

文章编号: 1000-0550(2008) 03-0459-10

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¹

孙治雷^{1,2} 黄思静^{3,4} 张玉修⁵ 王庆东^{3,4} 包申旭^{1,2} 孙致学^{3,4}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640 2 中国科学院研究生院 北京 100049
3 成都理工大学 成都 610051 4 “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室 成都 610051
5 中国地质大学地球科学与资源学院青藏高原地质研究中心 北京 100083)

摘要 由于在成岩过程中能有效抵抗上覆岩层的机械压实作用,抑制石英在颗粒表面成核的数量,自生绿泥石包膜对四川盆地须家河组砂岩储层的原生粒间孔的保存起到了重要的作用。须家河组早期自生绿泥石物质来源主要有同沉积的富铁沉积物的溶解、河流溶解铁的絮凝沉淀以及相邻泥岩压释水的贯入,主要以新生沉淀形式集中形成于同生期至早成岩早期。成岩中后期,由于下伏富 Mg 流体沿裂缝系统的持续进入,须 2 段的自生绿泥石的继续生长得到了充足的物质来源,其 MgO 的含量随地层深度明显增加,而须 4 段后期再生长现象不明显。该区自生绿泥石包膜对储层物性的影响通过绿泥石含量与参与孔隙度的关系以及孔隙度分布频率图可以得到较好的评估。从对储层的影响来说,自生绿泥石包膜存在一个最合适的厚度值,超过或低于这个值就会对储层造成负面影响而无法保护储层,该区此最适合的厚度值为 5~10 μm。

关键词 自生绿泥石 须家河组 物质来源 成岩作用 储层质量

第一作者简介 孙治雷 男 1975 年出生 在读博士研究生 地球化学 E-mail sun_zhile@tom.com

中图分类号 TE122.2+3 P588.2 **文献标识码** A

0 引言

砂岩储层中自生粘土矿物的研究近年来得到了广泛重视,一方面源于其本身的来源复杂性与分布广泛性,另一方面也源于其与储层质量千丝万缕的关系。砂岩储层中的自生粘土矿物虽然含量常常不大,但由于其特殊的矿物学形态和生长习性,往往占据并控制了大多数的颗粒表面和孔隙空间^[1],过去常常认为它是与自生硅质、自生碳酸盐一样对储层起破坏性作用的一种成分^[2],它们占据孔隙空间,堵塞喉道,增加束缚水含量,引起油层损害^[3];然而,近年来为数不少的研究成果业已揭示了它对储层质量积极的一面^[1,2,4~6],最典型的就是自生绿泥石包膜,由于它能阻止石英颗粒的成核,抵抗机械压实作用而使储层质量得到有效的保护^[1,2,5~13],同时,自生绿泥石规则的晶间孔也对储层的微孔隙的改善起到了一定作用^[7]。大量研究证明,含高异常孔隙度的储层往往都与自生绿泥石的颗粒包膜有关^[1,5,6,8~10],这也使储层中的自生绿泥石引起众多学者的广泛兴趣。

四川盆地须家河组是国内外少见的晚三叠世非常规致密砂岩气藏储层,具“超深、超低孔渗、超高压、超晚期构造”^④,勘探实践表明,即使在如此复杂的地质背景下,该地层仍然存在着自生孔隙富集区,成为勘探开发的亮点区域。其中,自生绿泥石扮演了重要的角色。本文通过对须家河组的大量砂岩样品的综合分析,试图探究该地层中的自生绿泥石的来源和成岩演化特征,进而评价自生绿泥石对须家河组砂岩储层的存在意义。

1 矿物学及分布特征

须家河组的 104 个砂岩样的 XRD 的统计结果显示,该砂岩储层中粘土矿物的含量占岩石的 4.63%,在小于 2 μm 的粘土质点中,绿泥石含量为 37.16%,仅次于含量为 55.77% 的伊利石,是该区最重要的粘土矿物之一。

1.1 XRD 衍射特征

在 2θ 角为 2.5°~30° 之间定向样品的 X 射线衍射谱图(图 1)上,该区砂岩储层的绿泥石普遍具有

¹ 国家自然科学基金项目(批准号:40672086)资助

^④ 中石化西南分公司勘探开发研究院,川西上三叠统须家河组天然气成矿规律及富集带预测,2003

收稿日期:2007-06-03 收修修改稿日期:2007-10-25

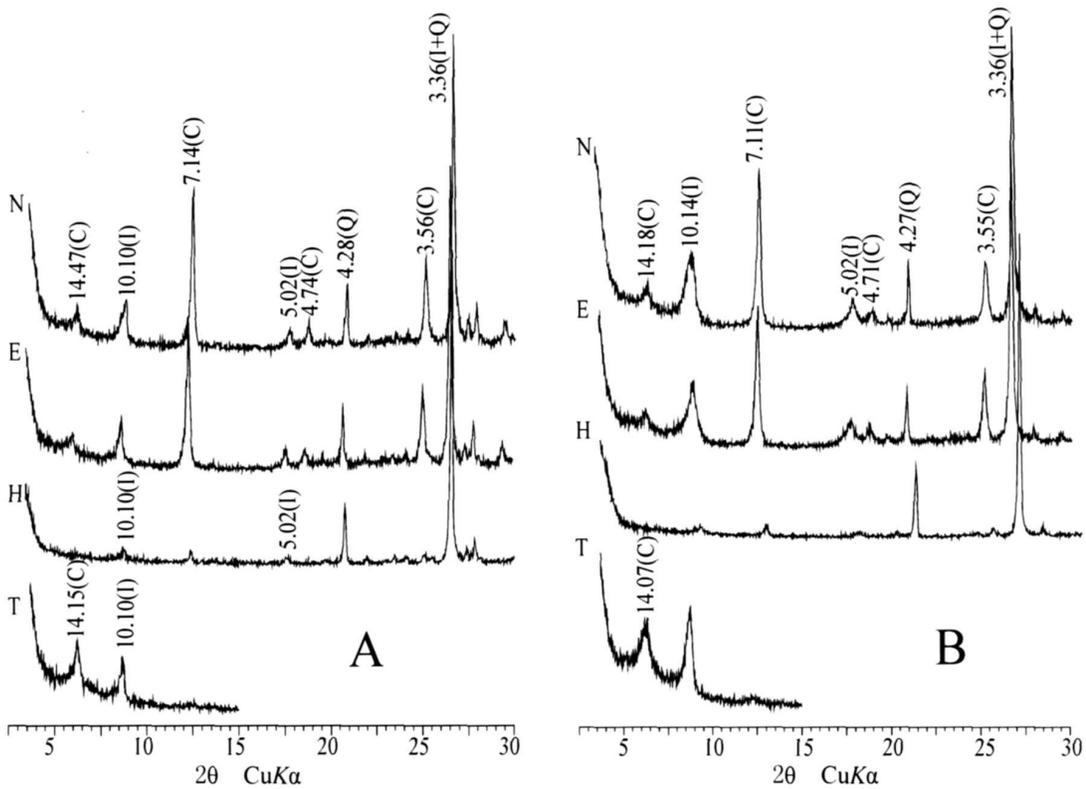


图 1 须家河组砂岩储层自生绿泥石 X 射线衍射图

A——川高 561 井, 须 2 段, 4 994-75 m, 绿泥石相对含量约 62%, 伊利石 38%; B——川高 561 井, 须 4 段, 3 712-85 m, 绿泥石石相对含量约 50%, 伊利石 50%。图中, N 为定向样品空气自然干燥曲线, E 为乙二醇饱和和处理曲线, H 为加盐酸处理曲线, T 为加热 550 °C 处理曲线。括号内字母, C—绿泥石, I—伊利石, Q—石英

Fig 1 XRD patterns of the authigenic chlorite in Xujiache sandstone reservoirs

$d_{001} = 14.47 \times 10^{-1}$ nm、 $d_{002} = 7.14 \times 10^{-1}$ nm、 $d_{003} = 4.74 \times 10^{-1}$ nm、 $d_{004} = 3.56 \times 10^{-1}$ nm 的整数基面衍射序列, 其衍射峰强度 d_{001} 与 d_{003} 大大低于 d_{002} 与 d_{004} , 表明了这些绿泥石富含铁的特征^[3]。

1.2 形貌特征

显微镜观察表明, 该区绿泥石既有交代骨架颗粒, 作为孔隙充填胶结物(图 2-A), 但更多地以颗粒包膜的形式出现(图 2-B、C、D、F)。

扫描电镜观察, 该区绿泥石多位于粒表, 也有位于粒间者, 其单体形貌多为叶片状(图 2-E、F), 聚合体呈绒线球状、玫瑰花状等, 其单体常常垂直颗粒表面呈栉壳状生长(图 C、F)。

1.3 分布特征

薄片偏光显微镜鉴定辅以 SEM 观察能有效弥补 XRD 衍射不能区分绿泥石成因(自生的还是碎屑的)的缺点, 而大量密集取样的薄片定量鉴定结果的统计是当前获取储层中自生矿物信息的一个传统有效的

手段。

根据系统取心的川高 561 井与川孝 565 井自生粘土矿物薄片(取样间隔 ≤ 10 cm/个)的定量鉴定结果作出图 3 据此可见: ① 自生绿泥石的分布具有明显的分带性, 本区须 2 段底部自生绿泥石陡然增加, 相对含量大, 个别样品中自生绿泥石的含量甚至达到 100%, 且在一定厚度范围内具有明显的控制作用; ④ 须 4 段伊利石的含量占绝对优势, 绿泥石含量很低, 且存在高岭石, 在某些井(比如川罗 562 井)可大量出现。一个重要的原因可能是须 4 段较须 2 段具有高渗滤条件(近 2000 个样品测试结果表明须 2 段平均氦气孔隙度 3.76%, 须 4 段为 6.01%), 更容易产生高岭石而非绿泥石^[3]; ④ 此外, 研究中发现个别井(如川孝 565 井)的须 2 段并未出现明显的自生绿泥石的迹象, 这说明绿泥石虽然大多集中出现在须 2 段(可能对应某种不同性质的砂岩夹层), 但其在平面上的展布也是不均匀的, 可能类似于透镜状分布。

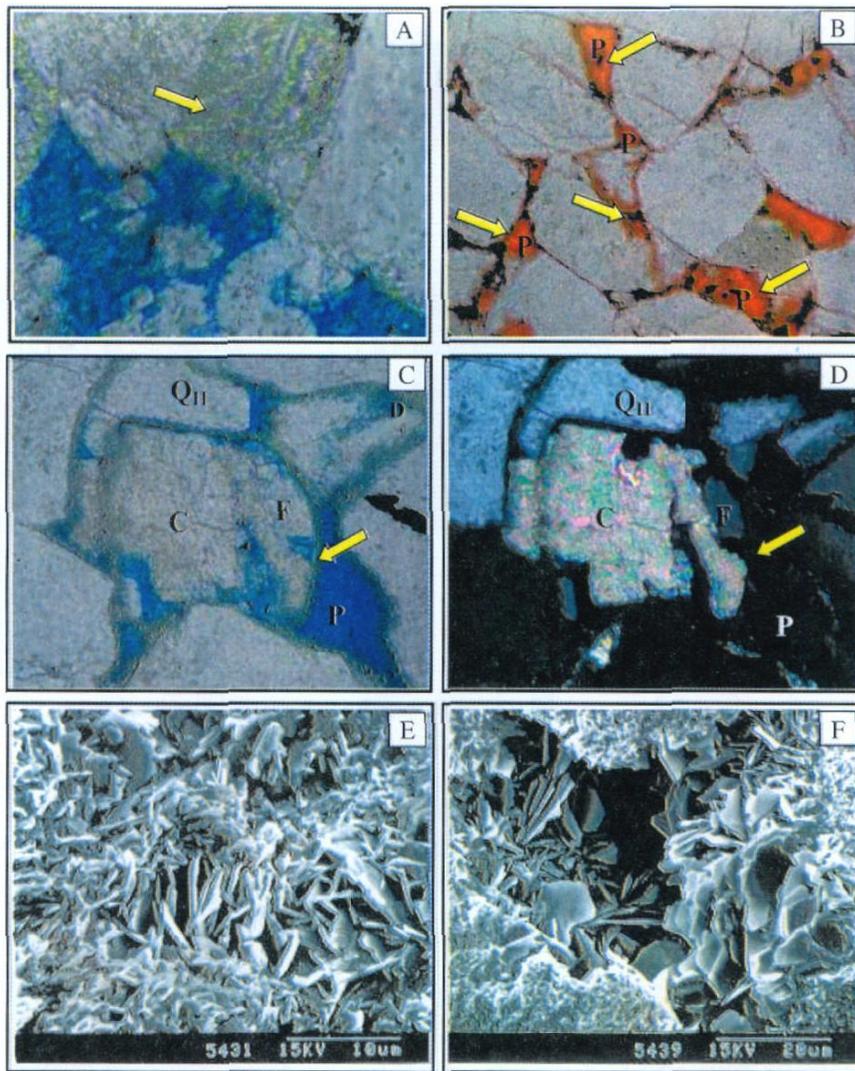


图 2 须家河组自生绿泥石矿物形态及赋存状态显微镜照相 (A—D) 和 SEM 照相 (E—F)

A——沿长石解理分布的纤维状交代绿泥石 (箭头所指处)。川孝 565 井, 3 560.25 m, 须 4 段, 蓝色铸片, 单偏光, 对角线长 0.20 mm。B——自生绿泥石颗粒包膜 (箭头所指处), 颗粒以点、线接触为主, 颗粒接触处无绿泥石, 原生粒间孔 (P) 得以较好的保存, 川高 561 井, 4 992.23 m, 须 2 段, 红色铸片, 单偏光, 对角线长 0.75 mm。C、D——自生绿泥石颗粒包膜 (箭头所指), 由近于等厚的纤状绿泥石垂直粒表生长, 包膜内大部分系长石溶解后沉淀的碳酸盐矿物 (C), 亦有少量长石 (F) 残余, 另可见受绿泥石包膜保护的残余粒间孔 (P) 和受绿泥石包膜限制生长的次生石英 (Q_{II}), 川高 561 井, 4 992.9 m, 须 2 段, 蓝色铸片, C、D 分别为单偏光与正交偏光照片, 对角线长 0.28 mm。E——颗粒表面叶片状的自生绿泥石, 川高 561 井, 4 940.91 m, 须 2 段, SEM 照片。F——绿泥石包膜之间的残余粒间孔 (P), 绿泥石呈自形的片状, 垂直颗粒生长, 厚度达到 10 μm 以上。川高 561 井, 4 996.29 m, 须 2 段。SEM 照片。

Fig. 2 Optical microscopic observations (A—D) and SEM images (E—F) of the authigenic chlorite minerals in Xujiache reservoirs

2 自生绿泥石的成岩演化

2.1 沉淀温度与时间

须家河组 (尤其是须 2 段) 大多数的自生绿泥石的沉淀作用是在较早的成岩阶段发生的, 主要依据是有绿泥石衬里的岩石 (或岩石中的某些部位的碎屑颗粒群) 颗粒间接触强度较低, 颗粒接触处没有绿泥石, 并有相当一部分残余粒间孔得到有效保存 (图 2-

B)。这些自生绿泥石很明显是先于压实作用剧增的时期而形成的。

大多数须 4 段 (图 2-A) 的粘土包膜比须 2 段 (图 2-C、F) 更薄, 其沉淀开始的主要时间段仍与须 2 段类似, 即从较早的成岩阶段开始, 同时, 由于储层中经常可以见到绿泥石包膜形成后的孔隙中存在自生高岭石现象 (图 4-A、B), 说明自生绿泥石也略早于须 4 段长石的溶解时间。从相对时间来说, 还有一部分须

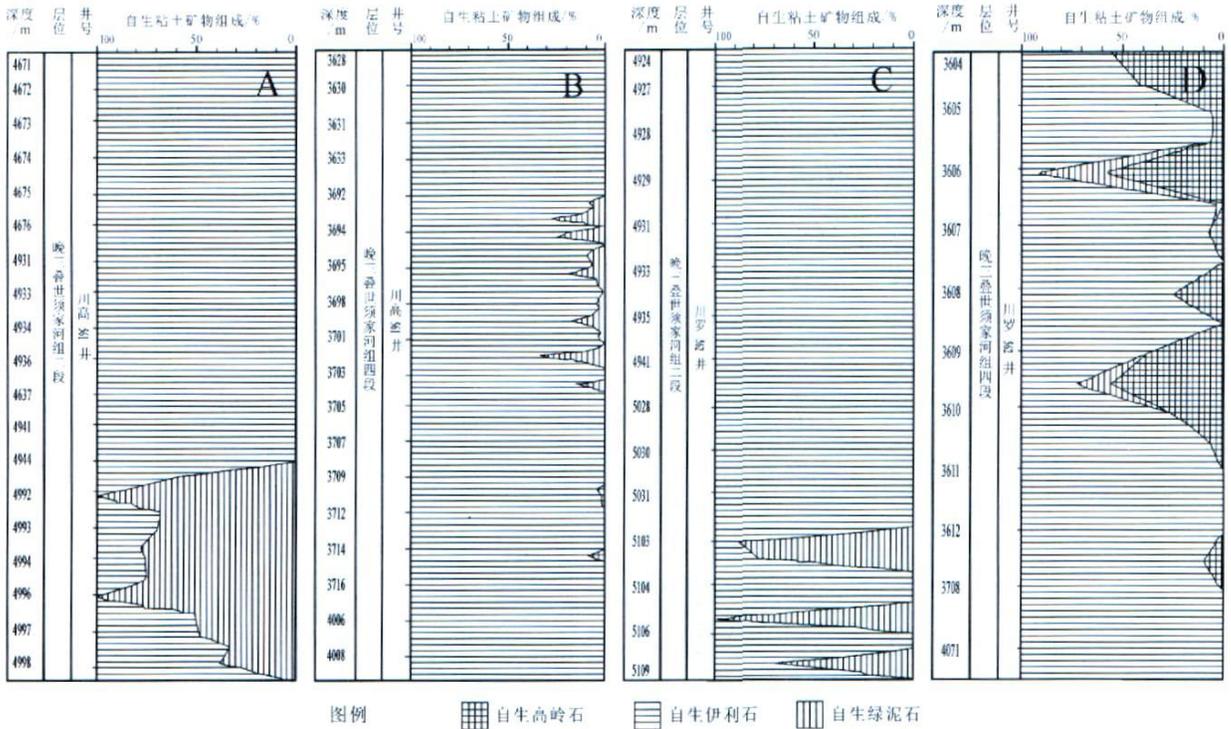


图 3 须家河组砂岩储层中主要自生粘土矿物单井纵向分布图

图中, A—川高 561 井须 2 段; B—川高 561 井须 2 段 4 段; C—川罗 562 井须 2 段; D—川罗 562 井须 4 段。
其中, 横坐标为各主要自生粘土矿物含量, 单位: %; 纵坐标为主要采样点埋深, 单位: m。

Fig. 3 Vertical distribution patterns of main clay minerals of Xujiache sandstones in single well

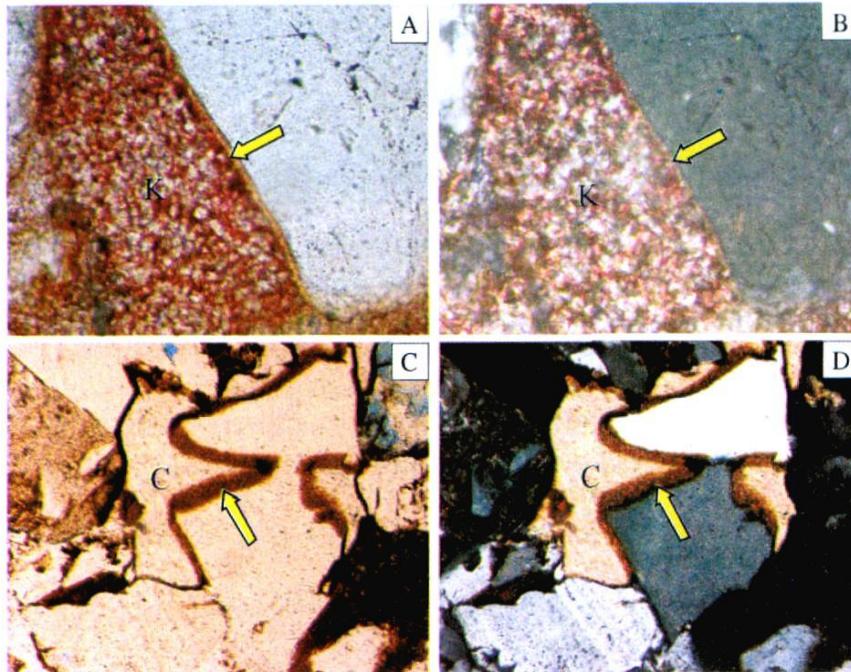


图 4 须家河组自生绿泥石包膜与自生高岭石(A,B)以及自生碳酸盐胶结物(C,D)占位关系显微镜照相

A、B——自生绿泥石包膜(箭头所指处)与自生高岭石(K)的占位关系显微照相。高岭石充填受绿泥石包膜保护的孔隙,表明其沉淀于绿泥石包膜之后。A——自生绿泥石包膜(箭头所指处)与自生高岭石(K)的占位关系显微照相。川罗 562 井, 3 606.82 m, 须 4 段。红色铸片, A、B 分别为单偏光与正交偏光照片单偏光, 对角线长 0.375 mm。C、D——自生绿泥石包膜箭头所指处)被稍后沉淀的碳酸盐胶结物(C)所包围。自生碳酸盐质地纯净, 晶形粗大, 并充填原生孔隙, 为早期碳酸盐沉淀, 并限制了自生绿泥石包膜的进一步生长。川罗 565 井, 3 560.75 m, 须 4 段。铸片, 单偏光, C、D 分别为为单偏光与正交偏光照片, 对角线长 0.265 mm。

Fig. 4 Optical microscopic observations of the occupying locations between authigenic chlorite and kaolinite (A, B)

on carbonate (C, D) in Xujiache reservoirs

4段的绿泥石可能是在长石溶解和(或)自生石英沉淀之后发生的,依据有这样两点:(a)有自生绿泥石和自生伊利石同时沉淀的现象,因而绿泥石沉淀的时候,孔隙流体中存在较多的 K^+ 离子并较为缺乏 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 离子,说明这些自生绿泥石是在浅色矿物(如长石)溶解之后发生的;(b)须 4段自生绿泥石可以在长石溶解后的粒内孔中生长。

偏光显微镜与 SEM 的结果表明须家河砂岩储层中自生绿泥石普遍出现于自生方解石胶结物之前(图 4-C、D),故通过与方解石胶结物的形成温度的对比,也可以大体确定绿泥石包膜大规模形成的温度和时间。以偏光显微镜与 XRD 甄选该地层含 100% 自生方解石胶结物的砂岩样品进行氧同位素的测试,按地区实际取 -7.5% (SMOW 标准)作为计算的流体同位素的 $\delta^{18}O$ 值,据 (Northrop 1966)的公式^[14]计算其沉淀温度。结果表明:所有 5 个样品的 $\delta^{18}O$ 在 13.85 到 15.88 (SMOW, ‰)之间,计算所得的最大沉淀温度为 66.3°C,最小 53.0°C,平均 56.7°C。此结果表明,较自生方解石沉淀时间更早一些的自生绿泥石薄膜其沉淀温度应该是略低于 56.7°C,也就是其主要是在早成岩期形成甚至同生期形成的,温度范围应在古常温至 60°C 左右。虽然砂岩储层中自生绿泥石形成的温度范围跨度很大^[1,2,11],甚至有明确的早期和晚期绿泥石之分^[4],但最近的研究表明其在 20~50°C^[6,11]至 70~80°C^[11]生长最为集中,与之对应,埋深从 < 1 000 m 到 2 000~2 500 m 之间,这与本次研究结果是一致的。

2.2 物质来源

有关自生绿泥石包膜的来源至今仍有争议,有研究认为颗粒早期的富铁粘土包壳的早期成岩转化是形成绿泥石包膜的重要原因^[2,6,9,11],也有研究认为早期的绿泥石包膜很多是直接从孔隙水新生沉淀得来^[1,6]。这应该是一种现象的两种成因。然而,对于须家河组地层而言,在该区(或更大范围的四川盆地)的地层中从未发现绿泥石、蒙皂石和蒙皂石绿泥石等间层矿物^[3];同时,从矿物学特征上来看,该地层中的绿泥石包膜并无通过蒙脱石质先驱粘土包膜转化过来以后遗留的蜂巢状特点(蜂巢状特点是膨胀性先驱粘土矿物遗留的重要的外形特点)^[10],这说明,该地层中大部分早期绿泥石包膜的生成机制是新生沉淀形式。

高岭石在成岩过程中的转化也是自生绿泥石形成的一个重要来源^[10,15]。但在须 2段成岩早期,由

于干旱的气候条件以及海相沉积环境的存在^[16],高岭石大规模出现的可能性不大,因此其在成岩后期转化为绿泥石的可能性也不大。在 SEM 与电子探针相结合的分析中未发现以高岭石“假形”存在的绿泥石晶体,也证明了这一点。

须家河组的绿泥石包膜是富铁的,电子探针分析数据(表 1)显示其 FeO 的含量大多数在 20% 以上,许多样品超过了 30%。该区自生绿泥石包膜的形成所必需的铁的可能来源主要有三个:第一、同沉积的富铁沉积物。从龙门山古隆起搬运来的富中基性岩浆岩岩屑及镁暗色矿物的物源地层从理论上可以为绿泥石提供充足的物质来源;第二、河流的溶解铁。已有研究表明,须家河组早期沉淀时期仍属于边缘海或与广海连通的局限水体时期,仍有相当盐度^[17],河流带来的溶解铁(如风化和搬运过程中黑云母、角闪石等铁、镁暗色矿物水化析出的铁)在此环境中絮凝卸载很可能为绿泥石的早期形成提供一部分铁。第三、泥岩压释水的贯入。须家河组是典型的砂、泥岩互层,成岩过程中与须 2段、须 4段相邻的泥岩层(须 3段、须 5段)会向砂岩层排放具有丰富铁、镁离子的压释水,从而可为绿泥石在成岩中后期的继续生长提供铁源。

自生绿泥石在成岩中、晚期继续生长现象比较普遍,从图 2-A、C 可以看出,相当一部分自生绿泥石出现在长石溶解之后,特别是须 2段,在早期形成的包膜基础上,其晶体在后期尺寸普遍加大,规则程度也越高。电子探针分析结果(表 1)表明,须 2段绿泥石随深度的加大,含有更高的 MgO 与 FeO ,其中, FeO 含量随深度仅略有增加,而 MgO 却有明显的增加态势,4 993.07 m 深度绿泥石中的 MgO 含量(7.77%)是 4 931.97 m 深度同种成分(3.79%)的 2 倍还多。以 $MgO/(FeO+MgO)$ 表示的指数也呈明显的升高趋势(4 931.97 m 深度与 4 935.27 m 由于深度相似,差别很小),这说明该储层中绿泥石后期的继续生长得到了更多富 Mg 流体的影响。

由于越靠近深部地层,自生绿泥石中的 MgO 含量越高,显示出其物质来源与下伏雷口坡组厚度巨大的蒸发盐的存在有密切的关系。初步研究表明,其运移驱动力是地下流体的热循环对流机制,而运移的通道则是须 2段非常发育的裂缝系统。须 2段同深度地层中的自生白云石胶结物同位素分析结果表明,其 $\delta^{13}C$ 值靠近 Q 具有浓厚的海相色彩;另外,统计结果表明,须 2段岩心裂缝达到 14.2 条/m,而有些钻井的薄片系统统计结果其见缝频率为 73.3% (川孝 565

3 对储层质量的影响

3.1 对孔隙度的影响

自生绿泥石包膜对储层孔隙的保护作用如今已经被很多研究者肯定,大多数学者对此机制的解释是自生绿泥石是通过阻止石英胶结物在硅质碎屑上的成核生长,从而对孔隙进行有效的保护。这种保护作用对须家河组这样埋深达到 5 000 m 之多的砂岩储层,意义更为重要。

自生绿泥石包膜对储层的影响效应可以从研究层段大量取样的不同孔隙度出现频率的分布图上可以体现出来。经验数据表明,大多数“正常”储层的孔隙度数值的分布在某个给定的深度范围是接近正态分布或对数正态分布的,或仅有微小的偏移^[8]。然而,来自须家河组 138 个砂岩样品的分析(图 6)显示,其分布未呈现典型正态分布特点,反而具有明显的双峰特征。按前人^[8]的解释,这种异常分布模式是由于绿泥石包膜对孔隙的保护作用明显改变了正常的孔隙分布特征,图中左侧的第一个类似于正态分布的数据峰的平均值为 2.59%,标准偏差为 0.76%,这一部分是该处砂岩孔隙度分布的正常趋势,而由于绿泥石包膜对原生孔隙的保护作用,导致第 2 个孔隙度分布峰值的产生,其平均值为 7.85%,标准偏差为 1.58%,二者对比,可以看出,自生绿泥石包膜的对须家河组原生孔隙的保护意义重大。

图 7-a, b, e, f 显示,自生绿泥石的含量与储层测试孔隙度之间存在着良好的正相关性,特别是和原生孔隙,相关性极好,比起世界上其他类似的情况来看^[6],甚至更好一些,这是由于以须家河组极其致密的储层特征为本底,更凸现出了绿泥石包膜的重要作用。

然而,图 7-c, d 表明,须 4 段无论是原生孔隙还是总孔隙率和识别出的自生绿泥石的含量之间的相关性并不明显。由于须 4 段的样品中自生绿泥石含量超过 2% 极其罕见,而事实上从测试结果看,须 4 段的自生绿泥石包膜厚度一般不足 2~5 μm ,且后期缺乏再生长现象,未起到明显的保护原生粒间孔的作用,反而使压实、压溶作用发生后有限的空间得到了充填。这和须 2 段通常达到 10 μm ,而后期又有富 Fe、Mg 流体来源的须 2 段绿泥石薄膜对孔隙的持续有效的保护作用有了质的区别。

3.2 对渗透率的影响

自生绿泥石对渗透率的影响至今仍难以量化来

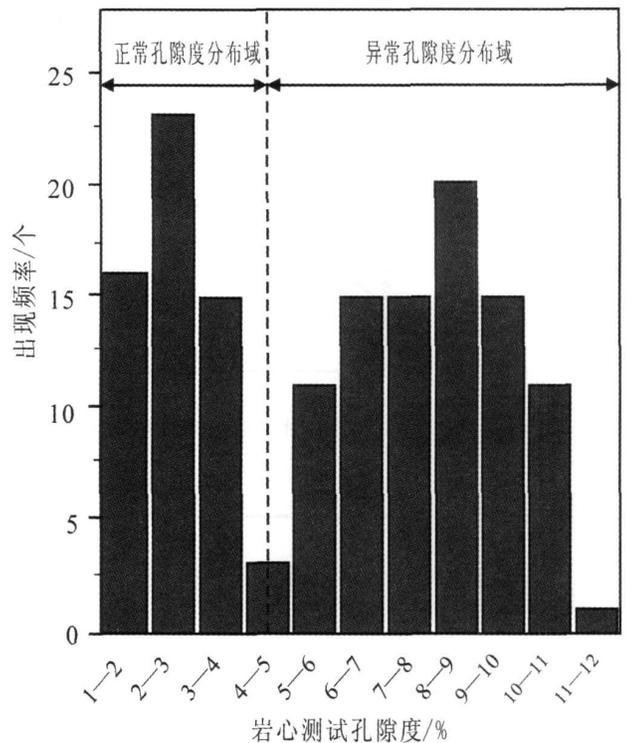


图 6 须家河组砂岩储层岩心测试孔隙度分布频率统计图 (138 个样品)

Fig 6 Porosity distributions in Xujiahe reservoir sandstones

研究,原因在于自然状态下影响渗透率的因素众多。当前研究发现,只有当绿泥石孔隙衬里达到一定厚度时,才会对深埋储层质量的改善有益^[6],但同时,更大含量的绿泥石以及更厚的环边(20 μm 甚至以上),却会促使渗透率急剧降低^[8],比如,粘土矿物含量从 5% 增加到 10%,其渗透率就会降低 1 000 倍^[3];另外,刚性颗粒为主的储层中的绿泥石包膜抵抗机械压实的程度明显强于含大量柔性颗粒的储层中绿泥石包膜^[8]。因而,对不同地区不同时期的砂岩储层而言,绿泥石包膜就存在一种“最合适的厚度”,即既可有效抑制石英胶结及压实作用,又不至于从根本上降低储层的渗透率和增加微孔隙的比例^[6],从须家河组研究实际来看,此处绿泥石环边最适宜的厚度 5~10 μm 。本区须家河组达到该厚度的绿泥石包膜基本上出现在须 2 段,而须 4 段的一般要薄于 5 μm ,不但未使储层的老原生孔隙得到较好的保存,而且对于有限的储集空间在压实后期进行了充填,并未对储层的孔、渗起到明显的改善作用。这从上述有关孔隙度的讨论结果也是一致的。

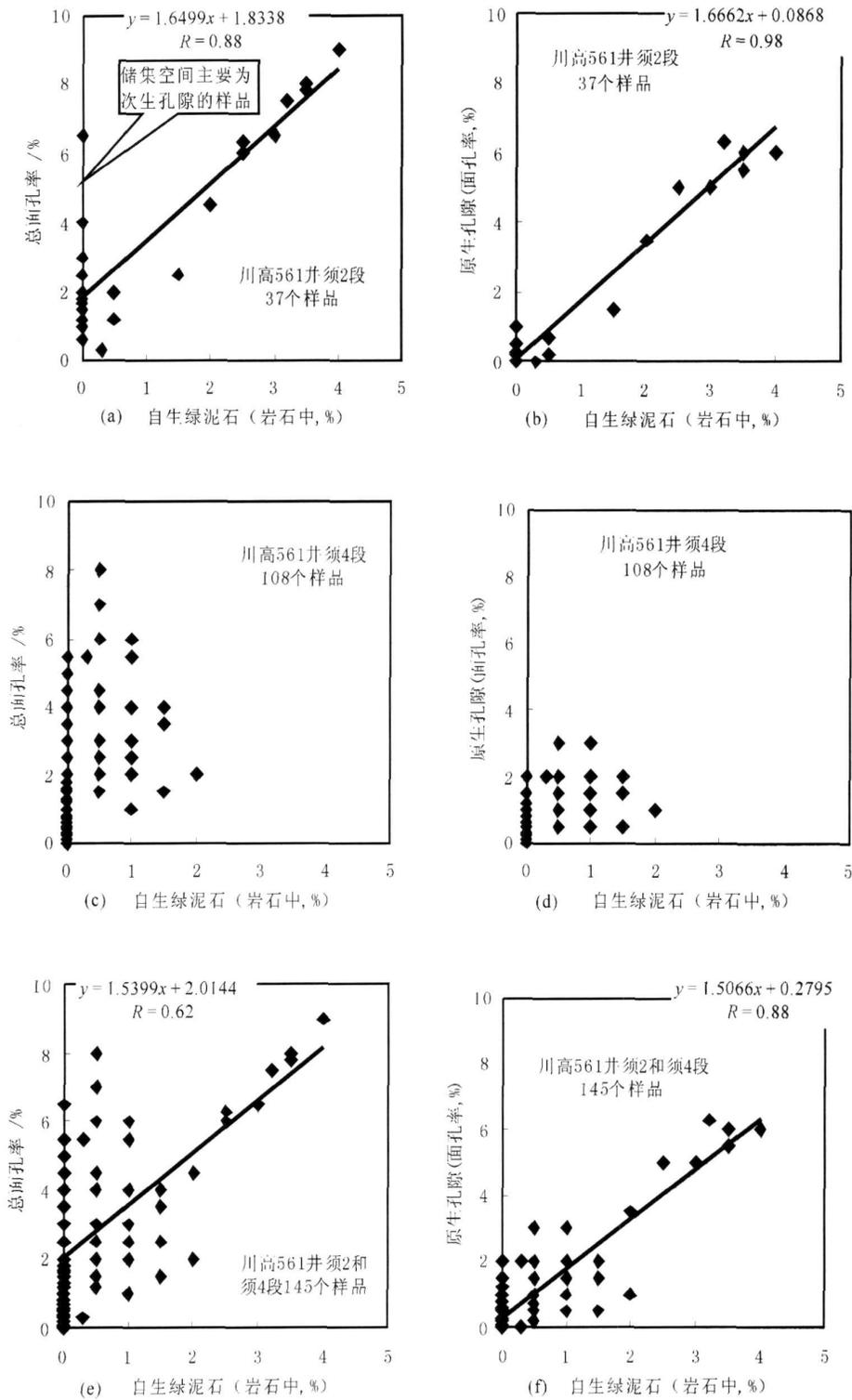


图 7 川高 561 井须 2、须 4 段砂岩中自生绿泥石含量与面孔率或原生孔隙面孔率的投点图

a) 须 2 段自生绿泥石含量与总面孔率的关系; b) 须 2 段自生绿泥石含量与原生孔隙面孔率的关系; c) 须 4 段自生绿泥石含量与总面孔率的关系; d) 须 4 段自生绿泥石含量与原生孔隙面孔率的关系; e) 须 2 段和须 4 段自生绿泥石含量与总面孔率的关系; f) 须 2 段和须 4 段自生绿泥石含量与原生孔隙面孔率的关系

Fig. 7 Porosity vs. authigenic chlorite content of Xujiache reservoir sandstones, Well 561 in Sichuan Basin

4 结论

(1) 自生绿泥石是须家河组砂岩储层中一种重要的胶结物,须 2 段底部分布最为集中,其赋存状态为连续等厚的颗粒包膜;

(2) 须家河组大多数的绿泥石包膜是通过新生沉淀作用是成岩阶段早期发生的,地层中各种富铁镁矿物的溶解、来自于相邻泥岩的压释水的贯入,是该阶段自生绿泥石生长的物质来源。在成岩阶段中、后期,下伏地层雷口坡组蒸发盐的溶解通过广泛分布的裂缝为自生绿泥石带来了继续生长所需要的富 Fe 、 Mg 流体;

(3) 须 2 段砂岩储层中,自生绿泥石包膜对储层的原生粒间孔甚至总孔隙度都具有良好的保护作用,而对于含量小于 2% 须 4 段,这种保护作用并不明显。双峰分布的孔隙度频率特点也表明了自生绿泥石包膜的存在对须家河组砂岩储层质量起到了良好的改善作用。

(4) 从对储层的影响来说,自生绿泥石包膜存在一个最合适的厚度值,超过这个值就会明显降低孔隙度和渗透率,而低于这个厚度就不能有效的抑止石英胶结和机械压实作用。须家河组砂岩储层的研究显示这个最适合的厚度值为 5~10 μm 。

致谢 本文在成文过程中得到了中国石油化工股份公司油气西南分公司勘探开发研究院吕正祥教授级高级工程师、赖素荣高级工程师以及曾小英高级工程师的大力帮助与指导,吕正祥教授还提供了自生绿泥石的部分电子探针资料,在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- 1 Bilalut V, Beaufort D, Baronnet A, *et al*. A nanopetrographic and textural study of grain-coating chlorites in sandstone reservoirs [J]. *Clay Minerals* 2003, 38: 315-328
- 2 Lanson B, Beaufort D, Berger G, *et al*. Authigenic kaolin and illite minerals during burial diagenesis of sandstones—a review [J]. *Clay Minerals* 2002, 37: 1-22
- 3 徐同台, 王行信, 张有瑜, 等. 中国含油气盆地粘土矿物 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003 [Xu Tongtai, Wang Xingxin, Zhang Youyu, *et al*. *The Clay Minerals in Oil and Gas Basins of China* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press 2003]
- 4 Ziegler K. Clay minerals of the Permian Rotliegend group in the North Sea and adjacent areas [J]. *Clay Minerals* 2006, 41: 355-393
- 5 Worden R H, Needham S J, Cuadros J, *et al*. The worm gut—a natural clay mineral factory and a possible cause of diagenetic grain coats in sandstones [J]. *Journal of Geotechnical Exploration* 2006, 89: 428-431
- 6 Richard H. Worden, Sadoon Morad. *Clay Mineral Cements in Sandstones* [M]. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2003
- 7 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): 273-291 [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): 273-291]
- 8 Salman Bbchi, Robert H. Lander, Linda Bonnell, *et al*. Anomously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and Predictability [J]. *AAPG Bulletin* 2002, 86: 301-328
- 9 Hillier S, Fallick A E, Matter A. Origin of pore-lining chlorite in the Aeolian Rotliegend of Northern Germany [J]. *Clay Minerals* 1996, 31: 153-171
- 10 Ehrenberg S. N. Preservation of an anomalously high porosity in deep buried sandstones by grain-coating chlorite: example from the Norwegian continental shelf [J]. *AAPG Bulletin* 1993, 77: 1260-1286
- 11 Grigsby, Jeffrey D. Origin and growth mechanism of authigenic chlorite in sandstones of the lower Vicksburg Formation, South Texas [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71: 27-36
- 12 Hilliers, Wilson M. J., Merriman R. J., *et al*. Clay mineralogy of the old red sandstone: clay mineralogy of the old red sandstone and Devonian sedimentary rocks of Wales, Scotland and England [J]. *Clay Minerals* 2006, 41: 433-471
- 13 Ehrenberg S. N., Dalland A., Amundsen H. E. F., *et al*. Origin of chlorite enrichment and neodymium isotopic anomalies in Halmtebanken sandstones [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1998, 15: 403-425
- 14 Northrop D. A., Clayton R. N. Oxygen-isotope fractionations in systems containing dolomite [J]. *Journal of Geology*, 1966, 74: 174-196
- 15 Storvolla V., Bjørlykke K., Karlsen O., *et al*. Porosity preservation in reservoir sandstones due to grain-coating illite—a study of the Jurassic Gam Formation from the Kristin and Lavrans fields offshore Mid-Norway [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19: 767-781
- 16 黄其胜. 川北晚三叠世须家河期古气候及成煤特征 [J]. 地质论评, 1995, 41 (1): 92-99 [Huang Qisheng. Paleoclimate and coal-forming characteristics of the Late Triassic Xujiahe Stage in Northern Sichuan [J]. *Geological Review*, 1995, 41 (1): 92-99]
- 17 林良彪, 陈洪德, 翟常博, 等. 四川盆地西部须家河组砂岩组分及其古地理探讨 [J]. 石油实验地质, 2006, 28 (6): 511-517 [Lin Liangbiao, Chen Hongde, Zhai Changbo, *et al*. Sandstone compositions and paleogeographic evolution of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Western Sichuan Basin, China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28 (6): 511-517]
- 18 Al-Hamad K. A., Hussain M., Inan B., *et al*. Lithologic characteristics and diagenesis of the Devonian Jauf sandstone at Ghawar Field, Eastern Saudi Arabia [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21 (10): 1221-1234

Origin and Diagenesis of Authigenic Chlorite within the Sandstone Reservoirs of Xujiahe Formation, Sichuan Basin, China

SUN Zhi-lei^{1,2} HUANG Si-jing^{3,4} ZHANG Yu-xiu⁵

WANG Qing-dong^{3,4} BAO Shen-xu^{1,2} SUN Zhi-xue^{3,4}

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Chengdu University of Technology, Chengdu 610051;

4. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610051;

5. Research Center for Tibet Plateau Geology, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract The authigenic chlorite grain-coatings or pore-linings play an important role in preserving primary porosities effectively by resisting the compaction of the overlying rock and decreasing the number of nucleation of authigenic quartz on the surfaces of grains in reservoir sandstones of Xujiahe Formation, Sichuan basin, China. The early materials forming the grain-coatings of chlorite are involving the solution of the syn-depositional Fe-rich sediments, flocculation of the soluble fluvial Fe and the intrusion of the compacting fluids in the adjacent shale bed. And moreover, the grain-coatings mainly formed as new neomorphic precipitations between syngeneses and early eodiagenesis. Due to the continuous intrusion of the Mg-rich fluids through the fracture system, the authigenic chlorites in Xujiahe Formation II are in possession of the enough materials to re-grow in mesodiagenesis; furthermore, the contents of MgO are increasing with the increasing depths distinctly. However, in Xujiahe Formation IV sandstones, the re-growth of chlorite is not obvious. The impact of the chlorite grain-coatings to the reservoir properties are well evaluated by the relation of the chlorite contents versus the porosity values and the porosity distribution figure in study area. As for the influence to reservoir quality, there is an "optimum thickness" for chlorite grain-coatings to effectively preserve the porosities, but without radically decreasing permeability and increasing the microporosity in reservoirs. Within Xujiahe Formation sandstones, the optimum thickness of chlorite grains seems to be between 5 μm and 10 μm .

Key words authigenic chlorite, Xujiahe Formation, origin of materials, diagenesis, reservoir quality