

· 战略性非金属矿产 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2023.0604

阜东斜坡区齐古组自生绿泥石的赋存状态与影响因素

祁利祺, 张晓童, 张浩宇, 陈可欣, 梅红婧, 于景维

(中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 在野外剖面及岩心观察基础上, 利用薄片鉴定、扫描电镜以及电子探针等多重手段, 对阜东斜坡区齐古组砂岩储层中自生绿泥石的赋存特征和形成机制进行了详细的分析, 为油气藏寻找以及开发方案的调整提供方向。结果表明, 研究区齐古组储层砂岩中自生绿泥石在镜下呈现3种赋存状态: 衬垫式、薄膜式和充填式, 以衬垫式为主, 相对应的储层物性较好; 自生绿泥石为富铁绿泥石, 凝灰质岩屑以及长石类矿物的溶蚀、黏土矿物之间的转化以及河流溶解的Fe所形成的絮状沉淀都为自生绿泥石的形成提供了重要的物质基础; 粒径大的砂岩储层中流体流动性相对较好, 有利于形成绿泥石大量发育的碱性环境; 齐古组绿泥石的赋存状态一致, 其含量不同对储层储集性能及敏感性有一定影响。

关键词: 阜东斜坡区; 齐古组; 自生绿泥石; 形成机制; 赋存状态

中图分类号: P578.962; P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)06-0826-12

The occurrence states and influencing factors of authigenic chlorite in the Qigu Formation of the Fudong slope area

QI Li-qi, ZHANG Xiao-tong, ZHANG Hao-yu, CHEN Ke-xin, MEI Hong-jing and YU Jing-wei

(China University of Petroleum at Karamay, Karamay 834000, China)

Abstract: On the basis of field profile and core observation, multiple methods such as thin section identification, scanning electron microscopy, and electron probe were used to conduct a detailed analysis of the occurrence characteristics and formation mechanism of authigenic chlorite in sandstone reservoir of the Qigu Formation in the Fudong slope area, providing the adjustment direction for the search for oil and gas reservoirs and development plans. The results indicate that the authigenic chlorite in the sandstone of the Qigu Formation reservoir in the study area exhibits three occurrence states under the microscope: liner-type, membrane-type, and filling-type, with liner-type being the main occurrence, and the corresponding reservoir properties are good; Authigenic chlorite is iron-rich chlorite, and the dissolution of tuffaceous debris and feldspar minerals, the transformation between clay minerals, and the flocculent precipitation formed by Fe dissolved in rivers are the important material basis for the formation of authigenic chlorite; Sandstones with large grain size and well sorting have high content of authigenic chlorites, which is helpful for forming and protecting of authigenic chlorite; Strong fluid dynamic is also an important controlling factor of authigenic chlorite formation; The occurrence states of chlorite in the Qigu Formation are similar, and different content of authigenic chlorite have a certain affection on the reservoir property and sensitivity.

收稿日期: 2023-03-29; **接受日期:** 2023-08-19; **编辑:** 郝艳丽

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技厅自然科学面上基金项目(2021D01A201); 克拉玛依市科技局人才创新项目(20212022hjxc0015)

作者简介: 祁利祺(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事沉积学相关的教学研究, E-mail: 45217017@qq.com; 通讯作者: 于景维(1985-), 男, 博士, 副教授, 从事储层沉积学相关的教学研究, E-mail: yyjjww-1985@163.com。

Key words: Fudong slope area; Qigu Formation; authigenic chlorite; genetic mechanism; occurrence state

Fund support: Natural Science Foundation of the Science and Technology Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2021D01A201); Talent Innovation Project of Karamay Science and Technology Bureau(20212022hjcxrc0015)

黏土矿物为地壳中重要的组成单元,粒径常小于 $2\ \mu\text{m}$,且类型多样。绿泥石是最常见也是最重要的黏土矿物之一(李仁泽等, 2016; 李海东等, 2017; 张娟等, 2021; 谭双等, 2022),在砂岩储层中不同含量以及赋存状态的绿泥石可能会造成储层的储集性能、润湿性等方面产生较大差异,影响优质储层的分布以及储层后期开发方式的选择(黄思静等, 2004; 谢武仁等, 2010; 孙全力等, 2012; 田建锋等, 2014)。由于在多个中新世代的含油气盆地优质储集砂岩中都发现有绿泥石,其赋存状态、成因机制及其对储层储集性能的影响成为众多学者的重点关注对象(Hillier *et al.*, 1996; Salman *et al.*, 2002; Wordern *et al.*, 2006; 田建锋等, 2008; 刘栋等, 2011; 杨巍等, 2012, 2013; 颜其彬等, 2014)。

准噶尔盆地中央拗陷带内阜康凹陷为富烃凹陷之一,凹陷东部斜坡带(简称阜东斜坡区)为油气聚集指向区(于景维等, 2014; 唐勇等, 2022)。斜坡带侏罗系砂体普遍发育,有利于油气聚集,受到较多关注(陈丹丹等, 2015; 曾治平, 2017; 于景维等, 2019, 2022)。近几年阜东斜坡区在上侏罗统齐古组(J_3q)获得重要油气突破,多口井在该层获得工业油流,油气勘探潜力较大(于景维等, 2016)。前人通过研究发现绿泥石在齐古组中较为普遍,明确绿泥石为优质储层形成控制因素之一(于景维等, 2018)。随着勘探开发的深入,发现储层酸化效果极差,油气开采遇阻,究其原因因为绿泥石遇酸会产生大量氢氧化铁,堵塞孔隙,严重破坏油层孔隙结构;不同含量及赋存状态的绿泥石造成相邻井产能差异较大,难以对区块产能进行有效性评价。由于前人针对研究区齐古组绿泥石缺乏系统性研究,面对现场问题难以进行有效地质指导。针对上述问题,本次研究利用野外剖面、岩心观察等宏观分析手段和薄片鉴定、扫描电镜等微观分析手段,详细分析了阜东斜坡区齐古组砂岩储层中自生绿泥石赋存状态、分布特征以及形成机制,重点加强了优质储层中绿泥石含量及其赋存状态的分析,为推动研究区滚动勘探和提高开发效益提供重要的地质指导。

1 研究区概况

准噶尔盆地可划分包括中央拗陷等7个一级构造单元,研究区位于中央拗陷东南部阜康凹陷的东部斜坡带,面积约 $800\ \text{km}^2$,主体同北三台凸起相连,表现为向西北倾斜的单斜构造(图 1a)。由于紧邻富烃凹陷,斜坡带为有利成藏区域。区内共有 40 余口钻井钻遇齐古组(图 1b),其中出油井 12 口,取芯井 20 口,芯长超过 200 m。上侏罗统齐古组埋深小于 2 500 m,目前钻井显示其厚度最厚可达 400 m,自下而上可划分为 3 段,受燕山运动影响,齐古组三段受到较为严重的剥蚀,齐古组一段最为完整。

齐古组时期物源来自于北部奇台凸起,研究区发育进积型辫状河三角洲沉积,由底至顶由辫状河三角洲前缘亚相过渡到平原亚相(图 1c)。岩性以中粒、细粒岩屑砂岩为主,岩屑成分多样,其中中酸性凝灰质含量平均超过 60%。填隙物以胶结物为主,胶结类型多样,常见绿泥石以及方解石,砂体成分成熟度较低;颗粒分选较好,磨圆表现为次棱状-次圆状,反映颗粒结构成熟度较高。颗粒之间接触关系常见点-线接触,储集空间以原生粒间孔为主,平均孔隙度为 16.95%,平均渗透率为 $116.1 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,属于中孔中低渗型储层(于景维等, 2017)。前人利用自生矿物的组合、演化顺序以及岩石的结构构造等资料,综合认定研究区齐古组储集砂岩处于中成岩阶段 A 期(况昊等, 2015)。

2 样品和分析方法

对研究区阜东 16 井、阜东 162 井等 20 口井的齐古组储集砂岩岩心进行了全面采集,共采集 237 块样品。

2.1 电子探针

在新疆油田实验检测研究院采用日本电子(JEOL)公司的型号为 JXA-8230 电子探针对 20 块样品进行了成分分析,电流束斑最小 $<1\ \mu\text{m}$,定量分析检

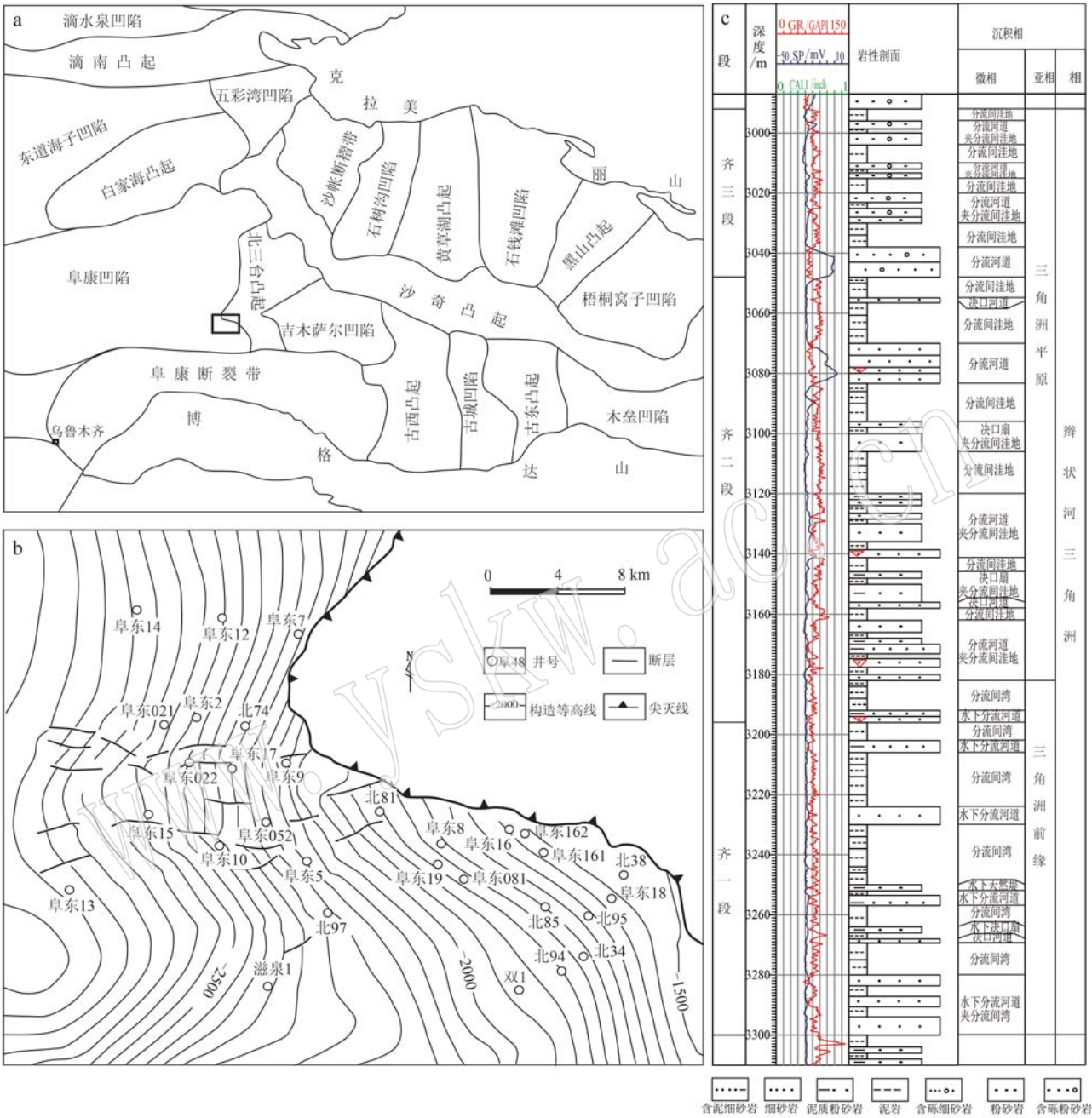


图 1 准噶尔盆地构造图(a)、研究区井位图(b)和阜东 021 井沉积相柱状图(c)
Fig. 1 Tectonic diagram of Junggar Basin(a), well location of the study area(b) and sedimentary facies column of well FD021(c)

出限一般约 100×10^{-6} , 可分析 B~U 之间的所有元素, 整体按照《GBT15074-2008-电子探针定量分析方法通则》进行实验。

2.2 常规以及铸体薄片制定

每块样品切取直径为 25 mm×5 mm 的岩样, 经过洗油、铸胶、胶固、磨平等步骤, 其中铸胶的压力为 6 MPa, 在新疆油田实验检测研究院按照 SY-T 5913-

2004 岩石制片标准进行制片, 共制得 126 张薄片。

2.3 扫描电镜及 X 衍射分析

在新疆油田实验检测研究院进行了扫描电镜和 X 衍射分析。扫描电镜的样品直径 10~15 mm, 长为 5 mm, 电子束强度为 10.9 mA, 高压为 5 kV, 按照《岩石样品扫描电子显微镜分析方法》SY/T5162-1997, 用扫描电子显微镜 JSM-5500LV 对 72 块样品进行了

扫描分析。

将砂岩样品磨成粉末,将待测粉末在试样架里均匀分布并用玻璃板压实,用X射线能谱仪QUANTAX400按照《岩石矿物能谱定量分析方法》SY/T6189-1996对100块砂岩样品进行了X衍射分析,仪器电压40 kV,电流250 mA,测试温度20℃,湿度50%。

3 自生绿泥石镜下赋存状态及分布规律

绿泥石在砂岩储层中的赋存状态主要有衬垫式、薄膜式以及充填式3种,衬垫式绿泥石晶体形态主要为叶片状,晶体垂直于颗粒边缘生长;薄膜式绿泥石存在于颗粒边缘,在颗粒接触处缺失;充填式绿泥石晶体形态受生长空间和时间影响较为完整,同颗粒无明显定向接触关系,常见石英或者方解石伴生(蔡来星等, 2023)。

根据铸体薄片以及扫描电镜的观察,发现研究

区齐古组砂岩储层中绿泥石以衬垫式赋存方式为主,绿泥石垂直颗粒生长,单一颗粒外绿泥石晶体厚度大小相似且整体连续性较好,衬垫式绿泥石的厚度分布于5~23.2 μm之间,平均值为11.79 μm(图2a)。扫描电镜下可见绿泥石晶间孔发育,同时晶体自形程度越接近孔隙越好(图2b)。其次为薄膜式,薄膜厚度较小,通常小于5 μm(图2c)。扫描电镜下常见片状集合体,局部绿泥石受沥青质浸染,晶形不太完整(图2d)。填充式绿泥石常伴随薄膜式和衬垫式绿泥石发育,范围较为局限,表现为塑性绿泥石充填于粒间孔隙或次生溶孔中(图2e),在扫描电镜下常以鳞片状集合体产出,伴生次生石英晶体(图2f)。前人研究发现,随着衬垫式绿泥石厚度的增大,储层物性逐渐变好,反映衬垫式绿泥石能够增强对原生孔隙的保护(田建锋等, 2014; 蒋艳霞等, 2015)。可一旦酸性流体进入,绿泥石对于储层孔隙结构的破坏也会增强。

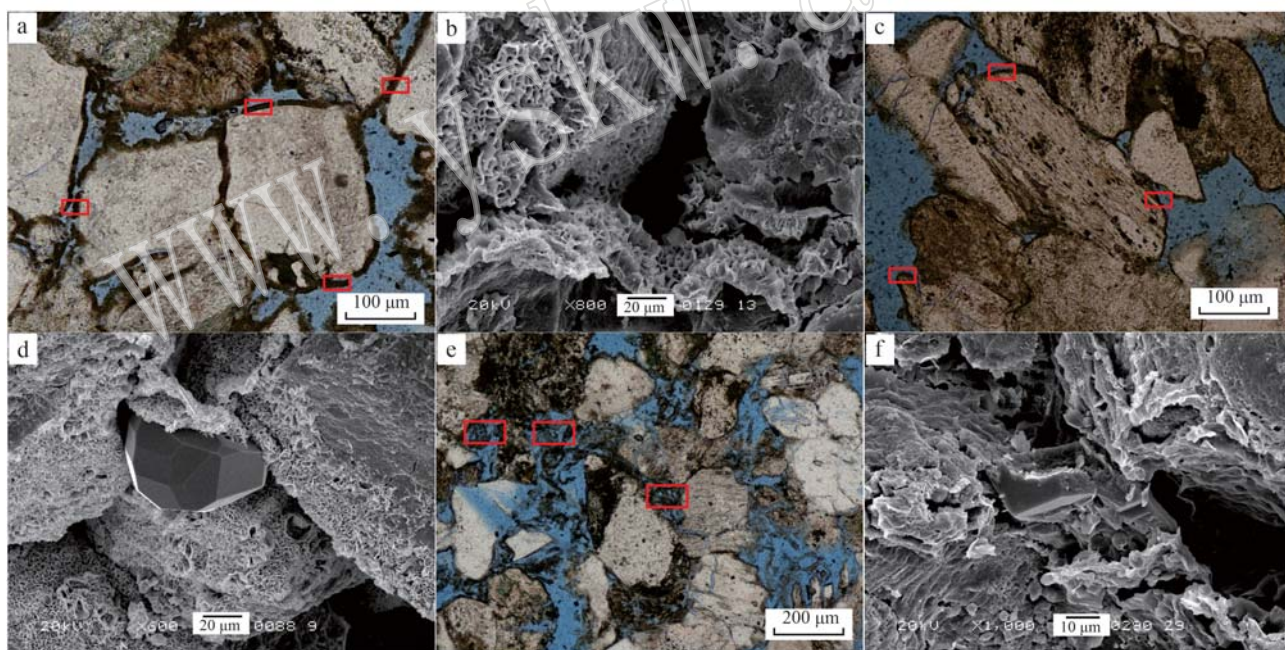


图2 研究区齐古组自生绿泥石镜下赋存状态

Fig. 2 The occurrence states of authigenic chlorite in the Qigu Formation of study area under microscope

a、b—衬垫式绿泥石,阜东161井,2 052 m; c、d—薄膜式绿泥石,阜东16井,2 030.2 m; e、f—充填式绿泥石,阜东19井,2 351 m
a, b—liner-type chlorite, well FD161, 2 052 m; c, d—membrane-type chlorite, well FD16, 2 030.2 m; e, f—filling-type chlorite, well FD19, 2 351 m

对不同赋存状态的绿泥石在垂向和平面上分布进行分析,一方面有助于优质储层的寻找,另一方面也有利于后期开发方案的调整。前人认为早期大量发育的绿泥石是三角洲推进的一个主要标志(黄思

静等, 2004),研究区辫状河三角洲前缘亚相中绿泥石相对含量平均为10.6%,辫状河三角洲平原亚相中绿泥石含量增长到30.1%,符合前人分析观点。同一沉积环境中,以位于研究区中部阜东17井为

例,绿泥石在纵向上相对含量表现为逐渐增大的趋势,特别在单砂体中尤为明显。在2 070~2 874 m 深度范围内,绿泥石的相对含量由 29% 迅速增加为 54%,冲刷面附近绿泥石的相对含量最高(图 3),推测较强的水动力条件下更有利于绿泥石的形成。利

用镜下薄片资料,发现随着深度的增加,绿泥石的赋存状态由薄膜式逐渐过渡为薄膜式+充填式,最终富集为衬垫式(图 3)。单套砂体底部受绿泥石的影响,物性较好,易形成优质储层,但在后期开发过程中需要注意酸敏破坏。

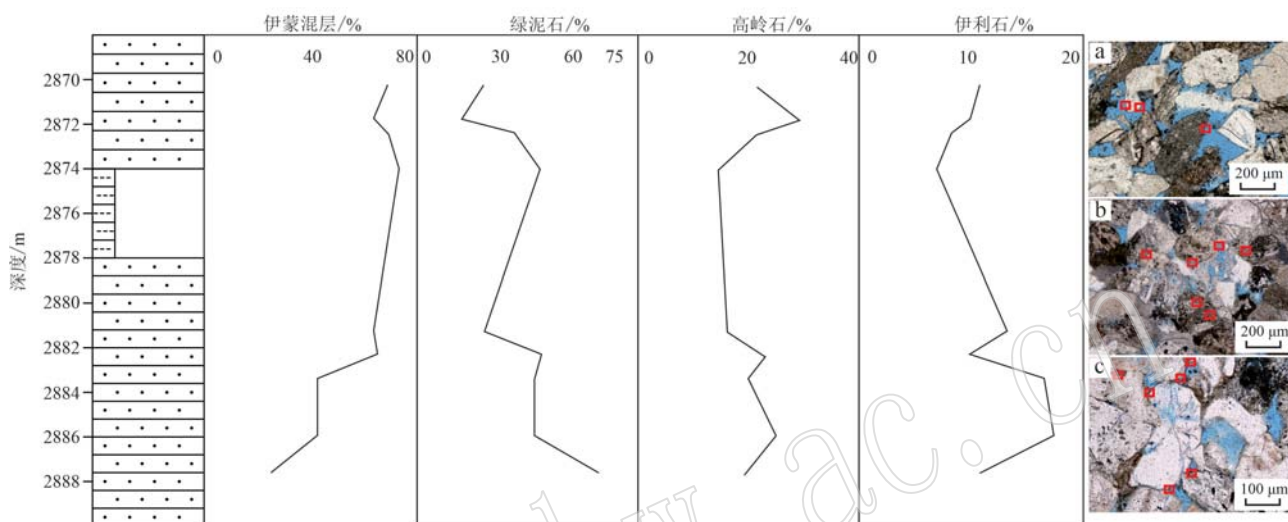


图 3 阜东 17 井黏土矿物相对含量变化

Fig. 3 Relative contents of clay minerals changing in vertical in well FD17

a—薄膜式绿泥石, 2 879.9 m; b—薄膜式和充填式绿泥石, 2 882 m; c—衬垫式绿泥石, 2 886 m

a—membrane-type chlorite, 2 879.9 m; b—membrane-type and filling-type chlorite, 2 882 m; c—liner-type chlorite, 2 886 m

绿泥石在平面上的分布具有一定的规律。以齐古组一段为例,薄膜式绿泥石主要发育在辫状河三角洲平原亚相,岩石中颗粒分选较差,泥质含量较高,绿泥石结晶程度较差(图 4a);衬垫式绿泥石主要发育在辫状河三角洲前缘亚相(图 4b、4c),部分发育于靠剥蚀线较近构造高部位的辫状河三角洲平原亚相(图 4d),岩石中颗粒分选较好,泥质含量较低,绿泥石结晶程度逐渐变好;薄膜式绿泥石主要发育于辫状河三角洲前缘,岩石内流体流动性较好,利于绿泥石充填孔隙和交代颗粒。

4 自生绿泥石的影响因素

砂岩储层中黏土矿物的形成受沉积、成岩环境多种因素的控制,具体包括多种离子的含量、温度、压力、孔隙流体 pH 值及其流动性等。绿泥石主要形成于富 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的碱性条件(黄思静等, 2004),根据绿泥石的镜下特征,发现绿泥石形成的控制因素主要包括物质来源、孔隙流体的 pH 值和流

动性。

4.1 物质来源

绿泥石是一种 2:1 层型铝硅酸盐矿物,化学式为 $(\text{MgFeAl})_6[(\text{SiAl})_4\text{O}_6](\text{OH})_8$ 。自生绿泥石的形成同 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 来源密切相关,前人认为 $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 以及 MgO 的含量对绿泥石的成因有一定的指示意义(白清华, 2009)。对不同赋存状态下绿泥石进行电子探针分析(表 1),发现 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 的含量平均为 30% 左右, MgO 的含量平均仅为 10% 左右,整体表现为高 FeO 、低 MgO 的特征,绿泥石整体属于富铁绿泥石,反映绿泥石八面体位置内 Fe 对 Mg 发生明显置换作用(梁树能等, 2014),这种绿泥石常见于火山成因绿泥石。

受燕山运动影响,盆地内部普遍发育大量火山活动,大量火山碎屑经河流或者以火山灰的形式搬运到研究区(图 5a、5b),充填于储层砂岩。区内齐古组岩石类型主要为岩屑砂岩,凝灰质岩屑为岩屑的主要类型(图 5c),平均含量为 35.2%。镜下所观察的凝灰质成分具有颗粒包膜(图 5f)、充填粒间孔

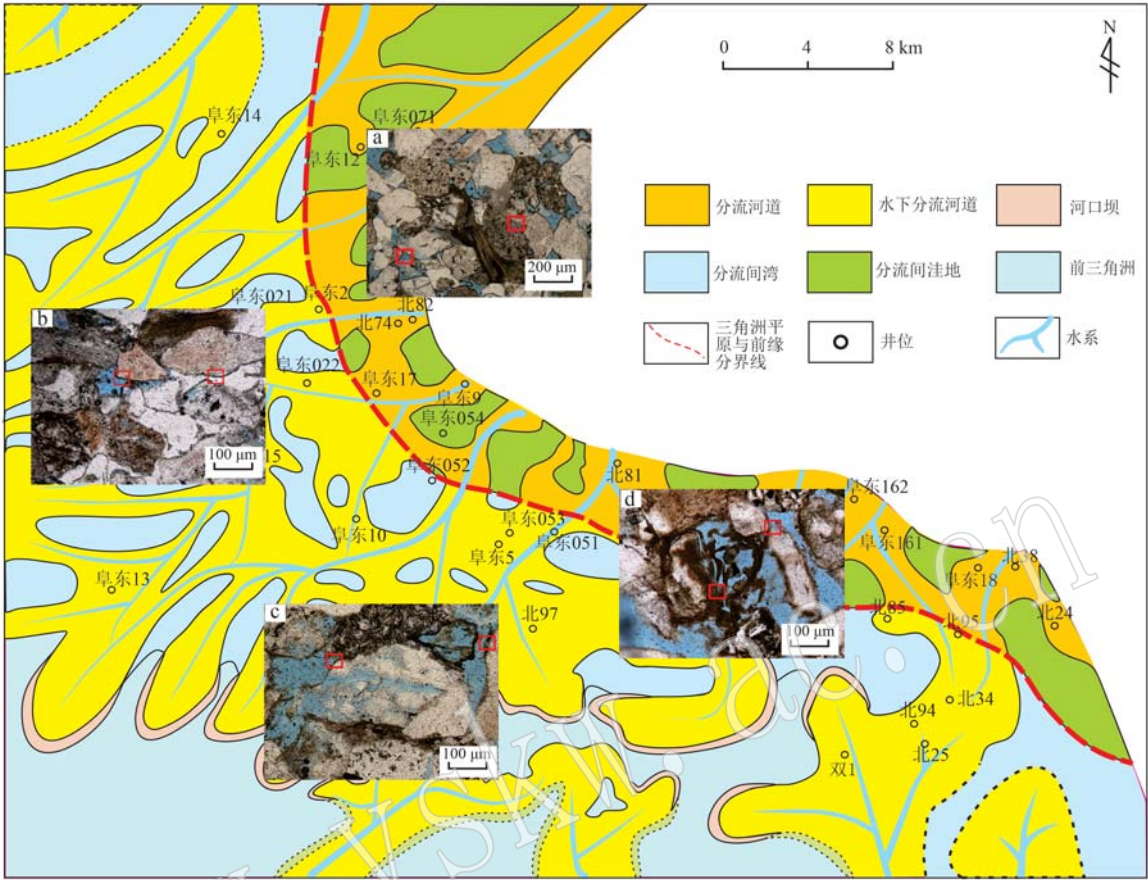


图 4 研究区齐古组自生绿泥石平面分布规律

Fig. 4 Distribution rules of authigenic chlorite in first member of Qigu Formation in the study area
a—薄膜式和充填式绿泥石，北 74 井，2 686.5 m；b—衬垫式绿泥石，阜东 022 井，3 116.2 m；c—衬垫式和充填式绿泥石，北 97 井，2 926.1 m；d—衬垫式和充填式绿泥石，阜东 162 井，2 053.4 m
a—membrane-type and filling-type chlorite, well B74, 2 686.5 m；b—liner-type chlorite, well FD022, 3 116.2 m；c—liner-type and filling-type chlorite, well B97, 2 926.1 m；d—liner-type and filling-type chlorite, well FD162, 2 053.4 m

表 1 研究区齐古组自生绿泥石电子探针成分分析结果 $w_B/\%$
Table 1 Electron probe data of the authigenic chlorites in the Qigu Formation of study area

井号	井深/m	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CO ₂	K ₂ O	Fe ₃ O ₄	CaO	MgO
阜东 161	2 052	49.96	19.40		0.03	21.67		8.94
阜东 18	1 927.5	32.45	15.68	2.86	0.04	33.24	0.62	15.11
阜东 19	2 355.1	44.09	14.34		0.07	29.24	0.07	12.19

隙(图 5e)、网状充填粒间孔隙和充填破裂缝(图 5d)等赋存特征。凝灰质成分的赋存方式类似于绿泥石的镜下存在特征,同时大量证据表明凝灰质成分在受溶液溶解后会形成大量 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等离子,形成碱性溶液(朱世发等, 2014)。富 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 的碱性溶液对于绿泥石的形成是十分有利的,推断凝灰质岩屑的溶蚀为自生绿泥石的形成提

供了重要的物质基础。
除凝灰质成分的直接溶解提供物质成分外,由凝灰质蚀变导致黏土矿物之间的转化也可以形成绿泥石(田建锋等, 2008),蒙脱石或者高岭石的绿泥石化为自生绿泥石形成的一个重要途径。随着温度的升高,蒙脱石的绿泥石化会造成某些层间塌陷,导致晶格的重新排列和碱性阳离子的吸附,首先形成蒙脱石/绿泥石混层,进而转化为绿泥石。黏土矿物的垂向上变化也可反映该种成因(图 3),绿泥石含量随深度逐渐增加,蒙脱石类矿物随深度逐渐降低。同时区内部分地区出现绿/蒙混层,也反映出这种成因的存在。高岭石也会随着温度的升高而形成绿泥石(杨威等, 2013),在区内黏土矿物相对含量纵向变化中可看到(图 3),绿泥石含量升高阶段,高

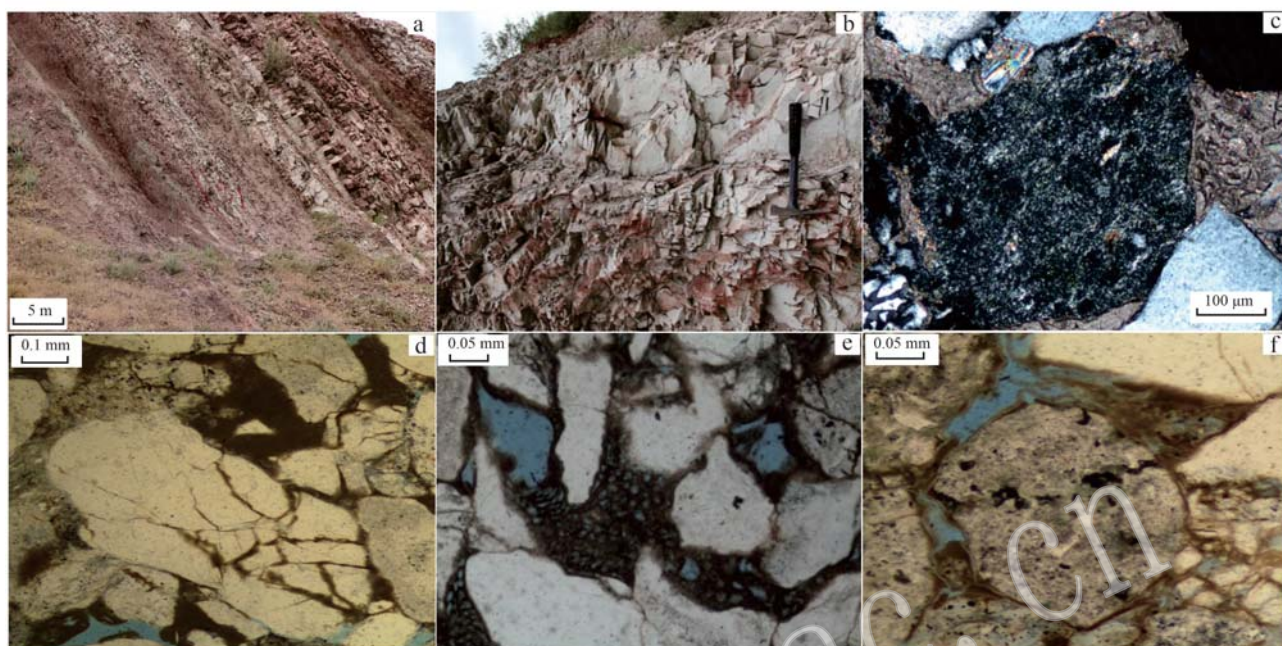


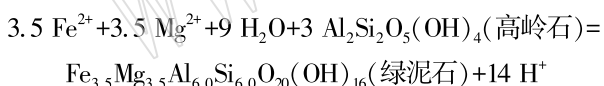
图5 研究区齐古组凝灰质成分的赋存状态

Fig. 5 Occurrence states of tuffaceous components in the Qigu Formation of study area

a—水磨沟剖面凝灰质砂岩; b—水磨沟剖面部分凝灰质黏土化; c—细-中砂岩中凝灰岩岩屑, 阜东19井, 2 414.1 m; d—中砂岩中充填于刚性颗粒破裂缝中的凝灰质, 北38井, 1 837.7 m; e—细中砂岩中凝灰质填隙粒间孔, 阜东18井, 1 925.5 m; f—中砂岩中凝灰质蚀变形形成绿泥石环边, 北38井, 1 837.7 m

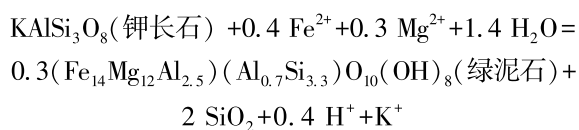
a—tuffaceous sandstone in Shuimogou profile; b—tuffaceous clay in Shuimogou profile; c—tuff debris in fine-medium grain sandstone, well FD19, 2 414.1 m; d—tuff in cracks of rigid particles in medium grain sandstone, well B38, 1 837.7 m; e—tuff in intergranular pore, fine-medium grain sandstone, well FD18, 1 925.5 m; f—loop side of chlorite formed by tuff in medium grain sandstone, well B38, 1 837.7 m

岭石下降比较明显。具体转化为:



镜下绿泥石占据长石溶蚀形成的粒内孔隙,而且绿泥石的形成常与长石溶蚀现象伴生(图2e、4c),在绿泥石发育的区域,长石的溶蚀也是十分明显。对齐古组砂岩储层中矿物含量进行统计,发现长石类的矿物含量同绿泥石含量呈负相关关系,反映出长石含量减小,绿泥石的含量相应增加(图6),总体揭示出自生绿泥石是长石类矿物的溶蚀产物。

研究区齐古组储集砂岩中长石含量约为13%,以钾长石为主。除了花岗岩的风化剥蚀外,凝灰质成分一定程度的水解也会析出钾长石。砂岩储层中钾长石溶解成绿泥石的化学方程式为:



当然,这种自生绿泥石的形成需要介质流动性好,可将酸性离子带出或者使其沉淀。

在薄片可见大量绿泥石存在于颗粒接触点之间(图2a、2c),尤其是在成岩早期形成的绿泥石,往往与河流溶解的Fe有关,它会在高盐度的情况下形成絮状沉淀,生成绿泥石。齐古组大部分是辫状河三角洲平原沉积,气候的干燥使得孔隙水的盐度增高,为绿泥石的形成提供了有效条件。

4.2 孔隙流体的酸碱度

绿泥石的四面体上,黏土表面的结构电荷 Si^{4+} 被 Al^{3+} 所替换,矿物晶层带有负电荷;在绿泥石的八面体上, Al^{3+} 被 Fe^{2+} 所替换,也会导致矿物晶层带有负电荷(田建锋等,2008),因此这种阳离子的不等价替换造成基面带负电,只有在表面电荷也呈负电的条件下,晶体相互排斥,绿泥石才能形成和保存。由于 Al_2O_3 水解的性质不同,只有在碱性条件下才能使黏土表面电荷呈负电(田建锋等,2008)。总体来说,碱性环境有利于绿泥石的形成和保存。

蒋艳霞等(2015)对研究区齐古组成岩作用进行分析,发现储集砂体中绿泥石和连晶状方解石共存,反映二者形成于相似流体环境。通过C、O同位素分

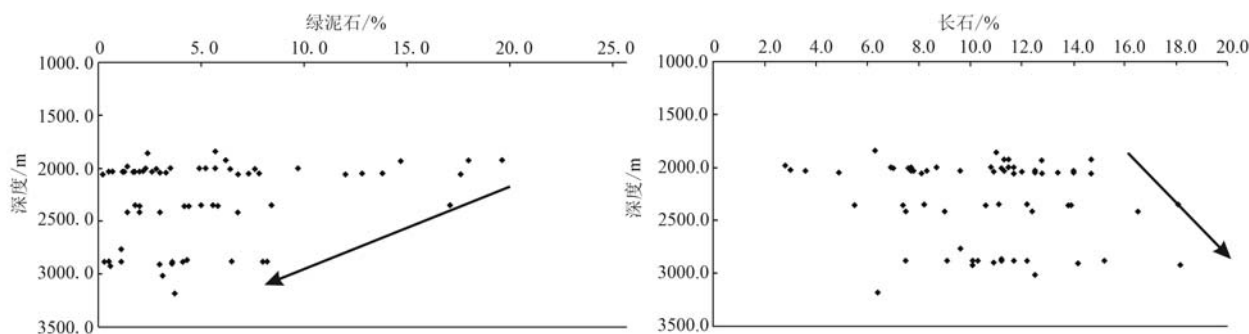


图6 研究区齐古组绿泥石和长石含量随深度变化

Fig. 6 Chlorite and feldspar contents versus depth in the Qigu Formation of study area

析,发现方解石沉淀温度较高,揭示连晶状方解石同有机酸脱羧作用有关,认为有机质成熟产生的富 CO_2 流体为方解石提供了碳源。杨威等(2013)通过模拟实验,揭示了孔隙流体pH值同温度之间的关系,反映出随着温度的增长,孔隙中的流体pH值也会增大,使其变为碱性环境,同时这种碱性的环境会持续存在。同时酸性流体对长石等硅酸盐矿物的溶蚀所释放的碱性离子造成流体逐渐偏碱性,大量晶形较好的方解石形成侧面反映出成岩过程中碱性环境持续时间较长(蒋艳霞等, 2015),可为绿泥石的形成提供有利环境条件,这同研究区齐古组内绿泥石在纵向以及平面上广泛分布的现象是一致的。

4.3 孔隙流体的流动性

除了上述碱性的流体环境外,孔隙流体的流动性也是自生绿泥石形成的关键性因素。

通过统计不同粒度绿泥石含量,发现粗砂岩中绿泥石的含量为33.5%,中砂岩中绿泥石的含量为23.8%,细砂岩中绿泥石的含量为15.8%,而像含砾粗、中砂岩这类粒径很大的岩性以及像粉砂岩、泥质粉砂岩这类粒径较小的岩性中绿泥石的含量大部分不超过5%(图7)。可见粒径较大的砂体中,原生孔隙保存较多,孔隙流体整体流动能力较强,长石等矿物容易受到流体影响发生溶蚀,为绿泥石的形成提供了重要物质保障;而粒径较小的砂体中,原生孔隙保存较少,砂岩中凝灰质成分或长石类矿物不能充分溶蚀,不利于绿泥石的广泛发育。

类似上述钾长石以及高岭石等矿物转化成绿泥石过程中,都伴随有相应的酸性离子 H^+ 生成,如果这些离子不断积累,不能被孔隙水带出,则孔隙流体中的pH值会慢慢发生改变,逐渐由碱性变为酸性,有利于高岭石等黏土矿物的形成。侏罗纪末期到白垩纪初期发生的燕山运动使得天山造山带以及博格

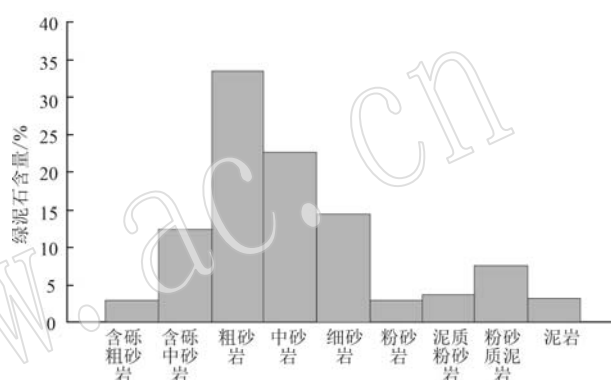


图7 研究区齐古组不同粒度砂岩绿泥石(相对)含量

Fig. 7 Chlorite (relative) content in sandstone with different granularity in Qigu Formation in study area

达山楔状体隆升并向北挤压,造成研究区异常压力分布广泛(于景维等, 2014)。而异常压力的出现会形成封闭环境,会阻碍流体与岩体之间的接触,阻止流体中离子之间的交换,尤其是对绿泥石形成所需的 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} ,酸性离子 H^+ 逐渐富集,因此绿泥石的含量随深度的增加而降低(图5)。而在较好的孔隙或者冲刷面附近,由于流体活动性不受到限制,离子之间交换要频繁得多,绿泥石的含量大大增加。

5 绿泥石对储层储集性能影响

为进一步明确绿泥石对于研究区齐古组储集性能的影响,针对临近两口井的同一产油层各项特征进行了对比(图8)。两个油层在沉积微相、碎屑含量等方面基本一致,但是在绿泥石含量上却有很大差别,而绿泥石的含量差异又造成了两口井在物性、孔喉半径以及酸敏等方面各有不同。

两口井齐古组为辫状河三角洲平原沉积环境,

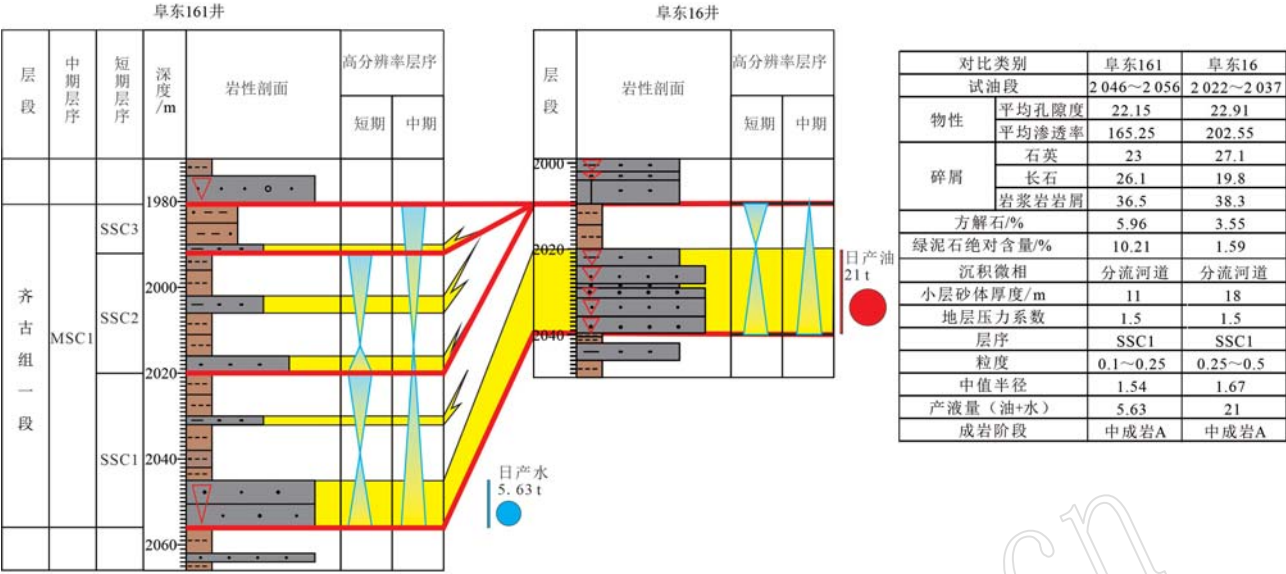


图 8 阜东 161 井和阜东 16 井储层对比图
图 8 Reservoir comparison between wells FD161 and FD16

成岩早期自生绿泥石呈环带状胶结,赋存状态基本一致,减缓压实作用对岩石物性的破坏,保存了一部分的原生孔隙,为溶蚀流体注入提供通道。但过多的绿泥石胶结会破坏大量喉道,造成渗透率的急速下降,导致有些孔隙成为死孔(图 9a、9b)。阜东 16 井齐古组绿泥石绝对含量为 1.59%,薄片显示颗粒之间的接触关系多为点接触,薄片面孔率较大,孔隙类型包括原生粒间孔和次生溶孔,油层的渗透率超过 200 mD,孔喉的中值半径达到 1.67 μm ,产量较高;阜东 161 井绿泥石的绝对含量达到 10.21%,薄片显示颗粒之间的接触关系以线接触为主,薄片面孔率明显较低,孔隙类型以原生粒间孔为主。在埋藏较深的前提下,孔隙度值和阜东 16 井相差不大,但渗透率之间的差距很大,导致产能存在一定的差异。由于绿泥石发育在流体活动性较大的区域,保存的原生孔隙以及次生溶孔为成岩后期发育胶结物提供空间。受成岩后期热液充注的影响(蒋艳霞等, 2015),阜东 161 井成岩后期铁方解石明显高于阜东 16 井;同时不同含量的环边绿泥石胶结物可限制石英次生加大,通过扫描电镜的观察,发现绿泥石含量较少的阜东 16 井石英次生加大现象较阜东 161 井石英次生加大更为明显(图 9c、9d),同前人的认识基本一致(杨威等, 2013)。结合前人的研究,发现辫状河三角洲平原沉积砂体连续性较差,绿泥石的发育非均质性很强(于景维等, 2017)。由于阜东

161 井及阜东 16 井主要靠近剥蚀线,因此砂体孔隙内流体流动性较强,但距离剥蚀线越远,绿泥石的发育差异就越大。

绿泥石的含量对于储集层的酸敏有很大影响。阜东 161 井绿泥石含量较高的储层酸敏程度为中等偏强,阜东 16 井绿泥石含量较低的储层酸敏程度很弱。绿泥石含量较高的储层,在开发过程中需要克服储层酸敏。根据上述分析,结合前人齐古组沉积相及储层的相关研究,认为辫状河三角洲前缘沉积有利于绿泥石的大面积发育,是下一步的勘探重点。

6 结论

(1) 研究区齐古组砂岩储层中自生绿泥石赋存状态以衬垫式为主,其次为薄膜式和充填式。绿泥石含量纵向上表现为逐渐增高,绿泥石赋存状态由薄膜式逐渐过渡为薄膜式+充填式,最终富集为衬垫式;平面上自辫状河三角洲平原向辫状河三角洲前缘,绿泥石赋存状态整体由薄膜式逐渐向衬垫式发展。

(2) 研究区绿泥石属于富铁绿泥石,砂岩储层中凝灰质岩屑的溶蚀为自生绿泥石的形成提供重要的物质基础,同时长石的溶解、黏土矿物之间的转化以及河流溶解的 Fe 所形成的絮状沉淀也是形成绿泥石的重要途径。碱性环境有利于绿泥石的形成和

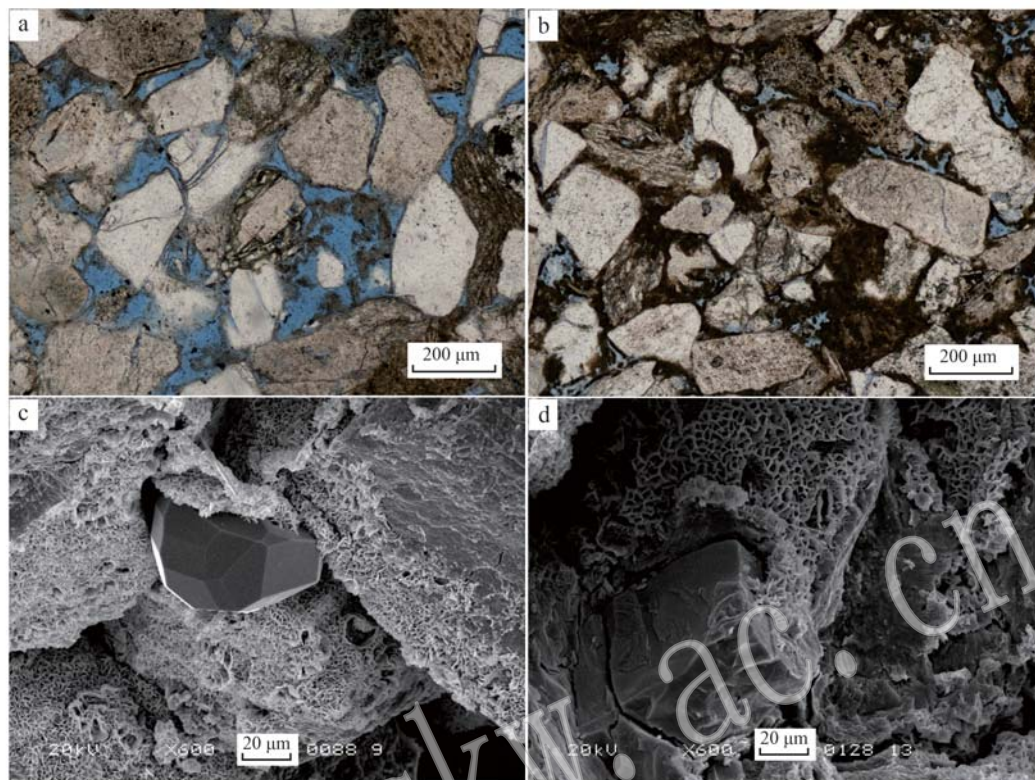


图9 阜东161井及阜东16井绿泥石镜下特征

Fig. 9 Microscopic characteristics of chlorite in well FD161 and FD16

- a—原生粒间孔和次生溶孔,阜东16井,2030.2 m; b—原生粒间孔,阜东161井,2052 m; c—石英次生加大,阜东16井,2030.2 m;
d—石英结晶形态较差,阜东161井,2052 m
- a—primary inter-granular pore and secondary dissolution pore in 2030.2 m, well FD16; b—primary inter-granular pore of 2052 m, well FD161;
c—quartz secondary enlargement in 2030.2 m, well FD16; d—imperfection on quartz crystals of 2052 m, well FD161

保存,异常压力由于限制孔隙内流体的流动,影响绿泥石的垂向分布。在物质供给以及碱性流体的基础上,流体的流动性也是自生绿泥石形成的重要影响因素。

(3) 富衬垫式绿泥石的辫状河三角洲前缘砂体为有利储集砂体,为下一步油气勘探的重点。绿泥石含量较高的储层,在开发过程中需要克服储层酸敏。

References

- Bai Qinghua. 2009. Formation Process and Distribution of Laumontite Cements in Yanchang Formation(Upper Triassic) of Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- Cai Laixing, Yang Tian, Tian Jingchun, *et al.* 2023. Advances in studies of development and growth mechanisms of clay minerals in tight sandstone reservoirs[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1~44(in Chinese with English abstract).
- Chen Dandan, Ji Hongjie, Tao Huifei, *et al.* 2015. Sedimentary characteristics and evolution model of the Middle-Early Jurassic on the south of Fukang Sag in eastern Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(11): 2093~2106(in Chinese with English abstract).
- Hillier S, Fallick A E and Matter A. 1996. Origin of pore-lining chlorite in the Aeolian Rotliegend of Northern Germany[J]. *Clay Minerals*, 31: 153~171.
- Huang Sijing, Xie Lianwen, Zhang Meng, *et al.* 2004. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstone, Ordos Basin and Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 31(3): 273~281(in Chinese with English abstract).
- Jiang Yanxia, Wen Huaguo, Jin Jun, *et al.* 2015. Analysis on effect of calcium carbonate cement in Qigu Formation of Jurassic in Fudong slope area, Junggar Basin[J]. *Geological Review*, 61(S1): 227~228(in Chinese with English abstract).
- Kuang Hao, Qi Liqi, Tan Xianfeng, *et al.* 2015. Analysis of pore evolution and diagenesis in sandstones of Qigu Formation of Upper Jurassic,

- east of Fukang sag, east of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 33(4): 493~497(in Chinese with English abstract).
- Liang Shuneng, Gan Fuping, Yan Baikun, *et al.* 2014. A study on the relationship between the composition and spectral feature parameter in chlorite[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(7): 1 763~1 768(in Chinese with English abstract).
- Li Haidong, Pan Jiayong, Liu Wenquan, *et al.* 2017. Mineral characteristics and geological significance of chlorite from the Julong'an uranium deposit in Le'an, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(4): 535~548(in Chinese with English abstract).
- Li Renze, Liu Chengdong, Liang Liang, *et al.* 2016. Characteristics and geological significance of chlorite from the Dafushang uranium deposit in taoshan area, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(2): 297~305(in Chinese with English abstract).
- Liu Dong, Li Zhongdong, Song Rongcai, *et al.* 2011. Characteristics and diagenetic evolution of chlorite of Eocene in Myanmar D Block[J]. *Journal of Mineral and Petrology*, 31(4): 100~109(in Chinese with English abstract).
- Salman B, Robert H L, Linda B, *et al.* 2002. Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and Predictability[J]. *AAPG Bulletin*, 86: 301~328.
- Sun Quanli, Sun Hansen, Jia Bao, *et al.* 2012. Genesis of chlorites and its relationship with high-quality reservoirs in the Xujiahe Formation tight sandstones, western Sichuan depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 33(5): 751~757(in Chinese with English abstract).
- Tan Shuang, Chen Qi, Wan Jianjun, *et al.* 2022. Characteristics of chlorite in Xiangyangping uranium ore deposit, middle segment of Miaoshan and its petrogenetic and metallogenic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1 097~1 108(in Chinese with English abstract).
- Tang Yong, Ji Jie, Guo Wenjian, *et al.* 2022. Characteristics and reservoir-control effect of Upper/Middle Permian unconformity structures in the east of Fukang Sag, Junggar Basin[J]. *Geophysical Prospecting*, 57(5): 1 138~1 147, 1 005(in Chinese with English abstract).
- Tian Jianfeng, Chen Zhenlin, Fan Yuanfang, *et al.* 2008. The occurrence, growth mechanism and distribution of authigenic chlorite in sandstone[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(2): 200~205(in Chinese with English abstract).
- Tian Jianfeng, Yu Jian and Zhang Qingzhou. 2014. The pore-lining chlorite formation mechanism and its contribution to reservoir quality[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 44(3): 741~748(in Chinese with English abstract).
- Worden R H, Needham S J, Guadros J, *et al.* 2006. The worm gut: A natural clay mineral factory and a possible cause of diagenetic grain coats in sandstones[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 89: 428~431.
- Xie Wuren, Yang Wei, Zhao Xingyuan, *et al.* 2012. Influences of chlorite on reservoir physical properties of the Xujiahe Formation in the central part of Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 33(5): 751~757(in Chinese with English abstract).
- Yan Qibin, Chen Peiyuan, Yang Huiting, *et al.* 2014. The genesis of chlorite and its Relationship with reservoir in Xujiahe Formation, Pu-guang Gasfield, Southwest China[J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 21(2): 16~20(in Chinese with English abstract).
- Yang Wei, Chen Guojun, Zhang Mingjie, *et al.* 2012. Influence of authigenic chlorite on reservoir properties of Chang 8 oil reservoir set in Zhenbei area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 24(3): 27~32(in Chinese with English abstract).
- Yang Wei, Wei Guoqi, Zhao Xingyuan, *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 [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1): 128~135(in Chinese with English abstract).
- Yu Jingwei, Gao Lixin, Lu Bingxiong, *et al.* 2022. Quality evaluation and differences analysis on reservoirs in second member of toutunhe Formation in Fudong slope area, Junggar Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 57(3): 687~703(in Chinese with English abstract).
- Yu Jingwei, Liu Ni, Pang Taizhong, *et al.* 2017. Sedimentary reservoir characteristics of the member 1 of the Qigu Formation in the Fudong slope zone of the Junggar Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 41(2): 221~228(in Chinese with English abstract).
- Yu Jingwei, Liu Ni, Wen Huaguo, *et al.* 2016. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy and prediction of favorable sandbodies in the Upper Jurassic Qigu Formation in Fudong slope area, Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 18(2): 265~274(in Chinese with English abstract).
- Yu Jingwei, Wei Fen, Wen Huaguo, *et al.* 2019. Analysis on distribution of illite/montmorillonite mixed layer and its controlling factors in the Toutunhe formation of Fudong slope area of Junggar basin[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 38(6): 39~46(in Chinese with English abstract).
- Yu Jingwei, Ye Yong, Liu Ni, *et al.* 2018. Character differences and controlling factors of reservoirs in the Upper-Middle Jurassic Fudong slope area, Junggar Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(5): 1 070~1 080(in Chinese with English abstract).
- Yu Jingwei, Zheng Rongcai, Qi Liqi, *et al.* 2014. Precise analysis on high-resolution sequence stratigraphy and microfacies of Toutunhe Formation of Middle Jurassic in the east slope zone, Fukang sag, Junggar basin[J]. *Geological Review*, 60(6): 1 337~1 347(in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhiping. 2017. Characteristics of formation pressure system and its effect on petroleum distribution in Jurassic of Fukang Sag[J]. *Fault-*

block Oil & Gas Field, 24(3): 337~341 (in Chinese with English abstract).

Zhang Juan, Liu Xinxing, Wang Yitian, *et al.* 2021. Charactersitics of chlorite from the Baguamiao gold deposit in Shanxi Province and its geological implication[J]. Geological Bulletin of China, 40(4): 586~603 (in Chinese with English abstract).

Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Liu Xuechao, *et al.* 2014. Alteration products of volcanic and their influence on reservoir space in hydrocarbon reservoirs: Evidence from Lower Permian strata in Ke-Xia region, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 35(2): 276~285 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白清华. 2009. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组浊沸石分布及成因探讨[D]. 西安: 西北大学.
- 蔡来星, 杨田, 田景春, 等. 2023. 致密砂岩储层中黏土矿物发育特征及其生长机理研究进展[J]. 沉积学报, 1~44.
- 陈丹丹, 吉鸿杰, 陶辉飞, 等. 2015. 准东地区阜康凹陷南部中下侏罗统沉积特征与沉积演化模式[J]. 天然气地球科学, 26(11): 2 093~2 106.
- 黄思静, 谢连文, 张萌, 等. 2004. 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), 31(3): 273~281.
- 蒋艳霞, 文华国, 靳军, 等. 2015. 准噶尔盆地阜东斜坡侏罗系齐古组砂岩中钙质胶结物特征及对储层的影响[J]. 地质论评, 61(S1): 227~228.
- 况昊, 祁利祺, 谭先峰, 等. 2015. 准东阜东斜坡区上侏罗统齐古组砂岩成岩作用及孔隙演化分析[J]. 新疆地质, 33(4): 493~497.
- 梁树能, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 2014. 绿泥石矿物成分与光谱特征关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 34(7): 1 763~1 768.
- 李海东, 潘家永, 刘文泉, 等. 2017. 江西乐安居隆庵铀矿床绿泥石特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 36(4): 535~548.
- 李仁泽, 刘成东, 梁良, 等. 2016. 江西省桃山铀矿田天府上矿床绿泥石特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(2): 297~305.
- 刘栋, 李仲东, 宋荣彩, 等. 2011. 缅甸D区块始新统绿泥石特征及成岩演化[J]. 矿物岩石, 31(4): 100~109.
- 孙全力, 孙晗森, 贾昀, 等. 2012. 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, 33(5): 751~757.
- 谭双, 陈琪, 万建军, 等. 2022. 苗儿山中段向阳坪铀矿床绿泥石特征及其成岩成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 41(6): 1 097~1 108.
- 唐勇, 纪杰, 郭文建, 等. 2022. 准噶尔盆地阜康凹陷东部中-上二叠统不整合结构特征及控藏作用[J]. 石油地球物理勘探, 57(5): 1 138~1 147, 1 005.
- 田建锋, 陈振林, 凡元芳, 等. 2008. 砂岩中自生绿泥石的产状、形成机制及其分布规律[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(2): 200~205.
- 田建锋, 喻建, 张庆洲. 2014. 孔隙衬里绿泥石的成因及对储层性能的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(3): 741~748.
- 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[J]. 石油勘探与开发, 37(6): 674~679.
- 颜其彬, 陈培元, 杨辉廷, 等. 2014. 普光气田须家河组绿泥石成因及其与储层关系[J]. 特种油气藏, 21(2): 16~20.
- 杨巍, 陈国俊, 张铭杰, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地镇北地区长8油层组自生绿泥石对储层物性的影响[J]. 岩性油气藏, 24(3): 27~32.
- 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[J]. 石油学报, 34(1): 128~135.
- 于景维, 高立新, 卢炳雄, 等. 2022. 准噶尔盆地阜东斜坡区头屯河组二段储集层质量评价及差异性分析[J]. 地质科学, 57(3): 687~703.
- 于景维, 柳妮, 庞太忠, 等. 2017. 准噶尔盆地阜东斜坡阜东16井区齐古组一段沉积储集层特征[J]. 地层学杂志, 41(2): 221~228.
- 于景维, 柳妮, 文华国, 等. 2016. 准噶尔盆地阜东斜坡区上侏罗统齐古组高分辨率层序分析及砂体预测[J]. 古地理学报, 18(2): 265~274.
- 于景维, 魏芬, 文华国, 等. 2019. 准噶尔盆地阜东斜坡带头屯河组伊/蒙混层分布规律及其主控因素研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 38(6): 39~46.
- 于景维, 叶勇, 柳妮, 等. 2018. 准噶尔盆地阜东斜坡区中上侏罗统储集层特征差异及控制因素分析[J]. 地质学报, 92(5): 1 070~1 080.
- 于景维, 郑荣才, 祁利祺, 等. 2014. 准噶尔盆地阜康凹陷东部斜坡带中侏罗统头屯河组高分辨率层序与沉积微相精细分析[J]. 地质论评, 60(6): 1 337~1 347.
- 曾治平. 2017. 阜康凹陷侏罗系压力系统特征及对油气分布的影响[J]. 断块油气田, 24(3): 337~341.
- 张娟, 刘新星, 王义天, 等. 2021. 陕西凤太矿集区八卦庙金矿床绿泥石特征及其找矿意义[J]. 地质通报, 40(4): 586~603.
- 朱世发, 朱筱敏, 刘学超, 等. 2014. 油气储层火山物质蚀变产物及其对储集空间的影响——以准噶尔盆地克-夏地区下二叠统为例[J]. 石油学报, 35(2): 276~285.