

基于岩相的致密砂岩差异成岩作用及其储层物性响应

——以准噶尔盆地莫西庄地区下侏罗统三工河组为例

王宏博¹, 马存飞¹, 曹 铮², 李志鹏³, 韩长城⁴, 纪文明¹, 杨 艺⁴

[1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 重庆科技学院 石油与天然气工程学院, 重庆 401331; 3. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 4. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000]

摘要:综合利用岩心观察、铸体薄片鉴定、扫描电镜观察、样品孔渗测试和压汞分析等资料,结合区域埋藏史和油气充注史,对准噶尔盆地莫西庄地区下侏罗统三工河组储层成岩作用、岩相差异成岩机理及储层孔隙结构进行研究和对比分析。结果表明:三工河组在成岩演化过程中主要经历了机械压实作用、胶结作用和溶蚀作用。不同岩相储层成岩机理差异明显,钙质砂岩相、含泥质炭质纹层砂岩相和富火山凝灰质杂基砂岩相在早成岩阶段储层就趋于致密,至中成岩阶段成岩作用强度较弱;块状砂岩相在早成岩阶段孔隙保存完好,中成岩阶段流体运移通畅,经历了多期次的胶结作用和溶蚀作用;含砾砂岩和砾岩相砾石含量高,流体运移不畅,早成岩阶段压实作用弱,中成岩阶段表现为弱胶结、弱溶蚀的特征。岩相不同的成岩机理对孔隙结构产生了决定性的影响,钙质砂岩相与含泥质炭质纹层砂岩相的孔隙连通性差、结构复杂,整体物性较差,不利于油气富集;块状砂岩相的孔喉分选性好,孔隙在所有岩相中最为发育且连通性强,整体物性好,有利于油气富集;含砾砂岩和砾岩相的颗粒分选差并紧密接触,孔隙连通性受到一定限制,但破坏性成岩作用强度较弱,总体物性较好,可以形成有效的油气储层。

关键词:差异成岩演化;成岩作用机理;孔隙结构;岩相;致密砂岩储层;三工河组;莫西庄地区;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Differential diagenesis and reservoir physical property responses of tight sandstone based on lithofacies: A case study on the Lower Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang area, Junggar Basin

WANG Hongbo¹, MA Cunfei¹, CAO Zheng², LI Zhipeng³, HAN Changcheng⁴, JI Wenming¹, YANG Yi⁴

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China; 4. School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830000, China]

Abstract: An integration of core observation, casting thin section identification, scanning electron microscopy (SEM) observation, porosity-permeability test of samples and mercury intrusion porosimetry (MIP), in combination with the local burial and hydrocarbon charging history, is applied to the study on the diagenesis, differential lithofacies-based diagenesis mechanism and reservoir pore structure of the Sangonghe Formation in Moxizhuang area, Junggar Basin. The results show that the Sangonghe Formation mainly experienced mechanical compaction, cementation and dissolution during the diagenetic evolution. Reservoirs of diverse lithofacies are significantly different in diagenetic mechanism: the calcareous sandstone facies, argillaceous carbonaceous sandstone facies and volcanic tuffaceous matrix sandstone facies tend to get tight in the early diagenetic stage, while featuring weak diagenesis intensity in the middle stage; the pores of the massive sandstone facies are well preserved in the early diagenetic stage with smooth fluid migration in the middle stage, and there are multi-stage cementation and dissolution occurring in between; and the conglomeratic sandstone and

收稿日期:2023-03-30;修回日期:2023-06-01。

第一作者简介:王宏博(1999—),男,硕士研究生,非常规油气储层地质学。E-mail: 1240840474@qq.com。

通信作者简介:马存飞(1987—),男,博士、副教授,非常规油气储层地质学和油气藏开发地质学。E-mail: mcf-625@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42172153)。

conglomerate facies feature high gravel content, resulting in poor fluid migration, and weak compaction in the early diagenetic stage, while characterized by weak cementation and weak dissolution in the middle stage. The different diagenetic mechanisms for the lithofacies serve to determine the pore structure. The calcareous sandstone facies and argillaceous carbonaceous sandstone facies of lamination texture have poor pore connectivity, complex structure and poor overall physical properties, which are not conducive to oil and gas enrichment; the pore throat of the massive sandstone facies is well sorted, and the pores of the facies are the most developed with strong connectivity, resulting in good overall physical properties, conducive to oil and gas enrichment; the particles of conglomeratic sandstone and conglomerate facies are poorly sorted and in close contact, limiting the pore connectivity to some extent, but the destructive diagenesis intensity is weak, and the overall physical properties are good, conducive to forming effective oil and gas reservoirs.

Key words: differential diagenetic evolution, diagenesis mechanism, pore structure, lithofacies, tight sandstone reservoir, Sangonghe Formation, Moxizhuang area, Junggar Basin

引用格式:王宏博,马存飞,曹铮,等. 基于岩相的致密砂岩差异成岩作用及其储层物性响应[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 976–992. DOI: 10.11743/ogg20230414.

WANG Hongbo, MA Cunfei, CAO Zheng, et al. Differential diagenesis and reservoir physical property responses of tight sandstone based on lithofacies: A case study on the Lower Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang area, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 976–992. DOI: 10.11743/ogg20230414.

准噶尔盆地是位于中国西北地区的大型陆相多旋回叠合含油气盆地,具有多层系发育、生-储-盖组合复杂、油气藏类型丰富、生油凹陷分布广泛的特点^[1-7]。准噶尔盆地自20世纪50年代开始进入油气勘探阶段,研究区准中1区块下侏罗统三工河组自2002年勘探发现工业油气流以来,多数井见良好油气显示,随后不断取得突破,2017年预测储量达 $2\,798\times 10^4\text{ t}$,展示了良好的油气勘探前景^[8-10]。前人对三工河组储层的成岩作用、储集物性和孔隙演化开展了大量工作,取得了丰富的成果^[11-15]。三工河组储层埋深大,经历了多样的成岩演化环境,成岩作用类型丰富,岩相间的成岩作用差异明显,孔隙结构和物性演化非常复杂,储层非均质性强,且不同岩相的差异成岩作用与物性演化的关系尚不明确^[16-17]。因此,对比讨论岩相之间的差异成岩作用机理,探究储层孔隙结构在差异成岩作用下的影响,厘清成岩作用与储层物性演化之间的关系,揭示优质储层的特征,对莫西庄地区未来的油气勘探具有重要的指导意义和启示作用。

1 区域地质背景

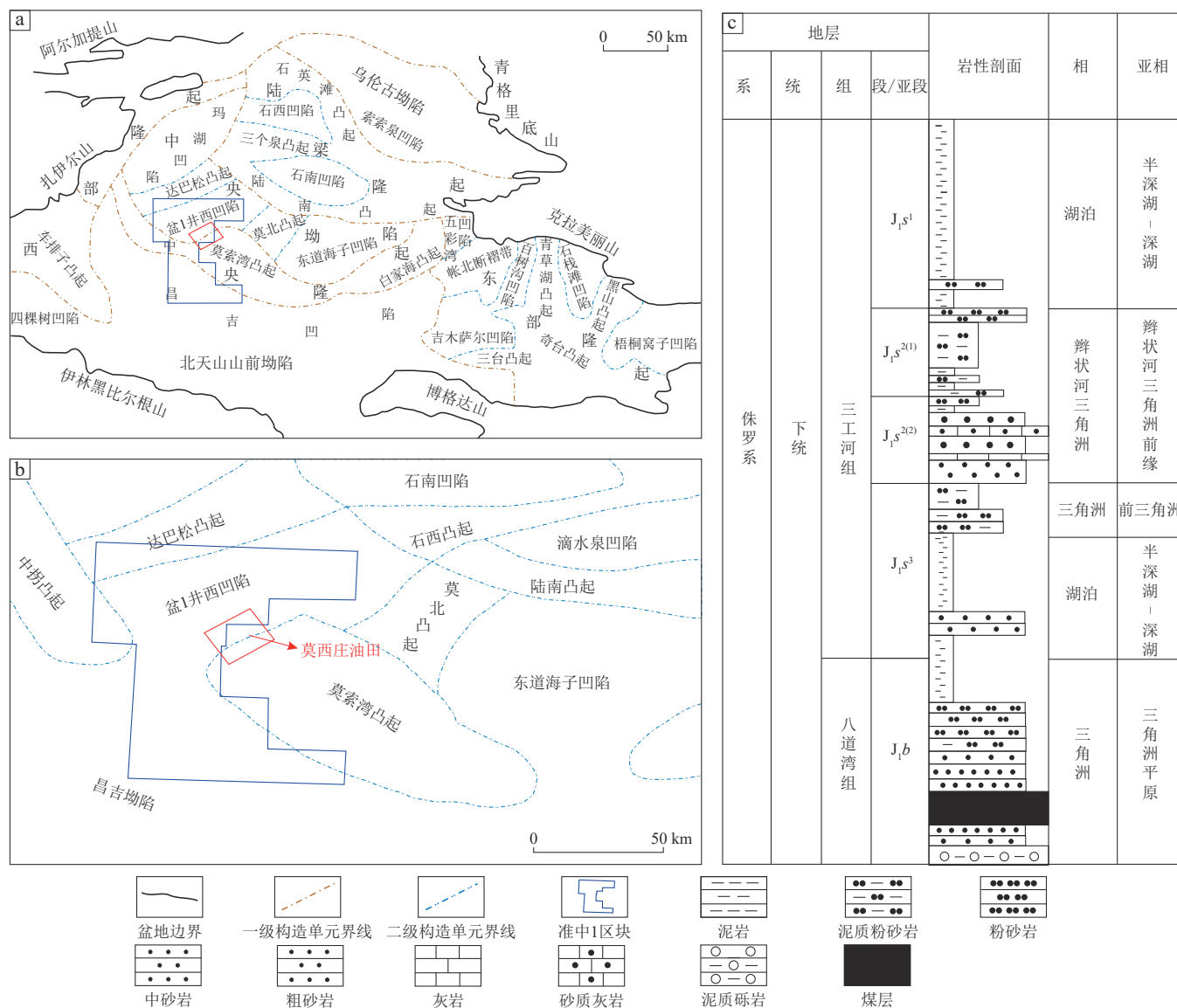
莫西庄地区处于古尔班通古特沙漠西南部边缘,构造上位于准噶尔盆地中央隆起区盆1井西凹陷东南部,为莫索湾凸起-盆1井西凹陷的转换部位,南接昌吉坳陷,北到莫北凸起(图1),自晚古生代以来经历了海西、印支、燕山和喜马拉雅4期构造沉积旋回^[18]。莫西庄地区低幅度背斜圈闭发育,地层整体从南西到北东

逐步抬升,在中部有一低缓的鼻状隆起,轴向为近东西向,鼻状隆起的北翼有一个凹槽,南翼为一南倾的单斜坡^[19-21]。研究区整体处于凸起向西侧凹陷过渡的单倾斜坡,是油气有利的运移指向部位,油气资源丰富^[22]。

研究目的层为侏罗系三工河组,主要发育三角洲前缘沉积,砂体厚度大、分布广、纵横向发育稳定。三工河组可自下而上分为三工河组三段(J_3s^3)、三工河组二段(J_3s^2)和三工河组一段(J_3s^1),油气储层主要发育在三工河组二段,为辫状河三角洲前缘亚相,是三角洲体系中沉积速率最快的区域。三工河组二段沉积时期,盆地进入沉降阶段,沉积物源供给充足。由于水体变化受沉积旋回的影响,三工河组二段发育的上、下亚段两期三角洲沉积的特征不同,下亚段砂体分布广泛,横向发育稳定;上亚段由于水体进一步加深,沉积物源减少,横向稳定性较差,规模缩小^[23]。三工河组一段可以作为良好的盖层,与三工河组二段形成了良好的储-盖组合,是该区油气勘探的重点层位^[9,17]。

2 岩石学特征

通过对莫西庄地区13口井、153块薄片的镜下观察鉴定,三工河组二段砂岩的碎屑颗粒组分主要为石英、长石和岩屑,其次为云母和少量矿物碎屑。通过对薄片的观察和统计,研究区砂岩的石英含量为21.4%~68.0%,平均45.6%;长石含量为5.0%~31.9%,平均18.0%,以钾长石为主;岩屑含量为13.0%~71.3%,平均36.3%,主要为火成岩岩屑,平均占比

图1 莫西庄地区构造单元及侏罗系典型地层剖面^[9,17]Fig. 1 Tectonic units and typical stratigraphic profiles of the Jurassic in the Moxizhuang area^[9,17]

a. 准噶尔盆地构造单元; b. 莫西庄地区构造单元; c. 莫西庄地区侏罗系典型地层剖面

15.0%, 变质岩岩屑(11.9%)和沉积岩岩屑(9.3%)相对较少。统计表明, 三工河组二段砂岩岩性以长石岩屑砂岩为主, 其次为岩屑长石砂岩和岩屑砂岩(图2)。砂岩填隙物类型为杂基和胶结物, 杂基具有富凝灰质特征, 含量为2.2%~25.0%, 平均8.4%。胶结物类型以碳酸盐胶结物为主, 其次为硬石膏、石英和黏土矿物, 可见少量黄铁矿。其中碳酸盐胶结物含量为0.1%~34.7%, 平均4.7%, 主要为方解石和铁方解石及少量菱铁矿和白云石; 硬石膏含量为0.1%~6.2%, 平均1.0%; 石英胶结物含量为0.2%~2.4%, 平均1.0%; 自生黏土矿物以高岭石和绿泥石为主, 发育少量伊利石和伊/蒙混层。研究区砂岩结构成熟度

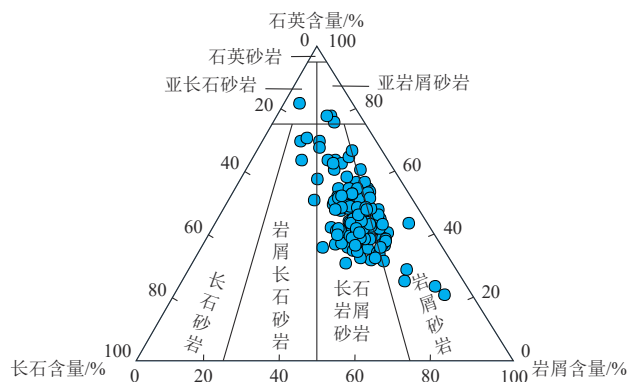


图2 莫西庄三工河组二段岩石学三角图

Fig. 2 Ternary diagram of the second member of the Sangonghe Formation in terms of petrology in the Moxizhuang area

中等偏低,成分成熟度低,分选中等-好,磨圆次棱角-次圆,颗粒以点-线接触为主。

3 沉积微相、岩相类型及特征

研究区三工河组沉积相主要为辫状河三角洲沉积,通过沉积特征研究,可将三工河组二段辫状河三角洲前缘亚相进一步划分为辫状水道、河道砂坝、分流间湾、河口坝和远砂坝 5 种沉积微相。在沉积微相划分的基础上,进行了岩相的划分。岩相是一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,其包括了反映岩石特征的成分、颜色、结构、沉积构造等^[24]。综合岩性、沉积构造及颜色并结合对 19 口井岩心的精细观察与描述,将研究区三工河组二段划分为泥岩相、粉砂岩相、细砂岩相、中砂岩相、粗砂岩相、含砾砂岩和砾岩相 6 种岩相类型,对不同岩相类型的亚相进行了细分并对岩相特征进行了系统总结(图 3)。

4 成岩作用类型及特征

4.1 压实作用

研究区三工河组二段储层砂岩压实作用特征明显,镜下可见碎屑颗粒的定向排列;颗粒间的接触关系主要为点-线接触,部分区域为缝合线接触(图 4a, b);岩屑颗粒塑性组分含量较高,在强烈的压实作用下易发生弯曲变形(图 4c);压实作用还可以导致自

生黏土矿物的析出,析出的矿物可以吸附在碎屑颗粒表面形成环边薄膜包裹颗粒。基于上述现象可知,研究区碎屑砂岩埋藏过程中经历的压实作用较为强烈。

4.2 胶结作用

研究区三工河组二段储层胶结作用较为强烈且类型丰富,胶结物主要为碳酸盐,其次为硅质、硬石膏和自生黏土矿物。

4.2.1 硅质胶结

硅质胶结在铸体薄片观察中常见以次生加大边的形式重结晶附着于石英颗粒边缘(图 4d)。在扫描电镜下,可观察到粒间孔隙中赋存大量的自生微晶石英。

4.2.2 碳酸盐胶结

研究区目的层砂岩碳酸盐胶结较发育,菱铁矿、方解石、白云石和铁方解石的平均含量分别为 1.1%, 21.8%, 1.0% 和 2.6%。镜下可见两期碳酸盐胶结: I 期碳酸盐胶结主要为方解石及少量白云石和菱铁矿,菱铁矿以包壳状覆于碎屑颗粒表面并充填孔隙。方解石呈孔隙式或连晶式胶结,充填了大量的孔隙空间,主要充填于粒间孔隙和长石、石英溶孔(图 4e)。II 期碳酸盐胶结物以铁方解石为主,正交光下呈暗紫红色或深红色,铁方解石占据的孔隙体积较前期方解石明显减小(图 4f)。



图 3 莫西庄三工河组二段岩相类型及特征

Fig. 3 Lithofacies types and characteristics of the second member of the Sangonghe Formation in the Moxizhuang area

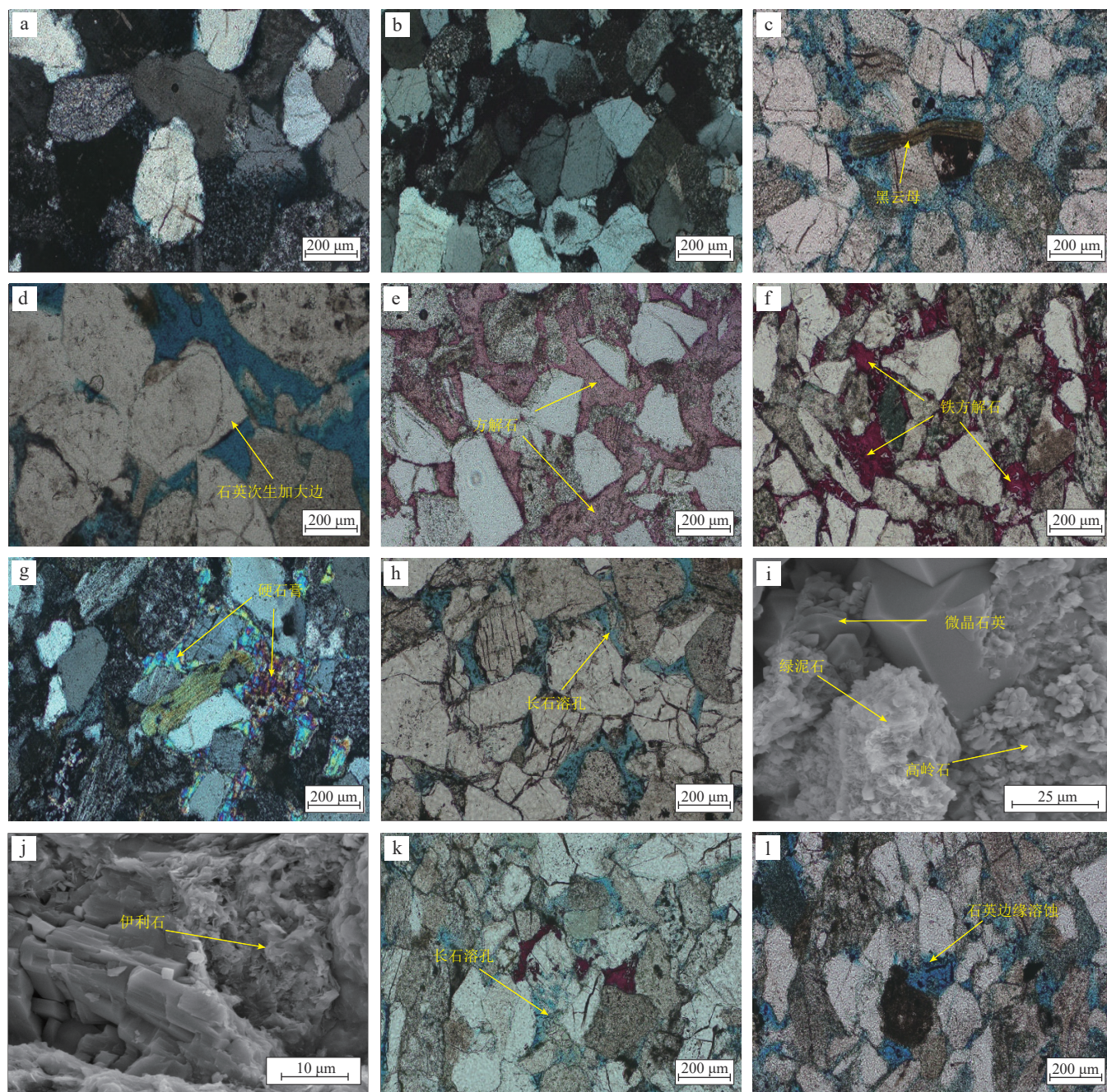


图4 莫西庄三工河组二段储层成岩作用特征显微照片

Fig. 4 Diagenetic characteristics of the reservoir in the second member of the Sangonghe Formation in the Moxizhuang area shown in micrographs
a. 庄104井,埋深4 349.50 m,石英颗粒凹凸接触,正交光;b. 庄1-2井,埋深4 332.27 m,石英颗粒线性接触,正交光;c. 庄11井,埋深3 965.26 m,黑云母受强烈挤压变形,单偏光;d. 庄6井,埋深4 034.48 m,石英次生加大,单偏光;e. 庄110井,埋深4 288.20 m,方解石胶结,单偏光;f. 庄11井,埋深3 918.14 m,铁方解石胶结,单偏光;g. 庄11井,埋深3 965.26 m,硬石膏胶结,正交光;h. 庄1-3井,埋深4 328.15 m,长石溶蚀,自生黏土矿物充填残余粒间孔隙,单偏光;i. 庄1-3井,埋深4 328.08 m,绿泥石、高岭石及微晶石英充填粒间孔隙,扫描电镜;j. 庄1-3井,埋深4 342.80 m,伊利石充填长石溶蚀孔隙,扫描电镜;k. 庄104井,埋深4 357.15 m,长石溶蚀,单偏光;l. 庄1井,埋深4 375.38 m,石英边缘溶蚀,单偏光

4.2.3 硬石膏胶结

部分砂岩样品硬石膏胶结发育,呈片状或薄板状充填孔隙(图4g),还可见硬石膏等对长石、石英颗粒的交代及晚期铁方解石对硬石膏的交代。

4.2.4 自生黏土矿物胶结

储层中自生黏土矿物主要为高岭石和绿泥石,其次为少量伊利石及伊/蒙混层,其中高岭石相对含量为27.0%~77.0%,平均54.0%;绿泥石相对含量为

12.0%~34.0%,平均23.7%;伊利石相对含量为4.0%~35.0%,平均14.9%;伊/蒙混层相对含量为2.0%~16.0%,平均7.4%。镜下观察高岭石常以书页状或蠕虫状集合体的形态充填于粒间孔隙,与长石溶蚀相伴生(图4h);绿泥石通常呈薄膜状包裹在碎屑颗粒表面或充填于长石溶孔中(图4i);伊利石常以丝发状充填于长石溶孔中,但总体含量较少(图4j);伊/蒙混层以蜂窝状或棉絮状胶结物的形式充填孔隙,该现象的出现标志着成岩阶段进入中成岩A期。

4.3 溶蚀作用

研究区三工河组二段砂岩长石、岩屑等不稳定矿物含量较高,长石溶蚀现象极为发育,可见长石颗粒的边缘溶蚀,还常见沿长石颗粒内部的破裂缝和解理缝溶蚀,形成边界不规则且大小不一的长石边缘溶孔和粒内溶孔(图4k)。石英颗粒溶蚀也较为发育,主要为颗粒边缘溶蚀和次生加大边溶蚀(图4l)。次生溶蚀面孔率为0.1%~10.2%,平均3.2%。

5 岩相差异成岩机理

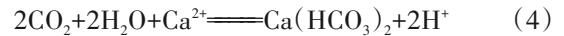
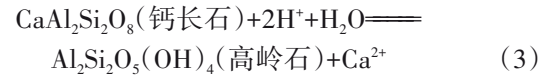
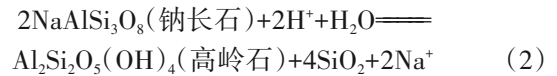
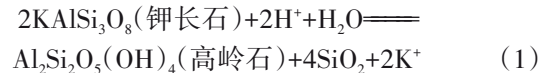
通过对研究区各类岩相的综合分析,研究岩相差异成岩机理,将岩相总结划分为以下5种类型进行讨论:钙质砂岩相、块状砂岩相、含泥质炭质纹层砂岩相、含砾砂岩和砾岩相以及富火山凝灰质杂基砂岩相。从各类岩相具体的成岩作用机理特征入手,对比讨论岩相间的成岩机理差异。

5.1 钙质砂岩相

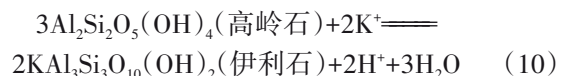
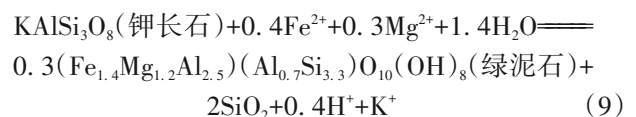
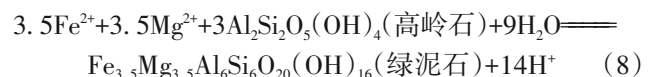
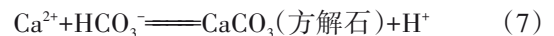
钙质砂岩相富含方解石和铁方解石胶结物,大量的钙质胶结物占据了孔隙空间,破坏储层物性,因此在钙质砂岩相中不利于形成良好储层。

早成岩A期,地温40~65℃,早期机械压实作用损失了少量的原生孔隙。研究区常发生长石的溶蚀作用[公式(1)~(3)],且长石的溶蚀会产生大量高岭石,这一过程也叫做长石的高岭石化,生成的高岭石常呈书页状集合体与长石溶孔共生。同时,长石溶蚀产生大量SiO₂,为硅质胶结提供了充足的物质来源,促进了硅质胶结的作用。早期长石、岩屑的溶蚀与储层埋藏浅并遭受大气水淋滤有关,酸性流体(H⁺)来源充足,为溶蚀作用提供了有利酸性环境^[25]。岩屑等火山物质的溶蚀,为孔隙流体提供了各种金属离子,如Fe³⁺,K⁺,Na⁺,Ca²⁺和Mg²⁺等。溶蚀作用发生之后,孔隙流体呈碱性,在大气CO₂和细菌还原有机质提供的CO₂环境

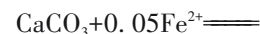
中,与Ca²⁺结合形成大量早期方解石沉淀[公式(4)和(5)],储层孔隙近致密(图5)。



早成岩B期—中成岩期,地温65~140℃,由于超压作用的存在,抑制了压实作用,少量有机酸/CO₂侵入储层,孔隙流体呈酸性,导致长石溶蚀[公式(1)~(3)],生成高岭石、硅质胶结物,部分早期方解石溶解,方解石重结晶沉淀[公式(6)和(7)]。该阶段同时会发生黏土矿物的相互转化,长石溶蚀形成的高岭石在埋深增加、温度升高且富含Mg²⁺和Fe²⁺等离子的弱碱性环境中,可以转化为绿泥石[公式(8)]^[26-27]。绿泥石也可以在弱碱性流体作用下由钾长石转化生成[公式(9)],在这一转化过程当中常见绿泥石与自生石英胶结相伴生。此外,高岭石在温度和压力的持续作用下会逐渐趋于不稳定状态,与流体中K⁺相互作用生成伊利石并释放H⁺和H₂O^[28][公式(10)]。



部分样品中晚期铁方解石胶结比较发育,此类样品中火成岩岩屑含量较高,在碱性成岩环境下,火成岩岩屑溶蚀和黏土矿物转化形成的大量Mg²⁺和Fe²⁺进入早期形成的方解石晶格,替换出部分Ca²⁺,形成铁方解石胶结[公式(11)]。



5.2 块状砂岩相

结合岩心及薄片观察分析,厚层砂岩中部的块状砂岩相,分选好,塑性填隙物含量低,原生孔隙保存较完整,次生溶蚀孔隙发育,是油气富集的有利岩相(图6)。

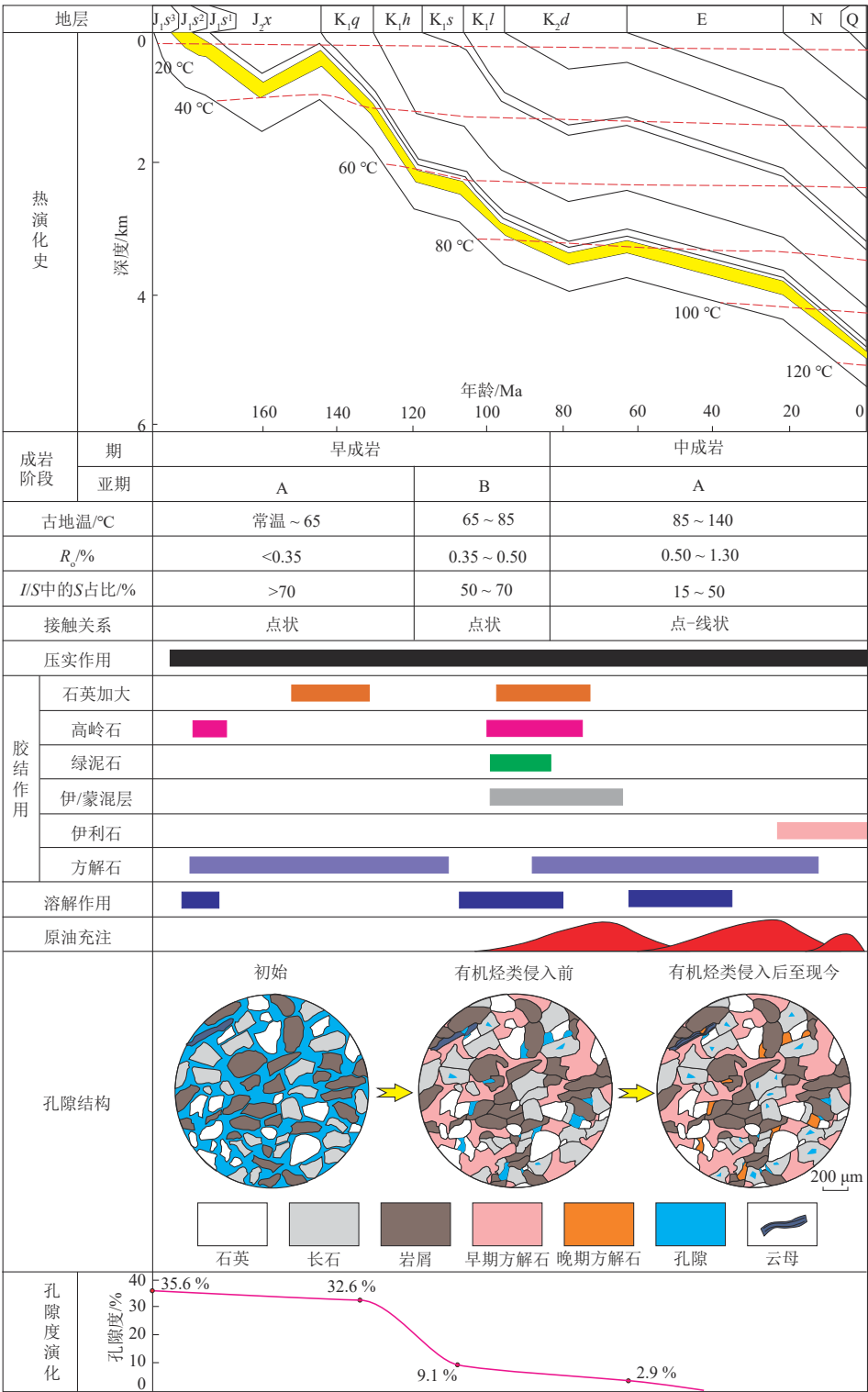


图5 莫西庄三工河组二段钙质砂岩相成岩演化序列与孔隙度演化

Fig. 5 Diagenetic evolution sequence and porosity evolution of the calcareous sandstone facies in the second member of the Sangonghe Formation in the Moxizhuang area

早成岩 A 期,地温 40 ~ 65 °C,在快速埋藏压实过程中储层损失部分原生孔隙,同时大气水淋滤导致部分长石溶蚀[公式(1)],溶蚀产物被带走(开放式成岩体系),长石溶蚀提高了储层的孔隙度和渗透率,溶蚀

发生后,部分早期方解石胶结物发生沉淀[公式(4)和(5)],充填了少量的储层孔隙。

早成岩 B 期,地温 65 ~ 85 °C,储层中发育半开放成岩体系,有机酸/CO₂ 侵入储层,孔隙流体转变为酸

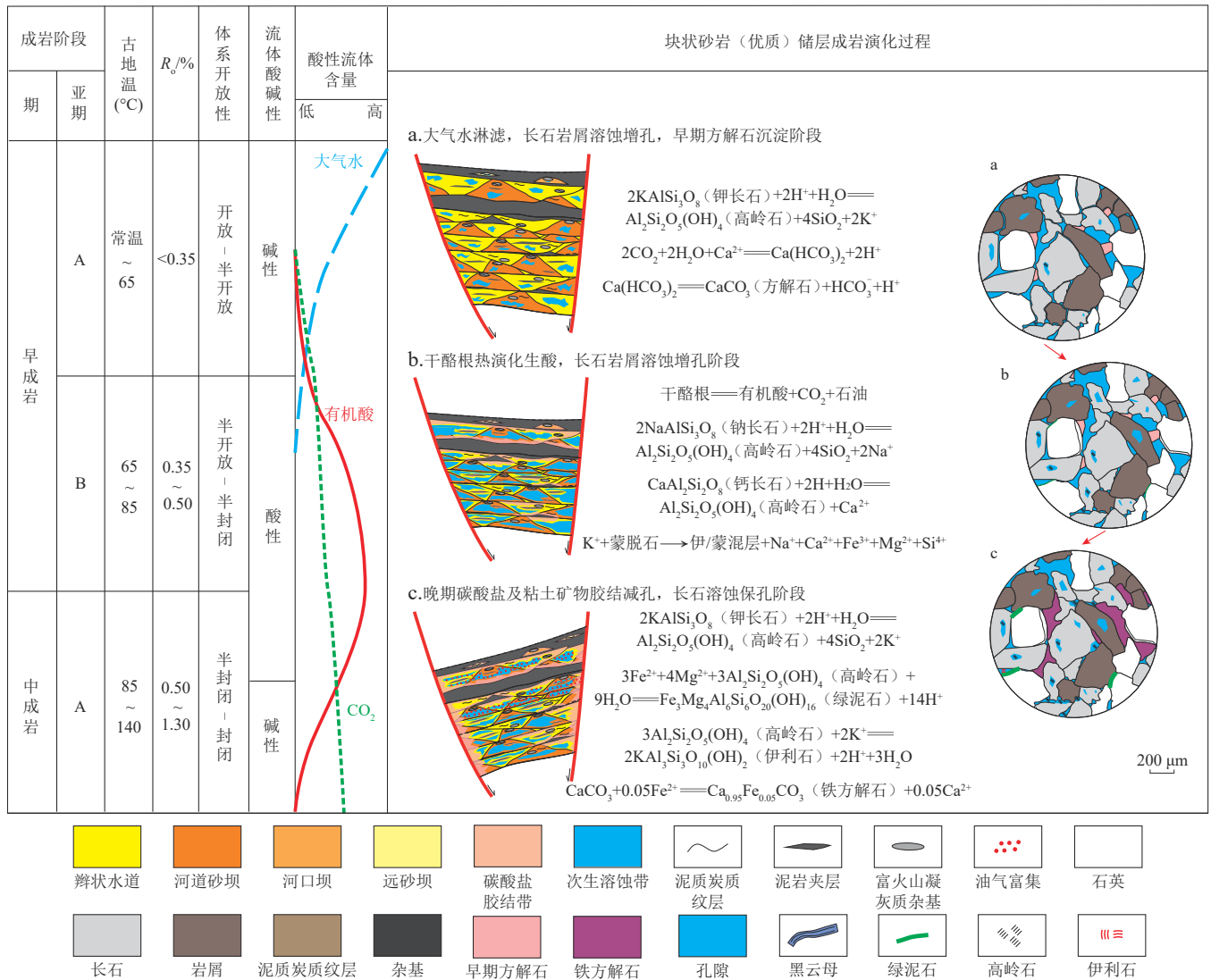
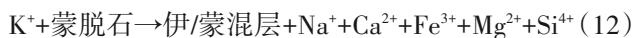


图6 莫西庄三工河组二段块状砂岩相优质储层形成演化模式

Fig. 6 Formation and evolution of high-quality reservoir of the massive sandstone facies in the second member of the Sangonghe Formation in the Moxizhuang area

性,导致长石、岩屑大量溶蚀[公式(1)—(3)],高岭石等溶蚀产物在原地沉淀,形成长石次生溶孔-自生高岭石沉淀成岩组合。当成岩环境开始转变为碱性时,储层中的火山物质可以发生蚀变形蒙脱石,蒙脱石与长石溶蚀产生的钾离子反应生成伊/蒙混层^[29][公式(12)],释放大量的 Fe^{3+} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等金属离子。该阶段长石溶蚀增孔-不增渗,有机烃类大量侵入储层。



中成岩A期,地温85~140℃,储层中发育近封闭成岩体系,长石溶解[公式(1)—(3)],形成长石次生溶孔-自生黏土矿物-自生石英沉淀的成岩组合。自生的黏土矿物为绿泥石和伊利石[公式(8)和(10)],均在

高温高压环境下由高岭石转化而来,长石、岩屑溶蚀和黏土矿物的转化提供了金属离子的物质来源。绿泥石以薄膜形式附着于颗粒表面,可以在一定程度上保护储层的孔隙空间;丝发状伊利石常充填长石溶孔,破坏形成的孔隙。与长石伴生的胶结作用为铁方解石和硬石膏胶结物的形成[公式(11)和(13)],硬石膏胶结的物质来源主要为长石溶蚀及黏土矿物的转化,同时油气的充注可以携带大量的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 进入储层,促进了硬石膏的形成^[30]。胶结物充填孔隙在一定程度上增强了岩石的抗压性能,有利于次生孔隙的有效保存,而该阶段的长石溶蚀改善了储集空间,起到了增加孔隙度,降低储层渗透率的效果。



5.3 含泥质炭质纹层砂岩相

薄片观察表明,含泥质炭质纹层砂岩塑性填隙物含量高,塑性填隙物占据了大量孔隙空间,导致面孔率较低,储层总体物性差、含油不均一。

早成岩 A 期,地温 40 ~ 65 °C,泥质和炭质纹层占

据大量粒间孔隙,早期快速埋藏压实过程中损失大量残余原生孔隙,少量长石溶蚀[公式(1)—(3)]。长石溶蚀转化成高岭石,同时产生 SiO₂ 和 K⁺,Na⁺,Ca²⁺等离子,SiO₂ 为早期石英加大提供了物质来源,K⁺,Na⁺和 Ca²⁺等离子促进了黏土矿物的形成和相互转化(图 7)。

早成岩 B 期—中成岩期,地温 65 ~ 140 °C,由于大

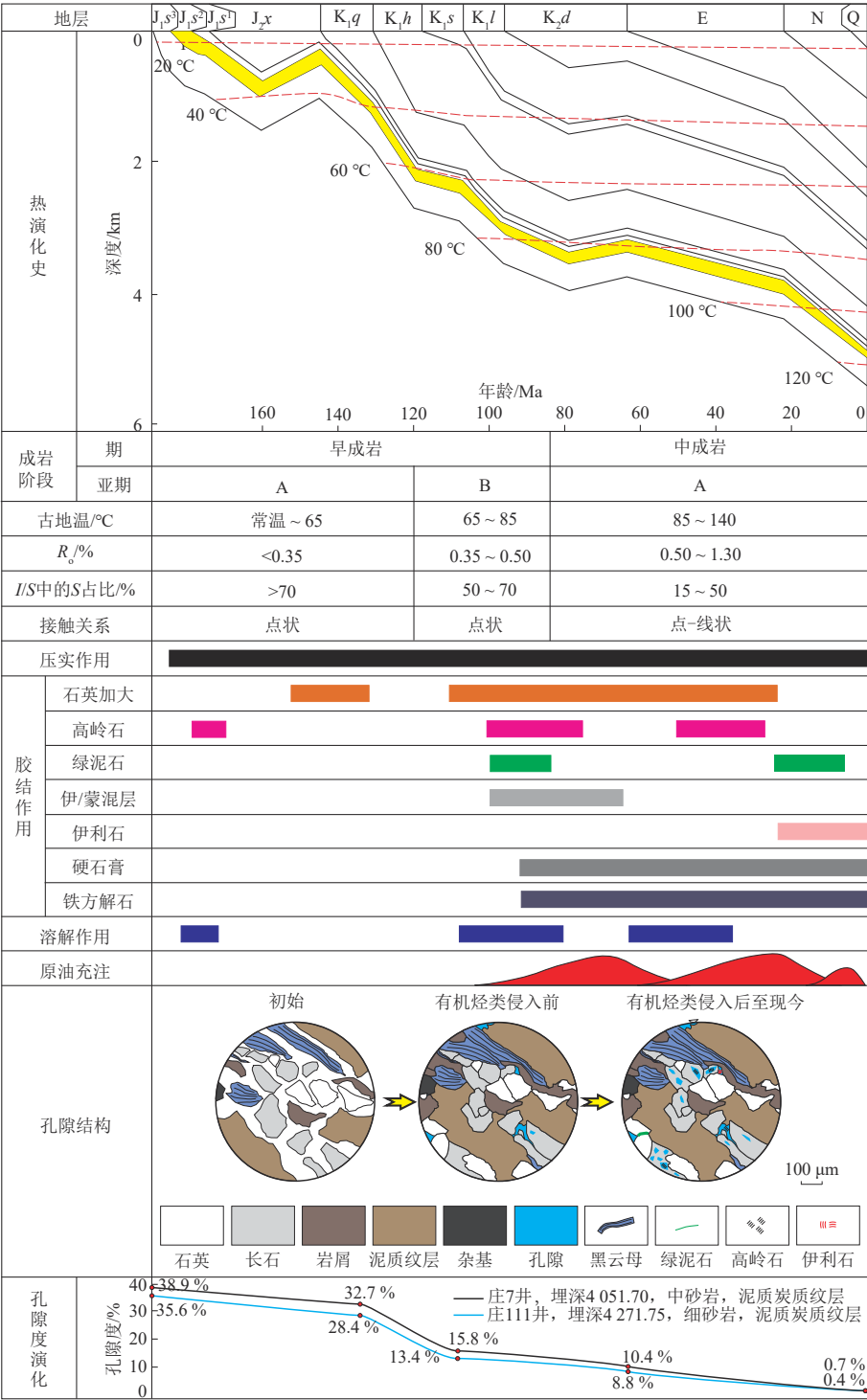


图7 莫西庄三工河组二段含泥质炭质纹层砂岩相成岩演化序列与孔隙度演化

Fig. 7 Diagenetic evolution sequence and porosity evolution of the argillaceous carbonaceous sandstone facies of lamination texture in the second member of the Sangonghe Formation in the Moxizhuang area

量塑性纹层的存在,有机酸/ CO_2 在储层内部流通不畅,仅导致部分长石溶蚀[公式(1)—(3)],同时由于流体环境封闭,高岭石等溶蚀产物在原地沉淀,并转化成绿泥石、伊利石等黏土矿物[公式(8)和(10)],对孔隙结构主要起到破坏作用;长石溶解提供了 K^+ 、 Na^+ 和 Ca^{2+} ,火山物质的溶蚀和黏土矿物的转化提供了大量的 Fe^{3+} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等金属离子,为硬石膏和铁方解石的形成提供了充足的物质来源[公式(11)和(13)],生成的胶结物进一步充填剩余孔隙。此外,持续的压实作用导致储层残余原生孔隙进一步降低,最终导致含泥质、炭质纹层砂岩孔隙度低。

5.4 含砾砂岩和砾岩相

含砾砂岩和砾岩储层的砾石含量高,抗压实能力较强,早期埋藏压实阶段,储层原生孔隙受压实的影响较小,保存完好。颗粒分选差且紧密接触,流体在粒间流通不畅,溶蚀作用较弱。

早成岩A期,地温 $40\sim 65\text{ }^\circ\text{C}$,早期快速埋藏压实过程中损失少部分原生孔隙,同时大气水淋滤导致部分长石溶蚀[公式(1)—(3)],长石溶蚀增孔、提渗,溶蚀提供的 SiO_2 促进了硅质胶结物的形成;在部分砾岩中钙质胶结发育,火山岩屑和长石溶蚀提供了丰富的 Ca^{2+} ,导致此类含砾砂岩和砾岩储层在早成岩A期有大量方解石胶结物形成[公式(4)和(5)],严重破坏了储层的孔隙结构(图8)。

早成岩B期—中成岩期,地温 $65\sim 140\text{ }^\circ\text{C}$,有机酸/ CO_2 侵入储层,导致长石大量溶蚀,生成高岭石、硅质胶结,同时产生铁方解石沉淀[公式(11)]。铁方解石的沉淀仍然需要地层流体中富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 等金属离子,这些金属离子的来源多种多样,主要来源于长石和火山物质的溶蚀。该阶段产生的黏土矿物主要为绿泥石和伊利石,均为碱性成岩环境中高岭石转化形成[公式(8)和(10)]。

5.5 富火山凝灰质杂基砂岩相

火山凝灰质杂基在研究区不同岩相中均广泛发育,但不同岩相之间的杂基含量存在差异。早—中侏罗世,阿尔泰造山带和西准噶尔造山带克拉玛依地区发生岩浆活动,推测是导致研究区三工河组砂岩富火山凝灰质杂基的主要原因。岩心观察可见火山凝灰质杂基不均一分布。

火山凝灰质杂基充填粒间孔隙,在显微镜下呈类似泥质特征,粒间充填的凝灰质杂基普遍发生溶蚀作用,形成次生溶蚀孔隙。薄片观察表明,富含火山凝灰

质杂基砂岩的碳酸盐胶结作用较弱,仅可见少量铁方解石。对富火山凝灰质杂基含量与碳酸盐胶结物含量统计可知,杂基含量高于 8.0% 时,碳酸盐胶结物含量快速下降至 5.0% 以下,碳酸盐胶结物随着杂基含量的增加呈明显的下降趋势。

同沉积期,盆地内部发生岩浆活动,火山灰进入河流;早成岩A期,地层处于相对开放—半封闭条件,大气水淋滤和细菌还原有机质产生 CO_2 促使长石溶蚀[公式(1)—(3)]、火山凝灰质脱玻化和溶蚀。高岭石可以由火山凝灰质转化而来,此类高岭石常呈团块状充填于粒间并与凝灰质紧密接触;同时,高岭石也可以书页状集合体的形式与长石溶蚀共生,为长石溶蚀的产物。高岭石和其他产物能够被孔隙流体及时带走,扩大了溶蚀的孔隙空间,对储层质量具有一定的积极意义;另一方面,塑性杂基含量高,在强烈的压实作用下,储层的储集空间大量缩减、破坏严重(图9)。

早成岩B期,有机酸/ CO_2 侵入,凝灰质岩屑、杂基和长石溶蚀[公式(1)—(3)],形成大量高岭石原地沉淀。成岩环境开始向弱碱性转变时,在杂基含量少的储层中,绿泥石为凝灰质杂基的主要蚀变产物,常以附着的形式沉淀在颗粒表面并包裹颗粒,并抑制后续的硅质胶结;在杂基含量较多的砂岩中,凝灰质杂基主要蚀变生成伊/蒙混层并充填粒间孔隙[公式(12)]。

中成岩期,杂基含量较少的砂岩中,孔隙中酸性流体运移通畅,促进了凝灰质杂基蚀变和长石溶蚀,形成次生溶蚀孔隙的同时也为自生高岭石的沉淀提供物质基础,但由于流体环境相对封闭,高岭石就近沉淀,使孔隙结构复杂化,而后沉淀的自生高岭石,在富含金属离子的碱性流体环境中,转化为绿泥石和伊利石[公式(8)和(10)],进一步破坏储层孔隙结构;杂基含量较多的砂岩中,早期压实作用导致储层趋于低渗—致密,成岩流体在储层中流通不畅,导致溶蚀和胶结作用较弱,至中成岩阶段,砂体进一步致密成岩,黏土矿物依然主要为伊/蒙混层矿物,导致残余粒间孔隙的孔隙结构更加复杂。

6 岩相差异成岩作用对孔隙结构及储层物性的影响

深入研究岩相差异成岩作用对储层孔隙结构的影响,对于揭示储层物性和孔隙结构的非均质性有着重要意义。三工河组二段为典型的致密砂岩储层,储层的微观孔隙结构对物性的影响非常明显。综合分析研究区样品的压汞曲线特征、孔喉半径分布、排驱压力和

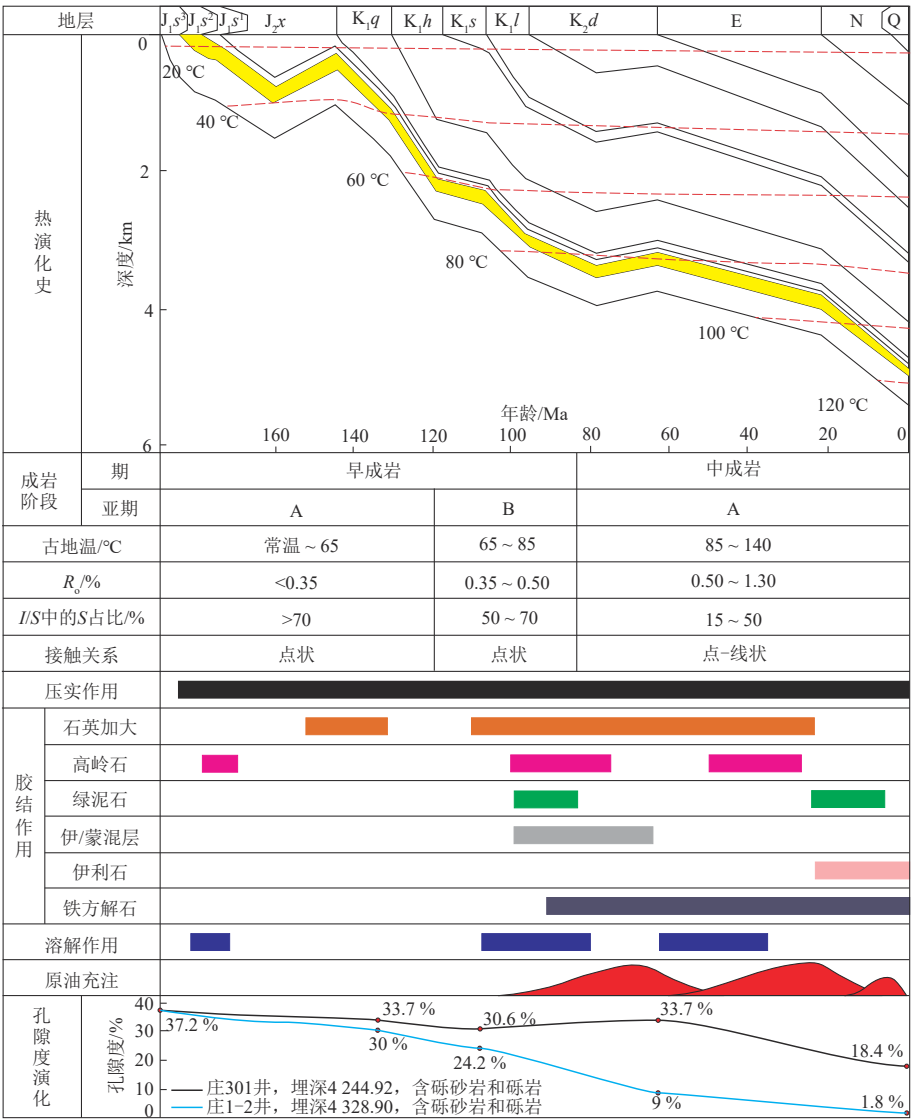


图8 莫西庄三工河组二段含砾砂岩和砾岩相成岩演化序列与孔隙度演化

Fig. 8 Diagenetic evolution sequence and porosity evolution of the conglomeratic sandstone and conglomerate facies in the second member of the Sangonghe Formation, Moxizhuang area

物性数据可知,研究区主要发育的孔隙结构主要有4类(I, II, III, IV型)(表1),由于岩相间成岩机理的差异,导致不同岩相之间发育截然不同的孔隙结构。

6.1 钙质砂岩相

研究区钙质砂岩相分布广泛,孔喉结构复杂,经过薄片统计分析,距离相邻砂-泥岩界面2 m以内,碳酸盐胶结物含量相对较高,而距离界面2 m以外,碳酸盐胶结物含量均在5.0%以下,表明钙质砂岩相主要分布于砂-泥岩接触面附近。对庄110井4 288.20 m深度的钙质细砂岩相样品的孔隙直径和进汞增量分析可知,样品进汞增量整体较低,且进汞增量峰值位于孔隙直径0.80 μm左右,反映了钙质砂岩相的孔隙被大量碳酸盐胶结物(方解石、铁方解石)充填破坏,致使储层丧失了

储集能力(图10a)。钙质砂岩相总体孔隙结构属于IV型,为研究区发育岩相中最差的孔隙结构类型(图11a)。

研究区钙质砂岩相的孔隙演化大致分为3种类型。第一种类型为早成岩期方解石胶结物大量胶结,完全充填孔隙,该阶段储层就达到了完全致密;第二种类型则是早成岩A期方解石胶结充填储层孔隙,但储层并未完全致密,经历早成岩B期一中成岩期有机酸侵入,部分早期方解石溶解后又以重结晶形式沉淀,储层达到致密;第三种类型为早成岩期少量方解石沉淀,早成岩B期一中成岩期,大量有机酸侵入,早期方解石溶解,铁方解石沉淀,储层未达到完全致密。

根据研究区样品的测试资料,庄110井4 294.64 m深度的钙质细砂岩,孔隙度为1.8%,渗透率为0.277×10⁻³ μm²,面孔率近于0,方解石含量为21.3%;庄104

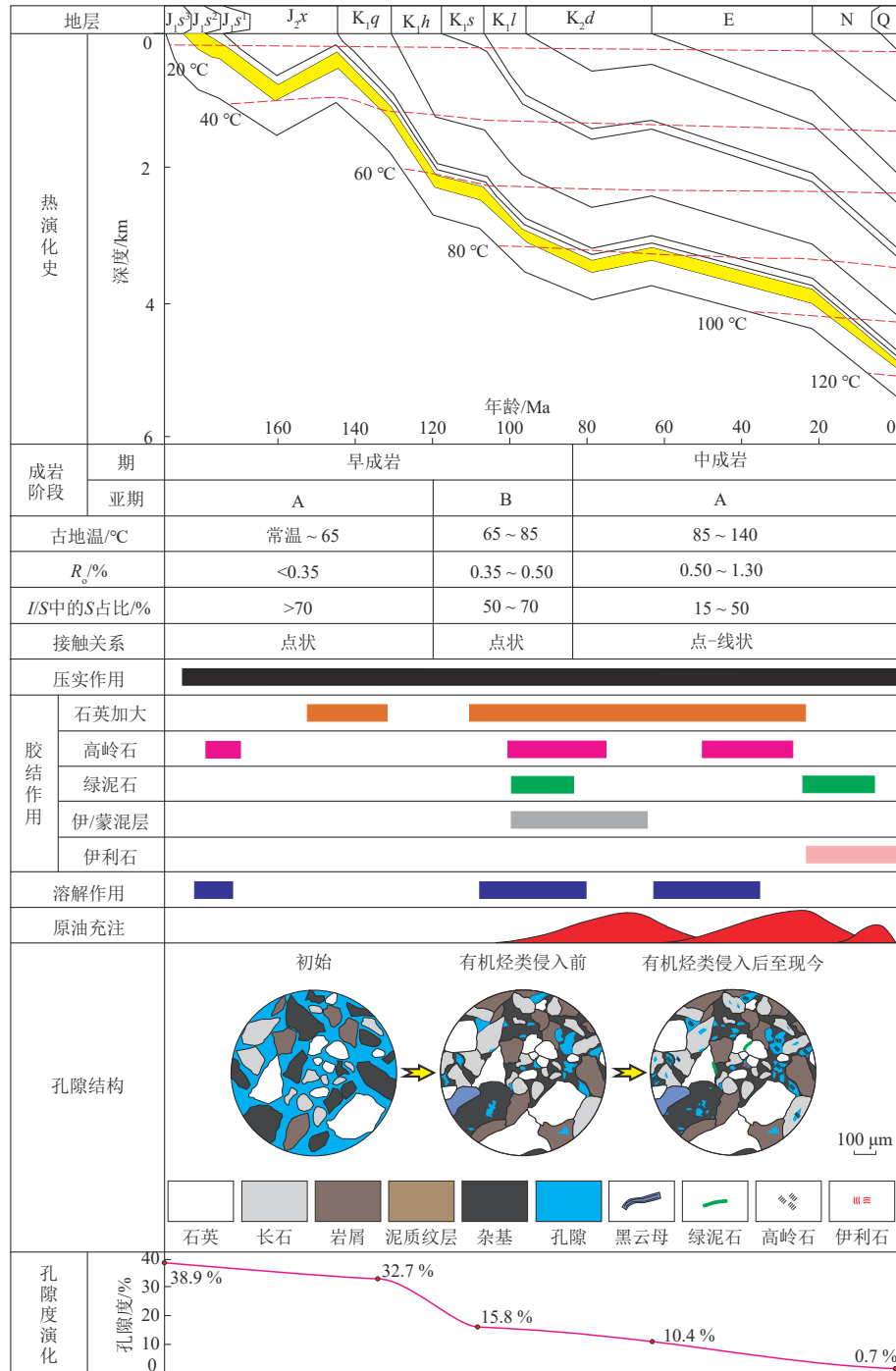


图9 莫西庄三工河组二段富火山凝灰质杂基砂岩相成岩演化序列与孔隙度演化

Fig. 9 Diagenetic evolution sequence and porosity evolution of the volcanic tuffaceous matrix sandstone facies in the second member of the Sangonghe Formation in the Moxizhuang area

井4 337.51 m深度的钙质粉砂岩,孔隙度为2.7%,渗透率为 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,方解石含量为25.0%。因此,钙质砂岩相整体的孔隙结构被严重破坏,破坏的最主要因素是胶结作用,胶结作用使储层孔隙结构变得异常复杂,缩小孔喉空间,损失大量孔喉,降低了孔隙的连通性^[31];孔隙分布孤立,流体流动受阻,导致溶蚀作用对于孔隙结构的改善贡献较小,部分早期形成的溶

孔也会被晚期胶结物充填,进而导致了样品整体的物性较差,无法成为有效的油气储层。

6.2 块状砂岩相

对比分析研究区不同砂岩的岩相可知,块状砂岩相总体上物性最好,孔隙结构良好的岩石样品主要为块状砂岩相。依据块状砂岩的孔隙直径与进汞增量的

表1 莫西庄三工河组二段孔隙结构分类

Table 1 Classification of the pore structure in the second member of the Sangonghe Formation in the Moxizhuang area

孔隙结构类型	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	排驱压力/MPa	平均孔径/ μm	特征
I 型	8.1 ~ 9.9 (平均 8.9)	82.26 ~ 160.68 (平均 120.24)	<0.1	5.00 ~ 10.00	储层孔喉分选性好,粗歪度,喉道类型以片状、弯片状为主,少量缩颈型喉道
II 型	8.2 ~ 10.7 (平均 9.1)	1.56 ~ 4.72 (平均 2.89)	0.1 ~ 1.0	1.00 ~ 5.00	孔喉分选性中等,略粗歪度,喉道类型以片状、弯片状为主,少量缩颈型喉道
III 型	4.8 ~ 9.2 (平均 7.0)	82.26 ~ 160.68 (平均 120.24)	0.2 ~ 1.0	0.10 ~ 5.00	孔喉分选性差,细歪度,喉道多为管束状或喉道不发育
IV 型	1.8 ~ 8.9 (平均 5.1)	0.01 ~ 0.31 (平均 0.19)	1.0 ~ 2.5	0.01 ~ 0.10	极细歪度

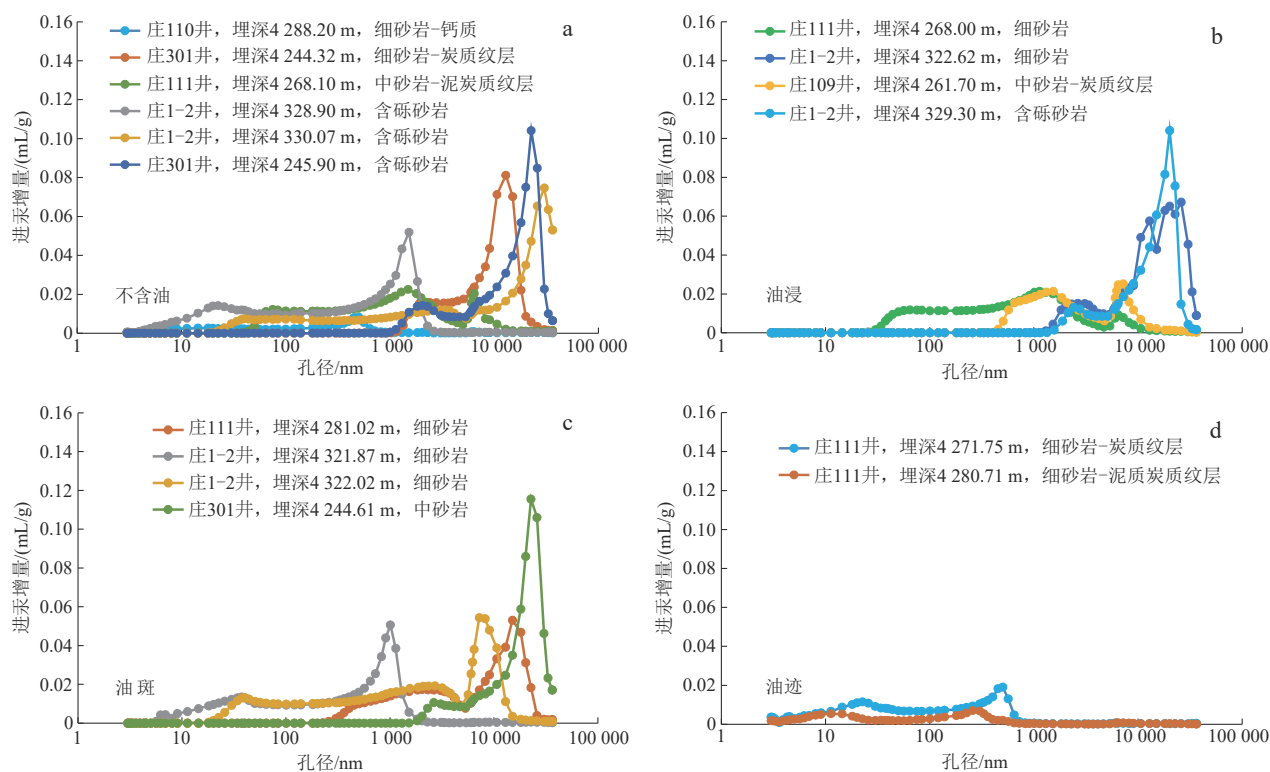


图10 莫西庄三工河组二段不同岩相砂岩样品孔径分布范围与进汞增量关系

Fig. 10 Relationship of pore diameter range and mercury influx increment in sandstone samples of different lithofacies in the second member of the Sangonghe Formation in the Moxizhuang area

a. 不含油砂岩样品; b. 油浸砂岩样品; c. 油斑砂岩样品; d. 油迹砂岩样品

关系,样品的孔隙直径主要分布在 $0.10 \sim 40.00 \mu\text{m}$,无论是油浸还是油斑砂岩,进汞增量曲线均呈现多峰特征,大部分峰值均位于不小于 $10.00 \mu\text{m}$ 的孔径范围内,表明块状砂岩相主要发育微米级孔隙(图10b,c)。块状砂岩相的孔隙结构为研究区发育的所有岩相中最好的,总体为I型孔隙结构(图11b)。厚层砂岩中部的块状砂岩相,颗粒分选好,刚性颗粒含量高,塑性填隙物含量低。早期埋藏压实阶段,原生孔隙得以保存,少量的方解石胶结对孔隙破坏作用较小。中成岩期,储层埋深增加,处于高温高压的封闭成岩环境,压实作用受到抑制,对原生孔隙起到保护作用,孔隙连通性

好,溶蚀作用强烈,胶结作用相对较弱。

根据研究区样品的测试资料,以庄109井为例,4283.56 m深度的块状中砂岩,次生孔隙度为5.0%,杂基含量为7.4%,白云石为2.5%,铁方解石为3.9%,石英为0.9%,黏土矿物为2.9%;4285.39 m深度的块状细砂岩,次生孔隙度为4.1%,杂基含量为6.1%,铁方解石为2.5%,硬石膏为0.3%,石英为0.6%,黏土矿物为2.4%。因此,在成岩演化过程中,块状砂岩相整体的胶结作用较弱,对孔喉空间的破坏较小;溶蚀作用强烈,有效地扩大了孔喉空间;块状砂岩储层中的刚性颗粒可以起到很好的支撑作用^[32],抗

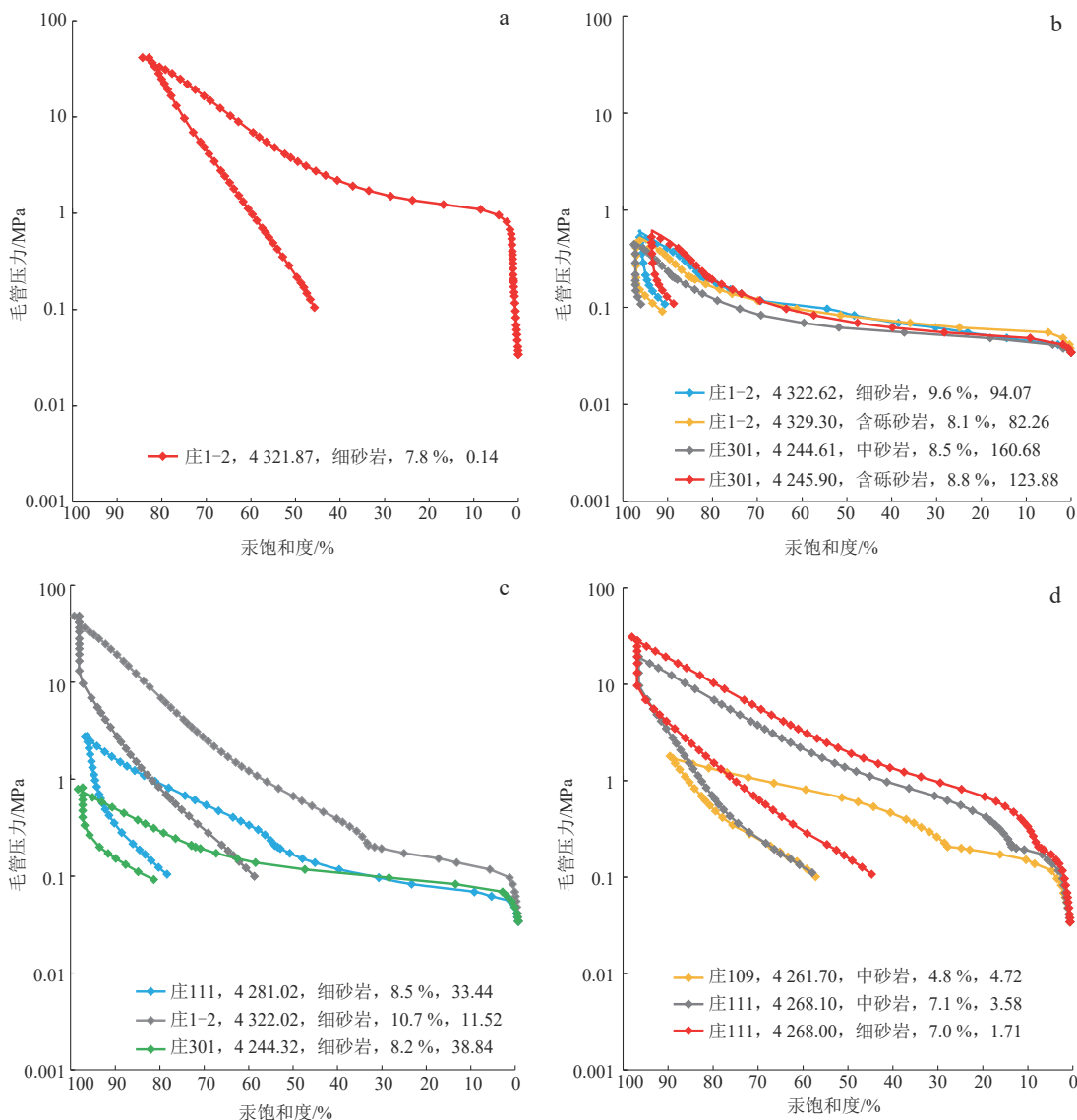


图11 莫西庄三工河组二段不同岩相样品汞饱和度和毛管压力关系

Fig. 11 Relationship of mercury saturation and capillary pressure of samples of different lithofacies in the second member of the Sangonghe Formation in the Moxizhuang area

a. IV型孔隙结构样品;b. I型孔隙结构样品;c. II型孔隙结构样品;d. III型孔隙结构样品

[图中的图例格式依次为:井号,埋深,岩性,孔隙度,渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)。]

压实能力强,压实作用对储层的孔隙空间破坏较小。成岩流体在块状砂岩相中的运移顺畅,储层经历的成岩作用较为完全,储层的原生孔隙得到良好保存,同时次生溶孔发育,储层物性好,孔隙结构有利于油气富集。

6.3 含泥质炭质纹层砂岩相

对研究区含油层段砂岩系统的岩心及薄片观察分析发现,含油层段内泥质、炭质纹层较发育。对比分析含泥质炭质纹层砂岩的孔隙直径与进汞增量可知,其孔隙直径主要分布在 $0.01 \sim 10.00 \mu\text{m}$,部分砂岩样品

进汞增量较低,砂岩样品进汞增量整体呈多峰特征,主峰位于孔隙直径 $10.00 \mu\text{m}$ 左右。含泥质炭质纹层砂岩相孔隙结构变化大,纳米级孔隙和微米级孔隙均有发育(图10a,d),主要的孔隙结构类型为II型和III型(图11c,d)。早成岩期,由于泥质炭质纹层、杂基等塑性物质含量高,占据大量孔隙空间,导致储层抗压能力弱,孔隙间流体流通性差,后续发生的溶蚀作用受到抑制。中成岩期,当孔隙流体转变为碱性时,发生黏土矿物和胶结物的生成及相互转化,进一步充填孔隙残余空间,破坏孔隙结构。

根据研究区样品的测试资料,庄1井4376.26m深

度的泥质炭质纹层细砂岩,面孔率为4.0%,杂基含量为15.0%,石英加大为0.5%,黏土矿物为3.0%;庄109井4 263.58 m深度的泥质炭质纹层中砂岩,面孔率为2.3%,杂基含量为8.6%,铁方解石为0.3%,硬石膏为0.9%,石英加大为1.1%,黏土矿物为5.6%。因此,在含泥质炭质纹层砂岩的成岩演化过程中,储层孔隙结构易被压实作用破坏,这一过程是最重要的减孔因素;流体流动性差,溶蚀作用整体较弱,对储层孔隙的改善效果不明显;胶结作用形成的胶结物充填残余孔隙,也是导致孔隙结构被破坏的因素之一。最终导致含泥质炭质纹层砂岩孔隙结构变化大,储层物性整体较差。

6.4 含砾砂岩和砾岩相

含砾砂岩和砾岩相储层物性总体较好,对比分析含砾砂岩和砾岩的孔隙直径与进汞增量可知,其孔隙直径主要分布在0.01~40.00 μm ,不同砂岩样品的进汞增量曲线峰值均较高,大部分峰值位于孔隙直径20.00 μm 左右,表明含砾砂岩和砾岩相主要发育微米级孔隙(图10a,b)。含砾砂岩和砾岩相孔隙结构较复杂,主要发育I型孔隙结构(图11b)。早成岩期,含砾砂岩和砾岩相储层整体抗压实能力较强,原生孔隙在快速埋藏压实过程中损失较小,得到良好保存,长石溶蚀及溶蚀产物对孔隙结构影响较小;中成岩期,部分长石溶蚀增孔,少量铁方解石沉淀和黏土矿物转化,对储层孔隙结构起到一定的破坏作用。

根据研究区样品的测试资料,庄109井4 300.80 m深度的含砂砾岩,面孔率为3.7%,石英加大含量为1.0%,黏土矿物为5.3%。整体来讲,对于含砾砂岩和砾岩相储层,颗粒接触紧密,刚性砾石含量高,受到的压实作用影响小,孔隙结构复杂,流体运移受到限制,溶蚀作用较弱,对储层物性有一定改善;胶结作用较弱,对孔隙结构的破坏程度较小,储层总体物性好,有利于油气富集。

7 结论

1) 莫西庄地区三工河组在成岩演化过程中主要经历了机械压实作用、胶结作用和溶蚀作用。由于储层埋深大,机械压实作用在埋藏过程中较为强烈,是储层孔隙度降低的主导因素;胶结作用强烈,胶结物类型多样并充填了储层粒间孔隙,是导致储层孔隙度进一步降低的直接因素;溶蚀作用主要以长石、岩屑等酸性不稳定矿物溶蚀为主,常见不规则颗粒边缘和粒内溶

蚀,在一定程度上改善了储层物性。

2) 由于不同岩相中成岩流体的运移能力和原始矿物组分存在显著不同,导致不同岩相储层成岩机理差异明显。钙质砂岩相、含泥质炭质纹层砂岩相和富火山凝灰质杂基砂岩相富含碳酸盐胶结物和塑性填隙物,在早成岩阶段储层由于强胶结和压实作用就趋于致密,中成岩阶段以后成岩作用强度相对较弱;块状砂岩相抗机械压实能力强,早成岩阶段孔隙得到良好保存,至中成岩阶段经历多期次的胶结和溶蚀作用,成岩作用较为完全。含砾砂岩和砾岩相在早成岩阶段受机械压实作用影响较小,至中成岩阶段主要表现为弱胶结、弱溶蚀的特征,成岩作用强度总体较弱。

3) 由于岩相间成岩机理的差异,导致各岩相间发育不同的孔隙结构,进而影响不同岩相储层的物性。钙质砂岩相孔喉尺度小、分布孤立、连通性差,整体的物性为所有岩相中最差,无法形成有效的油气储层;含泥质炭质纹层砂岩相孔隙结构变化大且复杂,物性较差,难以有效聚集油气;块状砂岩相孔喉分选性好,孔隙在所有岩相中最为发育且连通性强,整体物性最好,有利于油气富集;含砾砂岩和砾岩相发育复杂的孔喉结构,孔隙连通性受到一定限制,但破坏性成岩作用强度较弱,总体物性较好,在一定程度上可以形成油气储层。

参 考 文 献

- [1] 何生, 杨智, 何治亮, 等. 准噶尔盆地腹部超压顶面附近深层砂岩碳酸盐胶结作用和次生溶蚀孔隙形成机理[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2009, 34(5): 759-768.
HE Sheng, YANG Zhi, HE Zhiliang, et al. Mechanism of Carbonate Cementation and Secondary Dissolution Porosity Formation in Deep-Burial Sandstones near the Top Overpressured Surface in Central Part of Junggar Basin[J]. Earth Science, 2009, 34(5): 759-768.
- [2] 张义杰, 曹剑, 胡文瑄. 准噶尔盆地油气成藏期次确定与成藏组合划分[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(3): 257-262.
ZHANG Yijie, CAO Jian, HU Wenxuan. Timing of petroleum accumulation and the division of reservoir-forming assemblages, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 257-262.
- [3] 金振奎, 苏奎, 苏妮娜. 准噶尔盆地腹部侏罗系深部优质储层成因[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 25-31.
JIN Zhenkui, SU Kui, SU Nina. Origin of Jurassic deep burial high-quality reservoirs in the central Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 25-31.
- [4] 朱宁. 环玛湖地区三叠系百口泉组储层成岩作用差异性及其成因[D]. 中国石油大学(华东), 2019.
ZHU Ning. Diagenetic differences and genetic mechanisms of Triassic Baikouquan Formation reservoirs from circum-Mahu depression [D]. China University of Petroleum (EastChina),

- 2019.
- [5] 孙允来. 准噶尔盆地莫西庄永进地区侏罗系储层成岩作用特征及对储层的影响[D]. 西北大学, 2021.
- SUN Yunlai. Diagenetic features of jurassic reservoir and their implications for reservoir in Moxizhuang-Yongjin area of Junggar Basin[D]. Northwest University, 2021.
- [6] 支东明, 曹剑, 张景坤, 等. 新疆北部油气晚期成藏特征与分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 542-552.
- ZHI Dongming, CAO Jian, ZHANG Jingkun, et al. Characteristics and distribution pattern of late hydrocarbon accumulation in northern Xinjiang, China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 542-552.
- [7] 张仲培, 张宇, 张明利, 等. 准噶尔盆地中部凹陷区二叠系—三叠系油气成藏主控因素与勘探方向[J]. 石油实验地质, 2022, 44(4): 559-568.
- ZHANG Zhongpei, ZHANG Yu, ZHANG Mingli, et al. Main controlling factors and exploration direction of Permian to Triassic reservoir in the central sag of Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(4): 559-568.
- [8] 刘传鹏. 准噶尔盆地莫西庄地区三工河组二段储层微观特征及有效储层控制因素[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1515-1522.
- LIU Chuanpeng. Reservoir microscopic characteristics and effective reservoir control factors of J_2S_2 in Moxizhuang area, Junggar Basin [J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1515-1522.
- [9] 胡才志, 张立宽, 罗晓容, 等. 准噶尔盆地腹部莫西庄地区三工河组低孔渗砂岩储层成岩与孔隙演化研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(12): 2254-2266.
- HU Caizhi, ZHANG Likuan, LUO Xiaorong, et al. Diagenesis and Porosity Evolution of the low-porosity and low-permeability sandstones: Evidence from the Lower Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang area, central Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(12): 2254-2266.
- [10] 钱少飞. 准噶尔盆地莫西庄地区构造格局与演化史[D]. 中国石油大学(北京), 2019.
- QIAN Shaofei. Tectonic Framework and its Evolution in the Moxizhuang Area of the Junggar Basin, Northwest China [D]. China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [11] 李志明, 秦建中, 廖宗廷, 等. 准噶尔盆地莫西庄地区侏罗系三工河组二段储层特征[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(5): 799-805.
- LI Zhiming, QIN Jianzhong, LIAO Zongting, et al. Reservoirs features of the Second Member of Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang Area of Junggar Basin, NW China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(5): 799-805.
- [12] 况军, 姚根顺, 朱国华, 等. 准噶尔盆地腹部地区侏罗系三工河组相对优质储集层的成因[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 34-40.
- KUANG Jun, YAO Genshun, ZHU Guohua, et al. The origin of favorable sandstone reservoirs of Sangonghe Formation, Lower Jurassic in central Junggar Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(6): 34-40.
- [13] 王芙蓉, 何生, 何治亮, 等. 准噶尔盆地腹部地区深层砂岩储层孔隙特征研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 547-552.
- WANG Furong, HE Sheng, HE Zhiliang, et al. The reservoir characteristic of deeply-buried sandstone in the center of Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(6): 547-552.
- [14] 张福顺, 朱允辉, 王芙蓉. 准噶尔盆地腹部深埋储层次生孔隙成因机理研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(3): 469-478.
- ZHANG Fushun, ZHU Yunhui, WANG Furong. Forming Mechanism of secondary pores in deep buried reservoirs of Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(3): 469-478.
- [15] 胡海燕, 王国建. 准噶尔盆地深层相对优质储层发育机理—淋滤与溶蚀作用[J]. 中国岩溶, 2009, 28(1): 35-41.
- HU Haiyan, WANG Guojian. Development mechanism of relative high-quality oil reservoir in the deeply buried sandstone in the Junggar Basin: Leaching and corrosion [J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(1): 35-41.
- [16] 蒯克来, 操应长, 王艳忠, 等. 低渗透储集层成岩作用与孔渗演化——以准噶尔盆地中部1区侏罗系三工河组为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 434-443.
- XI Kelai, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Diagenesis and porosity-permeability evolution of low permeability reservoirs: A case study of Jurassic Sangonghe Formation in Block 1, central Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 434-443.
- [17] 王居峰, 邓宏文, 蔡希源. 准噶尔盆地腹部下侏罗统三工河组沉积体系[J]. 新疆石油地质, 2005(2): 137-141.
- WANG Jufeng, DENG Hongwen, CAI Xiyuan. Depositional System of Sangonghe Formation of Lower Jurassic in Hinterland of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005(2): 137-141.
- [18] 朱筱敏, 张义娜, 杨俊生, 等. 准噶尔盆地侏罗系辫状河三角洲沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2008(2): 244-251.
- ZHU Xiaomin, ZHANG Yina, YANG Junsheng, et al. Sedimentary characteristics of the shallow Jurassic braided river delta, the Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008(2): 244-251.
- [19] 毕研斌, 高山林, 朱允辉, 等. 准噶尔盆地莫西庄油田成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 318-326.
- BI Yanbin, GAO Shanlin, ZHU Yunhui, et al. Hydrocarbon accumulation patterns of Moxizhuang oilfield, the Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 318-326.
- [20] 孟蕾, 王敏, 关丽, 等. 莫西庄油田侏罗系三工河组储层四性关系研究[J]. 地质论评, 2019, 65(S1): 167-168.
- MENG Lei, WANG Min, GUAN Li, et al. Study on relationships of the four characters of Jurassic Sangonghe formation reservoir in Moxizhuang oilfield [J]. Geological Review, 2019, 65(S1): 167-168.
- [21] 张辉, 陈勇, 王学军, 等. 准噶尔盆地中部侏罗系三工河组储层沥青地球化学特征及其对油气成藏过程的指示[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 1054-1063.
- ZHANG Hui, CHEN Yong, WANG Xuejun, et al. Geochemical characteristics of solid bitumen in the Jurassic Sangonghe

- Formation in the central Junggar Basin and its implications for hydrocarbon accumulation process [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(6): 1054-1063.
- [22] 刘华, 孟祥雨, 任新成, 等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷侏罗系原油成因与来源[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(1): 25-37.
- LIU Hua, MENG Xiangyu, REN Xincheng, et al. Origin and source of Jurassic crude oil in well Pen-1 western Depression, Junggar Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2023, 47(1): 25-37.
- [23] 王孝明. 准中1区侏罗系三工河组低渗透储层特征与有效性评价[D]. 中国石油大学(华东), 2015.
- WANG Xiaoming. Reservoir characteristics and efficiency evaluation of the low permeability reservoirs of sangonghe formation of Jurassic in the block 1 of the central part in Junggar basin [D]. China University of Petroleum (EastChina), 2015.
- [24] 蒋裕强, 宋益滔, 漆麟, 等. 中国海相页岩岩相精细划分及测井预测: 以四川盆地南部威远地区龙马溪组为例[J]. *地学前缘*, 2016, 23(1): 107-118.
- JIANG Yuqiang, SONG Yitao, QI Lin, et al. Fine lithofacies of China's marine shale and its logging prediction: A case the Lower Silurian Longmaxi marine shale in Weiyuan area, southern Sichuan Basin, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(1): 107-118.
- [25] 郇金来, 漆智, 杨朝强, 等. 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*, 2016, 35(1): 87-93.
- HUAN Jinlai, QI Zhi, YANG Chaoqiang, et al. Diagenesis Mechanism and Porosity Evolution of the First Member of Huangliu Formation Reservoir in Dongfang Area, Yinggehai Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(1): 87-93.
- [26] 祝海华, 钟大康, 姚泾利, 等. 碱性环境成岩作用及对储集层孔隙的影响——以鄂尔多斯盆地长7段致密砂岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 51-59.
- ZHU Haihua, ZHONG Dakang, YAO Jingli, et al. Alkaline diagenesis and its effects on reservoir porosity: A case study of Upper Triassic Chang 7 tight sandstones in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 51-59.
- [27] 吴家洋, 吕正祥, 卿元华, 等. 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[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(1): 76-85.
- WU Jiayang, LYU Zhengxiang, QING Yuanhua, et al. 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 [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(1): 76-85.
- [28] 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. *地球化学*, 2009, 38(5): 498-506.
- HUANG Sijing, HUANG Keke, FENG Wenli, et al. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences porosity formation in clastic diagenesis—A case study on the Upper on secondary Paleozoic Ordos Basin and Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression [J]. *Geochimica*, 2009, 38(5): 498-506.
- [29] 孙光远, 王哲麟, 刘培刚, 等. 碱性长石溶蚀微孔发育特征及其对致密砂岩储层物性的改造作用——以鄂尔多斯盆地华庆地区三叠系延长组6段3亚段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 658-669.
- SUN Guangyuan, WANG Zhelin, LIU Peigang, et al. Dissolved micro-pores in alkali feldspar and their contribution to improved properties of tight sandstone reservoirs: A case study from Triassic Chang-63sub-member, Huaqing area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 658-669.
- [30] 马鹏杰, 张世奇, 佟昕, 等. 东濮凹陷文东地区沙三段储集层硬石膏胶结的形成机制[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(4): 772-779.
- MA Pengjie, ZHANG Shiqi, TONG Xin, et al. The Forming Mechanism of Anhydrite Cementation in the Es₃ Sandstone Reservoir of the Wendong Area, Dongpu Depression [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(4): 772-779.
- [31] 毛倩茹, 范彩伟, 罗静兰, 等. 超压背景下中深层砂岩储集层沉积—成岩演化差异性分析: 以南海莺歌海盆地中新统黄流组为例[J]. *古地理学报*, 2022, 24(2): 344-360.
- MAO Qianru, FAN Caiwei, LUO Jinglan, et al. Analysis of sedimentary-diagenetic evolution difference on middle-deep buried sandstone reservoirs under overpressure background: a case study of the Miocene Huangliu Formation in Yinggehai Basin, South China Sea [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(2): 344-360.
- [32] 王琪, 马东旭, 余芳, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区下石盒子组不同粒级砂岩成岩演化及孔隙定量研究[J]. *沉积学报*, 2017, 35(1): 163-172.
- WANG Qi, MA Dongxu, YU Fang, et al. The Diagenetic Evolution Grain Size Sandstones of Ordos Basin and Quantitative Research of Porosity in Different the Lower Shihezi Formation in Linxing Area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(1): 163-172.

(编辑 张玉银)