

鄂尔多斯盆地姬塬地区长6段致密砂岩中黏土矿物对储层物性的影响

李 阳^{1,2}, 李树同¹, 牟炜卫^{1,2}, 闫灿灿^{1,2}

(1. 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:黏土矿物在鄂尔多斯盆地姬塬地区长6段各小层中均有分布,是该区致密砂岩储层中主要的填隙物,对储层物性有重要的影响。利用铸体薄片、压汞、扫描电镜(SEM)、X-射线衍射(XRD)等实验测试技术,分析储层岩石学特征认为,长6段是以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主的低孔低渗的致密储层,其平均孔隙度为7.78%~9.13%,平均渗透率为 $(0.20 \sim 0.34) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。重点分析黏土矿物与储层物性之间的关系认为,高岭石和绿泥石是长6储层中主要的黏土矿物,对储层物性的影响较为复杂。少量的高岭石和绿泥石往往预示着储层孔隙度较好,而过量的高岭石(绝对含量>7%)和绿泥石(绝对含量>10%)则会大大降低储层的孔隙度。通过计算,长6储层原始孔隙度为41.13%~42.04%,高岭石充填导致砂岩孔隙度降低4.52%~4.78%,其损失率为10.74%~11.38%;绿泥石对长6段砂岩孔隙度的影响仅次于高岭石,导致孔隙度降低4.12%~4.70%,其损失率为9.81%~11.18%。自生高岭石对砂岩渗透率有一定的建设性作用,而绿泥石则导致砂岩渗透率降低。长6储层中伊利石含量较高岭石和绿泥石含量低,但由于其主要以丝缕状呈搭桥式充填孔隙,导致孔隙度和渗透率均有所降低,其孔隙度降低1.33%~2.08%,损失率为3.17%~4.94%。因此,在姬塬地区长6段致密储层中,黏土矿物对孔隙度的影响程度为:高岭石>绿泥石>伊利石。

关键词:黏土矿物;致密砂岩;储层物性;孔隙度;渗透率;长6储层;姬塬地区

中图分类号:TE122.2

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2017)07-1043-11

引用格式:Li Yang, Li Shutong, Mou Weiwei, *et al.* Influences of clay minerals on physical properties of Chang 6 tight sandstone reservoir in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(7): 1043-1053. [李阳, 李树同, 牟炜卫, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长6段致密砂岩中黏土矿物对储层物性的影响[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(7): 1043-1053.]

0 引言

目前,全球非常规油、气资源量分别约为 $3\,297 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $343 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中致密油气资源丰富,约占非常规资源量的 $1/2^{[1-3]}$ 。我国致密油气主要分布在鄂尔多斯盆地和四川盆地两大主力勘探区^[4],其中鄂尔多斯盆地姬塬油田三叠系延长组致密砂岩储

层具有亿吨级的原油储量,是长庆油田的主要产油气区^[5,6]。然而,低孔低渗特性一直制约着致密油气高效勘探开发,也是油田自然产能较低的重要原因^[7-11]。近年来,对致密储层形成机理的研究主要集中在沉积作用和成岩作用两大方面。沉积作用控制着储层的规模、决定着储层的岩石特征,因此影响着原生孔隙的发育,并对成岩作用产生一定的影

收稿日期:2017-04-25;修回日期:2017-06-16.

基金项目:中国科学院兰州油气资源研究中心“十三五”创新基金(编号:135CCJJ20160510);中国科学院创新促进会会员人才计划项目(编号:Y410ST1LST)联合资助.

作者简介:李阳(1991-),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事油气储层地质学研究.E-mail:1354015695@qq.com.

通信作者:李树同(1979-),男,甘肃会宁人,副研究员,博士,主要从事沉积学及油气地质学研究.E-mail:lishutong1979@163.com.

响^[12-17]。成岩作用则直接影响储层孔隙的后生变化,随埋深的增加,成岩条件(温度、压力、酸碱度、溶解度等)随之改变,导致成岩特征在空间上具有明显的差异性,从而影响储层孔隙的演化^[18,19]。压实作用、胶结作用、溶蚀作用及黏土矿物充填作用对储层物性都有重要影响,压实作用对储层损害是不可逆的^[20];不同世代的胶结作用对储层破坏程度也会不同^[21];溶蚀作用一般有利于改善储层物性;而黏土矿物与储层物性的关系较为复杂。以微孔—纳米孔为主的致密储层受黏土矿物的影响较大,主要体现在以下 2 个方面:一是黏土矿物易充填于原生粒间孔、溶蚀孔等孔隙空间中,导致孔隙和喉道半径缩小而形成微孔—纳米孔。如丝缕状、片状自生伊利石易将孔隙分割成无数微孔,使得孔喉变得迂回,降低储层物性^[22,23];以分散质点充填于孔隙中的高岭石和绿泥石也会使砂岩粒间孔隙被分割成许多微细孔隙,造成孔隙度降低等^[22]。二是黏土矿物为纳米—微米级颗粒的聚集体,属于超分子体系^[24],由于其粒度较细、具有间层结构,使自身发育有大量的晶间微孔和层间微缝,导致储层中形成大量的纳米—微米孔^[25,26]。如蒙脱石主要发育层内纳米级连通孔隙,高岭石发育有 20~100nm 的粒间孔以及小于 10nm 的层间缝隙,绿泥石层间发育有约 20nm 的狭缝状孔隙,伊利石则主要发育 0.5~4μm 的微孔隙^[27,28]。因此,不同黏土矿物类型、产状和含量对储层物性的影响不同,同种黏土矿物在不同成岩环境下对储层优劣的影响也有所不同^[22]。

近些年来,前人对姬塬地区长 6 段致密砂岩储层的形成机理做了大量的研究工作表明,压实作用、压溶作用、碳酸盐胶结作用以及黏土矿物胶结充填作用等使得储层物性变差,其中压实作用造成孔隙度的损失一般为 10%~32%,胶结作用造成孔隙度的损失一般为 2%~33%,而绿泥石膜胶结作用、溶蚀作用以及破裂作用对储层物性有利^[29-32];具体对姬塬地区长 6 段油层组中黏土矿物分布规律与储层物性的关系进行研究表明,以高岭石、绿泥石和伊利石等为主的自生黏土矿物含量较自生碳酸盐矿物含量高,在一定的区域范围内,黏土矿物的大量出现是引起储层低渗透的重要因素之一^[33]。但目前针对姬塬地区长 6 段致密砂岩中某种单一自生黏土矿物含量与储层物性关系的精细分析少见,且各类黏土矿物对储层物性的具体影响程度如何少见定量研究,以上相关方面的研究相对薄弱,可能是导致该油层组可采储量尚不足探明储量 1/3 的重要原因之

一^[29]。鉴于此,本文通过薄片分析、压汞、扫描电镜(SEM)、X-射线衍射(XRD)等实验,弄清该地区长 6 储层砂岩的基本岩石学特征、物性特征及黏土矿物特征,重点分析黏土矿物对储层物性的影响,揭示两者之间的相关关系,可为后期致密油气藏的勘探开发提供可靠的地质依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是我国东部中、新生代稳定沉降、拗陷迁移的多旋回克拉通边缘盆地,面积约为 25×10⁴ km²^[17,19,34]。盆地内部主要划分为伊盟隆起、渭北隆起,以及西缘逆冲带、天环拗陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带等共 6 个一级构造单元,姬塬地区为本文研究区,位于盆地中西部,横跨伊陕斜坡和天环拗陷两大构造单元(图 1)^[17,18,30,35-37],其范围北至马家滩,南到麻黄山,西至惠安堡,东到盐池。三叠系延长组长 6 储层为本文具体研究层位,其自下而上分为长 6₃、长 6₂和长 6₁共 3 个油层组,长 6₃—长 6₁期为湖退过程,湖平面下降,湖盆逐渐萎缩,形成一套水退型三角洲沉积,主要发育三角洲前缘亚相,沉积微相主要有水下分流河道、河口坝和分流间湾等,局部发

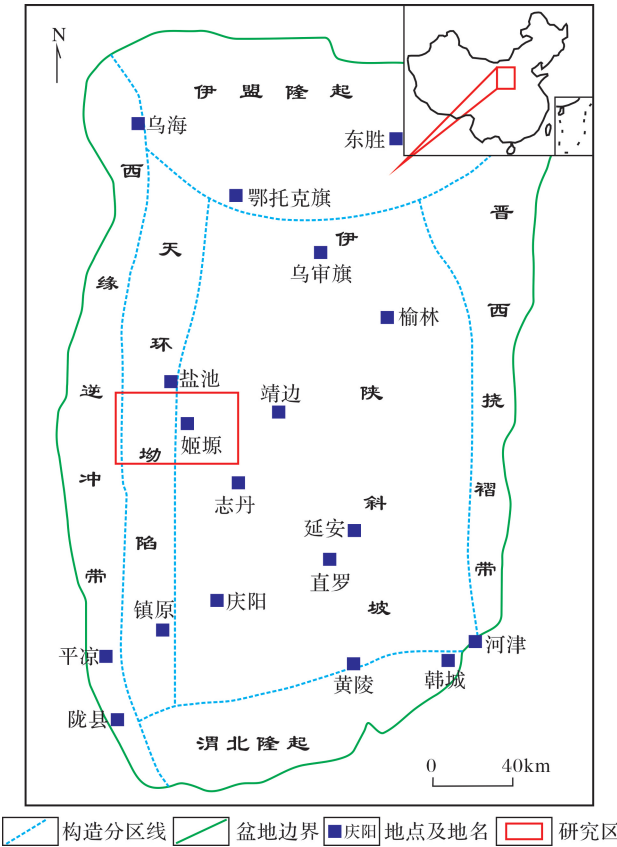


图 1 鄂尔多斯盆地构造分区及研究区位置
Fig.1 Tectonic division and study location of Ordos Basin

育水下决口扇和水下天然堤^[29,35]。其中长6₁层段主要发育水下分流河道微相,在其砂体中部和边部分别分布有绿泥石环边和高岭石黏土矿物;长6₂层段与长6₁层段沉积微相分布相似,高岭石和绿泥石黏土矿物主要分布在水下分流河道微相沉积砂体中;而长6₃层段则发育有三角洲前缘水下分流河道、河口坝和分流间湾微相,在局部水下分流河道中部和河口坝砂体中可见绿泥石环边发育,高岭石主要出现在分流间湾薄层砂体中^[30]。由于研究区地势相对较为平缓,河流输入作用较强,受东北和西北两大物源供给区的影响^[32,37,38],在三角洲不断向湖盆中心推进的过程中,盆地边缘的碎屑物质被携带到沉积区沉淀下来,有利于优质储层的形成、有机质的保存和烃源岩的发育^[33],具备优越的岩性油气藏形成条件^[37],是该地区的主力产油层位之一。

2 储层岩石学特征

根据长6储层大量的岩心观察和岩石薄片显微镜下鉴定,经统计分析认为研究区岩石类型以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主,偶见长石砂岩(图2)。碎屑组分的平均体积百分含量为82.6%~83.8%,其中以石英和长石占主要成分的平均体积百分含量分别为29.3%~30.4%、33.9%~36.2%,而岩屑和云母的平均体积百分含量分别为9.8%~12.1%、6.7%~8.1%(表1),总体含量表现为长石>石英>岩屑>云母。岩屑成分以变质岩岩屑为主(包括千枚岩、石英岩、片岩、变质砂岩和高变岩),

含量为5.4%~6.7%,火成岩岩屑(包括喷发岩、隐晶岩及少量花岗岩)和沉积岩岩屑(包括板岩、粉砂岩、泥岩、灰岩及白云岩)含量相差不大,分别为2.1%~2.6%、2.3%~2.8%(表1)。储层砂岩整体以细砂、极细砂为主,含部分粉砂;分选以中等为主,整体上表现为中等—好;成分成熟度较低,结构成熟度中等;颗粒以点—线接触为主,局部呈凹凸接触,磨圆度以次棱角状为主,反映沉积物源较近,且沉积颗粒可能经过较强的压实作用和胶结作用。

长6储层主要孔隙类型为压实残留粒间孔和胶结物粒间溶蚀孔(以长石溶孔为主,少见岩屑溶孔)(图3),其中粒间孔占岩石总孔隙的60%左右,长石

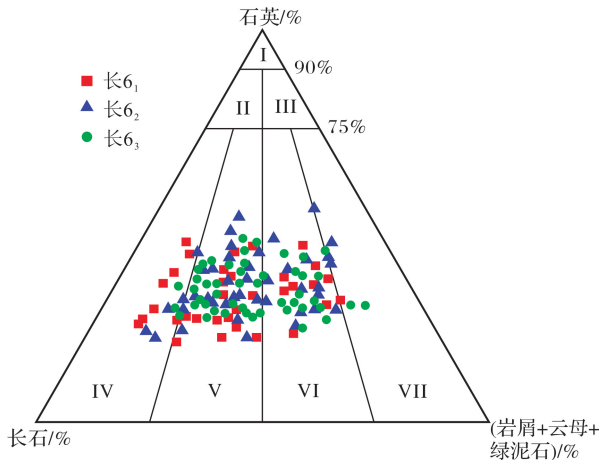


图2 姬塬地区长6储层岩石类型

Fig.2 Classification of sandstone of Chang 6 reservoir in Jiayuan area

I 为石英砂岩;II 为长石石英砂岩;III 为岩屑石英砂岩;
IV 为长石砂岩;V 为岩屑长石砂岩;VI 为长石岩屑砂岩;VII 岩屑砂岩

表1 姬塬地区长6储层岩石成分含量统计

Table 1 Rock component content of Chang 6 reservoir in Jiayuan area

层位	石英/%	长石/%	岩屑			云母/%
			火成岩/%	变质岩/%	沉积岩/%	
长6	29.8 0~48.5	33.9 0~57.5	2.6 0~11.2	6.7 0~18.2	2.8 0~11.1	7.3 0~30
	30.4 15.16~46	36.2 0~54	2.4 0.5~10.9	5.8 2~16.6	2.3 0~8	6.7 0~14.8
	29.3 18.7~45.5	35.4 21.5~54	2.1 0~5	5.4 1.4~12.3	2.3 0~9.3	8.1 1~18

注: $\frac{29.8}{0\sim48.5}=\frac{\text{平均值}}{\text{最小值}\sim\text{最大值}}$

溶孔和岩屑溶孔分别占总孔隙的34%和2%;而微裂缝和自生矿物中的晶间孔等少见,分别占总孔隙的1%、3%(图4)。对研究区519块岩石样品进行显微薄片分析可知,长6储层填隙物主要由黏土矿物(高岭石、绿泥石和伊利石)、碳酸盐(铁方解石为

主,含少量铁白云石和方解石)和硅质组成。对部分岩石样品进行X-射线衍射(XRD)测试统计分析表明(图5,表2),填隙物含量相对较高,为12.96%~15.95%。其中黏土矿物含量最高,为8.41%~9.62%(高岭石为3.76%~3.98%,绿泥石为3.40%~

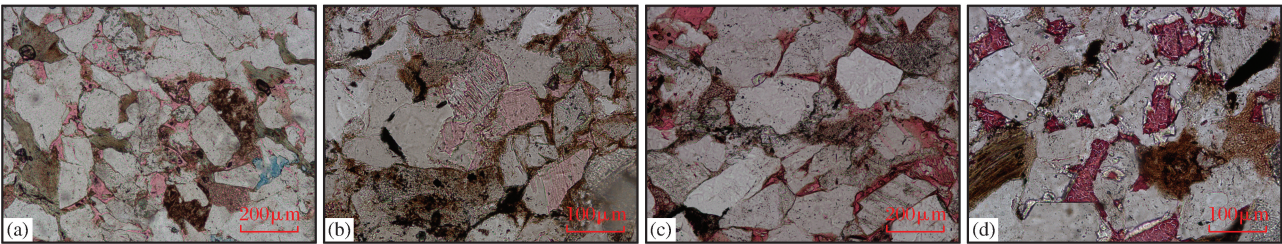


图3 姬塬地区长6储层岩石孔隙类型及特征

Fig.3 Pore type and characteristics of Chang 6 reservoir rocks in Jiyuan area

(a)黄8井,2 308.1m,长_{6₂},×100 原生粒间孔;(b)盐76井,2 338.63m,长_{6₂},×200 长石溶蚀孔;
(c)池335井,2 303.36m,长_{6₁},×100 原生残留粒间孔;(d)黄315井,2 580.75m,长_{6₃},×200 粒间孔及长石溶孔

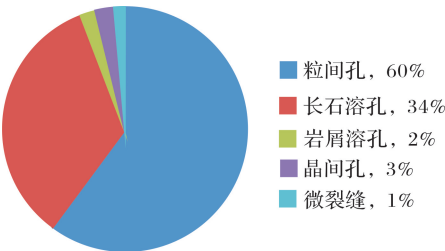
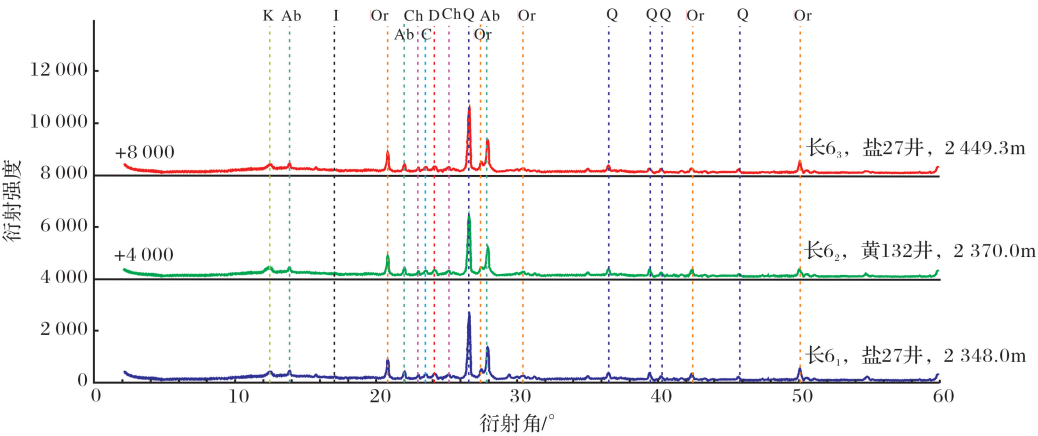


图4 姬塬地区长6储层各类孔隙所占比例
Fig.4 Proportion of pore types of Chang 6 reservoir in Jiyuan area

3.91%,伊利石为1.10%~1.73%);碳酸盐含量次之,为3.30%~5.29%(其中以铁方解石含量最高,为2.75%~4.60%;铁白云石和方解石含量次之,分别为0.22%~0.67%、0~0.26%;几乎不含白云石,其含量在0.02%左右);硅质含量最低,为1.02%~1.05%(表2)。填隙物含量总体表现为:黏土矿物>碳酸盐>硅质,高含量的黏土矿物对储层物性具有较大的影响,在长6砂岩储层中除压实作用外,自生黏土矿物的充填作用对储层的破坏性最大,对储层



Q为石英;C为方解石;D为白云石;Or为钾长石;Ab为钠长石;K为高岭石;I为伊利石;Ch为绿泥石

图5 姬塬地区长6储层岩石XRD谱图

Fig.5 XRD spectrum of Chang 6 reservoir rocks in Jiyuan area

物性的演化起到一定的控制作用。

3 储层物性特征

统计研究区毛细管压汞曲线孔渗测试数据分析结果(表3),长_{6₁}、长_{6₂}和长_{6₃}各小层的平均孔隙度分别为9.13%、8.86%和7.78%;其渗透率分别为 $0.34\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、 $0.30\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 和 $0.20\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,具有典型致密储层的物性特征。由于成岩环境的不同,导致长6各小层孔隙度和渗透率呈现长_{6₁}>长_{6₂}>长_{6₃}的差异性。同时,压汞测试分析也定量地

反映了储层孔喉的微观结构特征。对部分压汞曲线分析发现(表3,图6),长6砂岩储层中3个小层的排驱压力大小为:长_{6₃}>长_{6₂}>长_{6₁},平均喉道半径大小为:长_{6₁}>长_{6₂}>长_{6₃}。其中长_{6₁}小层排驱压力为1.00MPa,平均喉道半径为0.36μm;长_{6₂}小层排驱压力为1.04MPa,平均喉道半径为0.26μm;长_{6₃}小层排驱压力为1.85MPa,平均喉道半径为0.14μm,其储层孔喉结构特征与物性特征规律基本保持一致。

综上分析,研究区长6砂岩储层整体表现为

表 2 姬塬地区长6储层填隙物成分含量

Table 2 Content of interstitial minerals in Chang 6 reservoir of Jiuyan area

层位	绿泥石/%				高岭石 /%	伊利石 /%	碳酸盐/%					硅质/%	样品数
	绿泥石 总量	绿泥石 填隙物	绿泥 石膜	绿泥石 膜比例			碳酸盐 总量	铁方 解石	铁白 云石	方解石	白云石		
长6 ₁	3.40	3.25	0.15	4.40	3.91	1.10	3.30	2.75	0.22	0.33	0	1.25	231
长6 ₂	3.70	3.56	0.14	3.80	3.76	1.45	3.72	3.17	0.28	0.26	0.02	1.02	180
长6 ₃	3.91	3.81	0.10	2.60	3.98	1.73	5.29	4.60	0.67	0.00	0.02	1.04	108

表 3 研究区长6各小层储层物性参数及孔喉特征统计

Table 3 The physical parameters and pore throat characteristics of each layer in Chang 6 reservoir

层位	平均喉道 半径/μm	排驱压力 /MPa	平均孔隙 度/%	平均渗透率 /(×10 ⁻³ μm ²)	样品数
长6 ₁	0.36	1.00	9.13	0.34	15
长6 ₂	0.26	1.04	8.86	0.30	12
长6 ₃	0.14	1.85	7.78	0.20	12

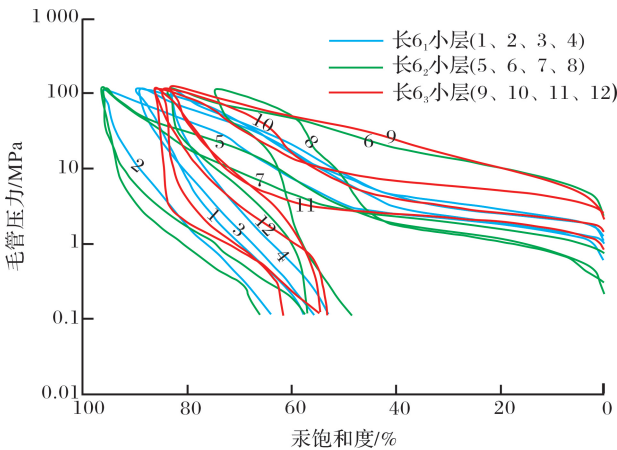


图 6 研究区长6储层典型毛细管压力曲线

Fig.6 Typical capillary pressure curves of Chang 6 reservoir in study area

1套低孔低渗的致密储层,且储层的非均质性较强,以中孔、中细孔喉为主。

4 主要黏土矿物特征

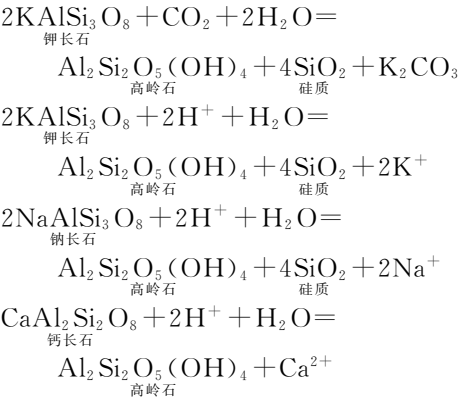
黏土矿物颗粒微小、比表面积大,具有吸附性、膨胀性和非渗透性等特征,是致密储层中重要的填隙物^[33]。其含量、赋存状态以及形成机理等是研究黏土矿物的重要内容,也是分析其与储层物性关系的基础。XRD分析测试表明(图5),长6储层中黏土矿物较发育,主要为高岭石、绿泥石和伊利石。镜下薄片和SEM观察发现(图7),高岭石主要以书页状呈分散质点式充填于孔隙中;自生绿泥石主要以填隙物的形式存在,但绿泥石膜不发育;伊利石则主

要以丝缕状呈搭桥式存在于原生孔隙中。

4.1 高岭石赋存状态及其成因

高岭石是姬塬地区长6储层中最主要的黏土矿物,其绝对平均含量为3.88%,占黏土矿物总量的41.26%,主要以孔隙或喉道填隙物的方式充填压实残余原生粒间孔隙和长石溶蚀粒内孔隙[图7(a),图7(b)]。单个自生高岭石晶体一般呈假六方片状,其晶体集合体通常呈书页状、蠕虫状或手风琴状等。本文研究区常见书页状高岭石集合体以分散质点的形式充填于砂岩粒间孔隙[图7(a)],少数自生高岭石晶体出现卷曲丝缕化的现象[图7(e)],说明可能存在自生高岭石的伊利石化。

研究区以自生高岭石为主,陆源碎屑高岭石少见。自生高岭石一般形成于酸性富Al³⁺环境,常与石英次生加大和长石溶蚀现象相伴生,说明高岭石的形成与长石的溶蚀有关,其成因机理可用如下化学方程式表示:



陆相自生高岭石中的Al³⁺主要来源于长石和含长石的火山岩屑,而H⁺主要来源于长7烃源岩中有机质热演化产生的CO₂溶于水形成的碳酸以及有机质脱羧作用形成的有机酸。有机质大量产生CO₂的温度范围大约在100℃以后^[39],而有机质脱羧作用产生大量有机酸主要在液态烃形成前夕。因此,该地区高岭石可能主要形成于早成岩晚期一晚成岩早期。

4.2 绿泥石赋存状态及其成因

以往研究表明,延长组砂岩中绿泥石主要以孔隙

衬里形式产出,且常作为建设性成岩作用而倍受关注^[33]。但本文研究发现,长6储层中绿泥石膜并不发育[图7(c),图7(d)],其绝对平均含量 $<0.2\%$,不足绿泥石总量的5%(表2),且绿泥石膜厚度 $<8\mu\text{m}$ 。绿泥石则主要以填隙物的形式赋存于孔隙中[图7(c)],其绝对平均含量为3.54%,占黏土矿物总量的37.76%,占绿泥石总量的95%以上,是长6储层中含量仅次于高岭石的另一种重要的黏土矿物。

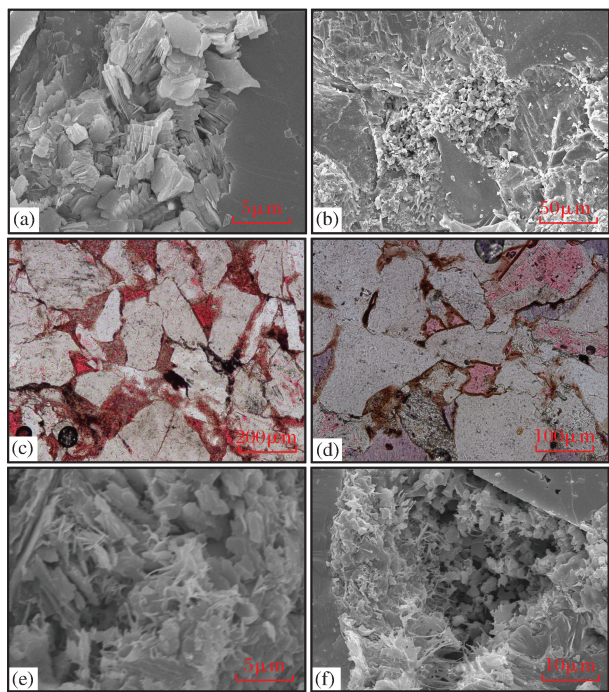


图7 长6储层黏土矿物充填作用特征

Fig.7 Characteristics of clay mineral filling in Chang 6 reservoir

(a)峰10井,2 216.9m,长 6_1 , $\times 4\ 500$,原生粒间孔隙充填书页状自生高岭石;(b)盐28井,2 448.23m,长 6_3 , $\times 450$,长石溶蚀作用形成的高岭石充填溶蚀孔隙;(c)峰11井,2 369.17m,长 6_1 , $\times 100$,颗粒表面薄层绿泥石膜及粒间绿泥石;(d)黄8井,2 286.35m,长 6_1 , $\times 200$,颗粒表面薄层绿泥石膜;(e)盐76井,2 339.7m,长 6_2 , $\times 3\ 700$,自生高岭石的伊利石化;(f)盐76井,2 385.8m,长 6_3 , $\times 2\ 300$,原生粒间孔隙丝缕状自生伊利石

绿泥石常形成于富 Fe^{2+} 或 Mg^{2+} 的碱性环境中,其 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 可能主要来源于储层中火山岩屑的蚀变或云母的水解。在不同的成岩演化阶段,因孔隙流体性质和砂岩结构的不同,导致绿泥石的空间赋存状态也有所不同。在早成岩A期,由于地层温度较低,自生绿泥石易直接从富 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 的碱性流体中沉淀,形成厚度较小的颗粒薄膜绿泥石;在早成岩B期—中成岩B期,地温较高, Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 常来源于基性—超基性岩的火山岩屑、黑云母或火山灰,形成厚度相对较大的孔隙衬里绿泥石;在晚成岩期,温度高,来源于泥岩的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 物质减少,

因此形成绿泥石的速度缓慢,以孔隙充填绿泥石为主,同时也发育少量孔隙衬里绿泥石。

根据以上分析,现今长6储层中少量的非常薄的绿泥石膜可能是成岩早期孔隙流体直接吸附颗粒表面所形成;而孔隙中以填隙物形式存在的绿泥石可能形成于晚成岩期,由于研究区砂体较薄,泥砂比高,导致渗滤性较差,绿泥石晶体无法沿颗粒表面生长,而直接沉淀于岩石孔隙中。

4.3 伊利石赋存状态及其成因

研究区长6储层中伊利石含量相较于高岭石和绿泥石的含量低,其绝对平均含量为1.43%左右,多以丝缕状呈搭桥式赋存于粒间孔隙中[图7(e),图7(f)],集中分布时易形成网状格架,从而减小储层孔喉半径,降低储层渗透率。

储层中,自生伊利石仅在大量富含 K^+ 的碱性环境中形成^[40],其 K^+ 主要来源于孔隙流体中的 K^+ 或长石溶蚀过程中释放的 K^+ 。当介质流体迁移速度较小,不能及时带走全部的 K^+ 时,碱性含 K^+ 离子会在砂岩孔隙中逐渐积累,从而改变孔隙中介质流体的性质和特征,形成富 K^+ 的碱性环境,进而有利于自生伊利石的形成。

5 黏土矿物与储层物性的关系

砂岩储层中黏土矿物的组成、含量、赋存状态等都会对储层物性起到一定的控制作用,也会影响油气田的开发。一般情况下,黏土矿物的绝对含量越高,其储层的孔隙度和渗透率越低。但在具体的研究区域,黏土矿物与储层物性的关系还会受到环境、黏土矿物赋存状态及其水敏性、速敏性和酸敏性等多重因素的影响。

5.1 高岭石与储层物性的关系

姬堰地区长6各小层中高岭石含量相近,由于该区成岩体系整体相对封闭,长石溶蚀形成的高岭石因无法及时搬运而在原地堆积充填孔隙,造成孔隙度降低。各小层自生高岭石含量与孔隙度的关系相对较为复杂,但最终都表现为随高岭石含量的增加,砂岩孔隙度逐渐降低;而与渗透率则表现为相对简单的线性关系(图8)。

从图8(a)可以看出,当自生高岭石的绝对含量 $<2\%$ 时,随砂岩储层中高岭石含量的增加,孔隙度呈微弱的增大趋势,说明刚开始长石的溶蚀作用强烈,且高岭石不足以原地结晶而被介质流体带走,导致孔隙度稍有增加;而高岭石绝对含量在 $2\% \sim 6\%$ 时,砂岩孔隙度变化却不大,此时可能由于长石

的溶蚀速率逐渐降低,而高岭石的结晶速率相对增高,导致沉淀于孔隙中的高岭石抵消了长石溶蚀所产生的次生孔隙;当高岭石的绝对含量超过7%以后,其孔隙度随高岭石含量的增加呈明显的下降趋势,此时长石的溶蚀速率因酸性物质的消耗而大大降低,高岭石的形成速率则相对增加,长石溶蚀产生的次生孔隙不足以抵消高岭石充填损失的孔隙而导致储层孔隙度降低。通过高岭石含量与储层孔隙度的相关关系分析可知,少量的高岭石反映了孔隙度较好的储层,而过量的高岭石会因充填孔隙导致储层孔隙度急剧降低。

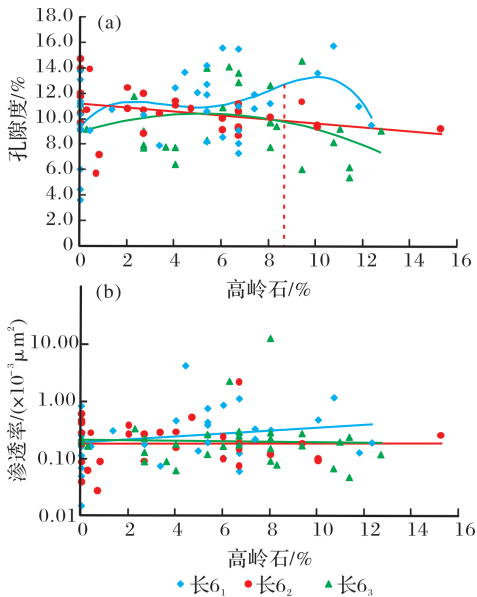


图8 长6储层高岭石含量与储层物性关系
Fig.8 Relationships of porosity and permeability with kaolinite in Chang 6 reservoir

随高岭石含量的增加,储层渗透率具有不明显的增大趋势[图8(b)],这可能与自生高岭石在孔隙空间的充填状态有关,同时也进一步说明该地区以自生高岭石为主,因为陆源碎屑高岭石与储层渗透率往往具有较强的负相关性^[23]。在长6储层中,自生高岭石主要以分散质点的形式充填于砂岩粒间孔隙,对砂岩孔喉半径的影响极小,因此对砂岩渗透率无明显的影响。虽然其正相关性并不十分明显,但总体而言,对储层渗透率还是有一定的积极意义。

通过未固结砂岩原始孔隙度 Φ_0 与 Trask 分选系数 S_o 之间的相关经验公式^[41,42]: $\Phi_0 = 20.91 + 22.90/S_o$ (其中 $S_o = (P_{25}/P_{75})^{1/2}$, P_{25} 、 P_{75} 分别表示粒度累计曲线上体积分数为25%和75%处对应的颗粒直径),计算姬塬地区长6砂岩储层分选系数 S_o 。值为1.08~1.13,则原始孔隙度 Φ_0 。值为

41.13%~42.04%。

当砂岩储层经历压实作用后,其剩余粒间孔隙度 Φ_1 可用如下公式计算^[43], $\Phi_1 = V_c + (\varphi_{lp} + \varphi_{dp}) \times \Phi_m / \varphi_{Tp}$ (其中 V_c 为胶结充填物百分含量; Φ_m 为样品实测孔隙度; φ_{lp} 为残余粒间孔面孔率; φ_{dp} 为溶蚀孔面孔率; φ_{Tp} 为总面孔率)。研究区长6储层中胶结充填物百分含量 V_c 值一般为12.96%~15.95%,压汞分析实测孔隙度 Φ_m 值为7.78%~9.13%,薄片观察分析 φ_{lp} 值为1.23%~2.43%, φ_{dp} 值为1.05%~1.18%, φ_{Tp} 值为2.54%~3.90%,计算可得压实后剩余粒间孔隙度 Φ_1 值为21.41%~22.93%。

砂岩经压实作用、充填作用和胶结作用之后,剩余孔隙度 Φ_2 为粒间孔隙所占据的部分孔隙,即 $\Phi_2 = \Phi_m \times \varphi_{lp} / \varphi_{Tp}$ 。经计算得 Φ_2 值为3.77%~5.69%,则充填胶结作用导致储层孔隙度损失 $\Delta\Phi$ ($\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$)值为15.72%~19.17%,其孔隙度损失率 R_Φ ($R_\Phi = \Delta\Phi / \Phi_0$)值为37.40%~45.59%。

储层中主要的胶结物和充填物包括碳酸盐胶结、硅质胶结,以及高岭石、绿泥石和伊利石充填。经计算,高岭石造成储层孔隙度的损失 $\Delta\Phi_k$ ($\Delta\Phi_k = \Delta\Phi \times \delta_k$,其中 δ_k 为高岭石占胶结物和充填物总量的比例因子)值为4.52%~4.78%,其损失率 $R_{\Phi k}$ ($R_{\Phi k} = \Delta\Phi_k / \Phi_0$)值为10.74%~11.38%。

5.2 绿泥石与储层物性的关系

长6储层中绿泥石主要以填隙物的形式赋存于孔隙中,而绿泥石膜不发育,使储层孔隙和喉道易被绿泥石充填堵塞,导致储层物性降低。各小层中绿泥石的含量变化相近,且对孔隙度的影响都有相同的变化趋势,对渗透率则主要具有负面影响(图9)。

由图9(a)可以看出,各小层中绿泥石含量与孔隙度表现为较复杂的非线性关系,但变化趋势相似。当绿泥石绝对含量小于4%~5%时,由于形成的绿泥石膜较薄(甚至此时可能还未开始形成绿泥石膜),不足以阻止石英和长石的再生长,也无法抑制压实作用,导致孔隙度随绿泥石含量的增加而减小;但绿泥石含量在5%~10%之间时,砂岩孔隙度却随绿泥石含量的增加而增加,可能是由于绿泥石增加的过程中伴随有部分绿泥石膜的形成,对长石、石英的再生长,以及压实作用产生一定的抑制;绿泥石含量达10%左右时,砂岩孔隙度达到最大值为12%~14%;当绿泥石绝对含量超过10%时,砂岩孔隙度又有减小的趋势,反映过量的绿泥石会使储层孔隙度降低,不利于有利储层的形成。

长6各小层中绿泥石含量与渗透率的关系不尽

相同,具体表现为长₆₁、长₆₂小层中绿泥石含量与渗透率表现为负相关,而长₆₃小层中绿泥石含量与渗透率表现为微弱的正相关[图9(b)],这可能与长₆₃更靠近长7烃源岩有关。绿泥石是一种酸敏性较强的黏土矿物,其晶体结构中的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 及 Mg^{2+} 会在酸性物质下溶出,当介质流体流速较低时,随着环境pH的下降会产生 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体,其粒度一般比储层孔喉半径大,易堵塞孔喉,导致渗透率降低^[22,44]。因长₆₃小层更靠近长7烃源岩层,环境pH值降低缓慢且流体运移速率相对较快,绿泥石在酸性条件下溶蚀形成的部分 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体还未沉淀已被流体带走,而长₆₁、长₆₂距烃源岩较远,所受介质流体流速的影响较小,因此导致长₆₃与长₆₁、长₆₂小层中绿泥石含量与渗透率关系有不同的变化趋势。但整体而言,绿泥石含量的增加对长6储层的渗透率有一定的负面影响。

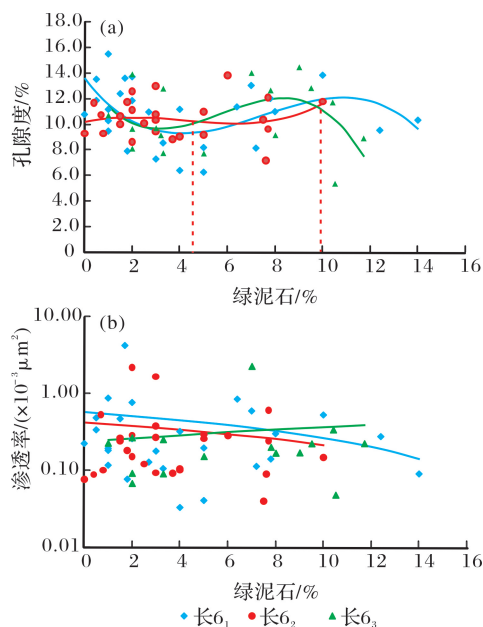


图9 长6储层绿泥石含量与储层物性关系

Fig.9 Relationships of porosity and permeability with chlorite in Chang 6 reservoir

经计算,长6砂岩储层中绿泥石对孔隙度的影响仅次于高岭石,造成储层孔隙度的损失 $\Delta\Phi_c$ ($\Delta\Phi_c = \Delta\Phi \times \delta_c$,其中 δ_c 为绿泥石占胶结物和充填物总量的比例因子)值为4.12%~4.70%,其损失率 R_{Φ_c} ($R_{\Phi_c} = \Delta\Phi_c / \Phi_o$)值为9.81%~11.18%。

5.3 伊利石与储层物性的关系

长6储层中伊利石含量较绿泥石和高岭石含量低,主要以纤维状呈搭桥式充填孔隙中,对储层物性的影响也没有高岭石和绿泥石强。从图10可以看出,伊利石的存在无论是对砂岩孔隙度还是渗透率

都有不利的影响。

随伊利石含量的增加,长6砂岩储层孔隙度有逐渐减小的趋势[图10(a)],说明伊利石的存在对孔隙度有一定的负面影响。伊利石含量与渗透率也呈负相关关系[图10(b)],可能主要与储层中伊利石的赋存状态和产状有关。长6储层中自生伊利石主要以纤维状、丝缕状呈搭桥式产于粒间孔隙中,易将原始粒间孔隙分割成无数微小的孔隙,使得储层孔隙半径减小、喉道变得迂回弯曲,从而降低了储层的渗透性。

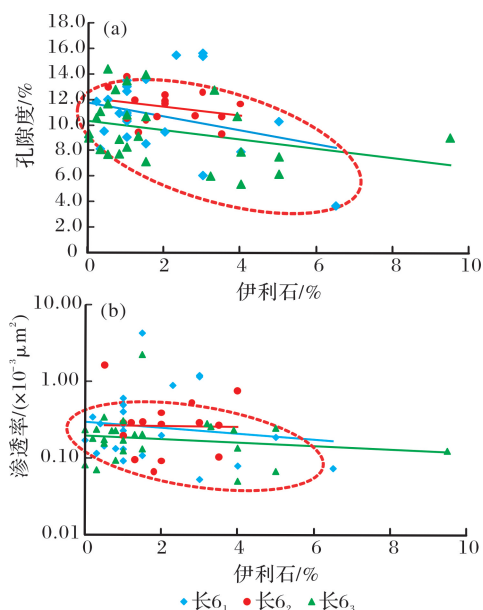


图10 长6储层伊利石含量与储层物性关系

Fig.10 Relationships of porosity and permeability with illite in Chang 6 reservoir

经计算可知,长6储层中伊利石对孔隙度的损害远远不及高岭石和绿泥石,其造成储层孔隙度的损失 $\Delta\Phi_i$ ($\Delta\Phi_i = \Delta\Phi \times \delta_i$,其中 δ_i 为伊利石占胶结物和充填物总量的比例因子)值为1.33%~2.08%,孔隙度损失率 R_{Φ_i} ($R_{\Phi_i} = \Delta\Phi_i / \Phi_o$)值为3.17%~4.94%。

6 结论

(1)鄂尔多斯盆地姬塬地区长6储层岩性主要为长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩,发育原生粒间孔隙和长石溶蚀孔隙为主,成分成熟度低,结构成熟度中等,为一套低孔低渗到特低孔特低渗的致密储层,其平均孔隙度为7.78%~9.13%,平均渗透率为 $(0.20 \sim 0.34) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

(2)长6储层中高岭石主要以书页状呈分散质点式充填于砂岩粒间孔隙中。砂岩中少量的高岭石往往暗示着储层具有较好的孔隙度,而过量的高岭

石(绝对含量 $>7\%$)因充填孔喉导致孔隙度急剧降低。通过相关公式计算表明,长6储层中高岭石充填作用导致孔隙度降低 $4.52\%\sim 4.78\%$,其损失率为 $10.74\%\sim 11.38\%$;但自生高岭石却对长6储层的渗透率具有一定的建设性作用。

(3)长6储层中绿泥石膜不发育(绝对含量 $<0.2\%$),不足以抑制长石和石英的次生加大。自生绿泥石主要以孔隙填隙物的形式存在,当绿泥石绝对含量在 $5\%\sim 10\%$ 之间时,砂岩孔隙度随绿泥石含量的增加而增加;当绿泥石绝对含量超过 10% 时,孔隙度随绿泥石含量的增加而逐渐降低。绿泥石对长6储层孔隙度的影响仅次于高岭石,导致孔隙度降低 $4.12\%\sim 4.70\%$,其损失率为 $9.81\%\sim 11.18\%$;且绿泥石含量的增加对渗透率也有一定的负面影响。

(4)伊利石在长6储层中主要以丝缕状呈搭桥式充填孔隙,将砂岩储层的原生粒间孔隙和次生溶蚀孔隙分割成无数微小的细孔隙,缩小孔隙半径,增加了喉道迂回度,从而导致储层孔隙度和渗透率都随伊利石含量的增加而降低,但对储层孔隙度的损害远远不及高岭石和绿泥石,其造成储层孔隙度损失 $1.33\%\sim 2.08\%$,损失率为 $3.17\%\sim 4.94\%$ 。

参考文献(References)

- [1] Rogner H. An assessment of world hydrocarbon resources[J]. Annual Review of Energy & the Environment, 1997, 22(1): 369-382.
- [2] Mccracken M, Fitz D E, Ryan T C. Tight Gas Surveillance and Characterization; Impact of Production Logging[C]. Keystone Colorado: SPE Unconventional Reservoirs Conference, 2008: 1-7.
- [3] Zhang Daquan, Zhang Jiaqiang, Wang Yufang, *et al.* China's unconventional oil and gas exploration and development: Progress and prospects[J]. Resources Science, 2015, 37(5): 1068-1075. [张大权, 张家强, 王玉芳, 等. 中国非常规油气勘探开发进展与前景[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 1068-1075.]
- [4] Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, *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. [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.]
- [5] Fu Jinhua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Geological theory and practice of petroleum exploration in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1091-1101. [付金华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地石油勘探地质理论与实践[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1091-1101.]
- [6] Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and re-source prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11. [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.]
- [7] Spencer C W. Geologic aspects of tight gas reservoirs in the Rocky Mountain regions[J]. Journal of Petroleum Technology, 1985, 37(7): 1308-1314.
- [8] Spencer C W. Review of characteristics of low permeability gas reservoirs in western United States[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(5): 613-629.
- [9] Zeng Daqian, Li Shuzhen. Types and characteristics of permeability sandstone reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(1): 38-45. [曾大乾, 李淑贞. 中国低渗透砂岩储层类型及地质特征[J]. 石油学报, 1994, 15(1): 38-45.]
- [10] Li Jian, Wu Zhiyong. Key Techniques for Exploration and Production of Deep Tight Sandstone Gas Reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002. [李健, 吴智勇. 深层致密砂岩气藏勘探开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.]
- [11] Su Fuyi, Zhou Wen, Jin Wenhui, *et al.* Identification and distribution of the Mesozoic plays in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 582-590. [苏复义, 周文, 金文辉, 等. 鄂尔多斯盆地中生界成藏组合划分与分布评价[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 582-590.]
- [12] Ding Xiaoqi, Zhang Shaonan, Zhou Wen, *et al.* Characteristics and genesis of the Upper Paleozoic tight sandstone reservoirs in the northern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4): 491-496. [丁晓琪, 张哨楠, 周文, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩储层特征及其成因探讨[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 491-496.]
- [13] Tang Haifa, Peng Shimi, Zhao Yanchao, *et al.* Analysis of main control factors of the physical property of tight sandstone reservoir[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2007, 22(1): 59-63. [唐海发, 彭仕宓, 赵彦超, 等. 致密砂岩储层物性的主控因素分析[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(1): 59-63.]
- [14] Zhang Shaonan. Tight sandstone gas reservoir; their origin and discussion[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 1-10. [张哨楠. 致密天然气砂岩储层: 成因和讨论[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 1-10.]
- [15] Han Yonglin, Wang Chengyu, Wang Haihong, *et al.* Sedimentary characteristics of shallow-water deltas in Chang-8 subsection of Yanchang Formation, Jiyuan area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1057-1064. [韩永林, 王成玉, 王海红, 等. 姬塬地区长8油层组浅水三角洲沉积特征[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1057-1064.]
- [16] Wang Changyong, Zheng Rongcai, Li Zhongquan, *et al.* Characteristics of lithologic reservoir of interval 8 of Yanchang Formation in Jiyuan Oilfield of Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(3): 69-74. [王昌勇, 郑荣才, 李忠权, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬油田长8油层组岩性油藏特征[J]. 地质科技情报, 2010, 29(3): 69-74.]
- [17] Li Shutong, Wang Qi, Zhong Jia'ai, *et al.* The genesis of sandbody

- in the shallow delta from Chang 8₁ of Jiyuan area in Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(6): 1102-1108. [李树同, 王琪, 仲佳爱, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8₁ 浅水三角洲砂体成因[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(6): 1102-1108.]
- [18] Liao Peng, Tang Jun, Pang Guoyin, *et al.* Reservoir characteristics and control factors of Chang 8₁ of Yanchang Formation of Triassic in Jiyuan region of Ordos Basin[J]. *Journal of Mineralogy Petrology*, 2012, 32(2): 97-104. [廖朋, 唐俊, 庞国印, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长 8₁ 段储层特征及控制因素分析[J]. *矿物岩石*, 2012, 32(2): 97-104.]
- [19] Zhang Jizhi, Chen Shijia, Xiao Yan, *et al.* Characteristics of the Chang 8 tight sandstone reservoirs and their genesis in Huaqing area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 679-684. [张纪智, 陈世加, 肖艳, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区长 8 致密砂岩储层特征及其成因[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 679-684.]
- [20] Zhang Jie, Xia Weimin, Xu Li, *et al.* Genesis of Jurassic tight sandstone reservoirs of Jiulongshan region in the northern Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25 (supplement 1): 71-78. [张杰, 夏维民, 徐丽, 等. 柴北缘九龙山地区侏罗系致密砂岩储层成因分析[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25 (增刊 1): 71-78.]
- [21] Wang Qi, Hao Lewei, Chen Guojun, *et al.* Forming mechanism of carbonate cements in siliciclastic sandstone of Zhuhai Formation in Baiyun Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(4): 553-558. [王琪, 郝乐伟, 陈国俊, 等. 白云凹陷陆海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理[J]. *石油学报*, 2010, 31(4): 553-558.]
- [22] Li Juan, Yu Bin. Effect of clay minerals on reservoir physical properties[J]. *Science and Technology of West China*, 2011, 10(22): 8-9. [李娟, 于斌. 粘土矿物对储层物性的影响[J]. *中国西部科技*, 2011, 10(22): 8-9.]
- [23] Fu Wanjun. Influence of clay minerals on sandstone reservoir properties[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000, 2(3): 59-68. [伏万军. 粘土矿物成因及对砂岩储集性能的影响[J]. *古地理学报*, 2000, 2(3): 59-68.]
- [24] Kang Yili, Luo Pingya. Influence of clay minerals on formation damage in sandstone reservoir: A review and prospect in it[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2000, 17(5): 36-40. [康毅力, 罗平亚. 粘土矿物对砂岩储层损害的影响——回顾与展望[J]. *钻井液与完井液*, 2000, 17(5): 36-40.]
- [25] Li Chaozheng, Liu Guangdi, Cao Zhe, *et al.* The study of Chang 7 tight sandstone micro pore characteristics in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(7): 1235-1247. [李超正, 柳广弟, 曹喆, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段致密砂岩微孔隙特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(7): 1235-1247.]
- [26] Shao Longyi, Liu Lei, Wen Huaijun, *et al.* Characteristics and influencing factors of nanopores in the Middle Jurassic Shimenkou shale in Well YQ-1 of the northern Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 164-173. [邵龙义, 刘磊, 文怀军, 等. 柴北缘盆地 YQ-1 井中侏罗统石门沟组泥页岩纳米孔隙特征及影响因素[J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 164-173.]
- [27] Ji Liming, Qiu Junli, Xia Yanqing, *et al.* Micro-pore characteristics and methane adsorption properties of common clay minerals by electron microscope scanning[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 249-256. [吉利明, 邱军利, 夏燕青, 等. 常见黏土矿物扫描微孔隙特征与甲烷吸附性[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 249-256.]
- [28] Wang Maozhen, Liu Shaobo, Ren Yongjun, *et al.* Pore characteristics and methane adsorption of clay minerals in shale gas reservoir[J]. *Geological Review*, 2015, 61(1): 207-216. [王茂桢, 柳少波, 任拥军, 等. 页岩气储层粘土矿物孔隙特征及其甲烷吸附作用[J]. *地质评论*, 2015, 61(1): 207-216.]
- [29] Cheng Jun, Li Hong, Lei Chuan. Diagenesis of Chang 6 reservoir of Upper Triassic in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(1): 69-74. [程俊, 李红, 雷川. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 6 储层成岩作用研究[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(1): 69-74.]
- [30] Meng Lina, Cui Qiang, Zhang Zhiyong, *et al.* Study on the diagenetic facies characteristics of Chang 6 reservoir of the Upper Triassic Yanchang Formation in Jiyuan area[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2014, 33(4): 70-77. [孟立娜, 崔强, 张志勇, 等. 姬塬地区上三叠统长 6 油层组储层成岩相研究[J]. *石油化工应用*, 2014, 33(4): 70-77.]
- [31] Ren Dazhong, Sun Wei, Huang Hai, *et al.* Formation mechanism of Chang 6 tight sandstone reservoir in Jiyuan Oilfield, Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 2016, 41(10): 1735-1744. [任大忠, 孙卫, 黄海, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬油田长 6 致密砂岩储层成因机理[J]. *地球科学*, 2016, 41(10): 1735-1744.]
- [32] Liu Zhenwang, Zheng Xi, Zhong Zhangqi, *et al.* Characteristics and formation mechanism of Chang 6 reservoir in Jiyuan area[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(3): 20-27. [刘振旺, 郑锡, 钟张起, 等. 姬塬地区长 6 油层组储层特征及形成机理[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(3): 20-27.]
- [33] Zhang Zhenhong, Wang Lingli, Zhu Jing. Regularities of clay minerals distribution in sandstone reservoir of Chang 6 in Jiyaun district[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2015, 35(2): 197-201. [张振红, 汪伶俐, 朱静. 姬塬地区长 6 油层组砂岩储层中粘土矿物分布规律研究[J]. *西安科技大学学报*, 2015, 35(2): 197-201.]
- [34] Zhang Xiaoli, Xie Zhengwen. Reservoir characteristics of Chang 8 of Yanchang Formation (Triassic) in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Journal of Mineralogy Petrology*, 2006, 26(4): 83-88. [张晓莉, 谢正温. 鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组长 8 储层特征[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(4): 83-88.]
- [35] Wang Zhanyong, Chen Yicai, He Fengyang, *et al.* Study on the characteristics of Chang 6 reservoir in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. *Science & Technology in Western China*, 2010, 9(29): 18-20. [王战永, 陈义才, 何逢阳, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长 6 段储层特征研究[J]. *中国西部科技*, 2010, 9(29): 18-20.]
- [36] Ma Haiyong, Zhou Lifa, Zhang Xiaogang, *et al.* Diagenesis and favorable diagenetic facies of Chang 8 reservoir in Jiyuan area of Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(4): 378-383. [马海勇, 周立发, 张小刚, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 段储层成岩作用与有利成岩相研究[J]. *石油实验*

- 地质,2013,35(4):378-383.]
- [37] Ma Yanli, Li Cheng, Dan Weidong, *et al.* Analysis on main control factors of Chang 6 reservoir in Jiyuan region, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2016, 30(3): 32-37.[马艳丽, 李成, 淡卫东, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长6成藏主控因素分析[J]. *石油地质与工程*, 2016, 30(3): 32-37.]
- [38] Shen Jun, Sun Wei, Liu Yanni, *et al.* Effect of the difference of low permeability reservoir microscopic pore structure on movable fluid: A case for the Chang 6 reservoir of Jiyuan and Banqiao areas in Ordos Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(3): 167-172.[盛军, 孙卫, 刘艳妮, 等. 低渗透油藏储层微观孔隙结构差异对可动流体的影响——以鄂尔多斯盆地姬塬与板桥地区长6储层为例[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(3): 167-172.]
- [39] Franks S G, Forester R W. Relationships among carbon dioxide, pore-fluid chemistry, and secondary porosity, Texas Gulf Coast[J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(4): 478-478.
- [40] Lee M, Aronson J L, Savin S M. K/Ar dating of time of gas emplacement in Rotliegendes Sandstone, Netherlands [J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(9): 1381-1385.
- [41] Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. *AAPG Bulletin*, 1973, 57(2): 349-369.
- [42] Huoseknecht D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones[J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(6): 501-510.
- [43] Wang Yang, Li Shutong, Mou Weiwei, *et al.* Tight reservoir characteristics and porosity evolution of Chang 8₁ in western Jiyuan area[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(4): 59-66.[汪洋, 李树同, 牟伟卫, 等. 姬塬西部地区长8₁致密储层特征及孔隙度演化分析[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(4): 59-66.]
- [44] Baker J C, Uwins P J R, Mackinnon I D R. ESEM study of authigenic chlorite acid sensitivity in sandstone reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 1993, 8(4): 269-277.

Influences of clay minerals on physical properties of Chang 6 tight sandstone reservoir in Jiyuan area, Ordos Basin

Li Yang^{1,2}, Li Shu-tong¹, Mou Wei-wei^{1,2}, Yan Can-can^{1,2}

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province/Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Clay minerals are widely distributed in each layer of the Chang 6 reservoir in Jiyuan area, which is the main interstitial material in the tight sandstone, and plays an important role in controlling the physical properties. Based on the experimental techniques of casting sections, mercury injection, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), combined with the analysis of the basic petrological characteristics, it is concluded that Chang 6, mainly consisting of feldspar lithic sandstone and lithic feldspathic sandstone, is a set of tight sandstone reservoir with low porosity and permeability. The average porosity and average permeability are 7.78%-9.13%, $(0.20-0.34) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, respectively. Focus on the analysis of the relationship between clay minerals and reservoir physical properties, kaolinite and chlorite are the most common clay minerals and have a complex influence on reservoir physical properties. A small amount of kaolinite and chlorite usually indicates good reservoir porosity, but excessive kaolinite (absolute content > 7%) and chlorite (absolute content > 10%) will greatly reduce the porosity of the reservoir. The original porosity of Chang 6 sandstone reservoir in Jiyuan area is from 41.13% to 42.04% by calculation. Kaolinite filling caused the decrease of porosity of 4.52%-4.78%, the loss rate is 10.74%-11.38%. The effect of chlorite on Chang 6 sandstone porosity after kaolinite, leading to the decrease of porosity of 4.12%-4.70%, the loss rate is 9.81%-11.18%. Authigenic kaolinite has a constructive effect on the permeability of sandstone, and chlorite plays a major role in reducing the permeability of sandstone. Although illite content is lower than that of kaolinite and chlorite, the porosity and permeability of the reservoir are reduced due to the silk thread forming a bridge type illite filling pores, which lead to the decrease of porosity of 1.33%-2.08%, and the loss rate is 3.17%-4.94%. Therefore, the influence of clay minerals on porosity of Chang 6 tight reservoir in Jiyuan area is as follows: kaolinite > chlorite > illite.

Key words: Clay minerals; Tight sandstones; Reservoir physical properties; Porosity; Permeability; Chang 6 reservoir; Jiyuan area