

# 准噶尔盆地中拐凸起深层含浊沸石火山碎屑岩 优质储层特征及发育模式

闫文琦, 刘荷冲, 刘海磊, 吴涛, 王秋玉, 费李莹, 王仕莉

( 中国石油新疆油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000 )

**摘要:**以准噶尔盆地中拐凸起二叠系佳木河组凝灰质砂砾岩储层为研究对象,采用岩石薄片、铸体薄片和扫描电镜等方法,分析深层含浊沸石火山碎屑岩优质储层特征及主控因素,揭示储层发育模式。结果表明:中拐凸起二叠系佳木河组发育厚层凝灰质砂砾岩,为中孔—低渗储层,胶结物以浊沸石和绿泥石为主,发育浊沸石溶孔和原生粒间孔等。研究区发育矿物转化成因和火山物质蚀变成因两类浊沸石,其中由斜长石钠长石化形成的浊沸石分布广,对储层物性、含油性、骨架密度和溶蚀孔数等具有明显的建设性作用,是优质储层发育的重要条件;绿泥石包膜发育和酸性喷出岩岩屑体积分数高,是优质储层发育的基础。准噶尔盆地深层火山碎屑岩优质储层为“喷发—淋滤—蚀变”的全周期发育模式。该结果为准噶尔盆地深层火山碎屑岩及其他类似油藏的勘探开发提供参考。

**关键词:**准噶尔盆地;中拐凸起;佳木河组;火山碎屑岩;浊沸石;储层特征;主控因素;发育模式

**中图分类号:**TE122;P581

**文献标识码:**A

**文章编号:**2095-4107(2025)04-0001-13

## 0 引言

火山碎屑岩是一种介于火山熔岩和碎屑岩的岩石类型<sup>[1]</sup>,在形成过程中受沉积和火山喷发双重作用的控制,岩性、组分和构造较为复杂<sup>[2-3]</sup>。美国首次在圣金华盆地火山碎屑岩储层获得突破,火山碎屑岩储层逐渐被人们重视<sup>[4-5]</sup>。随勘探进程的不断加深,火山碎屑岩储层成为全球研究的热点<sup>[6]</sup>,在委内瑞拉马拉开波盆地和中国渤海湾盆地找到亿吨级油气藏<sup>[7-9]</sup>,展现火山碎屑岩良好的勘探潜力。中国在火山碎屑岩油藏的勘探取得良好成效,首次在准噶尔盆地西北缘石炭系火山碎屑岩储层中获工业油流<sup>[10]</sup>,之后相继在松辽盆地长岭断陷、渤海湾盆地太古宇潜山及海拉尔盆地乌南次凹等发现 14 个大中型火山碎屑岩油气田<sup>[11-13]</sup>。人们研究中国不同地区火山碎屑岩的岩性、分布及成岩作用等<sup>[14-15]</sup>,根据火山碎屑体积分数和成分等,可分为沉积火山碎屑岩(体积分数为 50%~90%)和火山沉积碎屑岩(体积分数为 10%~50%),其中火山沉积碎屑岩按粒级进一步分为凝灰质砾岩、砂砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩。平面上,火山碎屑岩主要分为东、西部两大类,东部火山碎屑岩为太平洋板块向大陆俯冲过程中形成的火山碎屑熔岩和熔结火山碎屑岩,以渤海湾盆地为代表<sup>[14]</sup>;西部火山碎屑岩以准噶尔盆地凝灰质砂砾岩储层为典型代表,与古亚洲洋运动紧密相关<sup>[16-18]</sup>。初始成岩作用、表生淋滤作用和埋藏成岩作用具有复杂性,是现今火山碎屑岩储层孔隙结构及物性优劣的关键<sup>[19]</sup>。

研究区中拐凸起南斜坡位于准噶尔盆地西北缘,二叠系佳木河组发育厚层凝灰质砂砾岩储层,ZJ9、ZJ6 和 ZJ13 等井在目的层获高产油气流,成为油田增储上产的重要区块<sup>[20]</sup>。中拐凸起佳木河组凝灰质砂砾岩储层明显富集浊沸石,出现致密化和胶结化,导致储层物性数据不准<sup>[21]</sup>。目前研究主要集中于浊沸石对储层物性的影响,对中拐凸起佳木河组火山碎屑岩储层特征及优质储层形成机制的研究处于空白阶段。

以研究区 17 口井岩心为研究对象,采用岩石薄片、铸体薄片和扫描电镜等方法,研究中拐凸起佳木河组火山碎屑岩优质储层特征及主控因素,揭示深层火山碎屑岩优质储层发育模式,为准噶尔盆地中拐地区和类似地区火山碎屑岩油气藏勘探提供参考。

收稿日期:2024-10-01;编辑:朱秀杰

基金项目:国家科技重大专项(2025ZD1400300);新疆维吾尔自治区“天山英才”科技创新领军人才支持项目(2023TSYCLJ0001)

作者简介:闫文琦(1995—),男,硕士,工程师,主要从事沉积储层方面的研究。

### 1 区域地质概况

准噶尔盆地是中国重要的含油气盆地之一,根据构造格局,平面上分为西部隆起、中央坳陷、陆梁隆起、乌伦古坳陷、东部隆起和南缘冲断带 6 个一级构造单元(见图 1(a))<sup>[22]</sup>。中拐凸起位于准噶尔盆地西部隆起,北部、西部与克百断裂带、红车断裂带毗连,东部与达巴松凸起相邻,整体沿北西—南东向展布,呈鼻隆形态。研究区中拐凸起南斜坡位于红车断裂带下盘,整体为二叠系—侏罗系的平缓鼻状构造,西北高,东南低,与中拐鼻隆近平行分布<sup>[23]</sup>。

中拐凸起现今的构造形态主要形成于二叠纪早期<sup>[24]</sup>,鼻状构造幅度较大;二叠纪末期,西部车排子凸起逐渐抬升,鼻状构造开始隐伏;三叠系、侏罗系继承二叠系沉积末期的构造格局,随车排子凸起持续抬升,鼻状构造消失;白垩系沉积时期,呈东南倾向的单斜形态,地层倾角为 3°~5°。由于研究区构造活动强烈,形成北西—南东向的逆断裂和近东西向的走滑断裂两大断裂系统<sup>[25]</sup>,不同小断裂之间相互切割,形成不同的断块,断块局部发育宽缓的鼻状构造。

中拐凸起北邻玛湖凹陷,南抵沙湾凹陷,东接盆 1 井西凹陷,是油气有利运聚区;自下而上发育石炭系(C),二叠系佳木河组(P<sub>1j</sub>)、风城组(P<sub>1f</sub>)、上乌尔禾组(P<sub>3w</sub>),三叠系百口泉组(T<sub>1b</sub>)、克拉玛依组(T<sub>2k</sub>)、白碱滩组(T<sub>3b</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>)和白垩系吐谷鲁群(K<sub>1tg</sub>)(见图 1(c))。中拐凸起发育三类油气藏,第一类为深层气藏,包含石炭系、二叠系风城组和佳木河

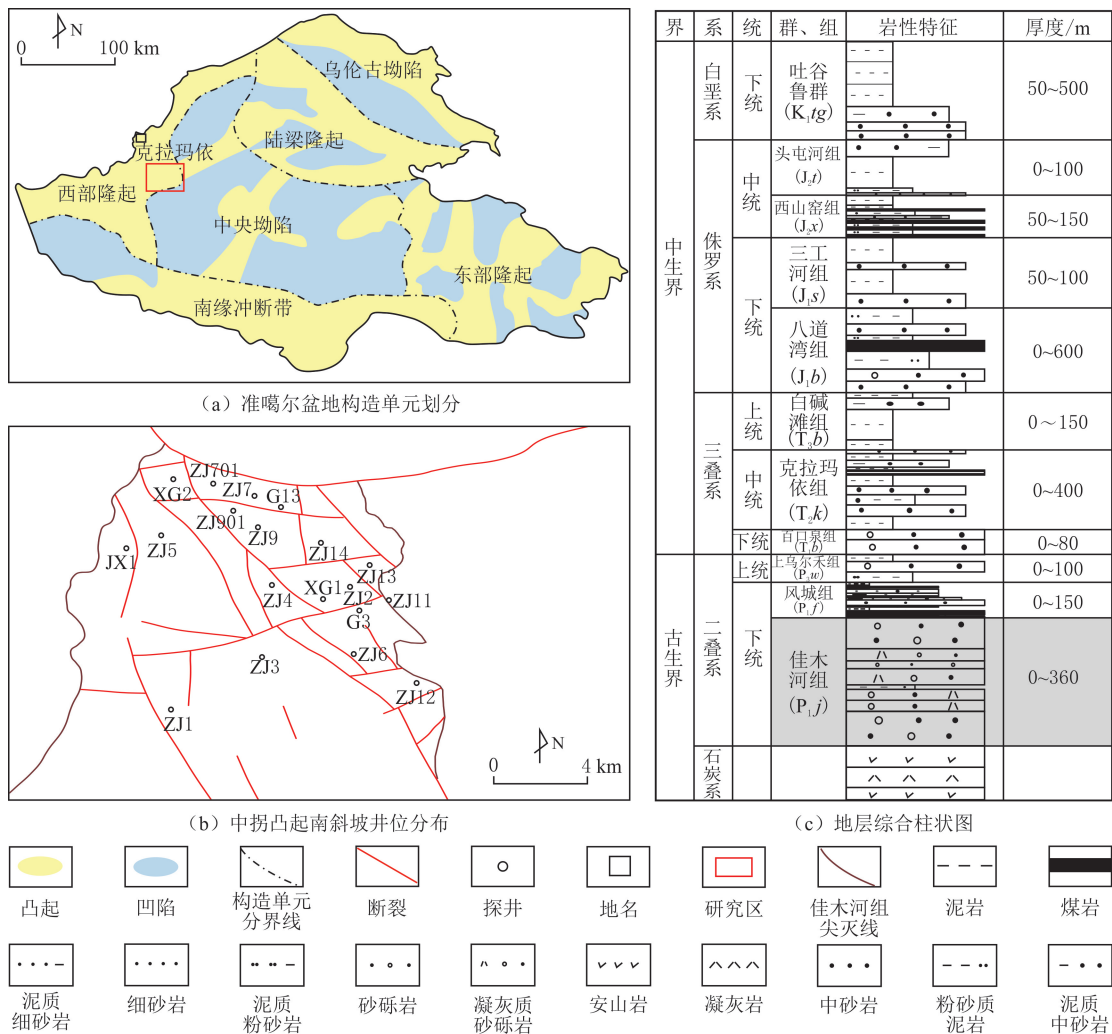


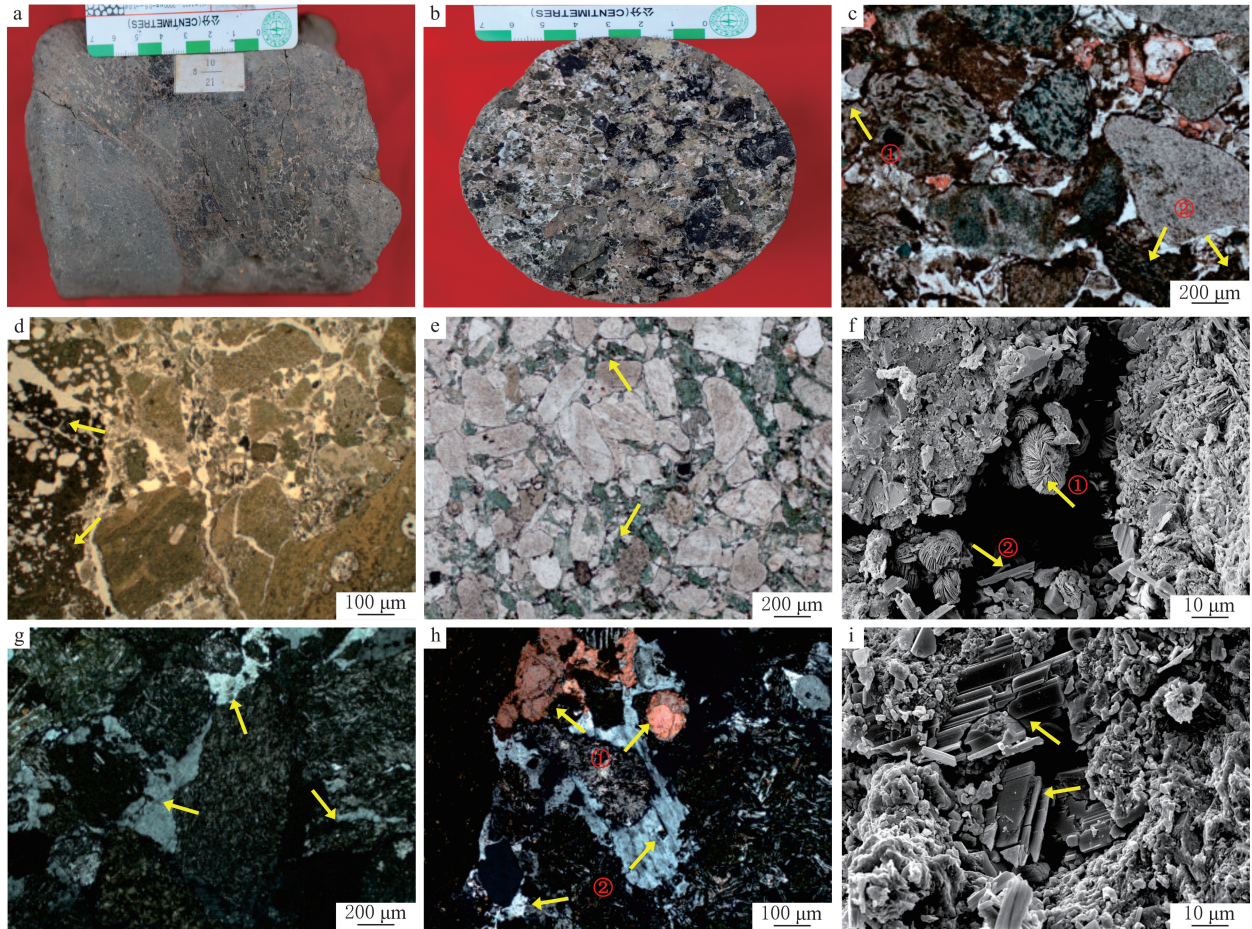
图 1 准噶尔盆地构造单元划分、中拐凸起南斜坡井位分布及地层综合柱状图  
 Fig.1 Tectonic unit division of the Junggar Basin, well location distribution on the southern slope of the Zhongguai Uplift and comprehensive stratigraphic columnar section

组;第二类为深层规模油藏,包含二叠系风城组、上乌尔禾组与三叠系百口泉组;第三类为浅层高效油藏,包含三叠系白碱滩组、侏罗系八道湾组和三工河组。目的层佳木河组岩性以凝灰质砂砾岩为主,夹部分砂砾岩,厚度为200~300 m。佳木河组 XG1 井区(见图 1(b))凝析气藏实现效益开发,接连部署的 ZJ14、ZJ13、ZJ9、ZJ7 等井获得重要突破,具备天然气规模成藏的有利地质条件,是准噶尔盆地天然气增储上产的重要层位。

## 2 优质储层特征

### 2.1 岩石学特征

中拐凸起二叠系佳木河组发育厚层凝灰质砂砾岩和凝灰质砂岩储层,整体为火山沉积环境。砾岩成分以岩浆岩为主(见图 2(a-b)),变质岩次之,最大砾径为 6 cm,一般砾径在 2~4 cm 之间;砂质成分以岩屑为主,长石、石英次之,粒径约为 2 mm,分选中等—差,呈次圆—次棱角状。岩屑以长石晶屑、安山岩岩屑和霏细岩岩屑为主,部分发育辉石晶屑,个别辉石绿泥石化和浊沸石化(见图 2(d));压实作用强烈,存在塑性变形。胶结物类型以浊沸石和方解石为主,浊沸石均匀分布于粒间,以长柱状为主(见图 2(c、f)),见交代碎屑颗粒现象,部分碎屑完全浊沸石化。镜下可见,白色浊沸石颗粒呈星点状—条带状均匀分布在



(a) 凝灰质砂砾岩, G13井, 4 084.60 m; (b) 凝灰质砂砾岩, ZJ4井, 4 468.60 m; (c) 凝灰质不等粒砂岩, ZJ9井, 4 088.35 m, ①为长石晶屑, ②为安山岩岩屑, 单偏光; (d) 凝灰质砂砾岩, 箭头处为凝灰质, ZJ14井, 4 295.99 m, 单偏光; (e) 含浊沸石凝灰质砂岩, 箭头处为绿泥石, JX1井, 3 737.68 m, 单偏光; (f) 凝灰质不等粒砂岩, ZJ9井, 4 088.35 m, ①为绒球状绿泥石, ②为浊沸石, 扫描电镜; (g) 凝灰质砂砾岩, 箭头处为浊沸石, ZJ14井, 4 298.81 m, 正交偏光; (h) 凝灰质砂砾岩, ZJ902井, 4 192.90 m, ①为方解石, ②为浊沸石, 正交偏光; (i) 凝灰质砂砾岩, 箭头处为浊沸石, ZJ901井, 4 061.72 m, 扫描电镜

图 2 中拐凸起佳木河组火山碎屑岩储层岩石学特征

Fig. 2 Petrological characteristics of pyroclastic reservoir in the Jiamuhe Formation of the Zhongguai Uplift

颗粒间,孔隙式胶结现象明显,局部见黑色干沥青(见图 2(g))。浊沸石溶孔发育,部分被沥青质充填。方解石通常呈不规则斑状散乱分布在粒间及火山灰中,偶见晶形完整的方解石充填于粒间孔隙(见图 2(b))。填隙物包括黏土矿物和火山灰(见图 2(f,i)),其中黏土矿物胶结主要为伊/蒙混层、绿泥石和伊利石,伊/蒙混层常以蜂巢状分布在粒间孔隙中,绿泥石以“绒球状”“薄膜状”“叶片状”三种形式赋存于颗粒表面,少量弯曲片状伊利石均匀分布在粒间孔隙中,大部分火山灰绿泥石化(见图 2(i))。

### 2.2 物性特征

研究区佳木河组火山碎屑岩 160 个岩心样品孔隙度和渗透率的统计数据表明,研究区为中孔—低渗储层,孔隙度为 6.6%~18.3%,平均为 13.1%,渗透率为  $(0.011 \sim 9.998) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为  $2.820 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,储层孔隙度与渗透率总体上呈正相关关系(见图 3),但相关关系较差,原因主要为佳木河组广泛发育浊沸石<sup>[22]</sup>,储层较为致密,局部裂缝发育。

### 2.3 孔隙结构特征

研究区佳木河组火山碎屑岩储层发育原生粒间孔、溶蚀孔、裂缝和火山岩气孔,其中原生粒间孔呈三角形和规则四边形,孔隙直径较大,为 4~5  $\mu\text{m}$ ,连通性较差(见图 4(a)),少量粒间孔中见剩余油分布。黏土矿物颗粒、硅质常充填在粒间孔中(见图 4(c)),堵塞部分粒间孔。溶蚀孔以长石溶孔和浊沸石溶孔为主,长石溶孔连通性较好(见图 4(b)),直径约为 2  $\mu\text{m}$ ,浊沸石溶孔形状不规则,呈星点状和条带状分布,连通性好,面孔率为 2%~3%,粒缘普遍发育绿泥石薄膜,孔内多见残余沥青(见图 4(e-f)),具备多期油气充注特征。研究区方解石的沉淀普遍晚于浊沸石的,存在多期胶结可能,浊沸石溶孔常被方解石和沥青质等充填(见图 4(d)),浊沸石和方解石对部分碎屑颗粒有交代作用。成岩作用早期,中拐地区浊沸石先充填粒间孔,后期经过部分溶蚀而形成溶蚀孔及溶蚀微裂缝(见图 4(g)),增大面孔率的同时形成油气的有效运移通道。中拐地区经历多期构造运动,形成多期原生裂缝,部分裂缝中见原油,镜下可见微裂缝大部分沿颗粒边缘分布,呈狭长状与溶蚀

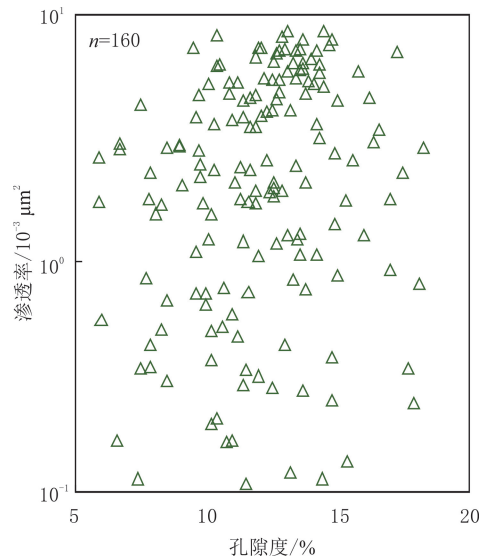
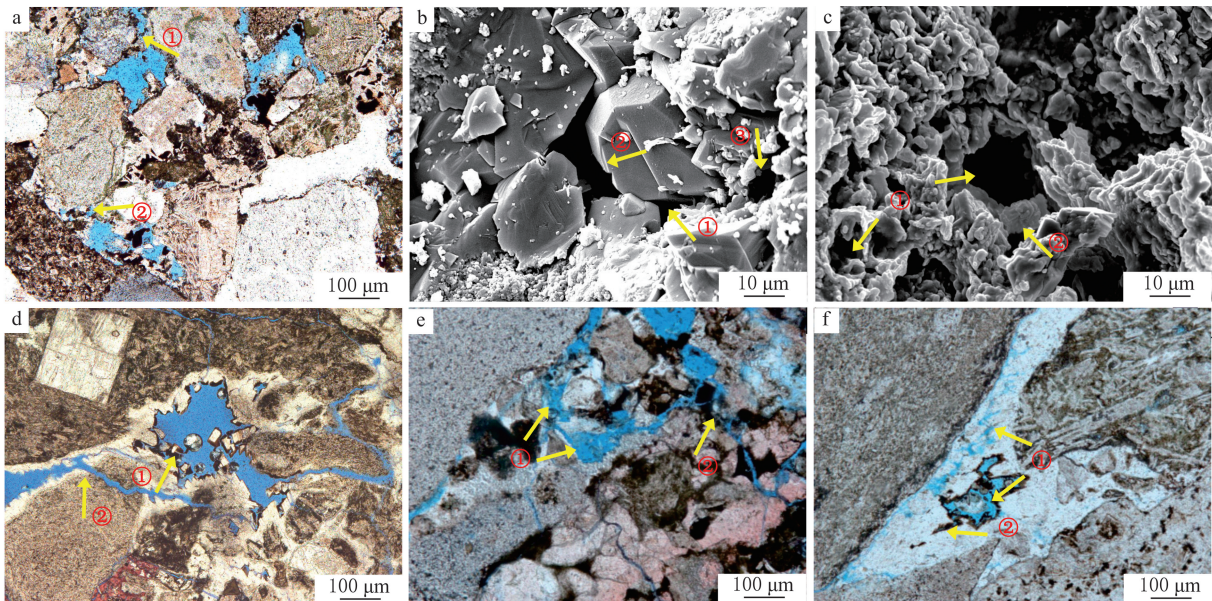
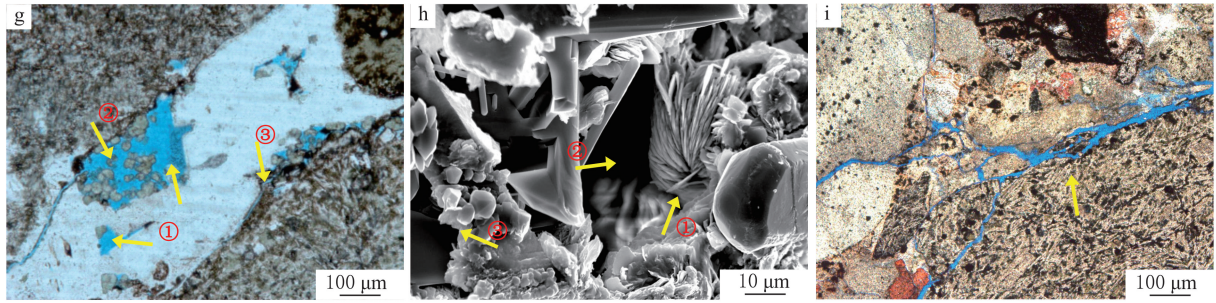


图 3 中拐凸起佳木河组火山碎屑岩储层物性特征

Fig. 3 Physical properties characteristics of pyroclastic reservoir in the Jiamuhe Formation of the Zhongguai Uplift





(a) 灰色荧光砂砾岩, ①为粒间孔, ②为粒间溶孔, ZJ5井, 3 927.17 m; (b) 绿灰色凝灰质砂砾岩, ①、②为粒间孔, ③为长石溶孔, G13井, 4 203.70 m; (c) 灰色荧光砂砾岩, ①为粒内溶孔, ②为绒球状绿泥石, ZJ5井, 3 882.10 m; (d) 灰色荧光砂砾岩, ①为浊沸石溶孔, ②为裂缝, ZJ4井, 4 638.64 m; (e) 浅灰色荧光砂砾岩, ①为浊沸石溶孔, ②为粒缘缝, ZJ901井, 4 065.49 m; (f) 褐灰色荧光凝灰质砂砾岩, ①为浊沸石溶孔, ②为残余沥青质, ZJ9井, 4 087.96 m; (g) 褐灰色荧光凝灰质砂砾岩, ①为浊沸石溶孔, ②为绿泥石, ③为粒缘缝, ZJ9井, 4 094.51 m; (h) 绿灰色砂砾岩, ①为绿泥石, ②为粒间孔, ③为硅质充填于粒间孔隙, ZJ7井, 4 164.76 m; (i) 褐灰色荧光凝灰质砂砾岩, 裂缝网络, ZJ6井, 5 005.55 m

图 4 中拐凸起佳木河组火山碎屑岩孔隙结构特征

Fig. 4 Reservoir space characteristics of pyroclastic rock reservoirs in the Jiamuhe Formation of Zhongguai Uplift

孔互相连通, 构成缝网组合, 偶见沥青等有机质赋存于微裂缝边缘, 表明缝网组合在一定程度上改善储层物性(见图 4(h-i))。火山碎屑岩受火山喷发和沉积作用双重控制, 具备火山岩典型特征。佳木河组储层部分安山岩砾石具有似圆状气孔, 但数量较少且不连通, 被浊沸石、绿泥石和沥青质等全充填或部分充填, 在安山岩气孔中未观察到沥青。

### 3 优质储层主控因素

#### 3.1 矿物转化成因浊沸石

矿物转化成因浊沸石是优质储层发育的重要条件。浊沸石是准噶尔盆地深层储层普遍发育的一种矿物, 主要有抗压保孔、溶蚀增孔和胶结减孔三种作用机制<sup>[26-30]</sup>, 对储层物性影响很大。研究区佳木河组凝灰质砂砾岩储层发育大量浊沸石, 根据斜长石、石英和浊沸石体积分数等将研究区浊沸石划分为两类(见图 5(a)), I 类浊沸石体积分数随石英、斜长石体积分数减少而显著增加。含 I 类浊沸石的储层为 I 类储层, 常见斜长石溶蚀现象(见图 5(b)), 形成大量长石溶孔, 且黏土矿物以绿泥石、伊/蒙混层和绿/蒙混层

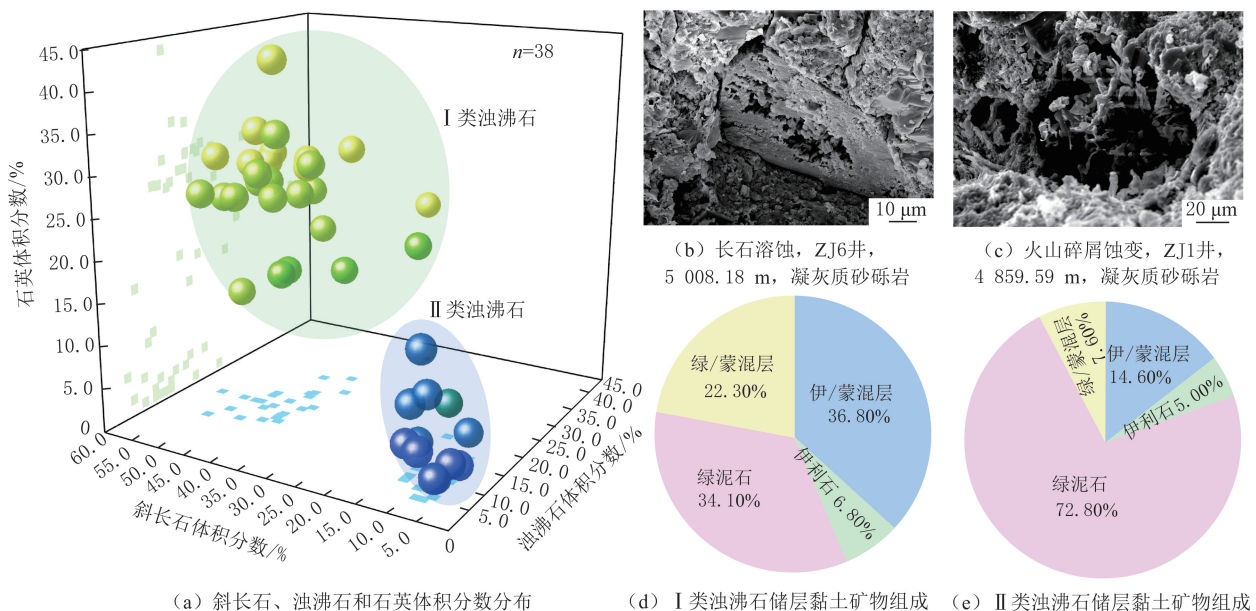


图 5 中拐凸起佳木河组浊沸石特征

Fig. 5 Characteristics of laumontite in the Jiamuhe Formation of Zhongguai Uplift

为主(见图 5(d)),浊沸石充填于孔隙。I 类浊沸石在研究区分布广泛,集中分布于 ZJ5、ZJ6 等高产井周围,体积分数较高,为 7.94%~37.47%,平均为 15.67%;孔隙度平均为 14.15%,溶蚀孔占总孔隙数的 36%;镜下观察浊沸石溶孔中有沥青质残留,荧光显示储层中油质沥青体积分数较高,平均为 70.29%,含油性明显优于 II 类储层的;岩石骨架密度分布于 2.70~2.84 g/cm<sup>3</sup>,平均为 2.76 g/cm<sup>3</sup>。I 类储层物性、油质沥青体积分数、岩石骨架密度及溶蚀孔占比与浊沸石体积分数存在较强相关关系(见图 6(a-b)),说明沉积早期浊沸石硬度大、体积分数高,富含 I 类浊沸石的储层岩石骨架密度较大,抵御压实作用的能力强,在一定程度上保护原生粒间孔,改善储层物性。随烃源岩不断生烃,酸性流体沿断裂上涌,相继溶蚀 I 类浊沸石,形成浊沸石溶孔,成为油气运移的主要通道。

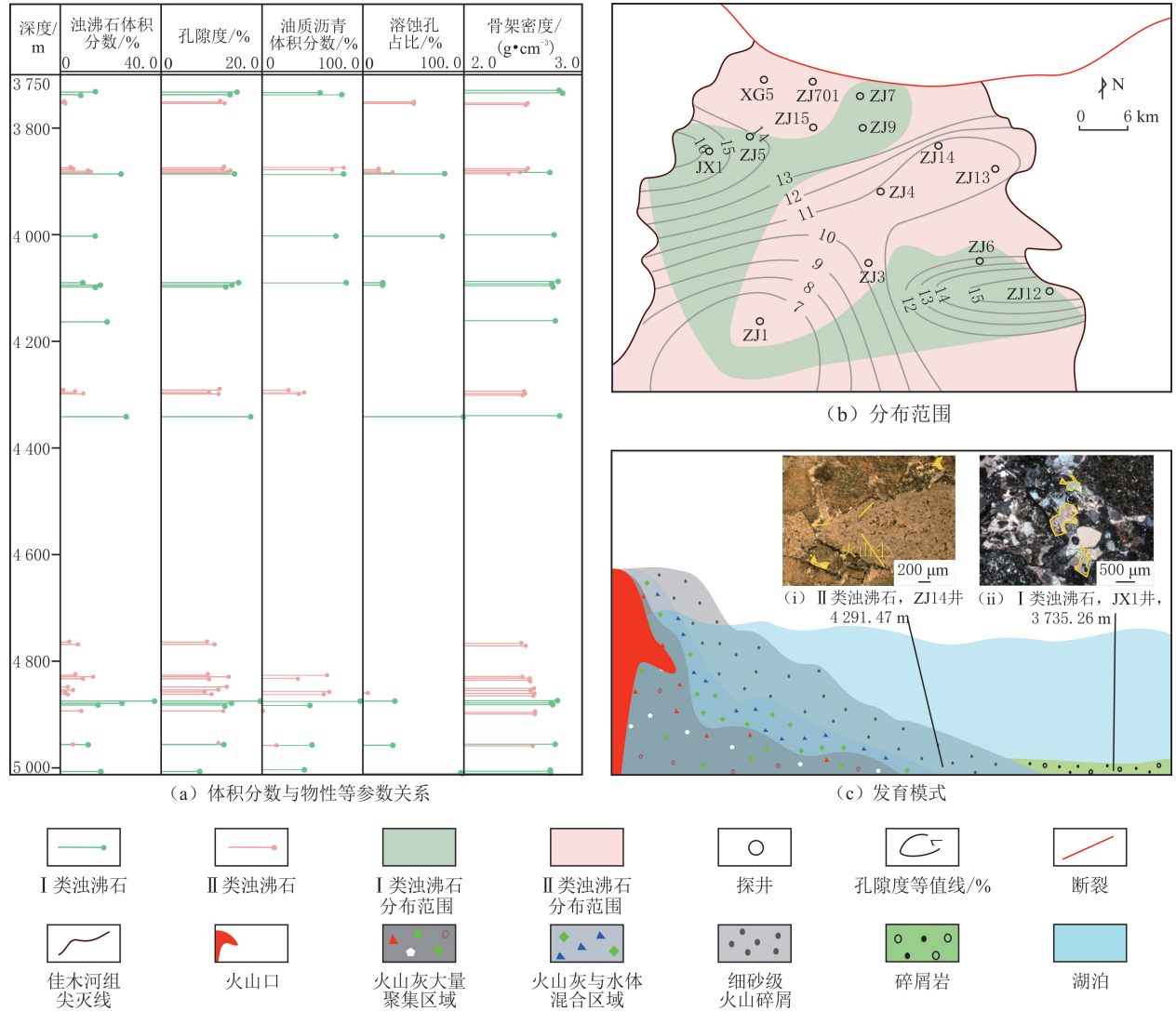


图 6 中拐凸起佳木河组浊沸石特征、分布范围及发育模式

Fig. 6 Characteristics, distribution range and development mode of turbid zeolite in the Jiamuhe Formation of Zhongguai Uplift

II 类浊沸石体积分数基本小于 15.00%,斜长石体积分数小于 10.00%,浊沸石体积分数与斜长石、石英体积分数无明显相关关系,储层火山碎屑体积分数较高,伴有风化蚀变作用,镜下可见火山碎屑岩蚀变后形成的孔隙(见图 5(c))。含 II 类浊沸石的储层为 II 类储层,储层中绿泥石体积分数异常高,平均为 72.80%(见图 5(e))。II 类浊沸石体积分数(平均为 6.44%)、孔隙度(平均为 11.46%)、油质沥青体积分数(平均为 55.11%)和骨架密度(平均为 2.55 g/cm<sup>3</sup>)明显低于 I 类浊沸石的(见图 6(a)),镜下观察浊沸石主要赋存于粒间孔,浊沸石溶孔较少。II 类浊沸石与储层物性不存在相关关系,I 类浊沸石在储层演化

过程中具有重要作用。

I 类浊沸石是矿物转化(斜长石钠长石化)发育模式下形成的。研究区佳木河组长石类型以斜长石为主,在后期溶蚀过程中形成大量钙、钾离子,石英等硅质物质释放大量碱性离子,黏土矿物以绿泥石和伊/蒙混层为主,伊/蒙混层形成于弱碱性还原环境,表明佳木河组经历长期碱性开放环境,能够提供浊沸石形成的基本物质来源(见图 6(c))。II 类浊沸石是火山物质水化蚀变发育模式下形成的,研究区火山活动频繁,火山碎屑供给充足,含量不断累积,在遇大气淡水和孔隙流体发生水化蚀变过程中,形成大量碱性阳离子,低压开放的碱性环境促进浊沸石的大量发育(见图 6(c))。两种不同发育模式下形成的浊沸石共同作用,形成现今中拐地区特有的含浊沸石凝灰质砂砾岩优质储层。

### 3.2 绿泥石包膜

绿泥石包膜是优质储层发育的关键条件。中拐地区主要发育伊/蒙混层、伊利石、高岭石、绿泥石和绿/蒙混层 5 类黏土矿物,其中绿泥石体积分数较高(见图 7(a)),赋存状态以叶片状和绿泥石包膜为主。中拐地区佳木河组储层绿泥石体积分数与储层孔隙度呈线性相关关系,随绿泥石体积分数增加,储层物性有所改善(见图 7(b)),且绿泥石体积分数与石英体积分数存在必要联系(见图 7(c))。

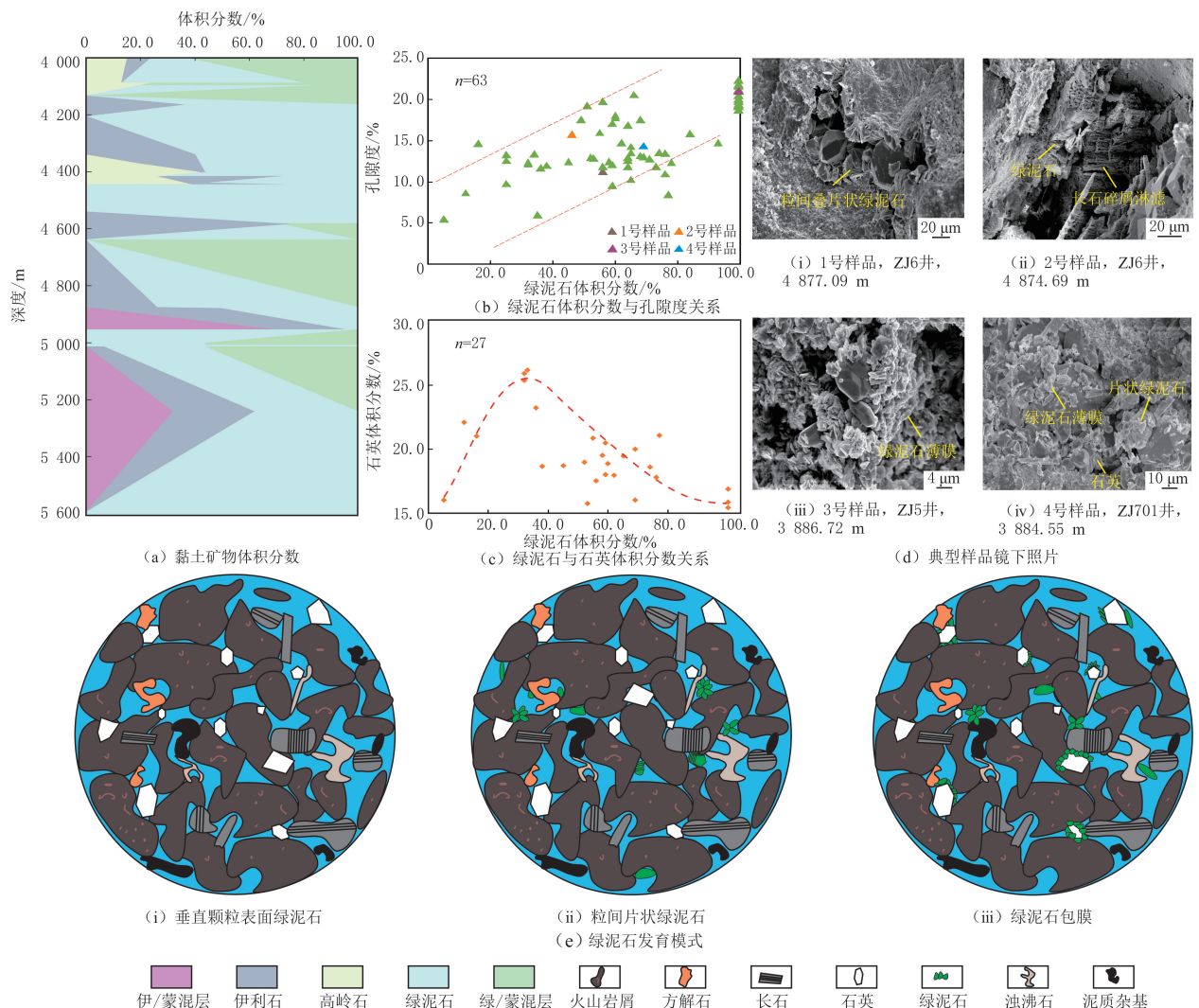


图 7 中拐凸起佳木河组绿泥石对储层影响

Fig. 7 The impact of chlorite on reservoirs in the Jiamuhe Formation of Zhongguai Uplift

由典型样品的镜下观察(见图 7(d))可知,1 号样品孔隙度相对较差,发育的绿泥石呈叠片状赋存于原始粒间孔隙,周围存在石英等硅质胶结,堵塞粒间孔,未见溶蚀作用,孔隙以剩余粒间孔为主,面孔率低,孔

隙连通性较差,孔隙中无残余沥青滞留。2号样品绿泥石体积分数低,储层物性很好,发育少量叶片状绿泥石,绿泥石仅生长在矿物颗粒表面,未堵塞粒间孔隙,且长石体积分数较高,存在明显淋滤现象,形成大量长石溶孔,可见残余沥青。2号样品中见少量由长石转化形成的Ⅰ类浊沸石,整体改善储层物性。佳木河组储层绿泥石体积分数集中在60.00%~80.00%之间,储层物性中等,储层(包含4号样品)中见绿泥石包膜,厚度约为8.5 μm,面积较小,石英颗粒较为规则,独立分布,部分发育充填于粒间孔隙的片状绿泥石。此外,以3号样品为代表的储层绿泥石体积分数极高(达到100.00%),储层物性好(孔隙度超过15.00%),说明发育绿泥石包膜的储层物性明显好于其他储层的,镜下只见绿泥石和石英,大面积绿泥石形成厚度约为6 μm的绿泥石膜,包裹在石英颗粒表面,抑制石英生长。当研究区绿泥石体积分数约为30.00%时,石英体积分数达到高峰(26.00%)(见图7(c)),石英以单晶颗粒发育,未见绿泥石,但随绿泥石体积分数不断升高和排列紧密,在石英颗粒表面形成面积较大的绿泥石包膜,通过抑制石英胶结过程中的成核作用,从而抑制石英的次生加大作用<sup>[31]</sup>,石英体积分数开始逐渐降低。

中拐地区绿泥石包括垂直颗粒表面绿泥石、粒间片状绿泥石和绿泥石包膜3种发育模式(见图7(e)),其中垂直颗粒表面发育的绿泥石为成岩作用早期形成的,多垂直于颗粒表面生长,部分附着在颗粒表面,绿泥石对佳木河组储层几乎无作用。粒间片状绿泥石发育在粒间孔中,在与单晶及叠片状绿泥石组合并堵塞孔隙的同时,充填部分细小喉道,对储层具有强烈的破坏作用,在研究区物性相对较差的储层中现象显著<sup>[32]</sup>。成岩作用后期的绿泥石形成绿泥石包膜,沿石英等碎屑颗粒表面紧密包裹,极大抑制石英的次生加大作用,保护粒间孔,同时也为后期酸性流体进入溶蚀长石等矿物提供有利通道<sup>[33-35]</sup>,是中拐地区现今浊沸石溶蚀优质储层发育的关键条件。

### 3.3 有利火山岩岩屑组合

有利火山岩岩屑组合是优质储层发育的必要条件。区别于常规砂砾岩储层,中拐地区凝灰质砂砾岩储层的岩屑组成非常复杂,不同类型岩屑组合对储层物性、储集空间和含油气性有显著影响。根据岩屑成分组合,按每种岩屑体积分数从多到少,将研究区储层分为7类,包括“安山岩+凝灰岩”“霏细岩+安山岩+凝灰岩”“霏细岩+安山岩+花岗岩+英安岩+凝灰岩”“安山岩+流纹岩+凝灰岩”“安山岩+流纹岩+花岗岩”“安山岩+流纹岩+霏细岩”“霏细岩+流纹岩+英安岩+安山岩”(见图8)。研究区广泛发育“霏细岩+流纹岩+英安岩+安山岩”类型的酸性喷出岩、中酸性喷出岩和中性钙碱性喷出岩岩屑组合,样品物性较好,孔隙度为8.70%~19.50%,平均为13.80%,渗透率为(0.035~0.208)×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,平均为0.076×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,测井响应具有“低伽马、高电阻”特征,岩心较为均质,浊沸石胶结物均匀分布在颗粒间,

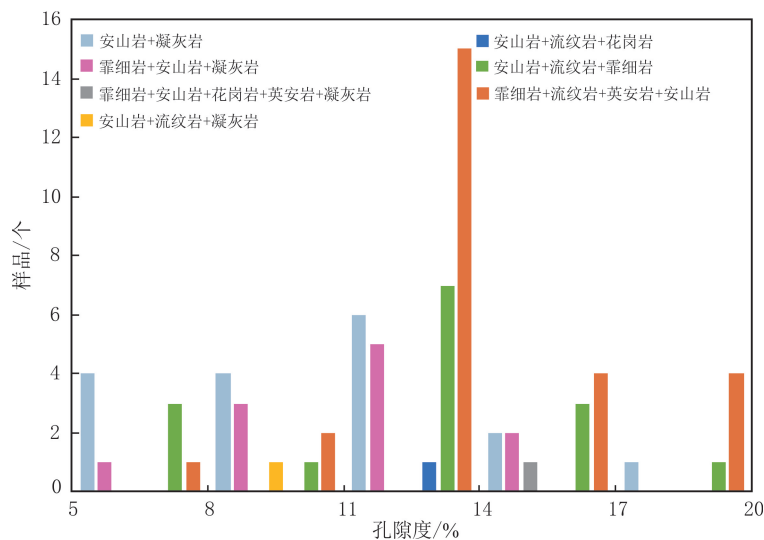


图8 中拐凸起佳木河组不同岩屑成分组合与孔隙度关系  
 Fig. 8 Relationship between different rock fragment composition combinations and porosity in the Jiamuhe Formation of Zhongguai Uplift

存在交代碎屑颗粒现象,发育浊沸石溶孔、粒间孔和微裂缝(见图 9),面孔率大于 6%,部分浊沸石溶孔被沥青质充填,油质沥青体积分数达 99.52%,整体发中等亮度淡蓝色光,储层的物性、电性和含油性最好。

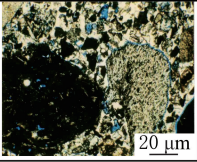
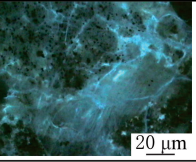


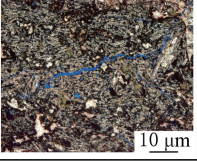
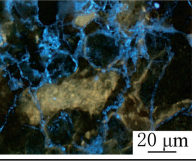


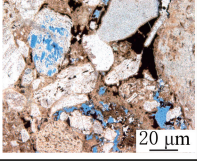
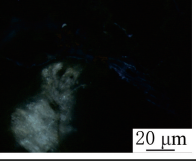


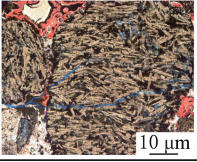
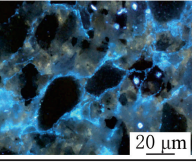


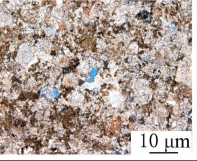
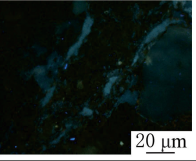


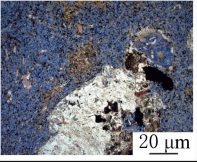
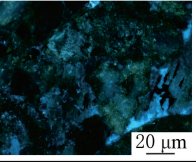


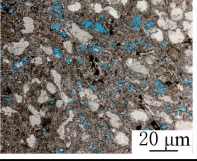
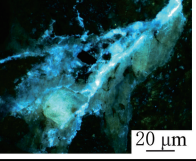


岩屑组合	孔隙度	渗透率	储集空间	含油性	测井曲线特征	
					GR/API	RT/( $\Omega \cdot m$ )
安山岩+凝灰岩	5.2%~18.7%, 平均为11.3% (n=17)	(0.016~0.038) $\times 10^{-3} \mu m^2$ , 平均为0.021 $\times 10^{-3} \mu m^2$ (n=13)				
霏细岩+安山岩+凝灰岩	7.3%~16.4%, 平均为11.7% (n=11)	(0.025~0.056) $\times 10^{-3} \mu m^2$ , 平均为0.043 $\times 10^{-3} \mu m^2$ (n=8)				
霏细岩+安山岩+花岗岩 +英安岩+凝灰岩	15.3% (n=1)	0.013 $\times 10^{-3} \mu m^2$ (n=1)				
安山岩+流纹岩+凝灰岩	9.2% (n=1)	0.076 $\times 10^{-3} \mu m^2$ (n=1)				
安山岩+流纹岩+花岗岩	12.2% (n=1)	0.302 $\times 10^{-3} \mu m^2$ (n=1)				
安山岩+流纹岩+霏细岩	10.4%~18.2%, 平均为12.5% (n=15)	(0.047~0.114) $\times 10^{-3} \mu m^2$ , 平均为0.082 $\times 10^{-3} \mu m^2$ (n=10)				
霏细岩+流纹岩+英安岩 +安山岩	12.5%~19.5%, 平均为13.8% (n=26)	(0.035~0.208) $\times 10^{-3} \mu m^2$ , 平均为0.076 $\times 10^{-3} \mu m^2$ (n=19)				

图 9 中拐凸起佳木河组不同岩屑组合物性、储集空间、含油性和测井曲线特征

Fig. 9 Characteristics of different rock debris compositions, reservoir space, oil content and logging curves in the Jiamuhe Formation of Zhongguai Uplift

“安山岩+流纹岩+霏细岩”类的中性钙碱性喷出岩和酸性喷出岩岩屑组合是佳木河组较好储层之一。该类储层物性整体较好,尤其是渗透率平均可达  $0.082 \times 10^{-3} \mu m^2$ ,发育大量浊沸石溶孔和斑晶溶孔,面孔率为 6%,最大孔隙直径为  $74.35 \mu m$ ,油质沥青体积分数为 99.68%,浊沸石溶孔和部分裂缝发光,但岩心非均质性较强(见图 9),泥质杂基体积分数较“霏细岩+流纹岩+英安岩+安山岩”的高,电阻率曲线的箱形特征明显。

“安山岩+凝灰岩”和“霏细岩+安山岩+凝灰岩”类的储层为研究区较差储层,物性相对较差,孔隙度平均分别为 11.30%和 11.70%,渗透率平均分别为  $0.021 \times 10^{-3}$ 和  $0.043 \times 10^{-3} \mu m^2$ ,孔隙类型以晶间孔、粒内溶孔和微裂缝为主,部分样品中见半充填气孔发育,但整体面孔率较小,为 2%~4%,电性特征无明显含油特征,岩石中荧光显示较差,部分颗粒发光,发光面积较小(见图 9)。此外,研究区发育“霏细岩

“安山岩+花岗岩+英安岩+凝灰岩”“安山岩+流纹岩+凝灰岩”“安山岩+流纹岩+花岗岩” 3 类岩屑组合,但样品较少。

研究区酸性喷出岩岩屑体积分数高,是中拐地区佳木河组优质储层发育的必要条件,酸性喷出岩 SiO<sub>2</sub> 体积分数超过 70.00%,熔浆基性程度较低。研究区整体为超压系统,当火山喷发时,高温的火山碎屑流从地下涌至地表,地层压力和温度极速变低,导致岩浆快速冷凝<sup>[36-38]</sup>,挥发分留于岩石而形成部分气孔;在随后演化过程中,地层压力和温度不断升高,围岩发生溶蚀,形成大量溶蚀孔,气孔和溶蚀孔为后期优质储层发育提供必要条件。

#### 4 优质储层发育模式

准噶尔盆地中拐凸起二叠系佳木河组火山碎屑岩优质储层为“喷发—淋滤—蚀变”的全周期发育模式(见图 10)。火山喷发阶段,早期的火山喷发形成大量富含 SiO<sub>2</sub> 的酸性岩浆,部分含有大量气体的岩浆喷出地表,喷发高度大,散落面积广,且携带大量火山碎屑;当酸性火山碎屑落到地面后,经过短距离搬运沉积而形成火山碎屑岩,经历压实、胶结等成岩作用,演化为中拐凸起佳木河组深层火山碎屑岩储层。大气淋滤阶段,火山碎屑岩长期暴露于地表,不断经受大气降水风化淋滤,孔隙流体碱性增强,成岩环境由原始全开放状态转变为半开放状态,初期由蒙皂石转变为绿/蒙混层再转变为绿泥石;随深度和温度的不断增加,化学成分不稳定的绿泥石呈自形程度较好的单晶状,部分充填于粒间孔隙,绿泥石发育的铁、镁离子主要来源于火山碎屑;当温度、压力升高到一定值时,绿泥石定向排列,石英颗粒表面形成绿泥石包膜,部分火山玻璃水解形成的蒙皂石先转化为黏土膜,在碱性环境下再转化为绿泥石包膜,绿泥石包膜抑制自生石英次生加大,保护储层粒间孔隙。斜长石水化蚀变阶段,中拐地区佳木河组火山岩屑为浊沸石的形成做出重要贡献,火山碎屑岩中富含易溶的玻璃质,在后期溶解过程中释放大量的钙、镁等碱性离子(高 SiO<sub>2</sub>),高碱性离子为浊沸石的发育提供物质基础;成岩作用早期的大量斜长石在低温下水化蚀变,形成浊沸石和钠长石。当烃源岩开始大量生烃时,酸性流体经过断裂不断上涌,浊沸石发生溶蚀,形成大量浊沸石溶孔,成为火山碎屑岩优质储层发育的重要条件。

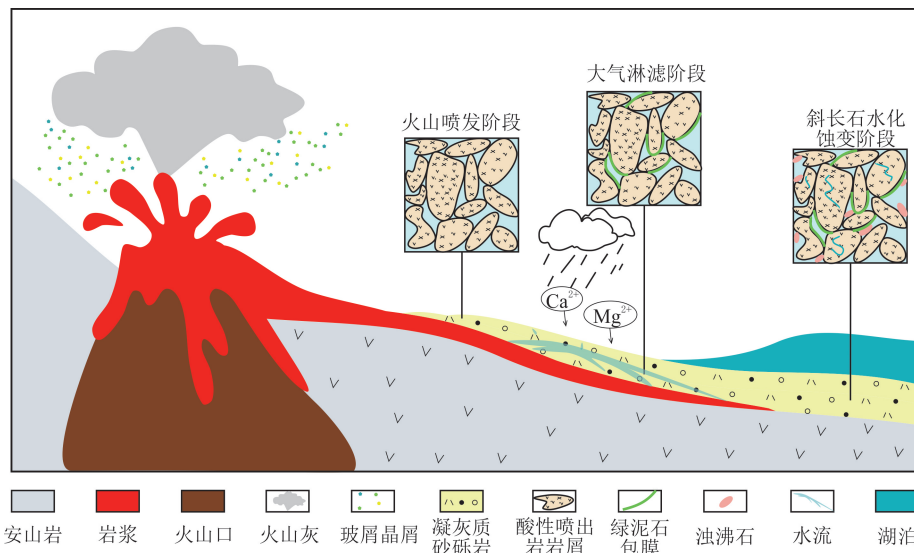


图 10 中拐凸起佳木河组优质储层发育模式

Fig. 10 High quality reservoir development pattern diagram in the Jiamuhe Formation of Zhongguai Uplift

#### 5 结论

(1)准噶尔盆地中拐凸起二叠系佳木河组火山碎屑岩类型主要为凝灰质砂砾岩和凝灰质砂岩,胶结物以浊沸石和方解石为主,还发育绿泥石黏土矿物;为中孔—低渗储层,主要发育原生粒间孔、溶蚀孔、裂缝

和火山岩气孔。

(2)研究区发育矿物转化成因和火山物质蚀变成因浊沸石,矿物转化成因浊沸石对储层物性、含油性、骨架密度和溶蚀孔数量等具有明显建设作用,形成受碱性还原环境控制,是优质储层发育的重要条件。佳木河组绿泥石体积分数高,包括垂直颗粒表面、粒间片状和包膜3种发育形态,绿泥石包膜可抑制石英次生加大作用,保护粒间孔,为后期酸性溶蚀流体进入提供有利通道,是优质储层发育的关键条件。富含“霏细岩+流纹岩+英安岩+安山岩”火山岩屑组合的储层物性最好,面孔率高,油气充注程度好,有利于优质储层发育。

(3)准噶尔盆地深层火山碎屑岩优质储层为“喷发—淋滤—蚀变”的全周期发育模式,浊沸石成因、绿泥石膜及岩屑组合共同控制研究区佳木河组有利储层的发育和分布。

## 参考文献(References):

- [1] 孙善平,刘永顺,钟蓉,等. 火山碎屑岩分类评述及火山沉积学研究展望[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 313-317.  
SUN Shanping, LIU Yongshun, ZHONG Rong, et al. Classification of pyroclastic rocks and trend of volcanic sedimentology: a review [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(3): 313-317.
- [2] 赵文智,邹才能,李建忠,等. 中国陆上东、西部地区火山岩成藏比较研究与意义[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 1-11.  
ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Comparative study on volcanic hydrocarbon accumulations in Western and Eastern China and its significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 1-11.
- [3] 邹才能,赵文智,贾承造,等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 257-271.  
ZOU Caineng, ZHAO Wenzhi, JIA Chengzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257-271.
- [4] 罗官幸,潘虹,李世宏,等. 准噶尔盆地北三台凸起南斜坡石炭系火山岩储层特征及成藏模式[J]. 东北石油大学学报, 2024, 48(5): 27-47.  
LUO Guanxing, PAN Hong, LI Shihong, et al. Reservoir characteristics and reservoir forming model of Carboniferous volcanic rocks on the southern slope of Beisantai Uplift, Junggar Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024, 48(5): 27-47.
- [5] WANG P J, CHEN S M. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, Northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3): 499-523.
- [6] 单玄龙,牟汉生,刘玉虎,等. 湖盆水下喷发火山岩相类型、特征与储集意义:以松辽盆地南部查干花地区白垩系为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 719-730.  
SHAN Xuanlong, MU Hansheng, LIU Yuhu, et al. Subaqueous volcanic eruptive facies, facies model and its reservoir significance in a continental lacustrine basin: a case from the Cretaceous in Chaganhua Area of Southern Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 719-730.
- [7] 金春爽,乔德武,淡伟宁. 渤海湾盆地中、新生代火山岩分布及油气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 19-29.  
JIN Chunshuang, QIAO Dewu, DAN Weining. Meso-Cenozoic volcanic rock distribution and reservoir characteristics in the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 19-29.
- [8] 徐长贵,张功成,黄胜兵,等. 渤海湾盆地海域白垩系大中型火山岩油气藏形成条件[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(3): 467-477.  
XU Changgui, ZHANG Gongcheng, HUANG Shengbing, et al. Formation of large-and medium-sized Cretaceous volcanic reservoirs in the offshore Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(3): 467-477.
- [9] WANG P J, REN Y G, SHAN X L, et al. The Cretaceous volcanic succession around the Songliao Basin, NE China: relationship between volcanism and sedimentation[J]. Geological Journal, 2002, 37(2): 97-115.
- [10] 卫延召,阿布力米提·依明,吴卫安,等. 准噶尔盆地东北部石炭系碎屑岩天然气成藏条件及勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(5): 810-822.  
WEI Yanzhao, ABULIMITI Yiming, WU Weian, et al. Natural gas accumulation conditions and exploration directions of Carboniferous clastic rocks in the northeastern margin of Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(5): 810-822.
- [11] 魏海泉,白志达,刘永顺. 火山碎屑岩的百年研究[J]. 地质论评, 2022, 68(5): 1918-1941.  
WEI Haiquan, BAI Zhida, LIU Yongshun. Centurial study on pyroclastic rocks[J]. Geological Review, 2022, 68(5): 1918-1941.
- [12] 彭浩,尹成,何青林,等. 川西地区二叠系热碎屑流火山岩发育特征及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 56-67.  
PENG Hao, YIN Cheng, HE Qinglin, et al. Development characteristics and petroleum geological significance of Permian pyroclastic flow volcanic rocks in Western Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 56-67.
- [13] 郑健,王璞珺,朱建峰,等. 火山碎屑岩储层特征及其主控因素分析:以松辽盆地南部长岭断陷龙凤山地区为例[J]. 世界地质, 2021,

- 40(2):399-407.
- ZHENG Jian, WANG Pujun, ZHU Jianfeng, et al. Characteristics and main controlling factors of pyroclastic reservoirs; a case study in Longfengshan Area, Changling Fault Depression, Southern Songliao Basin[J]. *World Geology*, 2021,40(2):399-407.
- [14] LEVIN L E. Volcanogenic and volcanoclastic reservoir rock in Mesozoic-Cenozoic island arcs; examples from the Caucasus and the NW Pacific[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1995,18(3):267-288.
- [15] 曾凡成,张昌民,李忠诚,等. 断块型沉火山碎屑岩致密气藏有效储层控制因素及分布规律:以松辽盆地南部王府气田白垩系沙河子组为例[J]. *石油与天然气地质*,2021,42(2):481-493.
- ZENG Fancheng, ZHANG Changmin, LI Zhongcheng, et al. Controlling factors and distribution pattern of effective tight gas pools in blocky pyroclastic rocks in the Cretaceous Shahezi Formation in Wangfu Gas Field, Southern Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021,42(2):481-493.
- [16] 邹姐姐,张大权,史基安,等. 准噶尔盆地中拐凸起二叠系上乌尔禾组油气成藏及其主控因素[J]. *天然气地球科学*,2021,32(4):540-550.
- ZOU Niuniu, ZHANG Daquan, SHI Jian, et al. Formation conditions and main controlling factors of hydrocarbon accumulation of the Upper Wuerhe Formation of Permian in Zhongguai Uplift, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021,32(4):540-550.
- [17] LI X S, PAN H, WU Y X, et al. Main control factors and hydrocarbon accumulation model of volcanic oil reservoirs with complex oil-water relationships; a case study of the Carboniferous in the Chepaizi Uplift, the Junggar Basin, China[J]. *Minerals*, 2022,12(11):1357.
- [18] 程光艺,周栋华,李国浩,等. 玛湖1井区三叠系白碱滩组二段沉积特征及有利储层预测[J]. *特种油气藏*,2024,31(6):49-56.
- CHENG Guangyi, ZHOU Donghua, LI Guohao, et al. Sedimentary characteristics and favorable reservoir prediction of the second member of the Triassic Baijiantan Formation in Mahu 1 Well Area[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024,31(6):49-56.
- [19] 蔡振忠,王健,莫涛,等. 库车坳陷克拉苏构造带博孜段巴什基奇克组超深储层特征及成岩演化[J]. *非常规油气*,2024,11(6):8-16.
- CAI Zhenzhong, WANG Jian, MO Tao, et al. Characteristics and diagenesis evolution of ultra-deep Bashijiqi Formation reservoir in Bozi Section of Kelasu Structure Belt, Kuqa Depression[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2024,11(6):8-16.
- [20] CAO J, ZHANG Y J, HU W X, et al. The Permian hybrid petroleum system in the northwest margin of the Junggar Basin, Northwest China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005,22(3):331-349.
- [21] 赵长永,师翔,廖伟,等. 砾岩中浊沸石的形成和溶蚀对储层物性的影响:以准噶尔盆地西北缘中拐凸起下二叠统佳木河组砾岩气藏为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*,2023,59(5):782-792.
- ZHAO Changyong, SHI Xiang, LIAO Wei, et al. Formation and erosion of zeolites in conglomerate reservoirs impact on physical properties: an example of a conglomerate gas reservoir of Lower Permian Jiamuhe Formation in Middle Abduction Bulge on northwest margin of Junggar Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2023,59(5):782-792.
- [22] 杨川,吴涛,李啸,等. 准噶尔盆地中拐凸起佳木河组储集层物性实测值校正[J]. *新疆石油地质*,2021,42(6):749-755.
- YANG Chuan, WU Tao, LI Xiao, et al. Correction of measured reservoir physical properties of Jiamuhe Formation in Zhongguai Uplift of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021,42(6):749-755.
- [23] 武小宁,钟厚财,林煜,等. 中拐凸起走滑断裂发育特征及对成藏的控制作用[J]. *断块油气田*,2023,30(2):286-293.
- WU Xiaoning, ZHONG Houcai, LIN Yu, et al. The development characteristics of strike-slip faults and its control effect on reservoir accumulation in Zhongguai Uplift[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023,30(2):286-293.
- [24] 姜伟,王志维,刁志龙,等. 准噶尔盆地中拐凸起东斜坡上乌尔禾组常规一致密油藏主控因素及成藏模式[J]. *东北石油大学学报*,2024,48(2):1-15.
- JIANG Wei, WANG Zhiwei, DIAO Zhilong, et al. Main controlling factors and accumulation model of conventional-tight oil reservoirs in the Upper Uerhe Formation of the eastern slope of Zhongguai Uplift, Junggar Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(2):1-15.
- [25] 郭文建,郭瑞婧,唐勇,等. 准噶尔盆地二叠系上乌尔禾组退覆式扇(辫状河)三角洲前缘—滩坝复合砂砾岩沉积特征及控制因素[J]. *古地理学报*,2024,26(3):584-599.
- GUO Wenjian, GUO Ruijing, TANG Yong, et al. Sedimentary characteristics, controlling factors and genesis of retrogradational fan (braided) delta front-beach bar composite gravel body in the Permian Upper Urho Formation in Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2024,26(3):584-599.
- [26] 赵文智,汪泽成,黄福喜,等. 中国陆上叠合盆地超深层油气成藏条件与勘探地位[J]. *石油学报*,2023,44(12):2020-2032.
- ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, HUANG Fuxi, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration position of ultra-deep reservoirs in onshore superimposed basins of China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023,44(12):2020-2032.
- [27] 孙靖,尤新才,郑孟林,等. 准噶尔盆地深层—超深层二叠系碎屑岩储层特征及控制因素[J]. *中国石油勘探*,2024,29(5):120-135.
- SUN Jing, YOU Xincan, ZHENG Menglin, et al. Characteristics and controlling factors of deep and ultra-deep Permian clastic reservoir in Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2024,29(5):120-135.

- [28] 王小军,宋永,郑孟林,等.准噶尔西部陆内盆地构造演化与油气聚集[J].地学前缘,2022,29(6):188-205.  
WANG Xiaojun, SONG Yong, ZHENG Menglin, et al. Tectonic evolution of and hydrocarbon accumulation in the Western Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2022,29(6):188-205.
- [29] 黄立良,王然,邹阳,等.准噶尔盆地玛南斜坡区上二叠统上乌尔禾组连续型砂砾岩油藏群成藏特征[J].石油实验地质,2022,44(1):51-59.  
HUANG Liliang, WANG Ran, ZOU Yang, et al. Accumulation characteristics of continuous sand conglomerate reservoirs of Upper Permian Upper Wuerhe Formation in Manan Slope Area, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022,44(1):51-59.
- [30] 李佳思,余兴,朱涛,等.准噶尔盆地中拐凸起 JL30 井区上乌尔禾组元素地球化学特征及其石油地质意义[J].地质学报,2020,94(10):3074-3089.  
LI Jiasi, YU Xing, ZHU Tao, et al. Elemental geochemistry characteristics and their petroleum geological implications for the Upper Wuerhe Formation in well block Jinlong-30 of the Zhongguai Uplift, Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020,94(10):3074-3089.
- [31] VOLTOLINI M, ARTIOLI G, MORET M. The dissolution of laumontite in acidic aqueous solution: a controlled-temperature in situ atomic force microscopy study[J]. American Mineralogist, 2015,97(1):150-158.
- [32] 左如斯,曾翔,曹忠祥,等.沉积岩中沸石类矿物成岩演化特征及其意义[J].新疆石油地质,2023,44(5):543-553.  
ZUO Rusi, ZENG Xiang, CAO Zhongxiang, et al. Diagenetic evolution and its significance of zeolites in sedimentary rocks[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023,44(5):543-553.
- [33] 石文林,张立强,严一鸣.川东南六塘地区凉高山组致密砂岩成岩特征及差异成岩演化模式[J].天然气地球科学,2023,34(6):992-1005.  
SHI Wenlin, ZHANG Liqiang, YAN Yiming, et al. Diagenesis characteristics and differential diagenetic evolution modes of Liang-gaoshan Formation tight sandstone in Liutang Area, Southeast Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 2023,34(6):992-1005.
- [34] 王龙,邓秀芹,楚美娟,等.沉积岩中自生浊沸石的形成、分布及油气意义:以鄂尔多斯盆地中—上三叠统延长组为例[J].地质论评,2022,68(6):2188-2206.  
WANG Long, DENG Xiuqin, CHU Meijuan, et al. Formation and distribution of laumontite in sedimentary sequences and their exploration significance: a case study on the Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Geological Review, 2022,68(6):2188-2206.
- [35] 曲希玉,苗长盛,李瑞磊,等.致密碎屑岩储层物性影响因素及优质储层主控因素:以松辽盆地长岭断陷龙凤山次凹营城组为例[J].天然气地球科学,2022,33(7):1036-1048.  
QU Xiyu, MIAO Changsheng, LI Ruilei, et al. Influencing factors of tight clastic reservoir physical properties and main controlling factors of high-quality reservoirs: taking the Yingcheng Formation of Longfengshan Sub-sag in Changling Fault Depression of Songliao Basin as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2022,33(7):1036-1048.
- [36] 任宪军,石云倩,靖伟,陆相湖盆水下喷发火山岩储层特征及发育模式:以松辽盆地长岭断陷查干花次凹为例[J].油气藏评价与开发,2024,14(2):176-189.  
REN Xianjun, SHI Yunqian, JING Wei. Characteristics and development model of underwater eruptive volcanic reservoirs in continental lacustrine basin: a case study of Chaghanhua Subsag in Changling Fault Depression, Songliao Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024,14(2):176-189.
- [37] 唐华风,边伟华,王璞璐,等.盆地火山岩相分类和模式[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(6):1651-1671.  
TANG Huafeng, BIAN Weihua, WANG Pujun, et al. Classification and model of volcanic facies in the basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2023,53(6):1651-1671.
- [38] 王剑,刘金,吴晓光,等.不同喷发环境下的优质火山岩储层分布规律:以准噶尔盆地东部石炭系为例[J].新疆地质,2023,41(3):386-395.  
WANG Jian, LIU Jin, WU Xiaoguang, et al. Distribution patterns of high-quality volcanic rock reservoirs under different eruptive environments: taking the Carboniferous in the Eastern Junggar Basin as an example[J]. Xinjiang Geology, 2023,41(3):386-395.