

操应长,朱 宁,张少敏,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层成岩作用与储集空间特征[J].地球科学与环境学报,2019,41(3):253-266.

CAO Ying-chang,ZHU Ning,ZHANG Shao-min,et al. Diagenesis and Reserving Space Characteristics of Tight Oil Reservoirs of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag of Junggar Basin,China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2019,41(3):253-266.

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层成岩作用与储集空间特征

操应长^{1,2},朱 宁¹,张少敏¹,蕙克来¹,薛秀杰¹

(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)

摘 要:利用岩芯观察、铸体薄片及荧光薄片鉴定,结合激光共聚焦显微镜、扫描电镜、X 射线衍射、恒速压汞等分析测试手段,分析了准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层成岩作用与储集空间特征及其相互关系。结果表明:吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层主要发育碳酸盐岩类、陆源碎屑岩类、火山碎屑岩类和混积岩类等 4 种岩石类型,储集空间可分为次生溶孔、晶间孔和微裂缝 3 类;不同岩石类型经历了不同的成岩作用过程,发育了不同类型的储集空间。①碳酸盐岩类中,泥晶云岩成分单一,压实致密,胶结作用弱,储集空间以白云石晶间孔为主;随着粉砂质和凝灰质含量增加,压实作用变弱,长石和凝灰质发生强溶蚀,粉砂质砂屑云岩及凝灰质云岩的储集空间以长石粒内孔、铸模孔及凝灰质溶蚀孔为主。②陆源碎屑岩类中,凝灰质粉砂岩的压实作用中等,粉砂级长石颗粒粒内及边缘、分散状凝灰质溶蚀,且溶蚀孔中有大量的黏土矿物充填,储集空间以蜂窝状长石溶蚀孔、凝灰质溶蚀孔为主;而云质泥岩压实作用强,溶蚀作用不发育,仅可见晶间孔及微裂缝。③火山碎屑岩类中,粉砂质凝灰岩、云质凝灰岩压实作用中等,长石、凝灰质易溶,但胶结物种类较多,储集空间以次生溶蚀孔为主,发育少量的晶间孔。

关键词:致密油储层;成岩作用;储集空间;物性;成岩差异;芦草沟组;吉木萨尔凹陷;准噶尔盆地

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1672-6561(2019)03-0253-14

Diagenesis and Reserving Space Characteristics of Tight Oil Reservoirs of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag of Junggar Basin, China

CAO Ying-chang^{1,2}, ZHU Ning¹, ZHANG Shao-min¹, XI Ke-lai¹, XUE Xiu-jie¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China; 2. Evaluation and Detection Technology Laboratory of Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: The core observation, casting and fluorescence thin section authentication, combined with confocal laser scanning microscope (CLSM), scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction and rate-controlled mercury intrusion, were employed to characterize tight oil reservoir space properties of Permian Lucaogou Formation in Jimusar sag of Junggar Basin, China, aiming

收稿日期:2018-11-03;修回日期:2019-03-05 投稿网址:<http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金委员会-中国石油天然气集团公司石油化工联合基金项目(U1762217);

国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2014CB239002)

作者简介:操应长(1969-),男,安徽潜山人,中国石油大学(华东)教授,博士研究生导师,理学博士,E-mail:cyc8391680@163.com。

at analyzing the diagenesis, reservoir space and relationship between them. The results show that tight oil reservoir of Lucaogou Formation in Jimusar sag is mainly composed of carbonate, terrigenous detrital, pyroclastic and normal mixed sedimentary rocks, and the reservoir spaces include secondary solution pores, intercrystalline pores and microcracks; the different types of rock undergo different diagenesis processes and develop different reservoir spaces. ① In the carbonate rocks, micritic dolostones are characterized by single component, severe compaction and weak cementation, and the reservoir space is dominated by dolomite intercrystalline pores; with the increasing of silty and tuffaceous contents, the silty arenites and tuffaceous dolostones are characterized by weaker compaction, stronger dissolution and cementation, and the reservoir space is mainly composed of feldspar inner pores, mold holes and tuffaceous dissolution pores. ② In the terrigenous detrital rocks, tuffaceous siltstones are characterized by moderate compaction, and widespread dissolution of feldspar and dispersive tuffaceous, the dissolution pores are filled by a great amount of clay mineral, and the reservoir space is mainly composed of honeycomb feldspar dissolution pores and tuffaceous dissolution pores; the dolomitic mudstones are characterized by strong compaction and poor dissolution, and intercrystalline pores and microcracks can be observed in it. ③ In pyroclastic rocks, the characteristics of silty and dolomitic tuffites are similar to those of tuffaceous siltstones, but the kinds of cement are a lot, the main reservoir spaces are secondary dissolution pore with a few intercrystalline pores.

Key words: tight oil reservoir; diagenesis; reservoir space; physical property; diagenetic difference; Lucaogou Formation; Jimusar sag; Junggar Basin

0 引言

在油气需求增加和勘探技术进步的推动下,致密油、致密气、页岩油等非常规油气资源成为能源结构组成的重要角色^[1]。通过早期勘探评定发现,中国非常规油气资源十分丰富,在鄂尔多斯盆地三叠系延长组、准噶尔盆地二叠系芦草沟组、松辽盆地白垩系青山口组—泉头组等地层均发现丰富的致密油资源^[2-6],但勘探开发仍处于起步和探索阶段^[7-9]。与常规油气藏相比,致密油具有生-储-盖三位一体、大面积连续或准连续分布、纳米级孔喉发育等特点^[3,5],给后期的勘探开发工作带来了一系列难题。

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组作为致密油储层的重点区域,近年来勘探开发工作取得了重要的突破^[10-11]。国内学者对该区地质特征^[5-6,10]、沉积特征与古气候特征^[11-16]、烃源岩特征^[17-19]、成藏过程^[20-21]、油气赋存状态及分子结构^[22]、储层特征及勘探开发潜力评价^[23-25]等宏观和微观方面开展了大量研究^[5-6,10-21],为该区的勘探开发提供重要指导。吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组作为一套多物源、多成分混杂而成的细粒沉积岩,其岩相类型复杂。前人根据不同成分的含量,结合结构与构造差异,提出精细的分类方案,总结出8种岩相

类型^[26],同时对该区的沉积相类型及沉积演化进行了深入研究,其主要为湖泊相和三角洲相,远砂坝、席状砂与滨浅湖分别为上、下“甜点体”最主要的微相类型^[12-14]。但目前关于该区的储集空间特征,特别是不同岩石类型中发育的储集空间类型以及各岩类成岩作用对储集空间的控制方面等研究较为薄弱^[27-33]。蕙克来等对芦草沟组致密油储层的岩石类型及特征进行系统命名和表征^[27];王晓琦等采用电子束荷电效应对储集空间及其连通性进行定量表征评价^[28];刘冬冬等通过芦草沟组裂缝发育特征研究对致密油储层开展评价^[29-30];马世忠等通过压汞实验精细表征了储层孔喉结构并进行储层分类^[31]。因此,本文在前人研究基础上,利用岩芯观察、铸体薄片及荧光薄片鉴定,结合X射线衍射(XRD)、激光共聚焦显微镜(CLSM)、扫描电镜(SEM)及能谱、恒速压汞等分析测试手段,结合储层岩石学特征,对准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层不同岩石类型的成岩作用、储集空间进行分析,并探讨了成岩作用与储集空间的关系,以为致密油储层评价及勘探开发提供参考。

1 区域地质概况

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地的东南缘,其北、

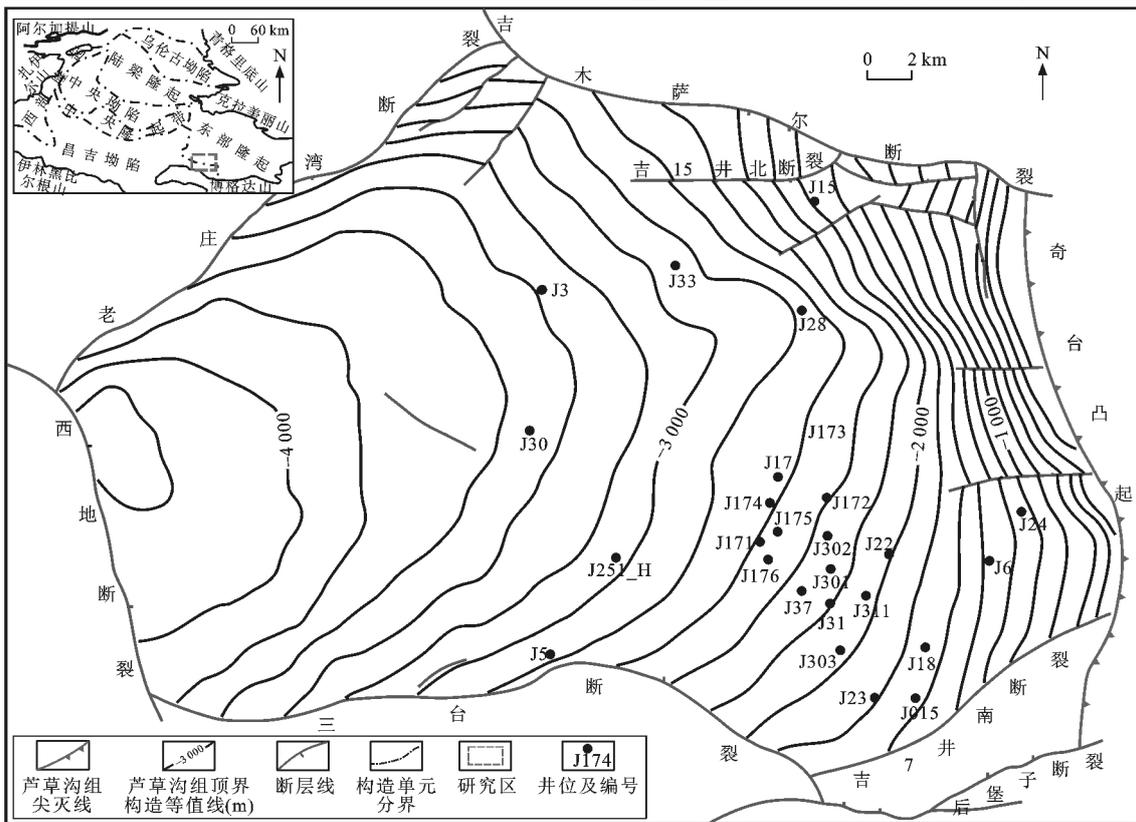
西、南均以断裂为界,东与奇台凸起相接,是在经历多期构造运动的叠加改造后,形成的一个发育在中石炭统褶皱基底上的西深东浅、西断东超的箕状凹陷^[23-24](图 1)。凹陷内部构造总面积大于 1 200 km²,二叠系芦草沟组(P₂l)为吉木萨尔凹陷最主要的烃源岩地层,可分为上、下两段,每段可分为上、下两层组,分别为 P₂l₁¹、P₂l₁²、P₂l₂¹、P₂l₂²(图 2)。目前钻探井所钻遇的源岩厚度大于 200 m,有利区面积达 806 km²,达到好—最好的生油岩标准,有机质类型以 I 型和 II 型为主,成熟度主体达到成熟阶段。芦草沟组储层具有分布面积大、有效厚度大、低孔、特低渗的特点。吉木萨尔凹陷属于近海湖盆,而研究层位二叠系芦草沟组沉积期气候干旱,水体盐度高,是典型的欠补偿型沉积,且该沉积期周边地区火山活动频繁,沉积组分复杂,矿物成分在纵向上变化频繁^[12](图 2)。通过精细地震标定及井震结合,在区域追踪出芦草沟组上、下“甜点体”的分布范围。资料显示:上“甜点体”以泥晶云岩为主,可见少量的粉砂岩薄层^[22],源岩厚度大于 5 m 的有利区面积约 398 km²,平均厚度为 24.8 m;下“甜点体”以粉砂岩和沉凝灰岩为主,其次为泥晶白云岩与泥岩^[27],源

岩厚度大于 20 m 的有利区面积约 871 km²,平均厚度为 34.8 m,以咸化湖相沉积为主。全区多口新部署的井和早期钻探老井均获得工业性油流,表现出良好的勘探开发前景。

2 岩石类型及矿物成分特征

吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层矿物成分复杂。X 射线衍射及薄片鉴定显示,该区主要发育石英、钾长石、斜长石、方解石、(铁)白云石、黄铁矿、沸石以及黏土矿物等多种矿物类型(图 2)。前人根据“四组分三端元”的分类方案,将碳酸盐含量、火山碎屑含量以及陆源碎屑含量作为 3 个端元组分,并遵循三级命名原则将研究区分为 4 种岩石类型,即陆源碎屑岩类、碳酸盐岩类、火山碎屑岩类和混积岩类,并详细划分为 18 个小类^[27]。本文在此分类基础上,通过 X 射线衍射,结合镜下薄片分析,明确了不同岩石类型的矿物成分和含量差异(表 1)。

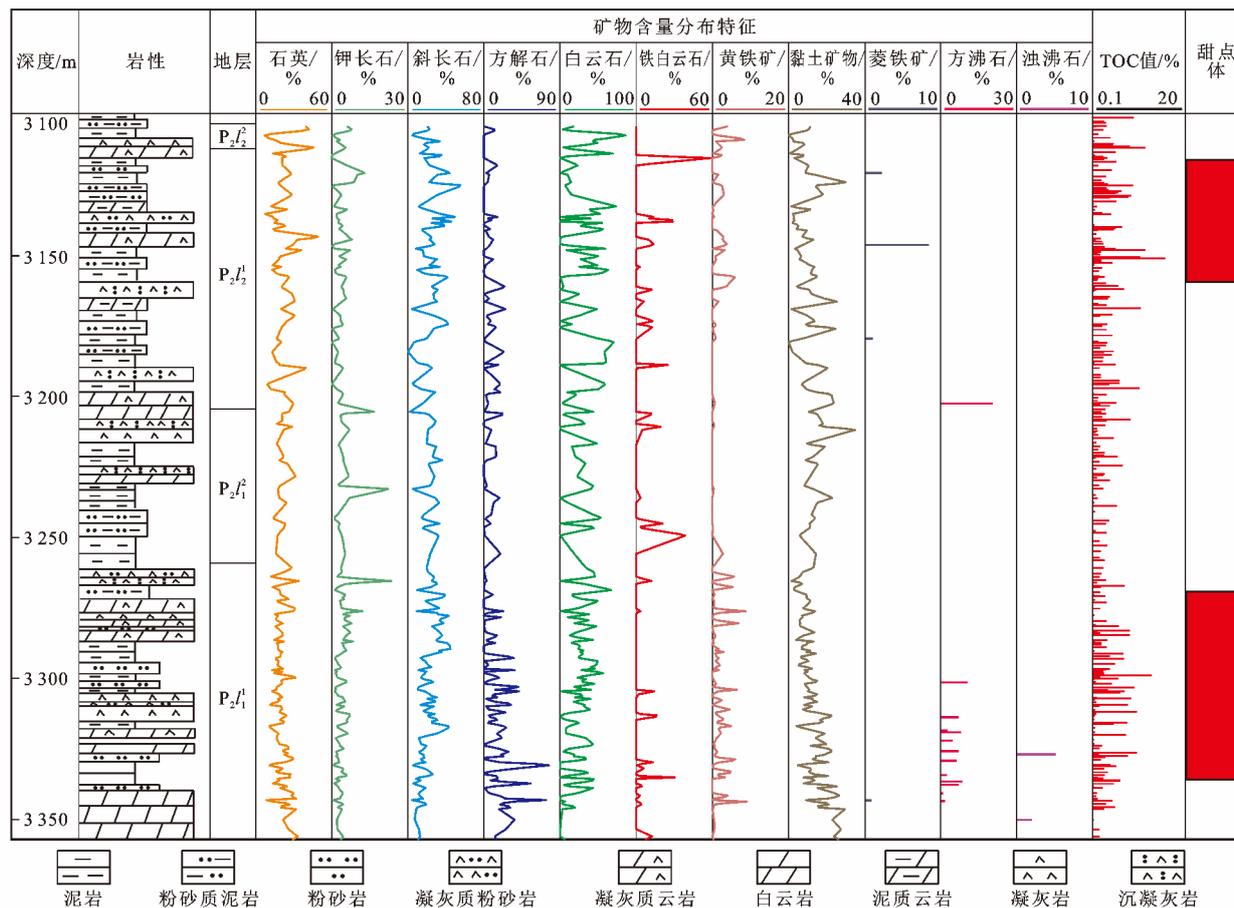
碳酸盐岩类主要发育泥晶云岩、粉砂质砂屑云岩和凝灰质云岩 3 种岩石类型。泥晶云岩中白云石含量(质量分数,下同)最高,平均为 86.1%,斜长石



图件引自文献^[27],有所修改

图 1 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组地质构造简图

Fig. 1 Geological Structural Sketch Map of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag of Junggar Basin



图件引自文献[32]

图2 芦草沟组综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive Geological Histogram of Lucaogou Formation

表1 全岩X射线衍射分析结果

Tab. 1 XRD Analysis Results of Whole-rocks

深度/ m	岩石 分类	岩性	不同矿物含量/%								
			石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	铁白云石	黏土矿物	沸石	黄铁矿
3 114.86	碳酸盐 岩类	灰色块状泥晶云岩	6.4	—	2.1	—	91.5	—	—	—	—
3 323.38		灰色块状泥晶云岩	8.2	—	3.0	—	85.2	—	3.6	—	
3 116.89		灰色块状粉砂质砂屑云岩	17.1	1.8	19.8	—	52.9	—	7.5	0.9	
3 146.54		深灰色块状粉砂质砂屑云岩	14.6	3.8	15.5	1.8	53.7	—	9.8	1.2	
3 273.78		灰色块状/纹层状凝灰质云岩	14.5	4.9	23.7	—	54.8	—	2.1	—	
3 127.53	陆源	灰色块状凝灰质粉砂岩	27.9	13.1	45.3	2.7	—	—	8.8	2.2	
3 136.45	碎屑 岩类	灰色纹层状凝灰质泥岩	28.3	12.6	28.7	5.5	3.1	—	17.3	—	4.5
3 263.36		深灰色纹层状云质泥岩	24.6	8.8	29.0	0.7	25.8	—	8.1	—	—
3 273.52	火山	灰色块状粉砂质凝灰岩	19.9	15.3	45.1	—	12.5	—	7.2	—	—
3 335.28	碎屑 岩类	灰色灰质凝灰岩	30.4	20.1	20.9	19.2	—	5.8	1.9	1.7	—
3 262.59		灰色云质凝灰岩	29.9	23.4	25.3	3.1	—	12.3	2.8	3.2	—

注：“—”表示矿物含量低于检测限；样品采自 J174 井。

和石英平均含量分别为 2.6%和 7.3%，黏土矿物平均含量为 1.8%，镜下显示成分较为均一[图 3(a)]；粉砂质砂屑云岩中白云石含量减少，平均为 53.3%，

陆源碎屑含量明显增加，石英平均含量为 15.8%，斜长石和钾长石平均含量分别为 17.7%和 2.8%，黏土矿物平均含量为 8.6%，可见少量黄铁矿，镜下

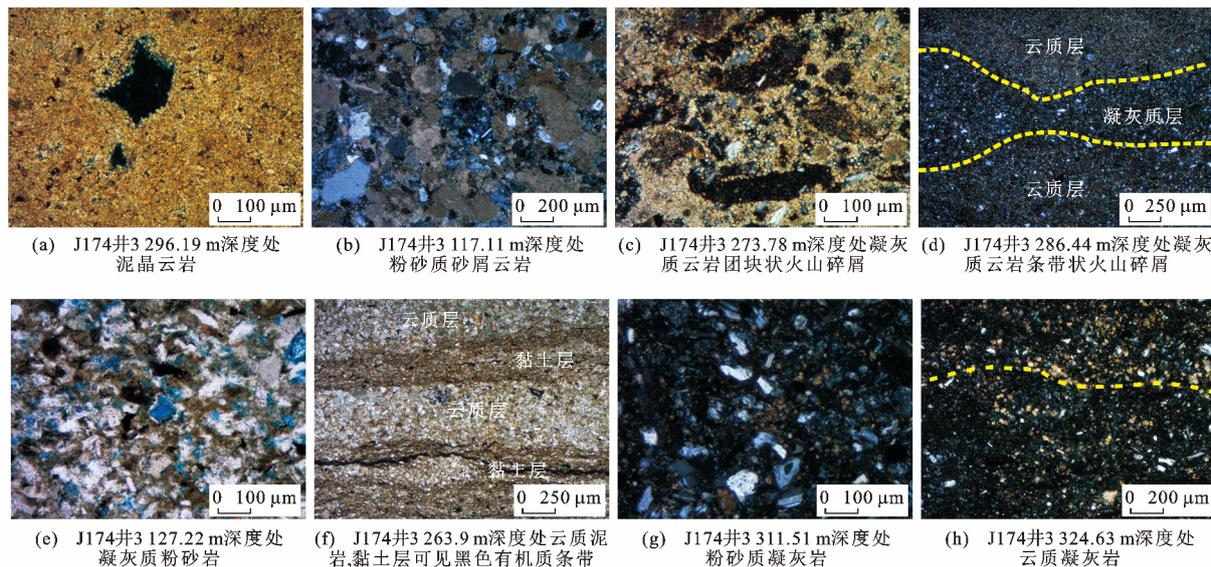


图 3 岩石类型及特征

Fig. 3 Types and Characteristics of Rocks

粉砂级长英质矿物与云质砂屑混合,长英质矿物呈次棱角状,云质砂屑磨圆相对较好[图 3(b)];凝灰质云岩中白云石平均含量为 55.4%,石英平均含量为 13.9%,斜长石和钾长石平均含量分别为 22.6%和 6.9%,黏土矿物平均含量为 2.5%,镜下火山碎屑组分呈条带状或团块状分布[图 3(c)、(d)]。

陆源碎屑岩类主要发育凝灰质粉砂岩、凝灰质泥岩和云质泥岩。凝灰质粉砂岩中长英质矿物含量明显增加,石英平均含量为 27.6%,斜长石和钾长石平均含量分别为 46.7%、13.2%,黏土矿物含量增加,平均为 8.0%,可见少量黄铁矿,镜下显示为火山碎屑和陆源碎屑分散混积[图 3(e)];凝灰质泥岩和云质泥岩呈纹层状,沉积韵律明显,黏土层可见黑色有机质条带[图 3(f)]。

在火山碎屑岩类中,火山碎屑含量增加。粉砂质凝灰岩所含钾长石含量增加,平均含量为 15.6%,沸石平均含量为 1.5%,镜下可见火山凝灰质层与粉砂质碎屑层叠置[图 3(g)];云质/灰质凝灰岩中,石英平均含量为 30.2%,长石平均含量为 44.9%,碳酸盐矿物平均含量为 18.7%,黏土矿物含量减少,沸石平均含量为 1.9%,镜下显示碳酸盐矿物与火山碎屑混积,具有一定的互层性[图 3(h)]。

3 储层成岩作用

3.1 压实作用

在碳酸盐岩类中,组分较为单一的泥晶云岩呈均一块状,压实作用较强,其缝合线最为发育[图 4(a)];随着陆源碎屑和凝灰质含量的增多,岩性过渡为粉

砂质砂屑云岩和凝灰质云岩,压实作用中等,粉砂级长英质颗粒呈分散状充填于砂屑间,凝灰质云岩中团块状及条带状火山碎屑通过压实调整后具有一定定向性[图 4(b)]。

在陆源碎屑岩类中,粉—细砂级的矿物含量增加。凝灰质粉砂岩压实作用中等,矿物颗粒之间呈现明显的线接触,凝灰质分散混积或与黏土层互层[图 4(c)、(d)];云质泥岩压实作用较强,浅色白云质纹层与暗色黏土层互层,在暗色黏土层中有机质含量增多,荧光下可见明显的压实变形且顺层分布[图 4(e)]。

在火山碎屑岩类中,棱角一次棱角状的长英质矿物含量增多,磨圆差但分选较好,粉砂质凝灰岩压实强度中等,其压实特征与凝灰质粉砂岩相似。

3.2 溶蚀作用

前人研究认为,研究区储层经历了酸碱流体交替溶蚀改造^[23],陆源碎屑岩类、火山碎屑岩类、碳酸盐岩类均发生不同程度的溶蚀,极大地改善了储层的储集物性^[34]。溶蚀强度受各岩类不稳定组分和含量影响,表现出较大差异。

泥晶云岩成分单一,致密程度最强,其溶蚀作用最弱;而粉砂质砂屑云岩和凝灰质云岩中的长石和凝灰质发生较强的溶蚀[图 4(g)],长石溶蚀多形成铸模孔,而白云石基本不溶[图 4(f)]。前人研究发现长石与碳酸盐矿物在酸性流体作用下存在选择性溶蚀现象,Surdam 等认为不同温度段长石和碳酸盐矿物溶蚀情况不同^[35-36]。与长石相比,白云石发生溶蚀需要更强的酸性条件,当酸性流体与长石作用

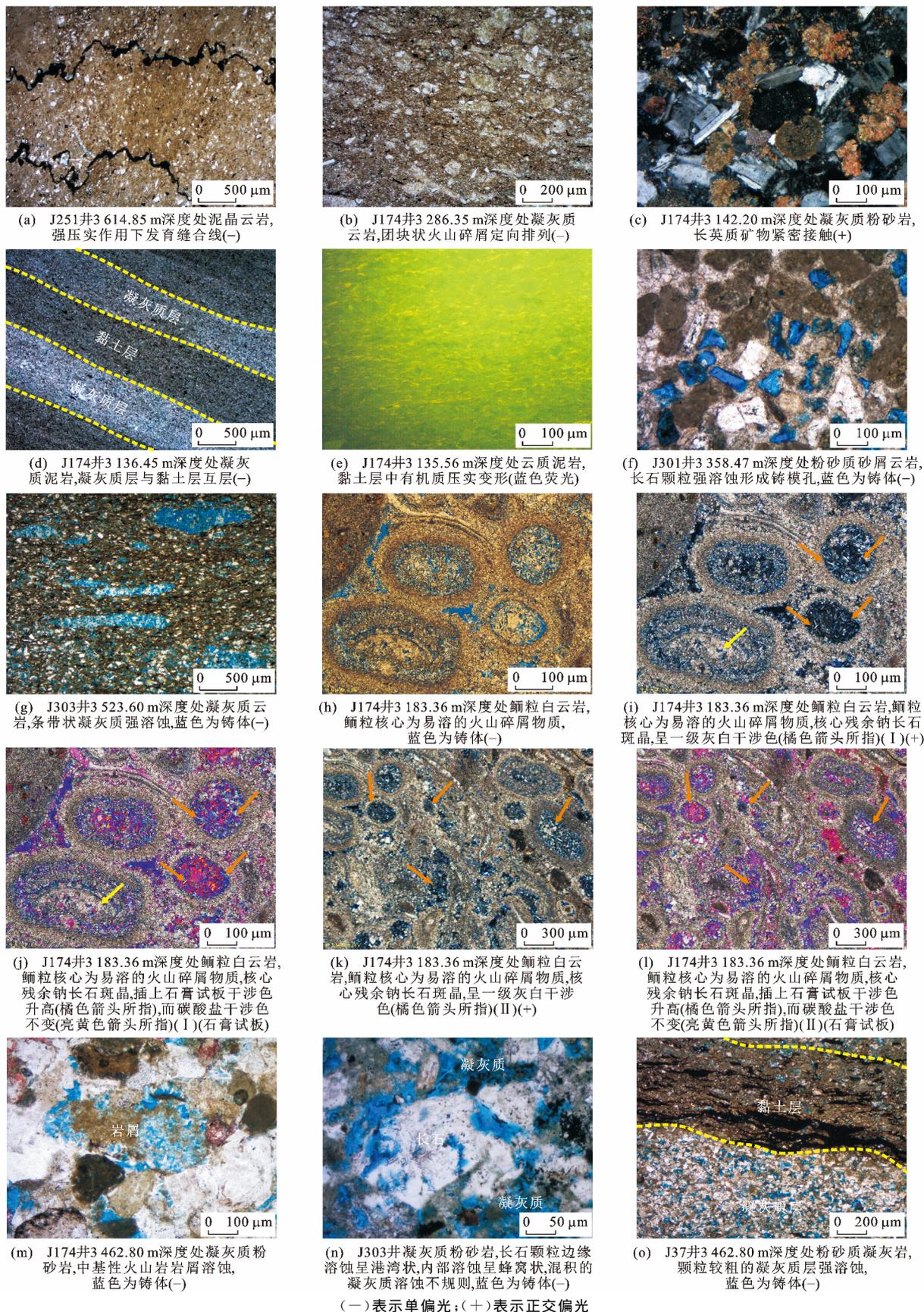


图4 压实及溶蚀作用特征

Fig. 4 Characteristics of Compaction and Dissolution

形成 HCO_3^- 及 CO_3^{2-} , 一方面消耗了 H^+ , 降低了 pH 值, 另一方面形成了 CO_3^{2-} , 有利于方解石和白云石沉淀。鲕粒白云岩中鲕粒核心有火山碎屑和碳酸盐组分, 其中火山碎屑极易发生溶蚀, 核心残留钠长石斑晶, 镜下插上石膏试板后干涉色升高, 而核心为碳酸盐成分的基本不发生溶蚀, 插上石膏试板后干涉色基本不变[图 4(h)~(l)]。

块状混积的凝灰质粉砂岩溶蚀作用也较为强烈, 陆源碎屑组分的长石、中基性火山岩岩屑及分散状的凝灰质物质在有机酸、 CO_2 等酸性流体的影响下发生溶蚀[图 4(m)、(n)], 长石颗粒内部溶蚀形成蜂窝状^[37], 颗粒边缘溶蚀呈港湾状, 分散状的凝灰质溶蚀较不规则。纹层状的凝灰质泥岩和云质泥岩压实作用都较强, 致密程度高, 基本不发生溶蚀[图 3(f)、图 4(d)]。

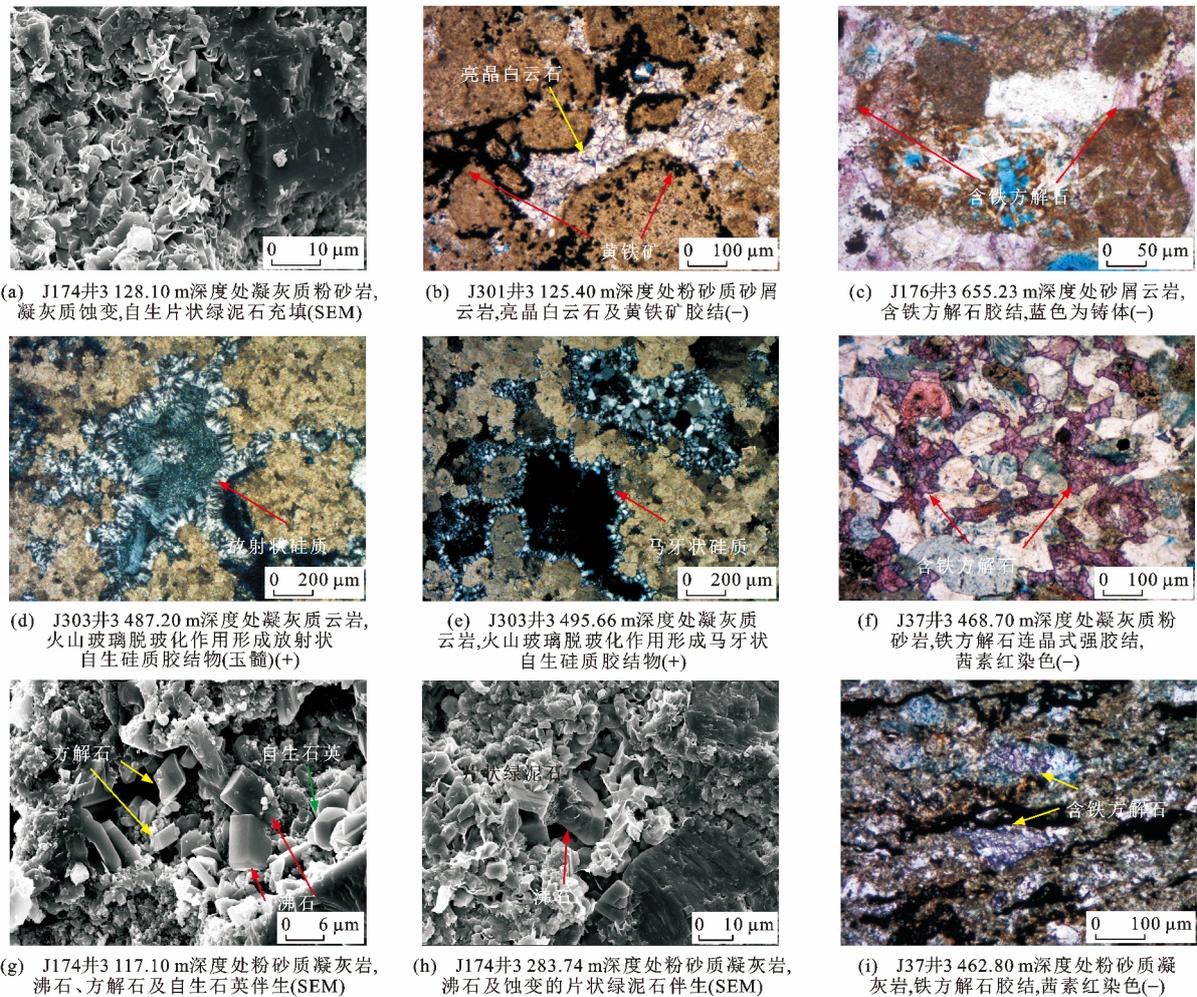
块状混积的粉砂质凝灰岩溶蚀作用特征与凝灰质粉砂岩相似, 纹层状的凝灰岩多表现为与泥质层互

层, 颗粒较粗的凝灰质层和尖棱角状的长英质矿物颗粒发生强溶蚀, 而黏土层基本无溶蚀[图 4(o)]。

3.3 胶结作用

通过薄片及扫描电镜观察, 结合 X 射线衍射分析结果, 认为研究区发育白云石、铁白云石、方解石、铁方解石、自生石英、自生钠长石、沸石和黏土矿物, 黏土矿物多由长石和凝灰质蚀变而充填于粒间[图 5(a)], 在各岩类中胶结物的类型差异较大。

在碳酸盐岩类中, 粉砂质砂屑云岩胶结作用较为明显, 当粉砂质含量较少时, 其胶结作用较强, 表现为鲕粒间或砂屑间发育晶型较好的亮晶白云石或方解石胶结物和少量黄铁矿[图 5(b)、(c)]。利用 Image-pro Plus 6.0 软件进行定量圈定, 该岩类中碳酸盐胶结物含量为 1.2%~5.3%, 平均为 2.1%。凝灰质云岩中混积的火山玻璃发生脱玻化作用, 在白云石粒间形成放射状或马牙状的自生硅质胶结物[图 5(d)、(e)]。



(a) J174井3 128.10 m深度处凝灰质粉砂岩, 凝灰质蚀变, 自生片状绿泥石充填(SEM)
 (b) J301井3 125.40 m深度处粉砂质砂屑云岩, 亮晶白云石及黄铁矿胶结(-)
 (c) J176井3 655.23 m深度处砂屑云岩, 含铁方解石胶结, 蓝色为铸体(-)
 (d) J303井3 487.20 m深度处凝灰质云岩, 火山玻璃脱玻化作用形成放射状自生硅质胶结物(玉髓)(+)
 (e) J303井3 495.66 m深度处凝灰质云岩, 火山玻璃脱玻化作用形成马牙状自生硅质胶结物(+)
 (f) J37井3 468.70 m深度处凝灰质粉砂岩, 铁方解石连晶式强胶结, 茜素红染色(-)
 (g) J174井3 117.10 m深度处粉砂质凝灰岩, 沸石、方解石及自生石英伴生(SEM)
 (h) J174井3 283.74 m深度处粉砂质凝灰岩, 沸石及蚀变的片状绿泥石伴生(SEM)
 (i) J37井3 462.80 m深度处粉砂质凝灰岩, 铁方解石胶结, 茜素红染色(-)

(-)表示单偏光; (+)表示正交光

图 5 胶结作用特征

Fig. 5 Characteristics of Cementation

在陆源碎屑岩类中,凝灰质粉砂岩以白云石和含铁方解石胶结为主,部分层段发育石英加大边。白云石和含铁方解石以半自形—自形充填于溶蚀孔隙,可见少量结晶程度较好的铁方解石成连晶式胶结[图 5(f)],碳酸盐胶结物含量为 2.4%~20.0%,平均为 5.7%,石英次生加大含量小于 1%。纹层状云质泥岩胶结作用基本不发育。

火山碎屑岩类发育的胶结物类型较多,包括白云石、铁方解石、自生石英、自生钠长石及沸石(以方沸石为主)[图 5(g)~(i)]。在粉砂质凝灰岩中,沸石多与方解石、自生石英伴生出现,在扫描电镜下沸石多呈板状[图 5(g)、(h)];通过 X 射线衍射分析,

沸石含量约为 3.8%。在凝灰质溶蚀孔中可见表面洁净的长石晶体;通过能谱分析,其成分为钠长石,充填于凝灰质溶蚀孔内。

4 储集空间特征

通过对 196 个样品进行常规气测孔隙度和渗透率测试,并结合 X 射线衍射分析及镜下薄片鉴定,确定不同岩石类型的储集空间、储集物性及含油性特征(表 2)。结果显示,粉砂质砂屑云岩、凝灰质粉砂岩和粉砂质凝灰岩储集物性最好,含油性为油迹,其次为凝灰质云岩和云质凝灰岩,含油性为油斑—荧光,泥晶云岩、云质泥岩及凝灰质泥岩物性最差。

表 2 各类岩石储层特征参数

Tab. 2 Reservoir Parameters of Each Rock

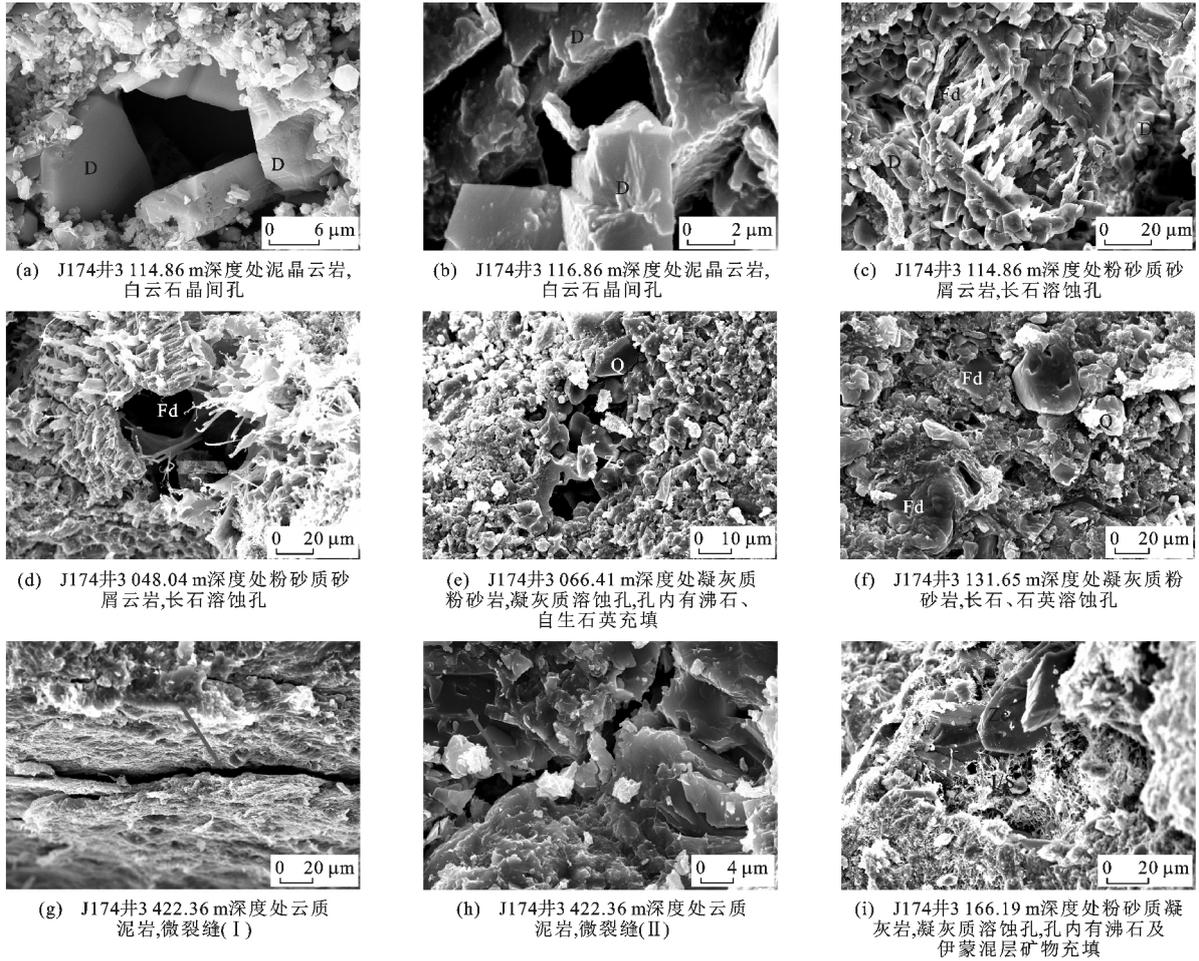
深度/m	岩石分类	岩性	孔隙度/%	渗透率/mD	排驱压力/MPa	含油性
3 218.46	碳酸盐岩类	灰色块状泥晶云岩	4.1	0.011	8.34	荧光
3 285.57		灰色块状泥晶云岩	4.4	0.006	10.30	荧光
3 028.12		灰色块状泥晶云岩	5.8	0.004	9.46	荧光
3 117.60		灰色块状粉砂质砂屑云岩	17.4	1.100	0.33	油斑
3 144.84		灰色块状粉砂质砂屑云岩	14.5	0.284	0.85	油迹
3 319.25		灰色块状/纹层状凝灰质云岩	9.7	0.011	5.49	
3 146.54		灰色块状/纹层状凝灰质云岩	9.1	0.032	6.32	油迹
3 276.61	陆源碎屑岩类	灰色块状凝灰质粉砂岩	16.2	0.208	1.19	油迹
3 283.09		灰色块状凝灰质粉砂岩	13.4	0.109	1.72	
3 274.60		灰色纹层状凝灰质泥岩	4.8	0.014	12.47	荧光
3 297.50		深灰色纹层状云质泥岩	5.7	0.033	10.48	荧光
3 274.65	火山碎屑岩类	灰色块状粉砂质凝灰岩	13.9	0.224	3.19	油斑
3 277.50		灰色块状粉砂质凝灰岩	13.4	0.138	3.38	油斑
3 271.74		灰色纹层状粉砂质凝灰岩	5.5	0.004	10.42	荧光
3 310.10		灰色云质凝灰岩	7.2	0.012	6.55	

注:样品来自 J174 井。

吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层成岩作用复杂,孔渗相关性差,纳米级孔隙发育^[33],因此,仅仅利用宏观物性不能很好地表征储层的储集物性,需要将铸体薄片、激光共聚焦显微镜、扫描电镜、恒速压汞等分析测试方法相结合,对储层的储集性能及差异进行精细刻画。

通过铸体薄片和扫描电镜观察发现,泥晶云岩储层的储集空间不发育,仅可见白云石晶间孔[图 6(a)、(b)],整体物性较差。气测孔隙度实验数据表明,其孔隙度为 1.2%~5.8%,平均值为 4.9%,渗透率为 0.004~0.018 mD,平均值为 0.007 mD;恒速压汞测试表明其排驱压力高,可达 10.30 MPa;激光共聚焦显微镜观察发现该类储层

的储集空间少,孔隙多呈孤立状,孔喉连通性差[图 7(a)~(c)]。粉砂质砂屑云岩储集空间十分发育,多为长石溶蚀形成的粒内孔、铸模孔以及少量凝灰质溶蚀孔[图 6(c)、(d)]。这类储层孔隙度较高,气测孔隙度为 14.5%~19.9%,平均值为 16.4%,渗透率为 0.245~1.100 mD,平均值可达 0.552 mD;恒速压汞测试表明其排驱压力低,仅为 0.85 MPa 左右;结合激光共聚焦显微镜观察,发现该类储层的储集空间孔喉连通性好[图 7(d)~(f)]。凝灰质云岩储集空间以分散状凝灰质、团块状或条带状凝灰质岩屑及尖棱角状的长英质火山碎屑溶蚀孔为主[图 4(g)],鲕粒白云岩中凝灰质核心也发生溶蚀[图 4(h)],其孔隙度和渗透率中等,恒



D 为白云石; Fd 为长石; Q 为自生石英; Ze 为沸石; I/S 为伊蒙混层

图 6 储集空间扫描电镜图像

Fig. 6 SEM Images of Reservoir Space

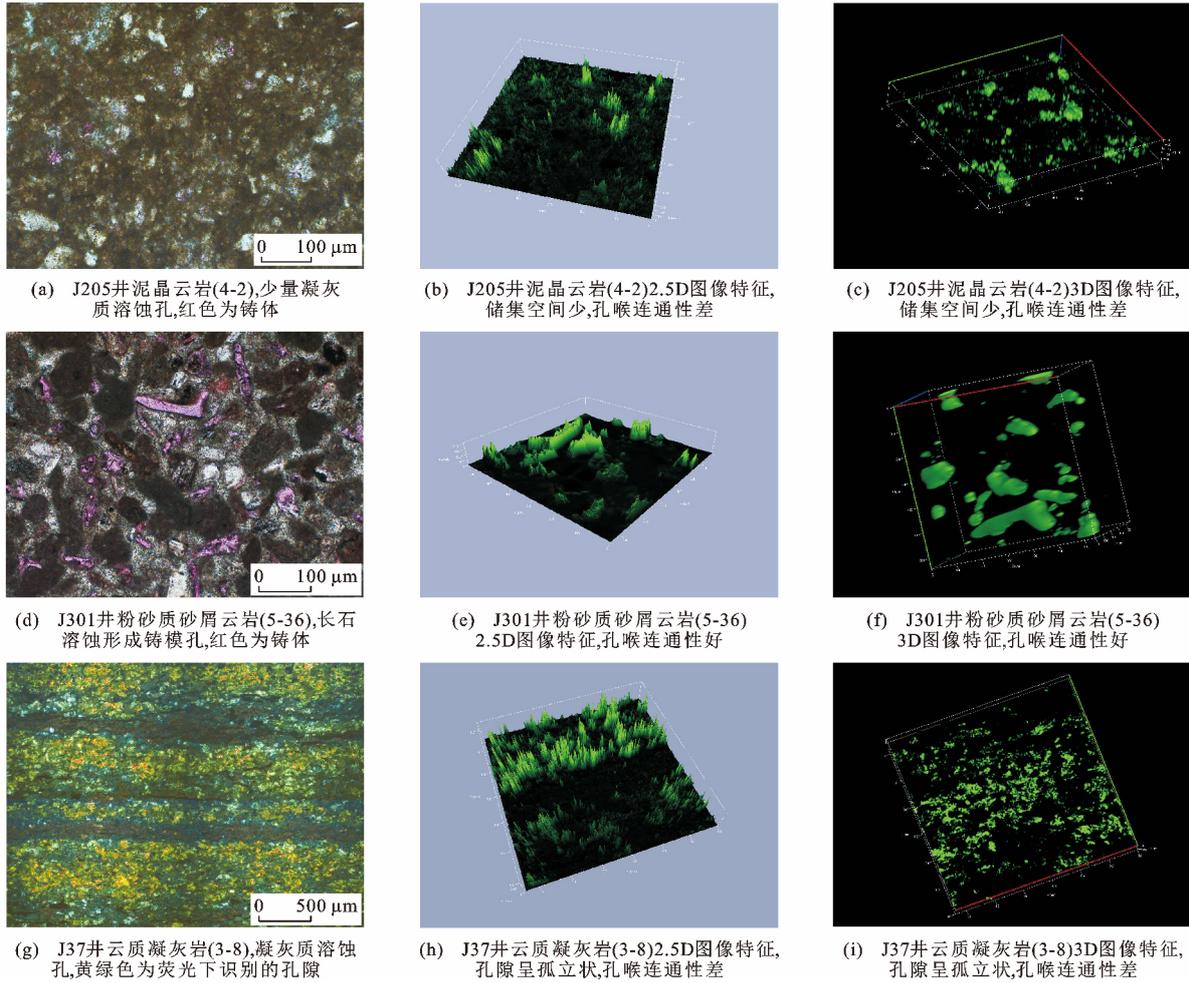
速压汞测试表明其排驱压力约为 6 MPa, 孔喉连通性中等。

凝灰质粉砂岩储集空间以粉—细砂级长石颗粒内部及边缘、中基性火山岩岩屑及分散状混积的凝灰质次生溶蚀孔为主, 溶蚀孔内有沸石和自生石英充填[图 6(e)、(f)]。这类储层储集物性较好, 孔隙度平均值为 14.2%, 渗透率平均值为 0.148 mD, 恒速压汞测试表明其排驱压力值较小, 孔喉连通性较好。云质泥岩孔隙不发育, 在扫描电镜下可见少量的晶间孔及少量微裂缝[图 6(g)、(h)], 其储集物性较差。

粉砂质凝灰岩的储集空间与凝灰质粉砂岩类似, 溶蚀孔内常有沸石及大量伊蒙混层矿物充填[图 6(i)], 其储集物性较好, 孔隙度平均值为 13.7%, 渗透率平均值为 0.181 mD, 排驱压力较小。云质凝灰岩以凝灰质溶蚀孔为主, 发育一定量的晶间孔, 孔隙度中等, 渗透率较低, 排驱压力较高, 溶蚀孔隙多呈孤立状, 连通性差[图 7(g)~(i)]。

5 储层成岩作用与储集空间的关系

不同岩类储层发育不同的储集空间, 不仅受岩石组分和结构的影响, 也与储层遭受的关键成岩作用密切相关^[38-39]。碳酸盐岩类储层以白云石和云质砂屑为主。泥晶云岩的成分组成较单一, 遭受了较强的压实作用改造, 可形成大量的缝合线作为后期烃类运移通道, 胶结和溶蚀作用弱, 其储集空间主要是泥晶云岩在后期埋藏过程中发生重结晶作用形成的, 储集物性差(图 8)。对于粉砂质砂屑云岩, 由于云质砂屑具有一定的抗压性, 该类储层遭受的压实作用中等。本区储层镜质体反射率(R_o)为 0.58%~1.20%, 自晚三叠世开始进入生油阶段, 在中侏罗世进入大量生烃阶段, 为芦草沟组第一个成藏期^[40]。蕙克来等研究发现, 早侏罗世包裹体的均一温度为 50℃~70℃, 此阶段有机质产生的大量有机酸得以保存, 结合芦草沟组致密油储层的沉积特征, 储层具有源储一体与源储互层的特征, 有机酸能快速进



2. 5D 图像中, 绿色表示孔隙位置, 高度表示识别出来的孔隙发育程度; 3D 图像中, 绿色范围表示孔隙及吼喉连通性

图 7 孔隙激光共聚焦显微镜和扫描电镜图像

Fig. 7 CLSM and SEM Images of Pores

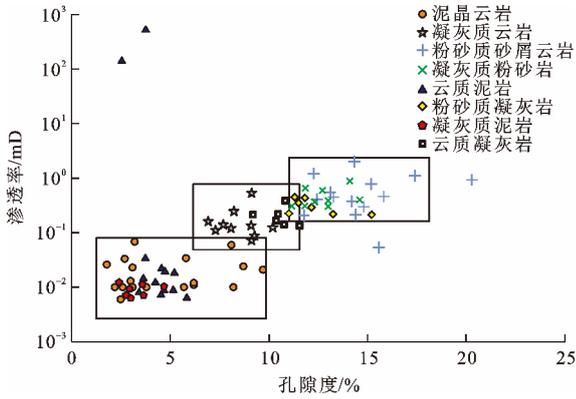


图 8 各类岩石孔隙度与渗透率关系

Fig. 8 Relationship Between Porosity and Permeability of Each Rock

入储层^[27,40], 导致溶蚀作用强, 形成大量的铸模孔, 且连通性好, 从晚白垩世至今, 埋藏温度为 120 °C, 烃源岩仍处于低熟—成熟阶段, 在此过程中也伴随有机酸的产生, 部分有机酸在高温下发生分解, 对储

层物性在一定程度上有所改善。粉砂质砂屑云岩储层也经历了胶结作用改造, 具有一定的破坏性, 但胶结物含量为 1.2%~5.3%, 因此, 储层仍以溶蚀作用的影响为主, 储集物性好(图 8)。凝灰质云岩物性较粉砂质砂屑云岩差(图 8)。

陆源碎屑岩类储层以粉—细砂级长英质矿物和岩屑颗粒为主, 具有一定的抗压实能力。块状凝灰质粉砂岩储层储集空间以长石、岩屑以及分散状凝灰质和团块状凝灰质岩屑等次生溶蚀孔为主, 这类物质在溶蚀过程中易形成伊蒙混层、绿泥石等黏土矿物充填在溶蚀孔隙中。根据 X 射线衍射分析数据, 长石含量与黏土矿物含量成明显的负相关关系(图 9)。通过统计黏土矿物含量与孔隙度、渗透率的关系发现, 孔隙度与黏土矿物含量成负相关关系, 表明黏土矿物对孔隙造成一定程度的堵塞[图 10(a)], 而渗透率与黏土矿物含量相关性较差, 推测其受微裂缝影响较大[图 10(b)]。同时, 碳酸盐胶结对储集空

间也具有一定的破坏性,块状凝灰质粉砂岩储层储集物性中等—好(图 8)。纹层状云质泥岩以压实作用为主,对储集空间的破坏强,储集物性差(图 8)。

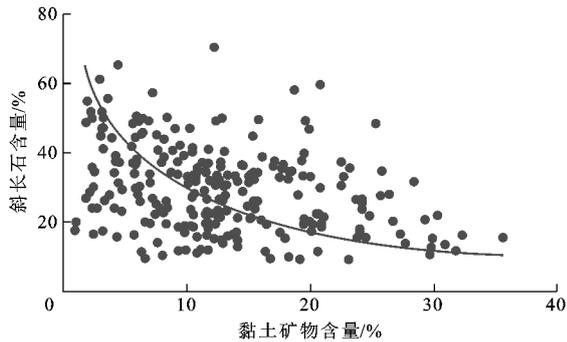
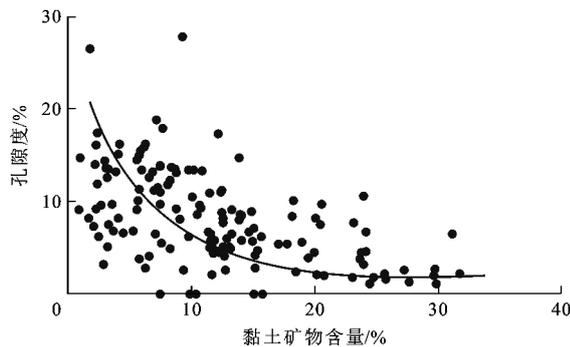
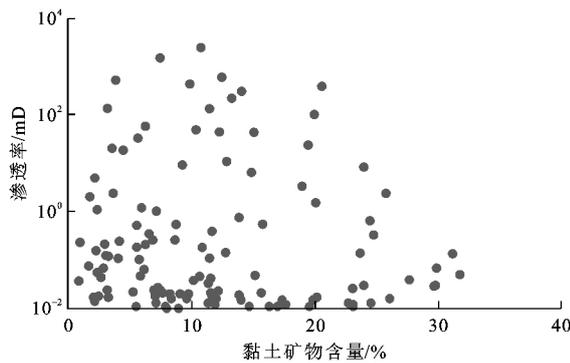


图 9 黏土矿物与长石含量关系

Fig. 9 Relationship Between Contents of Clay Mineral and Feldspar



(a) 黏土矿物含量与孔隙度关系



(b) 黏土矿物含量与渗透率关系

图 10 黏土矿物含量与孔隙度、渗透率关系

Fig. 10 Relationships Between Porosity, Permeability and Contents of Clay Mineral

火山碎屑岩类中以空落或水流搬运而来的中基性火山岩岩屑及凝灰质为主,具有酸不稳定性。块状粉砂质凝灰岩储层与凝灰质粉砂岩类似,其遭受较强的溶蚀作用改造,由于黏土矿物的充填对孔隙有一定的堵塞,同时也有自生钠长石、沸石及碳酸盐矿物伴生,增强了储集空间的复杂性,储层中胶结物含量较低,对储集空间的影响小于压实作用和溶蚀作用,这类储层储集物性中等—好(图 8)。云质凝

灰岩的压实作用中等,分散状凝灰质发生溶蚀,但多有黏土矿物、沸石及碳酸盐矿物充填堵塞孔隙,其储集物性较块状粉砂质凝灰岩差(图 8)。

6 结 语

(1)准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层主要成岩作用有压实作用、溶蚀作用、胶结作用,不同岩类中成岩作用的强度及表现形式不同。碳酸盐岩类中,泥晶云岩经历强压实,致密程度高,胶结和溶蚀作用基本不发育,粉砂质砂屑云岩及凝灰质云岩压实作用中等,粉—细砂级长石及凝灰质强溶蚀,发育少量的碳酸盐胶结物;陆源碎屑岩类中,凝灰质粉砂岩压实作用中等,溶蚀作用较强,溶蚀孔隙中有较多的黏土矿物充填,胶结物以碳酸盐矿物为主,云质泥岩以强压实作用为主;火山碎屑岩类中,粉砂质凝灰岩和云质凝灰岩压实作用中等,以凝灰质溶蚀为主,孔隙中发育伊蒙混层等黏土矿物、沸石、钠长石及碳酸盐胶结物。

(2)不同岩类储集空间及储集物性存在差异。泥晶云岩、云质泥岩及泥质凝灰岩基本不发育储集空间,可见纳米级晶间孔、有机质孔等,储集物性差;粉砂质砂屑云岩、粉砂质凝灰岩及凝灰质粉砂岩发育长石粒内和粒间溶蚀孔、铸模孔及凝灰质溶蚀孔,连通性较好,储集物性好;凝灰质云岩和云质凝灰岩发育分散状凝灰质溶蚀孔、团块状或条带状凝灰质岩屑溶蚀孔及尖棱角状的长英质溶蚀孔,连通性较好,储集物性中等。

(3)不同岩类的储集空间是各种成岩作用叠加改造的结果。泥晶云岩、云质泥岩及泥质凝灰岩以强压实作用为主,其余岩类主要以压实减孔和溶蚀增孔改造为主,胶结作用的致密化影响较小。

参 考 文 献 :

References :

[1] 姚泾利,赵彦德,邓秀芹,等.鄂尔多斯盆地延长组致密油成藏控制因素[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(4):983-992.
YAO Jing-li, ZHAO Yan-de, DENG Xiu-qin, et al. Controlling Factors of Tight Oil Reservoir in Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2015, 45(4): 983-992.

[2] 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 Cheng-zao, ZOU Cai-neng, LI Jian-zhong, 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.
- [3] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望: 以中国致密油和致密气为例[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 173-187.
ZOU Cai-neng, ZHU Ru-kai, WU Song-tao, et al. Types, Characteristics, Genesis and Prospects of Conventional and Unconventional Hydrocarbon Accumulations; Taking Tight Oil and Tight Gas in China as an Instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173-187.
- [4] 王社教, 蔚远江, 郭秋麟, 等. 致密油资源评价新进展[J]. *石油学报*, 2014, 35(6): 1095-1105.
WANG She-jiao, WEI Yuan-jiang, GUO Qiu-lin, et al. New Advance in Resources Evaluation of Tight Oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(6): 1095-1105.
- [5] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地二叠系成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 Li-chun, TANG Yong, LEI De-wen, 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.
- [6] 匡立春, 王霞田, 郭旭光, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油地质特征与勘探实践[J]. *新疆石油地质*, 2015, 36(6): 629-634.
KUANG Li-chun, WANG Xia-tian, GUO Xu-guang, et al. Geological Characteristics and Exploration Practice of Tight Oil of Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(6): 629-634.
- [7] 姚泾利, 邓秀芹, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(2): 150-158.
YAO Jing-li, DENG Xiu-qin, ZHAO Yan-de, et al. Characteristics of Tight Oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(2): 150-158.
- [8] 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 Hua, LI Shi-xiang, LIU Xian-yang. Characteristics and Resource Prospects of Tight Oil and Shale Oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 1-11.
- [9] 杜金虎, 何海清, 杨涛, 等. 中国致密油勘探进展及面临的挑战[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(1): 1-9.
DU Jin-hu, HE Hai-qing, YANG Tao, et al. Progress in China's Tight Oil Exploration and Challenges[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(1): 1-9.
- [10] 杨智, 侯连华, 林森虎, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油、页岩油地质特征与勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(4): 76-85.
YANG Zhi, HOU Lian-hua, LIN Sen-hu, et al. Geologic Characteristics and Exploration Potential of Tight Oil and Shale Oil in Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(4): 76-85.
- [11] 匡立春, 胡文璋, 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 Li-chun, HU Wen-xuan, WANG Xu-long, 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.
- [12] 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 Yu, YANG Yong-qiang, WAN Min, et al. Sedimentary Characteristic and Facies Evolution of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(6): 635-641.
- [13] 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 Chun-song, CHEN Neng-gui, YU Chao-feng, et al. Sedimentary Characteristics of Tight Oil Reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2013, 35(5): 528-533.
- [14] 张亚奇, 马世忠, 高阳, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层沉积相分析[J]. *沉积学报*, 2017, 35(2): 358-370.
ZHANG Ya-qi, MA Shi-zhong, GAO Yang, et al. Depositional Facies Analysis on Tight Reservoir of Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(2): 358-370.
- [15] 马克, 侯加根, 刘钰铭, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组成化湖混合沉积模式[J]. *石油学报*, 2017, 38(6): 636-648.
MA Ke, HOU Jia-gen, LIU Yu-min, et al. The Sedimentary Model of Saline Lacustrine Mixed Sedimentation in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(6): 636-648.
- [16] 曲长胜, 邱隆伟, 杨勇强, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古湖泊学意义[J]. *地质学报*, 2017, 91(3): 605-616.
QU Chang-sheng, QIU Long-wei, YANG Yong-qiang,

- et al. Carbon and Oxygen Isotope Compositions of Carbonatic Rock from Permian Lucaogou Formation in the Jimisar Sag, NW China and Their Paleolimnological Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(3):605-616.
- [17] 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 Cheng-yun, KUANG Li-chun, GAO Gang, et al. Difference in Hydrocarbon Generation Potential of the Shaly Source Rocks in Jimisar Sag, Permian Lucaogou Formation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2):385-390.
- [18] 蒋宜勤,柳益群,杨召,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷凝灰岩型致密油特征与成因[J].*石油勘探与开发*, 2015, 46(6):741-749.
JIANG Yi-qin, LIU Yi-qun, YANG Zhao, et al. Characteristics and Origin of Tuff-type Tight Oil in Jimisar Depression, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 46(6):741-749.
- [19] 曲长胜,邱隆伟,操应长,等.吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组烃源岩有机岩石学特征及其赋存状态[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(2):30-38.
QU Chang-sheng, QIU Long-wei, CAO Ying-chang, et al. Organic Petrology Characteristics and Occurrence of Source Rocks in Permian Lucaogou Formation, Jimisar Sag[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2017, 41(2):30-38.
- [20] 高岗,向宝力,李涛涛,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油系统的成藏特殊性[J].*沉积学报*, 2017, 35(4):824-833.
GAO Gang, XIANG Bao-li, LI Tao-tao, et al. Tight Oil System Particularity of Lucaogou Formation in Jimusa'er Sag, Junggar Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(4):824-833.
- [21] 郑民,李建忠,王文广,等.致密储层石油充注成藏过程分析:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J].*地球科学*, 2018, 43(10):3719-3732.
ZHENG Min, LI Jian-zhong, WANG Wen-guang, et al. Analysis of Oil Charging and Accumulation Processes in Tight Reservoir Beds: A Case Study of Lucaogou Formation in Jimisar Sag of Junggar Basin, NW China[J]. *Earth Science*, 2018, 43(10):3719-3732.
- [22] 唐红娇,杨立辉,朱峰,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油分子尺寸及结构特征[J].*地球科学*, 2018, 43(5):1587-1593.
TANG Hong-jiao, YANG Li-hui, ZHU Feng, et al. Molecular Size and Structure Characteristics of Tight Oil of Lucaogou Formation in Jimisar Depression[J]. *Earth Science*, 2018, 43(5):1587-1593.
- [23] 寇均益.陆内裂谷盆地致密油层成岩作用研究[D].西安:西北大学,2015.
KOU Jun-yi. Diagenesis Research of Intracontinental Rift Basin Tight Oil Reservoir[D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- [24] 周鹏.新疆吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层特征及储层评价[D].西安:西北大学,2014.
ZHOU Peng. Characteristics and Evaluation of Tight Oil Reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimisar Sag, Xinjiang[D]. Xi'an: Northwest University, 2014.
- [25] 宋永,周路,郭旭光,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组湖相云质致密油储层特征与分布规律[J].*岩石学报*, 2017, 33(4):1159-1170.
SONG Yong, ZHOU Lu, GUO Xu-guang, et al. Characteristics and Occurrence of Lacustrine Dolomitic Tight-oil Reservoir in the Middle Permian Lucaogou Formation, Jimusa'er Sag, Southeastern Junggar Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(4):1159-1170.
- [26] 张少敏,操应长,朱如凯,等.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[J].*地学前缘*, 2018, 25(4):198-209.
ZHANG Shao-min, CAO Ying-chang, ZHU Ru-kai, et al. Lithofacies Classification of Fine-grained Mixed Sedimentary Rocks in the Permian Lucaogou Formation, Jimisar Sag, Junggar Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4):198-209.
- [27] 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.
XI Ke-lai, CAO Ying-chang, ZHU Ru-kai, et al. Rock Types and Characteristics of Tight Oil Reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimisar Sag[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 36(12):1495-1507.
- [28] 王晓琦,孙亮,朱如凯,等.利用电子束荷电效应评价致密储集层储集空间:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J].*石油勘探与开发*, 2015, 42(4):472-480.
WANG Xiao-qi, SUN Liang, ZHU Ru-kai, et al. Application of Charging Effects in Evaluating Storage Space of Tight Reservoirs: A Case Study from Permian Lucaogou Formation in Jimisar Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(4):472-480.
- [29] 刘冬冬,张晨,罗群,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹

- 陷芦草沟组致密储层裂缝发育特征及控制因素[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(4): 36-47.
- LIU Dong-dong, ZHANG Chen, LUO Qun, et al. Development Characteristics and Controlling Factors of Natural Fractures in Permian Lucaogou Formation Tight Reservoir in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(4): 36-47.
- [30] 张云钊, 曾联波, 罗群, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密储层裂缝特征和成因机制[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(2): 211-225.
- ZHANG Yun-zhao, ZENG Lian-bo, LUO Qun, et al. Research on the Types and Genetic Mechanisms of Tight Reservoir in the Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(2): 211-225.
- [31] 马世忠, 张宇鹏. 应用压汞实验方法研究致密储层孔隙结构: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组为例[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(1): 26-33.
- MA Shi-zhong, ZHANG Yu-peng. Study on the Pore Structure of Tight Reservoir by Using Method of Mercury Injection: A Case Study of the Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(1): 26-33.
- [32] 查明, 苏阳, 高长海, 等. 致密储层储集空间特征及影响因素: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 85-95.
- ZHA Ming, SU Yang, GAO Chang-hai, et al. Tight Reservoir Space Characteristics and Controlling Factors: An Example from Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin, Northwest China[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(1): 85-95.
- [33] 靳军, 杨召, 依力哈木·尔西丁, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷致密油储层纳米孔隙特征及其含油性[J]. 地球科学, 2018, 43(5): 1594-1601.
- JIN Jun, YANG Zhao, Yilihamu ERXIDING, et al. Nanopore Characteristics and Oil-bearing Properties of Tight Oil Reservoirs in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Earth Science, 2018, 43(5): 1594-1601.
- [34] 祝海华, 钟大康, 姚泾利, 等. 碱性环境成岩作用及对储集层孔隙的影响: 以鄂尔多斯盆地长7段致密砂岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 51-59.
- ZHU Hai-hua, ZHONG Da-kang, YAO Jing-li, et al. Alkaline Diagenesis and Its Effects on Reservoir Porosity: A Case Study of Upper Triassic Chang-7 Tight Sandstones in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 51-59.
- [35] SURDAM R C, CROSSEY L J. Integrated Diagenetic Modeling: A Process-oriented Approach for Clastic Systems[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1987, 15: 141-170.
- [36] SURDAM R C, BOESE S W, CROSSEY L J. The Chemistry of Secondary Porosity: Part 2. Aspects of Porosity Modification[J]. AAPG Memoir, 1984, 37: 127-149.
- [37] 远光辉, 操应长, 惠克来, 等. 东营凹陷北带古近系碎屑岩储层长石溶蚀作用及其物性响应[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 853-866.
- YUAN Guang-hui, CAO Ying-chang, XI Ke-lai, et al. Feldspar Dissolution and Its Impact on Physical Properties of Paleogene Clastic Reservoirs in the Northern Slope Zone of the Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 853-866.
- [38] 牛永斌, 钟建华, 王培俊, 等. 成岩作用对塔河油田二区奥陶系碳酸盐岩储集空间发育的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(6): 13-19.
- NIU Yong-bin, ZHONG Jian-hua, WANG Pei-jun, et al. Effect of Diagenesis on Accumulate Capability of Ordovician Carbonate Rock in Block 2 of Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2010, 34(6): 13-19.
- [39] 钟大康, 周立建, 孙海涛, 等. 储层岩石学特征对成岩作用及孔隙发育的影响: 以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 890-899.
- ZHONG Da-kang, ZHOU Li-jian, SUN Hai-tao, et al. Influences of Petrologic Features on Diagenesis and Pore Development: An Example from the Triassic Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2012, 33(6): 890-899.
- [40] 闫林, 冉启全, 高阳, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层溶蚀孔隙特征及成因机理[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(3): 27-33.
- YAN Lin, RAN Qi-quan, GAO Yang, et al. Characteristics and Formation Mechanism of Dissolved Pores in Tight Oil Reservoirs of Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(3): 27-33.