

准噶尔盆地中拐地区上乌尔禾组储集层绿泥石膜成因及其对储集层物性的影响

单祥¹, 郭华军¹, 郭旭光², 徐洋¹, 曹元婷², 李亚哲¹, 王力宝¹

(1. 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023; 2. 新疆油田公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000)

摘要:以准噶尔盆地中拐地区上乌尔禾组砂砾岩储集层为例,利用铸体薄片、电子探针、扫描电镜、物性等资料,对陆相岩屑砂砾岩中发育的绿泥石膜微观特征、成因及其与储集性能之间的关系进行详细研究。结果表明:上乌尔禾组绿泥石膜为偏富铁型,且具有双层膜结构,近颗粒一侧里层膜连续性好、致密、晶体小;近孔隙一侧的外层膜连续性差、疏松、晶体大;绿泥石膜由先存黏土膜转化而来,形成于温度小于 70 ℃ 的早成岩阶段;绿泥石膜对碎屑石英的次生加大有抑制作用,但不能阻止自生石英晶粒在孔隙中沉淀,更不能阻止浊沸石、方解石胶结物的沉淀,也不能抑制机械压实作用,其对储集层孔隙保存贡献较小,对优质储层起指示作用。

关键词:绿泥石膜;成岩作用;硅质胶结;储集性能;上乌尔禾组;准噶尔盆地

中图分类号:P 571

文献标志码:A

引用格式:单祥,郭华军,郭旭光,等.准噶尔盆地中拐地区上乌尔禾组储集层绿泥石膜成因及其对储集层物性的影响[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(6):32-40.

SHAN Xiang, GUO Huajun, GUO Xuguang, et al. Genesis of chlorite coatings and their effects on reservoir quality in Upper Urho Formation of Zhongguai area, Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(6): 32-40.

Genesis of chlorite coatings and their effects on reservoir quality in Upper Urho Formation of Zhongguai area, Junggar Basin

SHAN Xiang¹, GUO Huajun¹, GUO Xuguang², XU Yang¹, CAO Yuanling², LI Yazhe¹, WANG Libao¹

(1. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China)

Abstract: Taking sandstones of Permian Upper Urho Formation for example and combining the analysis of casting thin section, electronic probe, SEM, and sandstone physic property, this article studied the chlorite coatings' micro features, genesis and their effects on continental sandstone quality. Several results are acquired as follows: the chlorite coatings of Upper Urho sandstones are Fe-rich with a "two-layer structure". The inner parts adjacent to grains are more continuous, denser, and finer-crystalline, while the outer parts adjacent to pores are less continuous, thinner and coarser-crystalline. The chlorite coatings of Upper Urho sandstones are transformed from clay precursors during eodiagenetic stage at temperature lower than 70 ℃. Chlorite coatings can inhibit detrital quartz form overgrowth, but they can not effectively inhibit authigenic quartz, laumontite and calcite from precipitation in primary pores and mechanic compaction. However, the occurrence of chlorite coatings is a barometer of a good quality reservoir.

Keywords: chlorite coatings; diagenesis; quartz cementation, sandstone reservoir quality; Upper Urho Formation; Junggar Basin

自生绿泥石包膜是碎屑岩中常见的黏土矿物类型,在中国多个含油气盆地的中生代碎屑岩储集层中广泛分布,如四川盆地三叠系须家河组^[1]、鄂

尔多斯盆地三叠系延长组^[2]、准噶尔盆地侏罗系头屯河组^[3]、松辽盆地侏罗系^[4]、吐哈盆地侏罗系^[5]等。自生绿泥石膜被认为与中深层异常高孔隙储集

层关系密切,围绕绿泥石膜成因、物质来源、抑制石英加大的机制、对粒间孔隙的保护机制等一直是国内外学者研究的热点^[6-10]。国外学者研究的绿泥石膜多发育在海相石英砂岩中,但中国含油气盆地中的绿泥石膜多发育在陆相三角洲-湖泊相长石砂岩或长石岩屑砂岩中,两种砂岩中绿泥石膜的形成环境不同,其对储集层孔隙的影响也需要重新认识。国内学者对中国陆相砂岩自生绿泥石膜成因及对储集层影响等方面做了大量工作,存在不同的研究观点。关于绿泥石膜形成时间:姚泾利等^[11]认为鄂尔多斯盆地华庆地区长6砂岩中绿泥石膜形成于初始压实阶段以前,也就是同沉积阶段;黄思静等^[12]认为中国三叠系陆相绿泥石膜形成于初始压实阶段以后的早成岩阶段。关于绿泥石膜形成机制:有学者认为绿泥石膜由早期富铁黏土膜转化而来,类似于海相石英砂岩中绿泥石膜的成因^[11,13];但有学者提出陆相砂岩绿泥石膜主要是在成岩期从孔隙水中直接沉淀出来的^[14]。关于绿泥石膜对储集层孔隙保存的贡献,有学者认为致密连续的绿泥石膜可以抑制石英加大、增强砂岩抗压实性,甚至促进溶蚀作用,因而对储集层起建设性作用^[1,3,12,14];有学者认

为绿泥石膜堵塞孔隙和喉道,降低储集层物性,对储集层起破坏作用^[13];也有学者提出发育绿泥石膜的砂岩具有高孔隙度是由其本身沉积性质决定,绿泥石膜对保护储集层孔隙贡献不大^[8,15-16]。笔者以准噶尔盆地西北缘中拐凸起二叠系上乌尔禾组岩屑砂岩储集层为例,综合利用研究区钻测井资料,结合11口井250多块铸体薄片资料以及7口取芯井16件柱塞样扫描电镜、电子探针等分析资料,研究陆相砂岩储集层绿泥石膜成因及其对储集层质量的影响。

1 研究背景及方法

研究区位于准噶尔盆地西北缘西部断裂带中拐凸起二级构造带(图1(a)、(b)),面积约500 km²。西北缘上乌尔禾组为一套扇三角洲-湖泊相碎屑沉积。研究区上乌尔禾组为扇三角洲前缘沉积,地层厚度范围在218~295 m,自下而上可分为3段。从乌一段到乌三段,湖平面上升,砂体不断退积沉积(图1(c))。研究区上乌尔禾组扇三角洲前缘水下分流河道砂体发育,物性较好,为研究区主力油层发育段,目前已探明J205井区油气藏。

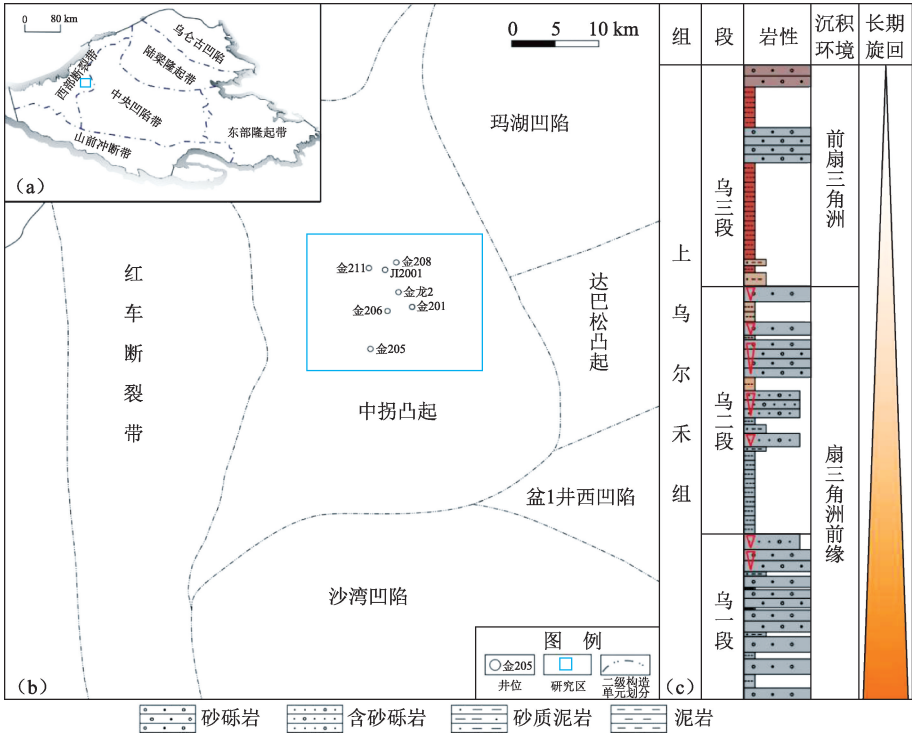


图1 研究区构造位置^[17]、岩性地层剖面(金205井)及取样井分布

Fig.1 Geological background of study area and distribution of sample wells

本次研究收集并鉴定了上乌尔禾组铸体薄片11口井共250多片,以获取上乌尔禾组储集层岩矿组成、孔隙类型等方面的信息。此外对金201、金

205、金206、金208、金龙2、金211、JL2001等7口取芯井岩心进行柱塞取样共计16件,样品进行以下分析工作:①首先对柱塞样品切片磨制铸体薄片,在

Leica 显微镜下进行观察鉴定,从而获取岩矿组成、孔隙类型、成岩作用特征方面的数据;②对发育绿泥石膜的铸体薄片表面镀碳,采用 Epma-1610 型电子探针对绿泥石成分进行测定;③对发育绿泥石膜的柱塞样品,钻取小样镀金后使用 FEI Inspect S50 型扫描电子显微镜进行观察,以获取孔隙及充填物形貌、结构方面的信息;④采用 FYKS-3 型覆压气体孔渗联合测试仪,对发育绿泥石膜的柱塞样进行孔渗测定,以研究绿泥石膜和储集层物性之间的关系。

2 研究结果

2.1 研究区砂岩基本特征

研究区上乌尔禾组埋深为 3997 ~ 4244 m,储集层段主要发育在乌一段和乌二段,其砂体纵向厚度较大,单层砂体厚度 10 ~ 60 m,为砂包泥结构,且横向连续性较好。乌三段砂岩整体不发育,泥岩厚度大,为区域盖层。上乌尔禾组为一套中低孔-特低渗砂砾岩储集层,平均孔隙度 10.35%,平均渗透率 $1.59 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;石英平均体积分数 6.37%,长石体积分数 5.97%,岩屑体积分数 87.66%,岩屑类型以凝灰岩为主(59.23%),其次为沉积岩(10.33%)和安山岩(7.97%) (图 2);填隙物以粒间胶结物为主,泥杂基含量较低(图 3)。胶结物主要有浊沸石(图 4(a))、硅质(图 4(b))、方解石(图 4(c))和绿泥石(图 4(d));储集空间类型主要为残余原生粒间孔(图 4(d)),其次为颗粒溶孔(图 4(e))和浊沸

石溶孔(图 4(f))。在研究区扇三角洲前缘水下分流河道砂体中,绿泥石膜和浊沸石胶结物普遍发育,成为研究区一种独特的成岩现象。

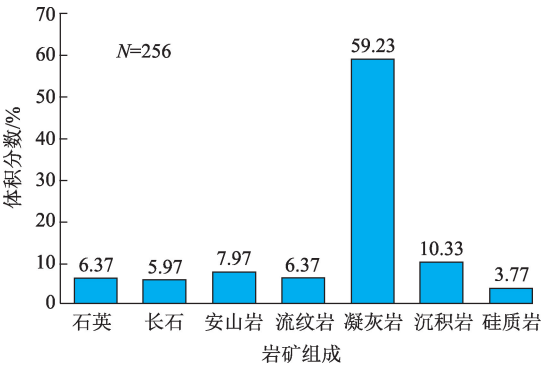


图 2 上乌尔禾组储集层岩矿组成及含量直方图

Fig. 2 Histogram showing detrital grain composition in reservoir of Upper Urho Formation

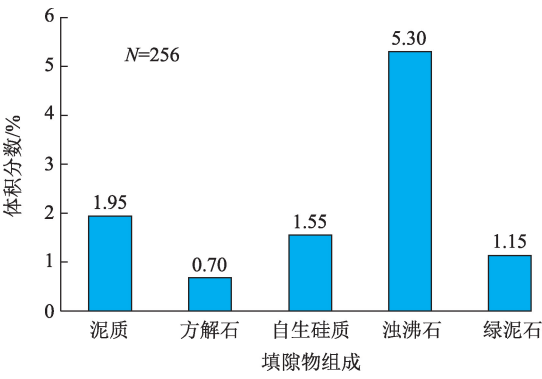


图 3 上乌尔禾组储集层填隙物类型及含量直方图

Fig. 3 Histogram showing types and content of interstitial materials in reservoirs of Upper Urho Formation

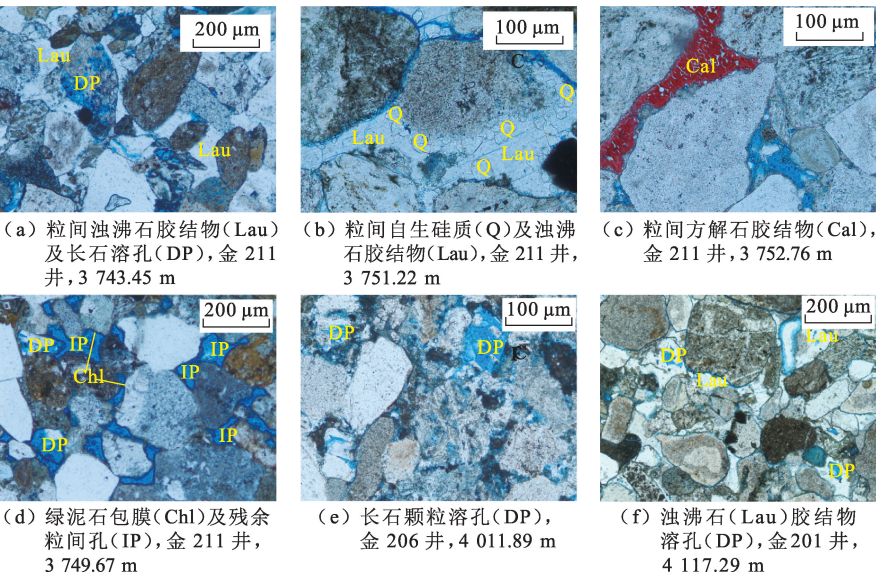


图 4 上乌尔禾组储集层中胶结物类型和孔隙类型微观照片

Fig. 4 Microphotographs showing authigenic cement and pore types of Upper Urho sandstones

2.2 自生绿泥石膜产状及成分

通过详细的铸体薄片及扫描电镜观察,上乌尔禾组砂岩中自生绿泥石主要以颗粒包膜方式产出,且晶体垂直颗粒生长(图 5(a));绿泥石膜并非处处等厚,一些薄片 中绿泥石膜表现出 不等厚,且具有碎屑特征,有别于孔隙水中直接析出的自生胶结物呈现出处处等厚的特征(图 5(b))。扫描电镜下,绿泥石膜具有双层膜结构,靠近颗粒一侧绿泥石膜致密、厚度相对较薄、晶体相对较小(单一晶体厚度一般小于 2

μm)、连续性好;靠近孔隙一侧绿泥石膜稀疏、厚度较大、晶体较大(单一晶体厚度一般为 3~5 μm),但其不如里层膜连续性好,不均匀地在里层膜之上生长(图 5(c))。扫描电镜下还可见到成岩晚期绒球状绿泥石充填在孔隙中,覆盖在颗粒绿泥石包膜之上(图 5(d))。从电子探针成分分析结果可知,上乌尔禾组绿泥石膜是偏富铁型,其 FeO 质量分数一般大于 20%, $w(\text{Fe})/w(\text{Fe}+\text{Mg})$ 为 0.79~0.88,平均为 0.83(表 1)。

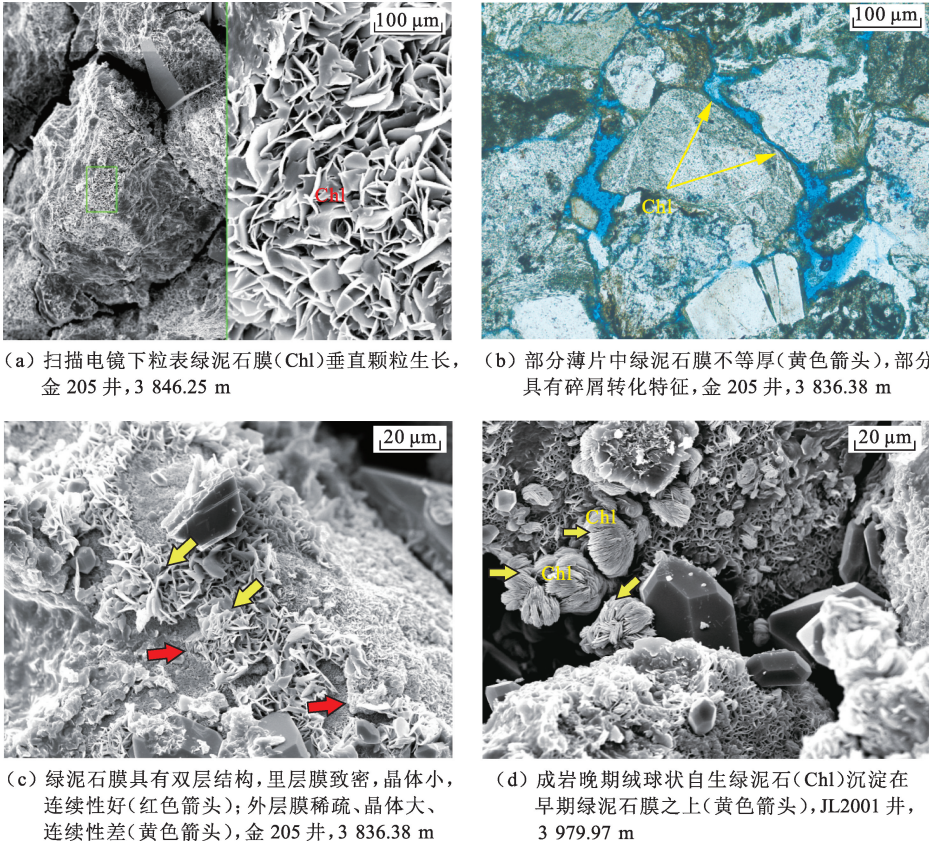


图 5 研究区上乌尔禾组绿泥石膜产状微观照片

Fig.5 Microphotographs showing micro-structure of chlorite coatings in Upper Urho sandstones

表 1 上乌尔禾组储集层绿泥石膜化学组成电子探针质量分数

Table 1 Electron probe data showing chemical compositions of chlorite coatings in Upper Urho sandstones

井号	深度/m	打点数	化学组成					
			$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{FeO})/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$
金 205	3944.75	5	5.94	34.71	16.61	24.25	0.82	0.23
金 205	3971.34	4	7.83	27.81	18.76	24.87	0.56	0.16
金 205	3971.62	6	7.66	30.01	18.28	25.31	0.34	0.20
金 205	3971.93	4	8.18	24.13	18.65	27.46	0.33	0.18

3 讨 论

3.1 绿泥石膜形成时间及成因

目前关于自生绿泥石膜有两种成因机制:①交代黏土先存膜^[17-21],存在 4 种常见的绿泥石化先存黏土膜,即机械渗虑蒙皂石、自生蒙皂石、磁绿泥石、

高岭石。机械渗虑蒙皂石先存膜可以是陆相盆地沉积成岩过程中原地生成,或者是搬运来的继承性蒙皂石膜;自生蒙皂石先存膜形成与火山碎屑蚀变形成的三八面体蒙皂石密切相关。磁绿泥石先存膜的形成通常伴随着磁绿泥石鲕粒;交代高岭石通常发生在中成岩期富 Fe、Mg 环境下。②从孔隙流体中

直接沉淀,孔隙水中直接沉淀出自生绿泥石一般发生在中成岩期,时间晚于石英胶结,因而不能起到抑制石英次生加大的作用;如 Sawan 气田白恶系砂岩中自生绿泥石膜就是从孔隙流体中直接沉淀的^[22]。由于自生绿泥石不能在早成岩期直接从孔隙流体中沉淀形成,大量文献报道的早期颗粒绿泥石膜的形成与先存黏土膜有关^[6,8-9,19]。

通过详细的铸体薄片及扫描电镜观察,成岩矿物

的产状特征可以反映上乌尔禾组绿泥石膜的形成时间:①绝大部分碎屑颗粒接触处缺少绿泥石膜(图 6(a));②在所有样品中,绿泥石膜包裹浊沸石胶结物(图 6(b));③自生石英晶粒沉淀在绿泥石膜之上(图 6(c)、(d));④绿泥石膜常包裹长石颗粒的铸模孔(图 6(e));⑤一些样品的薄片照片以及扫描电镜照片中可见伊蒙混层黏土膜(图 6(f)、(g)),部分颗粒接触处也可见较薄的伊蒙混层黏土膜(图 6(h))。

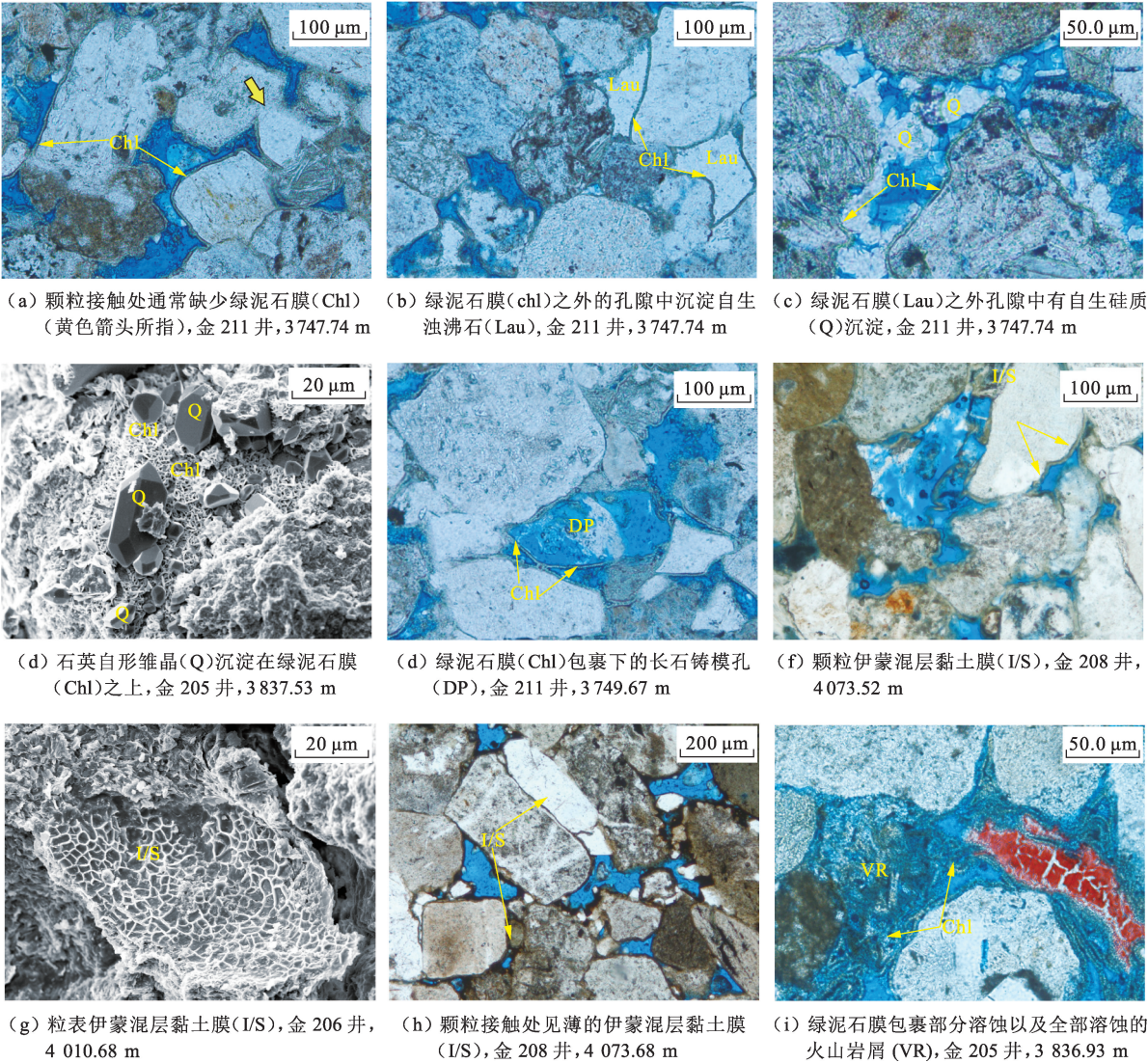


图 6 微观照片表明研究区上乌尔禾组绿泥石膜形成时间和成因

Fig. 6 Microphotographs showing timing and origin of chlorite coatings in Upper Urho sandstones

第一点表明绿泥石膜的形成时间晚于压实作用对颗粒调整之后;第二点表明绿泥石膜形成时间早于浊沸石沉淀;第三点表明绿泥石膜形成时间早于自生石英沉淀,岩石学特征又表明自生石英晶粒早于浊沸石沉淀;第四点表明绿泥石膜形成时间早于长石溶蚀之前;第五点表明岩石样品中存在除绿泥石膜之外的先存黏土膜,并且其形成时间可能早于

颗粒完全压实之前。前人大量研究表明,砂岩中自生石英一般在温度达到 70 ℃ 开始沉淀^[23](对应埋深约为 2 500 m);储层中自生浊沸石的形成温度一般为 70 ~ 90 ℃^[24];有机酸溶蚀长石一般在温度大于 80 ℃ 开始^[25]。

通过以上证据可以推断出,研究区上乌尔禾组绿泥石膜的形成温度小于 70 ℃,形成时间晚于压实作

用对颗粒调整之后的早成岩期,因此其不是从孔隙流体中直接沉淀出来的。结合研究区上乌尔禾组砂岩也发育伊蒙混层黏土膜的特点,可以确定上乌尔禾组绿泥石膜是由先存黏土膜在富 Fe、Mg 的环境中,在早成岩期转化而来。先存黏土膜最可能是火山玻璃水解形成的蒙皂石,上乌尔禾组物源成分中含大量的火山碎屑沉积物,粒间填隙物也常见火山玻璃蒙皂石化后形成的无序伊蒙混层,其部分转化为伊蒙混层黏土膜,部分在富 Fe、Mg 环境中转化为绿泥石膜。Fe、Mg 物质来源与火山碎屑有关,薄片可见绿泥石膜包裹部分或者完全溶蚀的火山岩屑(图 6(i)),表明火山岩屑的溶蚀为绿泥石膜形成提供了原地的物质来源。上乌尔禾组砂砾岩火山岩屑含量高,其中以中基性凝灰岩岩屑为主,据此推测研究区铁离子来源可能有两种机制:①物源区富铁、镁的中基性火山碎屑风化后,富铁、镁的氧化物和氢氧化物被河流溶解,形成河流溶解铁^[7];②早成岩期,火山碎屑物质的水化、水解作用提供丰富的铁、镁离子^[26]。

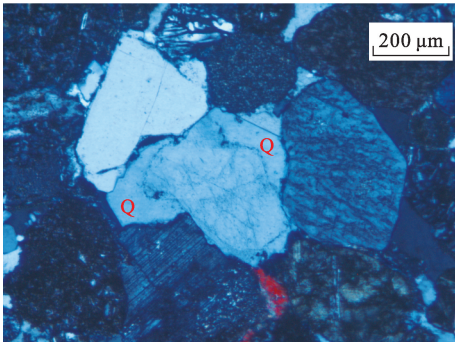
研究发现,上乌尔禾组绿泥石膜发育受沉积环境控制,在分选较好的水下分利河道砂岩中绿泥石膜最发育。一方面由于三角洲前缘沉积物原始物性好,流

体渗流通畅,有供绿泥石膜形成的离子交换条件及沉淀空间;另一方面三角洲前缘河流带来的溶解铁在此处沉淀,提供绿泥石膜形成所需的含铁物质。

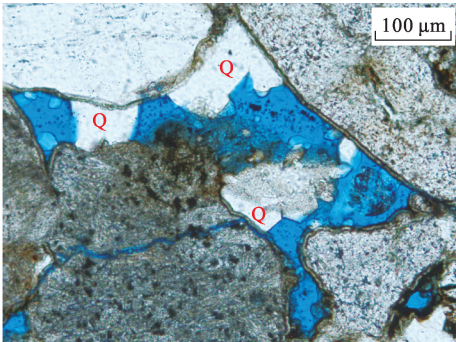
3.2 绿泥石膜与硅质胶结的关系

石英次生加大是导致储集层孔隙度降低的重要原因^[27]。前人研究认为,绿泥石膜能有效地抑制石英次生加大,保护原生孔隙,其主要机制有:①绿泥石膜阻止富 Si⁴⁺孔隙流体与颗粒接触,从而减少自生石英在石英颗粒表面的成核数量,抑制石英次生加大^[6];②绿泥石膜占据石英次生加大的生长空间抑制其生长^[9];③绿泥石膜阻碍石英的压溶作用,减少硅质的来源,从而抑制石英次生加大^[10]。以上观点提出的岩石学背景为富石英砂岩,因此硅质胶结作用是破坏储集层孔隙最重要的因素之一,绿泥石膜抑制石英次生加大对保护储集层孔隙有重要意义。

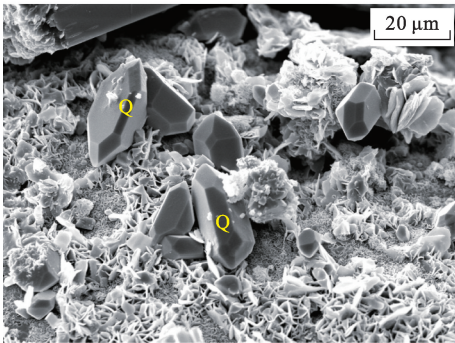
研究区上乌尔禾组储集层为岩屑砂岩,由于碎屑石英颗粒总量较低(石英体积分数平均为 6.37%),即使在不发育绿泥石膜的情况下,石英次生加大对储集层的影响也很有限。在有限的石英颗粒中,研究观察到在无绿泥石膜包膜的石英颗粒上,次生加大很发育,加大边厚度可达 20~30 μm(图 7(a)),



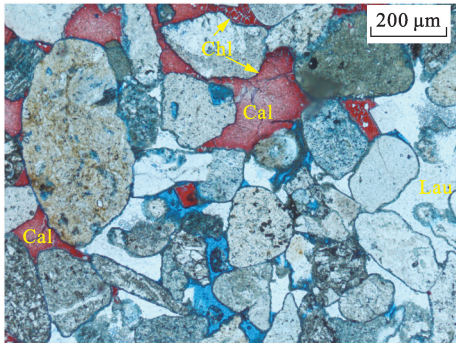
(a) 石英(Q)颗粒在无绿泥石膜发育的情况下自生加大边发育,加大部分呈连晶状堵塞孔隙,金 211 井,3 751.22 m



(b) 绿泥石膜包裹的颗粒外沉淀自生石英(Q),金 208 井,4 043.63 m



(c) 大量自生石英雏晶(Q)沉淀在绿泥石膜表面,金 205 井,3 837 m



(d) 方解石(Cal)和浊沸石(Lau)沉淀在具有绿泥石包裹的孔隙中,金 205 井,3 814.3 m

图 7 微观照片表明上乌尔禾组绿泥石膜与胶结作用的关系

Fig. 7 Microphotographs showing relationships between chlorite coatings and cementation in Upper Urho sandstones

而在发育绿泥石膜的砂岩中,石英颗粒次生加大边不发育,这表明绿泥石膜对于碎屑石英颗粒的次生加大的确起到明显的抑制作用。但同时可以发现,研究区发育绿泥石膜的储层孔隙中普遍沉淀自生石英晶粒(图7(b)),扫描电镜中常见自生石英晶粒散落在绿泥石膜之上(图7(c))。研究区砂岩火山碎屑组分含量高,在埋藏成岩过程中,蒙皂石的伊利石化($K^+ + Al^{3+} + \text{蒙皂石} \rightarrow \text{伊利石} + Si^{4+}$),以及火山碎屑水解都可以增加孔隙水的 Si^{4+} 浓度^[11]。当孔隙流体中 Si^{4+} 浓度不断增加直至过饱和,即使其不能沿着碎屑石英颗粒周围形成次生加大边,也可以直接从孔隙中以自生石英晶粒形式沉淀出来^[11,15]。对于上乌尔禾组岩屑砂砾岩而言,碎屑石英颗粒的次生加大对储集层影响有限,而孔隙中沉淀的自生石英晶粒充填粒间孔、堵塞喉道,降低储集性能。由此可见对于贫石英含量富火山岩屑含量的陆相碎屑岩储集层,绿泥石膜的存在仅抑制碎屑石英颗粒的次生加大,但不能抑制储集层中自生石英晶粒的沉淀,因此抑制硅质胶结物沉淀角度对保护储层原生孔隙贡献非常有限。

也有学者提到绿泥石膜能有效抑制浊沸石或者碳酸盐胶结物的发育^[14],但上乌尔禾组储层中绿泥石膜与浊沸石以及方解石胶结物的伴生现象十分普遍(图7(d))。岩石学特征表明,浊沸石以及方解石胶结物形成时间晚于绿泥石膜。浊沸石胶结物的形成和火山碎屑水解密切相关,其可以直接从孔隙水中沉淀出来;而方解石的沉淀受控于孔隙水介质条件和 Ca^{2+} 离子饱和程度与孔隙水 CO_2 分压。两种胶结物都无需在碎屑颗粒表面成核而从孔隙流体中直接沉淀,因此和绿泥石膜普遍伴生。绿泥石膜能够抑制浊沸石以及碳酸盐胶结物的说法既与事实不符,也缺乏科学依据。

3.3 绿泥石膜与压实作用的关系

有部分学者研究认为,绿泥石环边能提高岩石机械强度,增强岩石抗机械压实性能^[28-29]。前文所述上乌尔禾组砂岩颗粒接触处通常缺少绿泥石膜(图6(a)),说明绿泥石膜形成于压实作用对颗粒调整之后,绿泥石膜不能抑制早成岩期机械压实作用。然而致密完好的颗粒绿泥石包膜可以抑制颗粒压溶作用。另一方面绿泥石的莫氏硬度在2~3,而石英及长石骨架颗粒的莫氏硬度在6~7,因此绿泥石膜提高储集层的抗机械压实能力的说法缺少矿物学依据。此外扫描电镜中可见绿泥石膜晶体疏松分布,且晶间孔隙发育(图5(a)),显然其抗机械压实能力较弱。至

于部分学者提出被绿泥石包裹的长石铸模孔未被压垮^[14],那是由于长石铸模孔形成于中成岩期,此时压实作用已经将颗粒调整到现今的状态,长石铸模孔未被压垮是由于周围碎屑颗粒承担了上覆压力,而非绿泥石膜的贡献。

3.4 绿泥石膜与储集层物性的关系

研究发现绿泥石膜体积分数与储集层孔隙度之间具有较弱的正相关性(图8),研究区上乌尔禾组储集层孔隙类型以原生粒间孔为主(图4(d)),绿泥石膜发育的砂岩粒间孔孔隙度更高,但这并不意味着绿泥石膜是储集层具有高孔隙的主要原因。一般来说储层质量受原始沉积组分、结构以及成岩作用的共同控制^[23]。前文所述,绿泥石膜形成于压实作用对颗粒调整之后,因此从抑制压实角度对储层孔隙保存意义不大;另一方面绿泥石膜确实能对石英颗粒的次生加大起到抑制作用,但考虑到上乌尔禾组储层中石英总含量较低,绿泥石膜通过抑制石英胶结,保护储层孔隙作用有限,而且其不能抑制自生石英晶粒以及浊沸石、方解石胶结物的沉淀。因此研究区自生绿泥石膜对储层孔隙保存贡献较小,绿泥石膜实际上对高原生孔隙储集层起到指示作用。前人^[11,15]及本次研究均表明,绿泥石膜是扇三角洲水下分流河道等高能沉积环境的产物,因此其一定程度上指示了分选好、杂基含量低、原生孔发育的高能水下分流河道砂体。

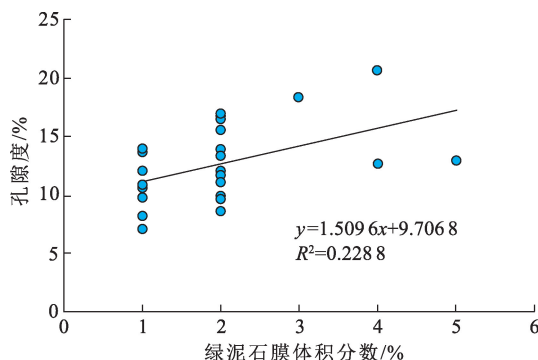


图8 绿泥石膜体积分数与孔隙度的关系

Fig. 8 Relationship between content of chlorite coatings and porosity

4 结 论

(1)上乌尔禾组绿泥石膜为偏富铁型,且具有双层膜结构,近颗粒一侧里层膜连续性好、致密、晶体小,近孔隙一侧的外层膜连续性差、疏松、晶体大。

(2)上乌尔禾组绿泥石膜由先存黏土膜转化而来,形成于温度小于70℃的早成岩阶段,先存黏土

膜的形成与火山灰蒙皂石化有关,Fe、Mg矿物与火山碎屑物质溶蚀有关。

(3)绿泥石膜对碎屑石英的次生加大有抑制作用,但不能阻止自生石英晶粒在孔隙中沉淀,更不能阻止浊沸石、方解石胶结物的沉淀以及抑制机械压实作用,其对储集层孔隙保存贡献较小,对优质储层起指示作用。

参考文献:

- [1] 刘金库,彭军,李阳,等.绿泥石膜胶结物对致密砂岩孔隙的保存机制以川中-川南过渡带边界地区须家河组储层为例[J].石油与天然气地质,2009,30(1):53-57.
- LIU Jinku, PENG Jun, LI Yang, et al. Pore-preserving mechanism of chlorite coatings in tight sandstone: an example from the T₃x Formation of Baojie area in the transitional zone from the central to southern Sichuan Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2009,30(1):53-57.
- [2] 谢渊,王剑,李令喜,等.鄂尔多斯盆地白垩系粘土矿物的分布特征及其沉积-成岩环境意义[J].地质通报,2010,29(1):93-104.
- XIE Yuan, WANG Jian, LI Lingxi, et al. Distribution of the Cretaceous clay minerals in Ordos Basin, China and its implication to sedimentary and diagenetic environment [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(1):93-104.
- [3] 王芙蓉,何生,何治亮,等.准噶尔盆地腹部永进地区深埋侏罗系砂岩内绿泥石包膜对储层物性的影响[J].大庆石油学院学报,2007,31(2):24-27.
- WANG Furong, HE Sheng, HE Zhiliang, et al. Effect of grain-coating chlorite on reservoir property of Yongjin area in the Junggar Basin [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007,31(2):24-27.
- [4] 曾伟.张强凹陷上侏罗统成岩作用及储层分布[J].西南石油学院学报,1996,18(4):9-15.
- ZENG Wei. Diagenesis and reservoir distribution of Upper Jurassic Series in Zhangqiang Hollow [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1996,18(4):9-15.
- [5] 刘林玉,曲志浩,孙卫,等.新疆鄯善油田碎屑岩中的粘土矿物特征[J].西北大学学报(自然科学版),1998,28(5):443-446.
- LIU Linyu, QU Zhihao, SUN Wei, et al. Properties of clay mineral of elastic rock in Shanshan Oilfield, Xinjiang [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1998, 28(5):443-446.
- [6] EHRENBERG S N. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain-coating chlo-

rite: examples from the Norwegian Continental Shelf [J]. AAPG Bulletin, 1993,77(7):1260-1286.

- [7] AJDUKIEWICZ J M, LARESE R E. How clay grain coats inhibit quartz cement and preserve porosity in deeply buried sandstones: observations and experiments [J]. AAPG Bulletin, 2012,96(11):2091-2119.
- [8] BERGER A, GIER S, KROIS P. Porosity-preserving chlorite cements in shallow-marine volcanoclastic sandstones: evidence from Cretaceous sandstones of the Sawan gas field, Pakistan [J]. AAPG Bulletin, 2009,93(5):595-615.
- [9] BILLAULT V, BEAUFORT D, BARONNET A, et al. A nanopetro-graphic and textural study of grain-coating chlorites in sandstone reservoirs [J]. Clay Minerals, 2003,38(3):315-328.
- [10] MA P J, LIN C Y, ZHANG S Q, et al. Formation of chlorite rims and the impact of pore-lining chlorite on reservoir quality: a case study from Shiqianfeng sandstones in Upper Permian of Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, Eastern China [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2017,64(6):825-839.
- [11] 姚泾利,王琪,张瑞,等.鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长4砂岩绿泥石膜的形成机理及其环境指示意义[J].沉积学报,2011,29(1):72-79.
- YAO Jingli, WANG Qi, ZHANG Rui, et al. Forming mechanism and their environmental implications of chlorite-coatings in Chang 6 sandstone (Upper Triassic) of Huaqing area, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011,29(1):72-79.
- [12] 黄思静,谢连文,张萌,等.中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系[J].成都理工大学学报(自然科学版),2004,31(3):273-281.
- HUANG Sijing, XIE Lianwen, ZHANG Meng, et al. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004,31(3):273-281.
- [13] 孙治雷,黄思静,张玉修,等.四川盆地须家河组砂岩储层中自生绿泥石的来源与成岩演化[J].沉积学报,2008,26(3):459-467.
- SUN Zhilei, HUANG Sijing, ZHANG Yuxiu, et al. Origin and diagenesis of authigenic chlorite within the sandstone reservoirs of Xujiahe Formation, Sichuan Basin, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008,26(3):459-467.
- [14] 孙全力,孙晗森,贾昀,等.川西须家河组致密砂岩储层绿泥石成因及其与优质储层关系[J].石油与天然

- 气地质, 2012, 33(5): 751-757.
- SUN Quanli, SUN Hansen, JIA Bao, et al. Genesis of chlorites and its relationship with high-quality reservoirs in the Xujiahe Formation tight sandstones, Western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 751-757.
- [15] 向芳, 冯钦, 张得彦, 等. 绿泥石环边的再研究: 来自镇泾地区延长组砂岩的证据[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 59-67.
- XIANG Fang, FENG Qin, ZHANG Deyan, et al. Further study of chlorite rim in sandstone: evidences from Yanchang Formation in Zhenjing area, Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(1): 59-67.
- [16] 周晓峰, 王建国, 兰朝利, 等. 鄂尔多斯盆地延长组绿泥石膜的形成机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(4): 20-28.
- ZHOU Xiaofeng, WANG Jianguo, LAN Chaoli, et al. Forming mechanisms of chlorite films in Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(4): 20-28.
- [17] ANJOS S M C, ROS L F, SILVA C M A. Chlorite authigenesis and porosity preservation in the Upper Cretaceous marine sandstones of the Santos Basin, offshore eastern Brazil [J]. Clay Mineral Cements in Sandstones, 2003, 34: 291-316.
- [18] HILLIER S. Pore-lining chlorites in siliciclastic reservoirs and stones: electron microprobe SEM and XRD data, and implications for their origin [J]. Clay Mineral, 1994, 29(4): 665-679.
- [19] MORAD S, KETZER J M, DEROS L F. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins [J]. Sedimentology, 2000, 47(sup1): 95-120.
- [20] PITTMAN E D, LUMSDEN D N. Relationships between chlorite coatings on quartz grains and porosity: Spiro Sand, Oklahoma [J]. Journal of Sedimentary Research, 1968, 38(2): 668-670.
- [21] DUTTON S P, LAND L S. Meteoric burial diagenesis of Pennsylvanian arkosic sandstones, southwestern Anadarko Basin, Texas [J]. AAPG Bull, 1985, 69(1): 22-38.
- [22] BERGER A, GIER S, KROIS P. Porosity-preserving chlorite cements in shallow-marine volcanoclastic sandstones: evidence from Cretaceous and stones of the Sawan Gas field, Pakistan [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93: 595-615.
- [23] BJØRLYKKE K. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins [J]. Sedimentary Geology, 2014, 301: 1-14.
- [24] 杨晓萍, 裴传楠. 鄂尔多斯盆地三叠系延长统浊沸石的形成分布与油气关系[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 628-632.
- YANG Xiaoping, QIU Yinan. Formation process and distribution of laumontite in Yanchang Formation (Upper Triassic) of Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 628-632.
- [25] SURDAM R C, CROSSEY L J, HAGEN E S. Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23.
- [26] 朱世发, 朱筱敏, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地西北缘二叠系沸石矿物成岩作用及对油气的意义[J]. 中国科学(地球科学), 2011, 41(11): 1602-1612.
- ZHU Shifa, ZHU Xiaomin, WANG Xulong, et al. Zeolite diagenesis and its control on petroleum reservoir quality of Permian in northwestern margin of Junggar Basin, China [J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41(11): 1602-1612.
- [27] 张少敏, 操应长, 王艳忠, 等. 牛庄洼陷西南部沙三中亚段浊积岩储层成岩作用与物性演化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 1-11.
- ZHANG Shaomin, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Diagenesis and physical properties evolution of turbidite reservoirs in Es₃^z of Niuzhuang Sag, Dongying Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(2): 1-11.
- [28] 丁晓琪, 张哨楠, 葛鹏莉, 等. 鄂南延长组绿泥石膜与储集性能关系研究[J]. 高校地质学报, 2010, 16(2): 247-254.
- DING Xiaoqi, ZHANG Shaonan, GE Pengli, et al. Relationship between reservoir properties and chlorite coatings: a case study from Yangchang Formation of south Ordos Basin, North China [J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(2): 247-254.
- [29] 朱平, 黄思静, 李德敏. 黏土矿物绿泥石对碎屑储集岩孔隙的保护[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(2): 153-156.
- ZHU Ping, HUANG Sijing, LI Demin. Effect and protection of chlorite on clastic reservoir rocks [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(2): 153-156.

(编辑 徐会永)