

doi:10.3799/dqkx.2017.528

储层岩性控制下的绿泥石对硅质胶结的影响

孙小龙¹,林承焰^{1,2*},董春梅^{1,2},张宪国^{1,2},马存飞¹,林建力¹,谢晶晶³

1.中国石油大学地球科学与技术学院,山东青岛 266580

2.山东省油藏地质重点实验室,山东青岛 266580

3.中海石油有限公司上海分公司,上海 200335

摘要:在西湖凹陷花港组低渗储层背景下,优质储层的发育伴随绿泥石和硅质胶结的同时富集,这与绿泥石抑制硅质胶结的观点存在矛盾。综合利用X衍射、铸体薄片、包裹体测试和扫描电镜及能谱分析等资料,以绿泥石分类及其成因分析为基础,通过对比不同粒度储层绿泥石和硅质胶结分布规律,结合地层条件和储层质量演化,分析绿泥石对硅质胶结的影响。研究结果表明:绿泥石发育孔隙衬里和孔隙充填两种产状,孔隙衬里绿泥石由早期黏土薄膜重结晶或直接由孔隙流体结晶而成,孔隙充填绿泥石受控于火山碎屑和长石溶蚀;绿泥石和硅质胶结均在物性较好的粗粒储层中富集;浅埋低地温阶段,孔隙衬里绿泥石有效抑制硅质胶结,仅在绿泥石不连续或颗粒破裂处发育孤立柱状石英晶体,深埋高地温阶段,难以有效抑制硅质胶结,多发育石英加大边;粗粒储层比细粒和砂质砾岩及泥砾岩储层孔隙发育,为石英加大边提供必要的生长空间,导致绿泥石相对含量更高的粗粒储层中硅质胶结也更发育。

关键词:西湖凹陷;花港组;绿泥石;孔隙衬里;成因机制;硅质胶结;沉积学。

中图分类号:P571

文章编号:1000-2383(2017)09-1599-09

收稿日期:2016-11-16

Influence of Chlorite on Siliceous Cement under Control of Reservoir Lithology

Sun Xiaolong¹, Lin Chengyan^{1,2*}, Dong Chunmei^{1,2}, Zhang Xianguo^{1,2}, Ma Cunfei¹, Lin Jianli¹, Xie Jingjing³

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Reservoir Geology Key Laboratory of Shandong Province, Qingdao 266580, China

3. Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: In the background of low-permeability reservoir in Huagang Formation, Xihu depression, high-quality reservoir is often associated with the enrichment of chlorite and siliceous cement, which is inconsistent with the view that chlorite can restrain siliceous cement. The classification and formation of chlorite were analyzed by X-ray, casting thin section, fluid inclusion test and scanning electron microscopy with spectrum. And the influence of chlorite on siliceous cement was studied through the comparison of the distribution of chlorite and siliceous cement in different reservoirs and the evolution of formation condition and reservoir quality. The results show that chlorite presents as pore-linking and pore-filling occurrences. Pore-linking chlorite is formed by the recrystallization of early clay coating or crystallization of pore fluid, and pore-filling chlorite is closely related to the dissolution of volcanic debris and feldspar. Chlorite and siliceous cement are both abundant in coarse reservoir (except sandy conglomerate and muddy gravel reservoir). Chlorite can hinder siliceous cement effectively during shallow burial and low geotemperature, and siliceous cement only grows above discontinuity chlorite or broken particle as isolated columnar quartz. Siliceous cement cannot be prevented during deeply buried and high geotemperature, and it develops as quartz overgrowth. The pores of coarse reservoir are more abundant than fine reservoir and conglomerate and muddy gravel reservoir, and the pores provide necessary space for quartz overgrowth, which is the main reason why chlorite and siliceous cement are both plentiful in

基金项目:国家科技重大专项(No.2016ZX05027-004);国家自然科学基金面上项目(No.41672129)。

作者简介:孙小龙(1991—),男,硕士研究生,主要从事储层地质学方面的研究。ORCID: 0000-0002-9719-2816. E-mail: upc_sxl@126.com

* 通讯作者:林承焰,ORCID: 0000-0002-5291-802X. E-mail: lincy@upc.edu.cn

引用格式:孙小龙,林承焰,董春梅,等,2017.储层岩性控制下的绿泥石对硅质胶结的影响.地球科学,42(9):1599—1607.

high-quality coarse reservoir.

Key words: Xihu depression; Huagang Formation; chlorite; pore-linking; formation mechanism; siliceous cement; sedimentology.

0 引言

自生绿泥石是碎屑岩储层中常见的胶结物类型,主要源自早期黏土矿物以及其他不稳定成分的蚀变转化或直接由孔隙流体结晶而成(Gould *et al.*, 2010; 田建锋等, 2011; 于振锋等, 2012; Bahlis and De Ros, 2013),因其与储层物性具有密切的相关性而备受国内外学者的关注。一种观点认为绿泥石通过抑制硅质胶结来促进优质储层的发育,并从不同角度提出了相应的抑制机理:绿泥石通过抑制石英压溶作用限制硅质的供应(Hillier, 1994; 刘金库等, 2009);绿泥石隔绝颗粒表面与孔隙流体的接触,抑制硅质成核(Ehrenberg, 1993; Pe-Piper and Weir-Murphy, 2008; 孙治雷等, 2008; 谢武仁等, 2010; 杨田等, 2015);绿泥石占据硅质胶结的成核基底,减少其生长空间(Berger *et al.*, 2009);绿泥石内层非定向生长的他形黏土晶体限制硅质的定向生长(Billault *et al.*, 2003);绿泥石层间氢氧化物八面体片对孔隙流体酸碱度具有调节作用,增大硅质的溶解度,使其难以达到过饱和结晶(田建锋等, 2008; 曲希玉等, 2015)。另一种观点认为绿泥石晶间孔发育,难以真正有效地阻止孔隙流体与石英颗粒表面的接触及硅质胶结的成核,绿泥石发育的储层物性较好主要是由强水动力条件下其自身岩石学特征决定的(姚泾利等, 2011; 杨威等, 2013; 周晓峰等, 2016),甚至认为绿泥石在一定程度上堵塞孔喉,对储层造成明显的损害(刘林玉和曲志浩, 1998; 兰叶芳等, 2011)。西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部,平面上可划分为西部斜坡带、西部次凹带、中央反转构造带、东部次凹带和东部断阶带(陶士振和邹才能, 2005),新生代沉积地层自下而上发育古新统、始新统平湖组、渐新统花港组、中新统龙井组、玉泉组、柳浪组、上新统三潭组和第四系东海群(雷闯等, 2014; 苏奥和陈红汉, 2015)。研究区位于西湖凹陷中央反转构造带中北部地区,花港组上段发育辫状河三角洲前缘厚层砂体储层,在整体低渗的背景下,局部发育相对优质储层,并伴随绿泥石和硅质胶结的同时富集,绿泥石和硅质胶结呈现异常的正相关分布规律,这与绿泥石能有效抑制硅质胶结的观点存在明显的矛盾。本文以绿泥石分类和成因分析为基础,重点对比不同粒度储层绿泥石和硅质胶结的分布规

律,结合埋藏过程中地层条件和储层质量演化,分析储层岩性控制下的绿泥石对硅质胶结的影响。

1 绿泥石分类及成因

综合X衍射、铸体薄片和扫描电镜及能谱分析等资料,依据绿泥石结晶特征、成分组成、形成时期、分布位置和成因机理等,将其划分为孔隙衬里绿泥石和孔隙充填绿泥石。

1.1 孔隙衬里绿泥石

孔隙衬里是研究区绿泥石的主要产状(图1a),I类孔隙衬里绿泥石与早期黏土薄膜的形成密切相关,II类孔隙衬里绿泥石由孔隙流体在洁净的颗粒表面结晶而成。

1.1.1 I类孔隙衬里绿泥石 强水动力环境下悬浮黏土矿物和絮凝铁镁物质胶体难以沉淀,以吸附方式附着于原始颗粒表面,形成早期等厚黏土薄膜(姚泾利等, 2011; 张霞等, 2011)。研究区较为发育的火山碎屑为黏土包膜的形成奠定了物质基础,辫状河三角洲前缘水下分流河道沉积环境为黏土包膜的形成提供强水动力条件。早成岩阶段储层处于开放的成岩环境,孔隙流体内铁镁物质含量较高,I类孔隙衬里绿泥石附着于早期黏土薄膜生长,或直接由其重结晶而成,充足的物质基础和生长空间使大量绿泥石晶体短时间内占据了黏土包膜较为发育的有利区域。过快的生长速度和过多的晶体数量使绿泥石晶体之间相互制约,且较强的孔隙流体活动性也使晶体并非严格的垂直于颗粒表面生长,多呈不同角度斜切颗粒,晶体间排列相对杂乱,结晶程度较差,呈直径约 $2\sim3\mu\text{m}$ 的半自形假六边形片状产出,集合体呈近似等厚层状,厚度约为 $2\sim5\mu\text{m}$ (图1b)。铁镁物质难以在短时间内充分占据绿泥石晶格,能谱显示I类孔隙衬里绿泥石 FeO 平均质量分数仅为 23.50%, SiO₂ 平均质量分数高达 45.28%(表1)。

1.1.2 II类孔隙衬里绿泥石 模拟实验证明绿泥石可以在洁净的长石和石英颗粒表面成核和生长(Haile *et al.*, 2015),储层物性随埋深增加而变差,成岩环境开放性减弱,导致流体活动性降低,残余的孔隙流体内的铁镁物质促进II类孔隙衬里绿泥石在洁净的颗粒表面成核。形成环境的变化导致其与I类孔隙衬里绿泥石具有明显不同的特征,生长速率

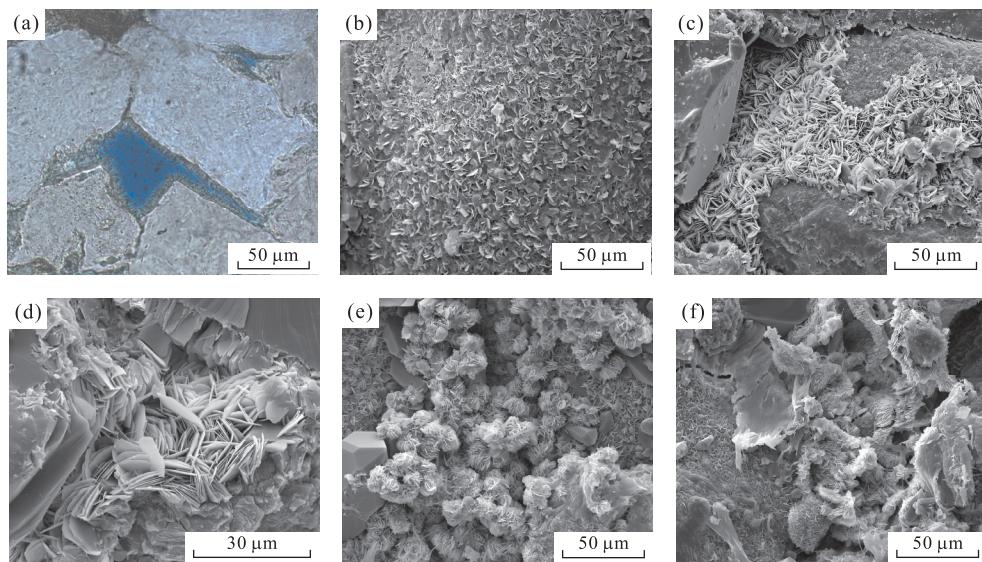


图1 不同类型绿泥石特征

Fig.1 Characteristics of different types of chlorite

a.孔隙衬里绿泥石,X2井,3 961.8 m,单偏光;b.I类孔隙衬里绿泥石,X1井,3 455.2 m,SEM;c.II类孔隙衬里绿泥石,X2井,3 889.0 m,SEM;
d.分散片状绿泥石,Y2井,3 722.0 m,SEM;e.绒球状绿泥石,Y1井,4 320.6 m,SEM;f.蠕虫状绿泥石,X2井,3 723.0 m,SEM

表1 不同类型绿泥石组成成分

Table 1 Composition of different types of chlorite

绿泥石类型	SiO ₂ (%)	FeO(%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO(%)	K ₂ O(%)	CaO(%)	样品数
I类孔隙衬里绿泥石	45.28	23.50	21.50	8.76	0.74	0.22	14
II类孔隙衬里绿泥石	38.96	29.68	20.93	9.12	1.11	0.20	21
分散片状绿泥石	34.10	35.21	22.25	8.29	0.08	0.08	14
绒球状绿泥石	33.96	33.14	23.83	8.10	0.91	0.06	17
蠕虫状绿泥石	33.08	33.78	22.66	9.38	1.10	0	2

显著降低,晶体数量明显减少,晶体拥有相对充足的成长空间和时间,自形程度和铁含量均有所增加,FeO平均质量分数为29.68%,SiO₂平均质量分数为38.96%(表1).单晶呈直径约为3~7 μm的相对自形六方片状,垂直或高角度斜切颗粒表面发育,晶体间排列相对有序,集合体呈厚度约为5~9 μm的近似等厚层状,分布连续性变差(图1c).

1.2 孔隙充填绿泥石

孔隙充填绿泥石以孔隙流体直接结晶而成的分散片状绿泥石和与伊利石共生的绒球状绿泥石为主,发育极少量高岭石转化的蠕虫状绿泥石.

1.2.1 分散片状绿泥石 随埋藏深度增加,储层逐渐演变为封闭的成岩环境,早期黏土包膜和孔隙衬里绿泥石的形成消耗了孔隙流体携带的大部分铁镁物质,火山碎屑的溶蚀提供了局部铁镁物质富集区域,孔隙充填绿泥石多集中在较大的残余粒间孔和溶蚀孔内.绿泥石生长速度明显减慢,晶体数量

大大减少,单晶呈直径约为5~15 μm的全自形六方片状,往往平行排列形成集合体,多个集合体相互交错排列(图1d).铁离子具有充足的时间取代绿泥石晶格中的阳离子,分散片状绿泥石具有最高的FeO含量,平均质量分数高达35.21%(表1).

1.2.2 绒球状绿泥石 在相对封闭的成岩环境中,钾长石的溶蚀为伊利石的形成提供必要的钾离子,火山碎屑溶蚀为绿泥石的形成提供铁镁物质,伊利石和绿泥石均易在偏碱性的环境中生成.当达到伊利石沉淀所需的钾离子临界饱和度时,迅速生成大量的伊利石(黄思静等,2009),当具有足够的铁镁物质时,绿泥石以伊利石为基底与其间歇共生,绿泥石的生长受到伊利石的限制,晶体自形程度和铁离子含量均低于其他类型孔隙充填绿泥石,以直径约为5~20 μm的绒球状集合体产出(图1e).

1.2.3 蠕虫状绿泥石 斜长石在低温下具有较低的溶解反应吉布斯自由能增量,偏基性的斜长石具

有显著的低温条件下的不稳定性,在缺少额外的钾离子来源的情况下,溶蚀产物以高岭石为主(黄思静等,2009)。火山碎屑溶蚀提供铁镁物质,随着溶蚀耗酸以及金属阳离子的生成,流体逐渐变为碱性环境,铁镁离子对高岭石晶格中硅铝离子进行置换,在保留高岭石原始蠕虫状集合体形态下重结晶形成绿泥石,蠕虫状绿泥石仅在少量溶蚀孔隙内发育,单晶呈相对自形片状紧密平行排列(图 1f),铁离子含量略低于分散片状绿泥石。

2 绿泥石与硅质胶结分布规律

2.1 储层粒度分类

花港组上段主要发育辫状河三角洲前缘亚相,包括水下分流河道、水下分流间湾和河口坝等沉积微相。水下分流河道构成辫状河三角洲前缘的沉积主体(潘荣等,2013),河道频繁的改道对河口坝和水下分流间湾造成不同程度的冲刷改造和破坏(杜忠明等,2013)。储层岩石成分相对稳定,以长石岩屑质石英砂岩为主,石英、长石和岩屑的质量分数分别主要分布在 60%~70%、12%~20% 和 15%~25%。典型的完整水下分流河道自下而上依次发育砂质砾岩(泥砾岩)、砾质砂岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩和粉砂岩。底部砂质砾岩厚度多为 0.1~1.0 m,砾石以变质石英岩、中酸性喷出岩、燧石和泥质岩等为主,分选中等,磨圆较好(图 2a)。水下分流间湾泥质岩在强

水动力条件下被搅动和冲刷形成的泥砾经短距离搬运和再沉积形成泥砾岩,分选磨圆较差的泥砾多呈现明显的顺层定向排列(图 2b)。砾质砂岩厚度多为 0.5~3.0 m,砾石成分与其下部砂质砾岩中砾石基本一致(图 2c)。粗砂岩、中砂岩和细砂岩为水下分流河道沉积的主体(图 2d, 2e, 2f),厚度多为 1~10 m 不等,以块状层理和平行层理为主(图 2g),发育少量交错层理(图 2h)。顶部粉砂岩厚度多为 0.3~1.0 m,以块状层理和波状层理为主(图 2i),物性极差,难以形成有效储层。

粒度对储层物性具有决定性的影响,考虑到粒度三级命名法划分的岩性过多,本文按照储层粒级主次划分为粉砂细砂岩、中砂细砂岩、细砂中砂岩、粗砂中砂岩、中砂粗砂岩、砾质砂岩、砂质砾岩和泥砾岩。砾质砂岩、中砂粗砂岩和粗砂中砂岩储层物性最好,细砂中砂岩和中砂细砂岩次之,粉砂细砂岩、砂质砾岩和泥砾岩最差(图 3)。砂质砾岩和泥砾岩孔隙度较低,但该类储层测试样品较短且易缺损,往往显示出与真实物性不符的相对高渗特征。

2.2 绿泥石与硅质胶结的异常分布关系

绿泥石的富集程度是多种因素综合作用的结果,强水动力条件和火山碎屑蚀变有利于悬浮黏土矿物和絮凝铁镁物质胶体生成,以吸附状态附着于颗粒表面,形成早期黏土薄膜,促进 I 类孔隙衬里绿泥石的发育,残余孔隙流体物质决定 II 类孔隙衬里绿泥石的发育程度,孔隙保存和强烈溶蚀为孔隙充

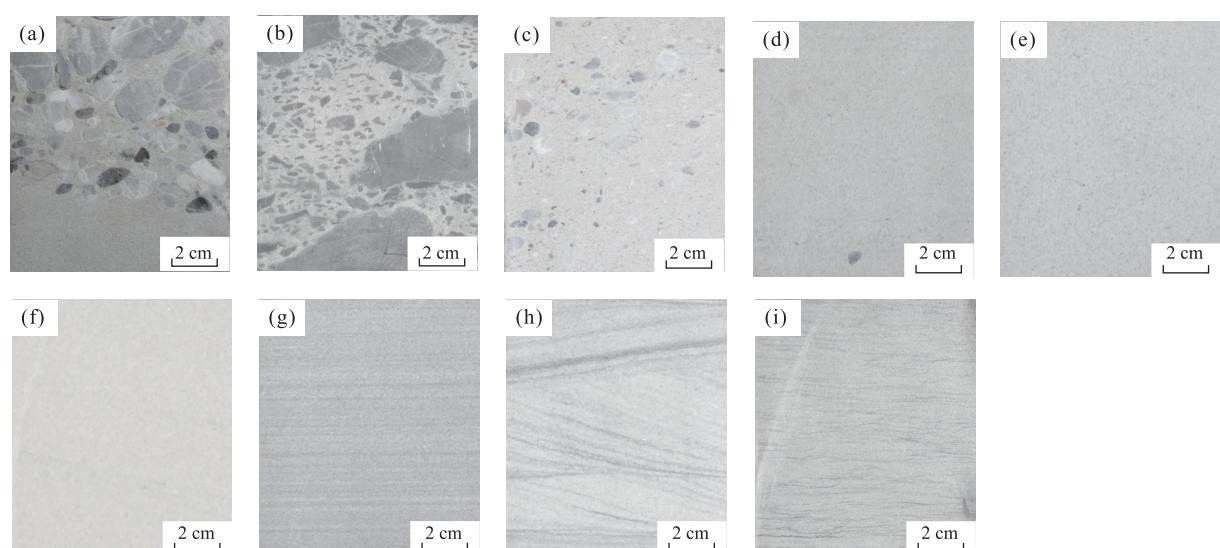


图 2 水下分流河道沉积微相岩性组合

Fig.2 Lithologies group of underwater distributary channel

a.砂质砾岩,X2 井,3 974.7 m;b.泥砾岩,X2 井,3 890.1 m;c.砾质砂岩,Y2 井,4 014.9 m;d.粗砂岩,X2 井,3 978.3 m;e.中砂岩,X2 井,4 324.6 m;f.细砂岩,Y1 井,4 338.0 m;g.平行层理,Y1 井,4 330.1 m;h.交错层理,Y1 井,3 870.0 m;i.波状层理粉砂岩,X1 井,3 848.6 m

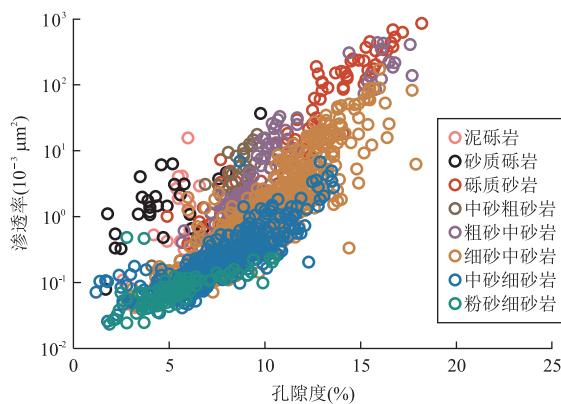


图3 储层岩性控制的孔隙度—渗透率交会

Fig.3 Porosity-permeability crossplot under the control of reservoir lithology

填绿泥石提供生长空间和物质基础,绿泥石相对含量随储层粒度增大呈现先上升后下降的趋势,粗砂中砂岩、中砂粗砂岩和砾质砂岩的绿泥石相对含量较高(图4a)。粉砂细砂岩—中砂细砂岩—细砂中砂岩—粗砂中砂岩—中砂粗砂岩—砾质砂岩反映水动力条件不断增强,有利于I类孔隙衬里绿泥石的发育,残余的大量铁镁物质有利于II类孔隙衬里绿泥石的发育,且随储层粒度变粗,石英等刚性成分含量增加,塑性颗粒和杂基含量减少,原生孔隙得以保存,有利于后期溶蚀作用的发育,为孔隙充填绿泥石的形成提供必要条件。砂质砾岩和泥砾岩虽然也反映了强水动力环境,但分选较差的沉积物快速混杂堆积,大量黏土集合体以杂基形式充填粒间孔隙,塑性岩屑含量也较高,孔隙保存较差,后期溶蚀作用较弱,均不利于绿泥石的发育。

与绿泥石的分布规律相似,硅质胶结含量随储层粒度变粗也呈现先增长后降低的趋势,且绿泥石相对含量较高的粗砂中砂岩、中砂粗砂岩和砾质砂

岩的硅质胶结更为发育,而绿泥石相对含量较低的粉砂细砂岩、中砂细砂岩、砂质砾岩和泥砾岩的硅质胶结含量却较少(图4b),明显与绿泥石能有效抑制硅质胶结作用的观点存在矛盾,两者存在异常分布关系的原因有待进一步分析。

3 绿泥石对硅质胶结的影响

不同产状绿泥石的发育程度、排列方式和分布位置等均存在很大差异,对硅质胶结的影响也明显不同.I类孔隙衬里绿泥石结晶程度较差,晶体排列杂乱,晶间孔复杂,分布连续且达到一定厚度的该类绿泥石能有效抑制硅质胶结;II类孔隙衬里绿泥石晶体自形程度较高,垂直或高角度斜切颗粒表面,晶间孔有序发育,集合体厚度较大,但连续性较差,对硅质胶结的抑制效果减弱;孔隙充填绿泥石多分散充填于较大孔隙内,难以对硅质胶结起到抑制作用。绿泥石对硅质胶结的影响与地层条件和储层质量等具有紧密的关系,综合铸体薄片、扫描电镜和包裹体测试等资料,依据硅质胶结形态、分布规律、发育程度和形成时间等因素将其划分为早期柱状石英晶体和晚期石英加大边两种典型产状(图5a,5b),重点研究不同粒度储层绿泥石和硅质胶结特征以及地层条件和储层质量演化,分析绿泥石对硅质胶结的具体影响,解释绿泥石与硅质胶结存在异常分布规律的原因。

浅埋藏阶段,压实较弱,各类粒度储层孔隙均较为发育。孔隙衬里绿泥石形成时间较早,具备抑制硅质胶结的先决条件。绿泥石占据硅质胶结的成核基底,虽然绿泥石晶间孔发育,但多为连通性较差的纳米孔隙,孔隙内部流体流动困难,形成稳定分布的束

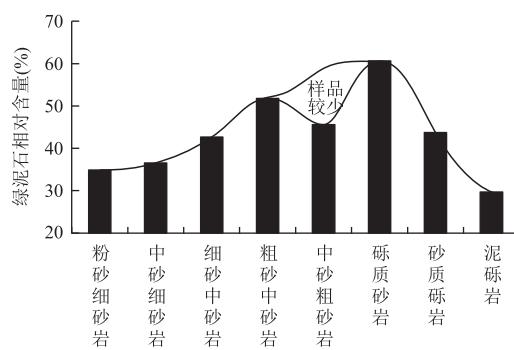


图4 不同粒度储层绿泥石(a)和硅质胶结(b)相对含量分布

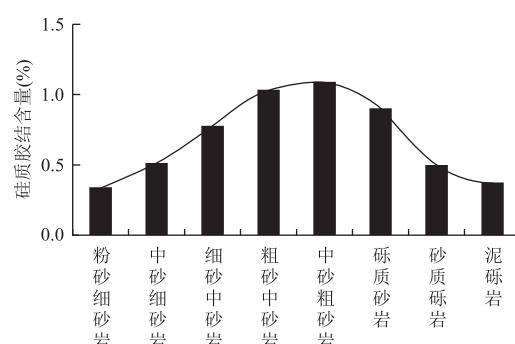


Fig.4 Distribution of chlorite (a) and siliceous cement (b) content of different granularity reservoirs

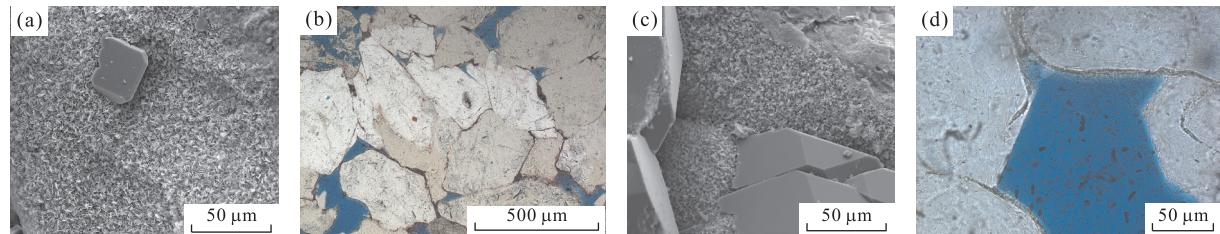


图 5 硅质胶结特征及其与绿泥石的关系

Fig. 5 Characteristics of siliceous cement and its relationship with chlorite

a.孤立柱状石英晶体,X2井,3 620.2 m,SEM;b.连续石英加大边,X2井,3 620.0 m,单偏光;c.石英加大边覆盖绿泥石,X2井,3 608.0 m,SEM;d.石英加大边覆盖绿泥石,X2井,3 621.0 m,单偏光

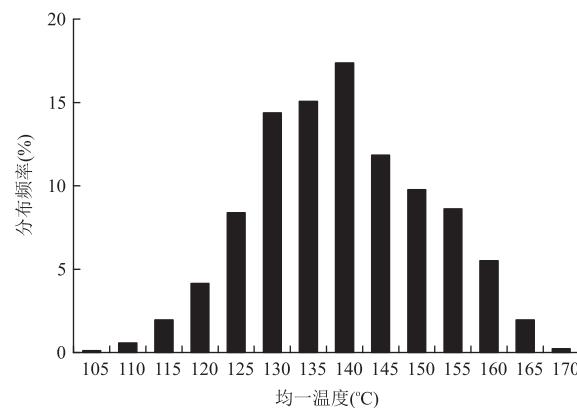


图 6 硅质胶结包裹体均一温度分布

Fig. 6 Distribution of homogenization temperature of fluid inclusions in siliceous cement

束缚水薄膜,有效地阻隔粒间孔隙流体与石英颗粒表面的物质和能量交换,同时产生石英压溶溶解障碍,抑制硅质的供应(Ajdukiewicz and Larese, 2012)。孔隙衬里绿泥石能有效地抑制早期硅质胶结,仅在绿泥石不连续或颗粒破裂处发育少量孤立柱状石英晶体(图 5a),成岩后期可进一步生长成连续的石英加大边。

深埋藏阶段,地温升高促使硅质的溶解速率加快,水分子活动性增强,颗粒表面束缚水薄膜减薄,更多的硅质与颗粒表面接触。但绿泥石晶体将石英颗粒表面分割成多个较为孤立的微单元格(Ajdukiewicz and Larese, 2012),且高密度的绿泥石晶体营造的微化学环境使硅质胶结反应活化能较高,高温是在这种环境下克服胶结障碍的必要条件(Harris, 2006),当达到临界温度后,硅质胶结覆盖孔隙衬里绿泥石形成连续的石英加大边(图 5c,5d)。花岗组石英加大边的流体包裹体均一温度均在 100 °C 之上,主要分布在 120~155 °C(图 6),表明石英加大边形成时间较晚,主要发育在中成岩 A 期至中成岩 B 期。足够高的地层温度只是硅质胶结克服绿泥石的

抑制作用而发育的必要条件之一,生长空间是否充足是决定其最终含量的另一重要因素。粗粒储层(砂质砾岩和泥砾岩除外)绿泥石更为发育,岩石比表面积更小,理论上更有利于绿泥石对硅质胶结的抑制作用,但其石英含量较高,塑性颗粒和杂质含量较少,储层抗压实能力较强,原生孔隙得到有效的保存,同时有利于酸性流体的注入和溶蚀作用的发育,当达到克服绿泥石对硅质胶结抑制的临界温度时,具有充足的硅质胶结生长空间,硅质胶结较为发育。细粒储层和砂质砾岩及泥砾岩储层绿泥石相对含量较低,对硅质胶结的抑制作用较弱,但其塑性成分含量较高,抗压实能力较差,原生孔隙大量损失,同时不利于后期的溶蚀增孔,当达到克服绿泥石对硅质胶结抑制的临界温度时,仅有少量的孔隙空间可供硅质胶结生长,导致其硅质胶结含量明显低于绿泥石富集的粗粒储层。

4 结论

(1) 绿泥石以孔隙衬里和孔隙充填形式产出:I类孔隙衬里绿泥石最为发育,晶体自形程度和铁含量较低,集合体呈等厚连续分布,附着早期黏土薄膜生长或直接由其重结晶而成;II类孔隙衬里绿泥石晶体自形程度和铁含量略有升高,集合体的连续性变差,由孔隙流体直接沉淀形成;孔隙充填绿泥石可细分为分散片状、绒球状和蠕虫状,晶体自形程度和铁含量较高,主要与火山碎屑和长石溶蚀密切相关。

(2) 绿泥石和硅质胶结在不同粒度储层中的分布呈现异常的正相关关系,在粗粒储层(砂质砾岩和泥砾岩除外)含量较高,在细粒储层和砂质砾岩及泥砾岩储层中含量较低。浅埋低地温阶段,绿泥石有效抑制硅质胶结,仅在绿泥石不连续或颗粒破裂处以孤立柱状石英晶体产出;深埋高地温阶段,绿泥石难

以有效地抑制硅质胶结,以石英加大边产出,粗粒储层孔隙较为发育,为硅质胶结提供充足的生长空间,导致其含量较高,细粒储层和砂质砾岩及泥砾岩储层孔隙保存较差,硅质胶结含量较低。

References

- Ajdukiewicz, J.M., Larese, R.E., 2012. How Clay Grain Coats Inhibit Quartz Cement and Preserve Porosity in Deeply Buried Sandstones: Observations and Experiments. *AAPG Bulletin*, 96(11): 2091–2119. doi: 10.1306/02211211075
- Bahls, A.B., De Ros, L.F., 2013. Origin and Impact of Authigenic Chlorite in the Upper Cretaceous Sandstone Reservoirs of the Santos Basin, Eastern Brazil. *Petroleum Geoscience*, 19(2): 185–199. doi: 10.1144/petgeo2011-007
- Berger, A., Gier, S., Krois, P., 2009. Porosity-Preserving Chlorite Cements in Shallow-Marine Volcaniclastic Sandstones: Evidence from Cretaceous Sandstones of the Sawan Gas Field, Pakistan. *AAPG Bulletin*, 93(5): 595–615. doi: 10.1306/01300908096
- Billault, V., Beaufort, D., Baronnet, A., et al., 2003. A Nanopetrographic and Textural Study of Grain-Coating Chlorites in Sandstone Reservoirs. *Clay Minerals*, 38(3): 315–328. doi: 10.1180/0009855033830098
- Du, Z.M., Shi, J.A., Sun, G.Q., et al., 2013. The Sedimentary Characteristics of Braided Delta of the Upper Xiagan-chraigou Formation in Maxian Region of Qaidam Basin. *Natural Gas Geoscience*, 24(3): 505–511 (in Chinese with English abstract).
- EHRENBERG, S. N., 1993. Preservation of Anomalously High Porosity in Deeply Buried Sandstones by Grain-Coating Chlorite: Examples from the Norwegian Continental Shelf. *AAPG Bulletin*, 77(7): 1260–1286. doi: 10.1111/j.1365-3091.2009.01106.x
- Gould, K., Pe-Piper, G., Piper, D.J.W., 2010. Relationship of Diagenetic Chlorite Rims to Depositional Facies in Lower Cretaceous Reservoir Sandstones of the Scotian Basin. *Sedimentology*, 57(2): 587–610. doi: 10.1111/j.1365-3091.2009.01106.x
- Haile, B.G., Hellevang, H., Aagaard, P., et al., 2015. Experimental Nucleation and Growth of Smectite and Chlorite Coatings on Clean Feldspar and Quartz Grain Surfaces. *Marine and Petroleum Geology*, 68: 664–674. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2015.02.006
- Harris, N.B., 2006. Low-Porosity Haloes at Stylolites in the Feldspathic Upper Jurassic Ula Sandstone, Norwegian North Sea: An Integrated Petrographic and Chemical Mass-Balance Approach. *Journal of Sedimentary Research*, 76(3): 444–459. doi: 10.2110/jsr.2006.040
- Hillier, S., 1994. Pore-Lining Chlorites in Siliciclastic Reservoir Sandstones: Electron Microprobe, SEM and XRD Data, and Implications for their Origin. *Clay Minerals*, 29(4): 665–679. doi: 10.1180/claymin.1994.029.4.20
- Huang, S.J., Huang, K.K., Feng, W.L., et al., 2009. 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. *Geochimica*, 38(5): 498–506 (in Chinese with English abstract).
- Lan, Y.F., Huang, S.J., Liang, R., et al., 2011. Influence of Authigenic Chlorite on the Relationship of Porosity to Permeability in the Sandstone Reservoir: A Case Study from Chang-8 Oil-Bearing Formation of Triassic in Jiyuan-Huaqing Area, Ordos Basin. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(3): 313–320 (in Chinese with English abstract).
- Lei, C., Ye, J.R., Wu, J.F., et al., 2014. Dynamic Process of Hydrocarbon Accumulation in Low-Exploration Basins: A Case Study of Xihu Depression. *Earth Science*, 39(7): 837–847 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. K., Peng, J., Liu, J. J., et al., 2009. Pore-Preserving Mechanism of Chlorite Rims in Tight Sandstone—An Example from the T₃x Formation of Baojie Area in the Transitional Zone from the Central to Southern Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 30(1): 53–58 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L.Y., Qu, Z.H., 1998. Properties of Clay Mineral of Clastic Rock in Shanshan Oil Field, Xinjiang. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 28(5): 443–446 (in Chinese with English abstract).
- Pan, R., Zhu, X.M., Liu, F., et al., 2013. Sedimentary Characteristics of Braided Delta and Relationship to Reservoirs in the Cretaceous of Kelasu Tectonic Zone in Kuqa Depression, Xinjiang. *Journal of Palaeogeography*, 15(5): 707–716 (in Chinese with English abstract).
- Pe-Piper, G., Weir-Murphy, S., 2008. Early Diagenesis of Inner-Shelf Phosphorite and Iron-Silicate Minerals, Lower Cretaceous of the Orpheus Graben, Southeastern Canada: Implications for the Origin of Chlorite Rims. *AAPG Bulletin*, 92(9): 1153–1168. doi: 10.1306/05050807118
- Qu, X. Y., Liu, Z., Gao, Y., et al., 2015. The Influence and Formation Environment of Chlorite Coatings in the Clastic Rock. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(4): 786–794 (in Chinese with English abstract).
- Su, A., Chen, H. H., 2015. Geochemical Characteristics of Oil

- and Source Rock, Origin and Genesis of Oil in Xihu Depression, East China Sea Basin. *Earth Science*, 40(6): 1072—1082(in Chinese with English abstract).
- Sun, Z. L., Huang, S. J., Zhang, Y. X., et al., 2008. Origin and Diagenesis of Authigenic Chlorite within the Sandstone Reservoirs of Xujiahe Formation, Sichuan Basin, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(3): 459—468(in Chinese with English abstract).
- Tao, S. Z., Zou, C. N., 2005. Accumulation and Distribution of Natural Gases in Xihu Sag, East China Sea Basin. *Petroleum Exploration & Development*, 32(4): 103—110(in Chinese with English abstract).
- Tian, J. F., Chen, Z. L., Yang, Y. Y., 2008. Protection Mechanism of Authigenic Chlorite on Sandstone Reservoir Pores. *Geological Science and Technology Information*, 27(4): 49—54(in Chinese with English abstract).
- Tian, J. F., Liu, C. Y., Wang, G. C., et al., 2011. Alkaline Dissolution of Sandstone in the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin. *Earth Science*, 36(1): 103—110(in Chinese with English abstract).
- Xie, W. R., Yang, W., Zhao, X. Y., et al., 2010. Influences of Chlorite on Reservoir Physical Properties of the Xujiahe Formation in the Central Part of Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 674—679(in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Cao, Y. C., Wang, Y. Z., et al., 2015. Genesis of High-Quality Reservoirs of Fan Delta Front in Lower Part of the Fourth Member of Shahejie Formation in Bonan Subsag. *Earth Science*, 40(12): 2077—2090(in Chinese with English abstract).
- Yang, W., Wei, G. Q., Zhao, X. Y., et al., 2013. Can Authigenic Pore-Lining Chlorite Restrain Quartz Overgrowth in Clastic Reservoir? A Case Study of Sandstone Reservoir in Xujiahe Formation, Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 34(z1): 128—135(in Chinese with English abstract).
- Yao, J. L., Wang, Q., Zhang, R., et al., 2011. Forming Mechanism and Their Environmental Implications of Chlorite-Coatings in Chang 6 Sandstone (Upper Triassic) of Hua-Qing Area, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(1): 72—79(in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. F., Cheng, R. H., Zhao, X. Q., et al., 2012. Types and Succession of Pyroclastic Rocks Diagenesis in Lower Cretaceous of Wuexun and Bei'er Depression in Hailaer Basin. *Earth Science*, 37(4): 851—859(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Lin, C. M., Chen, Z. Y., 2011. Characteristics of Chlorite Minerals from Upper Triassic Yanchang Formation in the Zhenjing Area, Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 85(10): 1659—1671 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. F., Wang, J. G., Lan, C. L., et al., 2016. Forming Mechanisms of Chlorite Films in Yanchang Formation, Ordos Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 40(4): 20—28 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 杜忠明,史基安,孙国强,等,2013.柴达木盆地马仙地区下干柴沟组上段辫状河三角洲沉积特征.天然气地球科学,24(3):505—511.
- 黄思静,黄可可,冯文立,等,2009.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.地球化学,38(5):498—506.
- 兰叶芳,黄思静,梁瑞,等,2011.自生绿泥石对砂岩储层孔隙度—渗透率关系的影响——以鄂尔多斯盆地姬塬—华庆地区三叠系长8油层组为例.成都理工大学学报(自然科学版),38(3):313—320.
- 雷闯,叶加仁,吴景富,等,2014.低勘探程度盆地成藏动力学过程:以西湖凹陷中部地区为例.地球科学,39(7): 837—847.
- 刘金库,彭军,刘建军,等,2009.绿泥石环边胶结物对致密砂岩孔隙的保存机制——以川中—川南过渡带包界地区须家河组储层为例.石油与天然气地质,30(1):53—58.
- 刘林玉,曲志浩,1998.新疆鄯善油田碎屑岩中的粘土矿物特征.西北大学学报(自然科学版),28(5):443—446.
- 潘荣,朱筱敏,刘芬,等,2013.新疆库车坳陷克拉苏冲断带白垩系辫状河三角洲沉积特征及其与储集层发育的关系.古地理学报,15(5):707—716.
- 曲希玉,刘珍,高媛,等,2015.绿泥石包壳对碎屑岩储层物性的影响及其形成环境——以鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界为例.沉积学报,33(4):786—794.
- 苏奥,陈红汉,2015.东海盆地西湖凹陷油岩地球化学特征及原油成因来源.地球科学,40(6):1072—1082.
- 孙治雷,黄思静,张玉修,等,2008.四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.沉积学报,26(3): 459—468.
- 陶士振,邹才能,2005.东海盆地西湖凹陷天然气成藏及分布规律.石油勘探与开发,32(4):103—110.
- 田建锋,陈振林,杨友运,2008.自生绿泥石对砂岩储层孔隙的保护机理.地质科技情报,27(4):49—54.
- 田建锋,刘池洋,王桂成,等,2011.鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩的碱性溶蚀作用.地球科学,36(1):103—110.
- 谢武仁,杨威,赵杏媛,等,2010.川中地区须家河组绿泥石对储集层物性的影响.石油勘探与开发,37(6):674—679.
- 杨田,操应长,王艳忠,等,2015.渤海洼陷沙四下亚段扇三角

- 洲前缘优质储层成因.地球科学,40(12):2077—2090.
 杨威,魏国齐,赵杏媛,等,2013.碎屑岩储层中自生绿泥石衬
 边能抑制石英次生加大吗?——以四川盆地须家河组
 砂岩储层为例.石油学报,34(z1):128—135.
 姚泾利,王琪,张瑞,等,2011.鄂尔多斯盆地华庆地区延长组
 长6砂岩绿泥石膜的形成机理及其环境指示意义.沉
 积学报,29(1):72—79.
 于振锋,程日辉,赵小青,等,2012.海拉尔盆地乌尔逊—贝尔

- 凹陷下白垩统火山碎屑岩成岩作用类型及序列.地球
 科学,37(4):851—859.
 张霞,林春明,陈召佑,2011.鄂尔多斯盆地镇泾区块上三叠
 统延长组砂岩中绿泥石矿物特征.地质学报,85(10):
 1659—1671.
 周晓峰,王建国,兰朝利,等,2016.鄂尔多斯盆地延长组绿泥
 石膜的形成机制.中国石油大学学报(自然科学版),40
 (4):20—28.

* * * * *

《地球科学》

2017年10月 第42卷 第10期 要目预告

- | | |
|--------------------------------------|------|
| 准噶尔盆地玛湖凹陷晚二叠世至中三叠世古气候、物源及构造背景..... | 黄云飞等 |
| 山东省灵山岛下白垩统浊积岩中与滑塌作用相关的软沉积物变形构造 | 梁钊等 |
| 鄂西丹江口水库区域周边断裂构造解析及特征 | 林松等 |
| 丰宁黄土—古土壤剖面常量元素地球化学特征 | 毛欣等 |
| 台湾海峡及邻区剖面岩石圈有效弹性厚度及其构造意义 | 王明明等 |
| 湘东锡田燕山期A型花岗岩黑云母矿物化学特征及其成岩成矿意义 | 周云等 |
| 鄂尔多斯盆地南部延长组重力流致密储层成岩作用及物性演化 | 孙宁亮等 |
| 滇西北程海—宾川断裂带第四纪分段活动性的构造地貌表现与限定 | 黄小巾等 |