

北部湾盆地涠西南凹陷涠洲组黏土矿物异常转化 对储层质量的影响

郇金来^{1,2}, 孟元林¹, 吴其林³, 陈国松⁴, 马帅², 林水城²

(1. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057;
3. 广东石油化工学院石油工程学院, 广东茂名 525000; 4. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163318)

摘要: 为寻找北部湾盆地涠西南凹陷优质储层发育区带, 指明后期油气勘探开发方向, 本文基于实验分析和热力学计算相结合的方法, 深入研究了涠西南凹陷渐新统涠洲组储层中黏土矿物异常转化层段及类型, 明确了异常高孔高渗带成因。结果表明: 受热流体活动影响, 研究区在埋深2 300~2 900 m存在明显的黏土矿物异常转化现象, 且可分为绿泥石化和高岭石化两种类型, 热力学计算结果也证实高岭石绿泥石化和伊利石高岭石化在涠西南凹陷具有热力学优先性, 是涠西南凹陷涠洲组优质储层的重要成因。异常高孔高渗带集中分布于绿泥石含量(质量分数)大于35%(高岭石含量在30%~35%之间)和高岭石含量大于45%(绿泥石含量在10%~20%之间)两个层段。其中, 在2 300~2 400 m和2 500~2 700 m深度范围内储层主要发育异常高岭石化; 在2 400~2 500 m和2 700~2 900 m深度范围内储层主要发育异常绿泥石化。

关键词: 黏土矿物; 异常转化; 储层质量; 渐新统涠洲组; 涠西南凹陷

中图分类号: P619.23⁺1; P618.130.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)05-0711-12

Influence of abnormal transformation of clay minerals on reservoir quality in Weizhou Formation, Weixinan Sag, Beibuwan Basin

HUAN Jin-lai^{1,2}, MENG Yuan-lin¹, WU Qi-lin³, CHEN Guo-song⁴, MA Shuai² and LIN Shui-cheng²

(1. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 2. CNOOC China Limited, Zhanjiang Branch, Zhanjiang 524057, China; 3. College of Petroleum Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China; 4. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Company of Limited Liability, Daqing 163318, China)

Abstract: In order to find the development position of high quality reservoir and determine the direction of later exploration and development in Weixinan Sag of Beibuwan Basin, this paper studied the location and type of abnormal clay mineral transformation in Weizhou Formation, Weixinan Sag, and identified the cause of abnormally high porosity and permeability zones based on the method of combining experimental analysis and thermodynamic calculation. The results show that, under the influence of thermal fluid activity, abnormal transformation of clay minerals is developed in the study area at the burial depth of 2 300~2 900 m, which can be divided into two types: chloritization and kaolinization. Thermodynamic calculation results also confirm that the chloritization of kaolinite and kaolinization of illite have thermal mechanical priority in Weixinan Sag, which is the important cause of high quality

收稿日期: 2023-07-15; 接受日期: 2023-08-09; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 广东省普通高校特色创新项目(2020KTSCX084); 中海油有限公司重大专项(CNOOC-KJ135ZDXM38ZJ01ZJ)

作者简介: 郇金来(1984-), 男, 博士研究生, 研究方向: 沉积岩石学、储层矿物学, E-mail: huanjl@enooc.com.cn; 通讯作者: 吴其林(1982-), 男, 副教授, 主要从事海洋地质学与岩石学研究, E-mail: wuqilin666@126.com。

reservoir of the Weizhou Formation in Weixinan Sag. The abnormally high porosity and permeability zones are concentrated in two layers, where the the proportion of chlorite mass is more than 35% (the proportion of kaolinite mass is between 30% and 35%) and the proportion of kaolinite mass is more than 45% (the proportion of chlorite mass is between 10% and 20%). Among them, abnormal kaolinization is mainly developed within the depth range of 2 300~2 400 m and 2 500~2 700 m, abnormal chloritization is mainly developed within the depth range of 2 400~2 500 m and 2 700~2 900 m.

Key words: clay minerals; abnormal transformation; reservoir quality; Weizhou Formation; Weixinan Sag

Fund support: Innovation Project of Educational Commission of Guangdong Province of China (2020KTSCX084); Limited Major Special Project of CNOOC (CNOOC-KJ135ZDXM38ZJ01ZJ)

我国含油气盆地黏土矿物主要由蒙皂石、伊利石、绿泥石、高岭石及黏土矿物转化过程中的中间产物组成,且大部分黏土矿物为含水层状硅酸盐。黏土矿物的类型、含量及产状对油气的生成、运移、储集及封盖都具有重要的指示意义(Labson *et al.*, 2002; Worden and Morad, 2003; 徐同台等, 2003; 孟元林等, 2006; 田建锋等, 2008a, 2008b; Peltonen *et al.*, 2009; Thyberg *et al.*, 2010; 丁晓琪等, 2010; Thyberg and Jahren, 2011; Wilson *et al.*, 2014; 陈宝赞等, 2014; Gier *et al.*, 2015; Kamal *et al.*, 2019; Leila, 2019)。研究表明,黏土矿物的产状、结构、分布特征及其对含油气储层质量的影响受控于成岩作用过程中的流体、温度、压力及埋藏深度等因素,而非简单的原始矿物沉淀的结果(Worden and Morad, 2003; Wilson *et al.*, 2014; Gier *et al.*, 2015; Kamal *et al.*, 2019; Leila, 2019)。反之,黏土矿物亦能揭示埋藏成岩过程中的温压条件,并对后续储层的成岩作用和岩石物理性质产生重要影响(Wilson *et al.*, 2014; Kamal *et al.*, 2019; Leila, 2019; 张艺楼等, 2020; 丁琳等, 2022)。在碎屑岩储层成岩作用过程中,黏土矿物对储层物理性质的影响甚至强于石英和碳酸盐胶结物(Labson *et al.*, 2002),如自生黏土矿物包膜。目前对自生黏土矿物包膜的研究以自生绿泥石最为常见(Ehrenberg, 1993; Billault *et al.*, 2003; 黄思静等, 2004; 田建锋等, 2008a, 2008b; 陈宝赞等, 2014; 周晓峰等, 2019; 谭双等, 2022),其次为蒙皂石(Matlack *et al.*, 1989; Moraes and Derros, 1990)、伊利石(Storvoll *et al.*, 2002; Hansen *et al.*, 2017)及高岭石(Walderhaug *et al.*, 2006; Waldmann and Gaupp, 2016)。诸多学者的研究(Ehrenberg, 1993; Worden and Morad, 2003; Thyberg *et al.*, 2010; 谢武仁等, 2010; Thyberg and Jahren, 2011; Gier *et al.*, 2015)均表明,不

同类型黏土矿物之间的相互转化是控制黏土矿物类型、含量、产状及其对储层质量影响的重要成岩反应,尤其是特殊地质条件下黏土矿物的异常转化(孟元林等, 2006; 孟凡晋等, 2012)。

前人对涠西南凹陷储层流体包裹体和热史的研究结果(刘平等, 2008; 郭飞飞等, 2010)表明,在古新世初期至渐新世末期,涠西南凹陷处于断陷及断拗转换阶段,张裂活动剧烈,大断裂沟通深部岩浆热源,对有机质演化及油气形成起到了重要的促进作用,但对于成岩作用影响的研究相对匮乏,尤其是热流体活动对储层成岩作用及储层质量的影响尚不明确。因此,本文以北部湾盆地涠西南凹陷X油田渐新统涠洲组三段砂岩储层黏土矿物演化特征为研究重点,通过激光粒度分析、岩心常规物性分析、扫描电子显微镜测试及XRD测试等,结合热力学计算结果,重点研究涠西南凹陷黏土矿物的纵向演化规律,深入探讨不同类型黏土矿物异常转化对储层质量的影响,为开展涠西南凹陷X油田和国内外其他类似油田储层成岩作用研究和储层质量预测提供科学依据。

1 地质背景

涠西南凹陷资源潜力大,油气富集,是南海北部北部湾盆地勘探程度最高、发现油气田最多的凹陷(图1a)。北部湾盆地涠西南凹陷新生代地层系统自下而上由古新统长流组(Ec)、始新统流沙港组(E1)、渐新统涠洲组(Ew)、下中新统下洋组(Nx)、中中新统角尾组(Nj)、上中新统灯楼角组(Nd)、上新统望楼港组(Nw)和第四系(Q)构成(图1b)(许月明等, 2020)。其中,始新统流沙港组二段(E1₂)发育半深湖-深湖相的暗色泥岩,是主要的生油层段;渐新统涠洲组三段(Ew₃)(简称“涠三段”)为一

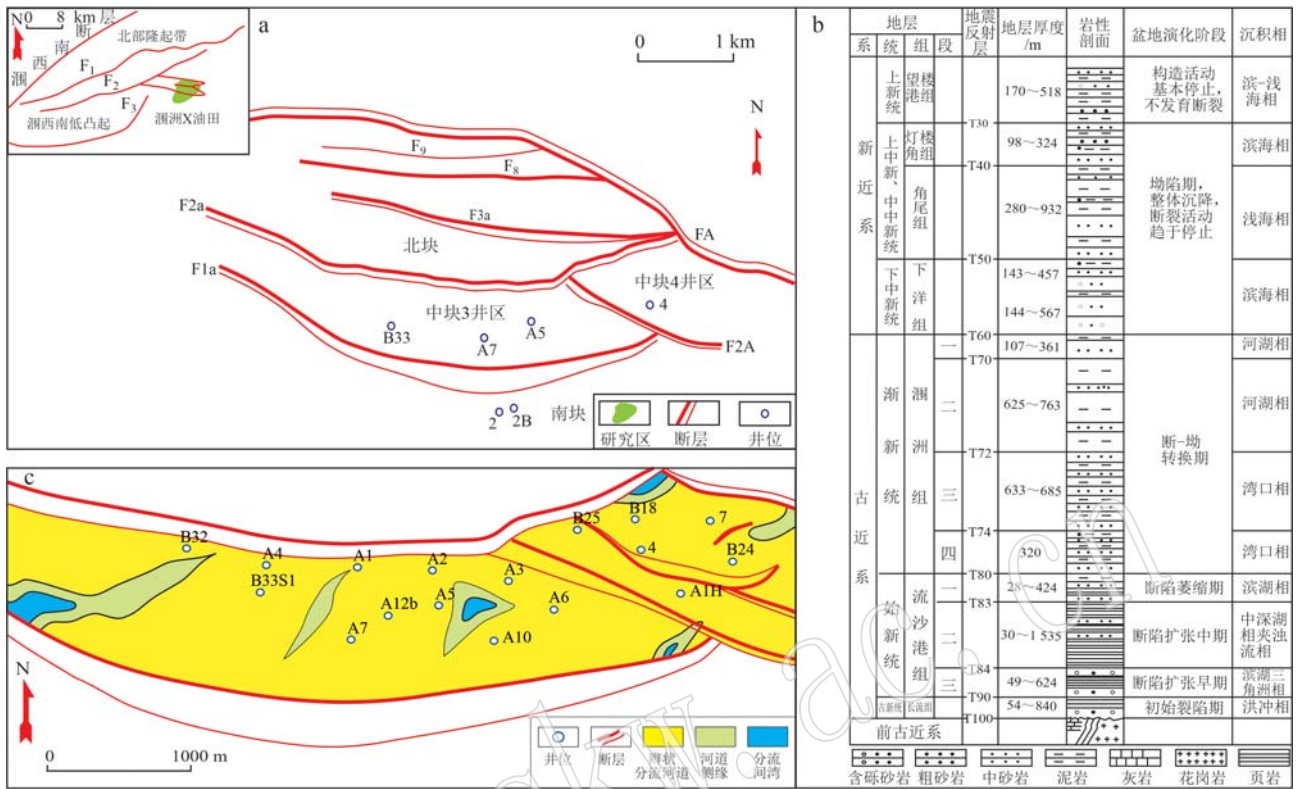


图 1 研究区地质背景综合图(据许月明等, 2020 修改)

Fig. 1 Comprehensive map of geological background of study area (modified after Xu Yueming et al., 2020)

套辫状河三角洲前缘的细砂岩储层, 是该区主要的储油层段; 涠洲组二段(Ew_2)发育浅湖-半深湖相的厚层泥岩盖层, 是该区良好的区域盖层(图 1c), 故自下而上形成了一套比较好的生储盖组合。涠西南凹陷渐新统涠三段碎屑岩储层为研究区油气勘探开发的主要目的层段, 亦是本文研究的重点。目前, 涠三段碎屑岩储层处于中成岩阶段 A 期, 且经历了两期热流体活动, 一期为古新世初期至渐新世末期, 深部岩浆热液侵入涠洲组三段(郭飞飞等, 2010); 另一期为渐新世涠洲组沉积中晚期至早中新世下洋组沉积时期(许月明等, 2020), 有机质热演化产生的有机酸及 CO_2 沿断层进入涠三段储层。很显然, 深部热流体活动及其影响对涠三段碎屑岩储层成岩作用及黏土矿物异常转化起到了重要的促进作用。

2 样品及测试

共采集 6 口取心井样品(2B 井、A5 井、A7 井、2 井、4 井和 B33 井)(取样井点位置见图 1a)。按照 20 cm 的间距对涠洲 X 油田涠三段碎屑岩储层岩心

进行 2.5 cm 直径样品钻塞采集, 钻取过程参照中海油企业标准 Q/HS 2036-2009, 保证所取样品未经后期的风化、蚀变影响以及有机质浸入, 共取得柱塞岩样 225 块。在此基础上进一步对柱塞进行分割, 分别开展铸体薄片鉴定、镜质体反射率(R_o)测定、全岩及黏土 XRD 分析、激光粒度分析、常规物性测试、扫描电镜观察等 6 项分析。

研究所涉及的测试全部由中海油海上高温高压油气藏勘探开发实验平台完成。其中, 利用 DM 4500P 偏光显微镜(徕卡, 德国)进行铸体薄片鉴定, 获得了岩石组分、结构, 自生矿物及孔隙特征, 岩石制片方法及镜下鉴定分析过程分别参照行业标准 SY/T 5913-2004、SY/T 5368-2016, 共获得 225 组数据。使用 Axio Scope A1 透射偏光显微镜(蔡司, 德国)50 倍物镜搭配 MSP-200 显微分光光度计对样品镜质体反射率进行测定, 测试过程参照行业标准 SY/T 5124-2012, 试样重复性绝对偏差低于 0.1, 再现性绝对偏差低于 0.12, 共获得 46 组数据。使用 Ultima IV 型 X 射线衍射仪(理学, 日本)对样品粉末的全岩组分和黏土矿物组分开展 X 射线衍射分析测

试,工作电压 40 kV,工作电流 40 mA,扫描速度(2θ)采用 $2^\circ/\text{min}$ 。实验结果采用 High-score Plus 程序进行物相鉴定与半定量分析,测试分析过程参照行业标准 SY/T 5163-2018,共获得 225 组数据。使用 Mastersizer 3000 激光粒度仪(马尔文,英国)对样品进行粒度分析测试,测量方法参照行业标准 SY/T 5434-2009,测量范围 $0.05\sim 3\ 200\ \mu\text{m}$,共获得 197 组数据。利用 ULTRAPORE-300 孔隙度测量仪和 ULTRAPER-410 渗透率测量仪(嘉晟,中国)对样品进行常规物性测试,实验前利用溶剂抽提法对样品洗油洗盐,测量方法严格按照国家标准 GB/T29172-2012 执行,孔隙度仪器校正因子最后一行两个参数 <0.001 ,标准样分析渗透率 $>0.01\ \mu\text{m}^2$,相对误差 $<5\%$,共获得 112 组数据。使用场发射环境扫描电子显微镜 QuantaFEG650 (FEI,美国)观察矿物形貌及黏土赋存状态,扫描电镜分析方法依据行业标准 SY/T 5162-2014,加速电压 20.0 kV,光束尺寸 $3.0\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 。能谱定量分析方法依据行业标准 SY/T 6189-2018,共获得 10 组数据。

3 结果与讨论

3.1 岩相学特征

225 个薄片样品显微镜下鉴定表明,涪西南凹陷 X 油田涪三段碎屑岩储层以岩屑石英砂岩为主,颗

粒整体较细(细砂岩 60.3%,体积分数),分选中等,磨圆度呈次棱-次圆状。碎屑组分以石英为主(平均 71.9%),其次为岩屑(平均 13.7%),含有少量钾长石(平均 7.6%),斜长石含量较低(平均 6.8%)。常规储集物性分析结果表明,储层平均孔隙度为 18.2%,平均渗透率为 $215.56\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,整体以中孔中渗为主,局部存在高孔高渗。

225 个全岩和黏土矿物 X 衍射实验表明,涪三段储层填隙物以黏土矿物为主,平均体积分数为 12.0%(图 2),主要以高岭石含量(35.7%)居首,绿泥石含量(24.8%)和伊利石含量(25.4%)中等,伊蒙混层含量(14.1%)最少。同时,不同种类黏土矿物在不同取样点含量存在差异。其中 4 井、2 井和 A7 井高岭石含量最高,A5 井绿泥石含量最高;各井区伊蒙混层含量均为最低。

3.2 黏土矿物产状

高岭石在扫描电镜下呈假六边形片状、书页状,以不同赋存状态发育在孔隙空间中,如无序状充填在颗粒之间(图 3a),手风琴状充填于粒间孔隙(图 3b),分散状发育在颗粒表面(图 3c),放大可见溶蚀孔隙及高岭石晶间孔(图 3d);绿泥石同样以不同产状赋存于砂岩储层中,包膜绿泥石完全包裹颗粒表面(图 3e),一定程度上能够抑制自生石英的过渡生长;衬里绿泥石包裹与孔隙接触的那部分颗粒表面(图 3f),避免了自生石英的发育;绿泥石也常呈叶片

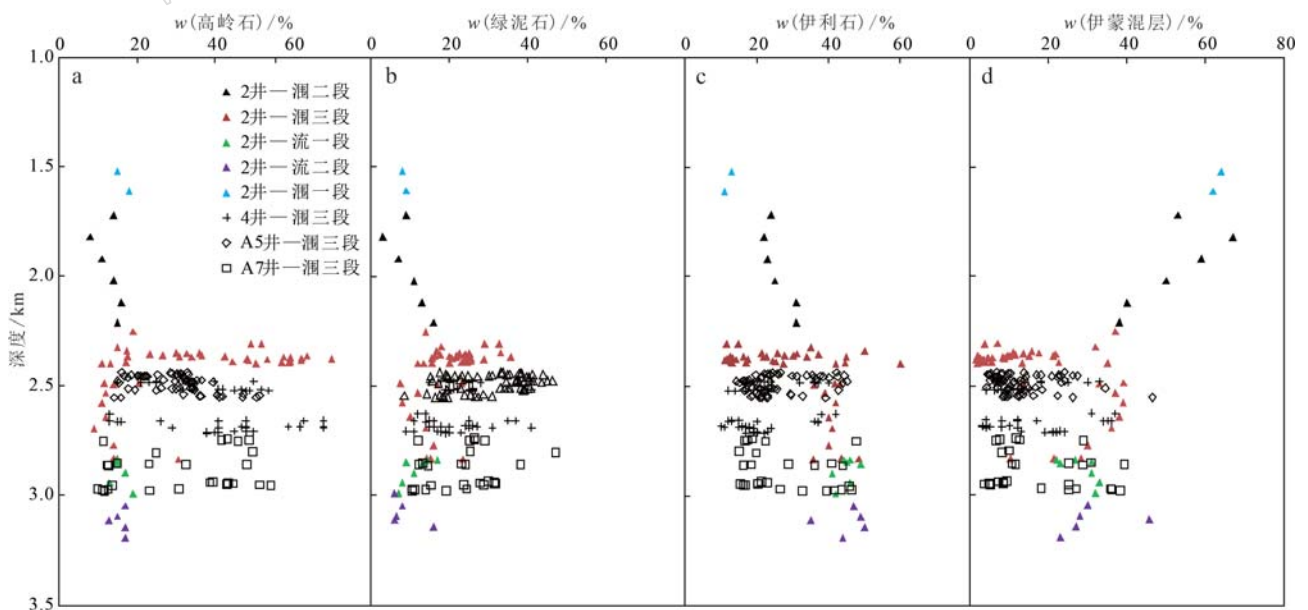


图 2 涪西南凹陷不同类型黏土相对含量随埋深的变化

Fig. 2 The change of relative mass content of different types of clay with burial depth in Weixinan Sag

状分散于颗粒表面(图 3g)或集合体呈玫瑰花状充填粒间孔隙(图 3h);伊利石在涠三段砂岩储层中以片状(图 3i)、丝片状充填粒间孔隙(图 3j),伊利石沉淀于钾长石、钠长石及高岭石附近,与长石和高岭石具有成因上的联系;伊/蒙混层(I/S)呈丝状混层附着在颗粒粒表(图 3k),或呈片状充填粒间孔隙(图 3l)。

3.3 黏土矿物异常转化层段

深部岩浆热液与有机质热演化产生的有机酸及 CO_2 进入涠三段砂岩储层中,势必引起成岩环境的

变化,作为对热流体异常敏感的镜质体反射率(R_o)和伊蒙混层(I/S)将发生异常变化,据此可以判断黏土矿物异常转化的层段(解习农等, 1999; 孟凡晋等, 2012; 陈超等, 2022)。X 油田涠三段不同井位样品的镜质体反射率(R_o)和伊蒙混层(I/S)中蒙皂石质量分数(S%)随深度变化趋势显示(图 4),在 2 300~2 900 m 深度范围内,局部 R_o 值异常偏高,不符合 R_o 值随埋深增加逐渐升高的变化规律(图 4a);同时,伊蒙混层中蒙皂石含量明显偏低,亦不符合 S% 值随埋深增加逐渐降低的变化规律(图 4b)。

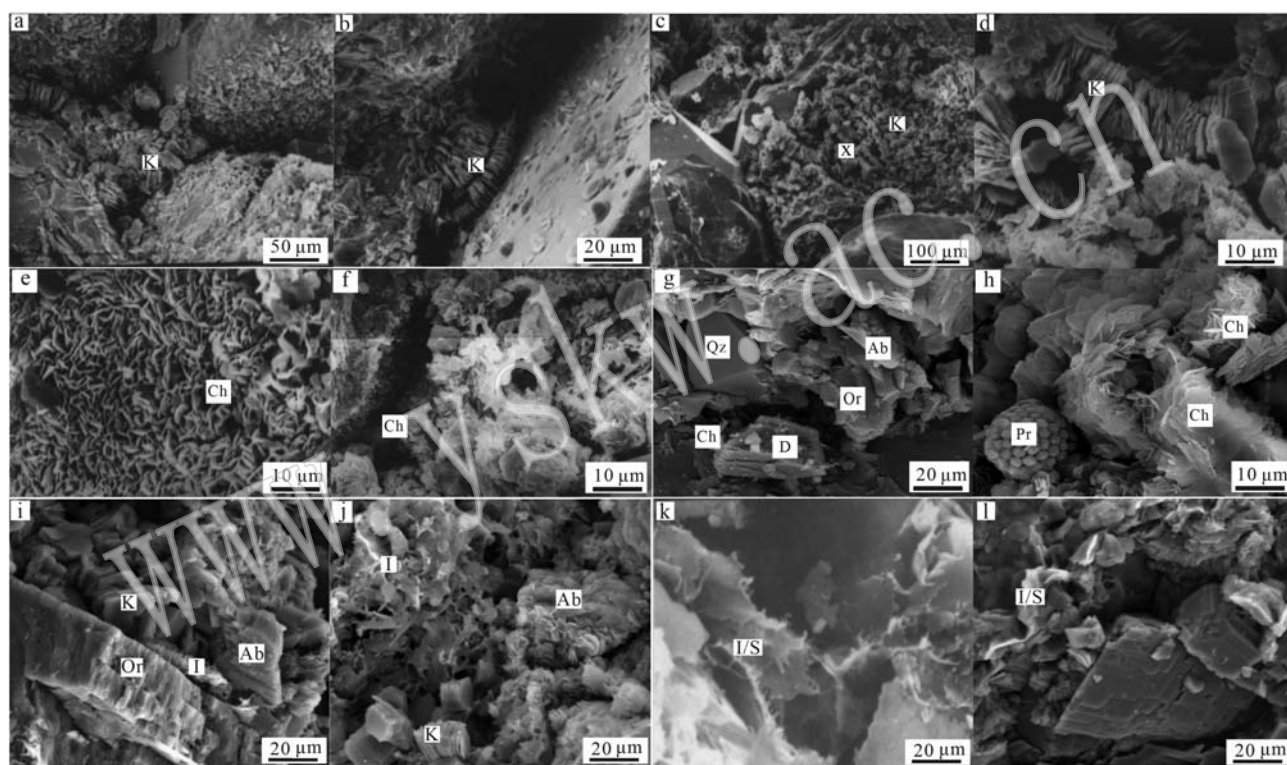


图 3 扫描电镜下涠三段储层自生黏土矿物赋存状态

Fig. 3 Occurrence of authigenic clay minerals under scanning electron microscope in the Ew₃

a—粒间孔隙内充填无序状假六边形高岭石, 2 井, 2 459. 12 m; b—手风琴状高岭石充填在粒间孔隙中, 2 井, 2 462. 62 m; c—蠕虫状高岭石分散发育在颗粒表面, 2B 井, 2 375. 38 m; d—图 3c 中 x 放大, 高岭石板状聚合物, 见溶蚀孔隙及高岭石晶间孔, 孔径 5~10 μm, 2B 井, 2 375. 38 m; e—颗粒包膜绿泥石, 单个晶体垂直于碎屑颗粒表面, 2B 井, 2 488 m; f—孔隙衬里绿泥石, 2B 井, 2 768. 19 m; g—绿泥石呈叶片状分散于颗粒表面, 颗粒间伴有石英加大、白云石、钠长石和钾长石, B33 井, 2 947. 95 m; h—绿泥石集合体呈玫瑰花状, 球状黄铁矿充填粒间孔隙, B33 井, 2 365. 35 m; i—片状伊利石、高岭石及钾长石充填粒间孔隙, 钠长石有溶蚀现象, B33 井, 2 197. 41 m; j—丝片状伊利石、高岭石充填粒间孔隙, 钠长石有溶蚀现象, B33 井, 2 946. 53 m; k—粒表丝状伊/蒙混层, 4 井, 2 656. 37 m; l—片状伊/蒙混层充填粒间孔隙, B33 井, 2 195. 50 m; K—高岭石; Ch—绿泥石; Qz—石英; D—白云石; Ab—钠长石; Or—钾长石; Pr—黄铁矿; I—伊利石; I/S—伊蒙混层

a—disordered pseudo hexagonal kaolinite filled in intergranular pores, well 2, 2 459. 12 m; b—accordion shaped kaolinite filled in intergranular pores, well 2, 2 462. 62 m; c—worm-like kaolinite dispersed on the particle surface, well 2B, 2 375. 38 m; d—enlarged in Fig. 3c, the kaolin plate-like polymer shows dissolution pores and intergranular pores of kaolinite, with a pore size of 5~10 μm, well 2B, 2 375. 38 m; e—particle coated chlorite, with a single crystal perpendicular to the surface of the debris particles, well 2B, 2 488 m; f—pore lining chlorite, well 2B, 2 768. 19 m; g—chlorite is dispersed on the surface of particles in a leaf-like manner, accompanied by quartz enlargement, dolomite, albite, and potassium feldspar between particles, well B33, 2 947. 95 m; h—the aggregate of chlorite is in a rose shaped shape, with spherical pyrite filling the intergranular pores, well B33, 2 365. 35 m; i—schistose illite, kaolinite, and potassium feldspar filling the intergranular pores, and sodium feldspar showing dissolution, well B33, 2 197. 41 m; j—filamentous illite and kaolinite fill intergranular pores, while albite exhibits dissolution, well B33, 2 946. 53 m; k—filamentous surface layer of illite/montmorillonite, well 4, 2 656. 37 m; l—sheet-like mixed layer filled with intergranular pores, well B33, 2 195. 50 m; K—kaolinite; Ch—chlorite; Qz—quartz; D—dolomite; Ab—albite; Or—potassium feldspar; Pr—pyrite; I—illite; I/S—layer of illite/montmorillonite

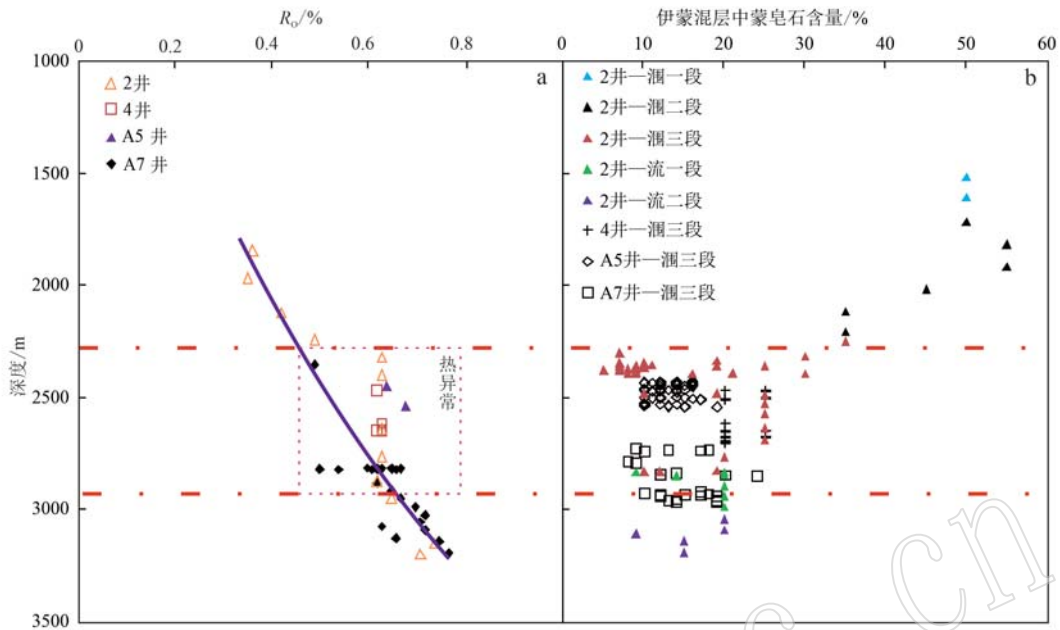


图4 涪三段镜质组反射率、伊蒙混层中蒙皂石相对含量随埋深演化趋势

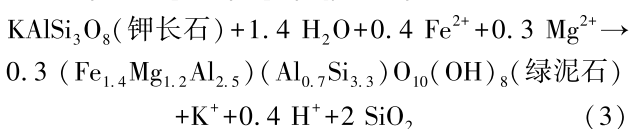
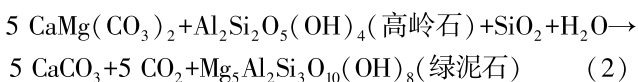
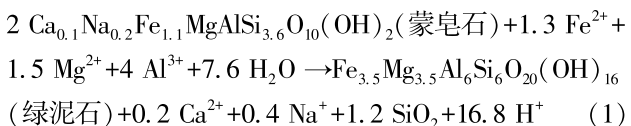
Fig. 4 Evolution trend of reflectance of vitrinite and relative mass content of smectite in I/S mixed layer with burial depth in the E₃

由此可判定,因热流体活动引起黏土矿物异常转化层段主要处在埋深2300~2900m范围内。

3.4 黏土矿物异常转化类型及其机制

3.4.1 绿泥石化型

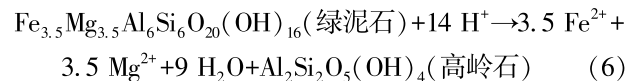
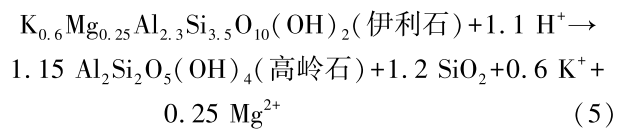
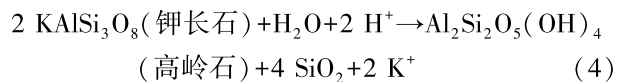
在古新世长流组沉积初期至渐新世涪洲组沉积末期,北部湾盆地经历了断陷扩张时期和断-拗转化时期,构造活动强烈,断层作为流体运移通道,沟通深部岩浆热源(郭飞飞等,2010)。深部岩浆热液沿断层进入涪洲组的同时,伴有大量铁、镁等离子的涌入。高浓度的铁、镁离子促使蒙皂石、高岭石及长石快速绿泥石化,使得绿泥石含量迅速升高(图2),其反应方程可表示为(Moard and Aldahan, 1987; 应凤祥等,2004):



3.4.2 高岭石化型

在渐新世中晚期至下中新世,油气开始初期的

大规模运移,有机质逐渐脱羧基产生大量有机酸,并伴有CO₂产生(郇金来等,2016)。该类酸性流体同样利用断层作为运移通道进入涪三段,促使长石、伊利石及少量绿泥石的高岭石化,使得高岭石含量迅速升高(图2),其反应方程为(徐同台等,2003):



3.4.3 吉布斯自由能增量计算

热力学分析中,通过计算吉布斯自由能增量可进一步证实黏土矿物的转化(郇金来等,2011;魏文文等,2011;孟凡晋等,2012),即当吉布斯自由能增量ΔG(J/mol)大于0时,反应进程不可能自动进行;当吉布斯自由能增量ΔG小于0时,反应进程才可能自动进行。本研究根据区域温度和压力数值依次计算出高岭石伊利石化、高岭石绿泥石化(公式2)、伊利石高岭石化(公式5)和绿泥石高岭石化(公式6)的自由能增量(表1)。结果表明,除了高岭石伊利石化之外,其余3个反应(公式2、5和6)均可自

动发生。在数值上,自由能增量越小,则优先性越高,更易于发生化学反应。即按照自由能增量由小到大排序,化学反应优先性可排列为:高岭石绿泥石化>伊利石高岭石化>绿泥石高岭石化>高岭石伊利石化。通过以上分析以及成岩环境酸碱性条件进一步约束,可判识确定,涠西南凹陷 X 油田涠三段储层中高岭石绿泥石化和伊利石高岭石化具有最高的优先性,这一结论与其黏土矿物含量纵向变化规律相吻合(图2)。

同时,伊利石高岭石化的平衡 pH 值范围高于绿泥石高岭石化反应的平衡 pH 值范围(表1)(徐同台等, 2003),在酸性成岩环境下,伊利石高岭石化的进程不但比绿泥石高岭石化更易于进行,同时使 pH 值升高,阻碍了绿泥石的高岭石化,为绿泥石的保存提供了有利成岩环境,导致成岩作用早期阶段建设性成因绿泥石在经过渐新世中晚期至下中新世有机酸及 CO₂ 酸性流体进入后,依然可以保存至今(图2)。

表1 涠三段黏土矿物转化的吉布斯自由能增量随深度变化(据徐同台等, 2003 修改)

Table 1 Variation of ΔG and pH value of clay mineral transformation in the Ew₃(modified by Xu Tongtai et al., 2003)

矿物反应	反应式	$\Delta G/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	平衡 pH 值
高岭石→伊利石	$3 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2 \text{K}^+ \rightarrow 2 \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 2 \text{H}^+ + 3 \text{H}_2\text{O}$	30~35	
高岭石→绿泥石	$5 \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 5 \text{CaCO}_3 + 5 \text{CO}_2 + \text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-523~-576	
绿泥石→高岭石	$\text{Fe}_{3.5}\text{Mg}_{3.5}\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{20}(\text{OH})_{16} + 14 \text{H}^+ \rightarrow 3.5 \text{Fe}^{2+} + 3.5 \text{Mg}^{2+} + 9 \text{H}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	-208~-243	5.0~5.7
伊利石→高岭石	$\text{K}_{0.6}\text{Mg}_{0.25}\text{Al}_{2.3}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 1.1 \text{H}^+ \rightarrow 1.15 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 1.2 \text{SiO}_2 + \text{K}^+ + 0.25 \text{Mg}^{2+}$	-318~-320	5.8~6.6

3.5 黏土矿物对储层质量的影响

XRD、激光粒度物和物性分析资料表明,不同粒级的自生黏土矿物类型和含量,对储层渗透率具有不同的控制作用。以典型井 A5 井为例(图5),当碎屑颗粒为中砂时,储层渗透率较高,就数值而言,高岭石、伊利石、伊蒙混层及绿泥石含量对储层渗透率的影响相对较小,最大与最小值相差 1~2 个数量级左右。然而 197 个激光粒度分析结果表明,研究区涠三段储层颗粒整体较细,细砂岩以下颗粒占 94.2%(图6)。在此情况下,高岭石、伊利石、伊蒙混层及绿泥石含量对渗透率具有明显控制作用,储层渗透率最大与最小值分别相差 3 和 4 个数量级左右。其中,高岭石、绿泥石含量与渗透率总体呈正相关关系,其主要原因是高岭石、绿泥石的成因与深部岩浆热液及有机酸和 CO₂ 有关,对储层物性的建设性意义大于自生黏土本身沉淀的效果(陈国松等, 2021),增加了储层的孔隙度与渗透率;伊利石、伊蒙混层含量与渗透率呈负相关关系,其主要原因是伊利石和伊蒙混层常呈桥状堵塞孔隙喉道或充填粒间孔隙,降低了储层孔隙度与渗透率。

3.6 异常高孔高渗带及其形成机制

3.6.1 异常高孔高渗带分布

涠西南凹陷 X 油田涠三段储层纵向上发育 3 个异常高孔高渗带(I~III),其深度范围分别为 2 300~2 400 m、2 400~2 600 m、2 600~2 900 m。这些异

常高孔高渗带与黏土矿物含量异常变化层段非常吻合(图7)。

第 I 异常高孔高渗带(2 300~2 400 m): 该带高岭石含量(质量分数)异常变化,在 12%~69.8%之间,平均值为 45.6%;伊利石和绿泥石含量较低,分别在 12%~58.7%和 13%~36.9%之间,平均值为 21.7%和 19.4%。即第 I 异常高孔高渗带的形成与它类矿物高岭石化密切相关。

第 II 异常高孔高渗带(2 400~2 600 m): 该带上部(2 400~2 500 m)绿泥石含量最高,在 16%~45.8%之间,平均值为 35.1%,高岭石含量中等,在 14.9%~45.7%之间,平均值为 30.5%;伊利石含量最低,在 13.4%~43.7%之间,平均值为 20.9%。下部(2 500~2 600 m)高岭石含量较高,在 10%~58.8%之间,平均值为 44.7%;伊利石含量中等,在 11.8%~43.1%之间,平均值为 21.9%;绿泥石含量较低,在 7.9%~39.1%之间,平均值为 20.0%。

第 III 异常高孔高渗带(2 600~2 900 m): 该带上部(2 600~2 700 m)高岭石含量最高,在 10.2%~70.3%之间,平均值为 47.3%;伊利石含量中等,在 9.9%~41.1%之间,平均值为 20.8%;绿泥石含量最低,在 7%~39%之间,平均值为 17.5%。下部(2 700~2 900 m)高岭石含量较高,在 10.9%~48%之间,平均为 32.0%;伊利石含量中等,在 13.7%~43.2%之间,平均为 30.4%;绿泥石含量较低,在 6.8%~

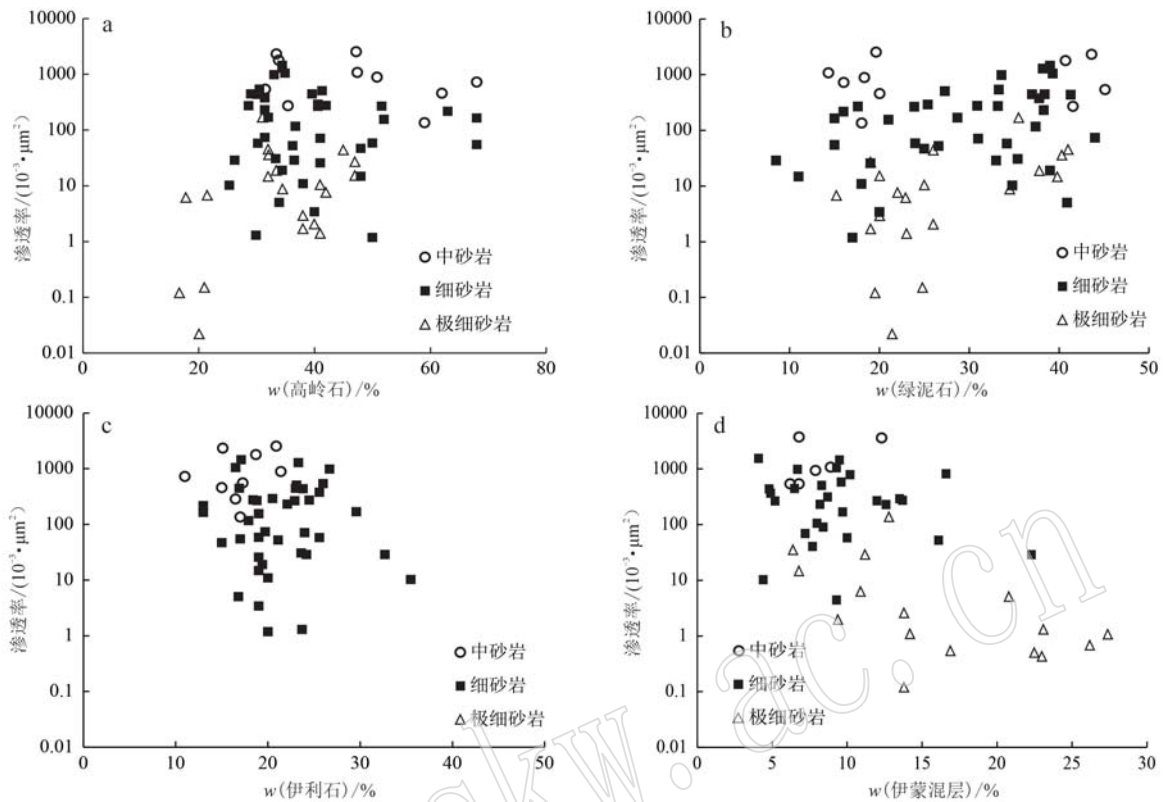


图5 涪三段储层不同类型黏土矿物质量相对含量与颗粒粒度和渗透率的关系

Fig. 5 The relationship between relative mass content of different types of clay minerals and particle size, permeability in the Ew_3

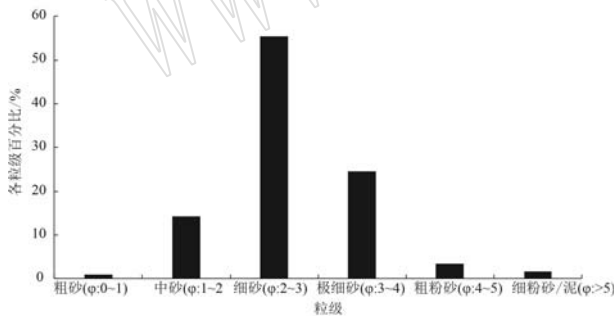


图6 涪三段储层碎屑颗粒粒级百分比图

Fig. 6 Percentage of clastic particle size distribution in the Ew_3

45%之间,平均为27.1%。

综上所述,涪西南凹陷渐新统涪三段储层第I、II和III异常高孔高渗带的形成均与黏土矿物的异常转化密切相关。其中第I异常高孔高渗带的形成主要与高岭石化相关;第II异常高孔高渗带的形成为高岭石化和绿泥石化共同作用的结果;第III异常高孔高渗带亦主要与高岭石化相关,但局部存在它类矿物绿泥石化。

3.6.2 异常高孔高渗带成因

前已论及和证实,对于黏土矿物而言,研究区涪三段储层中当高岭石含量大于30%时,储层质量相对较好(图8)。换言之,涪三段储层中异常高孔高渗带主要集中分布于绿泥石含量大于35%(高岭石含量在30%~35%之间)和高岭石含量大于45%(绿泥石含量在10%~20%之间)两个层段(图8),这就充分表明涪西南凹陷涪三段储层异常高孔高渗带与黏土矿物异常转化密切相关。鉴此,按照黏土矿物类型不同,可进一步将储层异常高孔高渗带成因机制划分为两种不同类型,即绿泥石成因型和高岭石成因型。

(1) 绿泥石成因型:该类异常高孔高渗带与绿泥石化型黏土矿物异常转化密切相关,主要形成于古新世初期至渐新世末期,受深部岩浆热液影响,蒙皂石、长石及高岭石向绿泥石转化产生次生孔隙,形成了成岩作用早期阶段的绿泥石成因型异常高孔高渗带,为后期地层流体的运移与聚集建立了新的流体输导网络,其典型特征为绿泥石含量异常高值区

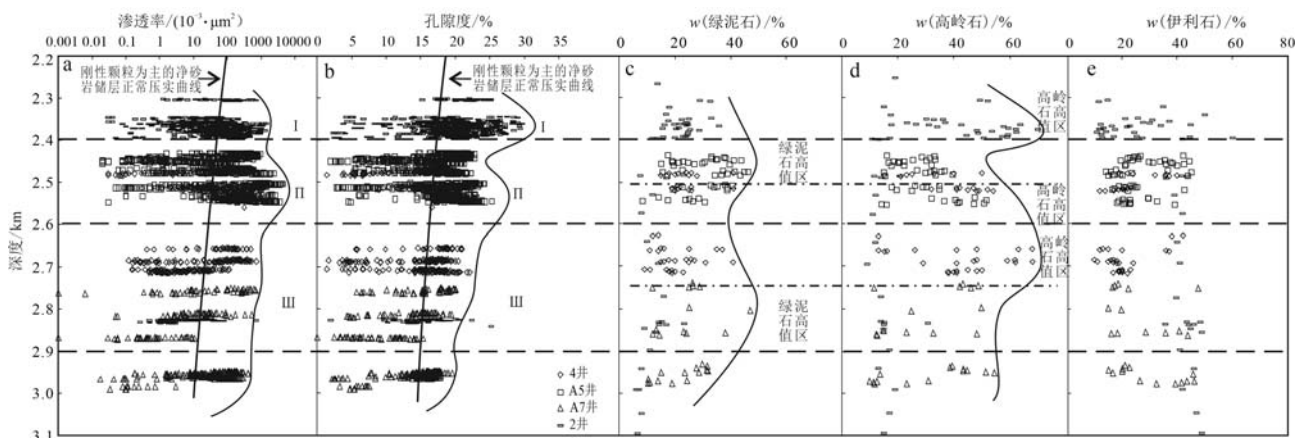


图 7 涠三段储层不同类型异常高孔高渗带与黏土矿物转化关系

Fig. 7 Relationship between different types of abnormal high permeability zones and clay mineral transformation in the Ew₃

与物性高值区相吻合。

(2)高岭石成因型：该类异常高孔高渗带与高岭石化型黏土矿物异常转化密切相关,主要形成于涠洲组沉积中晚期至下洋组沉积时期,受益于成岩作用早期阶段绿泥石成因型异常高孔高渗带,当有机质热演化产生的有机酸及 CO₂ 进入涠三段储层时,长石、伊利石及部分绿泥石向高岭石转化,产生次生孔隙,形成了成岩作用中期阶段的高岭石成因型异常高孔高渗带,为后期油气的运移与聚集提供了新的输导网络,其典型特征为高岭石含量异常高值区与物性高值区相吻合。

总之,成岩作用早期绿泥石成因型异常高孔高渗带得益于深部岩浆热液对黏土矿物转化的促进和储层的改造,为成岩作用中期高岭石成因型异常高孔带的形成提供了稳定的流体输导通道;而成岩作用中期形成的高岭石成因型异常高孔带,则得益于成岩作用早期绿泥石成因型异常高孔高渗带提供的渗流通道,且受控于有机酸及 CO₂ 对涠三段黏土矿物转化的推动和储层的改造;成岩作用早期绿泥石成因型异常高孔高渗带的大部分保存,得益于酸性条件下伊利石向高岭石转化对绿泥石向高岭石转化的抑制作用。成岩作用早期绿泥石成因型异常高孔高渗带的形成与保存和成岩作用中期高岭石成因型异常高孔高渗带的再形成,使得涠西南凹陷涠三段储层异常高孔高渗带较为发育,有利于油气的运移与聚集,其是目前涠西南凹陷涠三段油气富集的重要原因之一。

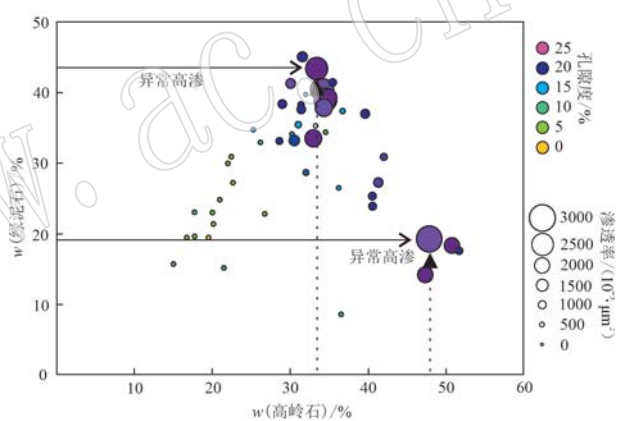


图 8 涠三段高岭石及绿泥石异常转化对储层质量的影响 (据陈国松等, 2021 修改)

Fig. 8 Influence of abnormal transformation of kaolinite and chlorite on reservoir physical properties in the Ew₃ (modified after Chen Guosong *et al.*, 2021)

4 结论

- (1) 涠西南凹陷涠洲组储层在埋深 2 300 ~ 2 900 m 范围内存在明显的异常黏土矿物转化现象, 2 300~2 400 m 和 2 500~2 700 m 主要发育高岭石化, 且高岭石集合体呈蠕虫状、板状发育在颗粒表面; 在 2 400~2 500 m 主要发育颗粒包膜绿泥石化, 2 700~2 900 m 主要发育衬里或分散片状绿泥石化。
- (2) 涠西南凹陷涠洲组储层存在两种黏土矿物异常转化类型: 一种是绿泥石化型, 由于古新世初期至渐新世末期深部岩浆热液的侵入, 促使它类矿物

快速绿泥石化;另一种是高岭石化型,受控于渐新世中晚期至下中新世有机酸及 CO₂ 的侵入,促使它类矿物高岭石化;热力学计算也证明了高岭石绿泥石化和伊利石高岭石化的优先性,且与黏土矿物含量异常变化吻合,进一步检验了黏土矿物异常转化的合理性及可信性。

(3) 涪西南凹陷涪洲组细砂岩储层质量与高岭石和绿泥石含量呈正相关关系,二者含量异常变化层段与异常高孔高渗带吻合。其中,第 I 和 III 异常高孔高渗带与高岭石含量高层段对应,是长石和伊利石高岭石化的结果;第 II 异常高孔高渗带与高岭石和绿泥石含量高层段一致,是酸性成岩环境转换条件下长石、伊利石高岭石化和高岭石绿泥石化不同时期叠合作用的结果。

References

- Billault V, Beaufort D and Baronnet A. 2003. A nanopetrographic and textural study of grain coats chlorites in sandstone reservoirs[J]. *Clay Minerals*, 38: 315~328.
- Chen Baoyun, Li Rongxi, Liang Jiwei, *et al.* 2014. Authigenic chlorite and its impact on reservoir physical properties: An example from the Yanchang formation of the Southwest Ordos Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(3): 390~394 (in Chinese with English abstract).
- Chen Chao, Xiu Di, Wang Haimin, *et al.* 2022. Petrological characteristics, geochemical characteristics, and geological significance of sandstones in Changzhougou Formation, central sector of the Yanshan Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(4): 771~785 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guosong, Meng Yuanlin, Huan Jinlai, *et al.* 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[J]. *Journal of Palaeogeography*, 23(3): 640~650 (in Chinese with English abstract).
- Ding Lin, Li Xiaoyan, Zhou Fengjuan, *et al.* 2022. Differential development characteristics and main controlling factors of the Paleogene high-quality reservoirs from the Zhu I Depression in the Pearl River Mouth Basin: A case on Wenchang Formation at Lufeng area and Huizhou area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(1): 75~86 (in Chinese with English abstract).
- Ding Xiaoqi, Zhang Shaonan, Ge Pengli, *et al.* 2010. Relationship between reservoir properties and chlorite rims: A case study from Yanchang Formation of South Ordos Basin, North China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(2): 247~254 (in Chinese with English abstract).
- Ehrenberg S N. 1993. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain-coats chlorite: Examples from the Norwegian continental shelf[J]. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 77: 1260~1286.
- Gier S, Worden R H and Krois P. 2015. Comparing clay mineral diagenesis in interbedded sandstones and mudstones, Vienna Basin, Austria [J]. *Geological Society, London Special Publications*, 435.
- Guo Feifei, Guo Xiaowen, Sun Jianfeng, *et al.* 2010. Source rock thermal and maturity history modeling in C sag of the weixinan depression, Bibuwan, Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(2): 87~93 (in Chinese with English abstract).
- Hansen H N, Lovstad K, Muller R, *et al.* 2017. Clay coating preserving high porosities in deeply buried intervals of the Stø Formation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 648~658.
- Huan Jinlai, Huang Sijing, Huang Keke, *et al.* 2011. Thermodynamics interpretation for albitization of detrital K-feldspar of 2nd member of Xujiahe Formation in western Sichuan Depression[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 18(3): 289~292 (in Chinese with English abstract).
- Huan Jinlai, Qi Zhi, Yang Zhaoqiang, *et al.* 2016. Diagenesis mechanism and porosity evolution of the first member of Huangliu formation reservoirs in Dongfang area, Yinggehai Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 35(1): 87~93 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Xie Lianwen, Zhang Meng, *et al.* 2004. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in nonmarine Triassic reservoir sandstones, Ordos Basin and Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(3): 274~281 (in Chinese with English abstract).
- Kamal M S, Mahmoud M, Hanfi M, *et al.* 2019. Clay minerals damage quantification in sandstone rocks using core flooding and NMR [J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9: 593~603.
- Labson B, Beaufort D and Berger G. 2002. Authigenic kaolin and illitic minerals during burial diagenesis of sandstones: A review [J]. *Clay Minerals*, 37: 1~22.
- Leila M. 2019. Clay minerals distribution in the pre-, syn-Messinian salinity crisis sediments of the onshore Nile Delta, Egypt: Mineral origin and implications on the reservoir quality[J]. *Journal of African Earth*

- Sciences, 154: 35~48.
- Liu Ping, Xia Bin, Tang Zaiqiu, *et al.* 2008. Fluid inclusions in reservoirs of Weixinan sag, Beibuwan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 14(4): 12~17 (in Chinese with English abstract).
- Matlack K S, Houseknecht D W and Applin K R. 1989. Emplacement of clay into sand by infiltration [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 59(1): 77~87.
- Meng Fanjin, Xiao Lihua, Xie Yuhong, *et al.* 2012. Abnormal transformation of the clay minerals in Yinggehai Basin and its significances [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(3): 469~476 (in Chinese with English abstract).
- Meng Yuanlin, Huang Wenbiao, Wang Yuechuan, *et al.* 2006. A Kinetic model of clay minerals transformation in overpressure setting and its applications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 461~467 (in Chinese with English abstract).
- Moard S and Aldahan S S. 1987. Diagenetic chloritization of feldspars in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 51: 155~164.
- Moraes M A S and Deros L F. 1990. Infiltrated clays in fluvial Jurassic sandstone of Reconcavo Basin, Northeastern Brazil [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60(6): 809~819.
- Peltonen C, Marcussen Ø, Bjorlykke K, *et al.* 2009. Clay mineral diagenesis and quartz cementation in mudstones: The effects of smectite to illite reaction on rock properties [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 26: 887~898.
- Storvoll V, Bjorlykke K, Karlsen D, *et al.* 2002. Porosity preservation in reservoir sandstones due to grain-coats illite: A study of the Jurassic Garn Formation from the Kristin and Lavrans fields, offshore Mid-Norway [J]. *Marine Petroleum Geology*, 19: 767~781.
- Tan Shuang, Chen Qi, Wan Jianjun, *et al.* 2022. Characteristics of chlorite in Xiangyangping uranium ore deposit, middle segment of Miaoershan and its petrogenetic and metallogenic significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1 097~1 108 (in Chinese with English abstract).
- Thyberg B and Jahren J. 2011. Quartz cementation in mudstones: Sheet-like quartz cement from clay mineral reactions during burial [J]. *Petroleum Geoscience*, 17: 53~63.
- Thyberg B, Jahren J, Winje T, *et al.* 2010. Quartz cementation in Late Cretaceous mudstones, northern North Sea: Changes in rock properties due to dissolution of smectite and precipitation of microquartz crystals [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 27: 1 752~1 764.
- Tian Jianfeng, Chen Zhenlin, Fan Yuanfang, *et al.* 2008a. The occurrence, growth mechanism and distribution of authigenic chlorite in Sandstone [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(2): 200~206 (in Chinese with English abstract).
- Tian Jianfeng, Chen Zhenlin and Yang Youyun. 2008b. Protection mechanism of authigenic chlorite on sandstone reservoir pores [J]. *Geological Science and Technology Information*, 27(4): 49~54 (in Chinese with English abstract).
- Walderhaug O, Bjorkum P A and Aase N E. 2006. Kaolin-coating of stylolites, effect on quartz cementation and general implications for dissolution at mineral interfaces [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 76: 234~243.
- Waldmann S and Gaupp R. 2016. Grain rimming kaolinite in Permian Rotliegend reservoir rocks [J]. *Sedimentary Geology*, 335(1): 17~33.
- Wei Wenwen, Huang Sijing and Huan Jinlai. 2011. Thermodynamic calculation of illite formation and its significance on research of sandstone diagenesis [J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(1): 20~25 (in Chinese with English abstract).
- Wilson L, Wilson M, Green J, *et al.* 2014. The influence of clay mineralogy on formation damage in North Sea reservoir sandstones: A review with illustrative examples [J]. *Earth—Science Reviews*, 134: 70~80.
- Worden R H and Morad S. 2003. Clay minerals in sandstones: Controls on formation, distribution and evolution [C]//Worden R H & Morad S. Clay mineral cements in sandstones. International Association of Sedimentologists, Special Publications, 34: 3~41.
- Xie Wuren, Yang Wei, Zhao Xingyuan, *et al.* 2010. Influences of chlorite on reservoir physical properties of the Xujiache Formation in the central part of Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 674~679 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xinong, Li Sitian, Dong Weiliang, *et al.* 1999. Trace marker of hot fluid flow and their geological implications: A case study of Yinggehai Basin [J]. *Earth Science Journal of China University of Geoscience*, 24(2): 75~80 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tongtai, Wang Xingxin, Zhang Youyu, *et al.* 2003. Clay Minerals in Petroliferous Basin, China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 37~69.
- Xu Yueming, Yuan Binglong, Zhang Hui, *et al.* 2020. Reservoir physical characteristics and influencing factors of the third member of Weizhou Formation in Weizhou 12-X oilfield, Beibu Gulf Basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 44(3): 46~56 (in Chinese with English abstract).
- Ying Fengxiang, Luo Ping, He Dongbo, *et al.* 2004. Diagenesis and Numerical Simulation of Clastic Reservoirs in Petroliferous Basins of China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 61~76.

- Zhang Yilou, Wu Hao, Ji Youliang, *et al.* 2020. Characteristics of pore structure differences in the 2th Member reservoir of Oligocene Dongying Formation, southern Nanpu Sag: Implications for reservoir quality [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(1): 85~95 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaofeng, Li Shuheng, Yu Junmin, *et al.* 2019. Diagenetic process responses of morphologies and chemical compositions of chlorite rims in sandstones: A case from chang 8 sandstone, Longdong Area, Ordos Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 38(2): 111~116 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈宝赞, 李荣西, 梁积伟, 等. 2014. 自生绿泥石及其对储集层物性影响研究: 以鄂尔多斯盆地西南缘延长组为例 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(3): 389~394.
- 陈超, 修迪, 王海敏, 等. 2022. 燕山中段常州沟组砂岩岩石学、地球化学特征及地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 41(4): 771~785.
- 陈国松, 孟元林, 郇金来, 等. 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 [J]. *古地理学报*, 23(3): 640~650.
- 丁琳, 李晓艳, 周凤娟, 等. 2022. 珠江口盆地珠一坳陷古近系优质储层差异发育特征及主控因素: 以陆丰地区和惠州地区文昌组为例 [J]. *岩石矿物学杂志*, 41(1): 75~86.
- 丁晓琪, 张哨楠, 葛鹏莉, 等. 2010. 鄂南延长组绿泥石环边与储集性能关系研究 [J]. *高校地质学报*, 16(2): 247~254.
- 郭飞飞, 郭小文, 孙建峰, 等. 2010. 北部湾盆地涠西南凹陷 C 洼烃源岩热史及成熟史模拟 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 30(2): 87~93.
- 郇金来, 黄思静, 黄可可, 等. 2011. 川西须二段碎屑岩钾长石钠长石化的热力学解释 [J]. *断块油气田*, 18(3): 289~292.
- 郇金来, 漆智, 杨朝强, 等. 2016. 莺歌海盆地东方区黄流组一段储层成岩作用机理及孔隙演化 [J]. *地质科技情报*, 35(1): 87~93.
- 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集层孔隙保存的关系 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 31(3): 273~281.
- 刘平, 夏斌, 唐在秋, 等. 2008. 北部湾盆地涠西南凹陷储集层流体包裹体 [J]. *石油勘探与开发*, 14(4): 12~17.
- 孟凡晋, 肖丽华, 谢玉洪, 等. 2012. 莺歌海盆地黏土矿物异常转化及其地质意义 [J]. *沉积学报*, 30(3): 469~476.
- 孟元林, 黄文彪, 王粤川, 等. 2006. 超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型及应用 [J]. *沉积学报*, 24(4): 461~467.
- 谭双, 陈琪, 万建军, 等. 2022. 苗儿山中段向阳坪轴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): 1097~1108.
- 田建锋, 陈振林, 凡元芳, 等. 2008a. 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): 200~206.
- 田建锋, 陈振林, 杨友运, 2008b. 自生绿泥石对砂岩储集层孔隙的保护机理 [J]. *地质科技情报*, 27(4): 49~54.
- 魏文文, 黄思静, 郇金来. 2011. 伊利石形成相关反应的热力学计算及其对砂岩成岩作用研究的意义 [J]. *地质科技情报*, 30(1): 20~25.
- 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.
- 解习农, 李思田, 董伟良, 等. 1999. 热流体活动示踪标志及其地质意义: 以莺歌海盆地为例 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 24(2): 75~80.
- 徐同台, 王行信, 张有瑜, 等. 2003. 中国含石油盆地粘土矿物 [M]. 北京: 石油工业出版社, 37~69.
- 许月明, 袁丙龙, 张辉, 等. 2020. 北部湾盆地涠洲 12-X 油田涠洲组三段储层物性特征与影响因素 [J]. *东北石油大学学报*, 44(3): 46~56.
- 应凤祥, 罗平, 何东博, 等. 2004. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩作用数值模拟 [M]. 北京: 石油工业出版社, 61~76.
- 张艺楼, 吴浩, 纪友亮, 等. 2020. 南堡凹陷南部不同构造带东二段储层孔隙结构差异及其对储层质量的影响 [J]. *岩石矿物学杂志*, 39(1): 85~95.
- 周晓峰, 李书恒, 于均民, 等. 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长 8 砂岩为例 [J]. *地质科技情报*, 38(2): 111~116.