

文章编号: 0253-2697(2011)05-0783-08

致密砂岩自生伊利石的成因及其对相对优质储层发育的影响

——以川西地区须四段储层为例

孟万斌^{1,2} 吕正祥³ 冯明石¹ 张世华³ 李 敏^{1,2} 麦发海^{1,2}

(1. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室 四川成都 610059; 2. 成都理工大学沉积地质研究院 四川成都 610059; 3. 中石化西南油气分公司勘探开发研究院 四川成都 610081)

摘要:川西地区须家河组四段为典型的致密砂岩储层,砂岩骨架颗粒中岩屑含量高而长石含量极低。自生黏土矿物主要为伊利石和高岭石,其中自生伊利石呈碎屑颗粒包膜、充填于次生粒内溶孔中的网状集合体和充填于粒间的非网状集合体 3 种方式产出。第一种为早期形成的蒙脱石经伊蒙混层转化而来;第二种由埋藏期钾长石的伊利石化作用形成;第三种由钾长石和早期形成的高岭石在深埋期间通过伊利石化作用形成。自生伊利石的形成对致密砂岩中相对优质储层的发育具有双重影响。它能降低储层的渗透率,影响储层质量,但颗粒包膜伊利石可以阻止石英次生加大的形成从而保护原生孔隙,埋藏成岩过程中蒙皂石-伊利石的转化反应以及钾长石和高岭石的伊利石化作用能促进钾长石的溶解形成次生孔隙。因此,自生伊利石的形成对于砂岩原生孔隙的保存和次生孔隙的发育具有积极作用,因而有利于相对优质储层的形成。

关键词:致密砂岩;自生伊利石;川西地区;须四段;相对优质储层

中图分类号:TE112

文献标识码:A

The origin of authigenic illite in tight sandstones and its effect on the formation of relatively high-quality reservoirs: A case study on sandstones in the 4th member of Xujiahe Formation, western Sichuan Basin

MENG Wanbin^{1,2} LÜ Zhengxiang³ FENG Mingshi¹ ZHANG Shihua³ LI Min^{1,2} MAI Fahai^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Oil-Gas Reservoir Geology & Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Southwest Oil-Gas Branch Company, Sinopec, Chengdu 610081, China)

Abstract: The 4th member of Xujiahe Formation in the western Sichuan Basin is composed of typical tight sandstones that contain abundant debris but very scarce feldspar in skeleton grains. Authigenic clay minerals are dominated by illite and kaolinite, wherein authigenic illite can be divided into three principal types: grain-coatings, netted aggregates filled in secondary intragranular dissolved pores and non-netted aggregates filled in intergranular space. The first type transforms from the early-formed smectite through I/S mixed layer, the second type is derived from illitization by K-feldspar during burial metamorphism, and the third type is a product of illitization by K-feldspar and the early-formed kaolinite during deep burial. The formation of authigenic illite has a dual effect on the development of relatively high-quality reservoirs in tight sandstones. On the one hand, it can reduce sandstone permeability and lower the quality of reservoirs, and on the other hand, the grain-coating illite can preserve the primary porosity by preventing quartz from cementation, while the transformation of smectite to illite and the illitization of K-feldspar and kaolinite during burial diagenesis can accelerate the dissolution of K-feldspar to form secondary pores. Therefore, the formation of authigenic illite generally plays a positive role in the primary porosity preservation and the development of secondary pores of sandstones, and consequently favors the formation of relatively high-quality reservoirs.

Key words: tight sandstone; authigenic illite; western Sichuan Basin; the 4th member of Xujiahe Formation; relatively high-quality reservoir

自生伊利石形成于流动的富钾水介质环境中^[1],是砂岩储层中常见的黏土胶结物之一。储层中自生伊

利石的含量、晶体形态、集合体的赋存状态乃至形成过程都对储层有着显著的影响^[2-5]。近年来,人们对碎屑

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05002-004-002)和油气藏地质及开发工程国家重点实验室项目(国重科研 G9)资助。

第一作者及通讯作者:孟万斌,男,1968年9月生,2003年获成都理工大学博士学位,现为成都理工大学副教授,主要从事沉积学、层序地层学和储层地质学的研究与教学工作。E-mail:mwb@cdut.edu.cn

岩储层中的伊利石化作用进行了热力学^[6-7]、动力学、地球化学模拟、理论分析数值模拟以及实验研究等多个角度的研究工作^[8-15],对自生伊利石与储层发育的关系进行了讨论^[2-5,9,12,16],并利用砂岩中自生伊利石定年来分析油气藏形成期^[17]。自生伊利石会堵塞喉道,是造成碎屑岩储层渗透率很低的主要原因之一^[9,18-19],从这一角度来说,自生伊利石对储层质量的影响是负面的。但另一方面,成岩蚀变的伊利石也可像绿泥石一样形成颗粒包膜并阻止石英次生加大的形成,从而有利于原生孔隙的保存^[5];更重要的是,在埋藏成岩过程中,蒙皂石-伊利石的转化反应以及高岭石的伊利石化作用能促进钾长石的溶解形成次生孔隙^[3-4],对提高储层质量是有利的。因此,成岩过程中自生伊利石的形成对储层发育具有双重作用。

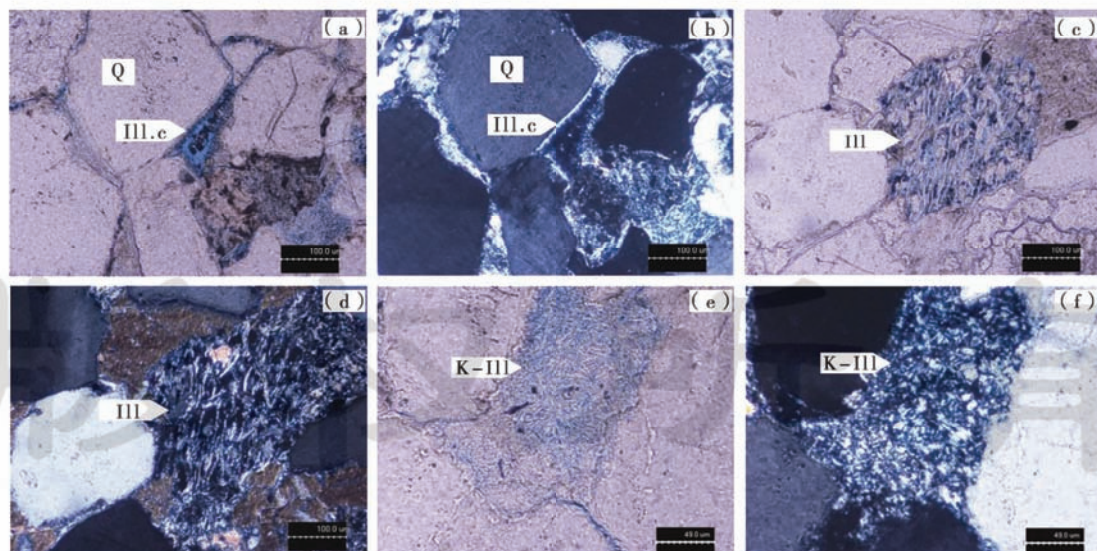
川西前陆盆地位于四川盆地西部,西起龙门山推覆带,北至米仓山—大巴山推覆带,东至达县、合川一线,南抵雅安、自贡等地,面积约 80 000 km²。区内上三叠统须家河组为一套海相、海陆交互相并向陆相过渡的砂泥岩含煤组合,蕴藏有丰富的天然气资源,其中须一段、须三段和须五段以泥质岩沉积为主,为区域性烃源岩层;须二段、须四段发育有大套河流—三角洲体系的块状砂岩,为区域性储集层^[20],目前发现的天然气主要分布于这两个地层段中。由于砂岩埋藏深度大,所经历的成岩作用复杂,造成现今砂岩平均孔隙度普遍小于 4%,为典型的超致密砂岩。但在这些超致

密砂岩中也发育相对优质储层(按吕正祥的定义^[21],川西地区须家河组相对优质储层一般指须二段储层孔隙度大于 4%,须四段储层孔隙度大于 6%的砂岩),孔隙类型绝大部分为次生孔隙,特别是长石等铝硅盐矿物溶解形成的次生孔隙所占比例可达 74%,构成了储集空间的主体^[21-22]。对于致密砂岩来说,与伊利石形成相关的钾长石的溶解是次生孔隙形成的主要机制^[3-4]。研究区储层砂岩中伊利石占 60.5%,是主要的自生黏土矿物^[2],分析这些成岩伊利石的产状、分布及其形成机制对于深入了解相对优质储层的发育具有重要的意义。

1 川西地区须四段自生伊利石的产状及分布

川西地区须四段现今岩石类型主要为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩,其次为长石石英砂岩、岩屑长石砂岩。但有研究表明,在这些含煤地层的砂岩中,至少有 10%~20%的长石在埋藏成岩过程中被煤系地层的酸性流体所溶解^[23],因此,研究区须四段砂岩沉积时长石的含量应高于现今长石的含量。

在偏光显微镜、扫描电镜和 XRD 分析中,所有样品中都发现有伊利石存在。这些伊利石大部分都具有较好的晶形,是自生伊利石而非杂基,它们主要呈 3 种方式产出:一种垂直生长于碎屑颗粒表面形成包膜[图 1(a)和图 1(b)]。能谱分析显示,这些黏土包膜只



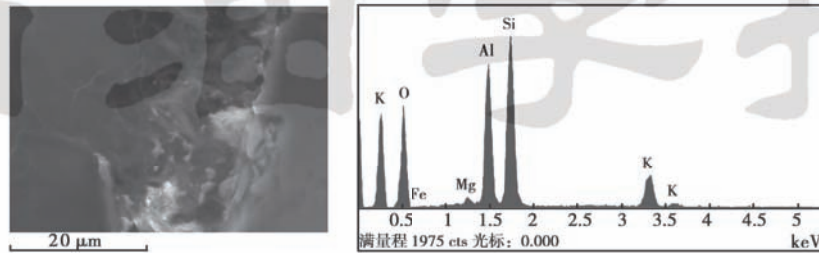
(a)、(b)为垂直于石英(Q)颗粒表面生长的伊利石包膜(III.c),但在石英颗粒接触处没有伊利石包膜存在,XC23井,3703.14m;(c)、(d)为与长石溶解有关的网格状伊利石,溶蚀残余在正交偏光下具有一致的光性方位,XC23井,4006.7m;(e)、(f)为分布于粒间的伊利石(K-III),保留了部分高岭石的原始结构(书页状集合体),晶间孔发育,XC202井,3843.46m;(a)、(c)、(e)为单偏光,(b)、(d)、(f)为正交偏光

图 1 川西地区须四段砂岩中自生伊利石偏光显微镜照片

Fig. 1 Photomicrographs for authigenic illites in sandstones of the 4th member of Xujiahe Formation, Triassic, western Sichuan Basin

含很少量的 Fe(图 2),因此排除了绿泥石的存在。SEM 揭示此类伊利石多呈“玉米片”状,集合体具有“蜂巢”状结构[图 3(a)和图 3(b)],表明其可能来自蒙脱石黏土前驱物。在颗粒的接触处很少有伊利石或其他包膜矿物存在。第二种是以网状伊利石集合体形式产于溶蚀粒内孔中,其中大部分网状伊利石都产于全部或部分被溶解的碎屑长石或岩屑中的长石中。它们表现为一组近于平行排列的伊利石集合体[图 3(d)],或彼此相交的两组伊利石[图 1(c)和图 1(d)]。

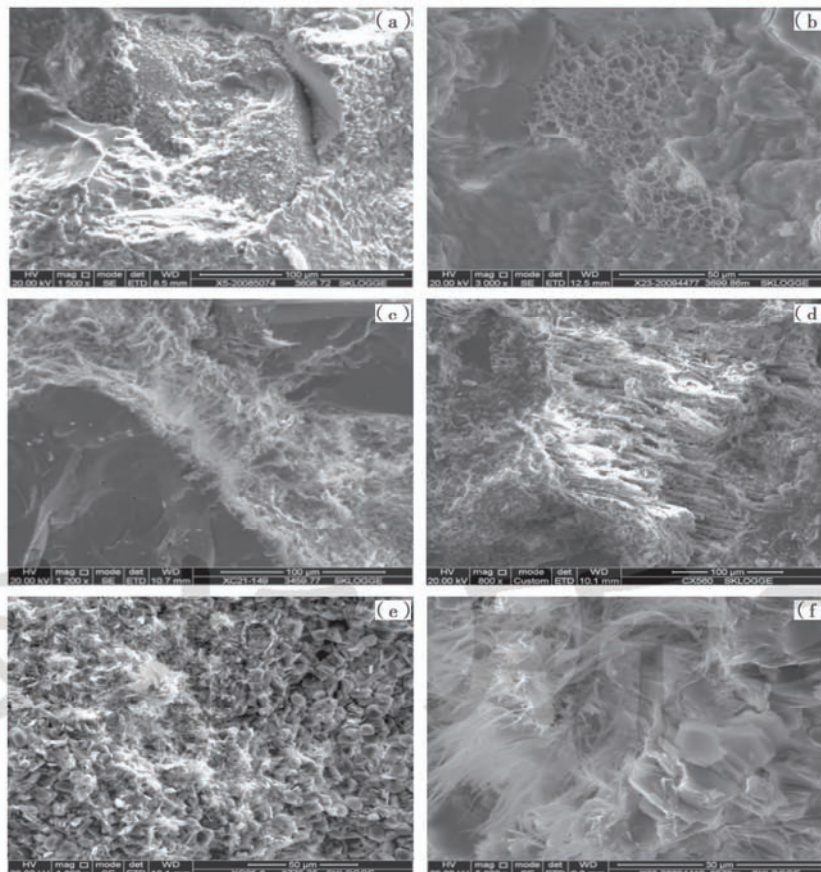
第三种是充填于碎屑颗粒之间的伊利石,它们没有明显的网状结构,常和高岭石共生,这种伊利石多呈“片状”或丝状的晶体形态[图 3(e)和图 3(f)],并不同程度地保留了部分高岭石书页状集合体的原始结构[图 1(e)和图 1(f)],因此,这些伊利石很可能是交代高岭石形成的。孔隙中充填的这种伊利石化的高岭石含有大量微孔隙,这可能是造成样品的测试孔隙度比薄片面孔隙率高的原因。在孔隙狭窄处,丝状伊利石互相搭接呈搭桥状存在[图 3(c)]。



X5 井,3 593. 39 m

图 2 须四段砂岩石英颗粒表面黏土包膜能谱分析

Fig. 2 Energy spectrum analysis of quartz grain-coating clay minerals in sandstones of the 4th member of Xujiahe Formation



(a)、(b)为生长于石英颗粒表面的伊利石包膜,具有蜂巢状结构,可能为蒙脱石转化而来,(a)X5 井 3 606. 72 m,(b)XC23 井,3 699. 86 m;(c)为喉道中呈搭桥状生长的丝状伊利石,XC21 井,3 450. 77 m;(d)为长石溶解后形成的网格状伊利石集合体,CX560 井,3 523. 41 m;(e)和(f)为正在发生伊利石化的高岭石,(e)XC25 井,3 775. 25 m,(f)XC23 井,3 570. 00 m

图 3 川西地区须四段砂岩中自生伊利石扫描电镜照片

Fig. 3 SEM photomicrographs for authigenic illites in sandstones of the 4th member of Xujiahe Formation, Triassic, western Sichuan Basin

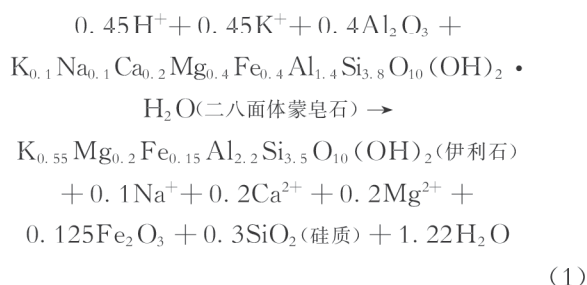
根据薄片分析,上述3种产状的自生伊利石在川西地区须四段砂岩中分布并不均匀,颗粒包膜伊利石只在部分井段见到,而充填于粒内溶孔中的网状伊利石和充填于粒间的伊利石是川西地区须四段砂岩中最主要的自生伊利石产出方式,只要有孔隙发育,几乎都可见到这两种自生伊利石的存在。

2 川西地区须四段自生伊利石的成因机制

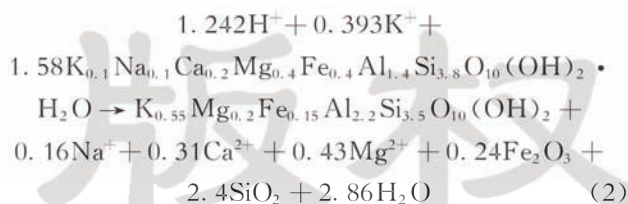
2.1 碎屑岩中自生伊利石的形成机制

伊利石和绿泥石不会在早成岩阶段的环境中生成,它们是中成岩阶段的主要成岩黏土矿物^[10]。在中成岩阶段,伊利石通过先期黏土矿物(如蒙皂石、高岭石)、碎屑长石和岩屑等蚀变而成。

碎屑岩中的蒙皂石黏土矿物既可以是早成岩阶段自生的也可以是碎屑黏土沉积成因的,其稳定性取决于地球化学环境和周围的温度^[24]。随着埋深增加,温度升高,二八面体蒙皂石通过间层矿物向伊利石转化。这种转化可以通过两条途径进行,第一条途径基本保留其中的硅,但需要有铝的供应,转换通过反应(1)进行,即



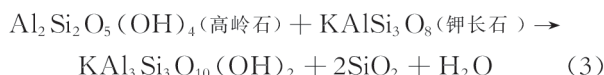
第二条途径保留其中的铝而产生额外的硅,这些硅可能以石英胶结物的方式沉淀,转换通过以下反应(2)进行:



无论通过哪种途径,这种转化过程都是通过蒙伊混层→伊蒙混层→伊利石、从无序混层到有序混层逐步进行的,并需要有钾离子的供应。在封闭的成岩体系中,反应所需的钾离子由钾长石的溶解提供。

孔隙中充填的片状和丝状伊利石主要通过高岭石族矿物与钾离子反应形成,根据平衡热力学模型,钾长石和高岭石很难稳定共生,它们在较低的成岩温度下共同出现是由低反应速率造成的。钾长石和高岭石的

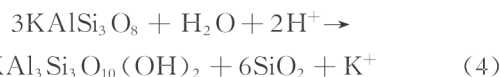
伊利石化最常见的反应为



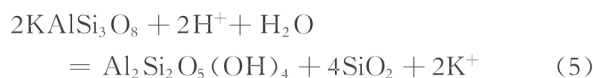
该反应是一个pH值中性的等化学反应,生成的硅质以石英次生加大或胶结物的形式沉淀下来。

砂岩中这种成岩伊利石的多少取决于两个因素,一是岩石中钾长石的原始含量;二是早成岩阶段钾长石蚀变为高岭石的程度(即埋藏阶段钾长石和高岭石的摩尔比例)^[12]。地球化学模拟表明,在封闭体系中,钾长石/高岭石的摩尔比值小于或等于1对伊利石的形成最有利^[10]。

在有酸性流体来源的情况下,钾长石的伊利石化反应也可以在没有高岭石的情况下进行,一般认为,在成岩阶段这种酸性流体来源于含有机酸、pH值低的地层水^[14],反应如下:



系统的开放性和封闭性对长石的溶解和高岭石、伊利石的沉淀有着重要影响。在同生到埋藏成岩作用初期开放体系的成岩过程中,由于长石等铝硅酸盐溶解形成的钾离子被迅速带走,很难达到伊利石沉淀所需的钾离子浓度的临界值,所以通过长石溶解形成伊利石几乎是不可能的,此时与长石等铝硅酸盐矿物溶解相伴生的自生黏土矿物主要是高岭石^[3]。该过程可用以下方程表达:



温度是自生伊利石形成的一个重要影响因素。蒙皂石-伊利石的转化反应大致开始于60~110℃,甚至在500m的浅埋藏、20~30℃的低温下就能进行^[5]。地球化学模拟表明,高岭石的伊利石化作用存在一个120~140℃阈值,在该阈值以下,由于反应速率低,高岭石的伊利石化作用不显著^[5],而超过这个阈值,高岭石、钾长石和多硅白云母的溶解作用变得很活跃,并发生伊利石的沉淀^[25],粒间孔隙中充填的自生伊利石主要形成于该阈值温度之上^[5]。据此可将砂岩中长石的溶解及黏土矿物的演化分为3个阶段^[3]:第一个阶段为同生到埋藏成岩作用初期的低温开放或半开放环境,偏基性斜长石大量溶解并伴随高岭石沉淀;第二阶段为埋藏成岩作用初期到120~140℃古地温以前,钾长石溶解,蒙皂石向伊利石转化;120~140℃古地温以后为第三阶段,钾长石的溶解和高岭石的伊利石化是该阶段两个重要的成岩反应,地层中钾长石/高岭石比值控制了长石的溶解以及溶解产物中钾长石、高岭石、伊利石3种矿物间的数量关系,并受这种反应物的消

耗量的限制,即当其中任何一种反应物耗尽后,伊利石化作用便会停止。因此,在封闭的砂岩成岩体系中,自生伊利石的含量和分布是钾长石和高岭石的含量和分布以及溶解的钾迁移能力的函数,而钾的迁移能力又是伊利石沉淀速率的函数^[26]。

流体的 pH 值对伊利石的形成也有影响。一般来说,钾长石的溶解需要酸性条件,而高岭石的伊利石化作用需要相对碱性的介质条件。然而,在同一成岩体系中,高岭石的伊利石化反应过程中向流体输出的氢离子可以供给钾长石溶解所需要的氢离子,即钾长石溶解伴随高岭石伊利石化作用的反应可以在流体 pH 值受到缓冲、缺乏足够氢离子浓度的条件下发生,而且动力学模拟已经证实,只要地层中存在高岭石和钾长石,反应一旦诱发,并且钾长石(高岭石)没有消耗完,该反应就可能持续发生,并且高岭石的伊利石化也有利于钾长石的溶解和与之有关的次生孔隙的形成^[4]。

2.2 以颗粒包膜方式存在的伊利石的成因

川西地区须四段储层砂岩中以颗粒包膜方式存在的自生伊利石多呈“玉米片”状,并且往往具有“蜂巢”状集合体形态[图 3(a)和图 3(b)],它们的分布并不连续,在碎屑颗粒接触处缺少这种包膜[图 1(a)和图 1(b)],据此推断,该类伊利石是由先期形成的蒙皂石在后来的较深埋藏阶段随温度升高逐渐转化而成,而在颗粒接触处缺少黏土包膜表明蒙皂石形成于沉积作用之后。

另据薄片观察,川西地区须四段砂岩中,伊利石包膜存在的地方很少有石英次生加大存在,用反应(2)很难解释反应产物硅的去向,因此,这种伊利石可能是蒙皂石通过第一种途径[即反应(1)]转化形成。

2.3 粒内溶孔中网状自生伊利石的成因

如前所述,在同生到埋藏成岩作用初期的开放环境中,由于长石等铝硅酸盐溶解形成的钾离子被迅速带走,偏基性的斜长石和部分钾长石溶解并伴随高岭石沉淀[反应(5)],此时岩石没有经历强烈的压实作用,原生粒间孔隙较发育,高岭石多充填于这些粒间孔隙中,薄片观察也表明高岭石或正在发生伊利石化的高岭石主要产于碎屑颗粒之间。

当成岩作用进行到埋藏初期至 120~140℃古地温以前的第二阶段,有机质成熟产生的有机酸进入地层水,同时受压实作用影响原生孔隙减少,成岩环境逐渐封闭,钾长石溶解形成的钾离子不能很快被带走,而成岩温度也没有达到高岭石发生伊利石化反应的阈值温度,此时钾长石的溶解形成伊利石[反应(4)]并沉淀于粒内溶孔中,由于钾长石的溶解往往沿解理缝进行,

形成的伊利石就沿解理缝分布形成充填于粒内溶孔中的网状伊利石集合体[图 1(c)、图 1(d)和图 3(d)]。

2.4 充填于碎屑颗粒间的伊利石的成因

随着埋深增加,成岩温度进一步升高,当温度超过 120~140℃这一阈值后,触发反应(3),高岭石开始发生伊利石化,形成充填于碎屑颗粒间的片状或丝状伊利石,该反应一直进行直至钾长石被耗尽。

川西地区须四段石英包裹体均一温度主要在 110~150℃,方解石胶结物的包裹体均一温度都超过 155℃,甚至高达 175.6℃(表 1)。这些数据表明,川西地区须四段砂岩的成岩温度已经达到或超过了高岭石伊利石化的温度界线,具备了高岭石发生伊利石化作用的条件。

川西地区须四段现今砂岩中长石含量极低,据 1272 个薄片数据统计,砂岩中长石平均含量仅 0.69%,不足 1%。X 射线衍射分析结果显示,须四段砂岩黏粒中含 13.5%的高岭石和 52.33%的伊利石,即高岭石与伊利石在须四段砂岩中共存,造成这一现象的原因是在相对深埋藏的封闭条件下,高岭石的伊利石化反应使钾长石已溶解耗尽,造成高岭石剩余,从而出现高岭石和伊利石的自生黏土矿物组合。

表 1 川西地区须四段自生矿物的包裹体均一温度
Table 1 Homogenization temperatures of fluid inclusions in authigenic minerals in sandstones of the 4th member of Xujiahe Formation

井号	井深/m	层位	均一温度/℃	备注
川孝 565	3 548.82	T ₃ x ₄	79.5	次生边石英
川孝 560	3 430.01	T ₃ x ₄	90.6	粒内孔隙石英
川丰 563	3 512.28	T ₃ x ₄	93.7	剩余孔隙石英
川孝 565	3 548.82	T ₃ x ₄	107.6	剩余孔隙石英
川高 561	3 708.63	T ₃ x ₄	110.2	剩余孔隙石英
川罗 562	4 070.52	T ₃ x ₄	116.2	次生边石英
川罗 562	4 070.52	T ₃ x ₄	116.5	次生边石英
川罗 562	4 070.52	T ₃ x ₄	117.3	次生边石英
川罗 562	4 070.52	T ₃ x ₄	118.4	次生边石英
川孝 560	3 520.9	T ₃ x ₄	123.6	剩余孔隙石英
川孝 565	3 639.36	T ₃ x ₄	126.7	孔隙石英
川孝 565	3 639.36	T ₃ x ₄	127.4	粒内孔隙石英
川高 561	3 708.63	T ₃ x ₄	145.7	次生边石英
川罗 562	4 070.52	T ₃ x ₄	146.8	剩余孔隙石英
川丰 563	3 775.12	T ₃ x ₄	171.6	方解石胶结物
川丰 563	3 775.12	T ₃ x ₄	158.7	方解石胶结物
川丰 563	3 775.12	T ₃ x ₄	175.6	交代石英的方解石

2.5 自生伊利石的形成时间

根据川西坳陷上三叠统须四段砂岩中自生伊利石 K/Ar 年龄测定,4 口井 6 个须四段砂岩样品的伊利石年龄为 129.05~96.19 Ma(表 2),相当于早白垩世,该时期为川西地区须家河组第一次最大埋深期(图 4)。

表2 川西地区须四段自生伊利石 K/Ar 测年基本数据及年龄值

Table 2 K/Ar dating data of authigenic illites in sandstones of the 4th member of Xujiache Formation

井号	井深/m	$(^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar})_m$	$(^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_m$	$(^{40}\text{Ar}^{\text{放}}/^{40}\text{Ar}^{\text{总}})/\%$	$^{40}\text{Ar}^{\text{放}}/^{40}\text{K}$	年龄值/Ma
川鸭 95	3 568.34	186.60050	7.26764	79.15	0.0077730	129.05 ± 1.24
川泉 171	3 702.57	183.61292	19.62199	91.38	0.0064842	108.28 ± 1.81
川孝 565	3 632.50	204.32484	23.11095	93.18	0.0057409	96.19 ± 1.22
川孝 565	3 632.50	214.65220	64.90838	96.79	0.0058575	98.09 ± 0.72
川丰 563	3 880.65	236.89044	15.78221	91.89	0.0069397	115.65 ± 0.96
川丰 563	3 880.65	272.56294	48.15447	96.76	0.0069544	115.88 ± 2.34

注:样品分析由中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心完成。

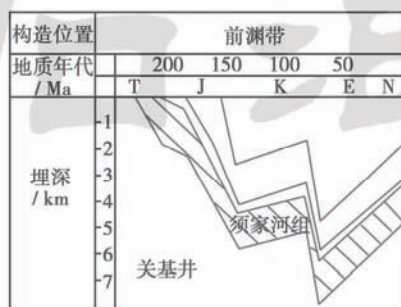
图4 川西前陆盆地前渊带埋藏史^[18]

Fig. 4 Burial history of the depression belt of western Sichuan Foreland Basin

3 自生伊利石的形成对储层发育的影响

黏土矿物与油气勘探关系密切,其总含量与储层孔隙度和渗透率为负相关^[27],但成岩伊利石对储层的渗透率和孔隙度却有不同的影响。

3.1 自生伊利石对储层渗透率的影响

渗透率和孔隙度是表征储层储集性能的两个主要参数,成岩过程中形成的自生伊利石对储层的这两个参数有重要的影响。自生伊利石呈丝状深入砂岩孔隙内,增加了流体流动通道的弯曲度,从而能大大降低砂岩的渗透性。对于含6%(体积百分数)钾长石和5%高岭石的砂岩,伊利石的形成能使渗透率的计算值降低1~3个数量级^[9]。因此,从渗透率角度来说,成岩自生伊利石对砂岩储层的影响无疑是负面的。扫描电镜分析显示,川西地区须四段砂岩中普遍存在呈毛发状、丝状、搭桥状充填于喉道中的伊利石,它们堵塞喉道,大大降低了渗透率,是造成储层低渗透-超低渗透的重要原因之一。

表3 川西地区须家河组砂岩孔隙构成状况^{①[21]}

Table 3 Composition of porosity of Xujiache Formation sandstones in western Sichuan Basin

层位	原生孔/%		次生孔/%		未分孔/% ^②		微裂隙/%		总面孔率/%	样品数/个
	绝对值 ^③	相对值 ^④	绝对值	相对值	绝对值	相对值	绝对值	相对值		
须2	0.38	31.05	0.64	52.32	0.02	1.32	0.19	15.31	1.22	155
须4	0.69	19.33	2.78	77.89	0.04	1.10	0.06	1.67	3.56	280
总计	0.58	21.20	2.01	73.81	0.03	1.14	0.11	3.85	2.73	735

注:①各种数值(除样品数外)均为平均值;②未分孔:指无法判断其成因是原生孔隙还是次生孔隙;

③绝对值:指该类孔隙面孔率;④相对值:指该类孔隙对总面孔率的贡献值。

3.2 自生伊利石对储层孔隙度的影响

3.2.1 以颗粒包膜方式存在的伊利石对储层孔隙度的影响

砂岩中自生的包膜绿泥石对储层原生和次生孔隙的保存作用已受到广泛关注,而对于自生的伊利石包膜对储层孔隙的保护作用则没有受到太多的重视。Vidar Storrøvoll^[5]研究了挪威中部海岸 Kristin 和 Lavrans 油田侏罗系 Garn 组砂岩孔隙的保存机制,认为伊利石或伊利石/蒙脱石包膜在原生孔隙保存中具有与绿泥石包膜相同的作用,它们能够通过有效地阻止石英的次生加大从而对原生孔隙的保存起到保护作用。但是,黏土包膜要对原生孔隙形成有效的保护,必须满足3个条件:①它必须形成于主要的石英胶结作用开始之前;②包膜必须是连续的且覆盖整个颗粒表面;③一个样品的绝大部分颗粒都有包膜发育。研究区须四段砂岩中部分井段的样品中发育自生伊利石包膜,并保留部分原生孔隙,但这种黏土包膜并不是普遍存在的,而且没有覆盖整个颗粒表面,对原生孔隙的保存作用有限。铸体薄片分析表明,川西地区须四段砂岩储层的主要孔隙类型为次生孔隙,原生孔隙所占比例很小,原生孔隙面孔率一般不超过0.7%,对总面孔率的贡献值不足20%(表3)。另外,蒙皂石-伊利石反应伴随钾长石的溶解并形成溶蚀孔隙,所以伊利石包膜的形成也能促进次生孔隙的发育。阴极发光分析发现,须四段存在钾长石的早期溶解并形成了次生溶蚀孔隙,但它们已被方解石全部充填,未能保留下来形成有效孔隙。因此从最终效果来说,这种伊利石包膜对川西地区须四段储层孔隙的发育和保存并不具有特别重要的意义。

3.2.2 孔隙充填伊利石的形对储层孔隙度的意义

孔隙中充填的伊利石是由钾长石和高岭石在埋藏成岩过程中通过伊利石化作用形成的,而钾长石的溶解是封闭条件下高岭石的伊利石化的必要伴随反应,即这些高岭石的伊利石化导致了钾长石的大量溶解形成次生孔隙,而高岭石的伊利石化过程是一个减体积的反应,反应过程有约 10.7% 的额外空间产生^[3]。川西地区须四段砂岩次生孔隙对砂岩面孔率的贡献值高达 78% (表 3),而这些次生孔隙主要是长石和岩屑中的长石组分发生溶解形成的。此外, Hurst 和 Nadeau^[28] 利用背散电子显微镜研究了自生黏土矿物的晶间孔隙,自生伊利石的晶间孔隙平均值为 63%,而高岭石为 43%,即高岭石发生伊利石化后晶间孔隙体积增加了,这些晶间孔隙中的一部分可能是有效的储集空间。因此,无论是从促进钾长石的溶解产生次生孔隙还是从引起孔隙体积的变化来说,高岭石的伊利石化作用对砂岩储层的发育都是有利的,这也是成岩伊利石对砂岩储层发育的重要意义所在。

4 结 论

(1) 川西地区上三叠统须家河组四段砂岩类型主要为岩屑砂岩和岩屑石英砂岩,砂岩骨架颗粒中碎屑长石含量极低,残余的微量长石主要为钾长石。自生黏土矿物主要为伊利石,它们呈颗粒包膜、充填粒内孔的网状集合体和充填粒间的非网状集合体 3 种形态存在。

(2) 川西地区以颗粒包膜方式存在的伊利石是蒙皂石通过第一种途径转化形成的;充填粒内溶孔中的伊利石由钾长石在封闭环境中的溶解形成;充填于碎屑颗粒间的伊利石是由成岩早期形成的高岭石在深埋藏条件下通过伊利石化作用所形成。

(3) 成岩过程中自生伊利石的形对储层发育具有双重作用。自生伊利石能降低储层的渗透率,对储层渗透率的影响是负面的;但在深埋藏封闭条件下,高岭石向伊利石的转化能促进钾长石的溶解形成次生孔隙,同时该转化本身增加了岩石的总孔隙体积和黏土矿物晶间孔隙,因此对深埋藏条件下砂岩次生孔隙的发育具有显著的积极作用,对致密砂岩中相对优质储层的形成具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 于明德,王璞珺,施昌瑞,等. 焉耆盆地包裹体特征和伊利石测年对油气成藏期次的指示[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2009,39(1):45-52.
Yu Mingde, Wang Pujun, Shi Changrui, et al. Indication of oil-gas migration & accumulation with fluid inclusion characteristics and

illite dating in Yanqi Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(1): 45-52.

[2] 刘昊年,黄思静,邓丽丽,等. 碎屑岩自生粘土矿物的沉淀作用及其对储层的影响——以川西坳陷上三叠统须家河组砂岩为例[J]. 华南地质与矿产, 2008(4): 1-7.

Liu Haonian, Huang Sijing, Deng Lili, et al. Precipitation interaction of authigenic clay minerals for clastic reservoirs and its effect on reservoirs: A case study of sandstones of Xujiahe Formation of Upper Triassic from Western Sichuan Depression[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2008(4): 1-7.

[3] 黄思静,黄可可,冯文立,等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成:来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 498-506.

Huang Sijing, Huang Keke, Feng Wenli, et al. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis: A case study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression[J]. Geochimica, 2009, 38(5): 498-506.

[4] 黄思静,孙伟,黄培培,等. 鄂尔多斯盆地东部太原组碎屑岩中自生伊利石形成机制及其对储层形成的影响[J]. 矿物岩石, 2009, 29(4): 25-32.

Huang Sijing, Sun Wei, Huang Peipei, et al. The origin of authigenic illite and its effects on reservoir quality: A case study from Taiyuan sandstone, Eastern Ordos Basin[J]. J. Mineral Petrol., 2009, 29(4): 25-32.

[5] Storvoll V, Bjørlykke K, Karlsen D, et al. Porosity preservation in reservoir sandstones due to grain-coating illite: A study of the Jurassic Garn Formation from the Kristin and Lavrans fields, offshore Mid-Norway[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(6): 767-781.

[6] 黄可可,黄思静,佟宏鹏,等. 长石溶解过程的热力学计算及其在碎屑岩储层研究中的意义[J]. 地质通报, 2009, 28(4): 474-482.

Huang Keke, Huang Sijing, Tong Hongpeng, et al. Thermodynamic calculation of feldspar dissolution and its significance on research of clastic reservoir[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(4): 474-482.

[7] 杨献忠,叶念军. 蒙脱石伊利石化过程中伊—蒙混层形成的 Gibbs 自由能[J]. 地质地球化学, 2003, 31(3): 20-25.

Yang Xianzhong, Ye Nianjun. Gibbs free energies of formation for mixed-layer illite-montmorillonite in the process of montmorillonite illitization[J]. Geology-Geochemistry, 2003, 31(3): 20-25.

[8] Elliott W C, Aronson J L, Matisoff G, et al. Kinetics of the smectite to illite transformation in the Denver Basin: Clay mineral, K-Ar data, and mathematical model results[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(3): 436-462.

[9] Lander R H, Bonnell L M. A model for fibrous illite nucleation and growth in sandstones[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1161-1187.

[10] Sanjuan B, Girard J P, Lanini S, et al. Geochemical modeling of diagenetic illite and quartz cement formation in Brent sandstone reservoirs: Example of the Hild Field, Norwegian North Sea[G]

- // Worden R H, Morad S. Clay mineral cements in sandstones, International Association of Sedimentologists Special Publication 34. Oxford; Blackwell Publishing, 2003; 425-452.
- [11] 石广仁. 蒙皂石转化伊利石的数值模拟——溶解沉淀模型与化学动力学模型[J]. 沉积学报, 2007, 25(5): 693-700.
Shi Guangren. Numerical modeling for the smectite to illite transformation; Dissolution-precipitation model and kinetic model [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5): 693-700.
- [12] Franks S G, Zwingmann H. Origin and timing of late diagenetic illite in the Permian-Carboniferous Unayzah sandstone reservoirs of Saudi Arabia[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1133-1159.
- [13] Bauer A, Velde B, Gaupp R. Experimental constraints on illite crystal morphology[J]. Clay Minerals, 2000, 35(3): 587-597.
- [14] Manning D A C. Experimental studies of clay mineral occurrence [G] // Worden R H, Morad S. Clay mineral cements in sandstones, International Association of Sedimentologists Special Publication 34. Oxford; Blackwell Publishing, 2003; 177-190.
- [15] 石广仁. 蒙皂石向伊利石转化的溶解沉淀模型[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 47-50.
Shi Guangren. Dissolution-precipitation model for smectite-illite transformation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 47-50.
- [16] 王飞宇, 郝石生, 雷加锦. 砂岩储层中自生伊利石定年分析油气藏形成期[J]. 石油学报, 1998, 19(2): 40-43.
Wang Feiyu, Hao Shisheng, Lei Jiajin. The isotopic dating of authigenic illite and timing of hydrocarbon fluid emplacement in sandstone reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(2): 40-43.
- [17] 杜业波, 季汉成, 朱筱敏. 川西前陆盆地上三叠统须家河组成岩相研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(3): 359-364.
Du Yebo, Ji Hancheng, Zhu Xiaomin. Research on the diagenetic facies of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Western Sichuan Foreland Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(3): 359-364.
- [18] 杜业波, 季汉成, 吴因业, 等. 前陆层序致密储层的单因素成岩相分析[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 48-52.
Du Yebo, Ji Hancheng, Wu Yinye, et al. Single factor diagenetic facies analysis of tight reservoir in western Sichuan foreland basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 48-52.
- [19] 孙建孟, 李召成, 关唯, 等. 用测井确定储层敏感性[J]. 石油学报, 1999, 20(4): 34-38.
Sun Jianmeng, Li Zhaocheng, Guan Ju, et al. Reservoir sensitivity determination by well logging[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(4): 34-38.
- [20] 张翥, 田作基, 吴胜华, 等. 川西须家河组储层成岩演化[J]. 岩石学报, 2008, 24(9): 2179-2184.
Zhang Nai, Tian Zuoji, Wu Shenghua, et al. Study Xujiahe reservoir diagenetic process, Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(9): 2179-2184.
- [21] 吕正祥, 刘四兵. 川西须家河组超致密砂岩成岩作用与相对优质储层形成机制[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2373-2383.
Lü Zhengxiang, Liu Sibing. Ultra-tight sandstone diagenesis and mechanism for the formation of relatively high-quality reservoir of Xujiahe Group in western Sichuan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2373-2383.
- [22] 李士祥, 胡明毅, 李浮萍. 川西前陆盆地上三叠统须家河组砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 535-539.
Li Shixiang, Hu Mingyi, Li Fuping. Diagenesis and porosity evolution of upper Triassic Xujiahe Formation sandstone in Western Sichuan foreland basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 535-539.
- [23] 黄思静, 佟宏鹏, 黄可可, 等. 阴极发光分析在恢复砂岩碎屑长石含量中的应用——鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠统须家河组的研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1013-1019.
Huang Sijing, Tong Hongpeng, Huang Keke, et al. Application of cathodoluminescence analyse to the recovery of feldspar content in sandstone; A case study of Upper Paleozoic of Ordos Basin and Xujiahe Formation of Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(10): 1013-1019.
- [24] McKinley J M, Worden R H, Ruffell A H. Smectite in sandstones; a review of the controls on occurrence and behavior during diagenesis [G] // Worden R H, Morad S. Clay mineral cements in sandstones, International Association of Sedimentologists Special Publication 34. Oxford; Blackwell Publishing, 2003; 109-128.
- [25] Bross É, Margueron T, Cassou C, et al. The formation and stability of kaolinite in Brent sandstone reservoirs; a modeling approach [G] // Worden R H, Morad S. Clay mineral cements in sandstones, International Association of Sedimentologists Special Publication 34. Oxford; Blackwell Publishing, 2003; 383-408.
- [26] Geoffrey T, Boudreau B P, Mogens R, et al. Simulation of potassium feldspar dissolution and illitization in the Statfjord Formation, North Sea[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(4): 621-635.
- [27] 陈鑫, 钟建华, 袁静, 等. 渤海洼陷深层碎屑岩储集层中的黏土矿物特征及油气意义[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 201-207.
Chen Xin, Zhong Jianhua, Yuan Jing, et al. Characteristics of clay mineral and its hydrocarbon significance in Paleogene clastic reservoir of Bonan Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 201-207.
- [28] Hurst A, Nadeau P H. Clay microporosity in reservoir sandstones; An application of quantitative electron microscopy in petrophysical evaluation[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(4): 563-573.

(收稿日期 2011-03-08 改回日期 2011-06-30 责任编辑 张怡)