

文章编号:0253-9985(2012)05-0751-07

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

孙全力¹, 孙哈森², 贾 昀³, 禹建军⁴, 罗文军⁵

(1. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 2. 中联煤层气责任有限公司, 北京 100011;

3. 新墨西哥矿业理工大学, 美国新墨西哥州 索科罗 87801; 4. 中国石油 西部钻探工程公司 试油公司, 新疆 克拉玛依 834000;

5. 中国石油 西南油气田分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610500)

摘要:致密气藏产气量在我国天然气总产量中所占比例越来越大,但由于其气藏分布复杂、储层预测难度大等因素,阻碍了该类气藏的勘探开发进程。川西坳陷须家河组储层为典型的致密砂岩储层,但在致密背景下发育相对优质储层,这些相对优质储层有较高的孔隙度和渗透率,对气井的高产发挥着重要的作用。在相对优质储层中有一种以绿泥石环边胶结发育为特征。文中通过大量镜下薄片鉴定、扫描电镜、X-衍射等手段,结合沉积相分析资料、区域地质及火山活动资料综合分析,确定了川西坳陷须家河组绿泥石形成的相对时期及其成因。研究认为,绿泥石主要是对原生孔隙起到了良好的保护作用,并且不是存在绿泥石环边胶结的砂岩储层均能成为相对优质的储层,其必须满足环边厚度足够并连续的条件,而且储层必须发育在高能的沉积环境之中。

关键词:绿泥石;致密砂岩;储层;须家河组;川西坳陷

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Genesis of chlorites and its relationship with high-quality reservoirs in the Xujiahe Formation tight sandstones, western Sichuan depression

Sun Quanli¹, Sun Hansen², Jia Bao³, Yu Jianjun⁴ and Luo Wenjun⁵

(1. CDUT College of Energy Resources, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. China CBM Company Limited,

Beijing 100011, China; 3. New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, New Mexico 87801, America;

4. Well Testing Company of CNPC XDEC, Karamay, Xinjiang 834000, China;

5. Exploration and Production Research Institute, PetroChina Southwest Oil Company, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: Tight gas production is taking up bigger and bigger shares in China's total natural gas production. However, further exploration and development of this kind of gas reservoirs face great challenges due to their distribution complexity and prediction difficulty. Although the Xujiahe Formation in western Sichuan depression is typical tight sandstone, it has relatively good reservoirs with relatively higher permeability and porosity. Research of these reservoirs reveals a unique phenomenon of the existence of a rim chlorite cementation. Based on analysis of data such as thin section, SEM and X-ray diffraction and in combination with sedimentary facies, regional geology and volcanic activity, the authors determined the period in which the chlorite was formed. It is suggested that the existence of chlorite can effectively protect the primary pores in these reservoirs. However, the sole existence of ring-shaped chlorite cementation does not necessarily mean a relatively better reservoir. Other pre-requirements for a high-quality reservoir are also needed, for example, the ring must be thick and continuous enough and the reservoirs must be formed in high-energy sedimentary environment.

Key words: chlorite, tight sandstone, reservoir, the Xujiahe Formation, western Sichuan depression

收稿日期:2012-05-01; 修订日期:2012-07-24。

第一作者简介:孙全力(1976—),男,博士研究生,油气田开发工程。

致密砂岩气藏具有孔隙度低($<12\%$)、渗透率低($<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、含气饱和度低(一般 $<60\%$)、含水饱和度高(一般 $>40\%$)等特点,天然气在其中流动速度较为缓慢^[1]。四川盆地须家河组天然气地质储量为 $3.0 \times 10^{12} \sim 4.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采储量约为 $1.5 \times 10^{12} \sim 2.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[2]。川西坳陷丰谷地区须家河组储层为超低孔、低渗致密气藏,在这种孔渗条件极差的背景下却蕴含着大量天然气。由于储层经历了复杂的成岩作用,储层非均质性强,气藏分布复杂,导致勘探难度大。前人研究证明,孔隙度的异常高值层段往往与自生绿泥石的颗粒包膜有关^[3-6],使得绿泥石包膜形成的相对优质储层成为勘探开发的亮点。20世纪60年代开始就有学者关注环边的自生绿泥石对储层的影响,然而至今其对储层的作用仍有所争议。一部分研究者认为其影响是负面的,认为绿泥石环绕碎屑,降低了原生孔隙度、堵塞孔隙喉道^[7]。然而另外一些学者研究认为绿泥石环边对储层有保护作用,Ehrenberg将挪威陆棚砂岩深埋藏条件下异常高的孔隙度的保存机理归因于包膜绿泥石的存在,并较为详尽地论述了包膜绿泥石在埋藏成岩过程中对孔隙的保存机制^[8];黄思静肯定了绿泥石对储层的保护作用^[9]。

本文通过对研究区须家河组大量砂岩样品的综合分析,结合区域地质资料,试图论证该地层中的自生绿泥石的成因及来源,并探讨自生绿泥石胶结对储集层的影响,为进一步油气勘探奠定基础。

1 地质概况

丰谷地区位于孝泉-新场-丰谷北东东向继承性隆起带的东端(图1),东邻八角场构造,南为黄鹿、葫芦溪向斜,西北为金山向斜。须家河组储层主要发育三角洲前缘水下分流河道微相,岩石类型以岩屑石英砂岩为主,石英含量高,岩屑含量低,以孔隙式-接触式胶结为主,碎屑分选好,磨圆较好,以次棱角-次圆状为主。储层平均孔隙度为 3.87% ,平均渗透率为 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层总体上较为致密。但发育绿泥石环边胶结的储层表现出相对好的孔渗条件,其孔隙度最高可达 10.37% ,平均为 6.93% ,渗透率最高达到 $0.75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.31 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而其相邻未发育绿泥石环边的储层孔渗条件较差,其平均孔隙度只有

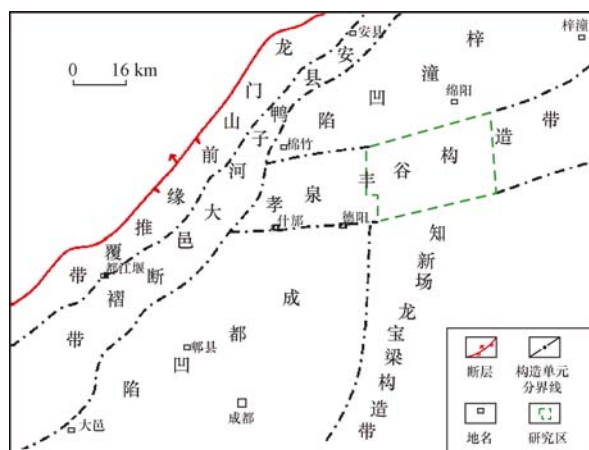


图1 川西坳陷丰谷地区构造位置

Fig. 1 Tectonic Location of Fenggu area in the western Sichuan depression

2.36%,平均渗透率为 $0.097 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2 绿泥石形成时期与成因

2.1 绿泥石形成时期

通过大量镜下薄片观察,研究区须家河组储层绿泥石主要以衬边(环边)形式存在,这种孔隙环边绿泥石通常是垂直于颗粒表面生长且近于等厚,颗粒接触处不发育绿泥石。绿泥石衬里发育的岩石,颗粒间接触强度较低,多为点到线接触(图2)。由此可见,绿泥石是发育在压实作用较弱、颗粒以点接触为主的成岩作用早期。绿泥石环绕颗粒生长,其与颗粒之间未见更早期胶结物(图2);而在相邻未发育绿泥石胶结储层中,最早发育的胶结物为石英加大,故而绿泥石环边发育时期是在石英加大边发育之前,而流体包裹体均一温度测定结果表明,最早一期石英加大发育时地层温度为 $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,即说明绿泥石发育在地层温度低于 $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的须家河组早成岩期(表1)。

2.2 绿泥石成因

关于自生绿泥石包膜的形成目前仍有较多争议,有研究认为绿泥石包膜是早期的富铁粘土包壳成岩转化的结果^[10-12],也有人认为绿泥石包膜是孔隙水新生沉淀产生的^[13]。然而在川西坳陷或四川盆地范围内的须家河组中从未发现绿泥石/蒙皂石或蒙皂石/绿泥石的间层矿物^[14];而且,粘土矿物转化的绿泥石会存在遗留的蜂巢状特征^[8],

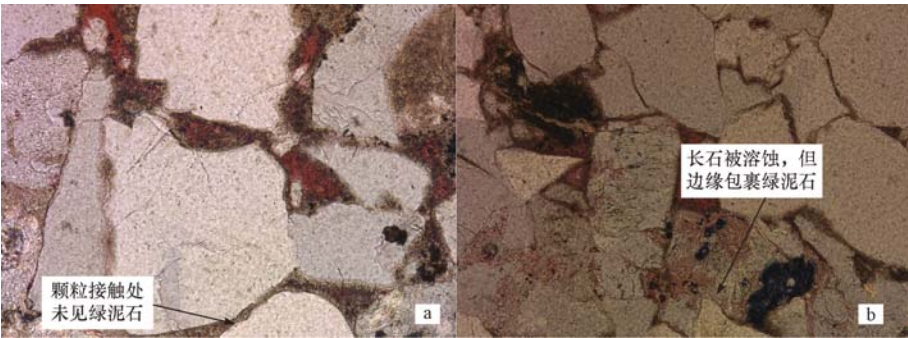


图2 川西坳陷须家河组储层绿泥石特征

Fig.2 Characteristics of chlorite in the Xujiache Formation reservoirs of the western Sichuan depression
(a. CG561 井,4 991.3 m,单偏光,对角线长 0.75 mm;b. CG561 井,4 992.1 m,单偏光,对角线长 1.44 mm)

表 1 川西坳陷须家河组石英加大中流体包裹体均一温度

Table 1 Homogenization temperature of fluid inclusions in quartz overgrowth in the Xujiache Formation of the western Sichuan depression

层位	成岩矿物	均一温度/℃	平均温度/℃	古地温梯度/(℃·km ⁻¹)	形成深度/m	形成时期	成岩阶段
T ₃ x ⁴	石英加大	88	88	33	2 212	J ₃ 末	中成岩 A 期
	石英加大	57,61	59	33	1 333	J ₁ 末	早成岩 A 期
T ₃ x ²	石英加大	82,86	84	33	2 091	J ₁ —J ₂	早成岩 B 期
	石英加大	53	53	33	1 152	T ₃ x ⁵ 末	早成岩 A 期
	石英加大	54,62	58	33	1 303	T ₃ x ⁵ 末	早成岩 A 期
	石英加大	145,153	149	33	4 061	K ₁	中成岩 B 期

表 2 川西坳陷 CG561 井自生绿泥石电子探针数据

Table 2 Electron probe data of the authigenic chlorites in the well CG561 in the western Sichuan depression

井号	井深/m	矿物含量/%				
		Na ₂ O	MgO	FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
川高 561	4 935.27	0.40	9.25	37.32	25.46	27.42
川高 561	4 931.90	0.21	4.59	34.51	25.80	33.96
川高 561	4 932.03	4.34	3.61	29.35	20.91	38.74
川高 561	4 993.07	0.32	9.30	36.36	25.51	28.15

从须家河组的绿泥石包膜特征来看,并未发现此特征,这说明本区绿泥石包膜的主要是以新生沉淀形式形成。

须家河组的绿泥石包膜是富铁的,从表 2 可以看出绿泥石中 FeO 的含量大多数在 20% 以上,而本区自生绿泥石包膜的形成所必需的铁可能来源主要有 3 个:①同期沉积的富铁沉积物,以火山碎屑或火山凝灰质沉淀为主;②河流的溶解铁;③泥岩中的铁随压实水灌入。其中河流溶解铁会在高盐度情况下产生絮状沉淀,并形成绿泥石^[10]。这种成因的绿泥石一般会形成在沉积阶段或岩石未被压实的阶段,但从薄片观察发现须家河组储层中并未发现颗粒接触点之间存在大量绿泥石的现象,故而这种成因不太可能成立;泥岩中含的铁

质会在沉积后向储层排出富含铁质的水,在随后的成岩变化中可能形成绿泥石,但是如果这种成因成立,须家河组绿泥石的分布便是会发育在靠近泥岩层段的储层中,而目前须家河组储层中绿泥石的分布并不遵循这一规律,所以这种假设也不成立。

四川省区域地质志记载,位于川西坳陷西侧的义敦—理塘地区,在晚三叠世火山活动十分强烈,火山岩广泛分布,仅晚三叠世图姆沟期的果德火山穹隆沉积的火山岩厚度最大可达 1 870 m,据角砾岩的分布范围,在理塘一带晚三叠世至少有 8 个火山爆发中心^[15],是研究区火山物质的主要来源。在研究区须家河组岩石薄片,也发现了大量与甘孜—理塘陆间裂谷带火山岩岩石类型相似

的同沉积火山碎屑。并且在马井、温江的钻井中,须五段发现了2~3层凝灰岩薄层。在川中及川西南地区的须四段野外剖面上也发现了同沉积火山物质,在不足10 m的含煤地层剖面中,发现了5层以上的火山灰沉积物,这说明了甘孜-理塘陆间裂谷带晚三叠世喷发的火山物质已被输至四川盆地大部分地区的晚三叠世地层^[16-17]。通过镜下

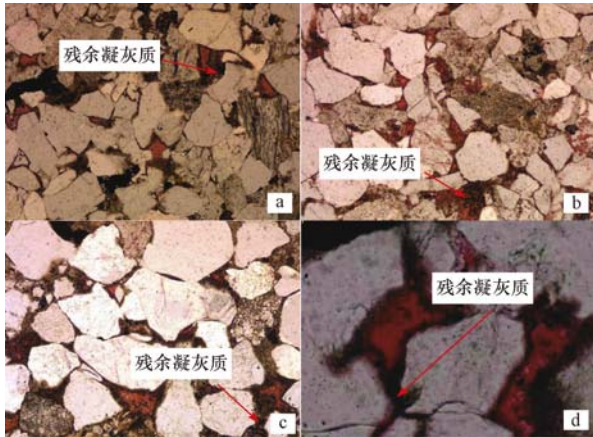


图3 川西拗陷须家河组储层凝灰质特征

Fig. 3 Characteristics of volcanic tuff in the Xujiahe Formation reservoirs of the western Sichuan depression

- a. CG561井, 4 992.50 m, $T_3x^{2(7)}$, 单偏光, 对角线长1.44 mm;
b. CF125井, 3 586.49 m, T_3x^4 , 单偏光, 对角线长1.44 mm;
c. CH138井, 3 568.31 m, T_3x^4 , 单偏光, 对角线长1.44 mm;
d. X203井, 5 021.25 m, $T_3x^{2(7)}$, 单偏光, 对角线长0.35 mm

薄片观察发现绿泥石发育的孔隙中可见残余凝灰质填隙物(图3a),这种现象在川西须家河组含有绿泥石的储层中普遍可见(图3b—d)。可以由此推断,须家河组绿泥石环边是由同沉积的火山凝灰质蚀变而形成。

3 绿泥石对储层的影响

3.1 绿泥石与储层的相关性

绿泥石主要发育在须四上亚段和须二下亚段,总体含量较低,含量大于2%的样品主要分布于须二段。自生绿泥石主要的赋存状态是以孔隙衬里方式产出,其存在与砂岩储集空间的保存和演化有着重要的关系。从图4a和图4b可以看出,绿泥石含量和总面孔率呈正相关性,但相关关系并不明显,其中须二段较须四段明显。将不含绿泥石样品剔除后(图4c,d),绿泥石含量和原生孔含量呈明显的正相关性,尤其在须二段最为明显,其绿泥石含量与面孔率相关系数达到0.962 9,尤其当绿泥石含量大于2%时,面孔率增加较为明显,这说明了绿泥石环边对原生粒间孔起到了保护作用。须四段与须二段的正相关特征相似,但在绿泥石含量增高时也有部分面孔率较低的样品出现,其原因将在后面分析。

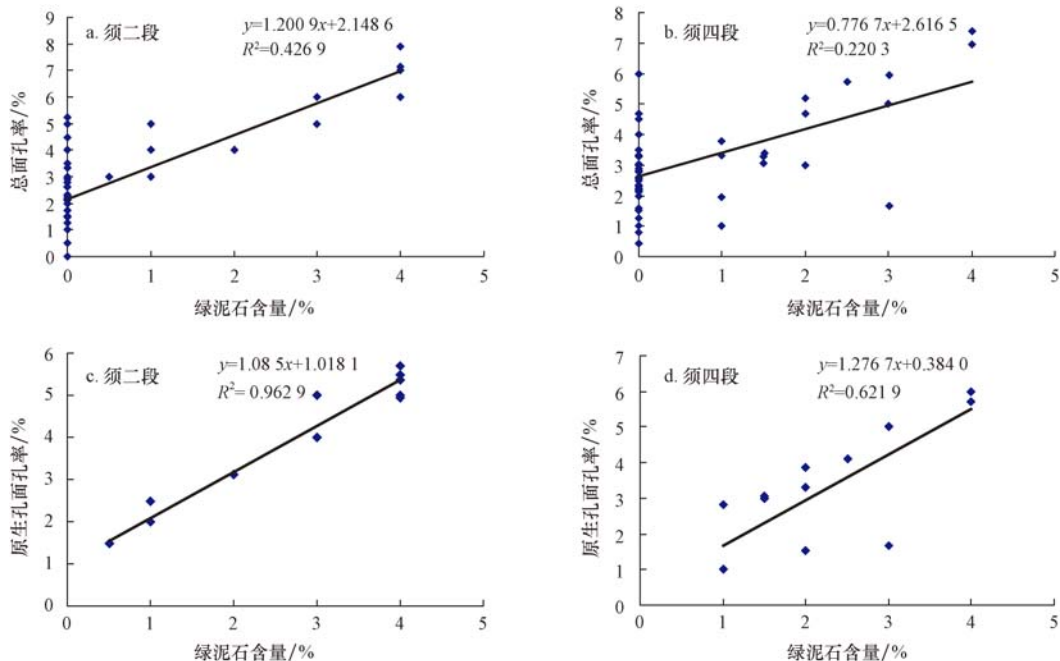


图4 川西拗陷须家河组绿泥石含量与面孔率关系

Fig. 4 Relationship between chlorite contents and sectional porosity for the Xujiahe Formation in the western Sichuan depression

3.2 环边绿泥石对储层的积极作用

1) 阻止其他胶结物在孔隙中沉淀

薄片观察发现,绿泥石环边胶结的孔隙后期胶结物含量少,且无石英加大现象和晚期碳酸盐胶结现象。绿泥石环边胶结物可抑制石英次生加大,其原理主要是通过阻止富含 SiO_2 的孔隙流体在碎屑石英表面成核,进而阻止共轴再生胶结物的形成(图5)。有绿泥石环边胶结发育的储层,其粒间亦不发育方解石胶结,但并不意味着没有可沉淀的碳酸盐胶结物在储层流体中出现。通过薄片观察,发现绿泥石环边保护的储层,部分长石被晚期铁方解石交代(图6a)。

2) 缓解压实作用并抑制压溶作用

绿泥石作为早期压实作用较弱时沉淀的自生矿物,可以在一定程度上缓解后期的压实作用,但效果有限,其主要贡献在于阻止了压溶作用。压溶作用是在石英颗粒接触面上发生的一种物理化学

反应,而绿泥石环边的存在使得石英颗粒间接触面积大大降低,从而抑制了压溶作用的发生。从颗粒间的接触关系可以看出,含有绿泥石环边的储层,其颗粒间接触关系主要表现为点-线接触(图2),而不发育绿泥石环边的储层则普遍表现为凹凸的线-线接触(图6b)。压溶的石英会以某种方式沉淀在孔隙中,绿泥石环边由此减少了次生硅质沉淀的原料供给,在这种既减少了压溶、减孔又抑制了胶结作用的双重保护下,使得原生孔隙得以保存。

3) 促进溶蚀作用

在致密砂岩储层中,当溶蚀流体大量生成时多数储层已较为致密,孔隙不发育,储层流通性差,溶蚀流体无法顺利进入储层。但在原生孔发育的绿泥石环边储层中,溶蚀流体可以顺利通过原生粒间孔及绿泥石晶间孔进入储层,并对其进行改造,镜下观察发现,绿泥石环边胶结的储层中,次生溶孔发育,部分长石被完全溶蚀只留下了绿泥石包壳(图2b)。

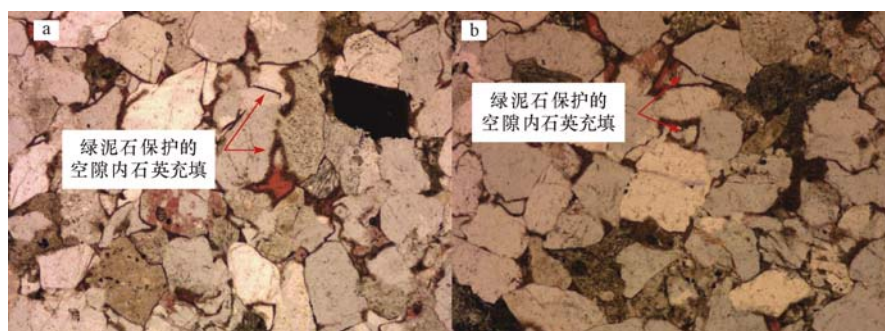


图5 川西坳陷须家河组绿泥石与次生硅质特征

Fig. 5 Characteristics of chlorites and the secondary silicas in the Xujiahe Formation of the western Sichuan depression

a. CG561 井, 4 992.5 m, 单偏光, 对角线长 1.44 mm; b. CG561 井, 4 993.4 m, 单偏光, 对角线长 1.44 mm

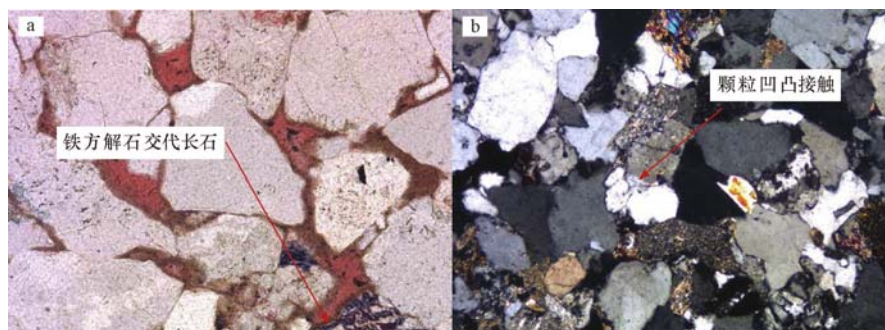


图6 川西坳陷须家河组绿泥石环边与不含绿泥石环边储层对比

Fig. 6 Comparison of reservoirs with and without chlorite rims in the Xujiahe Formation of the western Sichuan depression

a. CG561 井, 4 992.5 m, 单偏光, 对角线长 1.44 mm; b. CG561 井, 5 001.0 m, 正交光, 对角线长 1.44 mm

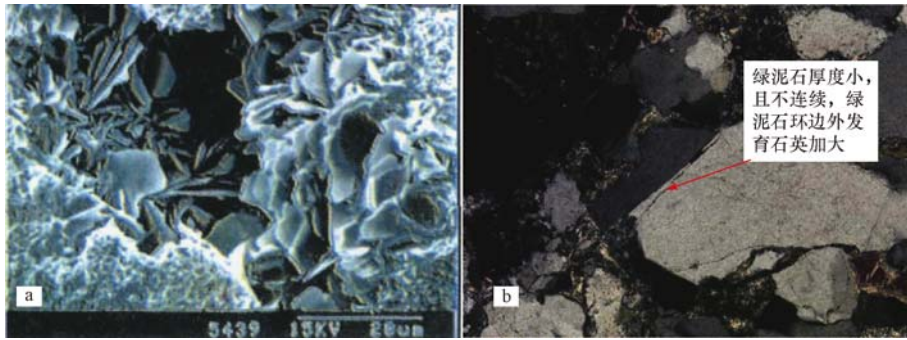


图7 川西坳陷须家河组绿泥石厚度特征

Fig. 7 Thickness of the chlorite rims in the Xujiahe Formation of the western Sichuan depression

- a. 绿泥石包膜之间的残余粒间孔,绿泥石呈自形的片状,垂直颗粒生长,厚度达到 10 μm 以上,CG561 井,4 996.29 m,扫描电镜;
b. 绿泥石环边较薄,且不连续,环边外部生长石英加大,CG561 井,3 657 m, T_3x^4 ,正交光,对角线长 0.75 mm

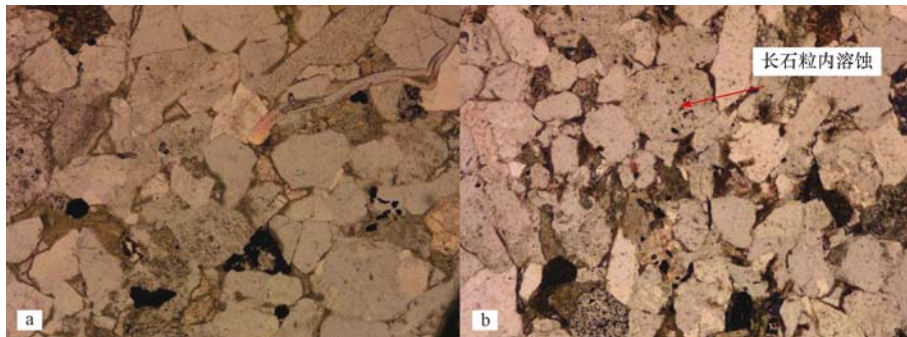


图8 川西坳陷须家河组在较差沉积微相中含绿泥石的储层特征

Fig. 8 Characteristics of chlorite-bearing reservoirs in unfavorable sedimentary microfacies in the Xujiahe Formation of the western Sichuan depression

- a. 绿泥石环边胶结发育,天然堤微相,颗粒分选差,岩屑含量高,孔隙不发育,CH100 井,4 952 m, $T_3x^{2(7)}$,单偏光,对角线长 1.44 mm;
b. 绿泥石环边胶结发育,分流间湾微相,颗粒分选差,岩屑含量高,孔隙不发育,CF563,4 761.04 m, $T_3x^{2(7)}$,单偏光,对角线长 1.44 mm

3.3 绿泥石环边相对优质储层的形成条件

研究发现,存在绿泥石环边胶结的储层不一定成为相对优质储层,而要成为相对优质储层必须有以下两个条件。

1) 绿泥石环边厚度大且分布连续

须四段绿泥石环边储层孔隙度(平均为 5.89%)与段二段(平均为 6.91%)相比较低,在前述分析绿泥石对储层影响时认为,须二段原生孔隙的发育与绿泥石关系更密切,且当绿泥石含量大于 2%时更为明显。对比薄片发现,须二段绿泥石含量普遍较须四高,且厚度较大(图 7a);须四段绿泥石发育层段中常出现不完整的环边,在未被包裹的石英颗粒周围会形成石英加大,使孔隙减小(图 7b)。

2) 优质的岩石类型和沉积微相

在丰谷地区 3 口钻遇 $T_3x^{2(7)}$ 砂组深井薄片

中,均发现绿泥石的存在,但只有 CG561 井形成了持久的工业产能。这是由于该井此层段为三角洲前缘水下分流河道微相,而 CH100 井钻遇的 $T_3x^{2(7)}$ 为决口河道及天然堤微相,CF563 井该层段为分流间湾、废弃河道及河口坝微相。沉积微相类型决定了沉积物初始孔隙条件,镜下观察对比发现,CH100 及 CF563 井的绿泥石环边胶结的储层岩石类型以岩屑砂岩为主,岩屑含量高,容易在后期强压实作用下变形,失去原生孔隙(图 8),故而孔渗条件差。

4 结论

1) 川西坳陷须家河组储层中绿泥石主要由同期沉淀的火山凝灰质蚀变而形成,对绿泥石分布的预测可采用同层追踪方法。

2) 绿泥石环边胶结对致密储层的影响主要

体现在对原生孔隙的保存,保存下来的原生孔隙可以作为后期溶蚀的流通通道,促进了后期的溶蚀。

3) 并不是存在绿泥石环边胶结的砂岩储层均能成为相对优质的储层,其必须满足环边厚度足够并连续,且储层必须发育在高能的沉积环境。

参 考 文 献

- [1] 关德师,牛嘉玉. 中国非常规油气地质[M]. 北京:石油工业出版社,1995:60-85.
Guan Deshi, Niu Jiayu. Chinese unconventional oil and gas geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 60-85.
- [2] 贾承造,郑民. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min. Chinese unconventional oil and gas resources and exploration and development prospect of [J]. petroleum exploration and development, 2012, 39(2): 129-136.
- [3] 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 Geochemical Exploration, 2006, 89: 428-431.
- [4] Richard H. Worden, Sadoon Morad. Clay Mineral cements in sandstones [M]. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2003.
- [5] Salman Bloch, Robert H Lander, Linda Bonnel. et al. Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and Predictability [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86: 301-328.
- [6] Hillier S, Fallick A E, Matter A. Origin of pore-lining chlorite in the Aeolian Rotliegendes of Northern Germany [J]. Clay Minerals, 1996, 31: 153-171.
- [7] 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. Xinjiang clastic rock in Shanshan oil field, the clay mineral characteristics [J]. Journal of Northwestern University (natural science edition), 1998, 28(5): 443-446.
- [8] Ehrenberg S, N. Preservation of anomalously high porosity in deepburied sandstones by grain-coating chlorite: example from the Norwegian continental shelf [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77: 1260-1286.
- [9] 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 Wenlian, Zhang Meng, et al. China Triassic continental sandstone formation mechanism of authigenic chlorite and reservoir pore preservation between [J]. Journal of Chengdu University of Technology (natural science edition), 2004, 31(3): 273-291.
- [10] Lanson B, Beaufort D, Berger G, et al. Authigenic kaolin and illitic minerals during burial diagenesis of sandstones: a review [J]. Clay Minerals, 2002, 37: 1-22.
- [11] 苏永进, 唐跃刚, 张世华, 等. 川西坳陷上三叠统天然气藏主控因素及形成模式 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 107-113.
Su Yongjin, Tang Yuegang, Zhang Shihua, et al. Main controlling factors and patterns of gas accumulation in the Upper Triassic of the western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 107-113.
- [12] 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.
- [13] Billault 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.
- [14] 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. in petroliferous basins of China clay [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [15] 戴宗明, 孙传敏. 松潘-甘孜造山带义敦岛弧中段三叠纪火山-沉积盆地的演化 [J]. 地质通报, 2008, 27(6): 799-813.
Dai Zongming, Sun Chuanmin. Songpan-Ganzi orogenic belt in the Middle Triassic Yidun arc volcano-sedimentary basin evolution [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(6): 799-813.
- [16] Kurt Burger, 任友谅, 周义平. 川南须家河组第四段 TON-STEINS 的岩石地化特征 [J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(2): 1-7.
Kurt Burger, Ren Youliang, Zhou Yiping. Southern Sichuan Xujiahe fourth section TON-STEINS rock geochemical characteristics [J]. Coal geology and exploration, 2000, 28(2): 1-7.
- [17] 杨光荣. 四川盆地晚三叠世火山灰成因粘土岩特征及其成因 [J]. 煤田地质与勘探, 1996, 12: 25-40.
Yang Guangrong. Sichuan Basin in the Late Triassic volcano three cause of ash clay rock characteristics and origin [J]. Coal geology and exploration, 1996, 12: 25-40.

(编辑 董立)