

# 致密砂岩储层中绿泥石成因分布及对含油气性影响述评

武啸天,李茜,朱光有,杨哲,付诗钰,徐锴,李济远,赵宇豪

长江大学地球科学学院,武汉,430100



Pre-pub. on line: [www.geojournals.cn/georev](http://www.geojournals.cn/georev)

**内容提要:**致密砂岩储层以低孔低渗、非均质性强及“甜点”预测难为特征,成为当前非常规油气勘探与开发研究的热难点。作为致密砂岩储层最重要的充填矿物之一,绿泥石深刻影响着致密砂岩储层的储集物性和含油气性,明确绿泥石的富集特征以及对储层物性与油气赋存能力的调控机制,将对精准预测致密砂岩含油气“甜点”区带来重要启示。笔者等以绿泥石的赋存状态、成因机制及其与成岩演化的耦合关系为切入点,系统分析了绿泥石对致密砂岩储层含油气性的作用机制与主控因素。研究表明:绿泥石在储层中主要以颗粒包膜式、孔隙衬里和孔隙充填3种形式存在;其中,颗粒包膜绿泥石由先驱黏土矿物转化、碎屑物质交代和孔隙流体沉淀3种作用共同影响形成,孔隙衬里绿泥石成因包括沉积黏土膜转化、富铁镁物质溶蚀再结晶、转化与直接结晶混合等,孔隙充填绿泥石则是从富镁铁孔隙水中沉淀和蒙脱石与伊利石转化而成;不同成岩期的绿泥石对储层有着双重性的影响,建设性主要体现在提高岩石抗压能力、抑制压溶作用、促进溶蚀作用、抑制石英加大等方面,而破坏性表现为堵塞吼道,降低储层的渗透率等;绿泥石的形成贯穿于沉积—成岩演化全过程,对储层含油气性的影响具有时空差异性与多因素协同性的特点,核心控制因素包括绿泥石产状、厚度、连续性、及成岩期次的相互作用。油气主要以薄膜形式在绿泥石表面及其晶间孔隙中富集,并以孤立或团聚的颗粒形式形成,矿物的比表面积越大,绿泥石对油气的吸附势能越高,不同成岩期绿泥石对油气吸附能力不同,孔隙衬里绿泥石的晶间孔吸附油气的能力最强。“甜点”储层的绿泥石厚度适中且完整连续,多分布在高能的沉积环境,避免厚层胶结物致密带,孔隙衬里绿泥石适度发育为油气充注和存储提供优越空间。笔者等为致密砂岩油气藏的“甜点”预测提供了矿物岩石学的综合依据,对深化致密储层油气富集机理认识及优化勘探开发策略具有重要意义。

**关键词:**绿泥石;致密砂岩;含油气性;成岩演化;油气吸附;甜点预测

随着常规油气的勘探开发程度不断提高,非常规油气逐渐成为代替常规油气、推动油气革命的重要力量(杜清,2011;邹才能等,2015)。其中,致密砂岩油气藏作为非常规油气的重要组成部分,已成为当下勘探开发的热点领域(邹才能等,2010;陈旋等,2024;张年念等,2024)。据统计,2023年致密气产量达 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上,鄂尔多斯盆地、四川盆地是致密气的主体产区,而致密油产量达 $1193 \times 10^4 \text{ t}$ ,主要包括鄂尔多斯盆地延长组6段(长6段)和延长组8段(长8段)、准噶尔盆地玛湖地区二叠系—三叠系、松辽盆地扶余油层等(吴晓智等,2022;戴金星等,2024;朱如凯等,2025;王清华等,2025)。在致密油气勘探中,由绿泥石胶结保护形成的“相对高孔隙体”的控藏作用受到了众多学者的关注,寻

找并评价此类含油气性较高“甜点”,规避其伴生低渗透率风险,是当前高效开发的首要任务(郭迎春等,2013)。

黏土矿物是碎屑岩储集层中十分关键性的填隙物,许多研究证据表明,低孔渗背景下黏土矿物能够影响致密砂岩储层的储集性能,不同黏土矿物对储层物性的影响存在差异,与异常高、低孔渗体有着密不可分联系(陈树跃,1983;颜其彬等,2013)。绿泥石是砂岩储层中最常见的自生黏土矿物之一,前人学者注意到绿泥石的某些特征,储层孔隙度的异常高值往往与绿泥石的富集有关(蒋裕强等,2013;娄敏等,2021)。绿泥石对储层的影响至今仍有争论,有学者认为绿泥石能够显著改善储层的孔隙度和渗透率,发育绿泥石的致密砂岩储层比未发育绿

注:本文为地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(编号:2025ZD1006605)与中国地质调查项目(编号:DD20230200102)的成果。

收稿日期:2025-08-05;改回日期:2026-01-20;网络首发:2026-01-04;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2026.01.041

作者简介:武啸天,男,2003年生,硕士研究生,油气地质学专业;Email:geowuxiaotian@163.com。通讯作者:朱光有,男,1973年生,博士,教授级高级工程师,主要从事深层油气地质与成藏研究;Email:zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn。

泥石的层段孔隙度和渗透率提高 10% 以上(孙全力等, 2012; Sun Zhixue et al., 2014; Wang Youzhi et al., 2025); 也有学者认为储层中的绿泥石胶结不利于油气的富集与运输, 其发育的砂岩物性好只是表象, 本质是物性好的砂岩有助于绿泥石膜发育(Xiang Fang et al., 2016; 周晓峰等, 2016; 李阳等, 2017); 但大部分学者研究认为绿泥石对致密砂岩储层的影响有着双重性的影响, 既有着抑制压实作用和石英次生加大、保护原生孔隙等积极作用, 也有过度发育导致的喉道堵塞、加剧储层非均质性的消极作用(任大忠等, 2019; 尤源等, 2019; Griffiths et al., 2021; Chen Shaoyun et al., 2024; Jia Fanjian et al., 2024); 还有学者认为绿泥石对孔隙保护作用有限, 储层物性主要受沉积相控制的沉积环境影响(Zhao Chengjin et al., 2022)。此外, 储层中富集的绿泥石能提高对油气的吸附能力, 不同赋存状态绿泥石对致密油的吸附能力亦有差异(Zhou Qianshan et al., 2021)。

笔者等系统总结了近 10 年绿泥石与致密砂岩储层的研究进展, 重点剖析绿泥石对致密砂岩储集物性的影响, 分析在油气多期充注中绿泥石富集特征和对储层含油气性的调控机制, 展示不同成岩期绿泥石演化对油气吸附的过程, 以期对低渗致密砂岩优质储层勘探提供新思路, 也为开发措施推行提供试验依据。

## 1 绿泥石的产状与成因

针对绿泥石在储层中的不同赋存形式, 最初陈树跃等(1983)的研究提出了砂岩储层孔隙系统中黏土矿物的 3 种赋存类型: 分立质点式、孔隙内衬式以及孔隙桥塞式。胡作维等(2012)指出, 自生绿泥石主要呈现颗粒包膜、孔隙充填和绿泥石化碎屑颗粒 3 种产状。姚泾利等(2011)的研究则揭示了绿泥石膜的双层结构特征, 即里层膜和外层膜。后续研究发现里层膜由同沉积黏土膜在早成岩阶段转化形成, 外层膜则是中成岩阶段从孔隙水中结晶析出的绿泥石(Lin Jianli et al., 2023; Chen Shaoyun et al., 2024)。此外, 借助电子显微镜及 X 射线扫描分析, 研究发现在原生孔隙内部识别出绿泥石的存在, 根据绿泥石的富集位置和产出形态, 孔隙充填型绿泥石多呈玫瑰花状或分散片状形态赋存(田建锋等, 2008a; Zhou Qianshan et al., 2020; Zhang Rui et al., 2022)。

针对前人所提出的绿泥石分类方案的差异, 由

于这些分类具较强的地区独特性, 导致分类方案未能统一, 且分类方法较为笼统模糊, 未能体现不同时期绿泥石的产状特征。笔者等吸取前人学者的分类经验, 按照绿泥石形成演化的先后顺序、独特的产状特征, 将绿泥石依次划分为: 颗粒包膜绿泥石、孔隙衬里绿泥石和孔隙充填绿泥石(表 1)。

### 1.1 颗粒包膜绿泥石

#### 1.1.1 产状

颗粒包膜绿泥石的晶体呈针状或放射纤维状, 在早期以薄膜的形式垂直碎屑颗粒表面生长, 并呈连续或半连续薄膜状包裹颗粒表面, 边缘平直, 与石英胶结物接触处可见明显界面。常形成于压实作用的初期阶段, 厚度均匀且通常不足 1  $\mu\text{m}$ , 由于受到挤压而在颗粒接触处平行于颗粒分布或部分缺失(田建锋等, 2008a; 刘定坤等, 2019; Chen Shaoyun et al., 2024)。颗粒包膜绿泥石主要发育于颗粒分选好、基质含量低(<5%)的中粗砂岩中, 与强水动力沉积环境(如河道中心)相关(Sun Zhixue et al., 2014)。颗粒包膜绿泥石由于受到早期的沉积搬运与成岩改造影响, 主要富集在具有高能水动力条件的三角洲入海(湖)的地区和相带, 如高能含砾含砾辫状河道微相、三角洲前缘水下分流河道及河口坝等可见富铁绿泥石膜(周晓峰等, 2017a)。

在鄂尔多斯盆地延长组和四川盆地沙溪庙组等地, 观察到的颗粒包膜绿泥石呈薄片状, 杂乱覆盖颗粒表面, 无明显定向性, 常见于水下分流河道砂体, 富硅铝贫铁, 被认为是与早期沉积环境中的铁絮凝作用相关(Zhang Rui et al., 2022)(图 1a、c、d); 长岭断陷营城组的颗粒包膜绿泥石厚度较小, 呈针状或片状覆盖颗粒表面, 形成于早成岩期未压实阶段, 与沉积期流体中铁镁离子富集相关(Zhang Junfeng et al., 2023)(图 1b)。

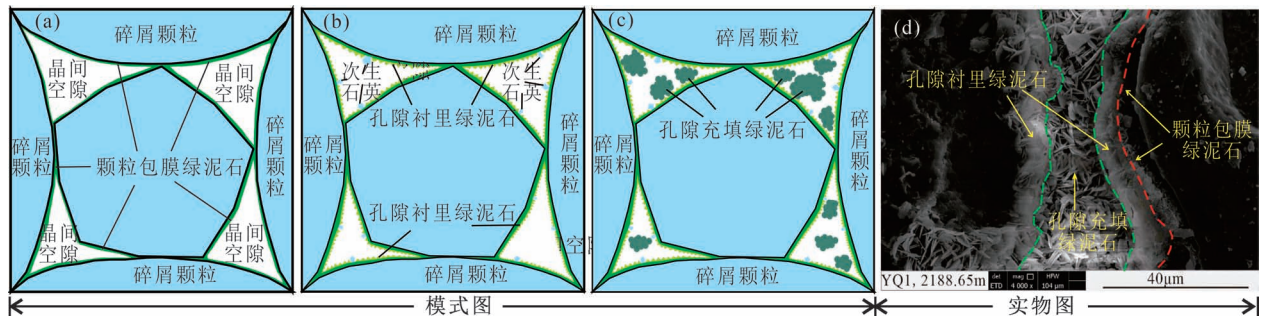
#### 1.1.2 成因

关于致密储层中绿泥石的成因, 胡作维等(2012)研究认为颗粒包膜绿泥石有三种成因: 先驱黏土矿物的转化、碎屑物质的交代和孔隙流体的沉淀。部分学者提出, 颗粒包膜绿泥石是由早期富铁黏土包壳经成岩作用转化而成(Lanson et al., 2002; 苏永进等, 2010; Grigsby, 2001; Zhu Shifa et al., 2017)。在沉积期三角洲前缘河口区, 早期沉积的潮汐—河流混合环境(如河口坝)利于碎屑黏土膜吸附, 河流输入的铁有机络合物因盐度差异絮凝沉淀, 形成黏土包膜, 为包膜绿泥石提供前驱体(Griffiths et al., 2021; 单祥等, 2019); 另有观点认

表 1 不同产状绿泥石的特征

Table 1 Characteristics of chlorites with different occurrences

绿泥石类型	颗粒包膜绿泥石	孔隙衬里绿泥石	孔隙充填绿泥石
产状	晶体呈针状或放射纤维状,以薄膜的形式垂直碎屑颗粒表面生长,并呈连续或半连续薄膜状包裹颗粒表面,边缘平直	晶体呈片状或竹叶状,垂直孔隙壁、颗粒表面或在颗粒包膜上呈厚栉壳状向孔隙中心结晶生长,集合体厚约为 3~10 μm	晶体呈玫瑰花状或分散片状,厚度>8 μm,晶体自形程度高,晶体生长方向和颗粒表面不具定向关系
沉积环境	分选好、基质含量低(<5%)的中粗砂岩中,强水动力沉积环境	粒度较粗、分选较好且杂基含量少的砂岩	富铁镁流体和弱碱性环境
成因	先驱黏土矿物的转化、碎屑物质的交代、孔隙流体的沉淀	同沉积黏土膜转化、富铁镁物质溶蚀再结晶、转化与直接结晶混合	直接从富 Mg <sup>2+</sup> 、Fe <sup>2+</sup> 孔隙水中沉淀以及蒙脱石和伊利石的转化
形成时间	压实作用的初期,同生期—早成岩 A 期	石英次生加大之前,早成岩晚期—中成岩早期	压实作用和石英次生加大之后,中成岩晚期或晚成岩期



为,绿泥石源可能于孔隙水中新生矿物的沉淀 (Billault et al., 2003),其中铁镁离子的主要来源于沉积时期的火山岩岩屑、火山碎屑,以及黑云母、长石等含铁镁丰富的火山物质和暗色矿物碎屑,这些物质经早期蚀变与溶解后,能为自生绿泥石的形成提供充足的铁、镁、硅、铝离子(胡作维等,2012),后期压实作用促使泥岩中的 Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup> 向砂岩运移 (Sun Zhixue et al., 2014);有些学者则认为 Fe<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 主要来自河流入海(湖)时的絮凝沉淀,河流携带的铁质胶体在咸淡水混合区絮凝,吸附于颗粒表面,经固态转化形成包膜形态的绿泥石,而非火山岩屑蚀变的溶解—结晶机制(Yu Yu et al., 2016),需弱碱性环境和铁镁离子供应的同时,在还原环境中热液重结晶形成(Lin Jianli et al., 2023)。

对于颗粒包膜绿泥石的形成过程,黄思静等(2004)认为,绿泥石膜通常由同沉积期的黏土膜转化而来,其转化过程自颗粒表面向孔隙中心逐步推进,并于早成岩阶段完成。田建锋等(2011)则提出另一种观点,认为早期绿泥石是直接由孔隙水中结晶析出,并在早成岩阶段于颗粒表面聚集形成薄膜。另有部分学者指出,颗粒包膜绿泥石的形成可能始于同沉积期碎屑颗粒压实固结之前,停止于石英次生加大及溶蚀作用(杨烁等,2020),在同沉积—早成岩阶段,河流搬运的铁—有机络合物[如胶体

Fe(OH)<sub>3</sub>]因湖水盐度升高絮凝,吸附于颗粒表面形成黏土前驱体(伊利石蒙脱石混层),埋藏至 1500~2500 m,温度 60~100℃,黏土前驱体在碱性孔隙水(pH≈8~9)中发生绿泥石化,形成致密包膜(周晓峰等,2019)。

## 1.2 孔隙衬里绿泥石

### 1.2.1 产状

孔隙衬里绿泥石晶体形态呈片状或竹叶状,其垂直孔隙壁、颗粒表面或在颗粒包膜上呈厚栉壳状向孔隙中心结晶生长,集合体厚约为 3~10 μm,形成时间稍晚于颗粒包膜绿泥石,在颗粒接触点附近绿泥石晶形较差、衬里厚度减小,越接近孔隙中心晶体自形程度越高(田建锋等,2008a;刘定坤等,2019;Zhang Yangchen et al., 2023)(图 2)。孔隙衬里绿泥石通常在粒度较粗、分选较好且杂基含量少的砂岩中发育,这类砂岩的结构要优于绿泥石不发育的区域(姚涇利等,2011)。此外,在对大量致密砂岩储层观察中也发现了溶蚀孔衬里绿泥石,该类型发育于长石溶蚀孔内,受孔隙空间的限制,晶体细小(Zhou Qianshan et al., 2020; Huggett et al., 2015)。

### 1.2.2 成因

物源中铁镁矿物(如辉石、角闪石)含量决定孔隙衬里绿泥石的发育规模,其发育也依赖于孔隙水

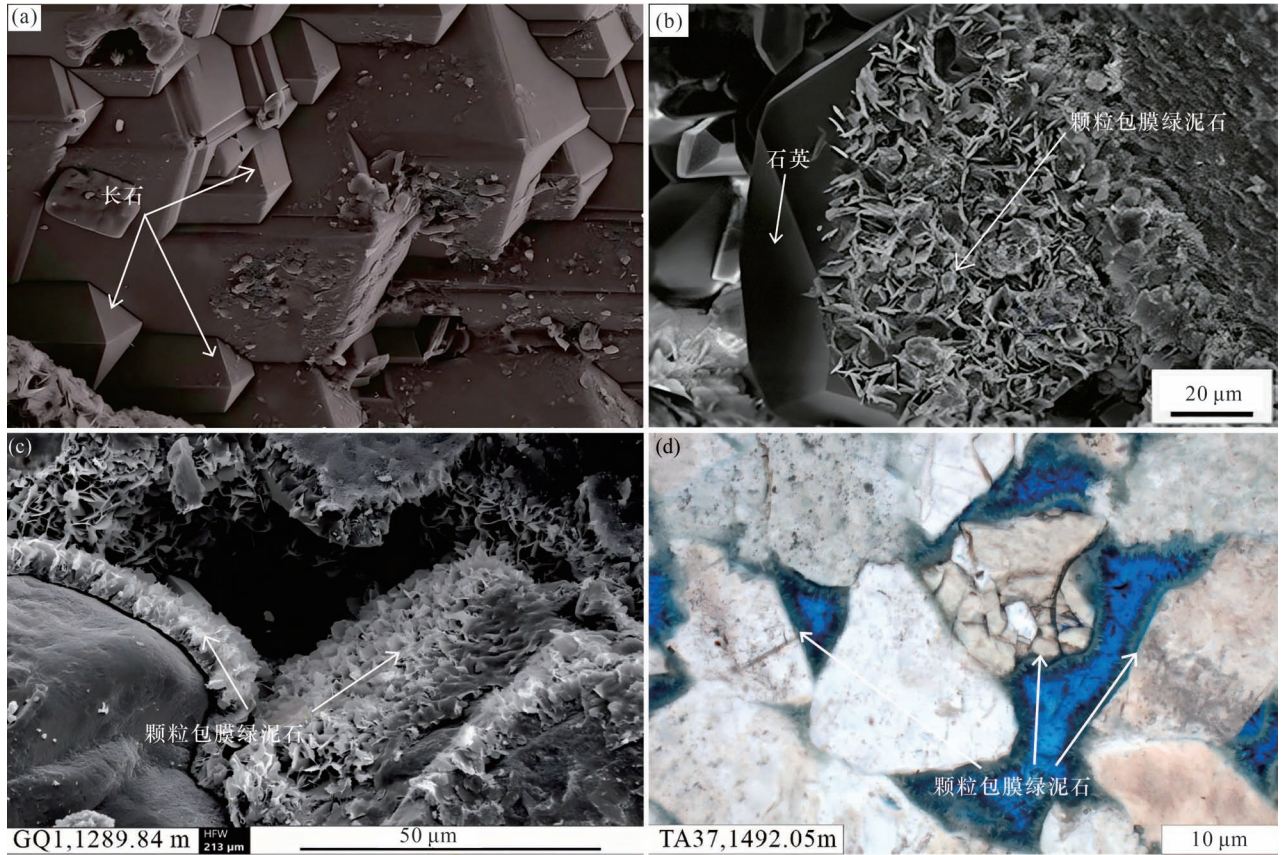


图 1 不同地区的颗粒包膜绿泥石(据 Zhou Qianshan et al. , 2021;Zhang Yangchen et al. , 2023; Chen Shaoyun et al. , 2024 修改)

Fig. 1 Grain-coating chlorites from different regions(modified after Zhou Qianshan et al. , 2021;Zhang Yangchen et al. , 2023; Chen Shaoyun et al. , 2024)

(a) 颗粒包膜绿泥石发育于长石矿物表面,扫描电镜图像,鄂尔多斯盆地西南缘三叠系延长组 8 段,S2 层 2138.10 m;(b) 颗粒包膜绿泥石杂乱覆盖颗粒表面,扫描电镜图像,松辽盆地长岭断陷龙凤山下白垩统营城,北 202 井 3087.48 m;(c)、(d) 围绕碎屑颗粒呈放射纤维状生长的颗粒包膜绿泥石,c 为扫描电镜图像,d 为显微镜下照片,四川盆地沙溪庙组,GQ1 井 1289.84 m

(a) Grain-coating chlorite developed on the surface of feldspar minerals, SEM image, Triassic Yanchang Formation, Section 8, S2 layer, 2138.10 m, southwestern margin of the Ordos Basin; (b) Grain-coating chlorite randomly covering the grain surface, SEM image, Lower Cretaceous Yingcheng Formation in Longfengshan, Changling Fault Depression, Songliao Basin, Well Bei 202, 3087.48 m; (c) (d) Grain-coating chlorite growing radially around detrital grains in a fibrous form, (c) is a SEM image, (d) is a microscopic photograph, Shaximiao Formation, Sichuan Basin, Well GQ1, 1289.84 m

化学条件与热演化程度,主要分布于分流河道砂体中颗粒分选好、火山岩屑含量的层段。连续性较好的孔隙衬里绿泥石,多在碱性孔隙水( $\text{pH} \approx 8 \sim 9$ )、中低温( $60 \sim 120^\circ\text{C}$ )条件下沉淀(Zhang Xia et al. , 2012)。关于孔隙衬里绿泥石成因的讨论,已有不少学者做了相应的研究,有学者按照其形成的铁质来源,分成了同沉积黏土膜转化型、富铁镁物质溶蚀再结晶型和转化与直接结晶混合型 3 种类型(田建锋等,2014);对四川盆地徐家河组等多地的孔隙衬里绿泥石研究发现,其 Fe 含量较高而 Si 含量较低,属于铁绿泥石,与富铁矿物溶解结晶有关(Zhao

Chengjin et al. , 2022;Zhou Qianshan et al. , 2021)。在成岩作用早期,黑云母、含铁凝灰岩、基性、超基性岩屑等发生水解,其中, $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 主要来自火山岩屑、黑云母和长石的溶蚀, $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 来自长石水解, $\text{Si}^{4+}$ 来自碎屑石英和硅质胶结物的溶解(Li Ke et al. , 2021),一方面,它为绿泥石的形成提供了丰富的铁、铝、硅元素,另一方面还营造了开放的碱性环境(田建锋等,2008a);早期颗粒包膜绿泥石形成后,生烃过程中释放的有机酸流体渗入,使孔隙水从碱性转为酸性,长石、岩屑等碎屑颗粒发生溶解,进而形成次生溶孔与铸模孔,同时在成岩孔隙流体的

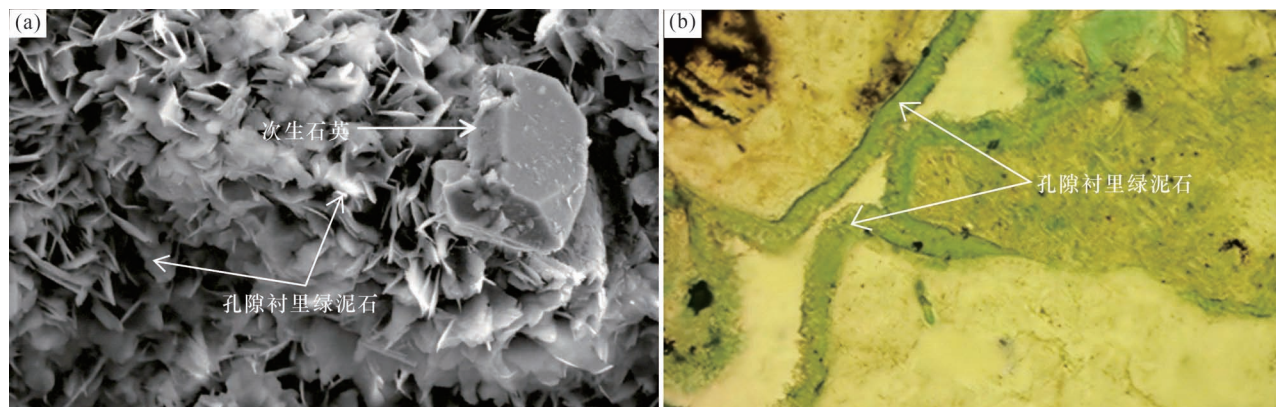


图2 孔隙衬里绿泥石(据 Zhou Qianshan et al. , 2021; Zhang Yangchen et al. , 2023 修改)

Fig. 2 Pore-lining Chlorite (modified after Zhou Qianshan et al. , 2021; Zhang Yangchen et al. , 2023)

(a) 孔隙衬里绿泥石以及形成后发育的次生石英, 样品 S3, 深度 2192.6 m, 鄂尔多斯盆地西南缘三叠系延长组 8 段;

(b) 松辽盆地长岭断陷龙凤山下白垩统营城组, 北 210 井 3949.75 m, 单偏光

(a) Pore-lining chlorite and secondary quartz developed after its formation; Sample S3, depth 2192.6 m, Member 8 of the Triassic Yanchang Formation at the southwestern margin of the Ordos Basin; (b) Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Longfengshan, Changling Fault Depression, Songliao Basin; Well Bei 210, 3949.75 m; plane-polarized light

作用下,第二期片状绿泥石结晶于早期膜状绿泥石之上(姜敏等,2021);有些学者认为孔隙衬里绿泥石由富铁镁孔隙水直接沉淀形成,厚度和覆盖度受沉积环境控制,火山岩屑蚀变(提供 Fe、Mg)、黑云母分解及黏土基质中的蒙脱石伊利石化,释放铁镁离子至孔隙水,形成于中温(90~135℃)的还原环境,优先在高能河道的高孔隙空间中沉淀(Lin Jianli et al. , 2023; Patricia et al. , 2023)。

目前对于孔隙衬里绿泥石的形成阶段的研究,有学者认为是中成岩 A—B 期,也有学者认为是形成于早成岩晚期至中成岩早期,早于石英、方解石和高岭石胶结,温度为 90℃ 左右。孔隙衬里绿泥石的形成时间早于后期强烈的压实作用,是在方解石胶结物形成和石英次生加大之前、长石溶解之后出现的。原因在于,在致密砂岩中,孔隙衬里绿泥石保留下来的部分残余原生粒间孔里常常能看到方解石充填的现象,也能观察到衬里绿泥石外侧的石英次生加大,以及在长石溶解后的粒内溶孔中生长(蒋裕强等,2013)。由此可知,孔隙衬里绿泥石形成于成岩作用早期,此时的孔隙衬里绿泥石颗粒间的接触紧密程度不高、压实作用较弱,颗粒主要以点接触或点—线接触为主(孙全力等,2012),且它的形成与富铁沉积环境相关,河流带来了大量溶解的  $Fe^{2+}$ ,为绿泥石的形成提供了铁元素来源,这类绿泥石主要分布在三角洲前缘环境中,孔隙衬里绿泥石在原生孔隙与新生粒内孔形成,形成后期伴随着石英次生

加大和碳酸盐胶结(钟韬等,2017)(图 3)。

### 1.3 孔隙充填绿泥石

#### 1.3.1 产状

孔隙充填绿泥石的晶体呈玫瑰花状或分散片状充填于溶蚀孔隙和粒间孔,厚度大于  $8\ \mu\text{m}$ ,晶体自形程度高,晶体生长方向和颗粒表面不具定向关系,与孔隙衬里绿泥石成分相近但形成较晚(Li Ke et al. , 2021; Chen Shaoyun et al. , 2024)。玫瑰花状绿泥石作为孔隙充填绿泥石,自形程度高,呈簇状充填孔隙,形成于晚成岩期,与泥岩压释水提供的铁镁离子有关,主要受长石溶解和泥岩压实流体影响(Zhou Qianshan et al. , 2021)。此类绿泥石在孔隙中的充填多表现为单矿物形态,部分绿泥石呈现多世代生长特征,其晶体向孔隙中心逐层生长直至完全充填孔隙,而另一些则不具备世代性的绿泥石直接进行充填作用(图 4a)。其中,四川盆地须家河组绿泥石充填溶蚀孔隙或无包膜和衬里的砂岩属于过渡型绿泥石,与泥岩中黏土矿物转化释放的离子有关(Zhang Rui et al. , 2022);四川盆地北部的沙溪庙组发育孔隙充填绿泥石为主(平均  $7\ \mu\text{m}$ ),绿泥石含量与长石、火山岩屑呈正相关(Liang Qingshao et al. , 2024)(图 4b)。

#### 1.3.2 成因

随着埋藏深度的增大,孔隙流体的 pH 值持续升高,铁质含量不断增加,当钾、钠含量较低时,蒙脱石和伊利石均呈现向绿泥石转化的趋势。虽然形成

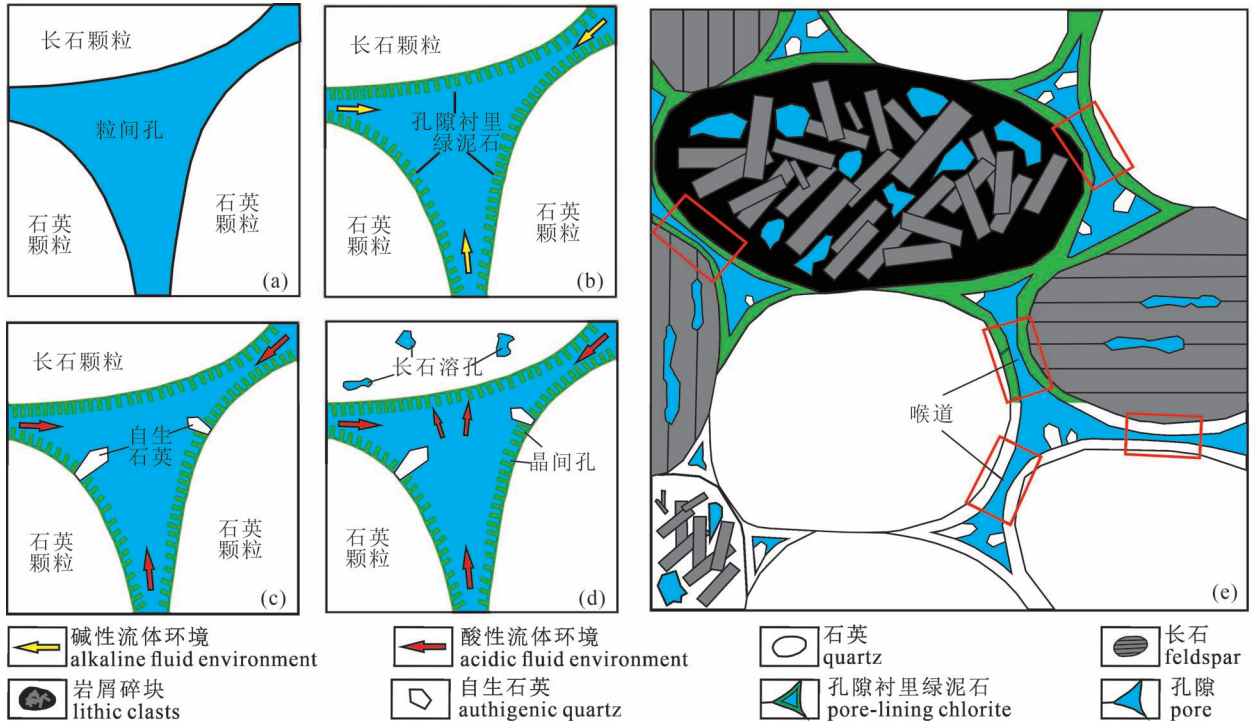
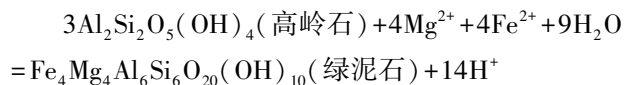


图3 致密砂岩储层孔隙衬里绿泥石的形成过程(据 Zhang Yangchen et al. , 2023 修改)

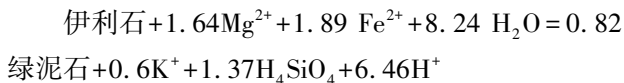
Fig. 3 Formation process of pore-lining chlorite in tight sandstone reservoirs (modified after Zhang Yangchen et al. , 2023)

- (a) 沉积初期,发育原生粒间孔;(b) 早成岩期,弱碱性条件下形成孔隙衬里绿泥石;(c) 中成岩期,酸性条件下逐渐形成自生微晶石英;(d) 酸性流体通过绿泥石晶间孔与长石颗粒接触,形成粒内溶蚀孔;(e) 孔隙衬里绿泥石发育时,孔隙结构呈现“大孔细喉”特征
- (a) Early sedimentary stage, with primary intergranular pores developing; (b) Early diagenetic stage, where pore-lining chlorite forms under weakly alkaline conditions; (c) Middle diagenetic stage, with authigenic microcrystalline quartz gradually forming under acidic conditions; (d) Acidic fluids pass through intercrystalline pores of chlorite to contact feldspar grains, resulting in the formation of intragranular dissolution pores; (e) When pore-lining chlorite is developed, the pore structure exhibits the characteristic of "large pores with fine throats"

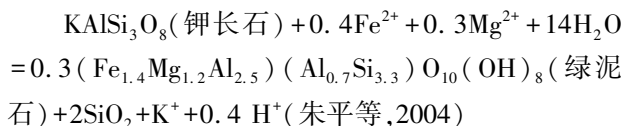
时间跨度较大,但含量通常很少,且没有相对固定的产出形态(田建锋等,2008a)。此类绿泥石主要发育于孔隙水中富含铁、镁的碱性成岩环境,在晚成岩阶段,随着埋深增加,高岭石将向绿泥石发生转化:



此外,在成岩作用中,伊利石也可以转化为绿泥石:



进入砂岩中的  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的流体也可使钾长石发生绿泥石化,其反应式为:



在晚成岩期,火山岩屑、黑云母等铁镁矿物的水解释放  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ ,长石溶蚀释放  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ ,有机质

成熟之后,孔隙流体成为富铁、镁的碱性流体,促进孔隙充填绿泥石在碱性环境孔隙流体中直接沉淀,同时泥岩压释水也为晚期玫瑰花状绿泥石提供离子补充(Zhou Qianshan et al. , 2020),形成铁质含量相对较低的孔隙充填绿泥石(Zhang Junfeng et al. , 2023)。也有其他学者认为孔隙充填绿泥石发育是在中成岩期压实作用和石英次生加大之后(温度  $\approx 110^\circ\text{C}$ ),绿泥石直接从富  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  孔隙水中沉淀,离子来源于火山岩屑和云母溶蚀,并伴随有碳酸盐胶结,晚期发生较弱溶蚀,受晚期方解石胶结影响显著,方解石沉淀消耗部分离子,导致其仅在砂岩中上部欠胶结区域发育(Li Ke et al. , 2021)。

#### 1.4 演化序列

颗粒包膜绿泥石主要受控于沉积环境,孔隙衬里绿泥石的分布受到砂岩内铁镁质岩屑及黑云母等矿物丰度的制约,而孔隙充填绿泥石的形成与砂岩组构密切相关。关于绿泥石在储层中的演化序列,不少学者给出了不同见解(田建锋等,2014;刘定坤

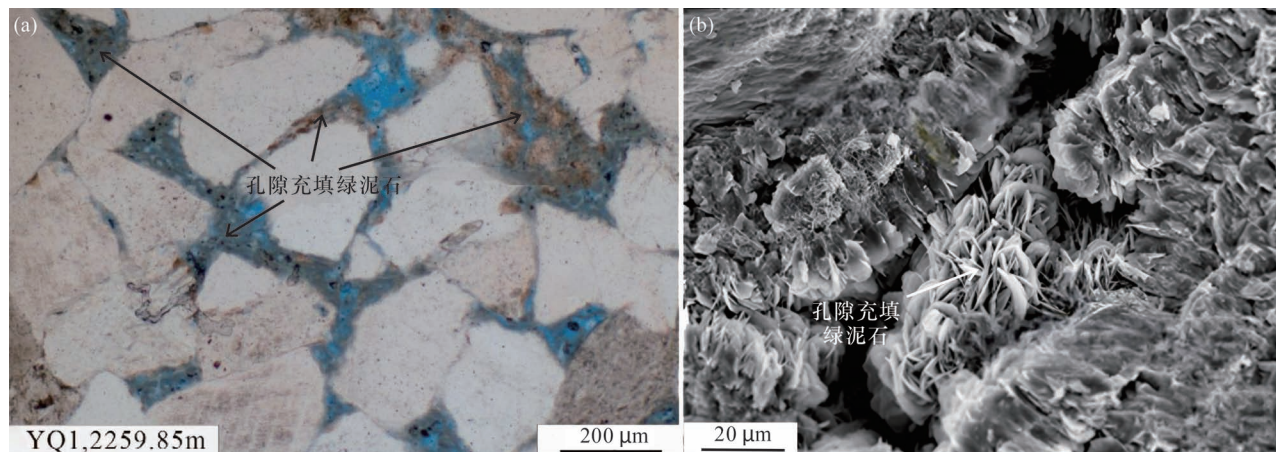


图4 孔隙充填绿泥石(据 Zhang Yangchen et al., 2023;Chen Shaoyun et al., 2024 修改)

Fig. 4 Pore-filling Chlorite(modified after Zhang Yangchen et al., 2023;Chen Shaoyun et al., 2024)

(a) 松辽盆地长岭断陷龙凤山下白垩统营城组的孔隙充填绿泥石,北202井3113.28 m;(b) 四川盆地沙溪庙组的原生孔隙内孔隙充填绿泥石广泛发育,GQ1井1289.84 m

(a) Pore-filling chlorite in the Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Longfengshan, Changling Fault Depression, Songliao Basin, from Well Bei 202 at a depth of 3113.28 m;(b) Pore-filling chlorite widely developed in primary pores of the Shaximiao Formation, Sichuan Basin, from Well GQ1 at a depth of 1289.84 m

等,2019),但大体上将绿泥石生长演化分为3期:在早期碱性的条件下形成的颗粒包膜属于第一期绿泥石,晶体体积小而分布密集,覆盖在颗粒表面,甚至包裹整个颗粒,自形程度低,铁含量较高;第二期自生绿泥石的形成温度较高,主要为孔隙衬里绿泥石,其晶体更大、自形程度更高。当埋深较大时,早期形成的颗粒包膜绿泥石中,较小颗粒因其较差的热力

学稳定性和较高的溶解度,会自发溶解并重新生长成为较大颗粒,这一过程导致部分颗粒包膜绿泥石转化为孔隙衬里绿泥石;第三期自生绿泥石以晶体粗大和自形程度高为特征,主要作为孔隙充填物。进入成岩中期后,绿泥石倾向于垂直于颗粒表面,向形态各异的原生孔隙内部生长,最终发育为孔隙充填绿泥石(娄敏等,2021)(表2)。

表2 不同学者对不同产状绿泥石演化序列的差异研究

Table 2 Studies by multiple scholars on differences in evolutionary sequences of chlorites with different occurrences

颗粒包膜绿泥石	孔隙衬里绿泥石	孔隙充填绿泥石	文献出处
早成岩 A 期	早成岩 B 期—中成岩 A 期,砂岩压实之后至石英大量胶结之前	中成岩 B 期—晚成岩期	田建锋等, 2008a
同生期—早成岩 A 期,硅酸盐矿物水化水解以及富 Fe, Mg 流体中蒙脱石向绿泥石的转化	早成岩 B 期,邻近泥岩中蒙脱石向伊利石转化提供充足的 Fe、Mg 离子	中成岩 B 期,有机酸脱羧形成的碳酸对硅酸盐矿物的溶蚀,以及高岭石(或伊利石)向绿泥石的转化	吴家洋等, 2020
早成岩期	中成岩 A 期,溶蚀衬里在中成岩 B 期	中成岩 B 期	Zhou Qianshan et al., 2021
早成岩阶段:埋藏压实使颗粒接触紧密,粘土前驱体在碱性环境中逐渐绿泥石化	中成岩阶段:长石、火山岩屑溶解释放 $Fe^{2+}/Mg^{2+}$ ,在孔隙中沉淀形成	早期物质来源于河流输入的铁絮凝物,晚期来自碎屑颗粒溶解及泥岩粘土矿物转化	Zhao Chengjin et al., 2022
在早成岩 A 期( $<60^{\circ}C$ )重结晶作用形成		中成岩期( $>80^{\circ}C$ ):铁镁矿物溶蚀或泥岩流体提供离子	Griffiths et al., 2021
早成岩阶段的浅埋藏( $20^{\circ}C - 40^{\circ}C$ )下,前驱体在碱性孔隙水中由热液重结晶形成	中成岩阶段:埋藏温度 $80^{\circ}C - 100^{\circ}C$ ,有机酸溶解火山岩屑、黑云母等,释放 $Fe^{2+}/Mg^{2+}$ ,在颗粒包膜的外侧生长	中成岩 B 期至晚成岩期:释放 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ ,在孔隙中心缓慢沉淀	Zhang Rui et al., 2022
早成岩 A 期:火山岩屑水解释放大量 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ ,黑云母蚀变补充 $Mg^{2+}$ 、 $K^{+}$ ,促使蒙脱石向绿泥石转化	早成岩 B 期,火山岩屑和黑云母持续释放离子,孔隙衬里绿泥石在颗粒包膜的外侧生长	中成岩期:有机酸溶蚀长石、火山岩屑,释放 $Ca^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ ,孔隙水离子浓度饱和后直接沉淀自形绿泥石	Chen Shaoyun et al., 2024

注:早成岩期( $<60^{\circ}C$ 为 A 期, $60\sim 80^{\circ}C$ 为 B 期)、中成岩期( $80\sim 120^{\circ}C$ 为 A 期, $120\sim 150^{\circ}C$ 为 B 期)、晚成岩期( $>150^{\circ}C$ )

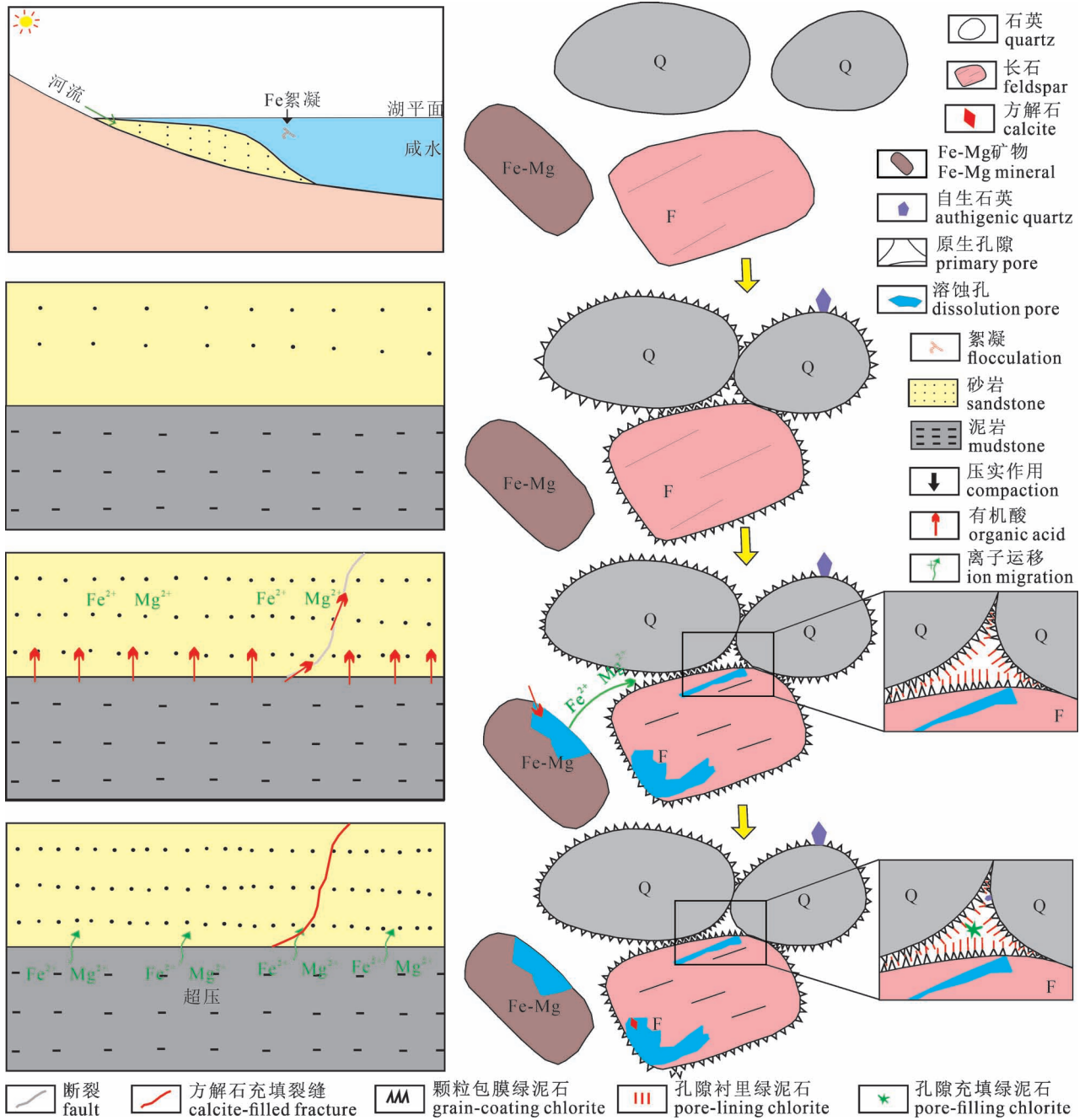


图5 研究区自生绿泥石的成因及形成过程图(据 Zhao Chengjin et al., 2022 修改)

Fig. 5 Diagram of the genesis and formation process of authigenic chlorite in the study area

(modified after Zhao Chengjin et al., 2022)

因此我们可以将绿泥石的成岩演化序列概括为:早期机械压实→早期颗粒包膜绿泥石(Ch1)→溶蚀作用→孔隙衬里绿泥石(Ch2)、石英次生加大→大量机械压实→孔隙充填绿泥石(Ch3)→方解石胶结(田建锋等,2008b)(图5)。

## 2 影响不同绿泥石发育的主控因素

国内已发现的绿泥石主要分布于鄂尔多斯盆地

三叠系延长组、四川盆地三叠系须家河组、塔里木盆地三叠系、准噶尔盆地侏罗系等的大型湖泊三角洲前缘砂体中,由于这些分布区域的地质背景存在差异,不同绿泥石的形成演化过程也呈现出多样特征,影响其形成演化的主控因素有很多,如沉积环境、物质来源和流体性质等(朱颖等,2017;乔江华,2019)。

### 2.1 沉积环境与物质来源

自生绿泥石主要发育在河流、三角洲和滨岸等

环境,其形成需要一个相对高孔、高渗、开放的体系沉积和碱性的成岩环境,以便于溶解物质的带入与带出(田建锋等,2008b)。颗粒包膜绿泥石发育于高能沉积环境的水下分流河道砂体(Chen Shaoyun et al., 2024),因为强水动力的河道砂体颗粒粗、分选好,所以有利于包膜绿泥石连续发育,而支流间湾微相因泥质含量高、压实强,包膜和衬里绿泥石不发育(Xiang Fang et al., 2016)。强水动力环境(如三角洲前缘)利于孔隙衬里绿泥石,高能辫状河道的孔隙衬里绿泥石覆盖度高(>80%),晶体呈多层排列,有效抑制石英胶结,储层孔隙度较高。而在低能辫状河道及含泥砾河道,孔隙衬里绿泥石覆盖度低(<55%),多呈单一层状,且常与压实作用叠加,导致储层致密,孔隙度和渗透率较差(Lin Jianli et al., 2023)(图6)。

绿泥石的铁、镁来源有:陆源火山岩屑、变质岩屑、生物成因铁的氧化物(如河口絮凝的铁腐殖酸复合体)及早期成岩的含铁黏土矿物(Worden et al., 2020)。绿泥石形成与三角洲前缘沉积的火山物质蚀变有关(尤源等,2019),中基性岩浆岩作为

母岩,其水解提供铁、镁离子(如黑云母、角闪石)是绿泥石形成的物质基础,扇三角洲前缘水下分流河道微相的高能、弱碱性还原环境(pH 7~9)促进绿泥石沉淀(晏奇等,2020)。此外,相同物质来源的绿泥石也有着不同的成岩演化过程。有学者提出,绿泥石的3个阶段有不同的物质来源,在“种子阶段”,也就是在同沉积一成岩早期,蒙脱石等作为前驱体在颗粒表面吸附聚集,在低能环境下初步转化为低结晶程度、低Fe/Mg含量的包膜绿泥石;在“分枝阶段”,早成岩的晚期,火山岩屑和黑云母持续释放离子,孔隙衬里绿泥石在早期颗粒包膜的外侧生长,晶体自形程度高,Fe/Mg含量升高;“开花阶段”,在中成岩期,溶蚀作用使孔隙水离子 $Si^{4+}$ 、 $Al^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 等过饱和,直接沉淀孔隙充填的呈自形六方板状绿泥石(Chen Shaoyun et al., 2024)。

## 2.2 流体性质

高悬浮泥沙携带富铁的前驱体促进孔隙充填绿泥石形成,但是却抑制颗粒包膜绿泥石连续性,生物搅动导致泥质与砂质混合,降低了颗粒包膜绿泥石保存率,或通过形成黄铁矿消耗铁离子,从而减少了

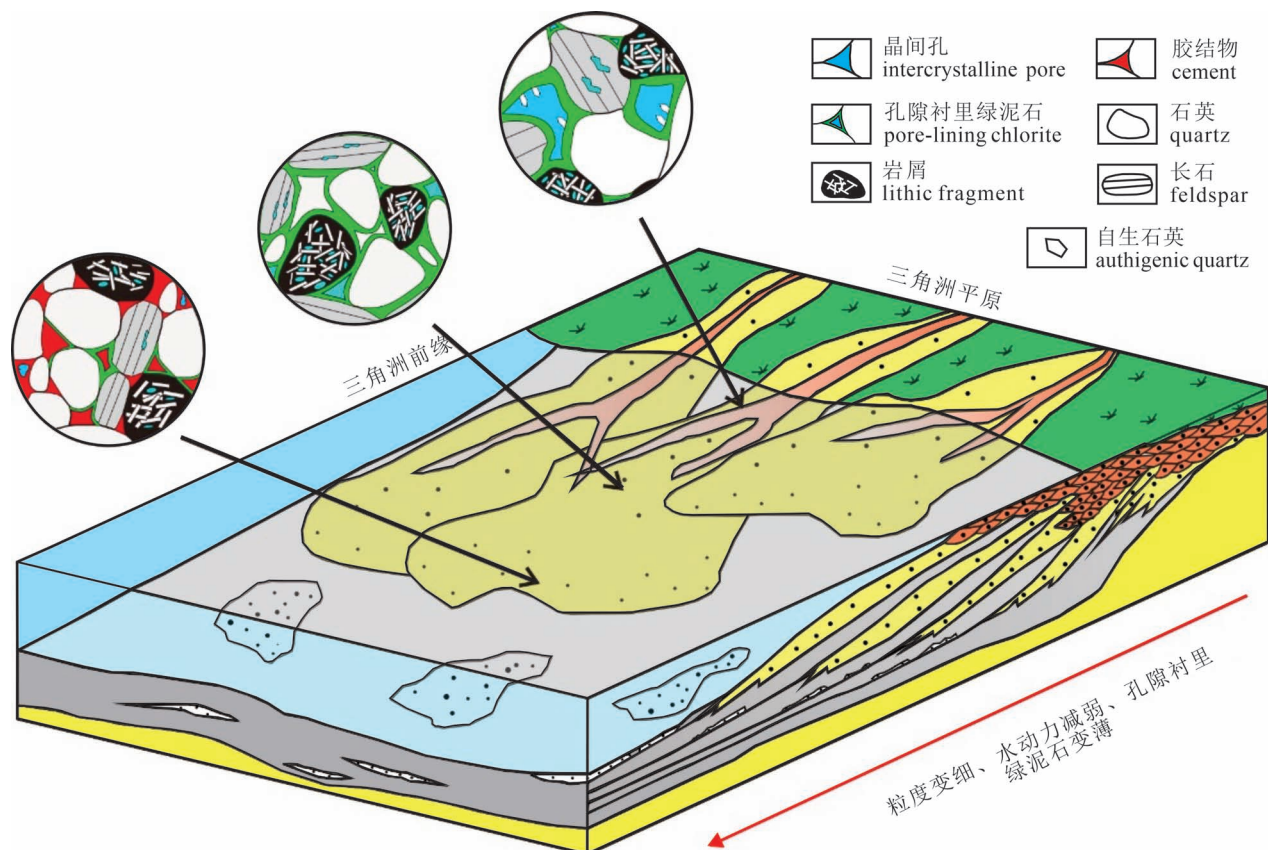


图6 自生绿泥石与沉积环境关系示意图(据 Zhang Yangchen et al., 2023 修改)

Fig. 6 Schematic diagram of the relationship between authigenic chlorite and sedimentary environment (modified after Zhang Yangchen et al., 2023)

绿泥石沉淀(Sun Zhixue et al., 2014)。

油气充注过程流体酸碱性质的变化对致密砂岩中的绿泥石演化也具有重要意义,进入成岩阶段后,伴随油气运移进入砂岩的短链有机酸和碳酸流体,一方面将孔隙溶液转变为水—烃两相体系,一定程度上抑制了成岩作用;另一方面促使孔隙流体由碱性向酸性转化,破坏了绿泥石形成的有利环境,转而促进了长石的溶蚀过程。但油气随着地层不断抬升而停止充注,每轮油气充注结束后,砂岩便失去酸性流体补给,孔隙水再次从酸性转变为碱性,这为绿泥石的沉淀提供了有利的成岩环境,在富铁的碱性成岩流体作用下,绿泥石晶体会不断析出,并逐步在碎屑颗粒表面聚集形成衬里绿泥石,石英颗粒开始发生溶蚀,由此产生的溶蚀小孔洞,为其进一步生长提供了所需的空间和物质(周晓峰等,2019)。所以碱性、富铁镁离子的孔隙水促进绿泥石沉淀,酸性流体则可能溶蚀绿泥石(Zhang Xia et al., 2012)。

### 3 绿泥石对储层的影响

自生绿泥石对致密储层物性的影响具有两面性。建设性主要体现在减缓压实作用、抑制压溶作用、抑制石英加大等方面;而破坏性则体现在会堵塞喉道,缩小喉道半径,降低渗透率,导致“中高孔、低渗”特征(Dowey et al., 2012; 尤源等, 2019; 蒋裕强等, 2013)。绿泥石对储层的影响具阶段性和空间差异性,不同类型的绿泥石对储层性能影响方式不同,同一类型绿泥石在不同成岩阶段的影响方式也不同(黄苏卫等, 2018; Liang Qingshao et al., 2024)。

#### 3.1 建设性作用

有研究显示,原生孔隙度与绿泥石含量呈正相关(图7),当层段内颗粒包膜绿泥石连续发育(覆盖率>80%)时,石英胶结物含量<3%,原生孔隙损失率降低约40%(Yu Yu et al., 2016; 陈春发等, 2023),孔隙度比非发育层高3%~5%,为后期酸性流体(如有机酸)渗透提供通道,促进长石、岩屑溶蚀形成次生孔隙(占总孔隙的30%~40%)(Zhou Qianshan et al., 2020; Jia Fanjian et al., 2024)。

##### 3.1.1 促进溶蚀

首先,绿泥石晶间孔为酸性溶蚀流体提供高效运移通道。对鄂尔多斯盆地延长组储层的研究发现,孔隙衬里绿泥石发育的储层的储集空间通常保存较好,含孔隙衬里绿泥石储层内颗粒间的接触关系以点—线接触为主,而未发育孔隙衬里绿泥石的储层则普遍呈现凹凸接触,孔隙衬里绿泥石的层状

结构会发育大量纳米级晶间孔,其连通率可达60%~75%,这些孔隙不仅是油气赋存的重要空间,更成为有机酸、碳酸等酸性流体渗透至碎屑颗粒表面的微观通道,可直接提升溶蚀作用的范围与效率。当有机酸流体进入储层后,可通过这些晶间孔快速扩散至长石、火山岩屑等易溶矿物表面,形成沿绿泥石分布带的选择性溶蚀。在绿泥石发育区,长石溶蚀孔的密度是无绿泥石区的4~5倍,且溶蚀孔多呈“围绕绿泥石衬里分布”的特征。该研究通过流体包裹体测温进一步证实,绿泥石晶间孔内的有机酸包裹体均一温度与长石溶蚀高峰期温度高度吻合,直接证明绿泥石晶间孔对溶蚀流体的导运作用,从而改善储层物性(谢武仁等, 2010; Zhang Xia et al., 2012; 席敏红, 2023; 牛君等, 2025; 兰叶芳等, 2011)。

其次,绿泥石可调控孔隙流体pH值,营造阶段性溶蚀有利环境。绿泥石大量形成可作为碱性、高孔渗的开放环境的指示,其形成与演化会通过离子交换、表面吸附等过程动态调节孔隙流体的酸碱性质,形成“碱性成岩环境→绿泥石沉淀→酸性流体输入→溶蚀作用增强”的阶段性循环,为长石、岩屑等矿物的溶蚀创造条件。当油气充注携带如乙酸、丙酸等短链有机酸进入储层后,绿泥石的缓冲作用可避免流体pH值骤降,而这一pH区间恰好是长石溶蚀的“最佳窗口”——既避免了高岭石等黏土矿物快速沉淀堵塞孔隙,又能持续溶解长石中的钙长石、钠长石组分,形成大量粒内溶孔与铸模孔。研究通过X射线衍射分析发现,绿泥石发育区的长石溶蚀残余物中,钙、钠元素含量比无绿泥石区低30%~40%,证明绿泥石调控的流体环境显著提升了溶蚀强度(Zhao Chengjin et al., 2022)。此外,绿泥石在成岩过程中会通过晶格取代释放 $Al^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ 与孔隙水中的 $F^{-}$ 结合形成 $AlF_6^{3-}$ ,这一反应可消耗流体中的 $F^{-}$ ,避免氟化物沉淀抑制溶蚀,同时由于 $Si^{4+}$ 与 $AlF_6^{3-}$ 可形成稳定络合物,也能间接促进长石中 $Si^{4+}$ 的释放,从而延长长石的溶蚀时间(Chen Shaoyun et al., 2024; 吴家洋等, 2020)。

最后,绿泥石与火山岩屑的耦合作用扩大了溶蚀物质供给。在富火山岩屑的致密砂岩中,绿泥石的形成常与火山岩屑的早期溶蚀同步,二者形成“物质供给—溶蚀反馈”的耦合关系,火山岩屑溶蚀释放的 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 为绿泥石提供成矿物质,而绿泥石的存在又可保护火山岩屑溶蚀形成的次生孔隙不被胶结物充填,同时进一步促进长石等其他矿物的溶蚀。有研究发现,粗面安山岩中的黑云母、辉石在海

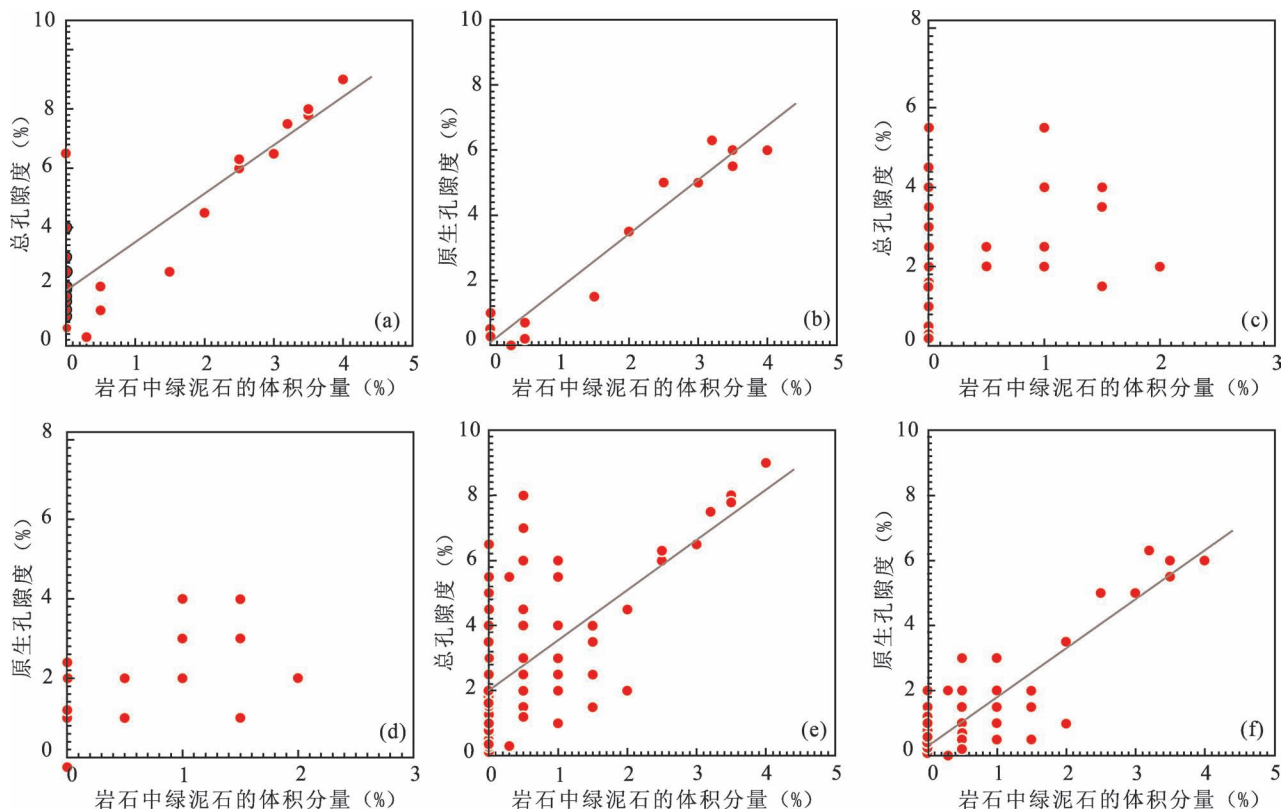


图7 须家河组孔隙度与自生绿泥石含量关系图(据 Sun Zhixue et al., 2014 修改)

Fig. 7 Diagram of the relationship between porosity and authigenic chlorite content in the Xujiache Formation (modified after Sun Zhixue et al., 2014)

(a) 二段自生绿泥石与总孔隙度关系;(b) 二段自生绿泥石与原生孔隙度关系;(c) 四段自生绿泥石与总孔隙度关系;(d) 四段自生绿泥石与原生孔隙度关系;(e) 二段和四段自生绿泥石与总孔隙度关系;(f) 二段和四段自生绿泥石与原生孔隙度关系(据 Sun Zhixue et al., 2014 修改)

(a) relationship between authigenic chlorite in Member 2 and total porosity;(b) relationship between authigenic chlorite in Member 2 and primary porosity;(c) relationship between authigenic chlorite in Member 4 and total porosity;(d) relationship between authigenic chlorite in Member 4 and primary porosity;(e) relationship between authigenic chlorite in Members 2 and 4 and total porosity;(f) relationship between authigenic chlorite in Members 2 and 4 and primary porosity

洋环境下先发生水解溶蚀,释放的  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  在孔隙中沉淀形成转化型绿泥石,而绿泥石形成后会包裹在未完全溶蚀的火山岩屑表面,阻止其与硅质流体接触,同时绿泥石晶间孔引导酸性流体进一步溶蚀火山岩屑中的钙、钠组分,形成“火山岩屑溶蚀孔—绿泥石晶间孔”的复合储集空间。另外,在准噶尔盆地玛湖凹陷下乌尔禾组地层中,绿泥石的发育程度与火山岩屑含量呈正相关,当火山岩屑含量超过 15% 时,绿泥石含量可达 5%~8%,此时长石溶蚀率也同步提升至 25%~30%。其原因在于,火山岩屑溶蚀释放的  $\text{Fe}^{2+}$  不仅促进绿泥石形成,还会与孔隙水中的  $\text{CO}_2$  结合形成  $\text{FeCO}_3$ ,消耗部分  $\text{CO}_3^{2-}$ ,从而维持流体的弱酸性,为长石溶蚀提供持续环境(晏奇等,2020)。

### 3.1.2 缓解压实

压实作用作为致密砂岩储层原生孔隙损失的核心驱动因素,是储层致密化的主因(牛君等,2025)。虽绿泥石自身硬度较低,但其特殊的晶体生长方式与空间分布,与物理隔离颗粒延缓孔隙闭合的方式,可减少压实过程中的颗粒破碎和孔隙坍塌,显著提升岩石整体抗压缩与抗变形能力(丁晓琪等,2010;马鹏杰等,2017;田建锋等,2014)。通过岩石力学实验测定,发育连续孔隙衬里绿泥石的砂岩,其抗压强度较无绿泥石砂岩提升 20%~35%,弹性模量提高 15%~25%,泊松比降低 8%~12%(Griffiths et al., 2021; Chen Shaoyun et al., 2024)。颜其彬等(2013)指出,绿泥石在粒间孔中的胶结作用可平衡成岩过程中不断增大的上覆载荷,分散了应力,减轻

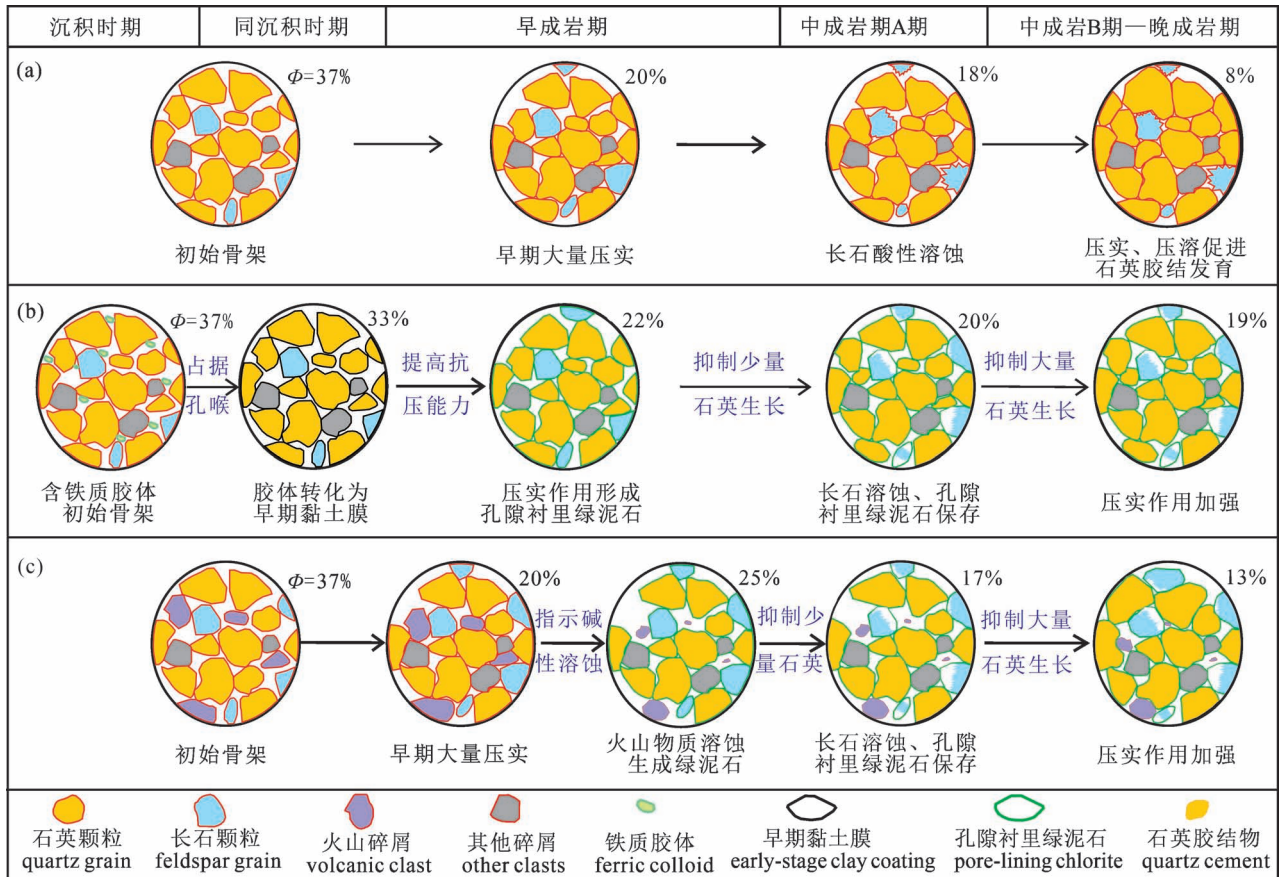


图8 孔隙衬里绿泥石的形成及影响过程示意图(据田建锋等,2014 修改)

Fig. 8 Schematic diagram of the formation and influence processes of pore-lining chlorite  
(modified after Tian Jianfeng et al., 2014&)

(a) 无孔隙衬里绿泥石发育的砂岩;(b) 转化型孔隙衬里绿泥石绿泥石;(c) 溶蚀型孔隙衬里绿泥石

(a) sandstone without the development of pore-lining chlorite;(b) transformed pore-lining chlorite;(c) dissolution-type pore-lining chlorite

压实作用对岩石粒间孔隙的破坏,使砂岩中一些孔隙得以完好保存下来。

在绿泥石包膜胶结的砂岩孔隙中,可以观察到孔隙边缘的包膜和衬里绿泥石错断位移不明显,表明绿泥石包膜形成后,岩石经历的变形程度有限,反映出其具有抑制岩石变形的作用(朱平等,2004)。孔隙衬里绿泥石以片状、栉壳状垂直孔隙壁生长,形成环绕颗粒的“刚性衬层”,相当于在碎屑颗粒与孔隙流体之间构建力学缓冲带,通过“颗粒加筋”作用增强颗粒骨架稳定性(孙治雷等,2008)。当受到上覆地层压力时,绿泥石晶体可将集中应力分散至更大范围的颗粒表面,避免单一颗粒因局部应力过高发生压裂或溶蚀(田建锋等,2014)。此外,早期形成的颗粒包膜绿泥石可通过包裹、固定颗粒接触关系,使颗粒在压实初期即形成稳定的“点—线接触”骨架,相较于无包膜砂岩在压实作用下快速变为凹

凸接触甚至缝合接触,包膜绿泥石发育的砂岩在埋藏深度达3000~4000 m时,仍有60%~70%的颗粒保持点—线接触(孙全力等,2012; Sun Zhixue et al., 2014)(图8)。

绿泥石也可以保护微观结构,减少孔隙坍塌与喉道变形。从微观尺度看,绿泥石通过抑制颗粒重排、孔隙挤压、喉道堵塞的压实连锁反应,保护储层孔隙结构完整性。绿泥石晶体在颗粒接触点附近虽厚度会减薄,但仍能形成“物理阻隔层”,避免石英、长石颗粒因直接接触发生压溶或机械嵌入。扫描电镜观察显示,鄂尔多斯盆地陇东地区长8段砂岩中,无绿泥石的石英颗粒接触处常见压溶缝合线,而有孔隙衬里绿泥石的颗粒接触处,缝合线发育率降低90%以上,且接触界面平整(周晓峰等,2019)。绿泥石晶间孔形成的微观通道,可在压实导致粒间孔缩小的同时,保留流体渗流路径,很大程度上减小了压

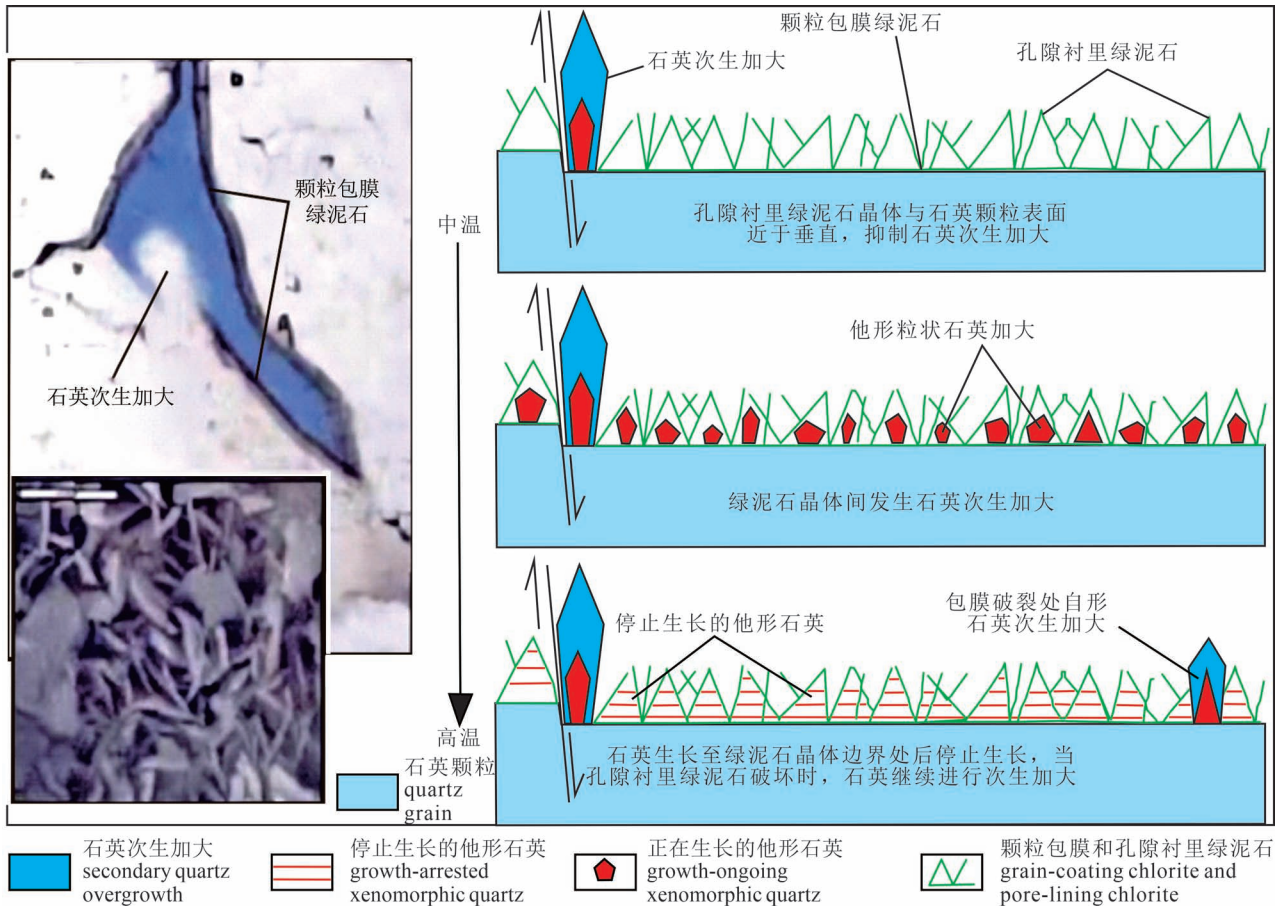


图9 绿泥石对石英次生加大的抑制过程(据马鹏杰等,2017 修改)

Fig. 9 Inhibition process of chlorite on quartz overgrowth (modified after Ma Pengjie et al. , 2017&)

实作用对致密砂岩储层带来的不利影响。

不同盆地的统计数据进一步验证了绿泥石缓解压实的效果(表3),绿泥石发育的砂岩压实孔隙损失率普遍低于18%,较无绿泥石砂岩降低40%左右,且这一效果在中深层储层中更为显著——例如四川盆地须家河组埋深4000 m处,含绿泥石砂岩的孔隙度仍能保持8%~10%,而无绿泥石砂岩孔隙度仅为3%~5%(朱如凯等,2025)。

### 3.1.3 抑制石英次生加大

研究发现,含绿泥石砂岩的石英胶结物含量显

著低于无绿泥石砂岩。连续的颗粒包膜与孔隙衬里绿泥石可作为物理屏障,阻止硅质流体与颗粒表面直接接触,同时阻止石英颗粒发生次生加大(图9)。国内外对于绿泥石抑制石英次生加大的作用机制研究已识别出至少四种核心机理:①抑制压溶:绿泥石包膜可有效抑制石英颗粒间的压溶作用,进而减少硅质的来源供给(孙全力等,2012);②颗粒表面隔离:绿泥石包膜覆盖颗粒表面,阻断了孔隙水与石英颗粒的直接接触,从而阻碍自生石英在颗粒表面的成核过程(王猛等,2017;黄思静等,2004);③占据

表3 不同盆地所含绿泥石含量及对孔隙保存的影响

Table 3 The chlorite content in different basins and its impact on pore preservation

盆地/地层	绿泥石类型	绿泥石含量(%)	压实孔隙损失率(%)	无绿泥石砂岩孔隙损失率(%)	孔隙保存提升幅度(%)	数据来源
鄂尔多斯延长组长8段	孔隙衬里绿泥石	3~8	12~15	25~28	40~45	Zhang Xia et al. , 2012
四川须家河组二段	颗粒包膜绿泥石	5~10	10~13	22~25	45~50	Sun Zhixue et al. , 2014
准噶尔玛湖下乌尔禾组	孔隙衬里、包膜绿泥石	4~9	14~17	27~30	40~43	晏奇等,2020
松辽长岭断陷营城组	孔隙衬里绿泥石	2~6	15~18	26~29	35~38	Zhang Junfeng et al. , 2023

加大核心:颗粒包膜绿泥石发育可以占据颗粒表面成核位点,  $\text{SiO}_2$  石英因缺少自生加大结晶核心而析出迟滞 (Billault et al., 2003; 丁晓琪等, 2010); ④流体化学调控:绿泥石层间氢氧化物八面体可调控孔隙流体 pH 值, 在石英颗粒附近形成局部碱性环境。此环境促进石英溶解, 间接抑制了其次生加大 (田建锋等, 2008b; Ajdukiewicz et al., 2012)。在四川盆地须家河组中的适宜厚度 ( $>7 \mu\text{m}$ ) 的自生孔隙衬里绿泥石, 它能促进孔隙水与矿物颗粒发生反应, 为后期溶蚀作用的进行提供保障, 同时还可缓冲孔隙流体 pH 值的浮动, 使石英颗粒表面乃至整个孔隙流体维持碱性状态, 也能抑制石英次生加大 (Sun Zhixue et al., 2014)。

### 3.2 破坏性作用

绿泥石对储层的破坏性作用体现在多方面, 且与产状、含量密切相关。在早—中成岩阶段胶结作用显著, 连续性差的颗粒包膜绿泥石会导致局部石英加大, 降低连通性, 致使储层致密化严重, 导致渗流能力差 (Zhao Chengjin et al., 2022; Jia Fanjian et al., 2024), 方解石也会在孔隙衬里绿泥石缺失处发育, 减少 3%~7% 孔隙。低能辫状河道及含泥砾河道中, 孔隙衬里绿泥石覆盖度低, 常与压实作用叠加, 孔隙度和渗透率显著劣于高能环境储层 (Lin Jianli et al., 2023)。当孔隙中的绿泥石过厚 ( $>10 \mu\text{m}$ ) 时, 孔隙边缘的绿泥石缩小喉道半径, 增加流体渗流阻力, 而且厚层的孔隙充填与孔隙衬里绿泥石能形成“隔层”, 阻碍流体扩散, 流体滞留现象显著 (Liang Qingshao et al., 2024)。

绿泥石酸敏性强, 在酸化压裂等开发作业中, 酸性流体易使其溶蚀并析出铁镁离子, 这些离子与流体中其他成分反应形成氢氧化物、碳酸盐沉淀, 快速堵塞喉道, 导致储层渗透率短期内急剧下降 (Worden et al., 2020)。这种二次伤害会加剧致密储层的开发难度, 且修复成本较高。此外, 绿泥石也可使得岩石力学弱化, 富绿泥石岩屑易发生塑性变形, 形成假基质填充孔喉, 破坏储层原生渗流通道, 导致渗透率持续降低 (Worden et al., 2020), 这种力学弱化还会影响储层抗压能力, 增加开发过程中储层坍塌的风险; 过度发育的绿泥石加剧储层的非均质性, 晚期孔隙充填绿泥石在残余孔隙中密集生长占据孔隙空间, 分布不均导致孔隙结构复杂化, 降低孔喉连通与渗透率, 退汞效率降低 15%~20% (Zhang Xia et al., 2012)。同时, 绿泥石与伊利石、高岭石等黏土矿物混合发育时, 会产生协同劣化效

应, 会叠加破坏性影响, 如伊利石的纤维状生长与绿泥石的孔喉堵塞协同作用, 可使储层渗透率降至  $0.1 \times 10^6 \mu\text{m}^2$  以下, 形成超低渗致密带 (李阳等, 2017); 部分绿泥石表面具有亲水性, 其发育会增强储层水锁效应, 使束缚水饱和度升高, 一方面挤占油气赋存空间, 另一方面增加油气渗流阻力 (王忠楠等, 2021)。尤其在孔隙衬里绿泥石过度发育区域, 亲水性表面与喉道狭窄的双重作用, 会显著降低油气开采效率。

有学者认为绿泥石的含量与总孔隙度相关性较弱, 绿泥石并非孔隙保存的直接原因, 而是高能沉积环境的伴生产物。原生孔隙丰富促使孔隙水流通性好, 抑制胶结物沉淀, 间接保留孔隙。绿泥石本身不具备保护孔隙或提升渗透率的能力, 高质量储层源于原始沉积的高孔隙基数, 而非绿泥石的成岩改造作用, 但厚层绿泥石却能堵塞喉道, 对渗透率产生负面影响 (Xiang Fang et al., 2016)。石英胶结抑制作用存疑, 绿泥石晶体间微孔允许石英微晶生长, 仅早期黏土前驱体可短暂阻止石英成核, 后期碱性环境抑制硅质沉淀才是主因。绿泥石堵塞孔喉, 其含量与渗透率呈负相关, 当绿泥石含量较高 ( $>10\%$ ) 时, 由于粒间孔加了一层绿泥石薄膜, 减少了孔隙的有效半径, 特别是对孔隙喉道的影响更大, 常常引起孔隙喉道的堵塞。当绿泥石总含量  $>25\%$  时, 储层物性急剧恶化, 绿泥石过度发育导致孔隙度和渗透率显著下降, 高含量区渗透率可降至  $0.1 \times 10^6 \mu\text{m}^2$  以下 (李阳等, 2017)。

### 3.3 绿泥石对储集物性影响的主控因素

#### 3.3.1 绿泥石的含量、包膜的厚度及连续性

绿泥石对残余原生粒间孔隙的保护, 需满足形成于早成岩阶段且具备一定厚度与含量的条件 (蒋裕强等, 2013)。在致密储层的成岩作用研究中, 绿泥石的含量及其包膜的形态特征 (厚度与连续性) 是调控储层物性的关键变量, 其与孔隙度、渗透率的动态关联贯穿于成岩演化的全过程。早期学者研究发现, 当绿泥石含量处于 3%~8% 的区间时, 储层孔隙度通常能保持较高水平, 呈现显著的正相关关系, 适量的绿泥石可通过在颗粒表面形成保护膜, 抵御机械压实对原生孔隙的压缩, 减少胶结物对孔喉的充填, 从而为油气储集保留充足空间。但当含量超过 10% 时, 这种正相关性会逐渐减弱, 过量的绿泥石晶体可能在孔隙内形成杂乱堆积, 反而成为物性的阻碍因素 (瞿建华等, 2017); 颗粒表面包膜绿泥石的形态差对孔隙保存的制约更为直接。当包膜厚

度适中,既能抑制石英次生加大,又不会过度挤占粒间孔隙;若厚度较薄,包膜如同不完整的“铠甲”,石英晶体可沿未被覆盖的颗粒边缘持续生长,导致粒间孔隙在成岩晚期被压缩;而当厚度较厚时,绿泥石自身的晶体生长会向孔隙中心延伸,减小孔喉半径,渗透率随之下降一个数量级以上,严重损害储层的渗流能力;连续性则是包膜发挥保护作用的前提条件。当包膜连续性达到80%以上时,能形成环绕颗粒的封闭屏障,即使在强胶结成岩环境下,仍可保留大量的原生粒间孔;若连续性较差,包膜呈现“岛状”分布,未被覆盖的颗粒表面成为石英次生加大的突破口,硅质胶结物会以这些区域为中心向外围扩散,最终使孔隙呈现“蜂窝状”劣化(杨永剑等,2019;娄敏等,2021)。

### 3.3.2 颗粒粒度的影响

绿泥石在致密砂岩储层中的含量与砂岩的粒度呈正相关,中—粗砂岩中绿泥石的含量大多在35%~84%,细砂岩中的绿泥石平均含量20%~25%,粉砂岩中仅不足10%(Chen Shaoyun et al., 2014)。受流体动力控制,粒径太大的砾石在分选不好的砂岩中接触关系复杂且表面积大,砾石以滚动方式运移,绿泥石难以覆盖孔隙颗粒表面,形成的少量绿泥石分布分散且较薄,无法形成有效的储集空间(图10a);在强水动力环境中的中—粗粒砂岩,颗粒以跳跃式搬运为主,表面速度差和压力差促使黏土颗粒均匀吸附,形成连续的包膜(覆盖率>80%)(图10b),可抑制石英次生加大,有效保护粒间孔隙;而在弱水动力环境的细粒含砾砂岩,颗粒滚动或悬浮搬运,绿泥石吸附不充分,导致其不连续或充填孔隙(Jia Fanjian et al., 2024)(图10c)。此外,相较于细颗粒,中颗粒的比表面积更小,其表面形成完整包膜所需的绿泥石量更少,这一特性使其对石英次生加大的抑制作用更为显著,故中—粗颗粒主导的储集层通常展现出更优的物性(陈国松等,2021;祁利祺等,2023)。

### 3.3.3 岩屑组分类型及含量

在致密储层的成岩演化过程中,岩屑的组分特征是调控绿泥石包膜发育的核心地质因素,其中富含铁镁质的中基性火山岩岩屑扮演着关键物源供给者的角色(Li Wenhuan et al., 2024)。这类岩屑因含有较高比例的辉石、斜长石等铁镁硅酸盐矿物,在成岩流体的作用下易发生溶蚀水解反应,岩石颗粒表面首先在酸性流体的侵蚀下产生微裂隙,随后晶格中的 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 等离子逐步释放并进入孔隙流体,

为绿泥石晶体的成核与生长提供了必要的物质基础。相比之下,石英岩屑、泥质岩屑等其他类型岩屑因铁镁元素含量匮乏,即便发生溶蚀也难以满足绿泥石包膜形成的物源需求(Dou Wenchao et al., 2023)。

朱如凯等(2009)通过对我国多个含油气盆地致密砂岩储层的统计分析发现,当砂岩中火成岩岩屑含量高于17%时,孔隙流体中 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 的浓度可维持在较高的水平,此时绿泥石包膜的厚度可达5~15  $\mu m$ ,且在碎屑颗粒表面的覆盖率超过60%,能有效减轻后期压实作用对原生孔隙的破坏;而当火成岩岩屑含量低于10%时,绿泥石包膜多呈不连续分布,厚度不足3  $\mu m$ ,对储层孔隙的保护作用显著减弱。只有当铁镁质岩屑的溶蚀速率超过绿泥石沉淀的消耗速率时,才能为包膜的持续发育提供稳定的物质保障,进而通过改善储层的孔喉结构提升其渗透性能。

### 3.3.4 孔隙流体

孔隙流体的化学性质尤其是碱性环境的持续时长,与绿泥石的形成时间存在明显的正相关关系。当孔隙流体长期维持稳定的碱性环境时,会为绿泥石晶体的成核与生长提供充足的化学动力,促使绿泥石更早在储层孔隙中沉淀形成。这种早期形成的绿泥石能够优先附着于碎屑颗粒表面,形成一层致密的保护膜,有效阻挡了后期石英次生加大,从而显著削弱了石英晶体过度生长对孔隙空间的挤占。因此,相较于晚期形成的绿泥石,早期形成的绿泥石对储层原始孔隙的保存效果更为突出,使得储层能够保留更高的孔隙度;同时,由于孔隙连通性未被石英次生加大严重破坏,储层的渗透率也通常维持在相对较高的水平(Zhou Qianshan et al., 2020)。

所以早期在含火山岩屑多的强水动力河道中的中—粗砂体有利于绿泥石发育较好的连续性,当孔隙衬里绿泥石厚度小于6.7  $\mu m$ 时,孔隙度与绿泥石含量呈正相关,渗透率最佳,太薄(<3  $\mu m$ )无法有效抑制胶结,太厚(>6.7  $\mu m$ )则堵塞孔喉(Li Ke et al., 2021)。

## 4 油气充注与吸附特征

### 4.1 油气充注的通道特征与动力条件

绿泥石的产状、结构属性及成岩演化过程,共同构成了油气充注的核心地质条件,其对油气充注通道的控制作用具有显著的差异性。从物质基础来看,绿泥石的形成与分布为油气充注提供了重要前

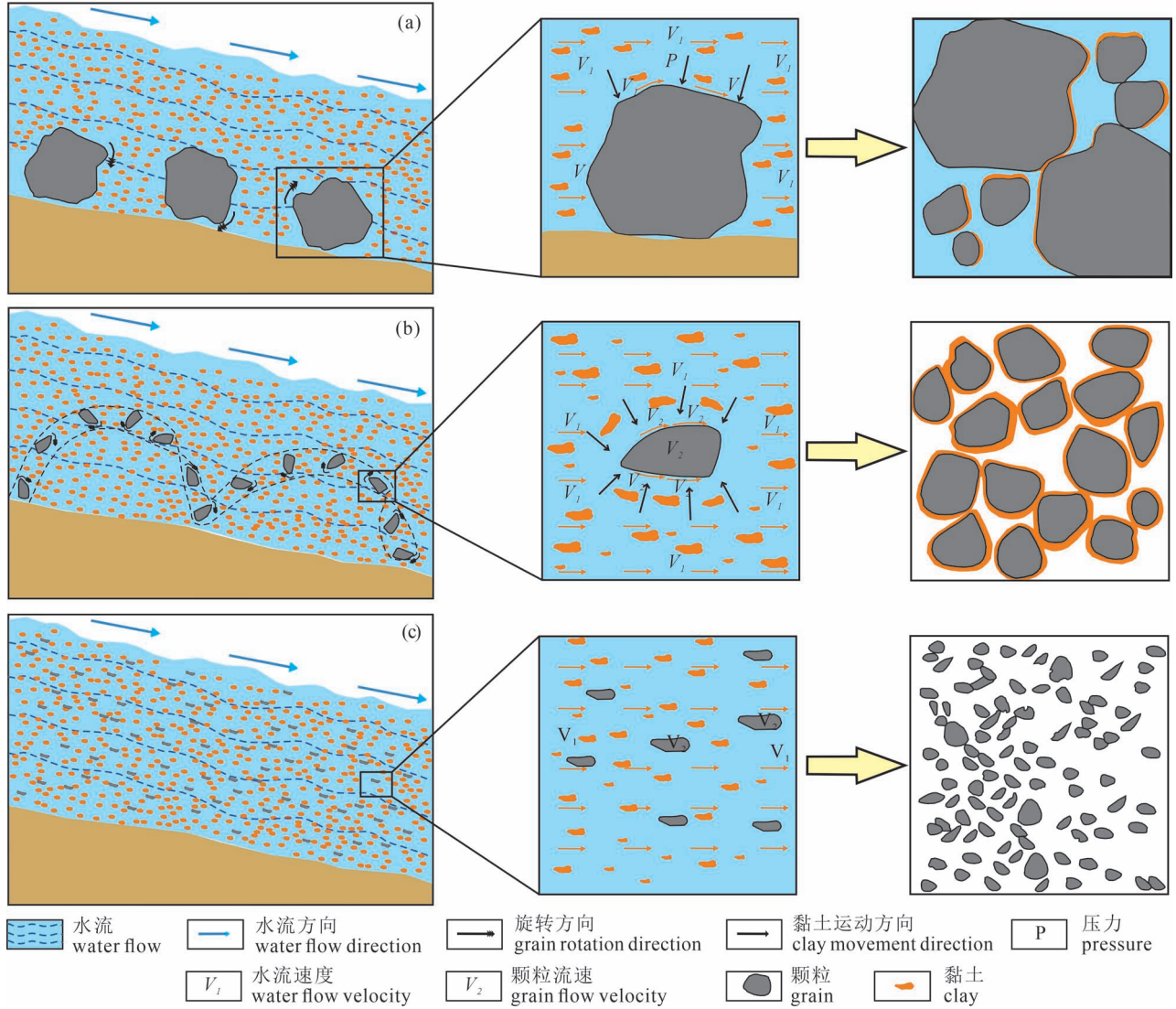


图 10 含砾砂岩中颗粒包膜绿泥石成因示意图(a)、中粒砂岩中颗粒包膜绿泥石成因示意图(b)和细粒至粉砂岩中孔隙充填绿泥石成因示意图(c) (据 Jia Fanjian et al., 2024 修改)

Fig. 10 Schematic diagram of the genesis of grain-coating chlorite in pebbly sandstone (a), grain-coating chlorite in medium-grained sandstone (b), and pore-filling chlorite in fine-grained to siltstone (c) (modified after Jia Fanjian et al., 2024)

提。研究表明,在弱碱性流体环境中形成的孔隙衬里绿泥石,其晶体天然发育大量纳米级晶间孔,连通率可达 60%~75%,这些晶间孔与残余粒间孔共同构成了油气充注的微观通道网络。此外,早成岩阶段形成的颗粒包膜绿泥石能够保留的砂岩中的原生粒间孔隙,通过增强岩石抗压实能力,与晶间孔共同构成“原生孔—晶间孔”复合通道系统,成为早期油气充注的主要储集场所。孔隙衬里绿泥石发育区的孔隙结构呈“大孔细喉”特征,细喉道降低毛管阻力,使得与其他黏土矿物区相比较,较大的原生粒间孔、溶蚀孔等提供油气暂存空间,适配致密储层低渗条件下的油气运移需求,成为中晚期油气侧向运

移的主要路径(吉利明等,2014;黄有根等,2024)。

油气充注的动力机制与绿泥石形成的水—岩反应密切相关。长石高岭石化及高岭石绿泥石化过程中,反应消耗孔隙水并伴随矿物体积缩减,使储层内部产生负压;同时烃源岩生烃形成的高压与储层负压形成“压—吸”动力,显著提升油气向绿泥石发育区的充注效率。绿泥石晶间孔的高连通性降低油气运移阻力,酸性溶蚀流体通过晶间孔溶蚀长石、岩屑形成次生溶孔,进一步拓宽充注通道,提升充注效率。实验证实,当绿泥石以孔隙衬里形式发育时,其晶间孔喉半径多集中于 5~50 nm,毛管阻力较其他黏土矿物发育区降低 30%~40%,更利于油气突破

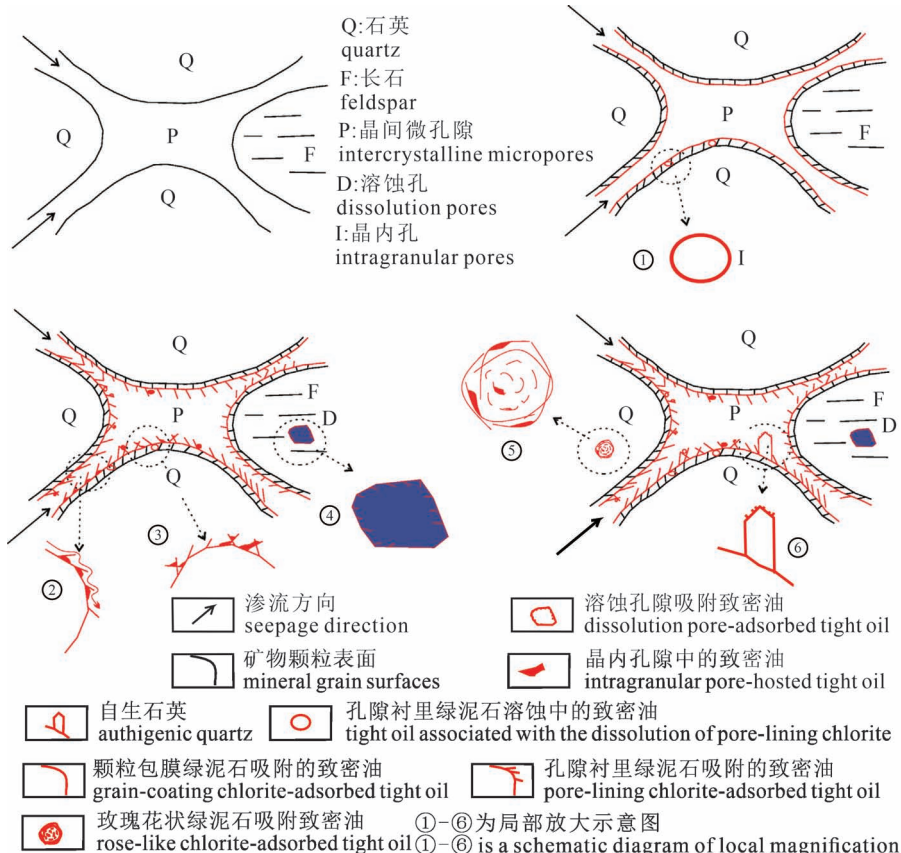


图 11 自生绿泥石对烃类充注过程中致密油微观赋存的过程

(据 Zhou Qianshan et al., 2021 修改)

Fig. 11 Process of authigenic chlorite on the microscopic occurrence of tight oil during hydrocarbon charging (modified after Zhou Qianshan et al., 2021)

致密储层的充注阈值(辛红刚等,2025)。

进一步拓宽充注通道,提升充注效率。实验证实,当绿泥石以孔隙衬里形式发育时,其晶间孔喉半径多集中于5~50 nm,毛管阻力较其他黏土矿物发育区降低30%~40%,更利于油气突破致密储层的充注阈值(辛红刚等,2025)。

#### 4.2 油气充注过程与绿泥石成岩时序的关系

油气充注与绿泥石的成岩演化存在严格的时序匹配关系,根据鄂尔多斯盆地区的埋热演化历史,该地区延长组的排烃过程主要发生在三叠世末至早侏罗世末期(210~175 Ma),共出现三个主要的含烃流体阶段:三叠世末至早侏罗世末期、中侏罗世末期至早白垩世末期、从晚白垩纪末期到早古近纪末期。原始粒间孔隙在同沉积阶段发育良好,孔隙流体在相连的孔隙内平稳流动,随着孔隙流体性质的变化,原来的晶间孔隙不断重组和缩小,颗粒包膜绿泥石从同沉积阶段开始析出(罗静兰等,2006;郭凯等,

2013)。前期形成颗粒包膜绿泥石后,早期低熟致密的油未填满孔隙和喉道,这一时期储集空间具有更好的连通性,致密油以薄膜的形式被吸收到颗粒包膜绿泥石的表面,这种吸附的致密油主要具有低成熟度并表现出强吸附粘性作用,可实现多层吸附并减小孔隙和喉道的大小,同时也增加了后期流体流动的粘性阻力;在形成孔隙衬里绿泥石形成的第二阶段,发生了中期大量的烃类填充,致密油主要以薄膜形式在孔隙衬里绿泥石的表面及其晶间孔隙中形成,并以孤立或团聚形式富集,孔隙衬里绿泥石的吸附能力与孔喉连通性呈正相关,表明储层物性影响吸附效率。在此期间,有机质的演化处于低成熟到成熟阶段,是烃源岩和储层系统有机-无机反应最活跃的时期,许多有机和无机酸性流体形成,溶解了砂岩中存在的不稳定的长石、黏土矿物和早期碳酸盐胶结物,导致次

生孔隙的形成。致密油随着埋藏深度、温度和压力条件的增加以及有机酸的不断消耗,意味着大量的黏土矿物脱水,不稳定的矿物溶解发生离子交换过程,释放出许多碱性阳离子( $K^+$ 、 $Na^+$ ),这增加了孔隙的pH值,并逐渐将成岩环境转变为碱性环境。孔隙衬里绿泥石的发育进一步促进了矿物表面的不规则性,扩大了比表面积,导致局部吸附势能显著增加,对矿物与致密油之间的吸附起到了积极的作用,在此过程中,随着绿泥石的不断生长,孔隙水围绕颗粒边缘流动,发生局部湍流,增加了抗渗性,并且很容易形成特定或团聚的致密油颗粒形式,这些颗粒在孔隙衬里绿泥石层状晶体中以与流体流动相反的方向积累,因此阻塞了流体在晶间孔隙中的流动,团聚颗粒形式的致密油出现在晶间孔隙中;到了晚期充注阶段,随着的玫瑰花状的孔隙充填绿泥石的形成,吸附能力较弱,此时自生绿泥石的比表面积较高,但由于这一阶段产生的致密油量极小,并且自生

绿泥石的含量有限,仅见孤立状致密油以团聚颗粒形式出现在晶间孔隙等区域(图11)。

值得注意的是,油气充注并非终止绿泥石生长的决定性因素。研究发现,油气充注虽驱替了大部分可流动孔隙水,但颗粒束缚水可通过扩散作用持续为绿泥石生长提供介质,导致部分绿泥石在充注后仍能继续沉淀,这种“后充注生长”现象会进一步优化晶间孔的储集性能。

### 4.3 油气充注与吸附的控制机制

油气充注过程与绿泥石特征的匹配性,直接决定了油气的赋存状态与富集程度,多项模拟实验结果为其提供了证据。核心机制体现在以下3个方面:①调控绿泥石的吸附容量:绿泥石的比表面积与表面电荷特性是吸附油气的基础,而油气充注通过“动力强化吸附”效应提升储集能力。孔隙衬里绿泥石从颗粒边缘到孔隙中心,表面吸附活性位点密度增加,在充注期的高压驱动下,油气分子更易突破能垒并附着于这些活性位点。高温高压物理模拟实验表明,针对不同成熟度油气的模拟显示,当充注压力适应于绿泥石晶间孔喉半径时,油气吸附容量较无绿泥石储层提升30%~50%,且孔隙衬里绿泥石晶间孔的吸附强度显著高于其他赋存形态(Zhou Qianshan et al., 2021; 辛红刚等, 2025);②影响不同的油气赋存状态。致密储层的低孔低渗特性限制了游离油气的大规模聚集,油气充注过程形成了以“薄膜为主、孤立富集为辅”的赋存模式。在充注初期,油气以小油滴形态沿绿泥石晶间孔运移,受孔喉限制无法合并为大油滴。随着充注持续,油气分子在范德华力作用下逐渐铺展于绿泥石表面,形成厚度2~10 nm的连续薄膜。当充注强度超过吸附饱和和阈值时,多余油气在晶间孔连通处形成孤立状富集体,其规模通常不超过5 μm,且被薄膜油气包裹。分子动力学模拟通过追踪油气分子在绿泥石表面的运移轨迹发现,在充注初期压力较小时,印证了油气分子以单分子层吸附为主,随着压力升高逐渐铺展形成连续薄膜,油膜厚度与模拟充注量呈正相关,当压力超过30 MPa时,晶间孔连通处出现孤立油滴聚集,与上述理论推导一致(王忠楠等, 2021; Fares Azzam et al., 2024);③对储层保存的协同作用。油气充注与绿泥石发育形成“双重保护”效应,显著提升油气保存效率。一方面,绿泥石通过抑制石英次生加大和压溶作用,减少孔隙损耗,为油气提供稳定储集空间。另一方面,充注的油气可占据孔隙空间,降低孔隙水活动强度,进而抑制晚期碳酸盐胶结物

沉淀,这种充注抑制胶结效应与绿泥石的孔隙保护作用形成协同,有效延缓储层致密化进程(邵晓州等, 2023; 辛红刚等, 2025)

绿泥石的吸附能力与绿泥石类型有关,绿泥石包膜与颗粒间的微缝隙为后期溶蚀提供流体通道,形成溶蚀通道,促进次生孔隙形成,油气在此吸附聚集,孔隙衬里绿泥石晶间孔的高比表面积能显著增强吸附势能(Azzam et al., 2024)。烃类充注过程会显著改变孔隙衬里绿泥石的生长形态,一方面,烃类充注会阻碍储层局部区域绿泥石包膜的持续生长;另一方面,它还会影响绿泥石的晶体形态:在颗粒接触点附近的孔隙中,受束缚水膜影响,孔隙衬里绿泥石倾向于呈现放射状持续生长,而在与烃类直接接触的颗粒表面,其形态则多表现为平坦的网状结构(马鹏杰等, 2017)。吸附能力排序为:孔隙衬里绿泥石晶间孔>孔隙充填绿泥石表面>长石溶蚀孔绿泥石表面>孔隙衬里绿泥石表面>颗粒包膜绿泥石晶间孔>颗粒包膜绿泥石表面(Zhou Qianshan et al., 2021; 王忠楠等, 2021)。

### 4.4 油气充注量的作用

油气充注量通过与绿泥石特征的匹配程度,直接影响油气赋存状态与储层含油气性,充注量与绿泥石孔隙容量不匹配时,均会导致含油气性下降。

油气充注量决定着油气赋存形态、绿泥石成岩演化与储层保存。充注量不足时:油气难以填满绿泥石晶间孔与原生孔隙,主要以薄膜形式吸附于绿泥石表面,受绿泥石吸附势能束缚,难以形成可动油气聚集。孔隙水未被油气驱替,绿泥石可能持续生长,过度生长的绿泥石会堵塞喉道,降低储层渗流能力;同时孔隙水活跃易引发石英次生加大,挤占油气赋存空间。不足则油气赋存分散,难以形成工业产能;充注量适中时:油气在绿泥石晶间孔、原生孔隙中形成薄膜与孤立颗粒混合赋存模式,既依托绿泥石表面吸附稳定赋存,又在孔隙连通处形成小规模富集体,含油气性最佳。油气占据绿泥石发育区的孔隙空间,降低孔隙水活动强度,抑制晚期方解石胶结物沉淀,与绿泥石的孔隙保护作用形成协同,延缓储层致密化,延长油气保存周期;充注量过量时:超出绿泥石孔隙与吸附容量的油气,会在通道内滞留并可能引发次生胶结,反而堵塞绿泥石晶间孔与喉道,破坏充注通道的连通性。

## 5 致密砂岩储层“甜点”预测

强非均质性成为致密砂岩储层含油气性差异的

主要因素,所以,预测相对优质的“甜点”储层,关键在于识别那些能有效促进油气充注、提供充足存储空间并利于烃类吸附滞留的地质条件(Duan Dongping et al., 2022),要成为相对优质“甜点”储层必须有以下两个条件:①绿泥石厚度适中且分布完整连续;②优质的绿泥石类型和沉积微相(孙全力等,2012)。

### 5.1 绿泥石的厚度与连续性

绿泥石的厚度与连续性是储层质量的决定性因素。统计表明,绿泥石适度发育(含量3%~10%,覆盖率80%~90%,厚度5~8  $\mu\text{m}$ )时孔隙保护最佳,过度或不足均导致储层劣化(杨巍等,2012)。绿泥石总含量3%~10%时,孔隙保存与渗流能力平衡最佳;含量>10%时,孔隙堵塞致使储层致密化。当孔隙中绿泥石的厚度处于5~8  $\mu\text{m}$ 范围时,对孔隙的保存能起到积极效果,如果厚度超过8  $\mu\text{m}$ 就会严重阻塞孔隙喉道,使储层物性下降,阻碍油气充注。绿泥石包膜的完整性(而非仅含量)是抑制石英胶结的核心因素,强水动力条件(如水下分流河道)形成的中粗粒砂岩,因颗粒以跳跃式搬运为主,黏土吸附均匀,包封率高(>80%),对应储层孔隙度较高。含量是基础,需大于5%,连续性包封率大于80%是关键,两者缺一不可,由此能有效抑制胶结、保护孔隙,为后期油气充注创造有利空间,形成优质储层。低含量或低包封率储层的石英胶结强烈,使得储层致密化严重,属于劣质储层(周晓峰等,2017a, 2017b)。

### 5.2 绿泥石类型与分布

绿泥石类型与分布是储层非均质性的关键控制因素,薄而连续的孔隙衬里绿泥石为有利成岩标志,它在颗粒表面形成有效屏障抑制石英胶结,保护孔隙空间,利于油气充注进行,同时其较大的比表面积可增强对烃类尤其重质组分的吸附能力。孔隙充填绿泥石为不利因素,它会直接占据孔隙空间,堵塞孔隙,严重降低渗透率,阻碍油气充注。优先选择火山岩屑含量高、早期孔隙衬里绿泥石发育(厚度>5  $\mu\text{m}$ )、孔隙充填绿泥石少的层段(Zhang Junfeng et al., 2023)。储层质量与绿泥石厚度、含量呈“单峰型”关系,存在最佳阈值。埋藏深度与热演化程度控制胶结物类型,高温(>100 $^{\circ}\text{C}$ )易形成绿泥石,所以寻找“甜点”储层就是寻找薄衬里与中等热演化区域,避免高孔隙充填绿泥石的致密区域,后者严重阻碍储层的含油气性(Molenaar et al., 2021)。

### 5.3 沉积环境

沉积环境决定碎屑结构与黏土前驱体分布,绿泥石形成、石英胶结等成岩过程进一步改造孔隙。优质储层的控制因素为高结构成熟度,包括:颗粒粗、分选好、基质少、初始孔隙度高、抗压实能力强等特点。在 高能辫状河道因碎屑颗粒粗、泥质含量低,机械压实弱,高能环境通过“沉积保存、成岩保护”双重机制维持优质储层,颗粒包膜与孔隙衬里绿泥石覆盖度高,有效阻止石英胶结并保留原生孔隙,提供油气赋存空间,并维持较好的孔喉连通性,保障了油气充注效率。低能环境的细粒沉积物与高泥质含量导致压实强烈,孔隙连通性差,因压实与胶结叠加导致储层劣化,油气充注困难(Lin Jianli et al., 2023)。

高含油气带多发育于潮汐—河流混合作用的河道砂体,在石英胶结弱、溶蚀孔发育(长石溶蚀率>10%)的中粗砂岩层段,对应辫状河三角洲前缘河道微相和强水动力的水下分流河道微相,颗粒包膜绿泥石发育,为油气充注和存储提供优越空间。低渗带发育在纯潮汐河道或高河流输入的砂体,孔隙充填绿泥石堵塞喉道,不利于油气充注。

优质储层也发育于中等河流影响的潮汐—三角洲环境,需结合岩相(如交错层理、生物扰动)和绿泥石的形态预测“甜点”区,避免纯潮汐或高浊度带的致密储层(Griffiths et al., 2021)。粗颗粒孔隙连通性好,利于酸性流体渗透,为油气充注提供通道,同时也能促进长石、岩屑溶蚀形成次生孔隙,在溶蚀孔发育带叠加晚期玫瑰花状绿泥石,可形成“吸附型甜点”,不仅能富集游离油气,还可能显著增强对烃类的吸附能力(Zhang Xia et al., 2012; Zhou Qianshan et al., 2020)。

部分学者认为,把储层中形成的异常高孔带完全归因于绿泥石的发育并不恰当(姚涇利等,2011; 田建锋等,2014),绿泥石包膜优先形成于粒度较粗、分选优良且胶结作用弱的部分(杨烁等,2020)。但不可否认的是,绿泥石(尤其是孔隙衬里型绿泥石)适度发育的储层,通常具有更好的孔隙保存能力和潜在的烃类吸附界面,与相对优质的含油气储层存在显著的正相关关系,利于油气充注富集。无论是绿泥石对储层物性起到保护作用,还是物性好的储层中绿泥石更易发育,绿泥石发育的储层与相对高含油气的储层之间都存在密切关联,都能指示和预测储层的含油气性优劣,进而为有利储层的预测提供依据。颗粒包膜与孔隙衬里绿泥石的双刃剑

效应需通过含量和分布评估,高能沉积环境、富铁镁物源、适度埋藏(<4000 m)的砂岩更易发育有利绿泥石组合。结合测井响应(高中子、低电阻)可识别“高孔低渗”储层甜点(黄鑫等,2021)。“甜点”预测需聚焦于绿泥石含量适中(保障渗流与充注)、溶蚀作用强(提供次生空间)的区域,并紧密结合沉积相(控制初始结构与成岩)与断裂带(可能提供油气运移通道或影响成岩)进行综合分析预测。

## 6 未来展望

结合现有研究成果与勘探开发实际需求,未来可围绕成岩演化序列与绿泥石形成的耦合关系等方向深化绿泥石与致密砂岩储层含油气性的相关研究:①成岩演化序列驱动绿泥石形成的量化建模:聚焦不同盆地沉积—成岩背景,以成岩演化序列为框架,量化各阶段关键参数对绿泥石产状、厚度及连续性的耦合控制效应;②成岩演化中绿泥石形成的微观过程解析:利用聚焦离子束扫描电镜、原子力显微镜等先进表征技术,结合分子动力学模拟,追踪绿泥石的动态形成过程。重点揭示早成岩 A 期的黏土前驱体转化机制、早成岩晚期—中成岩早期的溶蚀再结晶路径、中成岩晚期—晚成岩期的矿物转化与流体沉淀耦合机理,以及各阶段绿泥石晶间孔的形成与演变规律,明确序列驱动下绿泥石对流体运移、油气吸附—解吸的微观调控机制;③考虑演化过程中多矿物协同作用与绿泥石的耦合影响:突破单一绿泥石研究视角,基于成岩演化序列,分析绿泥石与石英、方解石、高岭石等矿物的时序协同效应。明确序列中不同矿物组合对储层孔喉结构、力学性质及含油气性的综合影响,完善致密砂岩储层质量评价体系;④油气充注与成岩—绿泥石演化序列的动态耦合模拟:针对不同成熟度油气,通过高温高压物理模拟实验,复刻成岩演化序列与油气多期充注的时空匹配过程。探究不同的形成时序与油气充注期次的适配性,量化不同阶段绿泥石的比表面积与油气吸附容量、吸附强度的定量关系,揭示成岩序列驱动下绿泥石对油气赋存状态的动态调控机制;⑤适配绿泥石发育储层的开发技术研究:针对不同阶段绿泥石的发育特征,研究其对储层力学性质的差异化影响。结合绿泥石与其他矿物的耦合关系,提出分阶段、针对性的储层改造方案,降低开发成本。

## 7 结论

(1)致密砂岩储层中的绿泥石有 3 种不同的产

状类型:颗粒包膜式、孔隙衬里式和孔隙充填式;颗粒包膜绿泥石由先驱黏土矿物转化、碎屑物的交代和孔隙流体沉淀 3 种作用在不同条件下所形成,孔隙衬里绿泥石的成因包括沉积黏土膜转化、富铁镁物质溶蚀再结晶和转化与直接结晶混合,孔隙充填绿泥石是从富镁铁孔隙水中沉淀和蒙脱石与伊利石转化而成。成岩演化顺序依次为机械压实→颗粒包膜绿泥石(Ch1)→溶蚀作用→孔隙衬里绿泥石(Ch2)、石英加大→孔隙充填绿泥石(Ch3)→方解石胶结。

(2)不同成岩阶段形成的绿泥石对储层具有双重影响。其建设性作用主要包括增强岩石抗压强度、抑制压溶作用、促进溶蚀作用以及限制石英次生加大;破坏性作用则表现为堵塞喉道、降低储层渗透率等。建设性与破坏性作用的平衡取决于绿泥石产状、含量及时空分布。

(3)比表面积和局部势能决定油气赋存状态,绿泥石类型与孔隙连通性影响吸附效率;致密油主要以薄膜形式在绿泥石衬里的表面及其晶间孔隙中形成,并以孤立或团聚形式富集,不同成岩期绿泥石对油气吸附能力不同,吸附能力排序为:孔隙衬里绿泥石晶间孔>孔隙充填绿泥石表面>长石溶蚀孔绿泥石表面>孔隙衬里绿泥石表面>颗粒包膜绿泥石晶间孔>颗粒包膜绿泥石表面。

(4)绿泥石厚度适中且分布完整以及高能的水动力环境都是发育致密砂岩储层“甜点”的有利因素;早期形成薄而连续的孔隙衬里绿泥石为有利成岩标志,孔隙充填绿泥石为不利因素,优先选择早期孔隙衬里绿泥石发育、孔隙充填绿泥石少的中粗粒砂岩层段;“甜点”区主要分布于绿泥石含量适中、溶蚀作用强的区域,优选需综合绿泥石演化阶段、沉积相类型与油气吸附关系综合预测。

## 参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 陈春发,戴朝成. 2023. 四川盆地川中地区上三叠统须家河组绿泥石胶结相储层特征. 化工矿产地质, 45(1): 24~30.
- 陈国松, 孟元林, 邹金来, 戴天骄, 肖丽华, 周武. 2021. 自生绿泥石对储集层质量影响的定量评价:以北部湾盆地涠西南凹陷涠洲组三段为例. 古地理学报, 23(3): 639~650.
- 陈树跃, 龙海骥. 1983. 砂岩储层中粘土矿物对储渗特性的影响. 大庆石油地质与开发, 2(3): 195~203.
- 陈旋, 贾雪丽, 王波, 刘俊田, 鲁宽, 武超, 田琳, 姚宗森. 2024. 吐哈盆地丘东洼陷深层致密砂岩油气富集主控因素. 中国海上油气, 36(6): 26~38.

- 戴金星,董大忠,倪云燕,龚德瑜,黄士鹏,洪峰,张延玲,刘全有,吴小奇,冯子齐. 2024. 致密砂岩气藏与页岩气藏展布模式. 石油勘探与开发, 51(4): 667~678.
- 丁晓琪,张哨楠,葛鹏莉,万友利. 2010. 鄂南延长组绿泥石环边与储集性能关系研究. 高校地质学报, 16(2): 247~254.
- 杜清. 2011. 致密砂岩油气藏特征研究. 西部探矿工程, 23(7): 37~38+42.
- 郭凯,曾灏辉,刘涛涛,雷新. 2013. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组含油气流体活动期次与石油充注史. 现代地质, 27(2): 382~388.
- 郭迎春,庞雄奇,陈冬霞,姜福杰,汤国民. 2013. 致密砂岩气成藏研究进展及值得关注的几个问题. 石油与天然气地质, 34(6): 717~724.
- 胡作维,李云,黄思静,成欣怡,黄阳. 2012. 颗粒包膜在深埋藏砂岩储层原生孔隙保存中的意义. 矿物岩石地球化学通报, 31(6): 640~648.
- 黄思静,谢连文,张萌,武文慧,沈立成,刘洁. 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. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(3): 273~281.
- 黄苏卫,张传运,刘峰. 2018. 西湖凹陷Y构造花港组黏土矿物特征及对储层物性的影响. 海洋石油, 38(2): 13~20.
- 黄鑫,段冬平,刘彬彬,李炳颖,丁芳,王伟,姜敏. 2021. 西湖凹陷花港组绿泥石成因及其对储层物性的影响. 吉林大学学报(地球科学版), 51(3): 669~679.
- 黄有根,王晔,路归一,陈存良,吴和源,张芳,冯炎松. 2024. 鄂尔多斯盆地神木气田石千峰组千5段砂体发育规模与储层特征. 西北地质, 57(6): 186~198.
- 吉利明,马向贤,夏燕青,邱军利. 2014. 黏土矿物甲烷吸附性能与微孔隙体积关系. 天然气地球科学, 25(2): 141~152.
- 蒋裕强,张春,邓海波,王猛,罗明生. 2013. 黏土矿物对低渗致密砂岩储层性能的影响. 西南石油大学学报(自然科学版), 35(6): 39~47.
- 兰叶芳,黄思静,吕杰. 2011. 储层砂岩中自生绿泥石对孔隙结构的影响——来自鄂尔多斯盆地上三叠统延长组的研究结果. 地质通报, 30(1): 134~140.
- 李阳,李树同,牟炜卫,闫灿灿. 2017. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长6段致密砂岩中黏土矿物对储层物性的影响. 天然气地球科学, 28(7): 1043~1053.
- 刘定坤,李圣,卿元华. 2019. 自生绿泥石对碎屑岩储层物性影响的研究现状. 西部资源, (2): 55~57.
- 姜敏,杨香华,姚光庆,姜平. 2021. 自生黏土矿物与甜点储层的关系——以涪西南凹陷和文昌A凹陷为例. 中国地质调查, 8(1): 13~23.
- 罗静兰,刘小洪,林潼,张三,李博. 2006. 成岩作用与油气侵位对鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层物性的影响. 地质学报, 80(5): 664~673.
- 马鹏杰,林承焰,张世奇,董春梅,魏孟吉. 2017. 碎屑岩储集层中绿泥石包膜的研究现状. 古地理学报, 19(1): 147~159.
- 牛君,王聪,梁飞. 2025. 绿泥石与浊沸石矿物特征及其对储集层物性的影响——以准噶尔盆地陆梁隆起西部下乌尔禾组为例. 新疆石油地质, 46(1): 13~21.
- 祁利祺,张晓童,张浩宇,陈可欣,梅红婧,于景维. 2023. 阜东斜坡区齐古组自生绿泥石的赋存状态与影响因素. 岩石矿物学杂志, 42(6): 826~837.
- 乔江华. 2019. 碎屑岩中的自生绿泥石及其对储层影响研究. 辽宁化工, 48(2): 143~147.
- 瞿建华,钱海涛,李鹏,尤新才,袁瑞. 2017. 玛湖凹陷百口泉组砾岩自生绿泥石成因及其对储集层物性的影响. 新疆石油地质, 38(5): 519~523.
- 任大忠,周兆华,梁睿翔,周然,柳娜,南郡祥. 2019. 致密砂岩气藏黏土矿物特征及其对储层性质的影响——以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例. 岩性油气藏, 31(4): 42~53.
- 单祥,郭华军,郭旭光,徐洋,曹元婷,李亚哲,王力宝. 2019. 准噶尔盆地中拐地区上乌尔禾组储集层绿泥石膜成因及其对储集层物性的影响. 中国石油大学学报(自然科学版), 43(6): 32~40.
- 邵晓州,李勇,张文选,郭懿萱,赵彦德,张晓磊,齐亚林,楚美娟. 2023. 鄂尔多斯盆地陕北地区长8致密砂岩流体包裹体特征与石油成藏. 中国地质, 50(5): 1299~1310.
- 苏永进,唐跃刚,张世华,房新娜. 2010. 川西坳陷上三叠统天然气成藏主控因素及形成模式. 石油与天然气地质, 31(1): 107~113.
- 孙全力,孙哈森,贾昀,禹建军,罗文军. 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. 石油与天然气地质, 33(5): 751~757.
- 孙治雷,黄思静,张玉修,王庆东,包申旭,孙致学. 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.
- 田建锋,陈振林,凡元芳,李平平,宋立军. 2008a. 砂岩中自生绿泥石的产状、形成机制及其分布规律. 矿物岩石地球化学通报, 27(2): 200~206.
- 田建锋,陈振林,杨友运. 2008b. 自生绿泥石对砂岩储层孔隙的保护机理. 地质科技情报, (4): 49~54.
- 田建锋,刘池洋,王桂成,邱欣卫. 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.
- 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. 吉林大学学报(地球科学版), 44(3): 741~748.
- 王猛,曾明,陈鸿傲,杨刚,徐绩芳,邱海滨,郭红光,王家敏. 2017. 储层致密化影响因素分析与有利成岩相带预测——以马岭油田长8油层组砂岩储层为例. 岩性油气藏, 29(1): 59~70.
- 王清华,金武弟,张荣虎,杨海军,徐振平,杨宪彰,张亮,余朝丰. 2025. 塔里木盆地致密砂岩油气勘探新领域及资源潜力. 石油学报, 46(1): 89~103.
- 王忠楠,罗晓容,刘可禹,范雨辰,王香增. 2021. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组致密砂岩储层绿泥石对润湿性的影响. 中国科学: 地球科学, 51(7): 1123~1134.
- 吴家洋,吕正祥,卿元华,杨家静,金涛. 2020. 致密油储层中自生绿泥石成因及其对物性的影响——以川中东北部沙溪庙组为例. 岩性油气藏, 32(1): 76~85.
- 吴晓智,柳庄小雪,王建,郑民,陈晓明,齐雪峰. 2022. 我国油气资源潜力、分布及重点勘探领域. 地学前缘, 29(6): 146~155.
- 席敏红. 2023. 西湖凹陷中北部绿泥石对储层发育的控制作用. 海洋石油, 43(4): 72~76.
- 谢武仁,杨威,赵香媛,魏国齐,谢增业,金惠,陈刚. 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.
- 辛红刚,李弛,马艳丽,李树同,段有为,邵明,陈俊霖,王伟. 2025. 鄂尔多斯盆地环县地区长82亚段致密储层孔隙演化与油气充注定量耦合关系表征. 天然气地球科学, 36(7): 1194~1207.
- 颜其彬,陈培元,杨辉廷,黄德明,彭小娇. 2013. 川东北普光3011~5井须家河组黏土矿物及胶结物特征. 特种油气藏, 20(3): 8~12+151.
- 晏奇,雷海艳,鲜本忠,王剑,罗正江,杨召,贺静,牛君,蒲强,田荣恒. 2020. 母岩性质对砾岩储层中自生绿泥石发育的影响及

- 油气储层意义——以准噶尔盆地玛湖凹陷玛北地区下乌尔禾组为例. 沉积学报, 38(2): 367~378.
- 杨烁, 王威, 张莉, 罗丁文, 邹华耀. 2020. 元坝—通南巴地区须家河组绿泥石膜胶结相砂岩发育控制因素与分布规律. 地球科学, 45(2): 479~488.
- 杨巍, 陈国俊, 张铭杰, 李程善, 吕成福, 李超. 2012. 鄂尔多斯盆地镇北地区区长8油层组自生绿泥石对储层物性的影响. 岩性油气藏, 24(3): 27~32+38.
- 杨永剑, 叶素娟, 张世华, 南红丽, 杨映涛, 阎丽妮, 蔡李梅, 朱丽. 2019. 深埋藏条件下绿泥石胶结物的地质意义及其对储层孔隙发育的影响探讨——以川西拗陷中段上三叠统须家河组二段为例. 第31届全国天然气学术年会(2019)论文集(01地质勘探). 中国安徽合肥. 中石化西南油气分公司勘探开发研究院: 718~728.
- 姚泾利, 王琪, 张瑞, 李树同. 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.
- 尤源, 梁晓伟, 冯胜斌, 牛小兵, 淡卫东, 李卫成, 王芳. 2019. 鄂尔多斯盆地长7段致密储层主要黏土矿物特征及其地质意义. 天然气地球科学, 30(8): 1233~1241.
- 张年念, 程超, 余逸凡, 鞠颀, 陈波. 2024. 西湖凹陷古近系致密砂岩气“三元耦合控藏”特征. 非常规油气, 11(3): 27~34.
- 钟韬, 曹冰, 刘金水, 高红艳, 刘创新. 2017. 西湖凹陷花港组低孔低渗砂岩储层中绿泥石环边的成因及其意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 44(6): 708~716.
- 周晓峰, 丁黎, 杨卫国, 宋鹏, 于均民. 2017a. 鄂尔多斯盆地延长组长8油层组砂岩中绿泥石膜的生长模式. 岩性油气藏, 29(4): 1~10.
- 周晓峰, 焦淑静, 于均民. 2017b. 鄂尔多斯盆地延长组砂岩中绿泥石膜的赋存状态及成因. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 834~842.
- 周晓峰, 李书恒, 于均民, 温德顺. 2019. 砂岩中绿泥石膜形貌和组成的成岩过程响应: 以鄂尔多斯盆地陇东地区区长8砂岩为例. 地质科技情报, 38(2): 110~116.
- 周晓峰, 王建国, 兰朝利, 代金友. 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.
- 朱平, 黄思静, 李德敏, 刘援朝. 2004. 粘土矿物绿泥石对碎屑储集岩孔隙的保护. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(2): 153~156.
- 朱如凯, 李国欣, 崔景伟, 黄福喜, 鲁雪松, 郭智, 曹正林. 2025. 中国致密油气形成地质条件与勘探前景. 石油学报, 46(1): 17~32.
- 朱如凯, 邹才能, 张甯, 王雪松, 程荣, 刘柳红, 周川闽, 宋丽红. 2009. 致密砂岩气藏储层成岩流体演化与致密成因机理——以四川盆地上三叠统须家河组为例. 中国科学(D辑), (3): 327~339.
- 朱颖, 丁晓琪, 胡鑫. 2017. 龙凤山地区营城组储层绿泥石黏土的形成机制及分布规律. 东北石油大学学报, 41(5): 62~69+7~8.
- 邹才能, 陶士振, 白斌, 杨智, 朱如凯, 侯连华, 袁选俊, 张国生, 吴松涛. 2015. 论非常规油气与常规油气的区别和联系. 中国石油勘探, 20(1): 1~16.
- 邹才能, 张光亚, 陶士振, 胡素云, 李小地, 李建忠, 董大忠, 朱如凯, 袁选俊, 侯连华, 瞿辉, 赵霞, 贾进华, 高晓辉, 郭秋麟, 王岚, 李新景. 2010. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质. 石油勘探与开发, 37(2): 129~145.
- Ajdkiewicz J M, Laresse 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.
- Azzam F, Blaise T, Patrier P, Beaufort D, Barbarand J, Elmola A A, Brigaud B, Portier E, Clerc S. 2024. Impact of sediment provenance and depositional setting on chlorite content in Cretaceous turbiditic sandstones, Norway. Basin Research, 36(3): e12867.
- Billault V, Beaufort D, Baronnet A, Lachapagne J C. 2003. A nanopetrographic and textural study of grain-coating chlorites in sandstone reservoirs. Clay Minerals, 38(3): 315~328.
- Chen Chunfa, Dai Chaocheng. 2023. Characteristics of chlorite cemented face reservoirs in Upper Triassic Xujiahe Formation in central region of Sichuan Basin. Geology of Chemical Minerals, 45(1): 24~30.
- Chen Guosong, Meng Yuanlin, Huan Jinlai, Dai Tianjiao, Xiao Lihua, Zhou Wu. 2021. Quantitative evaluation of impact of authigenic chlorite on reservoir quality: A case study of the Member 3 of Weizhou Formation in Weixinan sag, Beibu Gulf Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(3): 639~650.
- Chen Shaoyun, Yang Yongqiang, Jiang Zaixing, Qiu Longwei, Wang Xiaojuan. 2024. Insights into the formation and growth of authigenic chlorite in sandstone: Analysis of mineralogical and geochemical characteristics from Shaximiao Formation, Sichuan Basin, SW China. Marine and Petroleum Geology, 170: 107112.
- Chen Shuyue, Long Haixiang. 1983. Affect of clay mineral in sandstone reservoir reservoir characteristics. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2(3): 195~203.
- Chen Xuan, Jia Xueli, Wang Bo, Liu Juntian, Lu Kuan, Wu Chao, Tian Lin, Yao Zongsen. 2024. Main controlling factors for the enrichment of oil and gas in deep tight sandstone in the Quidong Sub-sag of the Turpan-Hami Basin. China Offshore Oil and Gas, 36(6): 26~38.
- Dai Jinxing, Dong Dazhong, Ni Yunyan, Gong Deyu, Huang Shipeng, Hong Feng, Zhang Yanling, Liu Quanyou, Wu Xiaoqi, Feng Ziqi. 2024. Distribution patterns of tight sandstone gas and shale gas. Petroleum Exploration and Development, 51(4): 667~678.
- Ding Xiaoqi, Zhang Shaonan, Ge Pengli, Wan Youli. 2010. Relationship between reservoir properties and chlorite rims: A case study from Yanchang formation of south Ordos Basin, North China. Geological Journal of China Universities, 16(2): 247~254.
- Dou Wencho, Lin Mian, Liu Luofu, Jia Langbo. 2023. The effect of chlorite rims on reservoir quality in Chang 7 sandstone reservoirs in the Ordos Basin, China. Marine and Petroleum Geology, 158: 106506.
- Dowey P J, Hodgson D M, Worden R H. 2012. Pre-requisites, processes, and prediction of chlorite grain coatings in petroleum reservoirs: A review of subsurface examples. Marine and Petroleum Geology, 32(1): 63~75.
- Du Qing. 2011. Study on characteristics of tight sandstone reservoirs. West-China Exploration Engineering, 23(7): 37~38+42.
- Duan Dongping, Zhang Xianguo, Liu Binbin, Lin Jianli, Wang Wenguang. 2022. The relationship between chlorite and reservoir quality in the Huagang Formation, Xihu depression, China. Energies, 15(9): 3438.
- Griffiths J, Worden R H, Utley J E P, Broström C, Martinus A W, Lawan A Y, Al-Hajri A I. 2021. Origin and distribution of grain-coating and pore-filling chlorite in deltaic sandstones for reservoir quality assessment. Marine and Petroleum Geology, 134: 105326.
- Grigsby J D. 2001. Origin and growth mechanism of authigenic chlorite in sandstones of the lower Vicksburg Formation, south Texas.

- Journal of Sedimentary Research, 71(1): 27~36.
- Guo Kai, Zeng Jianhui, Liu Taotao, Lei Xin. 2013&. Hydrocarbon fluid flow stages and oil migration history in Yanchang Formation of Longdong Area, Ordos Basin. *Geoscience*, 27(2): 382~388.
- Guo Qing, Lu Xiaojia, Liu Tao, Yang Mengtao, Wang Kai, Zhao Yande, Tao Liang. 2024. Pore structure characterization and its influence on aqueous phase trapping damage in tight gas sandstone reservoirs. *PLoS One*, 19(4): e0298672.
- Guo Yingchun, Pang Xiongqi, Chen Dongxia, Jiang Fujie, Tang Guomin. 2013&. Progress of research on hydrocarbon accumulation of tight sand gas and several issues for concerns. *Oil & Gas Geology*, 34(6): 717~724.
- Guo Shuyue, Long Haixiang. 1983&. Influence of clay minerals on reservoir permeability in sandstone reservoirs. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, (3): 195~203.
- Hu Zuwei, Li Yun, Huang Sijing, Cheng Xinyi, Huang Yang. 2012&. The significance of the grain coating in preserving the primary porosity in deeply buried sandstone reservoirs. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(6): 640~648.
- Huang Sijing, Xie Lianwen, Zhang Meng, Wu Wenhui, Shen Licheng, Liu Jie. 2004&. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(3): 273~281.
- Huang Suwei, Zhang Chuanyun, Liu Feng. 2018&. Clay mineral characteristics of Huagang Formation and impact on the physical property of sandstone reservoir in structure Y of Xihu Sag. *Offshore Oil*, 38(2): 13~20.
- Huang Xin, Duan Dongping, Liu Binbin, Li Bingying, Ding Fang, Wang Wei, Lou Min. 2021&. Origin mechanism of chlorite and its impact on reservoir properties in Huagang Formation, Xihu depression. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 51(3): 669~679.
- Huang Yougen, Wang Ye, Lu Guiyi, Chen Cunliang, Wu Heyuan, Zhang Fang, Feng Yansong. 2024. Development scale and reservoir characteristics of sand bodies in the Qian 5 member of the Shiqianfeng Formation of the Shenmu gas field in the Ordos Basin. *Northwestern Geology*, 57(6): 186~198.
- Huggett J M, Burley S D, Longstaffe F J, Saha S, Oates M J. 2015. The nature and origin of authigenic chlorite and related cements in oligo - Miocene reservoir sandstones, tapti gas fields, surat depression, offshore western India. *Journal of Petroleum Geology*, 38(4): 383~409.
- Ji Liming, Ma Xiangxian, Xia Yanqing, Qiu Junli. 2014. Relationship between methane adsorption capacity of clay minerals and micropore volume. *Natural Gas Geoscience*, 25(2): 141~152.
- Jia Fanjian, Zeng Zhiping, Guo Ruichao, Zhang Yang, Wang Zhukun, Zhao Leqiang, Wang Jianwei, Wu Zhiping. 2024. Origin of grain-coating chlorite and implications for reservoir quality in the Triassic deep - buried volcanoclastic sandstones, central Junggar Basin, northwestern China. *ACS Omega*, 9(20): 22371~22385.
- Jiang Yuqiang, Zhang Chun, Deng Haibo, Wang Meng, Luo Mingsheng. 2013&. Influences of clay minerals on physical properties of low permeability and tight sandstones. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 35(6): 39~47.
- Lan Yefang, Huang Sijing, Lü Jie. 2011&. Influences of authigenic chlorite on pore structure in sandstone reservoir; A case study from Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, China. *Geological Bulletin of China*, 30(1): 134~140.
- Lanson B, Beaufort D, Berger G, Bauer A, Cassagnabère A, Meunier A. 2002. Authigenic Kaolin and illitic minerals during burial diagenesis of sandstones: A review. *Clay Minerals*, 37(1): 1~22.
- Li Ke, Xi Kelai, Cao Yingchang, Niu Xiaobing, Wu Songtao, Feng Shengbin, You Yuan. 2021. Chlorite authigenesis and its impact on reservoir quality in tight sandstone reservoirs of the Triassic Yanchang formation, southwestern Ordos Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205: 108843.
- Li Wenhuan, Hu Dandan, Gong Changli, Fan Tailiang, Chen Yihang, Li Yanan, Shi Qi, Leng Qifeng. 2024. Controlling factors of high-quality reservoirs in low permeability sandstone: A case study of the upper member of the lower Ganchaigou formation, Qaidam basin. *Frontiers in Earth Science*, 12: 1396061.
- Li Yang, Li Shutong, (Mou/mu) Weiwei, Yan Cancan. 2017&. Influences of clay minerals on physical properties of Chang 6 tight sandstone reservoir in Jiuyan area, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28(7): 1043~1053.
- Liang Qingshao, Chen Chunyu. 2024. Chlorite - induced porosity evolution in multi-source tight sandstone reservoirs: A case study of the Shaximiao Formation in western Sichuan Basin. *Open Geosciences*, 16: 20220732.
- Lin Jianli, Lin Chengyan, Ma Pengjie, Dong Chunmei, Liu Binbin, Huang Xin, Zhang Xianguo, Zhao Xiaohan. 2023. The characteristics and origin of chlorite coats in the Oligocene gas sandstone reservoirs of the Upper Huagang Formation, Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin. *Sedimentary Geology*, 454: 106449.
- Liu Dingkun, Li Sheng, Qing Yuanhua. 2019&. Research status of the influence of authigenic chlorite on the physical properties of clastic reservoirs. *Western Resources*, (2): 55~57.
- Lou Min, Yang Xianghua, Yao Guangqing, Jiang Ping. 2021&. Relationship between authigenic clay mineral and desert reservoir—a case study in Weixinan Sag and Wenchang A Sag. *Geological Survey of China*, 8(1): 13~23.
- Luo Jinglan, Liu Xiaohong, Lin Tong, Zhang San, Li Bo. 2006&. Impact of diagenesis and hydrocarbon emplacement on sandstone reservoir quality of the Yanchang Formation (upper Triassic) in the Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 664~673.
- Ma Pengjie, Lin Chengyan, Zhang Shiqi, Dong Chunmei, Wei Mengji. 2017&. An overview on study of chlorite films in clastic reservoirs. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(1): 147~159.
- Molenaar N, Vaznytė J, Bär K, Šliaupa S. 2021. Illite and chlorite cementation of siliciclastic sandstones influenced by clay grain cutans. *Marine and Petroleum Geology*, 132: 105234.
- Niu Jun, Wang Cong, Liang Fei. 2025&. Mineral features of chlorite and laumontite and their impacts on reservoir physical properties: A case study of lower Wuerhe Formation in western Luliang uplift, Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 46(1): 13~21.
- Patrier P, Beaufort D, Azzam F, Blaise T, Portier E, Brigaud B, Clerc S. 2023. New insights on diagenetic chlorite and its source material in turbiditic sandstones of contrasted reservoir quality in the Lower Cretaceous Agat formation ( Duva oil and gas field, northern Norwegian North Sea ). *Marine and Petroleum Geology*, 152: 106221.
- Qi Liqi, Zhang Xiaotong, Zhang Haoyu, Chen Kexin, Mei Hongjing, Yu Jingwei. 2023&. The occurrence states and influencing factors of authigenic chlorite in the Qigu Formation of the Fudong slope area. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 42(6): 826~837.
- Qiao Jianghua. 2019&. Chlorite in clastic rocks and its influence on reservoirs. *Liaoning Chemical Industry*, 48(2): 143~147.

- Qu Jianhua, Qian Haitao, Li Peng, You Xincai, Yuan Rui. 2017&. Genesis of authigenic chlorite and its influence on reservoir physical properties in conglomerates of Baikouquan Formation, Mahu Sag. *Xinjiang Petroleum Geology*, 38(5): 519~523.
- Ren Dazhong, Zhou Zhaohua, Liang Ruixiang, Zhou Ran, Liu Na, Nan Junxiang. 2019&. Characteristics of clay minerals and its impacts on reservoir quality of tight sandstone gas reservoir; A case from Sulige Gas Field, Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 31(4): 42~53.
- Shan Xiang, Guo Huajun, Guo Xuguang, Xu Yang, Cao Yuanting, Li Yazhe, Wang Libao. 2019&. Genesis of chlorite coatings and their effects on reservoir quality in Upper Urho Formation of Zhongguai area, Junggar Basin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 43(6): 32~40.
- Shao Xiaozhou, Li Yong, Zhang Wenxuan, Guo Yixuan, Zhao Yande, Zhang Xiaolei, Qi Yalin, Chu Meijuan. 2023. The fluid inclusion characteristics and petroleum accumulation of Chang 8 tight sandstone in northern Shaanxi, Ordos Basin. *Geology in China*, 50(5): 1299~1310.
- Su Yongjin, Tang Yuegang, Zhang Shihua, Fang Xinna. 2010&. Main controlling factors and patterns of gas accumulation in the Upper Triassic of the western Sichuan Depression. *Oil & Gas Geology*, 31(1): 107~113.
- Sun Quanli, Sun Hansen, Jia Bao, Yu Jianjun, Luo Wenjun. 2012&. Genesis of chlorites and its relationship with high-quality reservoirs in the Xujiache Formation tight sandstones, western Sichuan depression. *Oil & Gas Geology*, 33(5): 751~757.
- Sun Zhilei, Huang Sijing, Zhang Yuxiu, Wang Qingdong, Bao Shenxu, Sun Zhixue. 2008&. Origin and diagenesis of authigenic chlorite within the sandstone reservoirs of Xujiache Formation, Sichuan Basin, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(3): 459~468.
- Sun Zhixue, Sun Zhilei, Yao Jun, Wu Minglu, Liu Junrong, Dou Zhenya, Pei Changrong. 2014. Porosity preservation due to authigenic chlorite coatings in deeply buried Upper Triassic Xujiache formation sandstones, Sichuan basin, western China. *Journal of Petroleum Geology*, 37(3): 251~267.
- Tian Jianfeng, Chen Zhenlin, Fan Yuanfang, Li Pingping, Song Lijun. 2008a&. The occurrence, growth mechanism and distribution of authigenic chlorite in sandstone. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(2): 200~206.
- Tian Jianfeng, Chen Zhenlin, Yang Youyun. 2008b&. Protection mechanism of authigenic chlorite on sandstone reservoir pores. *Geological Science and Technology Information*, (4): 49~54.
- Tian Jianfeng, Liu Chiyang, Wang Guicheng, Qiu Xinwei. 2011&. Alkaline dissolution of sandstone in the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin. *Earth Science*, 36(1): 103~110.
- Tian Jianfeng, Yu Jian, Zhang Qingzhou. 2014&. The pore-lining chlorite formation mechanism and its contribution to reservoir quality. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(3): 741~748.
- Wang Meng, Zeng Ming, Chen Hongao, Yang Gang, Xu Jifang, Qiu Haibin, Guo Hongguang, Wang Jiamin. 2017&. Influencing factors of tight reservoirs and favorable diagenetic facies; A case study of Chang 8 reservoir of the Upper Triassic Yanchang Formation in Maling Oilfield, Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 29(1): 59~70.
- Wang Qinghua, Jin Wudi, Zhang Ronghu, Yang Haijun, Xu Zhenping, Yang Xianzhang, Zhang Liang, Yu Chaofeng. 2025&. New fields and resource potential of tight sandstone oil and gas in Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 46(1): 89~103.
- Wang Youzhi, Wang Xiandong, Chen Xuqiang, Li Xiaohui, Wu Jingfeng, Gao Xiang, Peng Jianliang, Wang Biao, Xie Yingyi, Wu Haiguang. 2025. Classification and origin of pore-throat systems in tight sandstone reservoirs; A case study of the Xujiache Formation in the Northeastern Sichuan Basin, China. *Frontiers in Earth Science*, 13: 1572136.
- Wang Zhongnan, Luo Xiaorong, Liu Keyu, Fan Yuchen, Wang Xiangzeng. 2021&. Effect of chlorite on wettability of tight sandstone reservoir in Yanchang Formation of Upper Triassic in Ordos Basin. *Scientia Sinica (Terrae)*, 51(7): 1123~1134.
- Wang Zhongnan, Luo Xiaorong, Liu Keyu, Fan Yuchen, Wang Xiangzeng. 2021. Impact of chlorites on the wettability of tight oil sandstone reservoirs in the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China. *Science China Earth Sciences*, 64(6): 951~961.
- Worden R H, Griffiths J, Wooldridge L J, Utey J E P, Lawan A Y, Muhammed D D, Simon N, Armitage P J. 2020. Chlorite in sandstones. *Earth-Science Reviews*, 204: 103105.
- Wu Jiayang, (Li/lv/lu/lyu) Zhengxiang, Qing Yuanhua, Yang Jiajing, Jin Tao. 2020&. Genesis of authigenic chlorite in tight oil reservoirs and its influence on physical properties; A case study of Shaximiao Formation in NE of central Sichuan Basin. *Lithologic Reservoirs*, 32(1): 76~85.
- Wu Xiaozhi, Liu Zhuangxiaoxue, Wang Jian, Zheng Min, Chen Xiaoming, Qi Xuefeng. 2022&. Petroleum resource potential, distribution and key exploration fields in China. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 146~155.
- Xi Minhong. 2023&. Controlling effect of chlorite on reservoir development in the north-central Xihu depression. *Offshore Oil*, 43(4): 72~76.
- Xiang Fang, Wang Yuwan, Feng Qin, Zhang Deyan, Zhao Junxing. 2016. Further research on chlorite rims in sandstones; Evidence from the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(7): 507.
- Xie Wuren, Yang Wei, Zhao Xingyuan, Wei Guoqi, Xie Zengye, Jin Hui, Chen Gang. 2010&. Influences of chlorite on reservoir physical properties of the Xujiache Formation in the central part of Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 674~679.
- Xin Honggang, Li Chi, Ma Yanli, Li Shutong, Duan Youwei, Shao Ming, Chen Junlin, Wang Wei. 2025. Characterization of the quantitative coupling relationship between pore evolution and hydrocarbon charging in the tight reservoirs of the Chang 8<sub>2</sub> sub-member in the Huanxian area, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 36(7): 1194~1207.
- Yan Qi, Lei Haiyan, Xian Benzong, Wang Jian, Luo Zhengjiang, Yang Zhao, He Jing, Niu Jun, Pu Qiang, Tian Rongheng. 2020&. Influence of source rock properties on the development of authigenic chlorite in conglomerate reservoirs and its significance for oil and gas reservoirs; A case study from the lower urhe formation in the Mahu depression, Junggar Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(2): 367~378.
- Yan Qibin, Chen Peiyuan, Yang Huiting, Huang Deming, Peng Xiaojiao. 2013&. Characteristics of clay minerals and cements of the Xujiache formation in Well Puguang 3011-5 in northeast Sichuan. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 20(3): 8~12+151.
- Yang Shuo, Wang Wei, Zhang Li, Luo Dingwen, Zou Huayao. 2020&. Control factors and distribution of chlorite-cemented facies in the Xujiache sandstone, yuanba and tongnanba area. *Earth Science* 45(2): 479~488.

- Yang Wei, Chen Guojun, Zhang Mingjie, Li Chengshan, Lu Chengfu, Li Chao. 2012&. Influence of authigenic chlorite on reservoir properties of Chang 8 oil reservoir set in Zhenbei area, Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 24(3): 27~32+38.
- Yang Yongjian, Ye Sujuan, Zhang Shihua, Nan Hongli, Yang Yingtao, Yan Lini, Cai Limei, Zhu Li. 2019&. Discussion on geological significance of chlorite cements under deep burial conditions and their impact on reservoir pore development: A case study of the 2nd member of Upper Triassic Xujiahe Formation in the middle segment of Western Sichuan Depression. *Proceedings of the 31st National Natural Gas Academic Annual Meeting (2019) (01 Geological Exploration)*. Hefei, Anhui, China. Exploration and Development Research Institute of Sinopec Southwest Oil & Gas Company: 718~728.
- Yao Jingli, Wang Qi, Zhang Rui, Li Shutong. 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.
- You Yuan, Liang Xiaowei, Feng Shengbin, Niu Xiaobing, Dan Weidong, Li Weicheng, Wang Fang. 2019&. Features and geological significance of main clay minerals in Chang 7 tight sandstone reservoir, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 30(8): 1233~1241.
- Yu Yu, Lin Liangbiao, Gao Jian. 2016. Formation mechanisms and sequence response of authigenic grain-coating chlorite: Evidence from the Upper Triassic Xujiahe Formation in the southern Sichuan Basin, China. *Petroleum Science*, 13(4): 657~668.
- Zhang Junfeng, Deng Yong, Yan Detian, Wang Hua, Zhou Sandong. 2023. Chlorite characterization and diagenetic evolution as primary controls on Zhuhai Formation sandstone reservoir quality in Zhu-III sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea. *Geoenergy Science and Engineering*, 222: 211414.
- Zhang Niannian, Cheng Chao, Yu Yifan, Ju Hao, Chen Bo. 2024&. Characteristics of ternary factors coupling for controlling reservoir of Paleogene tight sandstone gas in Xihu Sag. *Unconventional Oil & Gas*, 11(3): 27~34.
- Zhang Rui, Qin Guangsheng, Nie Minglong. 2022. Study on the relationship between chlorite clay film diagenesis and sedimentary facies in reservoir sandstones. *Geofluids*, 2022(1): 5688817.
- Zhang Xia, Lin Chunming, Cai Yuanfeng, Qu Changwei, Chen Zhaoyou. 2012. Pore-lining chlorite cements in lacustrine-deltaic sandstones from the Upper Triassic Yanchang formation, Ordos Basin, China. *Journal of Petroleum Geology*, 35(3): 273~290.
- Zhang Yangchen, Qu Xiyu, Miao Changsheng, Zhu Jianfeng, Xu Wen, Wang Weiming. 2023. Effect of authigenic chlorite on the pore structure of tight clastic reservoir in Songliao Basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2): 1406.
- Zhao Chengjin, Jiang Youlu, Liu Jingdong, Liu Ming, Wang Liangjun. 2022. Occurrence and origin of chlorite and associated impact on tight sandstone reservoir quality: A case study of the Xujiahe Formation (NE Sichuan Basin, China). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 209: 109859.
- Zhong Tao, Cao Bing, Liu Jinshui, Gao Hongyan, Liu Chuangxin. 2017&. Genesis of chlorite rims and its significance to low porosity and low permeability sandstone reservoir of Huagang Formation in north central Xihu sag, East Sea of China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 44(6): 708~716.
- Zhou Qianshan, Lü Chengfu, Li Chao, Chen Guojun, Ma Xiaofeng, Li Chengze. 2020. Formation mechanism of authigenic chlorite in tight sandstone and its influence on tight oil adsorption, Triassic Ordos Basin, China. *Energy Exploration & Exploitation*, 38(6): 2667~2694.
- Zhou Xiaofeng, Ding Li, Yang Weigu, Song Peng, Yu Junmin. 2017a&. Growth pattern of chlorite film in Chang 8 sandstone of Yanchang Formation in Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 29(4): 1~10.
- Zhou Xiaofeng, Jiao Shujing, Yu Junmin. 2017b&. Occurrences and origin of chlorite films in the Yanchang Formation sandstones, Ordos Basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(5): 834~842.
- Zhou Xiaofeng, Li Shuheng, Yu Junmin, Wen Deshun. 2019&. Diagenetic process responses of morphologies and chemical compositions of chlorite rims in sandstones: A case from Chang 8 sandstone, Longdong Area, Ordos Basin. *Geological Science and Technology Information*, 38(2): 110~116.
- Zhou Xiaofeng, Wang Jianguo, Lan Chaoli, Dai Jinyou. 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.
- Zhu Ping, Huang Sijing, Li Demin, Liu Yuanchao. 2004&. Effect and protection of chlorite on clastic reservoir rocks. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(2): 153~156.
- Zhu Rukai, Li Guoxin, Cui Jingwei, Huang Fuxi, Lu Xuesong, Guo Zhi, Cao Zhenglin. 2025&. Geological accumulation conditions and exploration prospects of tight oil and gas in China. *Acta Petrolei Sinica*, 46(1): 17~32.
- Zhu Rukai, Zou Caineng, Zhang Nai, Wang Xuesong, Cheng Rong, Liu Lihong, Zhou Chuanmin, Song Lihong. 2009&. Evolution of diagenetic fluid in tight sandstone gas reservoir and its tight genetic mechanism—Taking Xujiahe Formation of Upper Triassic in Sichuan Basin as an example. *Science in China (Series D)*, (3): 327~339.
- Zhu Shifa, Wang Xiaoxu, Qin Yi, Jia Ye, Zhu Xiaomin, Zhang Jiatang, Hu Yunqi. 2017. Occurrence and origin of pore-lining chlorite and its effectiveness on preserving porosity in sandstone of the middle Yanchang Formation in the southwest Ordos Basin. *Applied Clay Science*, 148: 25~38.
- Zhu Ying, Ding Xiaoqi, Hu Xin. 2017&. Occurrence, growth mechanism and distribution law of chlorite clay in Yingcheng formation of Longfengshan gas field. *Journal of Northeast Petroleum University*, 41(5): 62~69+7~8.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Bai Bin, Yang Zhi, Zhu Rukai, Hou Lianhua, Yuan Xuanjun, Zhang Guosheng, Wu Songtao. 2015&. Differences and relations between unconventional and conventional oil and gas. *China Petroleum Exploration*, 20(1): 1~16.
- Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, Hu Suyun, Li Xiaodi, Li Jianzhong, Dong Dazhong, Zhu Rukai, Yuan Xuanjun, Hou Lianhua, Qu Hui, Zhao Xia, Jia Jinhua, Gao Xiaohui, Guo Qiulin, Wang Lan, Li Xinjing. 2010. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration. *Petroleum Exploration and Development*, 37(2): 129~145.

# Impact of chlorite enrichment on the hydrocarbon-bearing potential of tight sandstone reservoirs

WU Xiaotian, LI Xi, ZHU Guangyou, YANG Zhe, FU Shiyu, XU Kai, LI Jiyuan, ZHAO Yuhao  
*College of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, 430100*

**Abstract:** Tight sandstone reservoirs, characterized by low porosity, low permeability, strong heterogeneity, and difficulty in "sweet spot" prediction, represent a critical focus and challenge in current unconventional oil and gas exploration and development research. As one of the most important filling minerals in tight sandstone reservoirs, chlorite profoundly influences reservoir properties and hydrocarbon-bearing potential. Clarifying the enrichment characteristics of chlorite and its regulatory mechanisms on reservoir properties and hydrocarbon occurrence capacity will provide crucial insights for the precise prediction of hydrocarbon-bearing "sweet spots" in tight sandstones. We systematically analyzes the mechanisms and controlling factors of chlorite's impact on the hydrocarbon-bearing potential of tight sandstone reservoirs, focusing on its occurrence modes, genetic mechanisms, and coupling relationships with diagenetic evolution. Research indicates that chlorite primarily exists in reservoirs in three forms: grain-coating, pore-lining, and pore-filling. Among these, grain-coating chlorite forms through the combined effects of precursor clay mineral transformation, detrital material replacement, and pore fluid precipitation. Pore-lining chlorite originates from the transformation of sedimentary clay coatings, dissolution and recrystallization of Fe-Mg-rich materials, or mixed transformation and direct crystallization processes. Pore-filling chlorite precipitates from Fe-Mg-rich pore waters or forms via the transformation of smectite and illite. Chlorite formed during different diagenetic stages exerts dual effects on reservoirs: positive effects include enhancing rock compressive strength, inhibiting pressure dissolution, promoting dissolution processes, and suppressing quartz overgrowth; negative effects involve pore-throat blockage and permeability reduction. Chlorite formation spans the entire sedimentary-diagenetic evolution process, and its influence on reservoir hydrocarbon potential exhibits spatiotemporal variability and multi-factor synergy. Core controlling factors include chlorite occurrence, thickness, continuity, and interactions with diagenetic stages. Hydrocarbons primarily occur as films adsorbed onto chlorite surfaces and within its intercrystalline pores, or as isolated/aggregated particles. Minerals with larger specific surface areas exhibit higher adsorption potential energy for hydrocarbons. Chlorite from different diagenetic stages possesses varying adsorption capacities, with pore-lining chlorite's intercrystalline pores demonstrating the strongest hydrocarbon adsorption capability. "Sweet spot" reservoirs typically feature chlorite with moderate thickness and complete continuity, often distributed in high-energy sedimentary environments and avoiding zones of thick cementation. Moderate development of pore-lining chlorite provides favorable space for hydrocarbon charging and storage. We provide a comprehensive mineralogical and petrological basis for the "sweet spot" prediction of tight sandstone hydrocarbon reservoirs, which is of great significance for deepening the understanding of hydrocarbon enrichment mechanisms in tight reservoirs and optimizing exploration and development strategies.

**Keywords:** chlorite; tight sandstone; hydrocarbon-bearing potential; diagenetic evolution; Hydrocarbon Adsorption; sweet spot prediction.

**First author:** WU Xiaotian, male, born in 2003, is a current master's degree candidate specializing in Petroleum Geology; Email: geowuxiaotian@163.com

**Corresponding author:** ZHU Guangyou, male, born in 1973, Ph. D., professor-level senior engineer, primarily engaged in research on deep petroleum geology and hydrocarbon accumulation; Email: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

**Manuscript** received on: 2025-08-05; Accepted on: 2026-01-04; Published online on: 2026-01-20

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2026.01.041

**Edited by:** LIU Zhiqiang

