

南图尔盖盆地储层成岩作用及孔隙演化

周海燕^{1,2}, 胡见义¹, 郑俊章^{1,2}, 黄先雄²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油海外研究中心, 北京 100083)

摘要: 储层储集性能普遍良好是南图尔盖盆地油气资源丰富的主要原因。通过对该盆地储层的岩石学特征、成岩作用及孔隙类型演化分析研究发现, 砂岩的成岩作用及孔隙演化对储层的储集性能有着重要影响。在对大量薄片和岩心进行分析的基础上, 运用扫描电镜和 X 衍射粘土分析等手段, 对南图尔盖盆地砂岩储层研究表明, 该区机械压实和压溶作用、杂基充填作用、胶结作用和交代作用使砂岩孔隙度降低, 不稳定矿物的溶蚀作用导致储层次生孔隙发育。根据有机质的演化及粘土矿物的变化序列, 成岩作用和孔隙演化随埋深具有明显的阶段性: 早成岩阶段, 孔隙类型以原生孔隙粒间孔为主; 中成岩阶段, 孔隙类型以原生、次生混合型为主; 晚成岩阶段, 孔隙类型以次生型为主。综合评价南图尔盖盆地储层发现, 阿雷斯库姆组、阿克萨布拉克组和库姆科尔组为 I 类储层, 可作为今后油气勘探的主要目的层。

关键词: 成岩作用; 次生孔隙; 粘土矿物; 库姆科尔组; 孔隙演化; 南图尔盖盆地

中图分类号: P618.130.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2008)06-0547-12

Diagenesis and pore evolution of reservoirs in South Turgai Basin

ZHOU Hai-yan^{1,2}, HU Jian-yi¹, ZHENG Jun-zhang^{1,2} and HUANG Xian-xiong²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. CNPC International Research Center, Beijing 100083, China)

Abstract: The main factor responsible for rich hydrocarbon resources is the good behaviors of reservoirs in South Turgai Basin. An analysis of characteristics, diagenesis and pore type evolution of reservoir rocks shows that diagenesis and pore evolution exerted great effects on the properties of reservoir rocks. Lots of thin sections were analyzed by such means as standard petrographic microscope, X-ray diffraction and scanning electron microscope analysis so as to study the selected samples. Diagenetic complexity suggests that mechanical compaction and pressure solution, miscellaneous filling actions, cementation and replacement led to the decrease of porosity, whereas solution of unsteady minerals resulted in the increase of porosity. The evolution of organic materials and the sequence of clay minerals imply that diagenesis and pore evolution of the sandstone varied obviously with the increasing buried depth: the porosity type was mainly interparticle pores of the primary pore type at the early diagenetic stage, mainly the mixing of the primary and secondary pores at the middle diagenetic stage, and mainly the secondary pores at the late diagenetic stage. A comprehensive evaluation of the reservoirs in South Turgai Basin has led the authors to the conclusion that the Arysikum Formation, the Akshabulak Formation and the Kumkol Formation belong to Class I Reservoir, which may be regarded as the main targets in future prospecting work.

Key words: diagenesis; secondary pore; clay mineral; Kumkol Formation; pore evolution; South Turgai Basin

收稿日期: 2008-04-29; 修订日期: 2008-07-14

基金项目: 中国石油天然气集团公司科技攻关资助项目(07B60101)

作者简介: 周海燕(1976-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事石油地质勘探研究工作, E-mail: zhouhaiyan@cnpcint.com; zhouhy0119@

南图尔盖盆地为中生代走滑裂谷盆地,面积约 8 万 km²,呈南北向长轴状分布。平面上分为 3 个构造单元,次级构造单元具有垒-堑相间的地质结构,盆地的构造分带性控制了油气的形成与分布。从晚三叠世开始盆地经历了初始张裂、断陷沉积期、断坳转换期、坳陷沉积期和沉积后期隆起 5 个演化阶段。

三叠-中侏罗世断陷期主要沉积了一套煤系地层,白垩纪-始新世坳陷发育阶段主要为一套海相碳酸盐岩和陆相碎屑岩沉积,其上部沉积了渐新世-第四纪的陆相碎屑岩,沉积盖层最大厚度在 5 000 m 以上,具体沉积地层及发育特征见图 1。

南图尔盖盆地已发现大小油气田十几个,石油

	阶	组	厚度/m	岩性剖面	生油岩	储层	盖层
K ₁	Neocomian	Barremian	上达乌尔	40~350			
		Hauterivian					
		Vanlanginian	下达乌尔	30~300			
		Berriasian					
J ₃		Tithonian	阿克苏布拉克	600			
		Kimmeridgian					
		Oxfordian	库姆科尔	0~500			
		Callovian					
J ₂		Bathonian	卡拉甘塞	0~450			
		Bajocian					
		Aalenian					
		Toarcian					
J ₁		Pliensbachian	埃巴林	0~500			
		Sinemurian					
		Hettangian	萨济姆拜	0~1000			
Pz		基底					

图 1 南图尔盖盆地沉积地层特征

Fig. 1 Stratigraphic section of South Turgai Basin

可采资源 3.5 亿 (USGS)。该区发育的储层类型有砂岩储集层、碳酸盐储集层和基岩储集层,以砂岩储集层为主。丰富的油气资源与该盆地的储层具有密切关系,储层类型丰富和储集性能普遍良好是该盆地油气资源丰富的重要原因。

1 岩石学特征

1.1 矿物组成特征

研究区储集层主要为下白垩统阿雷斯库姆组,上侏罗统阿克苏布拉克组、库姆科尔组和中侏罗统多尚组的碎屑岩组成,其主要矿物成分为石英、长石、方解石、粘土+云母、铁白云石及菱铁矿等。石英含量最高,为 33%~55%,平均含量达 44%;粘土+云母为 26%~34%,平均含量为 30%;长石为 9%~34%,平均含量为 18%;方解石、铁白云石和菱铁矿平均含量分别为 5%、2%和 1%,阿克苏布拉克组几乎不含这 3 种矿物,但总体上碳酸盐含量最高不超过 15% (图 2a)。净砂岩和杂砂岩的矿物成分含量也略有差别 (图 2b)。层位上,从阿雷斯库姆组到多尚组,由浅到深,石英和粘土+云母含量增加、长

石含量降低。由此可见,不同层段岩性的矿物组成存在着明显差异,反映了其沉积环境的不同,粘土矿物成分含量较高及石英含量相对较低,反映了砂岩的成分成熟度不高,整体上离物源比较近。

储集层一般为灰色和灰褐色,致密度为松散-中等-致密,含油级别较高。由铸体薄片分析可看出,骨架颗粒主要由石英、长石和岩屑组成,矿物成熟度较低,颗粒间填隙物含量较高 (图 3a)。薄片统计表明,净砂岩孔隙度为 10%~28%,杂砂岩孔隙度变化范围较大,为 1%~25%。矿物成分中的石英主要以单晶为主,其形状为次棱角-次圆状,一般含有包体,部分变形并具有波状消光特征。研究区石英的次生变化主要是次生加大,但不是很普遍。长石以钾长石为主,斜长石变化范围大,在研究区的不同深度,均观察到长石被偏酸性溶液溶解形成的粒内溶孔、粒间溶孔,局部被自生矿物侵蚀和溶解 (图 3b)。

岩屑是指由 2 种以上的矿物颗粒组成的碎屑,它是母岩岩石的碎块 (郑浚茂等,1989;冯增昭,1993)。镜下观察表明,研究区的岩屑主要由未分异的沉积碎屑及泥、粘土组成,部分含有火山碎屑和变质成分,其含量较高。高含量的岩屑说明岩石矿物成

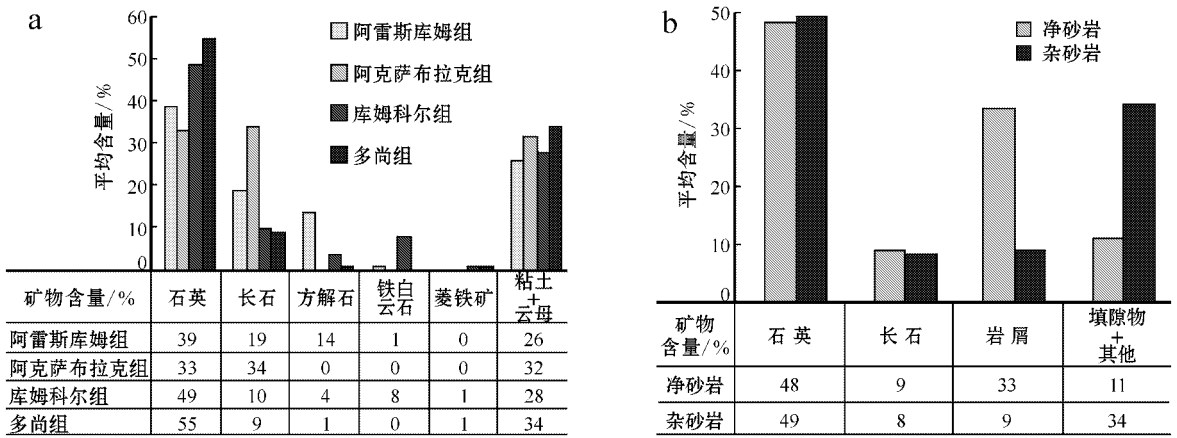


图 2 砂岩储层碎屑岩矿物成分平均含量对比图

Fig. 2 Comparison between average contents of clastic mineral components in sandstone reservoirs

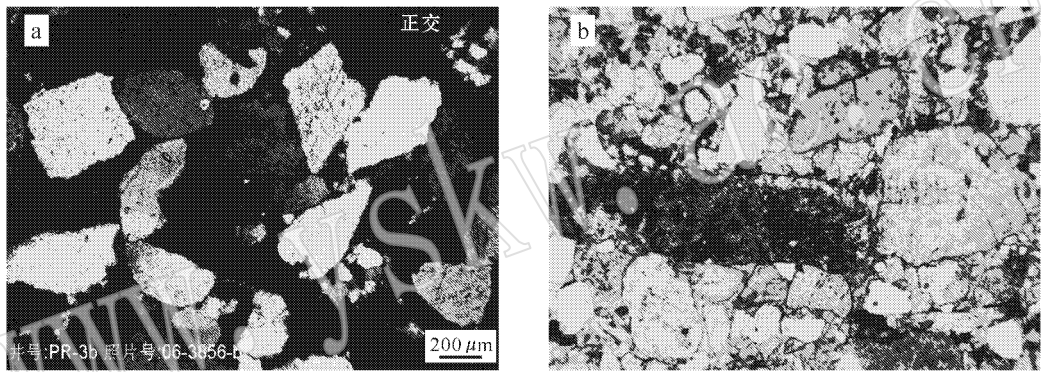


图 3 南图尔盖盆地碎屑岩储集层砂岩铸体薄片图(5×10)

Fig. 3 Apogrite thin section of the detrital reservoir in South Turgai Basin(5×10)

a—R1 井,库姆科尔组,净砂岩,石英(50%)、长石(3%)、岩屑(25%)、填隙物及其他(3%),长石局部变形、被侵蚀;b—R2 井,阿雷斯库姆组,杂砂岩,石英(40%)、钾长石(10%)、斜长石(10%)、岩屑(7%)、填隙物及其他(33%),石英局部微变形,长石局部被溶解和侵蚀,岩屑局部变形和溶解

a—R1 well, Kumkol Formation, arenite, quartz(50%), feldspar(3%), debris(25%), interstitial matter and other components(3%), feldspar is partially distortional and eroded;b—R2 well, Arskum Formation, apogrite, quartz(40%), potassic feldspar(10%), plagioclase(10%), debris(7%), interstitial matter and other components(33%), quartz is partially distortional and feldspar is partially corroded and dissolved, debris is partially distortional and dissolved

熟度偏低,碎屑储集岩经过搬运和风化的历史较短,为近源的快速堆积。岩屑局部有压实、破碎和变形,部分发生溶解和蚀变(图3)。其他矿物成分有云母、砂屑、泥砾、重矿物(痕量)及化石等,云母包含白云母和黑云母,局部弯曲变形膨胀。

1.2 砂岩填隙物特征

在碎屑岩中杂基和胶结物都作为碎屑颗粒间的填隙物。杂基主要是泥质,包括陆源粘土矿物及泥级(颗粒<0.03 mm)长英质颗粒;胶结物主要是指在成岩过程中形成的自生矿物,常见的有碳酸盐矿物、自生粘土、菱铁矿和黄铁矿。

泥质杂基在各含油组合中分布广泛,多充填于

粒间(图3),因而对储层物性影响较大。各层系泥质含量为26%~34%,平均约30%。碳酸盐矿物主要是方解石、铁白云石、微量的铁方解石,多呈亮晶、连晶结构,充填孔隙或交代颗粒,其含量平均为6%(图4a)。自生粘土矿物在储层中分布广泛,以微晶集合体的形式充填于粒间孔、粒内孔,堵塞孔隙,形成微孔隙(图4b),对储层物性、电性等影响明显。菱铁矿主要为不规则粒状(图4c),各层组含量很低,平均为1%。局部层组含微量黄铁矿(图4d)。

1.3 粘土矿物特征

碎屑储集岩中的粘土矿物主要是沉积成岩粘土矿物,在沉积作用过程中,可以改变陆源粘土矿物的

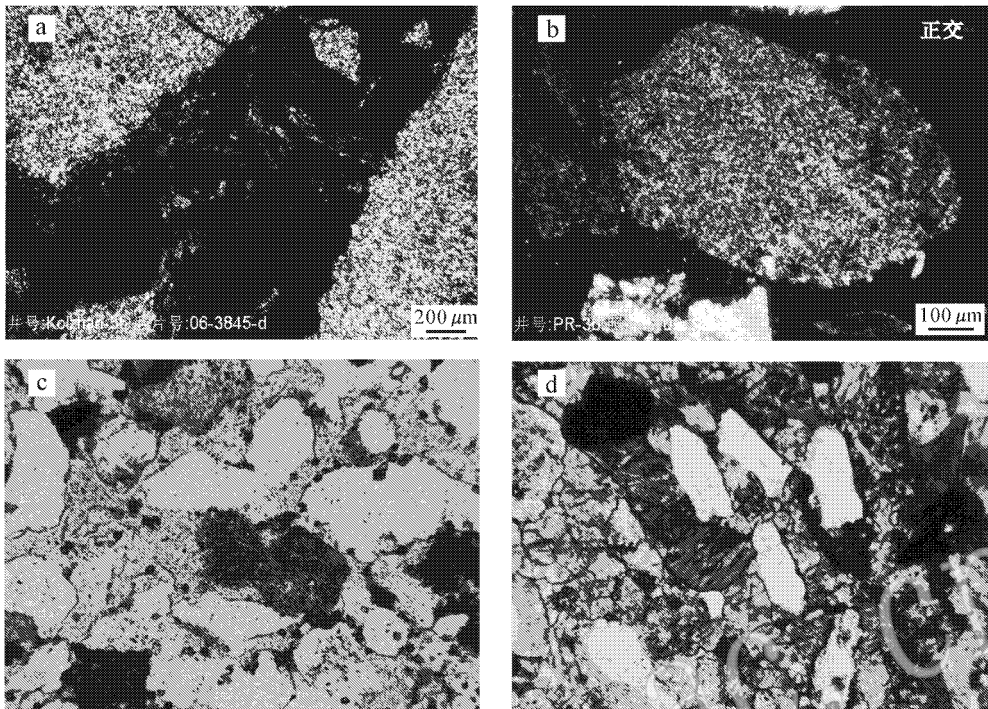


图 4 南图尔盖盆地储层砂岩填隙物特征图(铸体薄片, 10×10)

Fig. 4 Characteristics of sandstone interstitial matter in South Turgai Basin (cast thin section, 10×10)

a—R3 井 基底 碳酸盐矿物充填; b—R1 井 库姆科尔组 杂砂岩 自生粘土(11%); c—R4 井 库姆科尔组 杂砂岩 菱铁矿(5%);
d—R5 井 库姆科尔组 杂砂岩 黄铁矿(1%)

a—R3 well, Pz, carbonate mineral infilling; b—R1 well, Kumkol Formation, apogrite, authigenic clay(11%); c—R4 well, Kumkol Formation, apogrite, siderite(5%); d—R5 well, Kumkol Formation, apogrite, pyrite(1%)

成分,形成新的自生粘土矿物而转入沉积物中。由 X 衍射鉴定表明,研究区粘土矿物是以伊利石、伊/蒙混层、高岭石、绿泥石为主,蒙脱石含量很低,仅在阿克苏布拉克组含量较高。几乎不含绿/蒙混层、蛇纹石,仅在阿雷斯库姆组有少量分布。粘土矿物的分布对储层物性具有一定的影响,伊利石容易喉间“搭桥”和形成易动微粒,绿泥石遇酸产生酸敏,形成絮凝沉淀物,高岭石在流速作用下发生迁移,其晶片横截面容易嵌堵于孔喉间,蒙脱石遇淡水发生膨胀,这些现象均能造成孔喉的堵塞,降低储集岩的孔渗性。混层矿物具有端元矿物的双重性质,对储集层危害更大(游国庆等 2006, 杨晓萍等 2006, 宁宁等 2007)。从图 5 中可以看出,随着粘土矿物绝对含量的增加,孔隙度和渗透率总体呈减小的趋势,储层物性逐渐变差。

研究区储层粘土矿物组成随深度呈有规律的变化。随着深度的增加蒙脱石逐渐向伊利石转化,蒙脱石相对含量逐渐降低,在 1 700~3 000 m,蒙脱石已经完全转化,伊/蒙混层和伊利石相对含量随深度呈增加的趋势,到 2 600 m 左右,伊/蒙混层基本上已经完全转化,开始以伊利石为主(图 6)。

2 成岩作用特征

研究区储集层成岩作用的类型主要有机械压实和压溶作用、化学胶结作用、杂基充填作用、交代作用、溶蚀作用。前 4 种成岩作用为破坏性作用,使储层物性变差,而溶蚀作用为建设性作用,可改善储层物性。

2.1 机械压实和压溶作用

机械压实作用可以贯穿整个成岩过程,但在早成岩期对储层所造成的影响远比其他时期大。薄片鉴定表明,研究区碎屑储集层机械压实作用由弱到强,大部分颗粒以点-线接触为主,局部凹凸接触,随深度增加,压实作用增强出现缝合接触。压溶作用随埋深增大也逐渐显现,实际上压溶作用是发生在碎屑颗粒接触点上的溶解作用,这些溶解物会在附近沉淀,使另一部分碎屑次生加大。因此,包括碎屑之间的镶嵌接触面、石英次生加大等均被视为压溶作用的证据。从这个意义上讲,压溶作用比机械压实作用对孔隙更具破坏性。它们一方面使碎屑颗粒接触更加紧密,另一方面溶解物质沉淀充填粒间孔,从而使储集

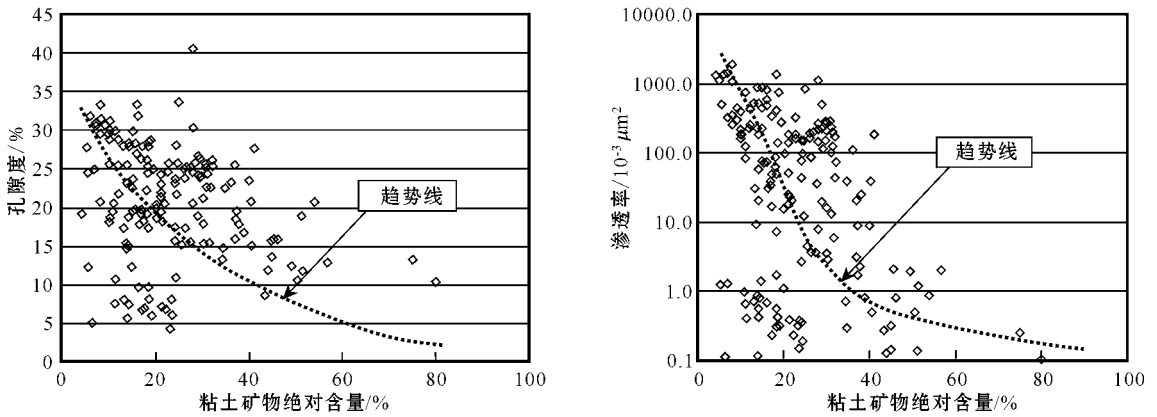


图 5 南图尔盖盆地储层粘土矿物绝对含量与孔隙度、渗透率关系图

Fig. 5 Relationship between absolute content of clay minerals and porosity/permeability of reservoirs in South Turgai Basin

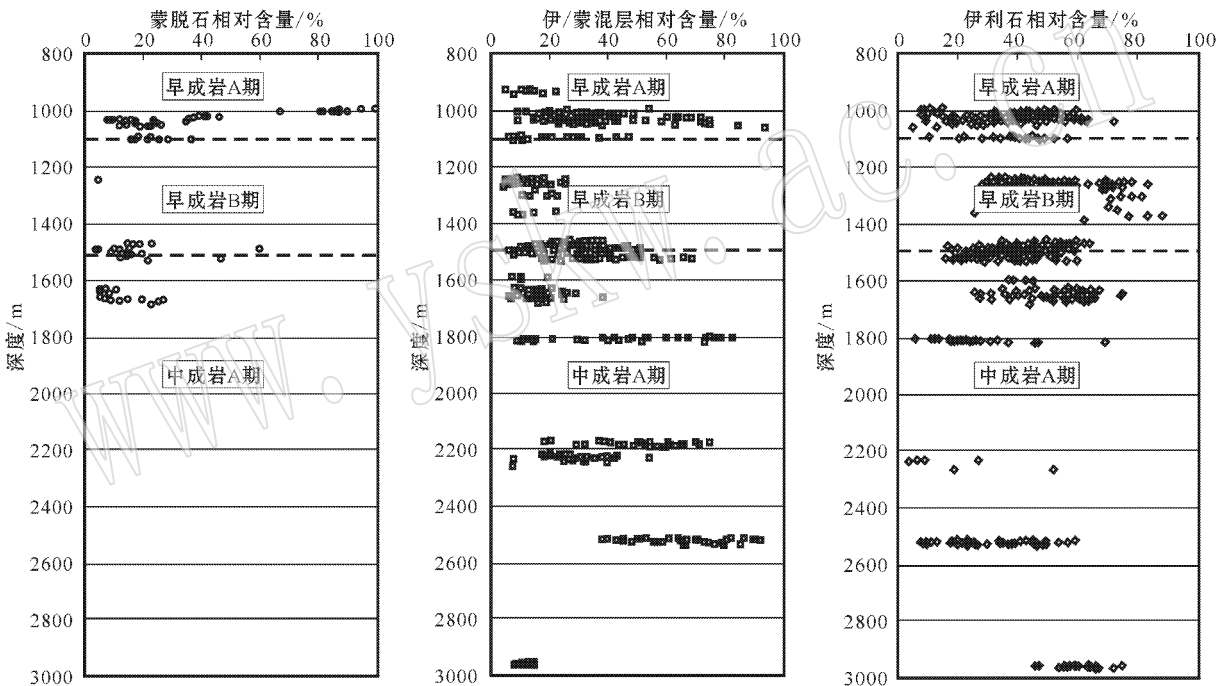


图 6 南图尔盖盆地储层粘土矿物相对含量与深度关系图

Fig. 6 Relationship between absolute content of clay minerals and depths in South Turgai Basin

岩物性和孔隙结构变差, 渗流能力降低(图 7)。

2.2 化学胶结作用

化学胶结作用形成的矿物充填于储层的孔隙之间, 堵塞喉道, 降低储层物性, 所以它对储层的破坏作用比较明显。研究区目的层段的胶结物主要为自生粘土、自生石英、碳酸盐类、硅酸盐类和少量铁质(菱铁矿等)。

粘土矿物对有机质的脱羧和裂化起催化作用, 产生有机酸(Surdam *et al.*, 1989; Lynch, 1996)。粘土矿物随压实成岩作用的增强, 不仅脱去孔隙水、束缚水, 而且随相变逐渐脱去层间水、晶间水, 同时释

放大量金属阳离子及 H^+ 离子, 脱去的水携带这些阳离子和有机酸率先进入邻近砂岩中, 打破环境平衡, 形成次生孔隙(钟大康等, 2004; 杨仁超等, 2007; 蒋恕等, 2007)。自生粘土矿物主要有蒙脱石、高岭石、伊/蒙混层、伊利石和绿泥石等。这些粘土矿物以粘土膜的形式包绕在碎屑颗粒外面, 大大缩小了砂岩的孔隙喉道, 对储集层物性的影响较大(图 8a)。

碳酸盐胶结物主要为方解石和白云石, 为本区碎屑储集岩中的重要成分之一, 但分布不均(图 8b)。碳酸盐胶结物从结构上可分为泥晶、亮晶, 且以亮晶为主。从薄片分析可以看出, 在成岩演化过程中, 泥

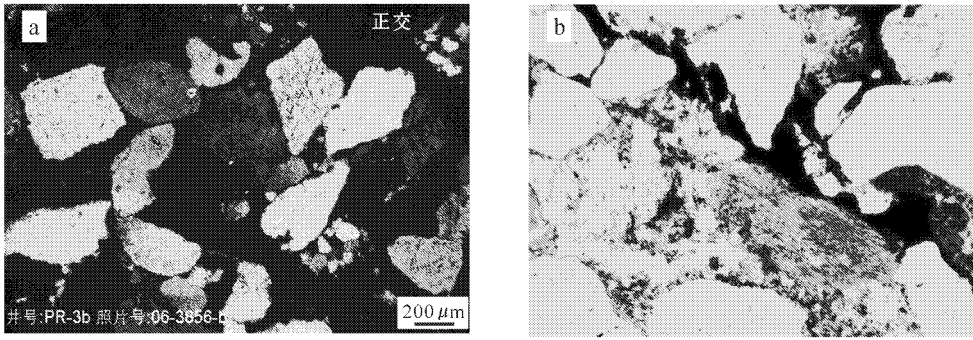


图 7 南图尔盖盆地储层颗粒接触类型(5×10)

Fig. 7 Grain contact types of reservoirs in South Turgai Basin(5×10)

a—R1 井, 库姆科尔组, 净砂岩, 基质支撑, 局部漂浮状, 点线和凹凸接触; b—R6 井, 多尚组, 点线和凹凸接触, 局部缝合接触
a—R1 well, Kumkol Formation, arenite, matrix support, partial floating, point-line contact and concave-convex contact; b—R6 well, Doshchan Formation, point-line contact and concave-convex contact, partial suture contact

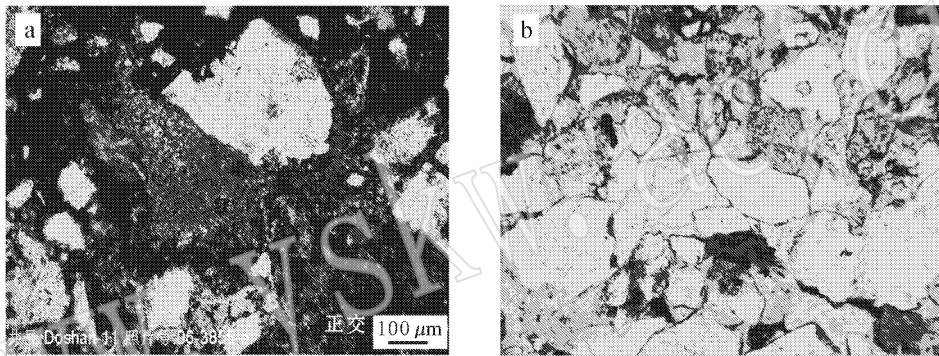


图 8 南图尔盖盆地砂岩碳酸盐胶结作用(铸体薄片, 10×10)

Fig. 8 Carbonate cement of sandstone in South Turgai Basin(cast thin section, 10×10)

a—R7 井, 多尚组, 砂质砾岩; b—R8 井, 库姆科尔组, 长石岩屑杂砂岩, 碳酸盐(7%)孔隙充填(7%)和颗粒置换(痕量), 无铁方解石, 局部嵌晶孔隙充填
a—R7 well, Doshchan Formation, sandy conglomerate; b—R8 well, Kumkol Formation, feldspar lithic sandstone, carbonate(7%), pore infilling(7%) and grain replacement(trace amount), calcite without ferruginous matter, partially poecilitic pore filling

晶结构形成早于亮晶,并随深度增加, Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 离子增多,出现了方解石(白云石)向铁方解石(铁白云石)转化序列。因此,方解石(白云石)形成早于铁方解石(铁白云石),方解石(白云石)中含铁多少也成为成岩演化程度的标志之一。

石英次生加大也是胶结作用的一种形式。研究区石英次生加大特征明显(图 9a),主要表现为硅质胶结,其沿石英颗粒边缘生长,与原石英颗粒光性一致。通过扫描电镜观察,其加大级别为Ⅲ级(图 9b)。石英次生加大降低了储集层的孔、渗性,也改变了其孔隙结构,使粒间管状喉道变为片状或缝状,降低了储集层的质量,但压实作用可得到缓冲,石英次生加大边间的原生孔隙得以保存。如果加大级别高,能使孔隙变小,喉道变窄,导致储集性能下降。石英加大现象在研究区并不普遍。由于加大石英在孔隙中的刚性支撑作用,反而延缓(抵抗)了机械压实作用对

储集层孔隙的破坏作用,这可能是研究区储集岩在较大埋深上也能保留较多残余粒间孔隙的原因之一。

2.3 杂基充填作用

杂基充填作用是指陆源粘土或陆源粘土级($< 0.03\text{ mm}$)长英质碎屑物质在同沉积或沉积物未脱离水体前,充填粒间,占据孔隙空间、堵塞喉道,变大孔隙为小孔隙或基质晶间微孔的过程,它主要发生在同生作用期间(郑浚茂等,1989;冯增昭,1993)。由于研究区沉积物离物源较近,搬运距离短,沉积速率快,分选不好,杂基充填作用较强,从前述岩石类型中就可以看出有很大一部分杂砂岩存在(图 10a)。

2.4 交代作用

交代作用系指在沉积期后演化过程中,沉积岩中某些矿物被化学成分不同的另一种矿物所替代的现象,它的发生与外来物质的带入和介质的物理化学条件(E_h 、 pH 值)的改变有关,其实质是溶解和沉

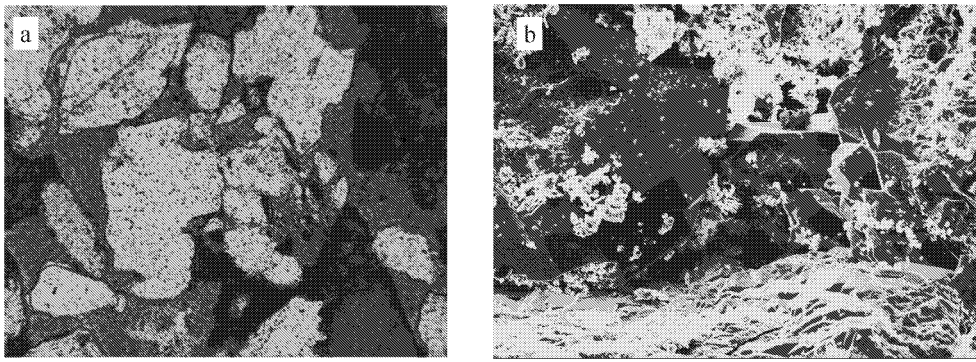


图9 南图尔盖盆地储层扫描电镜下石英加大边特征图(铸体薄片 5×10)

Fig. 9 Enlarged characteristics of quartz in South Turgai Basin (cast thin section under SEM 5×10)

a—R9井,库姆科尔组,净砂岩,石英加大边且不连续;b—R1井,库姆科尔组,灰色中-细粒砂岩,粒间、粒表高岭石与石英加大Ⅲ级
a—R9 well, Kumkol Formation, arenite, discontinuous enlargement of quartz; b—R1 well, Kumkol Formation, gray intermediate-fine grained sandstone, intergranular and grain surface kaolinite and III-grade quartz enlargement

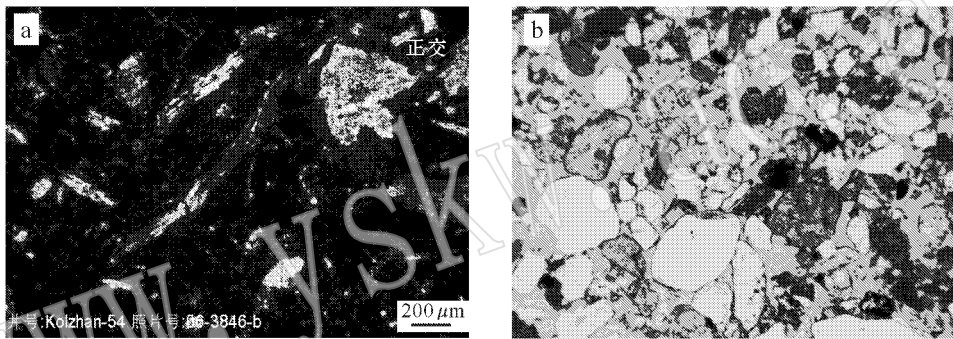


图10 南图尔盖盆地砂岩杂基充填作用、交代作用特征图(铸体薄片 5×10)

Fig. 10 Matrix infilling characteristics of sandstone in South Turgai Basin (cast thin section, 5×10)

a—R10井,阿克苏布拉克组,填充物+其他(25%)杂基充填;b—R11井,阿雷斯库姆组,岩屑长石砂岩(交代作用)
a—R10 well, Akshabulak Formation, interstitial matter and others (25%) (miscellaneous-filling); b—R11 well, Aryskum Formation, debris feldspar sandstone (replacement)

淀同时发生的作用,对储集岩物性的影响一般是负面的(郑浚茂等,1989;冯增昭,1993)。观察铸体薄片表明,研究区的交代作用主要是碎屑基质被自生粘土交代,方解石被碎屑骨架颗粒和基质粘土交代,内生粘土局部绿泥石化。粘土矿物交代碎屑颗粒,常见绿泥石交代石英、长石(图10b),使这些颗粒边界模糊不清。另外,存在铁方解石交代方解石,白云石交代方解石,铁白云石交代白云石等。

2.5 溶蚀作用

通过电镜扫描、铸体薄片观察发现,本区被溶蚀的物质主要是长石、岩屑等不稳定的颗粒以及少量方解石胶结物。在方解石胶结强烈的砂岩中,溶蚀作用较弱,次生孔隙极不发育。

本区溶蚀作用可分为两期:第一期为早期溶蚀作用,主要以长石、岩屑被溶蚀成粒内溶孔为特点。首先解理缝和双晶面产生机械破裂,形成微裂缝,粒

间溶液沿着微裂缝渗透,溶解长石形成粒内溶蚀微孔、缝,后被绿泥石薄膜包绕,推测为近地表条件下大气淡水淋滤的结果。蒙脱石和高岭石向伊利石的转化也有助于长石的溶解,第二期发生于成岩阶段中晚期,表现为长石的较强烈溶蚀以及方解石的弱溶蚀,是该区溶蚀作用的主要方式。该期溶蚀作用与泥岩中有机质的热演化产生有机酸有关,即在有机质成熟过程中产生的富含羧酸、羟基的酸性溶液进入碎屑岩中溶解长石、方解石胶结物等,使粒内溶蚀微孔进一步溶蚀,形成较大的溶蚀孔,若溶蚀作用较强,将形成残余铸(印)模孔或铸(印)模孔。研究区长石一般局部被侵蚀溶解,形成次生孔隙,从而增加了孔隙度,使储层物性进一步变好(图11a)。构造裂缝的存在有利于次生孔隙的形成,它也可以给酸性溶液活动提供良好的渗流通道,沿构造裂缝或微裂缝常见各种次生孔隙(图11b)。

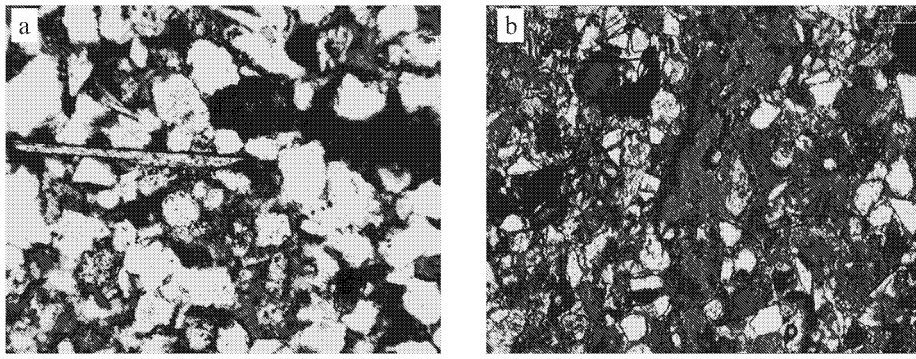


图 11 南图尔盖盆地砂岩储层沿构造裂缝的溶蚀现象(5×10)

Fig. 11 Erosion along the tectonic fracture in sandstone reservoir in South Turgai Basin(5×10)

a—R12 井 库姆科尔组,长石占颗粒骨架的 8%,局部被侵蚀,部分被溶解和蚀变,岩屑局部变形、压实、溶解和蚀变,溶解孔隙度为 2%;b—R13 井,阿雷斯库姆组,含灰细粒长石岩屑砂岩,颗粒点接触为主,略具定向性排列,长石常见弱的泥化现象,方解石胶结物孔隙式充填,连晶结构并交代长石,见顺层理分布的张裂缝,沿张裂缝隙两边粒间溶液孔发育,并见方解石胶结物被溶蚀,而远离裂缝隙的粒间溶孔不发育
a—R12 well, Kumkol Formation, feldspar occupies 8% of particle skeleton, locally eroded and partly dissolved and altered, debris locally deformed, compacted, dissolved and altered, with dissolution porosity being 2%; b—R13 well, Arysium Formation, with gray fine-grained feldspar debris sandstone, mainly point contact, some with definite direction. Feldspar commonly with weak sludging. Porosity filling in calcite cement, with crystal structure and replacement of feldspar. Tension crack distributed along bedding. Inter-dissolved pores developed on both sides of the tension crack, but with none far away from the fracture pore. Calcite cement dissolved

3 成岩阶段划分

不同地区的岩石在不同的埋深,处于不同的温度、压力和流体环境中,因此其成岩阶段特征不同。储层成岩阶段划分的主要依据有古地温,即流体包裹体的均一温度、自生矿物形成温度,有机质成熟度,粘土矿物组合及伊利石/蒙脱石(I/S)混层粘土矿物的转

化,自生矿物分布及形成顺序,岩石的结构、构造特征及孔隙类型等。成岩阶段一般可分为同生成岩阶段、早成岩阶段(包括 A、B 两个亚期)、中成岩阶段(包括 A、B 两个亚期)、晚成岩阶段和表生成岩阶段(薛新克等 2007,刘琼等 2007)。据此,由薄片观察的结果分析得出,研究区内储层成岩阶段可划分为早成岩阶段、中成岩阶段和晚成岩阶段,其中早成岩阶段和中成岩阶段均又分为 A、B 亚期(图 12)。

成岩阶段		今地温 / °C	埋深 / m	有机质		粘土岩		岩石固结 程度	机械 压实 作用	碎屑岩中的自生矿物										溶蚀作用			接触关系	孔隙类型		
阶段	期			阶段	R ₀ /%	转化带	混层比 / %			蒙脱石	混层粘土	高岭石	伊利石	石英加大	石英	长石	菱铁矿	方解石	白云石	铁白云石	长石	岩屑			碳酸盐	杂基
早成岩	A	55	<1 100	未熟	0.35	蒙脱带	>70	固 结	未固结													点——线——凹凸——缝合	原生孔隙型	粒间孔		
	B	60	1 500		0.50	无序带	50		半固结																	
中成岩	A	80	2 500	低熟	0.70	有序带	30																	混合孔隙型	粒间孔	
		90	2 800	成熟	0.90																					
		110	3 500	较高成熟	1.30																					
B	140	5 000	高成熟	2.00	超点阵	10																		溶孔		
晚成岩		>140	>5 000	过成熟	4.00	伊利石/蒙脱带	混层消失																	次生型	溶孔	

图 12 南图尔盖盆地成岩阶段划分及成岩演化序列图

Fig. 12 Diagenetic stages and evolution sequence of South Turgai Basin

早成岩 A 期成岩特征: 沉积物已脱离水体, 古地温为 55°C , R_0 小于 0.35%, 埋深小于 1 100 m, 有机质未成熟, 粘土伊/蒙混层比大于 70%, 沉积物为弱固结-半固结, 成岩作用主要是机械压实和早期碳酸盐胶结, 骨架颗粒以点接触为主, 孔隙仍以原生粒间孔为主。

早成岩 B 期成岩特征: 古地温为 $55\sim 60^{\circ}\text{C}$, R_0 为 0.35%~0.50%, 埋深为 1 100~1 500 m, 有机质未成熟, 粘土混层比 50%~70%, 为无序混层, 固结成岩, 压实作用增强, 大量出现高岭石、碳酸盐亮晶胶结, 长石、岩屑的溶解作用明显增强; 骨架颗粒以点线接触为主, 孔隙仍以原生粒间孔为主, 伴随出现粒间、粒内溶孔等。早白垩世阿雷斯库姆组埋深 1 100~1 500 m、晚侏罗世阿克萨布拉克组在盆地南部埋深 1 350~1 400 m、库姆科组在盆地南部埋深 1 430~1 480 m 及中侏罗统多尚组在盆地北部埋深 900~1 200 m, 正好处于此成岩期。

中成岩 A 期成岩特征: 古地温为 $60\sim 110^{\circ}\text{C}$, R_0 为 0.50%~1.30%, 埋深为 1 500~3 500 m, 有机质低成熟-较高成熟, 粘土混层比为 50%~20%, 为有序混层, 岩石已固结, 压实作用增强, 高岭石、自生石英(包括加大)、碳酸盐亮晶胶结物大量出现, 长石、岩屑的溶解作用增强; 骨架颗粒呈点线接触, 局部出现凹凸和缝合接触, 孔隙为混合型, 原生粒间孔、粒间-粒内溶孔和微孔隙。晚侏罗世阿克萨布拉克组在盆地北部埋深 1 500~2 100 m、库姆科组在盆地北部埋深 2 100~2 600 m 及中侏罗世多尚组在盆地南部埋深为 2 200~2 700 m, 这些沉积储层主要处于此成岩期。

中成岩 B 期成岩特征: 古地温为 $110\sim 140^{\circ}\text{C}$, R_0 为 1.30%~2.00%, 埋深为 3 500~5 000 m, 有机质高成熟, 粘土混层比为 20%~10%, 为超点阵混层, 压实作用强烈, 自生石英(包括加大)、碳酸盐亮晶胶结物大量出现, 长石、岩屑的溶解作用强; 长石基本被溶解或粘土化; 骨架颗粒呈线、凹凸接触, 局部缝合接触, 孔隙为混合型, 原生粒间孔大量减少, 粒间-粒内溶孔和裂隙孔比例明显增加。

晚成岩阶段成岩特征: 古地温为 $>140^{\circ}\text{C}$, R_0 为 2.00%~4.00%, 埋深大于 5 000 m, 有机质过成熟, 粘土混层带消失, 为伊利石、绿泥石带, 骨架颗粒呈缝合接触。

4 孔隙演化特征

不论是砂岩或是碳酸盐岩, 它们的孔隙类型、喉道类型以及孔隙-喉道的配合关系都与其储集性能

关系密切。砂岩中存在 4 种类型和孔隙: 粒间孔、溶蚀孔、微孔隙和裂隙。所有的砂岩最初都有粒间孔, 如果未遭到破坏, 常常是渗透性好、孔径大以及有丰富的烃类产能。溶蚀孔是由于碳酸盐、长石、硫酸盐或其他易溶物质的溶解造成的。具溶蚀孔隙的砂岩储集性可以从极好变到很差, 这取决于溶蚀孔隙的大小及溶蚀孔隙空间的相互连通性。含有较多粘土矿物的砂岩则有大量的微孔隙, 其特征常常是高表面积、小孔径、低渗透率、高残余水饱和度, 并且对淡水粘土膨胀的灵敏度增加。裂隙则可与其他任何孔隙共生(钟大康等, 2004)。孔隙类型及其孔隙几何性均随成岩作用的不同而发生变化。

4.1 孔隙类型

按照孔隙成因、空间位置和大小, 把研究区储集层的孔隙类型划分为原生孔隙和次生孔隙两大类。

原生孔隙包括粒间孔隙和微孔隙。粒间孔隙又分为正常粒间孔和缩小粒间孔, 正常粒间孔为沉积后主要因压实作用形成的孔隙, 一般为正常原生粒间缩小孔隙。据测算, 由于压实作用原始沉积物的孔隙大约减少了 60%。该类孔隙储集岩中的砂岩为颗粒支撑或杂基支撑, 含少量胶结物, 在颗粒、杂基及胶结物间的孔隙称为粒间孔隙。此为砂岩储集岩中最主要、最普遍的孔隙类型。这种孔隙的分布直接与沉积环境有关, 经成岩后生作用而发生变化。以粒间孔为主的砂岩储集岩, 其孔隙大、喉道粗、连通性较好。无论从储集能力或渗透能力的观点来看, 最好的砂岩储集岩是以粒间孔为主的。一般都具有较大的孔隙度($>20\%$)和渗透率(>100 毫达西)。研究区储层物性好的, 一般是以粒间孔为主; 局部有微孔隙, 可能与粘土和粘土质碎屑有关。

次生孔隙主要有溶蚀孔、特大孔、微裂隙孔和其他综合成因孔等。由薄片观察和扫描电镜观察, 研究区次生孔隙主要是骨架颗粒和基质粘土溶解形成的溶蚀孔(图 13)。溶蚀孔包括粒间溶孔、粒内溶孔和铸模孔。粒间溶孔是原生粒间孔隙或成岩期由胶结、沉淀等作用未完全充填的孔隙因颗粒收缩或被侵蚀、溶解而使孔隙壁扩大的孔隙; 粒内溶孔是指骨架颗粒(研究区主要为钾长石)被选择性溶解而形成的颗粒内部储集空间, 形成筛状、网格状、蜂窝状孔隙。据扫描电镜观察, 这些粒内溶孔和粒间溶孔基本是连通的, 因此对改善储集性能十分有利。溶解作用可以影响长石颗粒的一部分, 或者实际上是整个颗粒溶解。如果砂岩中有丰富的长石, 能以此种

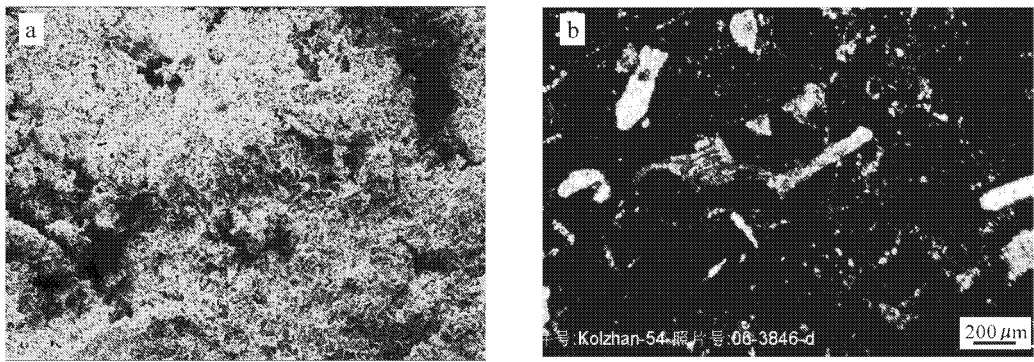


图 13 南图尔盖盆地储层次生孔隙图(铸体薄片 5×10)

Fig. 13 Secondary pore diagram under thin section for reservoirs in South Turgai Basin (5×10)

a—R14 井, 阿克苏布拉克组, 棕色泥质粉砂岩, 样品中溶蚀孔较发育, 连通较差; b—R14 井, 阿克苏布拉克组, 含生屑泥质硅质岩(正交); 面孔率 12.1%, 生屑内溶孔占 3%, 构造溶蚀缝占 0.1%, 基质溶孔占 9%, 分选中等, 块状构造, 岩石致密, 总体评价物性较好
a—R14 well, Akshabulak Formation, brown argillaceous siltstone, dissolved pore developed well with poor connectivity; b—R14 well, Akshabulak Formation, bioclastic shaly silicite(orthogonal light), surface-pore ratio 12.1%, dissolved pore in biotritus 3%, structural dissolved fracture 0.1%, matrix dissolved pore 9%, mediumly-sorted, massive structure, compaction, good physical property in general

方式产生大量的孔隙度。在生烃门限时, 蒙脱石向伊利石转化, 有机酸的大量生成, 加大了对基质、粘土和长石的侵蚀和溶解, 溶蚀孔发育。铸模孔主要是碎屑颗粒被完全溶解而形成的溶孔, 仅保留了颗粒外形轮廓及周围的粘土包膜或胶结物。

总体上来看, 南土尔盖盆地储层孔隙类型是以原生粒间孔隙为主, 次生的溶蚀孔为辅。

4.2 演化特征

碎屑岩的储集特性是由沉积环境、成岩作用和构造作用等诸多因素控制, 孔隙的演化规律亦主要是由成岩作用等来控制(曾德铭等, 2007; 李阳等, 2007)。随着埋深增大, 原生孔隙逐渐降低。储集层在埋藏成岩过程中, 建设性的成岩作用是该区普遍存在的溶蚀作用, 发育有利次生孔隙发育带。

从孔隙演化特征图上可以看出(图 14), 早成岩阶段埋藏较浅, 埋深不超过 1 500 m, 机械压实作用居首要地位, 自生矿物沉淀的化学胶结作用居次要地位, 长石被选择性溶解, 提供了一定的次生孔隙, 总的趋势是使原生孔隙逐渐减少(图 14、图 15)。该时期的孔隙类型以原生孔隙的粒间孔为主, 碎屑颗粒之间的接触关系由原来的不接触或点接触逐渐变为线接触。

中成岩阶段, 埋深超过 1 500 m, 机械压实作用逐渐减弱, 化学胶结作用较强, 使原生孔隙继续减少。在 2 200 m 左右, R_0 处于 0.50%~0.60%, 为蒙脱石向伊利石大量转化的地带, 有机质处于低熟阶段, 降解生成低分子有机酸, 有机酸的大量形成, 侵蚀和溶解了粒间粘土和碳酸盐胶结物, 出现了有利的次生孔

隙带(图 14、图 15)。在 R_0 为 0.70% 时, 埋深 2 500 m 左右, 有机质开始成熟, 大量热降解, 有机酸和 CO_2 产

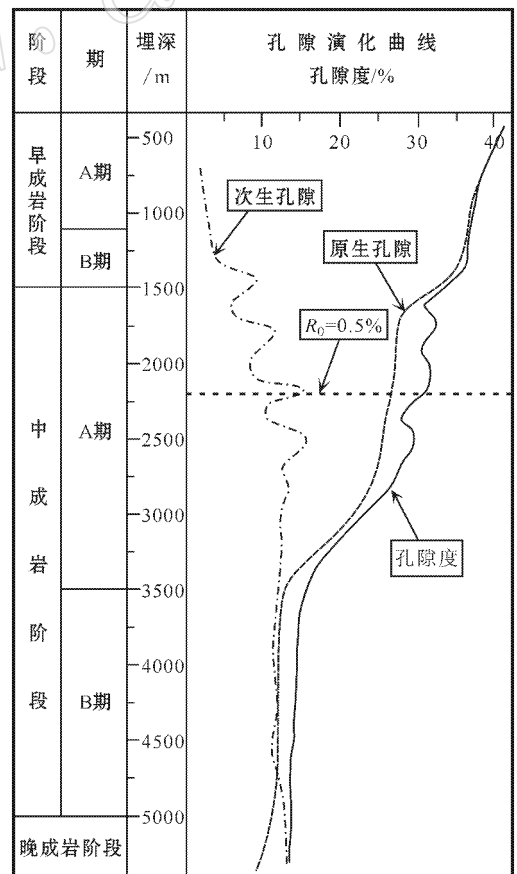


图 14 南图尔盖盆地孔隙演化特征图

Fig. 14 Characteristic diagram of pore evolution in South Turgai Basin

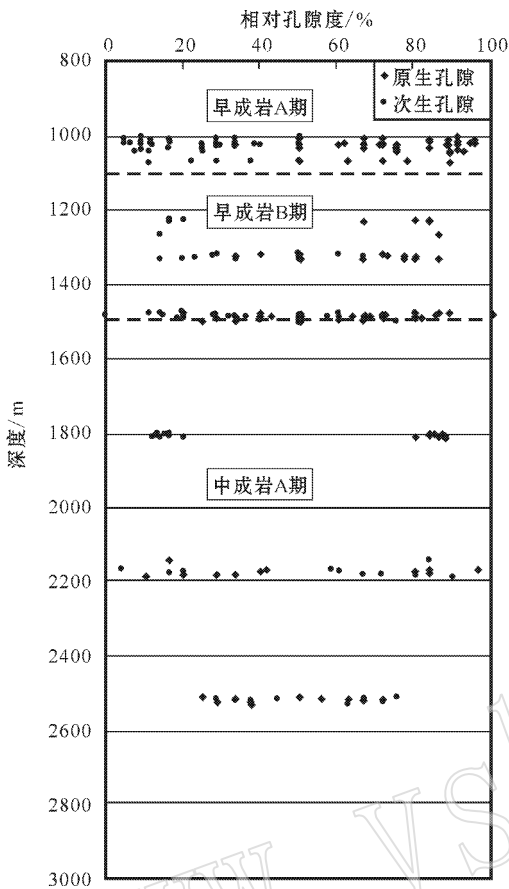


图 15 南图尔盖盆地储层孔隙度与深度关系图

Fig. 15 Porosity-depth relationship of reservoirs in South Turgai Basin

5 储层综合评价

砂岩储集层性能好坏主要包括 2 个方面：一方面是储集空间大小；另一方面是输导能力，即储集渗透性。储层储集性的优劣不是单一因素决定的，而是诸多因素综合作用的结果。一般情况下，具备下列条件的储层是有利储集层(唐海发等,2006;文华国等,2007)：①从孔隙度和渗透率上看，不但要求孔隙度发育，并且渗透性能还要好，才会成为主要的储集层；②从孔隙演化分类看，具有原生孔隙带、混合孔隙带及次生孔隙发育带的砂岩储层最好；③从成岩期看，最好是处于早成岩 B 期和中成岩 A 期，这时砂岩埋深不大，受成岩作用影响较弱，中成岩 A 期也是主要的油气生成期，生成的油气很容易进入储集层中，有利于油气的运移和聚集。

从储层的孔渗性、成岩期和主要孔隙类型总体评价来看，研究区的阿雷斯库姆组、阿克萨布拉克组和库姆科尔组可以作为优质储层，属于 I 类储层(表 1)，勘探潜力大，可作为今后油气勘探的主要目的层；多尚组比前几个层位要差一些，属于 II 类储层，具有一定的勘探潜力。

6 结论

(1)南图尔盖盆地储层成岩作用主要有机械压实和压溶作用、化学胶结作用、杂基充填作用、交代作用、溶蚀作用，前 4 个成岩作用为破坏性成岩作用，溶蚀作用为建设性成岩作用。

(2)成岩阶段可分为早成岩、中成岩和晚成岩 3 个阶段，细分为早成岩 A 期、B 期，中成岩 A 期、B 期和晚成岩 5 个时期。

(3)储层孔隙类型随着成岩阶段的变化而不同，

率高，长石岩屑的溶蚀、高岭石化、碳酸盐的溶解，出现了第 2 个次生孔隙带。该时期孔隙类型主要为原生、次生混合孔隙型，以粒间孔、溶孔为主。碎屑颗粒之间的接触关系由线接触逐渐过渡为凹凸接触。

晚成岩阶段，埋深超过 5 000 m 时，孔隙类型主要以次生型的溶孔为主，颗粒之间的接触关系由凹凸接触逐渐过渡为缝合接触。

表 1 南图尔盖盆地储层综合评价表

Table 1 Comprehensive reservoir evaluation of South Turgai Basin

层位	孔隙度/%		渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$		成岩期	主要孔隙类型	评价结果
	最大值	平均值	最大值	一般值			
阿雷斯库姆组	32.0	25.1	8 101.69	0.78~4 178	早成岩 B	原生孔	I 类
阿克萨布拉克组	35.7	23.0	7 876.86	0.05~3 939	早成岩 B 或中成岩 A	混合孔	I 类
库姆科尔组	29.5	22.0	13 841.18	0.01~5 384	早成岩 B 或中成岩 A	混合孔	I 类
多尚组	21.9	17.0	995.01	5.33~995	中成岩 A 或早成岩 B	混合孔	II 类

总体以原生粒间孔隙为主,次生的溶蚀孔为辅。

(4)阿雷斯库姆组、阿克苏布拉克组和库姆科尔组属于I类储层,可作为今后油气勘探的主要目的层,多尚组属于II类储层,具有一定的勘探潜力。

References

- Feng Zengzhao. 1993. Sediment Petrology(Volume one) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 37~139(in Chinese with English abstract).
- Jiang Shu, Cai Dongsheng, Zhu Xiaomin, *et al.* 2007. Mechanism of the pore evolution in Liaodong Bay area [J]. Earth Science, 33(3): 366~372(in Chinese with English abstract).
- Li Yang and Guo Changchun. 2007. The architecture and reservoir evaluation of underground lateral accretion bar: a case study on the Ng5²⁺³ sand-body in 7-th block west of the Gudong oil field [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 25(6): 942~948(in Chinese with English abstract).
- Liu Qiong, He Sheng, Chen Zhenlin, *et al.* 2007. Diagenesis and pore evolution of the cretaceous sandstone in the southwest Jiangnan Basin [J]. Mineral Petrol., 27(2): 78~85(in Chinese with English abstract).
- Lynch F E. 1996. Mineral/water interaction, fluid flow and sandstone diagenesis: evidence from the rocks [J]. AAPG Bulletin, 80(4): 486~504.
- Ning Ning, Chen Mengjin, Liu Rui, *et al.* 2007. Upper Palaeozoic quartz-sandstone reservoir diagenesis and pore evolution eastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 18(3): 334~338(in Chinese with English abstract).
- Surdam R C, Crossley L J, Hagen E S, *et al.* 1989. Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 73(2): 1~23.
- Tang Haifa, Peng Shimi and Zhao Yanchao. 2006. Characteristics of pore structure and reservoir evaluation in H2+3 tight gas reservoir, Daniudi gas field [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 26(3): 107~113(in Chinese with English abstract).
- Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Chen Hongde, *et al.* 2007. Characteristics of Chang 6 sandstone reservoir in Baibao-Huachi region of Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 28(4): 46~51(in Chinese with English abstract).
- Xue Xinke, Huang Zhijiu, Li Zhenhua, *et al.* 2007. Diagenesis and porosity evolution of Jurassic reservoir in Wuxia area, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 28(4): 428~431(in Chinese with English abstract).
- Yang Renchao, Fan Aiping, Han Zuozhen, *et al.* 2007. Succession of diagenesis and pore in sandstone reservoirs in Jiuyan Oilfield [J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 37(4): 626~630(in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoping, Zou Caineng, Li Wei, *et al.* 2006. The characteristics and the evolution of the diagenetic porosity in the oil-gas reservoir of the Upper Triassic Xiangxi Formation in the Central Sichuan Basin [J]. Bulletin of Mineralogy-Petrology and Geochemistry, 25(1): 55~59(in Chinese with English abstract).
- You Guoqing, Pan Jiahua, Liu Shuqin, *et al.* 2006. Diagenesis and

pore evolution of Paleogene sandstone reservoir in Dongying depression [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(3): 237~242(in Chinese with English abstract).

- Zeng Deming, Wang Xingzhi and Wang Siyi. 2007. The meaning of corrosion in the reservoir evolution of Feixianguan Formation in northern Sichuan Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 29(1): 15~18(in Chinese with English abstract).
- Zheng Junmao and Pang Ming. 1989. Study on Clastic Diagenesis [M]. Wuhan: Publishing House of China University of Geosciences, 80~156(in Chinese with English abstract).
- Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhou Xinyuan, *et al.* 2004. Effect of structure on sandstone's porosity evolution: a case study from the Donghe sandstones in Central Tarim [J]. Chinese Journal of Geology, 39(2): 214~222(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 冯增昭. 1993. 沉积岩石学(上册) [M]. 北京:石油工业出版社, 37~139.
- 蒋恕,蔡东升,朱筱敏,等. 2007. 辽东湾地区孔隙演化的机理 [J]. 地球科学, 32(3): 366~372.
- 李阳,郭长春. 2007. 地下侧积砂坝建筑结构研究及储层评价——以孤东油田七区西 Ng5²⁺³砂体为例 [J]. 沉积学报, 25(6): 942~948.
- 刘琼,何生,陈振林,等. 2007. 江汉盆地西南缘白垩系渔洋组砂岩储集层成岩作用和孔隙演化 [J]. 矿物岩石, 27(2): 78~85.
- 宁宁,陈孟晋,刘锐娥,等. 2007. 鄂尔多斯盆地东部上古生界石英砂岩储集层成岩及孔隙演化 [J]. 天然气地球科学, 18(3): 334~338.
- 唐海发,彭仕宓,赵彦超. 2006. 大牛地气田盒2+3段致密砂岩储层微观孔隙结构特征及其分类评价 [J]. 矿物岩石, 26(3): 107~113.
- 文华国,郑荣才,陈洪德,等. 2007. 鄂尔多斯盆地白豹-华池地区长6砂岩储层特征 [J]. 石油学报, 28(4): 46~51.
- 薛新克,黄治超,李震华,等. 2007. 准噶尔盆地乌夏地区侏罗系储集层成岩作用与孔隙演化 [J]. 新疆石油地质, 28(4): 428~431.
- 杨仁超,樊爱萍,韩作振,等. 2007. 姬塬油田砂岩储层成岩作用与孔隙演化 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 37(4): 626~630.
- 杨晓萍,邹才能,李伟,等. 2006. 四川盆地中部三叠系香溪群储层特征及成岩孔隙演化 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 25(1): 55~59.
- 游国庆,潘家华,刘淑琴,等. 2006. 东营凹陷古近系砂岩成岩作用与孔隙演化 [J]. 岩石矿物学杂志, 25(3): 237~242.
- 曾德铭,王兴志,王思仪. 2007. 溶蚀在川东北飞仙关组储层演化中的意义 [J]. 西南石油大学学报, 29(1): 15~18.
- 郑浚茂,庞明. 1989. 碎屑储集层的成岩作用研究 [M]. 武汉:中国地质大学出版社, 82~156.
- 钟大康,朱筱敏,周新源,等. 2004. 构造对砂岩孔隙演化的控制——以塔里木中部地区东河砂岩为例 [J]. 地质科学, 39(2): 214~222.