$ , 渗透率平均为  $0.077 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 孔喉半径主要分布在  $0.008 \sim 0.2 \mu\text{m}$  范围内, 含油性较好, 以油浸-油斑为主, 其次为油迹和荧光。

(4) 条带状含凝灰云岩相。该岩相在研究区分布广泛, 下甜点段尤为发育, 岩心呈灰色, 火山碎屑组分呈条带状或团块状与白云石混合, 火山碎屑团块具有定向排列性, 白云石以泥晶为主。泥晶云质条带溶蚀作用弱, 以压实作用和白云石重结晶作用为主; 火山碎屑条带或团块中凝灰质溶蚀作用及钠长石化较为强烈, 其溶蚀孔隙为主要的储集空间(图 7d1~4), 孔隙度平均为  $11.13\%$ , 渗透率平均为  $0.055 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 孔喉半径较大, 主要分布在  $0.02 \sim 0.1 \mu\text{m}$ , 含油性较好, 以油斑为主, 其次为油浸和油迹。

(5) 纹层状粉砂质/泥质沉凝灰岩相。该类岩相在研究区分布广泛, 主要集中发育在下甜点段, 纹层状粉砂质沉凝灰岩相整体呈深灰色, 由浅灰色纹层与深灰色纹层在纵向上频繁叠置构成, 深灰色纹层中常含黏土矿物使颜色较深。粒度较细, 火山碎屑组分含量高, 分选较好, 磨圆差, 以棱角-次棱角状为主。火山凝灰质与粉砂质或黏土呈纹层状互层, 有机碳含量中等, 少量为贫有机质岩石, 当粉砂质含量增多, 凝灰质含量减少时, 逐渐过渡为纹层状凝灰质粉砂岩。整体压实较弱-中等, 火山凝灰质易发生溶解, 因此该类岩石中长石及凝灰质溶蚀较强(图 7e1~4), 储集空间发育, 孔隙度平均  $13.1\%$ , 渗透率为  $0.094 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 孔喉半径分布范围主要为  $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ , 含油性以油斑为主。而纹层状泥质沉凝灰岩相粒度细, 孔隙不发育, 物性差, 孔隙度平均为  $4.17\%$ , 渗透率平均为  $0.0047 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 孔喉半径主要分布在  $0.005 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 。

(6) 纹层状云质泥岩相。该岩相集中发育在下甜点段, 岩心总体呈深灰色-黑色, 浅色纹层为云质, 可见云质呈星点状定向排列, 界线较清晰, 镜下可见

较大的晶型好的白云石定向排列; 暗色层位富含有机质的黏土层, 同时黏土层中含有泥晶白云石; 有机质含量高, 顺层分布, 为良好的生油岩。成岩作用以压实作用和重结晶作用为主, 溶蚀作用弱, 该类岩石孔隙不发育, 扫描电镜下可见有机质孔等纳米级孔隙(图 7f1~4)。

## 5 结论

(1) 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密储层矿物成分复杂、岩石组分多样, 是一种陆源碎屑、火山物质与内源碳酸盐沉积的过渡型混合沉积岩。根据三端员分类命名方案, 将研究区细粒沉积岩划分为陆源碎屑岩、火山碎屑岩、碳酸盐岩和混合沉积岩四大类。

(2) 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒混合沉积岩沉积构造多样, 纹层构造十分发育, 主要包括陆源碎屑富集纹层、火山碎屑富集纹层和碳酸盐富集纹层。根据组分、结构、沉积构造等特征, 研究区混合沉积岩主要分为单一组分岩相和多组分混杂岩相类型, 其中单一组分岩相主要为块状, 多组分混杂岩相主要包括块状多组分混杂岩相、条带-团块状多组分混杂岩相和纹层状多组分混杂岩相, 同时每一类多组分混杂岩相都包含陆源碎屑组分、火山碎屑组分、碳酸盐组分两两混杂或三者同时混杂的情况。

(3) 块状泥晶云岩相、块状粉砂质砂屑云岩相、块状凝灰质粉砂岩相、条带状含凝灰云岩相、纹层状粉砂质/泥质沉凝灰岩相和纹层状云质泥岩相是研究区主要发育的岩相类型。不同岩相类型的储集物性、孔喉结构特征以及储集空间类型存在差异。其中块状凝灰质粉砂岩相、条带状含凝灰云岩相和纹层状粉砂质沉凝灰岩相为最有利岩相类型。

衷心感谢各位专家及编辑在审稿过程中对本文提出的宝贵修改意见。

## 参考文献

- [1] 李建忠, 郑民, 张国生, 等. 中国常规与非常规天然气资源潜力及发展前景[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊1): 89-98.
- [2] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制, 地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
- [3] 李婷婷, 朱如凯, 白斌, 等. 混积岩储层特征: 以酒泉盆地青西凹陷下白垩统混积岩为例[J]. 沉积学报, 2015(2): 376-384.
- [4] 李新宁, 马强, 梁辉, 等. 三塘湖盆地二叠系芦草沟组二段混积岩致密油地质特征及勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,

- 2015, 42(6): 763-771.
- [5] 田继先, 曾旭, 易士威, 等. 咸化湖盆致密油储层“甜点”预测方法研究: 以柴达木盆地扎哈泉地区上干柴沟组为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(5): 193-201.
- [6] 潘仁芳, 陈美玲, 张超谟, 等. 济阳坳陷古近系沙河街组页岩有机质热演化特征[J]. 地学前缘, 2016, 23(4): 277-283.
- [7] 黄成刚, 袁剑英, 田光荣, 等. 柴西地区始新统湖相白云岩储层地球化学特征及形成机理[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 230-242.
- [8] SCHIEBER J. Significance of styles of epicontinental shale sedimentation in the Belt Basin, Mid-Proterozoic of Montana, USA[J]. *Sedimentary Geology*, 1990, 69: 297-312.
- [9] 李钜源. 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 616-620.
- [10] 葱克来, 操应长, 朱如凯, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层岩石类型及特征[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1495-1507.
- [11] 张少敏, 操应长, 朱如凯, 等. 雅布赖盆地小湖次凹细粒沉积岩岩相特征与沉积环境探讨[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 309-319.
- [12] 陈世悦, 张顺, 王永诗, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 198-208.
- [13] LAZAR O R, BOHACS K M, MACQUAKER J H S, et al. Capturing key attributes of fine-grained sedimentary rocks in outcrops, cores, and thin sections: nomenclature and description guidelines[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(3): 230-246.
- [14] 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 34-43.
- [15] PLINT A G, MACQUAKER J H S, VARBAN B L. Bed-load transport of mud across a wide, storm-influenced ramp: Cenomanian-Turonian Kaskapau Formation, western Canada foreland basin[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2012, 82(11): 801-22.
- [16] 孙龙德, 方朝亮, 李峰, 等. 油气勘探开发中的沉积学创新与挑战[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 129-136.
- [17] 梁超, 姜在兴, 杨锦婷, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相及储集空间特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 691-698.
- [18] 黄振凯, 陈建平, 王义军, 等. 松辽盆地白垩系青山口组泥岩微观孔隙特征[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 30-36.
- [19] 孙维凤, 宋岩, 公言杰, 等. 青西凹陷下白垩统下沟组泥云岩致密油储层特征[J]. 地质科学, 2015, 50(1): 315-329.
- [20] 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.
- [21] 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): 385-394.
- [22] 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.
- [23] 方世虎, 宋岩, 徐怀民, 等. 构造演化与含油气系统的形成[J]. 石油实验地质, 2007, 29(2): 149-153.
- [24] 毛翔, 李江海, 张华添, 等. 准噶尔盆地及其周缘地区晚古生代火山机构分布与发育环境分析[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2381-2391.
- [25] 冯进来, 曹剑, 胡凯, 等. 柴达木盆地中深层混积岩储层形成机制[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2461-2472.
- [26] 徐伟, 陈开远, 曹正林, 等. 咸化湖盆混积岩成因机理研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1804-1816.
- [27] 谭梦琪, 刘自亮, 沈芳, 等. 四川盆地回龙地区下侏罗统自流井组大安寨段混积岩特征及模式[J]. 沉积学报, 2016, 34(3): 571-581.
- [28] GARCÍA-HIDALGO J F, GIL J, SEGURA M, et al. Internal anatomy of a mixed siliciclastic-carbonate platform: the Late Cenomanian-Mid Turonian at the southern margin of the Spanish Central System[J]. *Sedimentology*, 2007, 54(6): 1245-1271.
- [29] FRANCIS J M, DUNBAR G B, DICKENS G R, et al. Siliciclastic sediment across the North Queensland margin (Australia): a Holocene perspective on reciprocal versus coeval deposition in tropical mixed siliciclastic-carbonate systems[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(7): 572-586.
- [30] 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.
- [31] MACQUAKER J H S, GAWTHORPE R. Mudstone lithofacies in the Kimmeridge Clay Formation, Wessex Basin, southern England: implications for the origin and controls of the distribution of mudstones[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1993, 63(6): 1129-1143.
- [32] 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.
- [33] HICKEY J J, HENK B. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett Shale, Mitchell 2 TP Sims well, Wise County, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 437-443.
- [34] APLIN A C, MACQUAKER J H S. Mudstone diversity: origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(12): 2031-2059.
- [35] 付金华, 邓秀芹, 楚美娟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组深水岩相发育特征及其石油地质意义[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 928-938.
- [36] MANZELLA I, BONADONNA C, PHILLIPS J C, et al. The role of gravitational instabilities in deposition of volcanic ash[J]. *Geology*, 2015, 43(3): 211-214.