

川南地区三叠系须家河组致密砂岩孔隙类型及物性控制因素

祝海华^{1,2}, 钟大康^{1,2}, 张亚雄³, 孙海涛^{1,2}, 杜本强⁴, 孟昊^{1,2}, 张春伟^{1,2}, 杨喆^{1,2}

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石油 西南油气田分公司蜀南气矿, 四川 泸州 646000)

摘要:通过普通及铸体薄片、扫描电镜、岩心物性及压汞数据等资料,研究了川南地区须家河组致密砂岩储层的孔隙类型和物性特征,并探讨了孔隙发育类型、孔-渗关系控制因素及砂岩物性空间变化与沉积条件的关系。结果表明,川南地区须家河组以原生粒间孔发育为特征,次为溶蚀孔隙和晶间微孔,渗透率随孔隙度增加呈迅速增加—稳定—再次增加的三段式分布,主要原因是绿泥石、伊利石胶结物的生长抵消了孔隙度增加对渗透率的贡献。平面上,砂岩物性的变化与沉积条件密切相关:短距离搬运或沉积水动力弱的砂岩成分及结构成熟度差,物性差;长距离搬运且沉积于强水动力条件的砂体孔隙发育。纵向上,单一河道砂体的中-中下部物性好于顶、底部,原因是河道沉积时水动力由强变弱,砂体中部成分、结构成熟度好于顶、底部,这也导致了砂体内部成岩作用的非均质性,并最终影响了孔隙的纵向分布。

关键词:孔隙类型;物性特征;致密砂岩;须家河组;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Pore types and controlling factors on porosity and permeability of Upper Triassic Xujiahe tight sandstone reservoir in Southern Sichuan Basin

Zhu Haihua^{1,2}, Zhong Dakang^{1,2}, Zhang Yaxiong³, Sun Haitao^{1,2}, Du Benqiang⁴, Menghao^{1,2}, Zhang Chunwei^{1,2}, Yang Zhe^{1,2}

(1. State Key Lab of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. School of Earth Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 4. Luzhou Gas District, Southwest Oil and Gas Field Co., Ltd., PetroChina, Luzhou, Sichuan 646000, China)

Abstract: Based on thin sections, scanning electron microscopy (SEM), core porosity and permeability data, and mercury injection data, this paper summarized the pore types, physical property of tight sandstone of the Xujiahe Formation and discussed the controlling factors on pore types, poroperm relationship and spatial change of physical property. The result shows that the rapid compaction process and minor dissolution resulted in the relative abundant of primary pore followed by dissolution pore and intergranular micropore. As the porosity increases, the permeability change shows a three-stage pattern, namely rapid increasing first, then getting stabilized and increasing again. This distribution pattern is mainly controlled by pore throat filling authigenic chlorite and illite which offset the increases in permeability due to the increase of porosity. The poor connectivity of dissolution pore and micropore also influence the permeability of sandstone. The spatial change of physical property of sandstone is controlled by sedimentary condition. The relative short transport distance or low energy environment resulted in low compositional and textural maturity and poor physical property. Only the sandstone with long transport distance and high energy environment are abundant in porosity. The physical quality in middle and lower part of single fluvial sandstone is better than that of the upper and bottom parts. The major reason is that the decreases of energy during fluvial sandstone deposition result in higher compositional and textural maturity of the middle part and lead to the diagenetic heterogeneity within a single sandstone.

Key words: pore type, porosity and permeability, tight sandstone, Xujiahe Formation, Sichuan Basin

收稿日期:2013-10-20; 修订日期:2013-12-20。

第一作者简介:祝海华(1987—),男,博士研究生,储层地质学。E-mail:retinaabcd@163.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB201104);国家自然科学基金项目(41302108)。

川南地区油气勘探始于 20 世纪 50—60 年代(主力目的层为嘉陵江组和茅口组)。前期须家河组由于是非勘探目的层而一直未受到重视,经过近年来的勘探才发现了丹凤场等一批具有商业开发价值的气藏。前人对四川盆地须家河组储层特征的研究主要集中于川西、川中和川中—川南过渡带。一般认为强水动力环境砂体物性较好^[1-2],强烈压实作用、石英次生加大破坏了大量的孔隙;长石、岩屑溶解是次生孔隙的主要来源^[3-6]。绿泥石薄膜阻止加大边生长有利于粒间孔隙保存^[7-11];也有学者认为绿泥石环边保护孔隙能力有限,甚至会充填孔隙,降低物性^[12-14]。

本文通过川南地区不同位置的 7 口井 722 块普通薄片、80 块铸体薄片、40 个样品的扫描电镜资料结合压汞资料、岩心物性测试数据的分析,研究了川南地区须家河组孔隙类型、孔渗关系,侧重于讨论在宽缓古地貌背景下须家河组孔隙发育的控制因素以及绿泥石等粘土胶结如何影响孔渗关系。

1 地质背景

研究区位于四川盆地南部,构造上属于川东南中

隆高陡构造带(图 1)。目的层须家河组厚度 258 ~ 694 m,总体趋势由东南向西北增厚,现今埋深主要分布于 800 ~ 2 000 m。四川盆地须家河组自下而上可划分出 6 段,其中须六段又可分为 3 个亚段。川南地区在雷口坡期地貌较高^[15-20],在须家河组沉积早期为物源区,地层发育不全,缺失下部须一段、须二段及须三段下部地层,到须三段中、晚期才被超覆并接受沉积,只发育须三段至须六段。

川南地区须家河组是一套在宽缓地貌背景下形成的一套辫状河三角洲和正常湖泊沉积^[20],其物源主要来源于盆地东南部的江南古陆^[21]。纵向上须家河组以发育大套砂岩夹薄层泥岩为特征。其中须四段和须六¹亚段沉积时以辫状河三角洲平原河道为特征,沉积厚层砂岩^[1-2],须三段、须五段及须六²亚段沉积期发生湖侵,湖相泥岩发育,储层主要发育于须四段和须六¹亚段。

2 岩石学特征

根据 7 口井 400 余张镜下薄片分析,研究区须家河组储层为一套中—低成分成熟度和中等结构成熟度

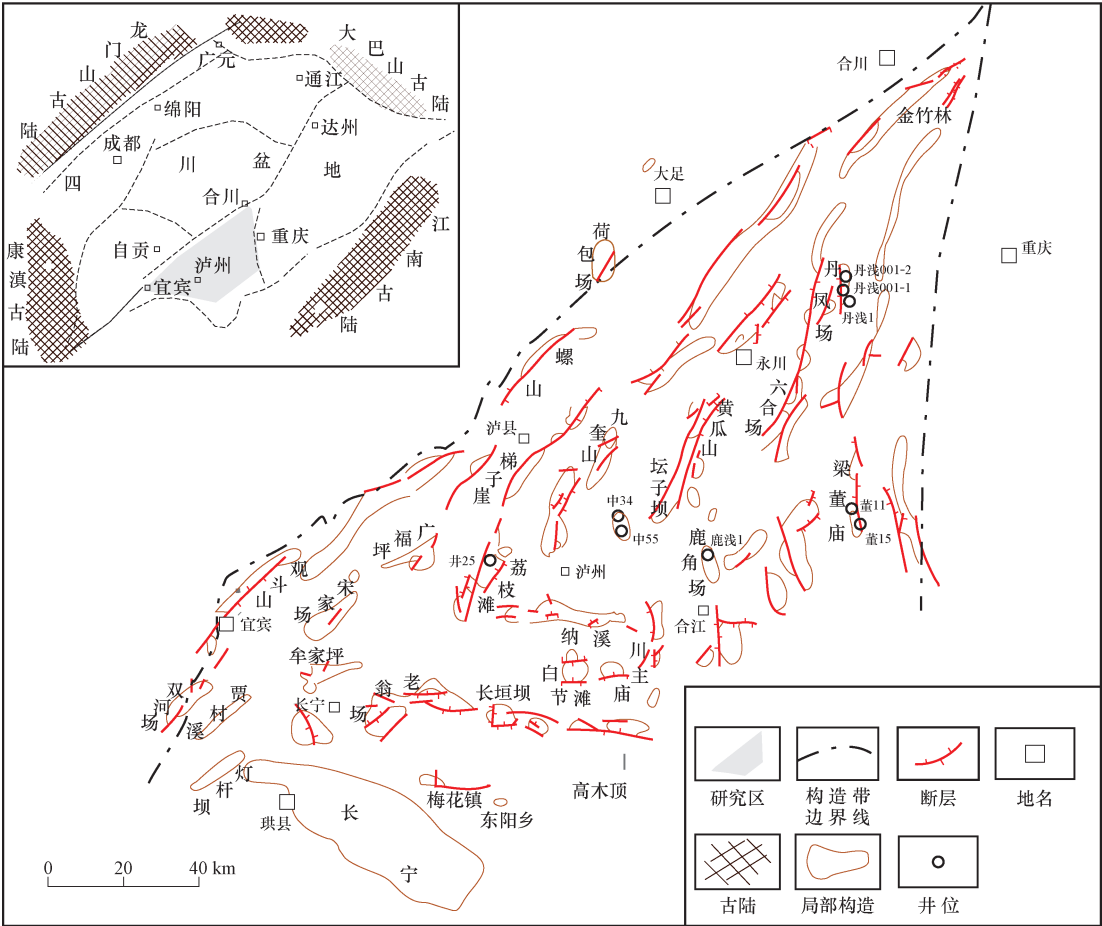


图 1 研究区构造纲要
Fig. 1 Structure outline map of the study area

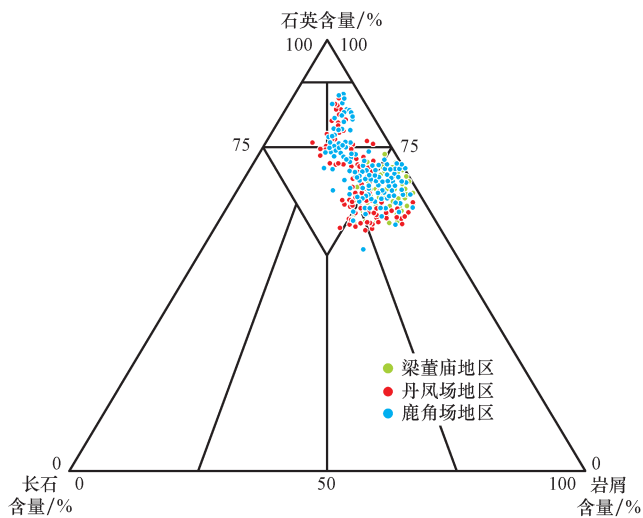


图 2 须家河组储层岩石组分三角图

Fig. 2 Composition triangle diagram of Xujiache Formation

的砂岩,粒度以中粒、中-细粒为主,分选中-低,磨圆度以次棱角状、次棱角-次圆状为主。岩石类型以岩屑砂岩最为发育,次为长石岩屑质石英砂岩、岩屑质石英砂岩、少量细粒钙质砂岩及粉砂岩(图 2)。平面上近物源的梁董庙构造几乎全部为岩屑砂岩,且分选较差,向盆内的丹凤场地区,长石岩屑质石英砂岩、岩屑质石英砂岩比例增加。

3 孔隙类型及物性特征

3.1 孔隙类型

对碎屑岩储集空间的分类,依照分类依据具有多种划分方案,如 Schmidt 等根据孔隙成因把孔隙分为原生、次生和混合成因,也可以根据孔隙大小分为超毛细管孔隙和微毛细管孔隙^[22]。本文根据孔隙成因将须家河组储集空间分为原生孔隙和次生孔隙,并根据产状等特征进一步细分(表 1)。

原生孔隙的主要为压实或胶结残余的粒间孔,压实残余孔没有胶结物充填,边缘平直,形状规则,更为常见的是压实之后的胶结残余孔隙,孔隙中常充填的胶结矿物包括石英次生加大和绿泥石环边(图 3a,b)。

表 1 研究区须家河组孔隙分类
Table 1 Pore classification of Xujiache Formation in the study area

孔隙类型	亚类	特征	比例/%
原生孔隙	压实残余孔隙	颗粒间残余孔隙,包括压实残余孔	51
	胶结残余孔隙	和胶结残余孔	
次生孔隙	粒间溶孔	颗粒边缘、杂基及胶结物溶蚀成因	12
	粒内溶孔	长石、岩屑等部分溶蚀成因孔隙	20
	铸模孔	长石、岩屑等溶蚀完全形成铸模孔	5
	晶间微孔	重结晶、胶结矿物之间孔隙	12
	微裂缝	构造成因,常切穿碎屑颗粒	—

粒间溶孔主要为碳酸盐胶结物、杂基溶蚀形成,由于溶蚀程度不均一,粒间溶孔常表现为孔隙边缘不规则(图 3c,d)。粒内溶孔主要为长石、岩屑颗粒不稳定成分溶蚀而成,长石的溶蚀一般沿解理发生,溶蚀孔隙沿解理缝分布,单个溶孔形状较为规则(图 3e),当溶蚀完全时形成铸模孔(图 3f)。

晶间微孔主要包括粒间杂基粘土重结晶形成的微小孔隙以及自生粘土胶结矿物之间的孔隙(图 3g,h)。这类孔隙过于细小,渗透能力差,对物性贡献小。

微裂缝一般为构造成因,常切穿碎屑颗粒、胶结物(图 3i)。微裂缝可作为溶蚀流体的通道,因此常见溶蚀孔隙分布于微裂缝周围,同时微裂缝的渗透能力强,对砂体物性有很好的改善作用。

根据 80 个铸体薄片资料统计,川南地区须家河组孔隙类型以原生粒间孔为主,占 51%,其次为粒内溶孔等各种溶蚀孔隙,占 37%,杂基微孔含量占 12%。孔隙比较发育的样品主要分布于靠近盆地内部丹凤场地区的丹 001-1,丹 001-2 及丹浅 1 井,平均面孔率为 2.80%,盆地边缘的董 11、董 15 井孔隙基本不发育,面孔率小于 1.0%。

3.2 物性特征

研究区 19 口井 2 030 个样品的孔渗数据显示须家河组砂岩岩心孔隙度最大为 12.5%,最小 0.08%,平均 4.09%;渗透率最大 $7.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最小 $0.003 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,具有明显的低孔、低渗特征。并且不同岩性孔隙度不同,其中钙质砂岩、粉砂岩及杂砂岩物性最差,孔隙度普遍小于 2.00%,岩屑质石英砂岩物性最好,平均孔隙度 5.93%,次为长石岩屑质石英砂岩和岩屑砂岩,平均孔隙度分别为 4.98%和 3.65%。

孔-渗关系显示渗透率随孔隙度增加而变化,具有明显的分带性,呈台阶式分布(图 4):孔隙度从 1%增至 3%时,渗透率迅速变高为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,甚至更高;孔隙度从 3%增加至 7%时,大部分样品渗透率位于 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,且整体上并未随孔隙度增加而增加。当孔隙度高于 7%时,随着孔隙度增加,渗透率再次增加。

4 孔隙及物性控制因素

储层的物性受多种因素的影响,包括沉积条件、成岩作用、构造运动、油气充注、异常高压等,其中沉积条件和成岩作用是最主要的影响因素^[23-25]。对研究区须家河组而言,沉积条件和成岩作用对储层物性都有影响,其中成岩作用是造成低孔、低渗的主要原因,而

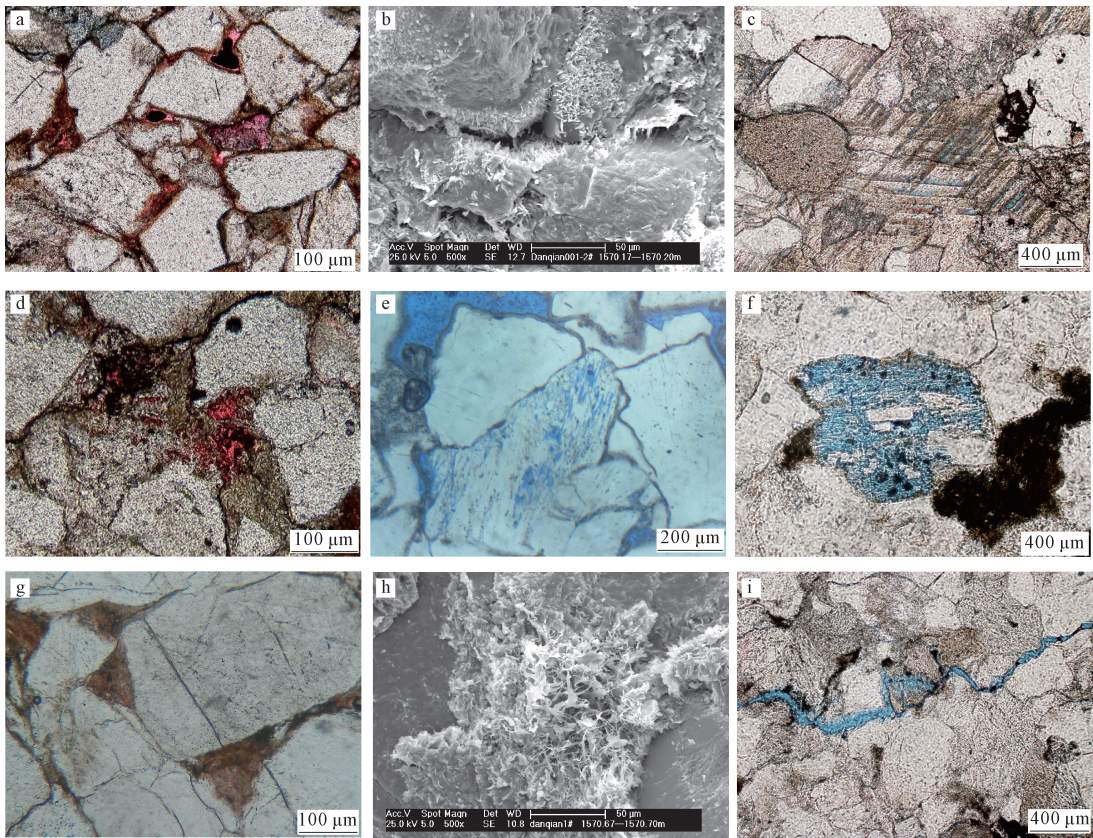


图 3 研究区须家河组孔隙类型

Fig. 3 Pore types of Xujiache Formation in the study area

a. 原生粒间孔,丹浅 001-1 井,1 565.20 m;b. 原生粒间孔,胶结残余,丹浅 001-2 井,1 570.17 m;c. 方解石胶结物微弱溶蚀孔,董 11 井,1 526.60 m;
d. 粒间杂基溶蚀孔,丹浅 1 井,1 568.70 m。e. 长石溶蚀孔,丹浅 001-1 井,1 569.90 m ;f. 铸模孔,井 25 井,1 439.99 m ;g. 粒间粘土晶间微孔,
红色铸体,丹浅 001-1 井,1 565.20 m ;h. 粒间伊利石晶间微孔,丹浅 1 井,1 570.67 m ;i. 微裂缝,穿粒缝,董 15 井,2 327.99 m

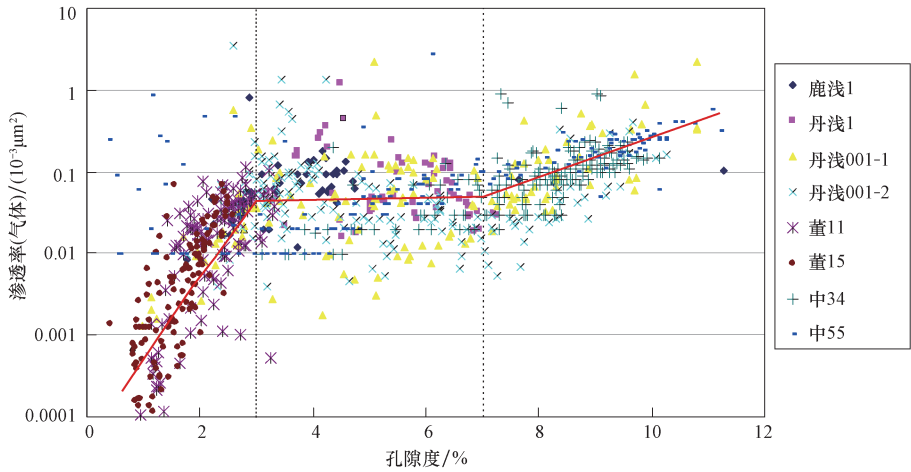


图 4 研究区孔隙度与渗透率分布

Fig. 4 Porosity versus permeability for Xujiache Formation

沉积条件在空间上影响孔隙及物性的变化。

4.1 成岩作用对孔隙发育的影响

4.1.1 早期压实、后期胶结及弱溶蚀导致孔隙整体不发育

研究区须家河组在沉积之后便经历了快速的埋

藏。根据对丹浅 001-1 和董 11 等多口井地层埋藏史的分析,须家河组在沉积之后发生了持续快速的埋深,以丹浅 001-1 井为例(图 5),晚三叠世须家河组沉积之后就经历了持续性的埋藏,至白垩纪末期埋深至最深,达 4 340 m,平均埋藏速率为 31.6 m/Ma。持续性快速的埋藏导致须家河组压实强烈(图 5)。

在经历早期快速埋藏之后,须家河组砂岩又发生

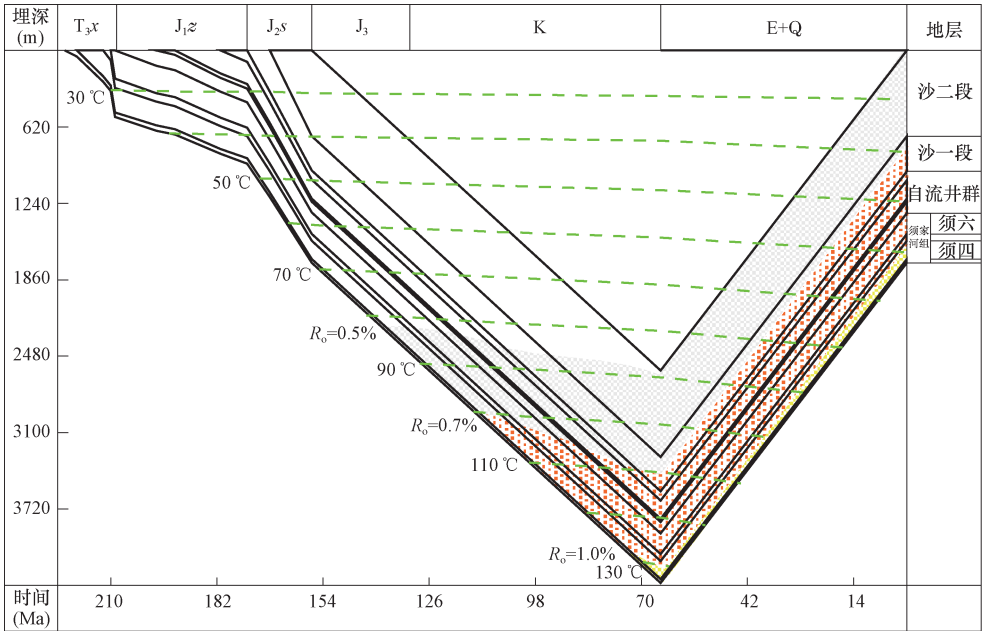


图 5 丹浅 001 - 1 井埋藏史
Fig. 5 Burial history of Well Danqian001-1

了硅质、钙质及少量粘土胶结 (平均含量 5.8%), 受到须家河组煤系地层酸性环境的影响, 碳酸盐胶结较少^[26] (平均含量 1.6%), 胶结物以硅质胶结为主 (平均含量 4.0%)。根据石英次生加大的流体包裹体测温显示, 硅质胶结大多发生于 80 ~ 100 °C (图 6), 对应埋藏深度为 2 000 ~ 3 000 m。说明以硅质为主的胶结作用对储层孔隙的充填主要发生于 2 000 m 之后, 2 000 m 之前主要为压实损孔作用。

假设现今的残余原生孔隙 = 孔隙度 × 原生孔比例 = 4.09% × 51% = 2.09%, 当早期埋藏至 2 000 m 时 (R_o : 0.4% ~ 0.5%), 此时有机酸溶蚀开始发生, 而硅质胶结作用并未大量出现, 砂岩古孔隙度可估算为胶结物损孔量 (所有胶结物平均含量) + 残余孔隙度 = 5.80% + 2.09% = 7.89%, 但实际上, 由于在 2 000 m 之前仍会出现部分硅质、钙质及粘土胶结, 因此当埋藏至 2 000 m 时, 砂岩古孔隙度应低于 7.89%, 参考现今的孔渗关系, 此时砂岩的渗透率应普遍小于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 因此经过早期的埋藏之后

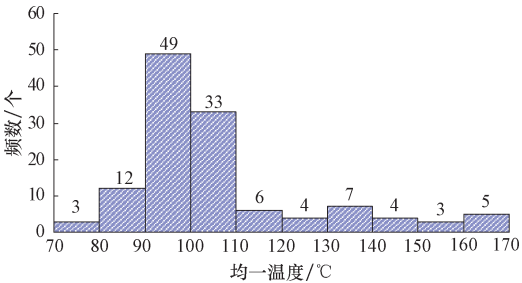


图 6 石英次生加大边流体包裹体均一温度分布
Fig. 6 Homogenization temperature distribution of fluid inclusions in quartz cement

须家河组已经致密。
溶蚀作用可以形成次生孔隙, 研究区须家河组溶蚀对象主要为长石和岩屑, 但强度较弱, 多为部分溶蚀, 溶孔比例较低 (37%), 导致溶蚀作用弱的原因包括 3 个方面: ①酸性水缺乏, 须家河组沉积时, 沉积中心位于川西地区^[16-17], 远离研究区, 盆地中心的酸性水很难经过长距离横向运移之后对目的层段进行溶蚀。而纵向上研究区须家河组本身烃源岩不发育, 因此不能产生大量的有机酸; ②缺少可溶矿物, 须家河组碎屑颗粒主要为石英和岩屑, 长石含量普遍小于 10%, 岩屑多以泥岩、千枚岩和石英岩等难溶岩屑为主, 易溶岩屑含量少; ③早期致密化严重, 须家河组砂岩在烃源岩开始产生有机酸时, 已经发生强烈的压实作用, 早期的致密化会阻碍酸性水进入厚层砂体内部发生溶蚀。

4.1.2 绿泥石环边胶结利于原生孔隙保存

强烈压实作用后剩余的原生孔隙会因为石英次生加大和碳酸盐胶结作用而进一步损失, 但如果砂岩发育绿泥石环边胶结, 残余原生孔隙便会得到较好的保存 (图 7)。统计显示绿泥石含量与岩心孔隙度存在较好的正相关性 (图 8a)。

一般认为自生绿泥石胶结有利于原生的孔隙的保存^[7,27-29]: 一方面自生绿泥石胶结可以提高砂岩的机械强度, 对压实压溶有一定抑制作用, 镜下也显示这类砂岩的压实程度相对于无绿泥石胶结砂岩要弱。更重要的是绿泥石环边胶结有效的抑制了压实之后方解石、硅质的胶结, 统计显示, 绿泥石环边对方解石胶结

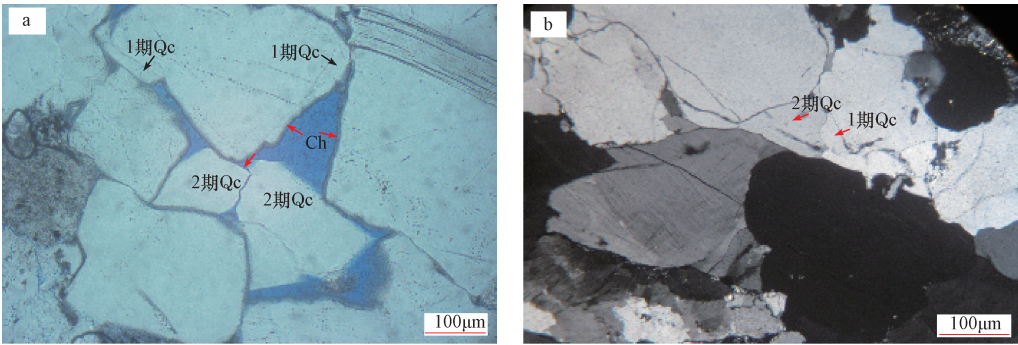


图 7 绿泥石胶结砂岩孔隙发育情况与无绿泥石胶结砂岩对比

Fig. 7 Pore abundance comparison between sandstones with and without chlorite coating cementation

a. 丹浅 001-1 井, 1 569.90 m, 单偏光, 绿泥石胶结, 残余原生孔隙发育; b. 丹浅 001-1 井, 1 464.26 m, 正交光, 绿泥石环边不发育, 粒间全部被石英加大充填
Qc. 石英; Ch. 绿泥石

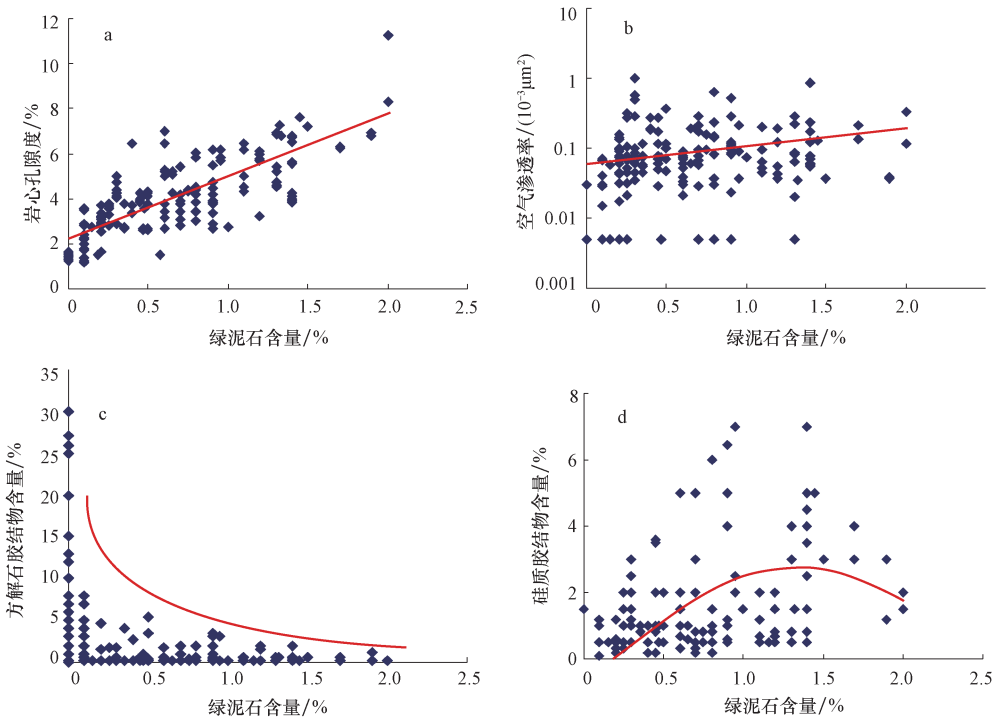


图 8 须家河组绿泥石含量与物性、硅质、方解石胶结关系(薄片个数 200 个)

Fig. 8 Chlorite content vs. porosity, permeability, quartz and calcite cementation of Xujiahe Formation (based on 200 thin sections)

具有明显的抑制作用,随着绿泥石含量的增加,方解石胶结迅速减少(图 8c);而绿泥石与硅质胶结含量的关系呈规律变化,当绿泥石含量小于 1% 时,两者呈一定的正相关性,大于 1% 时呈负相关性(图 8d),说明在绿泥石环边相对发育的砂岩中,硅质胶结受到了一定的抑制。绿泥石对方解石和硅质胶结的抑制对压实残余孔隙的保存至关重要。

4.2 沉积条件对孔隙发育的影响

沉积条件决定了砂岩沉积时的搬运距离和水动力条件,从而决定了砂岩的岩石学特征进而影响空间上孔隙的发育程度。

川南地区物源来自于江南古陆,碎屑沿东南向西北盆内方向搬运^[21],物性数据显示搬运距离短的砂岩物性差于长搬运距离的砂岩。以埋藏史相似的梁董庙和丹凤场地区为例,梁董庙地区现今埋深 1 500 ~ 1 800 m,该区砂体发育,厚度大,但物性差,平均孔隙度 2.00%,渗透率普遍小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要原因是靠近物源区,搬运距离短,水动力不稳定,碎屑颗粒常大小混杂,泥岩、板岩和千枚岩等塑性岩屑含量高(平均 18.6%),不利于孔隙的保存(图 9)。而研究区靠盆内的丹凤场、中兴场地区,由于搬运距离增加,碎屑分选变好,不稳定的塑性碎屑减少(平均含量 10.5%),物性明显变好,其砂岩平均孔隙度 5.5%,平

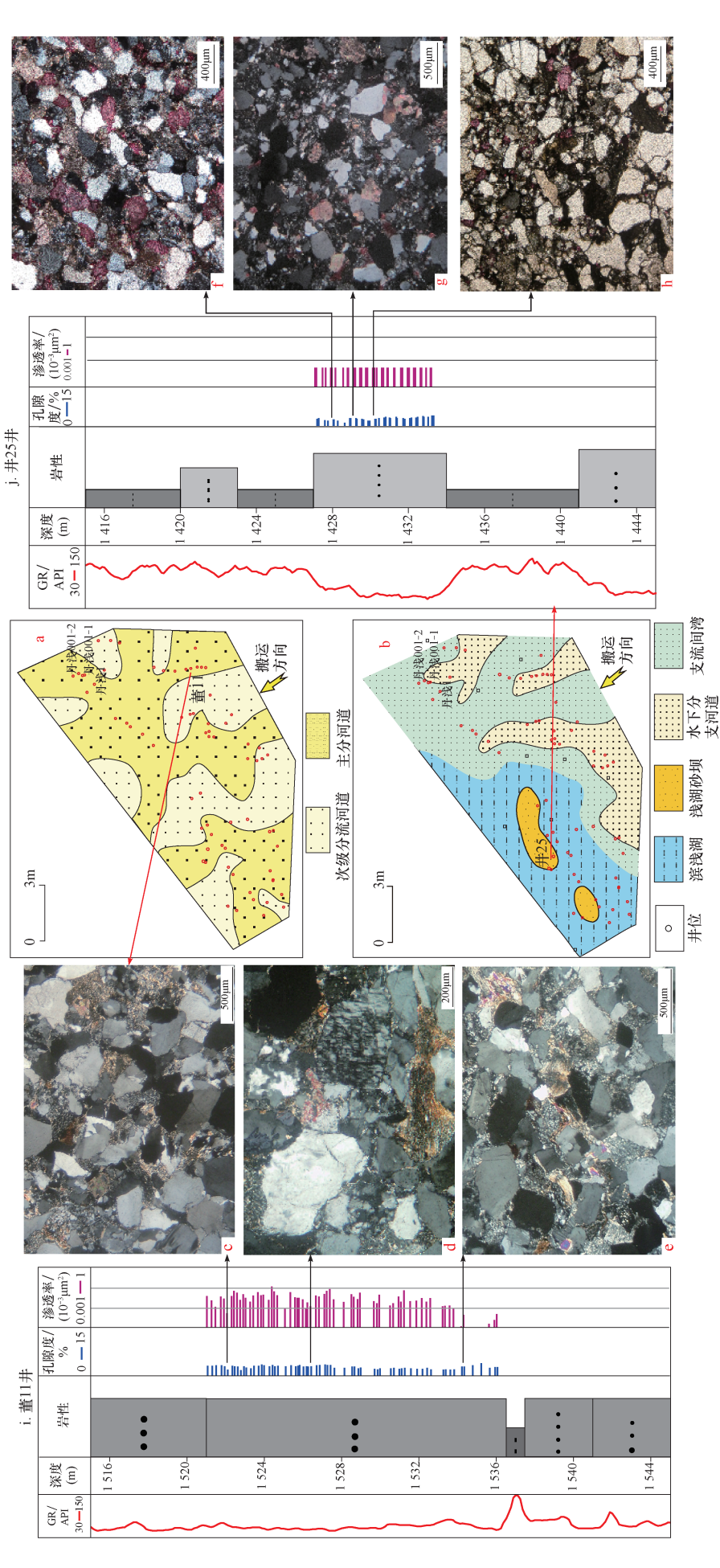


图9 研究区短距离搬运辫状河道砂体（董11）及滩坝砂体物性变化特征（井25）

a. 须四段沉积相图；b. 须六²亚段沉积相展布；c. 1 522.86 m, 须四段, 中粒岩屑砂岩, 分选差, 压实强烈, 孔隙少；
f. 1 428.0 m, 须六²亚段, 细粒钙质砂岩, 靠近砂、泥界面, 钙质胶结发育, 孔隙少；g. 1 429.46 m, 须六²亚段, 中-细粒岩屑砂岩, 分选差, 钙质胶结, 孔隙少；h. 1 430.50 m, 须六²亚段, 中-细粒岩屑砂岩, 分选差, 压实强烈, 孔隙不发育

均渗透率 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。再至川中南的河包场地区,由于搬运距离更远,其岩石类型以石英砂岩、岩屑石英砂岩、长石石英砂岩为主,加之靠近沉积中心的烃源岩,次生孔比例增加,孔隙类型以残余孔和次生溶孔为主,平均孔隙度达 6.08%^[30]。

随着搬运距离增加,物性的差异则更多受控于水动力条件,岩心物性统计显示主分流河道物性最好,平均孔隙度 6.10%,平均渗透率 $0.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其次为次级河道和水下分流河道,平均孔隙度分别为 4.5% 和 5.59%,平均渗透率为 $0.19 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而河道间砂岩及滩坝砂岩物性最差,平均孔隙度均小于 3%,平均渗透率小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。主要原因为沉积水动力较弱的河道间及滨浅湖滩坝砂体粒度偏细,杂基含量高,且由于围岩泥岩发育,碳酸盐岩胶结严重,物性一般较差,如南井地区的滩坝砂体(图 9)。而沉积水动力较强的砂体如丹凤场地区须四

段主河道砂体粒度粗、分选好、杂基含量少,孔隙相对发育(图 10)。

在单一河道砂体内部,仍可以观察到物性具有一定差异,呈现出三段式分布(图 10),砂体中-中、下部的孔隙度好于顶部和底部。这种分布的成因包括两个方面:①沉积水动力条件的变化,即河道沉积过程中,河流对早期泥岩的冲蚀导致河道底部分选较差,随着河道迁移,水动力减弱,至砂体顶部多为低水动力的细粒沉积,因此纵向上,砂岩中部的结构和成分成熟度要好于顶底部,利于原生孔隙保存;②纵向岩石学特征变化引起的成岩作用差异。砂体顶、底部由于粒度细、杂基含量高或分选差,在埋藏过程中更易被压实,同时受相邻泥岩影响,也易发生较强的碳酸盐胶结,孔隙不发育。河道砂体中-中下部由于粒度粗、分选好,压实程度相对低,早期就出现的绿泥石环边胶结也多发育于砂体内部,利于孔隙保存,物性较好。

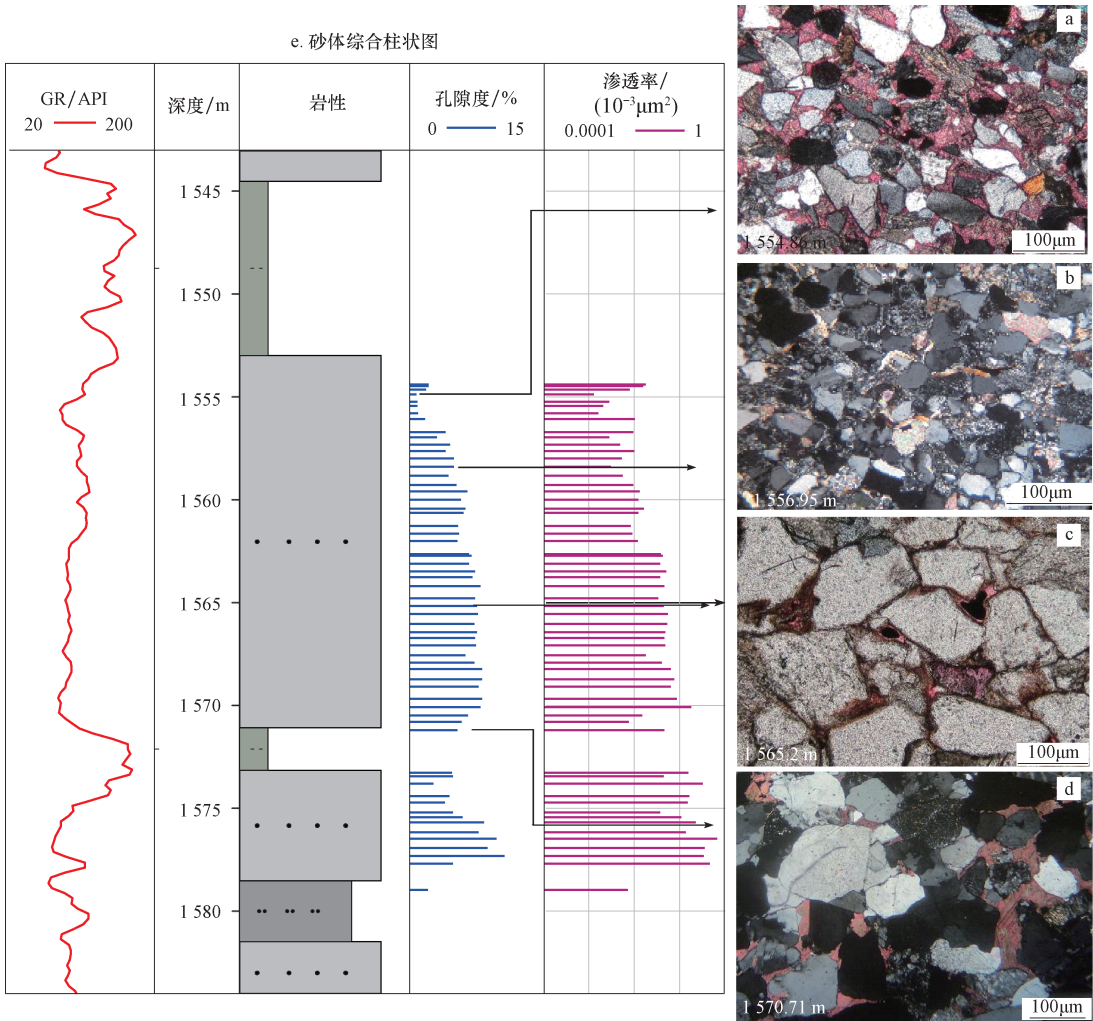


图 10 丹浅 001-1 井须四段主河道砂体物性变化特征(井位见图 9)

Fig. 10 Heterogeneity of porosity and permeability within a fluvial sandstone of the 4th Member of Xujiahe Formation from Well Danqian 001-1 (see Fig. 9 for well location)

[最顶部砂岩发生早期方解石胶结;向下第二样品粒度细,压实强;而最底部砂岩分选较差,且也发生了方解石胶结。只有河道中部砂岩成分、结构成熟度高,原生孔隙保存最好(孔隙充填浅红色铸体)。]

4.3 孔、渗关系控制因素

孔、渗关系显示不同孔隙度条件下,渗透率具有不同的分布特征和变化规律。这种台阶式孔、渗关系是岩石学特征与成岩作用共同作用的结果。

孔隙度小于 3% 的样品在压汞曲线上表现为排驱压力高,大于 2 MPa (图 11a),孔喉中值半径小,小于 0.2 μm (图 11b),这类砂岩主要为近物源分选较差的岩屑砂岩以及弱水动力环境的细粒岩、粉砂岩,经历强烈成岩作用后,孔隙几乎损失殆尽,孔喉半径小,孔隙即是吼道 (图 12a),孔隙度略微增加时,渗透率便会快速增加。

当孔隙度为 3% ~ 7% 时,渗透率变化小,主要分布于 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,压汞排驱压力降低,主要分布于 0.5 ~ 2 MPa,孔喉中值半径增大,主要为 0.2 ~ 0.8 μm,且排驱压力和中值半径随孔隙度增加变化较小 (图 11)。由于渗透率主要受控于喉道半径,因此孔隙度为 3% ~ 7% 的砂岩孔喉变化较小,是渗透率相对稳定的直接原因,结合薄片及扫描电镜资料认为这主要由两个方面因素造成。

第一,孔隙度为 3% ~ 7% 的砂岩其孔隙及吼道偏小,绿泥石环边虽然对孔隙保存有利,但对细小孔隙和吼道的充填仍会损害渗透能力。以图 12 样品 b 和 c 为例,样品 c 孔隙度 (7.03%) 高于样品 b (5.01%),但因样品 c 孔隙中存在绿泥石环边及部分伊利石胶结,其渗透率 ($0.0505 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 要小于样品 b ($0.0763 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。绿泥石含量与物性关系也显示随绿泥石含量增加砂岩孔隙度增大,而渗透率并未随之增加 (图 8),这也反应绿泥石胶结物利于孔隙保存,但对喉道的充填会抵消孔隙度增加对渗透率的贡献。由于原生粒间孔是研究区主要孔隙类型 (平均含量 51%),因此绿泥石胶结对孔喉的充填是导致渗透率未随孔隙度增加而增大的主要原因。

其次,须家河组砂岩由于溶蚀作用弱且不均一,孔喉弯曲度大,连通性差,同时长石的溶蚀常伴随着发丝

状自生伊利石的沉淀,堵塞孔隙和喉道。此外,杂基粘土矿物重结晶或蚀变后会形成的部分微孔隙 (比例 12%),但渗透性同样很差,因此粒内溶孔、粘土微孔虽然可以提高孔隙度,但对渗透率影响小。

当孔隙度较高时 (>7%),此时随孔隙度增加,排驱压力减小,一般小于 1 MPa,中值半径快速增大 (>0.8 μm),薄片及扫描电镜显示此类砂岩孔隙保存较好,孔喉较粗且直径大于绿泥石环边厚度 (图 12d),因此随孔隙度增加,渗透率又开始增高,此时绿泥石环边的作用主要为抑制钙质、硅质胶结和保护孔隙,对渗透率的损害较小。

5 须家河组孔隙及物性变化模式

通过分析近物源的梁董庙地区,到靠研究区东北部的丹凤场,再到川中 - 川南过渡带的荷包场地区可以发现,这些地区须家河组沉积时物源、构造背景及埋藏过程相似:均为东南物源供源,沉积时构造宽缓,早期沉积之后便持续快速埋藏至最大深度 (4 200 ~ 4 900 m),在喜马拉雅期才抬升至现今埋深。因此这些地区须家河组储层特征具可对比性,储层孔隙和物性随搬运距离、沉积水动力条件的变化表现出一定的规律性 (图 13):近物源的梁董庙地区砂岩塑性岩屑、杂基含量高,分选差,埋藏过程中易发生强烈压实,孔隙不发育,随着搬运距离增加,强水动力条件的河道砂岩成分及结构成熟度变好,压实程度降低,绿泥石胶结发育,原生孔隙保存好,如研究区丹凤场河道砂岩。再至川中南过渡带的荷包场地区,成分及结构成熟度更好,加之靠近沉积中心,溶蚀孔隙比例增加,孔隙类型以原生和次生孔隙为主^[30],物性最好。

6 结论

1) 川南地区须家河组孔隙发育程度低,孔隙类型以残余原生粒间孔为主,次为溶蚀孔隙和晶间微孔。

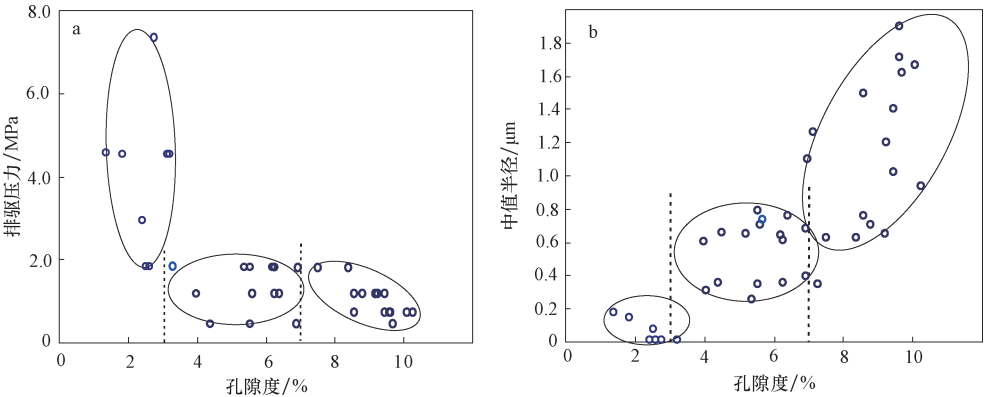


图 11 须家河组压汞参数与孔隙度变化特征

Fig. 11 Plot of porosity versus median size of pore throat and displacement pressure of Xujiahe Fomation

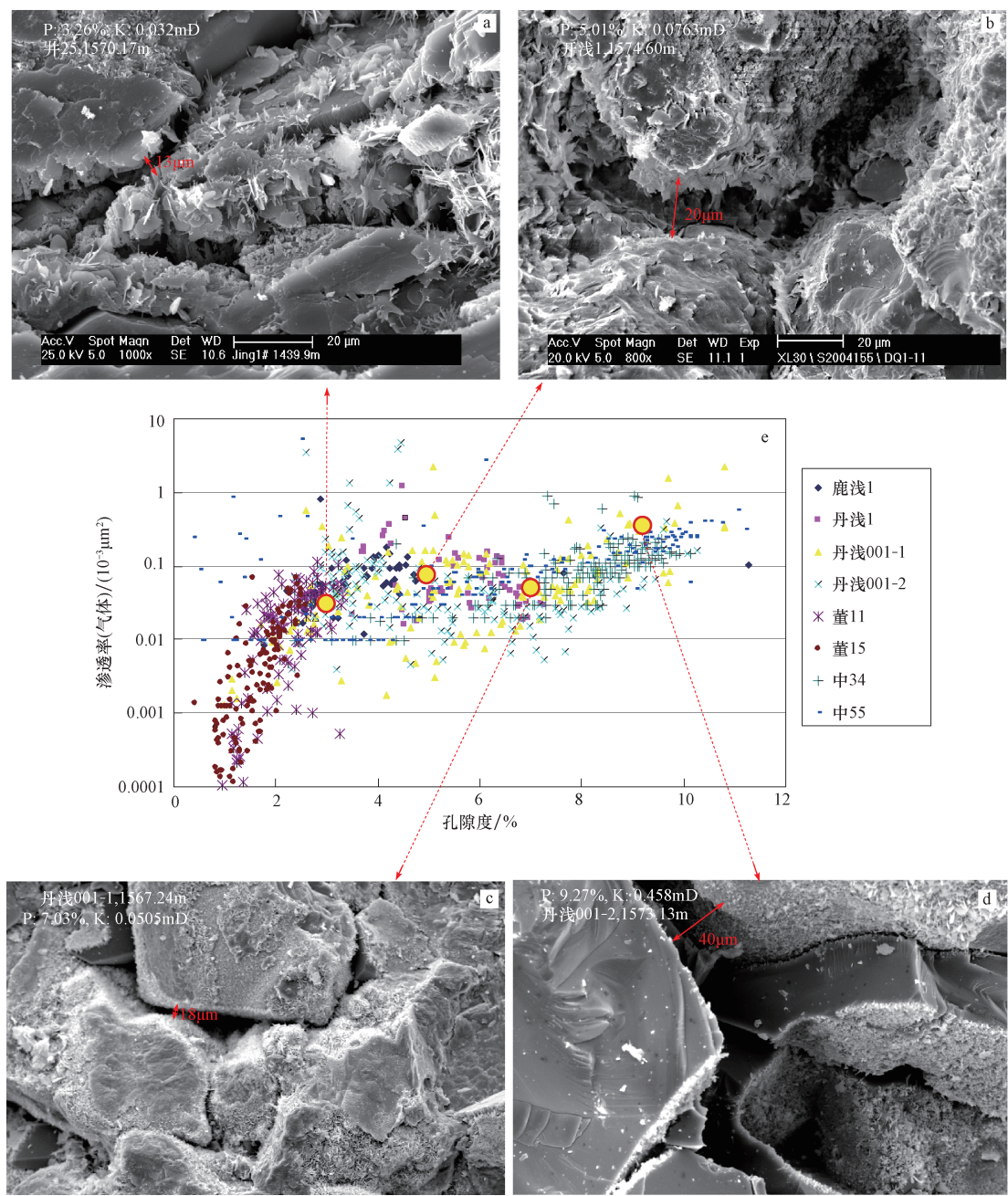


图 12 不同孔隙度样品的吼道特征

Fig. 12 Pore throat characteristic of sandstone samples with different porosity

- a. 低孔隙度条件下,孔隙与吼道均细小,渗透率低;b,c. 粘土矿物对孔隙的充填抵消了孔隙度增加对渗透率的贡献;
d. 孔隙度继续增加,粘土矿物对渗透率影响减弱

孔隙发育程度受控于成岩作用和沉积条件。早期持续快速压实,后期胶结及溶蚀弱导致研究区须家河组孔隙整体不发育,绿泥石环边胶结对原生孔隙的保存使得残余原生孔是研究区主要孔隙类型。

2) 空间上,砂岩物性的变化与沉积条件密切相关,短距离搬运或沉积水动力弱的砂岩成分及结构成熟度差,物性差,长距离搬运且沉积于强水动力条件的砂体孔隙发育,有利储层主要分布于具一定搬运距离的主河道砂体中。

3) 纵向上,单一河道砂体内部物性呈顶底差而

中-中下部好的三段式分布,原因是沉积时水动力由强变弱,砂体中部成分、结构成熟度好于顶底部,利于孔隙保存,岩石学特征的差异在埋藏过程中又进而影响砂体不同部位的成岩强度并最终导致了孔隙的三段式纵向分布。

4) 渗透率随孔隙度增加呈迅速增加—稳定—再次增加的三段式分布,这与不同孔隙度条件下砂岩喉道半径变化有关,低孔隙度时,孔喉细小,孔隙即为喉道,随孔隙度增加渗透率快速增加,当孔隙度为3%~7%时,渗透率未随孔隙度增加的主要原因为

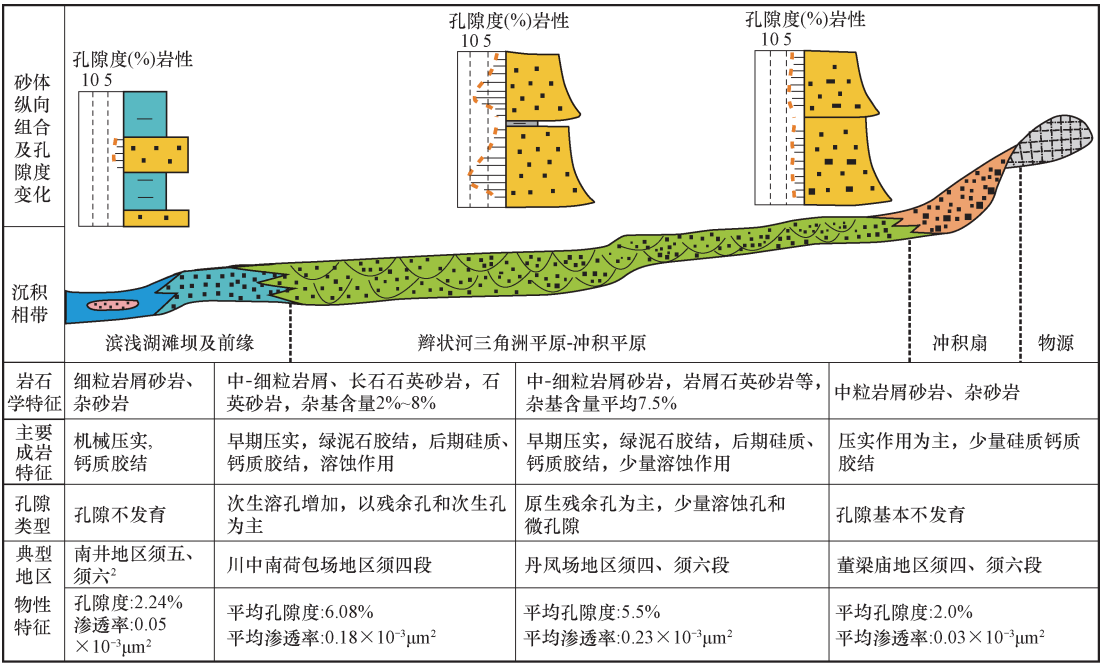


图 13 须家河组砂岩物性变化模式(沉积相展布改自谭秀成,2008)

Fig. 13 Porosity spatial distribution pattern of Xujiahe sandstone in southern Sichuan Basin
(sedimentary facies is modified after Tan Xiucheng,2008)

绿泥石等自生粘土矿物对孔喉的充填有关,而当孔隙度大于7%时,孔喉半径大于粘土环边厚度,渗透率随孔隙度增加再次增加。

参 考 文 献

[1] 柯光明,郑荣才,高红灿,等. 四川盆地须家河组高分辨率层序-岩相古地理特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2008,35(6):630-638.
Ke Guangming,Zheng Rongcai,Gao Hongcan,et al. High-resolution sequence stratigraphy and the lithofacies paleogeographic characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008,35(6):630-638.

[2] 朱如凯,赵霞,刘柳红,等. 四川盆地须家河组沉积体系与有利储集层分布[J]. 石油勘探与开发,2009,36(1):46-56.
Zhu Rukai,Zhao Xia,Liu Lihong,et al. Depositional system and favorable reservoir distribution of Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development 2009,36(1):46-56.

[3] 谢武仁,李熙喆,张满郎,等. 川西南地区上三叠统须家河组砂岩储层综合评价[J]. 天然气地球科学,2008,19(1):94-99.
Xie Wuren,Li Xizhe,Zhang Manlang,et al. Reservoir evaluation of Upper Triassic Xujiahe Formation in southwest Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience,2008,19(1):94-99.

[4] 张峭楠. 四川盆地西部须家河组砂岩储层成岩作用及致密时间讨论[J]. 矿物岩石,2009,29(4):33-38.
Zhang Shaonan. Discussion on the diagenesis and timing of tight sandstone reservoir in Xujiahe Formation, Western Sichuan Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology,2009,29(4):33-38.

[5] 董贞环. 四川盆地西部须家河组致密砂岩成岩作用与孔隙演化模式[J]. 岩相古地理,1994,14(2):33-41.
Dong Zhenhuan. Model for diagenesis and porosity evolution of the dense

sandstones from the Xujiahe Formation in Western Sichuan Basin [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography,1994,14(2):33-41.

[6] 王伟,王兴志,张帆,等. 四川广安地区须家河组四段储层成岩作用与孔隙演化[J]. 世界地质,2010,29(1):96-103.
Wang Wei,Wang Xingzhi,Zhang Fan,et al. Diagenesis and pore evolution of reservoir in the 4th Member of Xujiahe Formation in Guang'an area of Sichuan Province [J]. Global Geology,2010,29(1):96-103.

[7] 黄思静,谢连文,张萌,等. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系[J]. 成都理工大学学报,2004,31(3):273-281.
Huang Sijing,Xie Lianwen,Zhang Men,et al. Formation mechanism of authigenic chlorite and relation to preservation of porosity in non-marine Triassic reservoir sandstones,Ordos Basin and Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology,2004,31(3):273-281.

[8] 谢武仁,杨威,赵杏媛,等. 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,2010,37(6):674-680.
Xie Wuren,Yang Wei,Zhao Xingyuan,et al. Influences of chlorite on reservoir physical properties of the Xujiahe Formation in the central part of Sichuan Basin [J] Petroleum Exploration and Development, 2010,37(6):674-680.

[9] 刘金库,彭军,刘建军,等. 绿泥石环边胶结物对致密砂岩孔隙的保存机制—以川中-川南过渡带边界地区须家河组储层为例[J]. 石油与天然气地质,2009,30(1):53-60.
Liu Jinku,Peng Jun,Liu Jianjun,et al. Pore-preserving mechanism of chlorite rims in tight sandstone—an example from the T³x Formation of Baojie area in the transitional zone from the central to southern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology,2009,30(1):53-60.

[10] 孙治雷,黄思静,张玉修,等. 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[J]. 沉积学报,2008,26(3):459-468.

- Sun Zhilei, Huang Sijing, Zhang Yuxiu, et al. Origin and diagenesis of authigenic chlorite within the sandstone reservoirs of Xujiahe Formation, Sichuan Basin, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(3): 459–468.
- [11] 田建锋, 陈振林, 杨友运. 自生绿泥石对砂岩储层孔隙的保护机理[J]. *地质科技情报*, 2008, 27(4): 49–55.
- Tian Jianfeng, Chen Zhenlin, Yang Youyun. Protection mechanism of authigenic chlorite on sandstone reservoir pores [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2008, 27(4): 49–55.
- [12] 姚泾利, 王琪, 张瑞, 等. 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[J]. *沉积学报*, 2011, 29(1): 73–80.
- Yao Jingli, Wang Qi, Zhang Rui, et al. Forming mechanism and their environmental implications of Chlorite-coatings in Chang 6 Sandstone (Upper Triassic) of Hua-Qing Area, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 73–80.
- [13] 刘林玉, 曲志浩, 孙卫, 等. 新疆鄯善油田碎屑岩中的粘土矿物特征[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 1998, 28(5): 443–446.
- Liu Linyu, Qu Zhihao, Sun Wei, et al. Properties of clay mineral of clastic rock in Shanshan Oil Field, Xinjiang [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 1998, 28(5): 443–447.
- [14] 钟广法, 林社卿, 侯方浩. 泌阳凹陷核三下亚段砂岩成岩作用及储集性[J]. *矿物岩石*, 1996, 16(2): 40–46.
- Zhong Guangfa, Ning Sheqin, Hou Fanghao. Diagenesis and reservoir quality of sandstones of Lower He-3 member (Paleogene) Biyang depression, Henan, China [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1996, 16(2): 40–46.
- [15] 罗志立. 扬子古板块的形成及其对中国南方地壳发展的影响[J]. *地质科学*, 1979, (4): 127–138.
- Luo Zhili. On the occurrence of Yangtze old plate and its influence on the evolution of lithosphere in the southern part of China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1979, (4): 127–138.
- [16] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 159–260.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan. Regional Geology of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 159–260.
- [17] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 200.
- Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. Formation and evolution of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 200.
- [18] 秦起荣, 苏培东, 李乐, 等. 川中低缓构造成因[J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(1): 108–111.
- Qin Qirong, Su Peidong, Li Le, et al. Origin of Low structures in Central Sichuan Area [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(1): 108–111.
- [19] 罗志立. 中国西南地区晚古生代以来地裂运动对石油等矿产的影响[J]. *四川地质学报*, 1981, 2(1): 1–2.
- Luo Zhili. Effect of taphrogenesis on the oil and other mineral since Neopaleozoic in the southwest China [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1981, 2(1): 1–2.
- [20] 施振生, 杨威, 金惠, 等. 川中—川南地区上三叠统沉积相研究[J]. *沉积学报*, 2008, 26(2): 211–221.
- Shi Zhensheng, Yang Wei, Jin Hui, et al. Study on sedimentary facies of the Upper Triassic in Central and South Sichuan Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 211–221.
- [21] 谢继容, 李国辉, 唐大海. 四川盆地上三叠统须家河组物源供给体系分析[J]. *天然气勘探与开发*, 2006, 29(4): 1–5.
- Xie Jirong, Li Guohui, Tang Dahai. Analysis on provenance-supply system of upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2006, 29(4): 1–5.
- [22] 聂逢君, 姜美珠, 李思田, 等. 砂岩对热流体作用的响应及识别标记: 以珠江口盆地西部为例[J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 581–591.
- Nie Fengjun, Jiang Meizhu, Li Sitian, et al. The responses of sandstone to hot fluid flow and their identified markers a case study from the western part of the Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 581–591.
- [23] 郑浚茂, 应凤祥. 煤系地层(酸性水介质)的砂岩储层特征及成岩模式[J]. *石油学报*, 1997, 18(4): 19–24.
- Zheng Junmao, Ying Fengxiang. Reservoir characteristics and diagenetic model of sandstone intercalated in coal-bearing strata (Acid water medium) [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1997, 18(4): 19–24.
- [24] 钟大康, 朱筱敏, 张枝焕, 等. 东营凹陷古近系砂岩储集层物性控制因素评价[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 95–98.
- Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhang Zhihuan, et al. Controlling factors of sandstone reservoir of the Paleogene in Dongying Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 95–98.
- [25] 钟大康, 朱筱敏, 周新源. 塔里木盆地中部泥盆系东河砂岩成岩作用与储集性能控制因素[J]. *古地理学报*, 2003, 8(3): 378–389.
- Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhou Xinyuan. Diagenesis and controlling factors of reservoir quality of Devonian Donghe sandstones in central Tarim basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2003, 8(3): 378–389.
- [26] 祝海华, 钟大康, 李其荣, 等. 四川盆地蜀南地区上三叠统须家河组低孔低渗储层特征及形成机理[J]. *沉积学报*, 2013, 31(1): 167–175.
- Zhu Haihua, Zhong Dakang, Li Qirong, et al. Characteristics and controlling factors of Upper Triassic Xujiahe tight sandstone reservoir in Southern Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 167–175.
- [27] Amthor J E, Okkerman J. Influence of early diagenesis on reservoir quality of Rotliegende sandstones, Northern Netherland [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(12): 2246–2265.
- [28] Ehrenberg S N. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain-coating chlorite; examples from the Norwegian Continental Shelf [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77: 1260–1286.
- [29] Pittman E D, Lumsden D N. Relationship between chlorite coatings on quartz grains and porosity, Spiro Sand, Oklahoma [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1968, 38: 668–670.
- [30] 张胜斌, 王琪, 李小燕, 等. 川中南河包场须家河组砂岩沉积—成岩作用[J]. *石油学报*, 2009, 30(2): 225–231.
- Zhang Shengbin, Wang qi, Li Xiaoyan, et al. Depositional diagenetic coupling complex of Xujiahe sandstone in Hebaochang Block in the south part of the Central Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(2): 225–231.