

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组 混积岩成因及其孔隙发育特征

王剑^{1,2,3}, 袁波⁴, 刘金^{1,2}, 李勇³, 李二庭^{1,2}, 马聪^{1,2}, 张宝真⁵

1. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆克拉玛依 834000;

2. 新疆页岩油勘探开发实验室, 新疆克拉玛依 834000;

3. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500;

4. 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;

5. 中国石油新疆油田分公司风城作业区, 新疆克拉玛依 834000

摘要:以岩性特征差异对混积岩储层孔隙成因的影响作用为主线,从岩石组构与颗粒堆积学的关系角度分析孔隙的成因和特征。研究认为:(1)基于水动力条件、矿物组合和岩石结构特征,并以碎屑颗粒、黏土矿物和碳酸盐类矿物三端元作为划分依据,芦草沟组“甜点”岩性主要有凝灰质砂屑云岩、凝灰质长石岩屑粉细砂岩、凝灰质云屑砂岩及凝灰质云质粉砂岩。混积岩主要为母源混合成因,并且垂向上各类型混积岩层可互层叠置而形成相缘混合。(2)基于颗粒的球形堆积模型,当碎屑颗粒含量低于52.4%时,孔隙度随颗粒含量的增加而减小;当碎屑颗粒含量达到52.4%时,如果碎屑颗粒含量继续增加,粒间孔隙将大量出现,孔隙度将快速增大,逐渐演变为常规的砂岩储层。(3)根据碎屑颗粒、黏土矿物和碳酸盐类矿物三种端元组分与孔隙类型的关系,芦草沟组混积岩的孔隙类型可以划分为粒间孔、粒内溶孔和晶间孔,凝灰质砂屑云岩、凝灰质长石岩屑粉细砂岩的孔隙类型以颗粒支撑的粒间孔和粒内溶孔为主,而凝灰质云屑砂岩及凝灰质云质粉砂岩以晶间孔较发育为特征。混积岩优质储层的发育主要受碎屑颗粒组分含量控制,易溶碎屑组分含量及溶蚀作用对储层物性具有改善作用。

关键词:混积岩;混积成因;孔隙特征;芦草沟组;吉木萨尔凹陷;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Genesis and pore development characteristics of Permian Lucaogou migmatites, Jimsar Sag, Junggar Basin

WANG Jian^{1,2,3}, YUAN Bo⁴, LIU Jin^{1,2}, LI Yong³, LI Ertong^{1,2}, MA Cong^{1,2}, ZHANG Baozhen⁵

1. Research Institute of Experiment and Detection, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Shale Oil Exploration and Development, Karamay, Xinjiang 834000, China;

3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation,
Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

4. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China;

5. Fengcheng Oilfield Operation Area, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: Taking the influence of lithological characteristics differences on the genesis of pores in migmatite reservoirs as the main line, the genesis and characteristics of pores were analyzed from the perspective of the relationship between rock fabric and grain deposition. (1) Based on hydrodynamic conditions, mineral assemblage and rock structure characteristics, and taking three endmembers of clastic particles, clay minerals and carbonate minerals for classification, the “sweet spots” in the Lucaogou Formation are mainly composed of tuffaceous sandy dolomite, tuffaceous feldspar detrital siltstone, tuffaceous dolomitic sandstone and tuffaceous dolomitic siltstone. The migmatites have mixed sources, and various types of migmatite layers can be superimposed on each other vertically to form facies marginal mixing. (2) Based on the spherical accumulation model, when the content of debris particles is lower than 52.4%, the porosity decreases with the increase of particle content. When the content of clastic particles reaches 52.4%, if the content of clastic particles continues to increase,

收稿日期:2021-12-15;修订日期:2022-03-15。

作者简介:王剑(1984—),男,硕士,高级工程师,从事油气地质研究。E-mail:wangjian_2605@126.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05008-004-008)和新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2017D04023)联合资助。

large number of intergranular pores will appear, and the porosity will increase rapidly, gradually evolving into a conventional sandstone reservoir. (3) According to the relationship between the three end components of clastic particles, clay minerals and carbonate minerals and the pore types, the pores of the migmatites in the Lucaogou Formation can be classified into three types including intergranular pore, intragranular dissolved pore and intercrystalline pore. The pores in tuffaceous sandy dolomites and tuffaceous feldspar detrital siltstones are mainly intergranular and intragranular dissolved ones supported by particles, while those in tuffaceous dolomitic sandstones and tuffaceous dolomitic siltstones are mainly intercrystalline ones. The development of high-quality migmatite reservoirs is mainly controlled by the content of clastic particle components, and the content of soluble clastic components and dissolution effect can improve the physical properties of the reservoirs.

Key words: migmatite; genesis of migmatite; pore characteristics; Lucaogou Formation; Jimsar Sag; Junggar Basin

MOUNT 于 1984 年首次提出“混合沉积物”这一概念^[1],准确表述混合沉积过程及其产物。国内学者在 1990 年提出“混积岩”的概念,其中狭义的混积岩是指陆源碎屑与碳酸盐组分在同一岩层内混积形成的沉积岩,而广义的混积岩则包括陆源碎屑岩、碳酸盐岩与同时含有陆源碎屑及碳酸盐组分的岩石在层间混合沉积而形成的混积层系^[2-3]。但混积岩并不包括经成岩作用或后期改造而形成的假混合^[4]。混合沉积在古代和现今海洋和湖泊等沉积环境中均广泛分布^[5-6]。众多学者对混积岩成因开展过系统研究,并认为气候变化、季节性河流碎屑物质注入、海平面变化、构造作用、风暴和潮汐作用、生物扰动等作用过程对于混积岩的形成均具有重要意义。而混合沉积的类型包括间断混合、相混合、原地混合、母源混合等^[7-8]。目前混合沉积岩分类多以陆源碎屑、黏土矿物和碳酸盐类矿物为三端元作为分类依据^[9-10],但部分学者选择以砂、异化粒、灰质和泥质四端元进行分类^[11]。近年来,随着混积岩型储层油气勘探的不断突破,与混积岩相关的非常规致密油气逐渐成为油气勘探的研究热点,而针对混积岩储层的研究对于明确非常规油气富集机理及富集过程具有重要意义^[12-15]。

吉木萨尔凹陷芦草沟组是典型的混积岩型页岩油储层,前人针对芦草沟组储层岩性、成岩作用、微纳米孔隙类型、储层成因及分类等方面做了大量的研究工作^[16-27],并认为该套混积岩储层形成主要受古气候、构造运动、湖平面升降与物源供给控制。目前,混积岩储层的形成机理仍存在较大争议,部分学者认为次生孔隙起决定作用,但部分学者则坚持储层质量受控于原生孔隙的保存^[28-29]。

本次研究运用铸体薄片、扫描电镜、阴极发光等实验测试手段,对吉木萨尔凹陷芦草沟组混积岩的物质组成、类型及成因进行精细研究,在毫米—

微米—纳米等不同尺度下对储层孔隙类型进行鉴定分析,并参考压实模拟实验成果,阐明芦草沟组混积岩储层成因及孔隙发育的控制因素。

1 研究区概况

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部,凹陷区面积 1 278 km²。区域上处于南缘冲断带、东部隆起和中央拗陷的接合部位。凹陷南部受控于三台断裂和西地断裂,而北部受吉木萨尔断裂控制,为一典型的中新生代前陆逆冲断陷(图 1a,b)。凹陷整体表现为东高西低,地层倾角 3°~5°,内部断裂不发育。凹陷内部二叠系自下而上发育将军庙组、芦草沟组及梧桐沟组 3 套地层。其中页岩油主要产于二叠系芦草沟组内部,其地层厚度在 25~300 m 之间,平均为 200 m;埋深在 800~4 500 m,平均为 3 570 m。芦草沟组自上而下分为 2 段,而各段内部又可进一步分为 2 个砂层组。其中 2 个页岩油甜点段位于 P₂l₂² 和 P₂l₁¹ 内,而 P₂l₂² 可划分为 4 个小层,P₂l₁¹ 可划分为 7 个小层。上甜点(P₂l₂²)属于浅湖相、滨浅湖相和滨湖相夹云泥坪相沉积,而 P₂l₂²⁻¹、P₂l₂²⁻²、P₂l₂²⁻³ 优势沉积微相为砂质坝和云砂坪。下甜点(P₂l₁¹)为三角洲前缘、浅湖相、浅湖相夹半深湖相及半深湖沉积,而 P₂l₁¹⁻¹、P₂l₁¹⁻²、P₂l₁¹⁻³ 优势沉积微相为远砂坝和席状砂(图 1c)。

2 混积岩物质组成

根据岩石薄片鉴定、全岩 X 射线衍射分析、黏土矿物 X 射线衍射分析及扫描电镜分析结果发现,芦草沟组混积岩的主要混积端元组分包括陆源长英质碎屑、盆地内碎屑、火山岩碎屑、碳酸盐类矿物和黏土矿物。

2.1 陆源长英质碎屑

陆源长英质碎屑是芦草沟组混积岩主要的碎

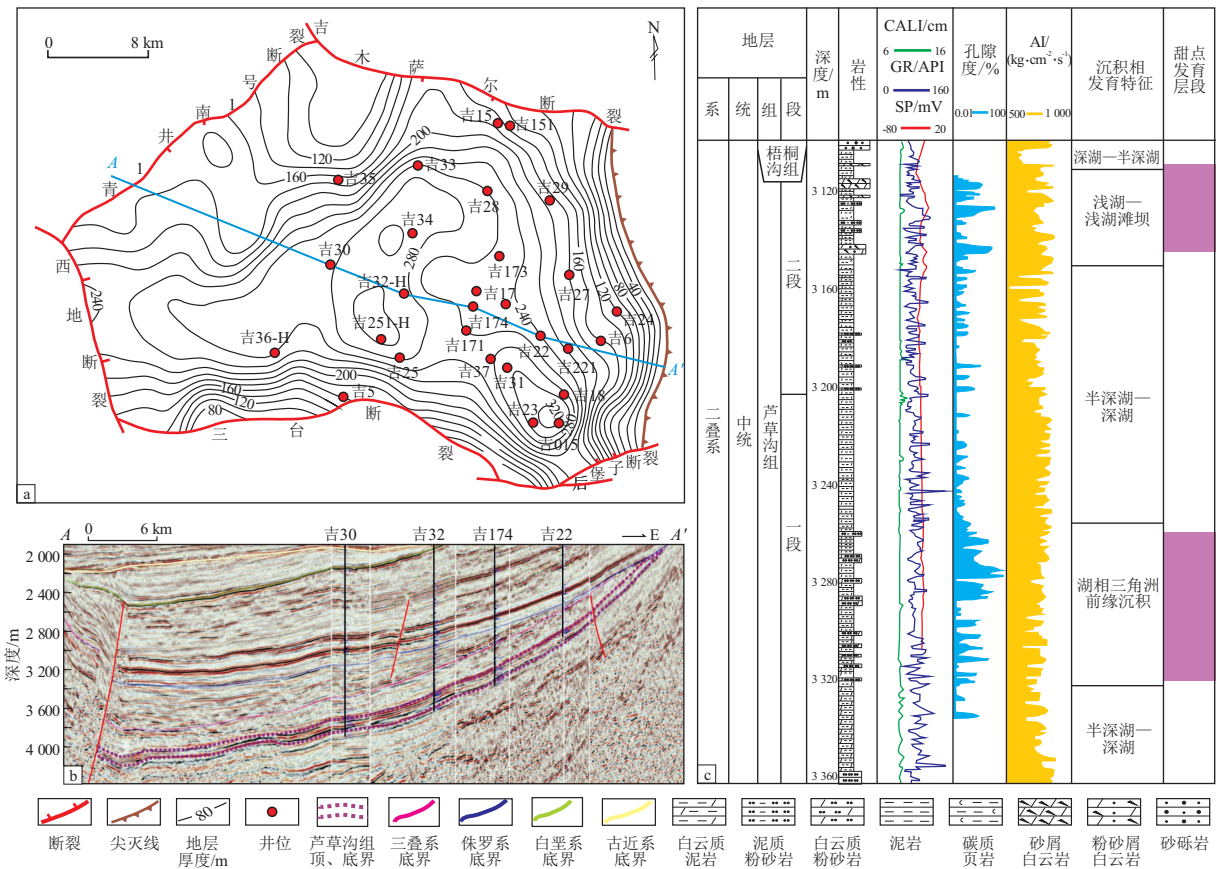


图 1 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组厚度等值线图(a)、连井地震剖面图(b)及地层综合柱状图(c)

Fig.1 Thickness contour map (a), cross-well seismic profile (b)

and comprehensive stratigraphic histogram (c) of Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin

屑成分(图 2a, 3a-c)。芦草沟组陆源长英质碎屑主要成分为石英和长石,岩屑含量较少,粒级主要集中在粉砂级,其次为细砂级。石英碎屑主体为棱角状一次棱角状结构,反映结构成熟度较差。此外,石英颗粒边缘多具有“港湾状”溶蚀特征,表明储层曾经历过碱性成岩作用过程,使得石英碎屑发生溶解。而长石碎屑以斜长石为主,多具卡氏双晶

特征。钾长石含量较斜长石低(图 2a),但钾长石在后期成岩埋藏过程中多经历了酸性溶蚀作用,甚至溶蚀彻底而形成铸模孔。

2.2 盆地内碎屑

盆地内碎屑指在沉积盆地或沉积环境内所形成的碳酸盐颗粒。芦草沟组混积岩内部盆地内碎屑主要成分为白云岩岩屑,单偏光下白云岩岩屑一

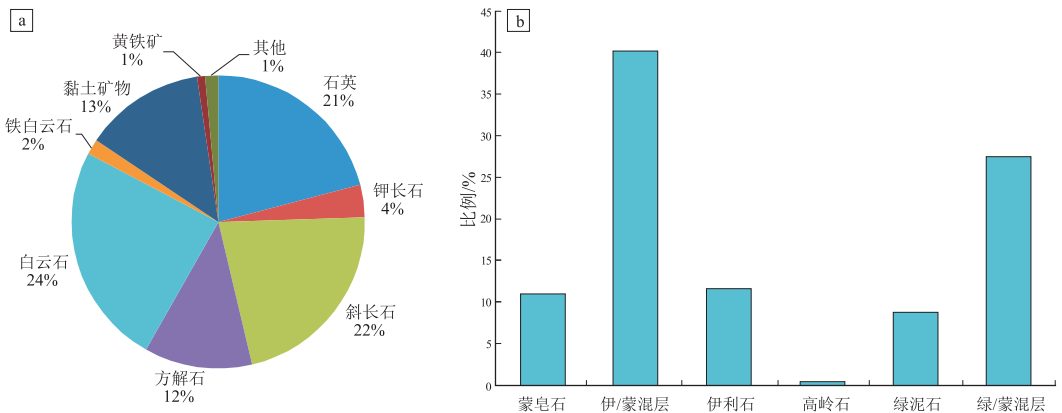


图 2 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混积岩全岩矿物组成特征(a)及黏土矿物特征(b)

Fig.2 Whole rock mineral composition (a) and clay mineral characteristics (b) of migmatites in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin

般呈褐色—褐黑色,具泥晶结构,白云岩岩屑粒度变化范围较大,从砾屑—粉屑均有分布,主体以细砂—粉砂级为主,主要发育于砂屑白云岩及云屑砂岩中,主体磨圆呈圆状—次圆状,部分具有棱角状(图 3a,b,d,e),为湖盆边缘同沉积期所形成的白云岩经过高能水动力破坏,反复淘洗磨圆,最终沉积形成。

2.3 黏土矿物

芦草沟组黏土矿物整体含量较低,平均为 13.3%(图 2a),成分以伊/蒙混层和绿/蒙混层为主,含量分别为 40.3%和 27.6%,而高岭石含量极少,仅占 0.5%(图 2b)。伊/蒙混层比值分布范围较大,主要介于 70%~100%之间,平均为 56.7%,而绿/蒙混层比值主要介于 20%~40%。芦草沟组黏土矿物来源主要有 3 种,分别为机械沉积成因、火山物质蚀变成因和孔隙水结晶成因,其中机械成因的黏土矿物以不规则状的伊/蒙混层矿物为主,主要发育于泥质粉砂岩和粉砂质泥岩中;火山物质蚀变成因的黏土矿物主要为绿/蒙混层矿物和伊/蒙混层矿物,但伊/蒙混层矿物中 Fe、Mg 比例较高;而孔隙水结晶成因的黏土矿物主要为蜂巢状伊/蒙混层矿物,并主要发育于长石溶蚀孔隙中。

2.4 火山碎屑

芦草沟组储层火山碎屑物质含量主要在 0~

25%之间,少数可达 75%以上,一般呈纹层状和分散状存在,以基性的玻屑、长石和石英晶屑组分为主,为季风或水流携带中基性火山物质在湖盆中沉积形成。长石晶屑以具双晶的钠长石为主,较为干净,颗粒较小(图 3a);石英晶屑较为干净,以斑晶形态分布于火山灰中或存在于岩屑中,这与具有一定的磨圆的陆源石英碎屑颗粒具有较大区别;玻屑呈长条形,显示了沉积时和沉积后具有一定的塑性变形,玻屑极易发生溶解,对次生孔隙的形成具有重要意义。

2.5 碳酸盐类矿物

芦草沟组储层内碳酸盐类矿物主要有方解石、白云石及(含)铁白云石(图 2a)。白云石主要赋存于云质岩屑内,同时还可以自生白云石沉淀以及云泥等形式产出。芦草沟组沉积期气候炎热,咸化的湖水环境有利于沉积泥晶白云石,沉积期或同沉积期形成的白云石晶体大小一般为泥粉晶,部分为中—细晶,同时还可伴生有少量的黏土杂质。扫描电镜下,这一成因类型白云石的自形程度较差,多具有溶蚀特征,且晶间孔隙较发育(图 3f)。白云石形成的另一种重要方式与藻类相关,即可形成藻云岩^[30-31],镜下观察这一成因的白云石主要为微晶及泥微晶。

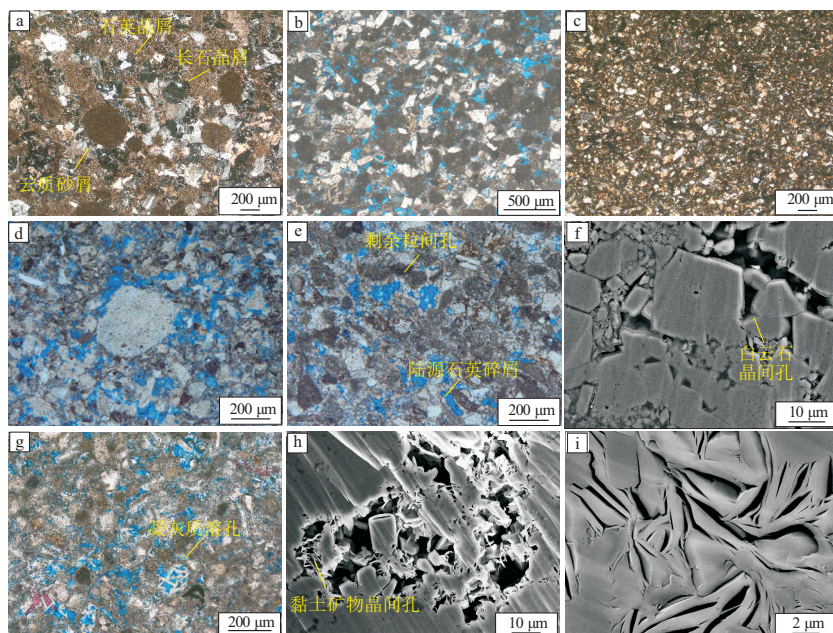


图 3 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混积岩类型及孔隙特征

a.凝灰质云屑砂岩,正交光,J10016井,3 313.74 m;b.云屑长石极细粒砂岩,单偏光,吉 174 井,3 114.85 m;c.云质粉砂岩,正交光,J10022 井,3 477.22 m;d.长石岩屑粉砂岩,粒间孔与粒内溶孔,云质砂屑磨圆较好,单偏光,铸体薄片,J10022 井,3 478.25 m;e.砂屑云岩,粒间孔,单偏光,铸体薄片,J10025 井,3 532.98 m;f.白云石晶间孔,氩离子抛光+场发射扫描电镜,吉 179 井,3 334.89 m;g.含凝灰质砂屑云岩,凝灰质溶孔中长条形钠长石充填,单偏光,吉 174 井,3 164.93 m;h.长石粒内溶孔,内部板状钠长石和似蜂巢状伊/蒙混层矿物充填,氩离子抛光+场发射扫描电镜,J10012 井,3 313.99 m;i.狭缝形伊/蒙混层矿物晶间孔,氩离子抛光+场发射扫描电镜,J10012 井,3 313.97 m

Fig.3 Migmatite types and pore characteristics of Lucaogou Formation, J1001, Jimsar Sag, Junggar Basin

此外,芦草沟组参与混积的还有有机质碎屑,主要来源于高等植物、双壳类及菌藻类等水生生物^[32]。其中高等植物经过腐殖化作用,主要演变为惰质组和镜质组,而菌藻类经过地质演化和生烃,现今多演变为沥青质体^[33]。

3 混积岩类型与成因

3.1 混积岩类型

二叠系芦草沟组为陆源碎屑、碳酸盐及火山物质组成的混合沉积,由各端元组分直接构成的储层占比很低,大部分储层均由三者混合而成,且三者之间相互过渡,并无截然的界限^[34]。将火山碎屑、细砂、粉砂和异化颗粒(白云岩岩屑)统称为颗粒组分,并与黏土矿物和碳酸盐类矿物共同作为三端元组分进行岩性划分,每种岩性可根据内部火山物质含量而进一步细分。研究发现,芦草沟组“甜点段”混积岩类型主要有凝灰质砂屑云岩、凝灰质长石岩屑粉细砂岩、凝灰质云屑砂岩及凝灰质云质粉砂岩,而生物沉积仅在富有机质泥岩中发育。

凝灰质砂屑云岩是芦草沟组上甜点段主要岩性类型,约占 15%,白云石为主要矿物成分,其含量一般在 60%~80%之间,最高达 95%,其次为长石和石英,方解石含量较低(表 1)。碎屑组分主体为白云岩岩屑、云质砂屑与粉砂级陆源长英质碎屑的混合,碎屑颗粒间为粉—细晶白云石充填,凝灰

质呈分散状分布,且多被白云石交代,其中,云质砂屑磨圆较好,而陆源碎屑磨圆较差,呈次棱角一次圆状,但当陆源长英质碎屑含量增高时,逐渐向云屑砂岩过渡。凝灰质砂屑云岩发育剩余粒间孔、长石及凝灰质溶蚀孔及白云石晶间孔,是上甜点段主要的岩石类型之一。

凝灰质长石岩屑粉细砂岩是芦草沟组上甜点段主要岩石类型,其碎屑颗粒粒度相对较粗,主体为细砂级,其次为粉砂级。这种岩性与常规的细砂岩储层相当,但凝灰质含量较高。碎屑颗粒以凝灰质碎屑、陆源石英和长石为主,含量基本在 90%以上,但其中凝灰质碎屑含量一般小于 35%(表 1),长石含量异常高(大于 50%),因此除陆源长石碎屑外,火山碎屑中长石的供给也是其主要的来源。此外,这类储层内部泥质含量较低,一般低于 5%,同时白云石含量也相对较低,多低于 10%。但相较于其他岩性,凝灰质长石岩屑粉细砂岩中发育大量粒间孔和粒内溶孔(图 3d),含油性较好,是上甜点段主要的产层。

凝灰质云屑砂岩也是芦草沟组上甜点段主要岩性类型,具有白云岩岩屑、凝灰质和陆源碎屑颗粒混合沉积的特征(图 3a)。白云石含量在 45%~60%之间,长石和石英总含量在 25%~50%之间,而黏土矿物相较于(含)凝灰质砂屑云岩较高,一般在 0.4%~4.0%之间,平均 2%(表 1)。显微镜下

表 1 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组主要岩性全岩 X 射线衍射分析

Table 1 Whole rock X-ray diffraction analysis of main lithology of Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin

井号	深度/m	岩石类型	含量/%						
			石英	斜长石	钾长石	方解石	白云石	黄铁矿	黏土矿物
吉 174	3 114.86	砂屑云岩	6.40	2.10			91.50		
吉 174	3 121.38	砂屑云岩	8.20	11.10	0.60		80.10		
吉 37	2 856.30	砂屑云岩	8.31	27.02		3.12	61.32		0.23
吉 303	2 498.04	长石岩屑粉细砂岩	62.68	26.21	9.12				1.99
吉 303	2 498.28	长石岩屑粉细砂岩	62.31	24.92	10.20				2.57
吉 303	2 597.05	长石岩屑粉细砂岩	26.49	67.82			5.30		0.39
吉 301	2 693.71	长石岩屑粉细砂岩	61.38	35.07					3.55
吉 43	2 942.95	长石岩屑粉细砂岩	16.60	45.37	22.14	11.07	3.32		1.50
吉 43	2 924.27	长石岩屑粉细砂岩	25.86	42.74	19.12	5.62	3.37		3.29
吉 37	2 843.90	长石岩屑粉细砂岩	24.73	45.92	21.19		4.71		3.45
吉 174	3 117.10	云屑砂岩	17.10	32.70	1.80		45.00	0.90	2.50
吉 174	3 190.57	云屑砂岩	16.70	10.70	1.00	1.40	57.90	2.60	3.70
吉 305	3 576.78	云屑砂岩	19.17	18.05	11.28		48.50		3.00
吉 303	2 588.36	云屑砂岩	31.28	14.52	6.70		46.92		0.58
吉 303	2 593.43	云屑砂岩	16.24	24.90			58.46		0.40
吉 41	4 067.93	云质粉砂岩	22.57	32.26	12.90		28.17		4.10
吉 41	4 066.23	云质粉砂岩	17.16	39.68	13.01		25.88		4.27
吉 37	2 848.50	云质粉砂岩	23.46	48.15		3.59	18.11		5.69

云屑颗粒多较大,粒径多在 0.1~0.5 mm 之间,且云屑主要由泥晶白云石组成,成分较纯,磨圆相对较好,反映其沉积之前经历了较强的改造作用,而凝灰质含量在 0~30% 之间变化。凝灰质云屑砂岩中主要发育溶蚀孔和晶间孔,并可见剩余粒间孔、溶蚀孔和白云石晶间孔。

凝灰质云质粉砂岩在芦苇沟组广泛发育,是下甜点段的主要岩石类型,其内部碎屑颗粒以陆源长英质碎屑为主,其次为火山碎屑。白云石含量在 20%~35% 之间,黏土矿物含量相对较高,在 4.0%~6.0% 之间,平均 4.7% (表 1)。各成分碎屑颗粒主要呈棱角状,分选较好 (图 3c)。镜下可见火山碎屑与粉砂级碎屑颗粒分散混积,并且当凝灰质含量增多时,逐渐过渡为沉凝灰岩,但随着陆源石英和长石含量的增加,白云石含量减少,逐渐过渡为凝灰质含云质粉砂岩。凝灰质云质粉砂岩发育溶蚀孔和白云石晶间孔,白云石晶间孔呈典型的三角形。

3.2 混积岩成因

吉木萨尔凹陷芦苇沟组为咸化湖—三角洲相沉积,沉积期气候以炎热干旱条件为主,但间歇性出现温暖湿润的特征^[35]。岩层厚度薄、纵向变化快,且岩性多变。从岩石粒度角度来看,主体粒度集中在粉细砂级以下,属于细粒混积岩^[36]。

混积岩岩性分布与沉积相带和水动力条件密切相关。而黏土基质含量反映了沉积环境的水动力条件,砂岩中黏土基质含量高意味着重力流或浊流沉积,粉砂岩中黏土含量高则意味着向低能的静水沉积过渡。狭义的混合沉积主要发育于碳酸盐岩浅滩与混合坪,表现为火山物质、陆源碎屑和盆地内碎屑 3 种来源碎屑的混积。异化颗粒等同于

石英、长石、岩屑等砂—粉砂级的碎屑颗粒,这些颗粒通常形成于高能环境。芦苇沟组混积岩中含有大量的内源碎屑颗粒,同时含有大量的陆源母岩风化成因的长石和石英碎屑,说明研究区既有较多陆源碎屑颗粒的供给,也存在较强的内源化学沉积作用。而火山物质参与混积通常反映事件性和间歇性沉积特征,其中凝灰质砂屑云岩、凝灰质云屑砂岩及凝灰质长石岩屑粉细砂岩分选较好,通常反映沉积环境的水动力条件相对较大,为滩坝—水下扇前缘等相对高能环境的产物 (图 4)。泥质粉砂岩、灰质泥岩、云质泥岩和粉砂质泥岩主要发育于低能环境的浅湖—半深湖沉积区 (图 4)。

在凝灰质含量较高的粉—细砂岩中,碱性长石、石英晶屑含量较高,粒度多以泥—细粉砂级为主,这些降落型火山物质由于重力作用或风携带进入湖盆^[37]。由于经过较少的搬运磨圆,晶屑多呈尖棱角状。岩石整体为颗粒支撑结构,颗粒间接触关系以点—线、线接触为主。受湖盆中热液及凝灰质影响,咸化湖盆中藻类勃发为有机质大量生成及沉积提供了条件。由于湖盆底层卤水不易与空气接触,因此有机质得以较好保存,是盆地内主要的烃源岩发育位置。

广义上混合沉积主要表现为相缘混合,是指不同沉积微相接触带或过渡区所发生的混合沉积。在吉木萨尔凹陷芦苇沟组内部则主要表现为各类岩性在垂向上复杂的薄互层 (图 4)。

4 混积岩储层孔隙发育特征及影响因素

4.1 混积岩孔隙特征

根据岩石中孔隙发育的部位,芦苇沟组混积岩孔隙类型可划分为粒间孔、粒内溶孔和晶间孔。铸

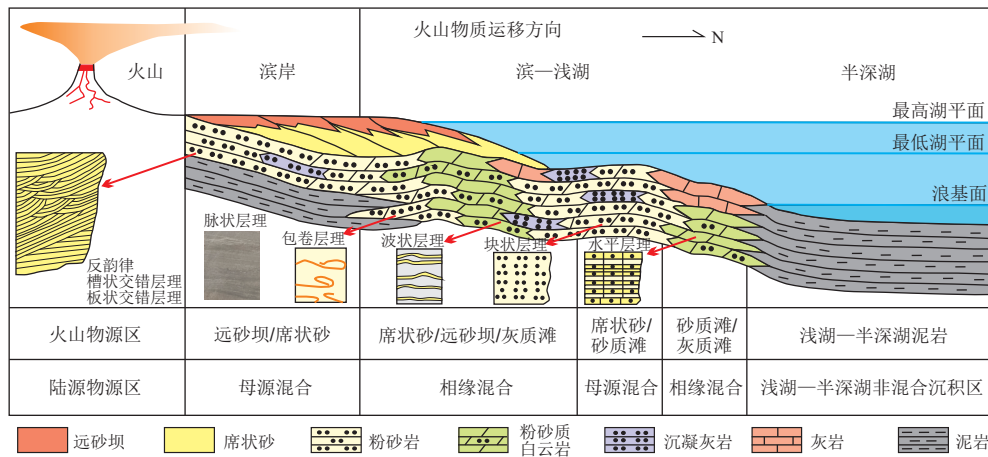


图 4 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组混积岩沉积模式

Fig.4 Sedimentary model of migmatites in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin

体薄片结果显示,芦草沟组微米级以上孔隙主要有剩余粒间孔、粒间溶孔及粒内溶孔。而扫描电镜下,微纳米孔隙主要包括无机矿物晶间孔和有机质孔^[38]。

粒间孔铸体薄片下多呈边缘弯曲的三角形(图 3d, e),粒间孔边缘由于参与堆积的长石和凝灰质碎屑发生溶蚀,导致粒间孔隙扩大,形成粒间孔隙与溶蚀孔隙叠加的混合孔隙(图 3b)。芦草沟组储层经历了复杂的酸性和碱性溶蚀作用^[30]。碱性溶蚀作用主要表现为石英颗粒边缘的溶蚀。酸性溶蚀主要体现在长石和凝灰质碎屑内部形成的溶蚀,部分颗粒由于溶蚀完全而形成铸模孔,并且孔隙中常见有板状钠长石晶体充填(图 3g, h)。白云石晶间孔孔径主要分布在 200 nm~3 μm 之间,并由菱形白云石晶体搭建而成,多呈三角状(图 3g),这一类型晶间孔主要为准同生期后泥晶灰质成分向微晶、细晶转化的过程中体积逐渐减小,白云石晶体呈格架状接触形成。依据孔隙形态,研究

区黏土矿物晶间孔分为 2 类,分别为片状伊/蒙混层矿物晶间缝和蜂巢状伊/蒙混层矿物晶间孔,黏土矿物晶间缝主要由片状伊/蒙混层矿物形成,呈细窄的长条形或狭缝形(图 3i),广泛发育于泥岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩;蜂巢状伊/蒙混层矿物主要形成黏土矿物晶间孔,为亚微米—纳米级,呈似圆孔形,由似蜂巢状伊/蒙混层矿物晶体形成,常见于溶蚀孔隙中。

凝灰质砂屑云岩发育于远砂坝与云坪过渡的混合相带,碎屑颗粒含量在 55%~70%之间,储集空间为剩余粒间孔隙及少量溶蚀孔隙,储层物性好,孔隙度在 6.0%~12.0%之间,平均为 7.6%,平均渗透率为 $0.027 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔喉半径 0.16 μm,而直径大于 0.074 μm 以上的孔喉占比达 63.8%,为研究区内含油性好的一种岩相类型(图 5a, b, 表 2)。凝灰质长石岩屑粉细砂岩发育于远砂坝和席状砂微相,受事件性火山喷发影响较大,碎屑颗粒含量在 80%~95%之间,颗粒支撑作用相对最强,粒间孔隙在压

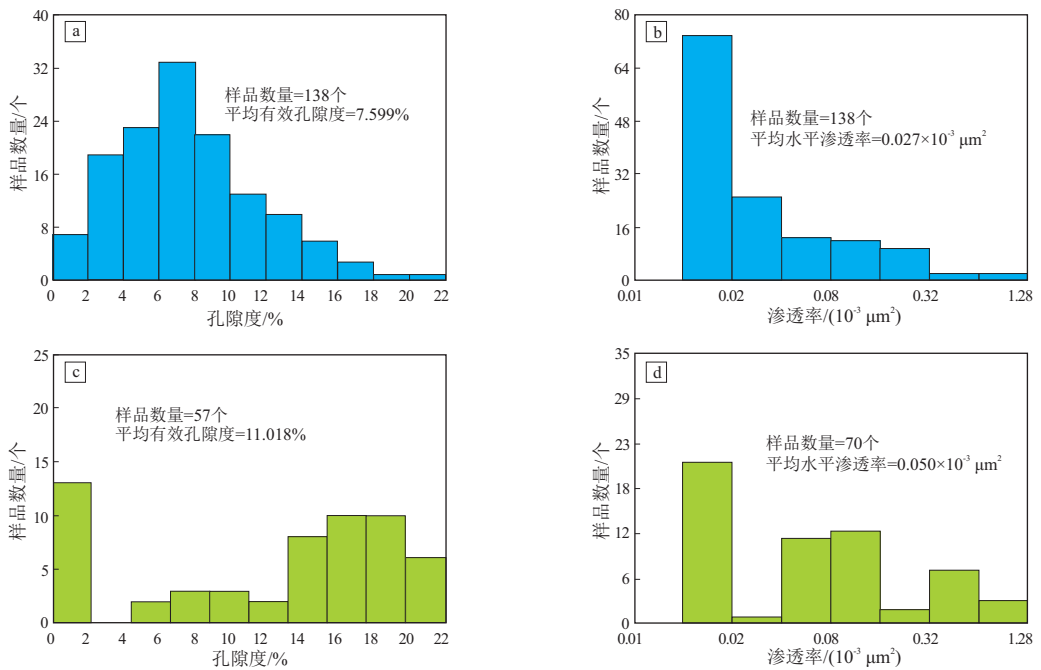


图 5 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混积岩储层物性特征

a, b.凝灰质砂屑云岩物性分布柱状图;c, d.凝灰质长石岩屑粉细砂岩物性分布柱状图

Fig.5 Physical properties of migmatite reservoirs in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin

表 2 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混积岩物性特征

Table 2 Physical properties of migmatites in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin

岩性	中值压力/ MPa	排驱压力/ MPa	最大孔喉 半径/μm	平均毛管 半径/μm	0.074 μm 以上 孔喉占比/%	最大进汞 饱和度/%
凝灰质砂屑云岩	39.7	4.4	0.51	0.16	63.8	80.6
凝灰质长石岩屑粉细砂岩	14.8	3.7	1.24	0.36	61.7	86.6
凝灰质云屑砂岩	30.4	4.3	0.48	0.14	22.0	83.6
凝灰质云质粉砂岩	27.1	4.1	0.27	0.09	38.0	80.0

实作用下保存最好,加上溶蚀作用的改善,使得储集空间主体为剩余粒间孔隙及溶蚀孔隙,其孔隙度平均为 11.02%,渗透率为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔喉半径 $0.36 \mu\text{m}$,是研究区物性及含油性最好的储层(图 5c,d,表 2)。凝灰质云屑砂岩储集空间为剩余粒间孔隙及少量溶蚀孔隙,物性特征整体与凝灰质砂屑云岩大致相同,直径在 $0.074 \mu\text{m}$ 以上的孔喉占比为 22.0%,整体以微纳米级孔喉为主(表 2)。凝灰质云质粉砂岩碎屑颗粒含量在 45%~65%之间,泥质含量相对较高,储层发育剩余粒间孔隙及少量溶蚀孔隙,储层物性相对较差,平均孔喉半径 $0.09 \mu\text{m}$ (表 2)。

4.2 碎屑颗粒含量对孔隙发育的影响

吉木萨尔凹陷芦草沟组储层中粉细砂—异化颗粒(白云岩碎屑)—火山碎屑等颗粒组分相互支撑形成大量直径大于 $10 \mu\text{m}$ 的粒间孔隙,这些孔隙即使经历了压实作用也大量存在,使得其在铸体薄片上就能较好地识别。但如果储层主要由黏土矿物或泥晶碳酸盐组成,则储层储集空间将以微孔为主,并只能依靠扫描电镜识别。本次研究基于基质和球形碎屑颗粒的混积岩概念模型,探讨其内部宏孔和微孔的成因,碎屑颗粒包括粉细砂、砂屑和火山碎屑,基质包括泥晶碳酸盐和黏土矿物。当混积岩中的碎屑颗粒含量为 0 时,其孔隙度等同于基质的孔隙度。随着水动力条件的

逐渐增强,颗粒含量增加,细粒混积岩孔隙度将逐渐减少。当石英颗粒含量为 10%时,颗粒间充填黏土矿物和泥晶碳酸盐,此时泥页岩孔隙主要为黏土矿物微孔隙和碳酸盐晶间孔,孔隙度为 7.2%;颗粒含量达到 20%,细粒混积岩仍以黏土矿物微孔隙为主,孔隙度为 6.4%。若假设颗粒以立方体堆积,则在颗粒含量低于 52.4%时,碎屑颗粒难以接触,无法形成粒间孔隙,孔隙类型主要为黏土矿物微孔隙和碳酸盐晶间孔。由此可见,当混积岩中黏土基质或碳酸盐泥晶占主体时,碎屑颗粒百分含量(X)与孔隙度(Φ_{mud})具有明显的线性负相关关系,即随着颗粒含量的增加,泥页岩的孔隙度逐渐减小。当碎屑颗粒达到立方体堆积时,杂基含量最高为 47.6%(图 6a-c)。

$$\Phi_{\text{mud}} = (1-X) \times \Phi_{\text{matrix}}$$

随着水动力条件的增强,杂基含量逐渐降低,粒间孔隙逐渐发育,岩石孔隙度逐渐增大。因而,在形成粒间孔隙之前,混积岩孔隙度会降低到一个最小值,即当颗粒含量达到 52.4%时,粒间全部为黏土矿物和泥晶碳酸盐充填,仅发育黏土矿物微孔隙和碳酸盐晶间孔,岩石孔隙度处于最小值。经过上述临界状态后,当颗粒含量高于 52.4%时,按照国内的碎屑岩类型划分标准,实际上已经属于粉砂岩范畴。假如杂基含量进一步降低,岩石的碎屑颗

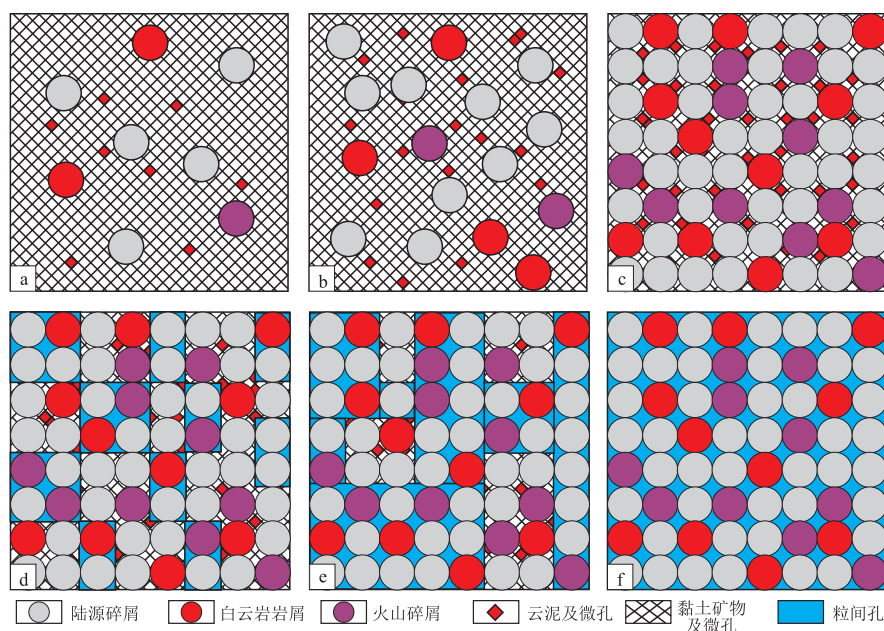


图 6 不同水动力条件下颗粒分散状细粒混积岩碎屑含量变化与孔隙特征

a.碎屑含量 10%,孔隙度为 7.2%;b.碎屑含量 20%,孔隙度为 6.4%;c.碎屑含量 52.4%,孔隙度为 3.808%;d.碎屑含量 70%,孔隙度为 20%;e.碎屑含量 90%,孔隙度为 38.4%;f.碎屑含量 100%,孔隙度为 47.6%;由 a 至 f 水动力条件依次增强

Fig.6 Variation of elastic content and pore characteristics of granular dispersed fine-grained migmatites under different hydrodynamic conditions

粒之间开始逐渐发育粒间孔隙,这时碎屑颗粒百分含量(X)与细粒混积岩孔隙度(Φ_{mid})具有明显的线性正相关关系,即随着颗粒含量的增加,混积岩的孔隙度逐渐增大。随着沉积环境水动力条件的增强,杂基含量减少到一定程度,最终会发展为杂基含量很低的净砂岩沉积。当陆源碎屑、白云岩碎屑和火山碎屑颗粒之间无杂基充填时,粒间孔隙最为发育,岩石孔隙度达到最大值。此时,如果碎屑颗粒为立方体堆积,孔隙度最大值为 47.6%;若碎屑颗粒为菱面体堆积,孔隙度为 26%(图 6d-f)。

概念模型是一种理想状态,需要根据岩石结构进一步具体分析。但它较好地阐释了混积岩中的宏孔成因,对探讨颗粒含量与孔隙度的相关性仍具有指导意义。如果在数值模拟的基础上,开展混积岩孔隙演化的物理模拟,系统观测压实过程中孔隙类型和孔隙结构的变化,将有助于加深理解混积岩的孔隙发育机理。

从碎屑颗粒含量与储层孔隙度和渗透率的相关性来看,随着凝灰质碎屑、长石、石英等碎屑颗粒含量的增加,储层物性变好,反映了碎屑颗粒含量增加,颗粒支撑作用加强,粒间孔隙越发育(图 7a, b)。凝灰质砂屑云岩、凝灰质长石岩屑粉细砂岩由于所处的水动力环境较强,颗粒之间的泥质组分或泥晶基质含量较低,颗粒堆积的初始阶段孔隙度较高,粗孔隙发育,而且抗压实的能力较强,容易形成大孔隙;而泥晶白云岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩等其他类型细粒沉积岩,由于碎屑颗粒含量较低,

一般在 20%~45%之间,在后期压实的过程中,孔隙度迅速衰减,不容易形成大孔隙。介于二者之间的云屑砂岩及云质粉砂岩,孔隙发育特征具有过渡特征。

4.3 易溶组分对孔隙发育的影响

芦草沟组页岩储层镜质体反射率(R_o)值分布在 0.7%~1.3%之间,目前成岩阶段主体处于中成岩阶段 A 期。在粉细砂、白云岩碎屑、火山碎屑等刚性颗粒组分相互支撑和抗压实下,沉积初始孔隙度虽经历了较强的机械压实,但粒间孔隙仍可保存在 6%~12%。在压实减孔之后,酸性溶蚀对于储层物性进行了有利的改善,碱性溶蚀相对于酸性溶蚀作用弱,基本可忽略。芦草沟组混积岩酸性溶蚀作用以碱性长石和凝灰质的溶蚀为主,并伴随少量碳酸盐的溶蚀。火山物质中含有较多的易溶组分,在有机酸的作用下,可以发生大量的溶蚀,有利于形成次生孔隙^[39-40]。有机质达到成熟阶段,干酪根的脱羧作用早期生成的有机酸和晚期生成的碳酸等是研究区酸性流体的主要来源。受两期酸性流体作用,储层中岩屑及长石碎屑受溶蚀作用显著。在铸体薄片下,长石碎屑内部或边缘均不同程度受溶蚀影响,形成粒间溶孔和粒内溶孔。扫描电镜下,长石的酸性溶蚀主要沿解理进行,并有沿解理逐渐扩大溶蚀的特征。碳酸盐类矿物的溶蚀作用仅在局部白云岩层段中发育。

在溶蚀改善之下,吉木萨尔凹陷芦草沟组粒间溶孔和粒内溶孔广泛发育。储层现今长石类型

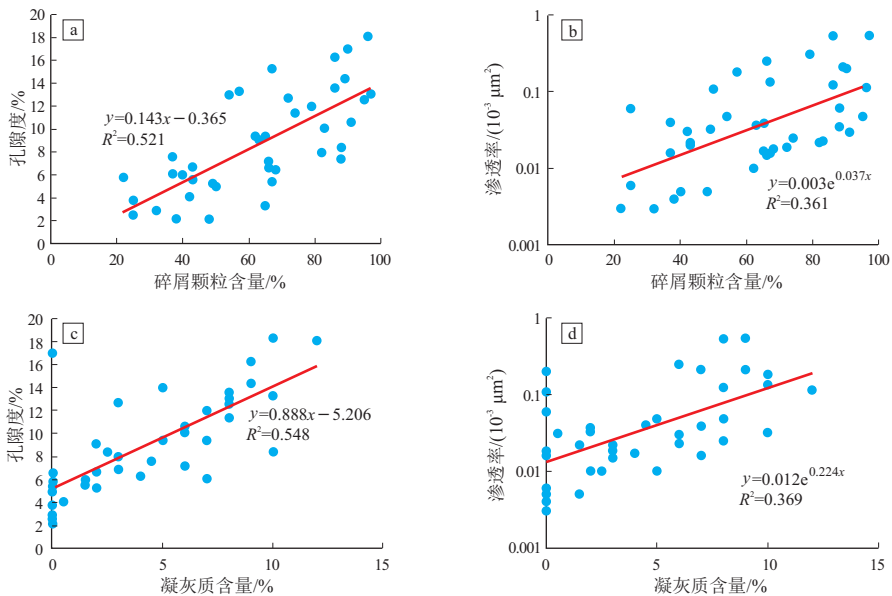


图 7 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混积岩储层物性与岩石组分关系

Fig.7 Relationship between physical properties and rock components of migmatite reservoirs in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin

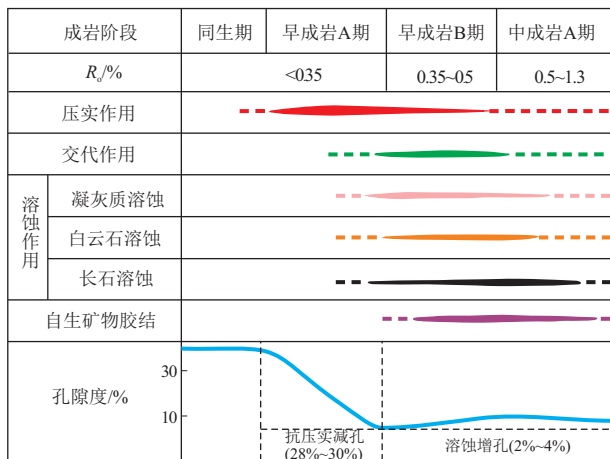


图 8 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组
成岩演化序列及孔隙演化模式

Fig.8 Diagenetic evolution sequence and pore evolution model of Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin

以钠长石为主,粒内溶孔中常见有自生钠长石和似蜂巢状伊/蒙混层矿物等,将孔隙分割成多个微米级的小孔隙(图 3g)。凝灰质含量与储层的孔隙度和渗透率主体呈正相关关系(图 7c,d),反映了凝灰质中易溶组分的溶解产生的次生孔隙对于混积岩储层整体物性的改善和提升。从溶蚀改善效果来看,原始沉积成因的粒间孔较为发育的凝灰质砂屑云岩、凝灰质长石岩屑粉细砂岩孔隙度将增加 2%~4%,而泥质粉砂岩、云质泥岩由于粉细砂、白云岩碎屑、火山碎屑等刚性颗粒组分含量少,易溶组分含量少,沉积成因的粒间孔发育差,溶蚀流体很难进入,基本未发生易溶组分的溶蚀,溶蚀改善作用弱(图 8)。

5 结论

(1) 吉木萨尔凹陷芦草沟组混积岩储层的成分端元组分有陆源长英质碎屑、火山碎屑、盆地内碎屑、碳酸盐类矿物及黏土矿物。混积岩成因主要为母源混合成因,发育受沉积微相及事件性火山喷发作用共同控制。

(2) 基于颗粒的球形堆积模型,当碎屑颗粒含量低于 52.4% 时,孔隙度随颗粒含量的增加而减小;当碎屑颗粒含量达到 52.4% 时,如果碎屑颗粒含量继续增加,粒间孔隙将大量出现,孔隙度将快速增大,逐渐演变为常规的粉细砂岩储层。

(3) 芦草沟组混积岩中凝灰质砂屑云岩、凝灰质长石岩屑粉细砂岩以颗粒支撑的粒间孔和粒内溶孔为主,凝灰质云屑砂岩及凝灰质云质粉砂岩晶间孔较发育。随着凝灰质碎屑含量的升高,溶蚀作

用产生的溶蚀孔隙含量增加。混积岩优质储层的发育主要受碎屑颗粒组分含量控制,易溶碎屑组分含量及溶蚀作用对储层物性具有改善作用。

参考文献:

- [1] MOUNT J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments[J]. *Geology*, 1984, 12(7): 432-435.
- [2] 张锦泉,叶红专. 论碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积[J]. *成都地质学院学报*, 1989, 16(2): 87-92.
ZHANG Jinquan, YE Hongzhan. A study on carbonate and siliciclastic mixed sediments[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1989, 16(2): 87-92.
- [3] 张雄华. 混积岩的分类和成因[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(4): 31-34.
ZHANG Xionghua. Classification and origin of mixed sedimentite[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(4): 31-34.
- [4] 王越,陈世悦,张关龙,等. 咸化湖盆混积岩分类与混积相带沉积相特征:以准噶尔盆地南缘芦草沟组与吐哈盆地西北缘塔朗组为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(9): 1021-1035.
WANG Yue, CHEN Shiyue, ZHANG Guanlong, et al. Classifications of mixed sedimentite and sedimentary facies characteristics of mixed sedimentary facies belt in saline lacustrine basin: taking examples as the Lucaogou Formation in the south of Junggar Basin and the Taerlang Formation in the northwest of Tuha Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2017, 38(9): 1021-1035.
- [5] 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.
- [6] 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.
TAN Mengqi, LIU Ziliang, SHEN Fang, et al. Features and model of mixed sediments of Da'anzhai Member in Lower Jurassic Ziliujing Formation, Huilong area, Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 571-581.
- [7] CUNNINGHAM K J, LOCKER S D, HINE A C, et al. Interplay of Late Cenozoic siliciclastic supply and carbonate response on the southeast Florida Platform[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(1): 31-46.
- [8] 齐玉民,章顺利,吴家洋,等. 渤海石臼坨凸起沙河街组深埋藏混积岩成岩作用特征[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(3): 63-69.
QI Yumin, ZHANG Shunli, WU Jiayang, et al. Diagenesis characteristics of Shahejie Formation deep-buried mixed siliciclastic-carbonate sediments in the Shijutuo Uplift, Bohai Sea[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(3): 63-69.
- [9] 鄢继华,蒲秀刚,周立宏,等. 基于 X 射线衍射数据的细粒沉积岩岩石定名方法与应用[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(1): 48-54.

- YAN Jihua, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Naming method of fine-grained sedimentary rocks on basis of X-ray diffraction data [J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(1): 48-54.
- [10] 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 Zaixing, LIANG Chao, WU Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [11] 罗妮娜, 侯守探, 纪友亮, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷大王庄地区古近系沙三上亚段混积模式研究 [J]. *沉积学报*, 2020, 38(5): 1037-1048.
- LUO Ni'na, HOU Shoutan, JI Youliang, et al. Sedimentary model of mixed rocks in the upper Es₃ of Paleogene in the Dawangzhuang area, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(5): 1037-1048.
- [12] 蒲秀刚, 周立宏, 韩文中, 等. 细粒相沉积地质特征与致密油勘探: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(1): 24-33.
- PU Xiugang, ZHOU Lihong, HAN Wenzhong, et al. Geologic features of fine-grained facies sedimentation and tight oil exploration: a case from the second member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(1): 24-33.
- [13] 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苇沟组为例 [J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(1): 85-95.
- ZHA Ming, SU Yang, GAO Changhai, 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 & Technology*, 2017, 46(1): 85-95.
- [14] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力 [J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 657-667.
- KUANG Lichun, TANG Yong, LEI Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 657-667.
- [15] 黎茂稳, 金之钧, 董明哲, 等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(4): 489-505.
- LI Maowen, JIN Zhijun, DONG Mingzhe, et al. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(4): 489-505.
- [16] 许琳, 常秋生, 杨成克, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦苇沟组页岩油储层特征及含油性 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 535-549.
- XU Lin, CHANG Qiusheng, YANG Chengke, et al. Characteristics and oil-bearing capability of shale oil reservoir in the Permian Lucaogou Formation, Jimusaer Sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 535-549.
- [17] 操应长, 朱宁, 张少敏, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦苇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 Yingchang, ZHU Ning, ZHANG Shaomin, et al. Diagenesis and reservoir space characteristics of tight oil reservoirs of Permian Lucaogou Formation in Jimusaer Sag of Junggar Basin, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(3): 253-266.
- [18] 林会喜, 宋明水, 王圣柱, 等. 叠合盆地复杂构造带页岩油资源评价: 以准噶尔盆地东南缘博格达地区中二叠统芦苇沟组为例 [J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(2): 7-17.
- LIN Huixi, SONG Mingshui, WANG Shengzhu, et al. Shale oil resource evaluation in complex structural belt of superimposed basin: a case study of middle Permian Lucaogou Formation in Bogda area, southeast margin of Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(2): 7-17.
- [19] 张关龙, 王越, 张奎华, 等. 柴窝堡凹陷中二叠统芦苇沟组储层控制因素与发育模式 [J]. *特种油气藏*, 2021, 28(6): 27-35.
- ZHANG Guanlong, WANG Yue, ZHANG Kuihua, et al. Reservoir controlling factors and development model of Middle Permian Lucaogou Formation in Chaiwopu Sag [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(6): 27-35.
- [20] 李二庭, 王剑, 李际, 等. 源储—体烃源岩精确评价: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组为例 [J]. *石油实验地质*, 2021, 43(2): 335-342.
- LI Erting, WANG Jian, LI Ji, et al. Accurate evaluation of source rocks in source-reservoir integration: a case study of source rocks in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(2): 335-342.
- [21] 张奎华, 宋明水, 曹忠祥, 等. 博格达地区中二叠统沉积环境与烃源岩特征 [J]. *断块油气田*, 2021, (1): 9-13.
- ZHANG Kuihua, SONG Mingshui, CAO Zhongxiang, et al. Sedimentary environment and the characteristics of hydrocarbon source rock of the Middle Permian in Bogda area [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, (1): 9-13.
- [22] 彭寿昌, 查小军, 雷祥辉, 等. 吉木萨尔凹陷芦苇沟组上“甜点”段页岩油储层演化特征及差异性评价 [J]. *特种油气藏*, 2021, 28(4): 30-38.
- PENG Shouchang, ZHA Xiaojun, LEI Xianghui, et al. Evolution characteristics and difference evaluation of shale oil reservoirs in the upper sweet spot interval of Lucaogou Formation in Jimusaer Sag [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(4): 30-38.
- [23] 霍进, 支东明, 郑孟林, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组页岩油藏特征与形成主控因素 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(4): 506-512.
- HUO Jin, ZHI Dongming, ZHENG Menglin, et al. Characteristics and main controls of shale oil reservoirs in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(4): 506-512.
- [24] 张奎华, 曹忠祥, 王越, 等. 博格达地区中二叠统芦苇沟组沉积相及沉积演化 [J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(4): 1-12.
- ZHANG Kuihua, CAO Zhongxiang, WANG Yue, et al. Sedimentary facies and evolution of Middle Permian Lucaogou Formation in Bogda area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(4): 1-12.

- [25] 马聪,王剑,潘晓慧,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油储层方沸石成因与甜点意义[J].石油实验地质,2020,42(4):596-603.
MA Cong, WANG Jian, PAN Xiaohui, et al. Origin and significance of "sweet spots" of analcites in shale oil reservoirs in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 596-603.
- [26] 梁成钢,罗群,张金凤,等.致密砂岩储层层理缝与构造缝渗吸差异分析:以吉木萨尔凹陷芦草沟组为例[J].油气地质与采收率,2020,27(4):104-110.
LIANG Chenggang, LUO Qun, ZHANG Jinfeng, et al. Analysis of imbibition difference between bedding fractures and structural fractures in tight sandstone reservoir: a case study in Lucaogou Formation in Jimsar Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(4): 104-110.
- [27] 马明伟,祝健,李嘉成,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油储集层渗吸规律[J].新疆石油地质,2021,42(6):702-708.
MA Mingwei, ZHU Jian, LI Jiacheng, et al. Imbibition law of shale oil reservoirs in the Lucaogou Formation in Jimsar Sag [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(6): 702-708.
- [28] 高岗,杨尚儒,屈童.混合沉积研究现状及其与油气富集的关系[J].地质科技情报,2018,37(6):82-88.
GAO Gang, YANG Shangru, QU Tong. Research status of mixing sediments and their relationship with petroleum enrichment [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(6): 82-88.
- [29] 王越,张奎华,林会喜,等.博格达山周缘芦草沟组混合沉积控制因素及模式[J].新疆石油地质,2017,38(6):686-692.
WANG Yue, ZHANG Kuihua, LIN Huixi, et al. Controlling factors and model of mixed deposits of Lucaogou Formation on the periphery of Bogda Mountain [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(6): 686-692.
- [30] 王剑,周路,刘金,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组酸碱交替成岩作用特征及对页岩储集层的影响[J].石油勘探与开发,2020,47(5):898-912.
WANG Jian, ZHOU Lu, LIU Jin, et al. Acid-base alternation diagenesis and its influence on shale reservoirs in the Permian Lucaogou Formation, Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 898-912.
- [31] 李红,柳益群,李文厚,等.新疆乌鲁木齐二叠系湖相微生物白云岩成因[J].地质通报,2013,32(4):661-670.
LI Hong, LIU Yiqun, LI Wenhong, et al. The microbial precipitation of lacustrine dolomite from Permian Formation, Urumchi, Xinjiang, China [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(4): 661-670.
- [32] 李二庭,向宝力,刘向军,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油偏稠成因分析[J].天然气地球科学,2020,31(2):250-257.
LI Erting, XIANG Baoli, LIU Xiangjun, et al. Study on the genesis of shale oil thickening in Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 250-257.
- [33] 焦淑静,张慧,薛东川,等.泥页岩有机显微组分的扫描电镜形貌特征及识别方法[J].电子显微学报,2018,37(2):137-144.
JIAO Shujing, ZHANG Hui, XUE Dongchuan, et al. Morphological structure and identify method of organic macerals of shale with SEM [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2018, 37(2): 137-144.
- [34] 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 Xuguang, et al. Characteristics and occurrence of lacustrine dolomitic tight-oil reservoir in the Middle Permian Lucaogou Formation, Jimusar Sag, southeastern Junggar Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1159-1170.
- [35] 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 Yaqi, MA Shizhong, 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.
- [36] 陈世悦,张顺,刘惠民,等.湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨[J].古地理学报,2017,19(2):271-284.
CHEN Shiyue, ZHANG Shun, LIU Huimin, et al. Discussion on mixing of fine-grained sediments in lacustrine deep water [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(2): 271-284.
- [37] 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 Yongqiang, 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.
- [38] 王剑,周路,靳军,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油储层孔隙结构、烃类赋存及其与可动性关系[J].石油实验地质,2021,43(6):941-948.
WANG Jian, ZHOU Lu, JIN Jun, et al. Pore structure, hydrocarbon occurrence and their relationship with shale oil production in Lucaogou Formation of Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(6): 941-948.
- [39] 蒯克来,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 Kelai, CAO Yingchang, ZHU Rukai, et al. Rock types and characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 36(12): 1495-1507.
- [40] 王然,常秋生,钱永新,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油“甜点体”储集特征及成因机理[J].石油实验地质,2020,42(4):604-611.
WANG Ran, CHANG Qiusheng, QIAN Yongxin, et al. Reservoir characteristics and genesis of shale oil "sweet spots" in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 604-611.