

砾岩中浊沸石的形成和溶蚀对储层物性的影响 ——以准噶尔盆地西北缘中拐凸起下二叠统佳木河组砾岩气藏为例

赵长永¹ 师翔^{2,†} 廖伟³ 闫利恒⁴ 戴灿星⁴ 李绪涛² 师永民^{5,†} 郑皓轩⁶

1. 中国石油新疆油田分公司勘探事业部, 克拉玛依 834000; 2. 华巍博大(北京)科技有限公司, 北京 100083;
3. 中国石油新疆油田储气库有限公司, 呼图壁 831200; 4. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 克拉玛依 834000;
5. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 6. 陕西科技大学化学与化工学院, 西安 710021;
† 通信作者, E-mail: sx834703670@163.com (师翔), sym@pku.edu.cn (师永民)

摘要 以中拐凸起下二叠统佳木河组砾岩气藏的储层为研究案例, 在岩芯观察、光学显微镜和全能谱扫描电子显微镜观察的基础上, 分析砾岩储层中浊沸石的发展特征, 探讨其成因机制, 并分析浊沸石充填、溶蚀及含量变化对储层物性的影响, 得到如下认识。1) 浊沸石不但充填在砾岩、安山质砾石以及颗粒内原生气孔中, 而且大量分布在砾石骨架颗粒之间, 占胶结物含量的80%以上, 与研究区基性和碱性火山质母岩成分密切相关。2) 研究区沸石成因有内生和外生两种类型, 内生作用形成的沸石充填于安山质砾石内部的原生气孔中, 与喷出岩的低温热液作用或接触交代作用有关; 外生作用类型的沸石是含玻璃质较高的各种火山熔岩和凝灰岩受碱性水溶液的蚀变作用, 发生脱玻璃化后形成, 充填在砾石骨架的孔隙中, 使储层发生致密化, 其中典型的是风化淋滤作用形成的沸石。3) 沸石对研究区储层有重要影响, 早期碱性环境下, 大量沸石的充填和胶结使储层发生致密化的消极作用, 后期酸性环境下, 部分沸石溶蚀产生次生孔隙的积极作用, 以大量充填于砾间孔中而产生致密化的消极作用为主。总之, 沸石类矿物的胶结程度、含量及后期的溶蚀程度控制着储层的储集性能。

关键词 准噶尔盆地; 砾岩; 气藏; 储层; 浊沸石; 储层物性

Formation and Erosion of Zeolites in Conglomerate Reservoirs Impact on Physical Properties: an Example of a Conglomerate Gas Reservoir of Lower Permian Jiamuhe Formation in Middle Abduction Bulge on Northwest Margin of Junggar Basin

ZHAO Changyong¹, SHI Xiang^{2,†}, LIAO Wei³, YAN Liheng⁴, DAI Canxing⁴,

LI Xutao², SHI Yongmin^{5,†}, ZHENG Haoxuan⁶

1. Exploration Division, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000; 2. Huawei Boda (Beijing) Technology Co. Ltd., Beijing 100083; 3. Gas Storage Co. Ltd., PetroChina Xinjiang Oilfield, Hutubi 831200; 4. Engineering Research Institute of PetroChina Xinjiang Oilfield Branch, Karamay 834000; 5. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 6. College of Chemistry and Chemical Engineering, Shanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021;
† Corresponding authors, E-mail: sx834703670@163.com (SHI Xiang), sym@pku.edu.cn (SHI Yongmin)

Abstract Taking the reservoir of the Lower Permian Jiamuhe Formation Conglomerate Gas Reservoir in the Zhongguai Uplift as a research case, based on core observation, optical microscopy, and full spectrum scanning electron microscopy, this paper analyzes the development characteristics of turbidite in conglomerate reservoirs, explores its genetic mechanism, and analyzes the effects of filling, dissolution, and content changes of turbidite on reservoir properties. The following understanding are obtained. 1) Turbidite is not only filled in conglomerates,

andesitic gravels, and primary gas pores within the particles, but also widely distributed among the gravel skeleton particles, accounting for over 80% of the cement content. It is closely related to the composition of basic and alkaline volcanic parent rocks in the study area. 2) The origin of zeolite in the study area can be divided into two types: endogenous and exogenous. The zeolite formed by endogenesis is filled in the primary pores of andesitic gravel, which is related to the low-temperature hydrothermal process or contact metasomatism of volcanic rock; The zeolite of exogenic type is formed by the alteration of various volcanic lava and tuff with high glassy content by alkaline aqueous solution after devitrification and filling in the pores of gravel skeleton, which makes the reservoir compact. The typical zeolite is formed by weathering and leaching. 3) Zeolites have a significant impact on the reservoirs in the study area. In the early alkaline environment, the filling and cementation of a large amount of zeolites have a negative effect on the densification of the reservoir. In the later acidic environment, some zeolites have a positive effect on the dissolution of secondary pores, with a large amount of filling in the gravel pores leading to the negative effect of densification. In summary, the degree of cementation, content, and later dissolution of zeolite minerals control the reservoir performance.

Key words Junggar Basin; conglomerate; gas reservoir; reservoir; laumontite; reservoir physical properties

浊沸石的一般化学式为 $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 晶体结构容易受地质环境的影响而发生改变。浊沸石的成因有以下两种: 1) 方解石与高岭石在高温高压环境中发生反应, 属于埋藏变质作用的产物, 代表埋藏作用与变质作用的界线, 以浊沸石变质相的形式出现^[1-4]; 2) 碎屑岩孔隙中大量碱性火山凝灰质在低温低压环境中水解, 或基性斜长石钠长石化, 产生 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 离子和水铝硅酸盐络阴离子团, 以胶结物的形式充填在骨架孔隙中^[3-8]。油气储层中的沸石类矿物一般是在成岩演化过程中以胶结物形式存在的自生矿物。

针对陆相碎屑岩储层中浊沸石的形成、分布以及对储层的影响, 已有较多的研究, 尤其是鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透-致密砂岩以及准噶尔盆地西北缘二叠系-三叠系砾岩储层中沸石胶结物的相关研究颇多^[2-10]。付国民等^[5]通过研究鄂尔多斯盆地东南部富县地区延长组长3段油层浊沸石的形成与分布, 认为在早成岩期 $85\sim 100^\circ\text{C}$ 条件下, 含量较高的斜长石与碱性富钠孔隙水相互反应, 形成浊沸石胶结; 在晚成岩期, 有机质脱羟作用导致形成有机酸, 溶蚀浊沸石, 产生大量次生孔隙。可见, 浊沸石具有使储层致密化和溶蚀产生次生孔隙的双重作用。

研究表明, 以胶结物形式充填于碎屑岩储层中的沸石具有特定的时空分布特点, 往往在某个层段或某个区块集中分布^[1,6-7,9]。准噶尔盆地西北缘玛湖28井区的上乌尔禾组中, 砾岩几乎全部被浊沸石胶结, 砂质含量低, 浊沸石控制了储层的物性^[10]。鄂尔多斯盆地吴起-安塞地区长10油层胶结物中浊沸石充填的占比为60%, 储层的孔隙中浊沸石溶蚀

孔的占比高达86%^[11]。

目前已发现的各种碎屑岩储层中普遍发育沸石胶结, 由于母岩类型、沉积环境和成岩作用的差异, 沸石胶结物的类型和含量差异较大。虽然碎屑岩储层中浊沸石是成岩作用的产物, 但其空间分布与沉积相密切相关。例如, 准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷乌尔禾组的浊沸石主要分布在扇三角洲前缘靠近古湖岸的地带^[10], 鄂尔多斯盆地延长组浊沸石含量高的部位往往处于三角洲前缘地带^[11], 可能与这些相带的古盐度、高钙质含量以及流体活跃程度有关。

我国大部分盆地的碎屑岩储层中普遍发育沸石胶结, 如鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透-致密砂岩储层^[11]、松辽盆地下白垩统泉头组-登楼库组致密砂岩储层^[6]、渤海湾盆地沙四段广泛分布的方沸石胶结砂岩储层^[6,12]以及四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组浊沸石胶结的砂岩储层等^[13-14]。在与火山岩母岩相关的断陷湖盆砂砾岩储层中, 沸石胶结也较为常见, 如二连盆地下白垩统阿尔善组钠沸石和方沸石胶结的火山质砂砾岩储层以及松辽盆地下白垩统沙河子营城组火山质砾岩储层等。

综上所述, 陆相碎屑岩中以胶结物形式存在的浊沸石较为普遍, 主要见于松辽、渤海湾、二连、鄂尔多斯、四川、苏北-南黄海、三塘湖和准噶尔等盆地^[6], 成因类型相对单一, 通常以某种成因为主, 同时具有内生和外生成因的沸石胶结物几乎没有报道。

准噶尔盆地西北缘中拐凸起南北两侧砾岩中的沸石胶结物不仅成因复杂, 而且与绿泥石等其他胶结物相比, 绝对含量和相对含量都异常地高。玛湖28井区下乌尔禾组砾岩中的胶结物几乎全为浊沸

石, 约占储层岩石总矿物含量的 22%^[10]。中佳 2 井区下二叠统佳木河组砾岩储层中浊沸石胶结物绝对含量为 15%~20%, 相对于绿泥石等其他胶结物的相对含量为 80%^[7], 其他胶结物为方解石, 不含黏土矿物, 砂质含量低, 浊沸石控制了原生砾石骨架颗粒之间孔隙的减少程度和次生溶蚀孔的发育程度, 进而控制了储层甜点的分布, 这在其他碎屑岩储层中很少见。因此, 探讨该地区浊沸石的成因机制有助于判别沉积环境, 恢复成岩演化过程, 预测优质储层的分布。

针对上述问题, 本文以准噶尔盆地中拐凸起佳木河组气藏为例, 通过研究砂砾岩储层中浊沸石的成因机制以及对储层物性的影响, 揭示储层中浊沸石的溶蚀对地层沉积-成岩-物性改造过程的演化规律, 为下一步勘探部署提供依据。

1 准噶尔盆地西北缘砾岩储层沸石发育特征

1.1 研究区储层地质概况

准噶尔盆地西北缘中拐凸起二叠系至侏罗系地层为继承性的宽缓鼻状古隆起, 自西北缘的红车断裂起, 沿东南向沙湾凹陷倾没, 从白垩系地层开始, 成为隐伏的古隆起, 周缘构造活动强烈, 断裂非常发育(图 1)。从凹陷区向凸起区, 二叠系地层依次被剥蚀尖灭, 具备形成构造-地层油气藏的良好地质背景。近年来, 在中拐凸起东南翼下二叠统佳木河组已发现地质储量规模超过 $5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的气藏。

中拐凸起的脊线基本上沿着红 3 井东侧断裂呈北西-南东向展布。中佳 2 井区位于红 3 井东侧断裂以南, 处于红车断裂带的下盘, 整体上为一个大型的平缓单斜构造, 地层倾角为 $3^\circ \sim 5^\circ$, 局部发育鼻状构造。

研究区目的层为二叠系底部佳木河组二段(P_{1j2}), 自上而下分为 3 个砂层组(P_{1j2}^1 , P_{1j2}^2 和 P_{1j2}^3)。主力产气层为佳二段一砂组(P_{1j2}^1), 岩性为大套褐灰色含浊沸石的凝灰质砂砾岩和薄层杂色泥岩。砾石成分以方解石、沸石充填的杏仁状玄武岩和安山岩为主, 砾石呈棱角状, 大小混杂, 反映近物源快速堆积的特点。砂层组具有下粗上细的正旋回特性, 系扇三角洲平原向前缘过渡的分流主河道沉积, 物源为凹陷边缘的石炭系火山岩, 主要为沸石和方解石充填的杏仁状玄武岩、安山岩及中基性火山碎屑岩,

这也为该地区沸石的形成提供了重要的物质来源。

1.2 砾岩储层孔隙的成因机制

大量形成的浊沸石、方沸石及少量方解石、高岭石、绿泥石等胶结物, 一方面占据储层孔隙, 使储层变得致密, 另一方面抑制成岩过程中储层的压实作用, 这些胶结物的充填为后期的溶蚀作用提供了物质基础。成岩作用后期, 在大气水以及有机质热演化产生的酸性流体作用下, 浊沸石发生溶蚀, 改善了储层的物性, 成为主要的储集空间和油气聚集场所。浊沸石溶蚀孔中常见的沥青反映储层曾发生规模性的油气充注, 抑制储层的进一步致密化, 使储层保留较多的孔隙。

佳木河组沉积期, 中拐凸起受扇三角洲平原前缘亚相控制, 形成一大套厚层浊沸石胶结的粗碎屑沉积, 以砂砾岩为主, 夹砂质中细砾岩、含砾中细砂岩以及含砾泥质粉细砂岩(图 2), 沉积物分选程度低, 为棱角-次棱角状(图 2(a)), 砾石之间多碎屑杂基支撑(图 2(b)), 普遍含大量方解石和浊沸石充填的杏仁状或气孔状火山岩(凝灰岩、安山岩和玄武岩)及大量玻屑(图 2(c)和(d)), 储集空间以浊沸石次生溶蚀孔隙为主(浊沸石含量占填隙物总含量的 80%), 同时保留大量火山岩原始气孔。

通过研究区 8 口井(G3, G13, XG1, ZJ2, ZJ4, ZJ5, ZJ6 和 ZJHW201)的岩芯观察, 统计浊沸石和方解石含量, 结合胶结充填和溶蚀特征, 绘制中佳 2 井区浊沸石相的平面分布图(图 3)。可以看出, 浊沸石胶结物在平面上分布广泛, 说明研究区及周边地区二叠系佳木河组沉积期具备浊沸石形成的地质环境, 特别是红车断裂带以西的石炭系火山岩母岩区提供了大量的 Ca^{2+} 和其他水铝硅酸盐矿物。准噶尔盆地西北缘中拐凸起中的石炭系物源区母岩主要为富碱的基性玄武质和安山质火山岩, 气孔发育, 是形成砂砾岩原生孔隙的主控因素。

中拐凸起南翼下二叠统气藏是近来发现的一个新气藏, 其储层主体是以浊沸石溶蚀孔为主的砾岩储层(图 4), 是一种新的储层类型: 粒间溶蚀孔隙。

储层的砾石成分与沸石胶结物关系密切, 储层内部安山质砾石中, 原生火山岩气孔充填大量浊沸石, 由长石和似长石经蚀变、交代而成, 常与方解石构成杏仁状。

1.3 砾岩储层浊沸石胶结特征

研究区砾石成分以方解石和浊沸石充填的杏仁

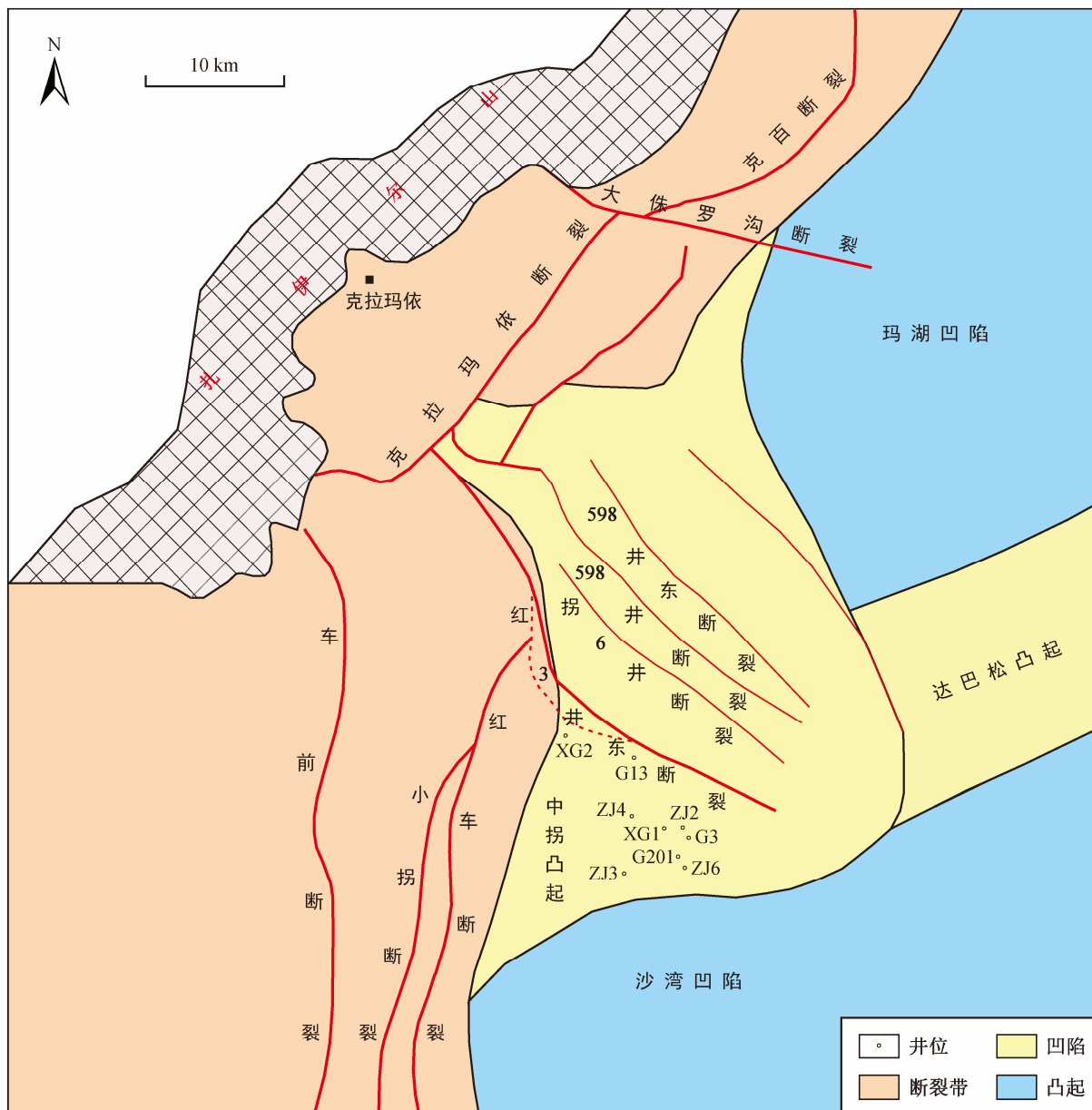


图 1 准噶尔盆地西北缘地区中拐凸起位置及断裂分布

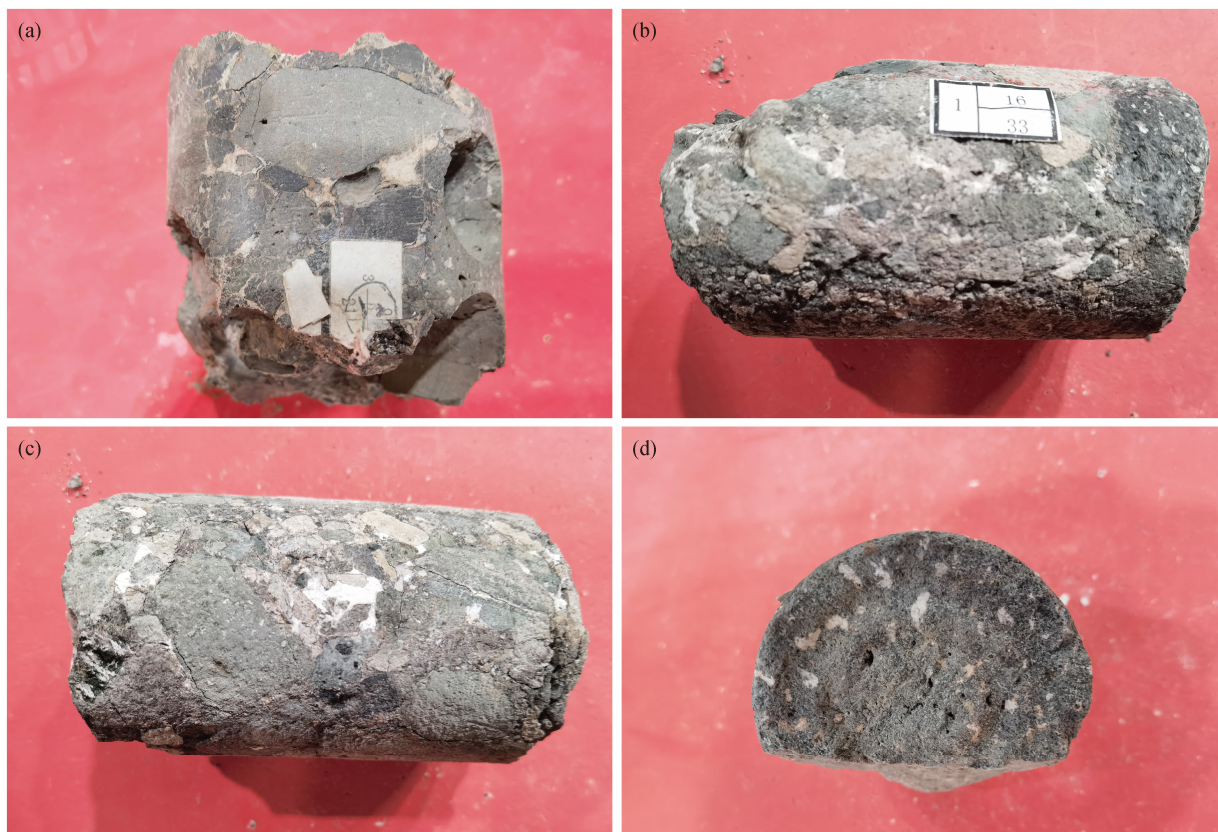
Fig. 1 Location and fault distribution of Zhongguai Uplift in Northwest margin of Junggar Basin

状玄武岩、安山岩和火山碎屑为主，泥质砾岩次之，砂质成分以岩屑为主，砾石骨架颗粒之间胶结物以浊沸石为主，反映该区以富 Ca^{2+} 化学沉淀为主的特点。储集空间类型丰富多样，包括安山质砾石内部原始火山残留气孔、砾石骨架颗粒之间浊沸石溶蚀次生孔隙以及剩余砾石骨架颗粒之间孔隙(图 5)。

显微镜下薄片观察统计结果表明，沸石胶结物的绝对含量为 15%~20%，占总填隙物含量的 80% 以上，部分薄片甚至 100% 的胶结物为浊沸石(图 5(a))，次圆状大小不等的砾石呈“漂浮”状分布在沸

石填隙物中，反映出沸石形成时间在成岩埋藏压实作用之前，砾石呈松散状，孔隙流体处于开放状态，大量的富碱金属离子和铝硅酸根离子富集，发生化学沉淀。此外，还可以观察到浊沸石与绿泥石共生的现象(图 5(b))，绿泥石呈环边状分布在骨架颗粒的边缘。

砾石呈孤立状分布在沸石胶结物的填隙物中(图 5(a))，对成岩作用的早期压实致密起到抑制作用，有助于后期沸石溶蚀形成的次生孔隙保留下来。沸石胶结的砾岩中，沸石晶间(溶扩)孔发育，



(a) 浊沸石胶结物充填粗-中粒不等碎屑砂砾岩(G13 井, 4202 m); (b) 浊沸石胶结物充填中-细粒不等碎屑砂砾岩(ZJHW201 井, 5608 m); (c) 浊沸石胶结物充填粗-中-细粒不等碎屑砂砾岩(ZJHW201 井, 5608 m); (d) 浊沸石胶结物充填细粒碎屑砂砾岩, 在岩芯横剖面可见气孔状构造(ZJHW201 井, 5604 m)。白色部分为浊沸石胶结物

图 2 中佳 2 井区砾岩储层中的浊沸石充填
Fig. 2 Laumontite infilling of conglomerate reservoir in Well ZJ2 Block

含沥青, 面孔率为 2%~3% (图 5(a)中暗色部分)。

2 砾岩储层中浊沸石成因机制探讨

2.1 内生作用成因机制

浊沸石的内生作用成因机制, 主要是岩石中矿物与地幔热能作用的结果。当热液通过岩石时, 其中的 Na, Ca, K 等与岩石中 Si, Al 等发生反应, 形成具有特定结构的浊沸石。火山岩中的钙长石在热液作用下发生钠长石化, 这一过程中会有浊沸石形成。

研究区大量薄片(G3 井, G13 井, XG1 井, ZJ2 井, ZJ4, ZJ5, ZJ6 井和 ZJHW201 井)观察表明, 斜长石斑晶环带特征明显, 基质中斜长石格架间充填玻璃质, 玻璃质均已脱玻绿泥石化(图 6(a)), 杏仁体发育, 方解石和浊沸石充填(图 6(b)), 可见部分未被充填残余气孔(图 6(c))。通过分析研究区储层中浊沸石的形成过程, 本文认为基性斜长石的钠长石化为浊沸石的形成提供了物质基础。60~160℃条件下,

火山物质遇水重结晶, 促进孔隙水中的 Na^+ 置换, Ca^{2+} 进入基性长石晶格, 导致基性斜长石转化为钠长石, 同时 Ca^{2+} 被释放进溶液中, 有利于浊沸石和方解石的形成。因此, 碎屑岩中内生作用形成的浊沸石常与喷出岩的晚期低温热液作用或接触交代作用有关。

2.2 外生作用成因机制

外生作用是浊沸石的重要成因类型。火山岩在母岩区经过长期的风化淋滤和剥蚀作用, 再经过长距离的搬运, 在沉积区沉积并压实成岩。研究区浊沸石的成因有两种: 1) 在杏仁状安山质砾石中基性斜长石的钠长石化过程中形成浊沸石充填; 2) 碱性火山质母岩及上下相邻层位所含火山碎屑物质在长期的风化剥蚀过程中产生大量 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 和水铝硅酸盐络阴离子团, 孔隙流体不断地将这些矿物元素迁移、浓缩和聚集, 在弱碱性环境下结晶析出浊沸石, 以胶结物形式充填在孔隙中。

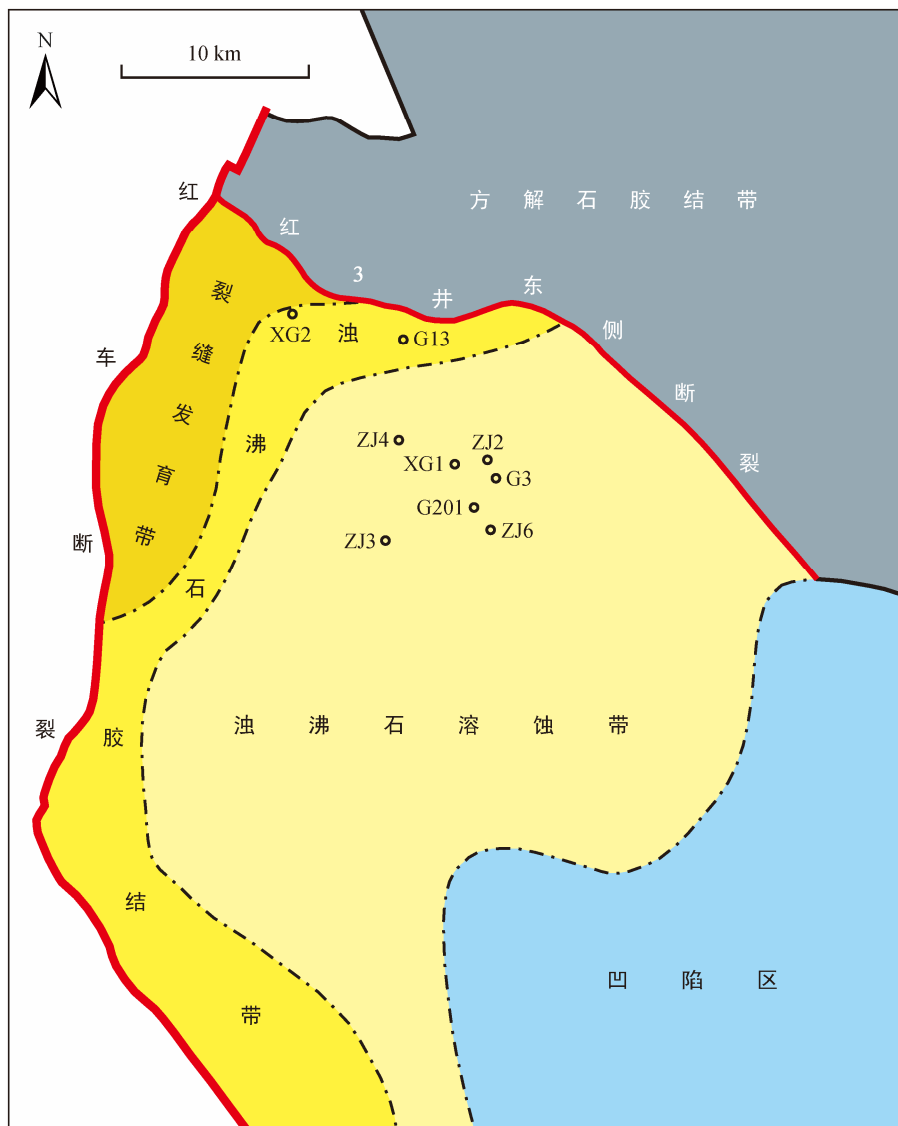


图3 准噶尔盆地西北缘中佳2井区佳木河组沸石相的平面分布

Fig. 3 Plane distribution of zeolite facies in Jiamuhe Formation of Well ZJ2 Block in the northwest of Junggar Basin

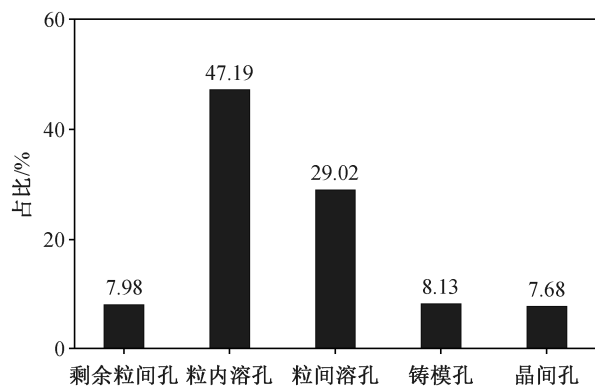
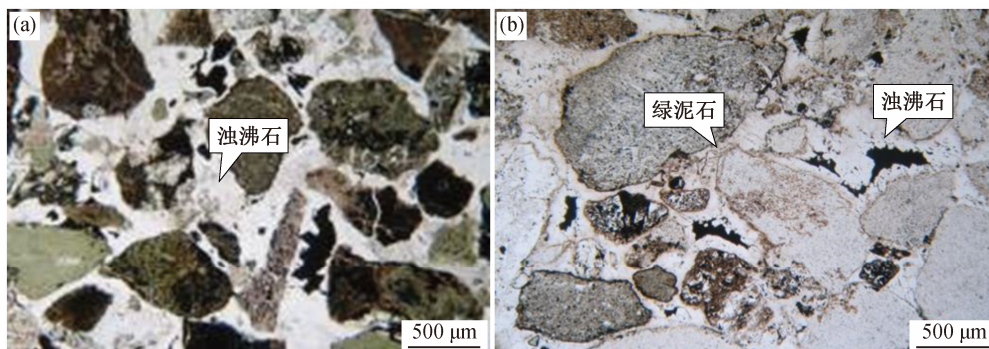


图4 中佳2井区二叠系佳木河组储集空间类型占比

Fig. 4 Proportion of the storage space types of the Permian Jiamuhe Formation in Well ZJ2 Block

中拐凸起南部中佳2井区下二叠统佳木河组与上覆二叠统乌尔禾组地层之间为区域不整合接触(图7),中间缺失中、下二叠统风城组和夏子街组。在长时间的风化剥蚀过程中,地层中砾石骨架颗粒之间的孔隙为沸石胶结提供了充分的空间。碱性沉积环境利于形成浊沸石,因此研究区浊沸石胶结物的绝对含量比其他矿物高。

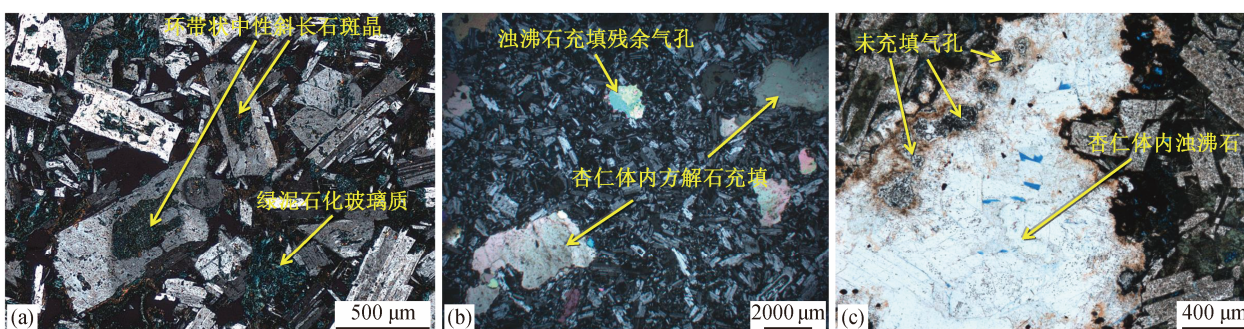
综合研究区钻井取芯观察资料和元素测井资料,结合常规测井曲线中单井浊沸石含量的变化情况(图7),可知纵向上浊沸石发育程度差异较大。在以火山岩为主的下部层段,浊沸石胶结致密,储层物性差,试油结果显示为低液量的水层或含油水



(a) 纯浊沸石胶结砾岩(G3井, 4639.95 m, 单偏光); (b) 浊沸石与绿泥石共同胶结砾岩(XG1井, 4557.13 m, 单偏光)

图 5 中佳 2 井区佳木河组砾岩储层中的浊沸石胶结

Fig. 5 Laumontite cementation of conglomerate reservoir on Jiamuhe Formation in Well ZJ2 Block



(a) 杏仁状安山岩质砾石蚀变和脱玻化(单偏光); (b) 杏仁体被方解石和浊沸石充填(正交偏光); (c) 杏仁状安山岩砾石被浊沸石充填(单偏光)。ZJHW201井, 5603.86 m

图 6 普通显微镜下杏仁状安山岩质砾石内的蚀变充填

Fig. 6 Inner erosional alteration and filling of amygdaloid andesite gravels under ordinary microscope

层, 进一步说明在油、气、水冲注过程中, 因致密储层物性差, 只有小部分储层孔隙可以充注地层流体。中上部层段浊沸石溶蚀程度高, 储层物性好。砾岩储层中浊沸石溶蚀对储层物性的改善起决定性的作用。试油结果显示, 上部产气量在万方以上, 均为纯气层, 可见砂砾岩储层中浊沸石的溶蚀对储层的物性改造作用明显。

3 浊沸石对储层物性的影响

3.1 浊沸石胶结充填使砾石骨架颗粒之间孔隙度降低

在钙碱性凝灰质沉积后的成岩阶段, 碱性环境下形成大量沸石类矿物, 充填在砾石骨架颗粒之间的孔隙中。沸石的胶结作用使得孔隙度降低, 岩性致密化。研究区砂质砾岩和砾岩中, 砾石成分以安山岩为主, 其次为英安岩和霏细岩。砾石骨架颗粒之间被浊沸石和泥质杂基充填, 砂质多被浊沸石交代(图 8)。

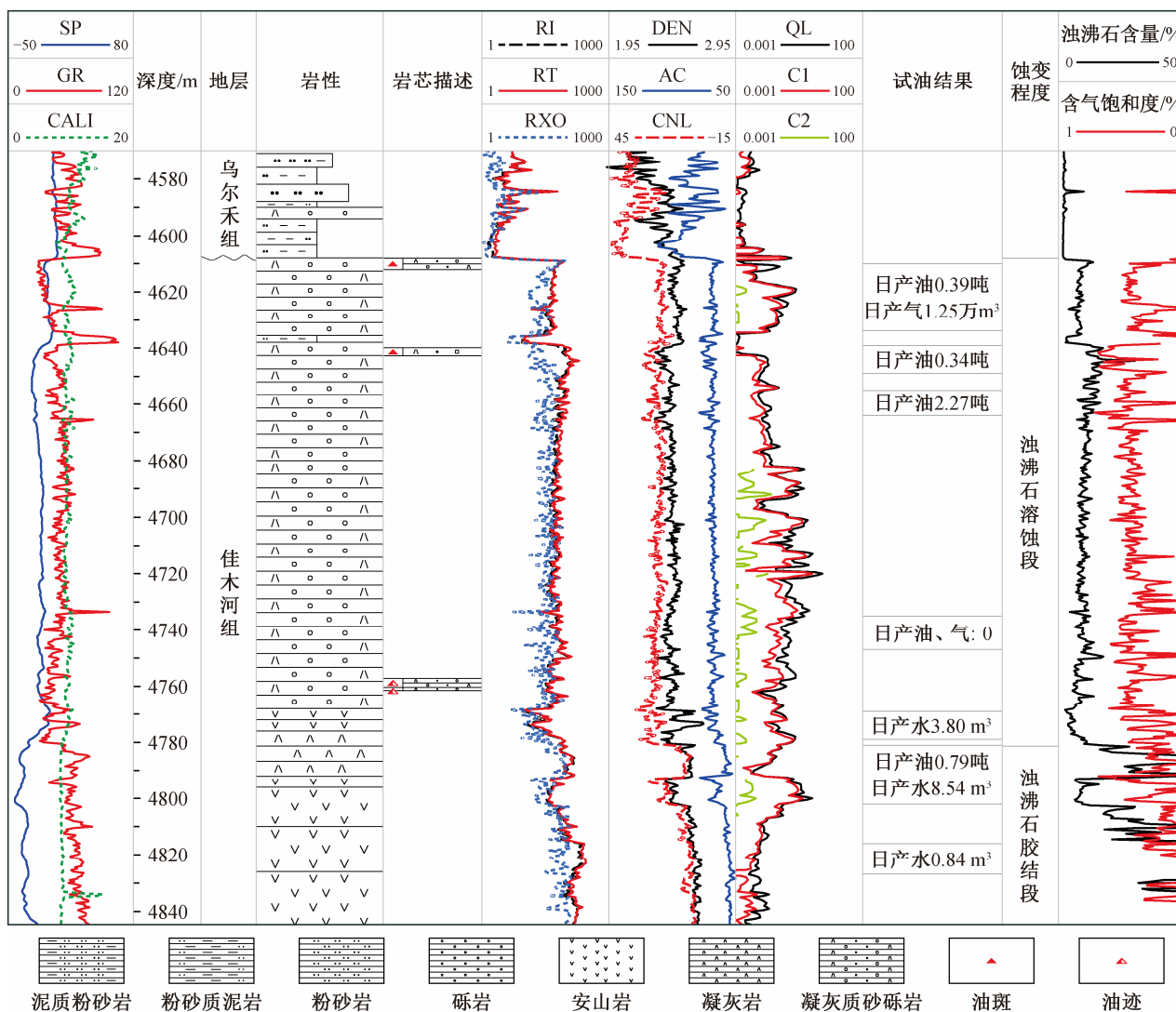
3.2 浊沸石溶蚀形成次生孔隙

在链接铝氧八面体和硅氧四面体的架状结构中, 含有较多的 H^+ 和 OH^- (结构水和结晶水) 以及 Ca^{2+} , 在碱性环境下相对稳定, 易结晶形成稳定的水铝硅酸盐矿物。但是, 在 H^+ 含量高的酸性环境下, H^+ 容易取代 Ca^{2+} , 形成水铝硅酸胶体, 溶于水而流失, 造成矿物架状结构坍塌(溶蚀)。

在中佳 2 井区的大量岩石薄片, 可以看到浊沸石溶蚀孔边缘分布大量伊利石。由于浊沸石在低温低压环境下不稳定, 在弱碱性环境下容易发生沉淀, 在酸性环境下又容易溶蚀, 因此, 作为早期的填隙物, 浊沸石会降低原生孔隙, 但后期酸性环境中又容易溶蚀, 成为良好的存储和渗流通道(图 9)。

3.3 浊沸石溶蚀改变储层物性

与常见的碎屑岩储层相比, 研究区砾岩储层填隙物中 80% 以上为浊沸石胶结, 呈浅白色, 充填在粒间孔中, 占储层岩石总矿物含量的 15%~30%。溶蚀产生的次生孔隙是研究区主要的储集空间类



SP: 自然电位(MV); GR: 自然伽马(API); CALI: 井径(cm); RI: 浅电阻率(Ω m); RT: 真电阻率(Ω m); RXO: 深电阻率(Ω m); DEN: 密度(g/cm^3); AC: 声波时差($\mu s/m$); CNL: 补偿中子含量(%); QL: 全烃含量(%); C1: 甲烷含量(%); C2: 乙烷含量(%)

图7 G13井P_{1j2}¹组储层综合柱状图

Fig. 7 Comprehensive histogram of P_{1j2}¹ reservoir of Well G13

型，因此浊沸石的含量和溶蚀程度是影响研究区储层物性的主要因素。

从图7看出，因沉积环境和岩性差异，研究区浊沸石纵向含量变化以及胶结和溶蚀程度差异非常大。图7中录井结果显示，下部浊沸石胶结段岩性致密，地层孔隙水较少，主要依靠造岩矿物中极少量的自由电子导电，故电阻率异常高，反映储层浊沸石的溶蚀程度低。上部储层段中浊沸石大量溶蚀，岩石颗粒之间的大量孔隙被地层水充满，水中所含盐类呈离子状态，在外加电场作用下，这类岩石主要靠离子导电，导电能力强，电阻率偏低，说明浊

沸石溶蚀后产生大量孔隙。佳木河组地层纵向的蚀变程度与储层物性和生产能力相对应(图10)。

从图10看出，不同的浊沸石含量区间，孔隙度与渗透率均呈现一定的相关性；随着浊沸石含量增加，渗透率略增大，基本上在 $1 \times 10^{-3} \mu m^2$ 以上。储层孔隙度和渗透率与浊沸石含量大致正相关，但并非浊沸石含量高，孔渗条件就好。孔渗发育程度与浊沸石的溶蚀程度密切相关，浊沸石含量是控制溶蚀孔隙发育程度的必要条件，而不是充分条件。

3.4 沸石对储层形成的积极作用和消极作用

研究区浊沸石与其他沸石类矿物一样，多产于

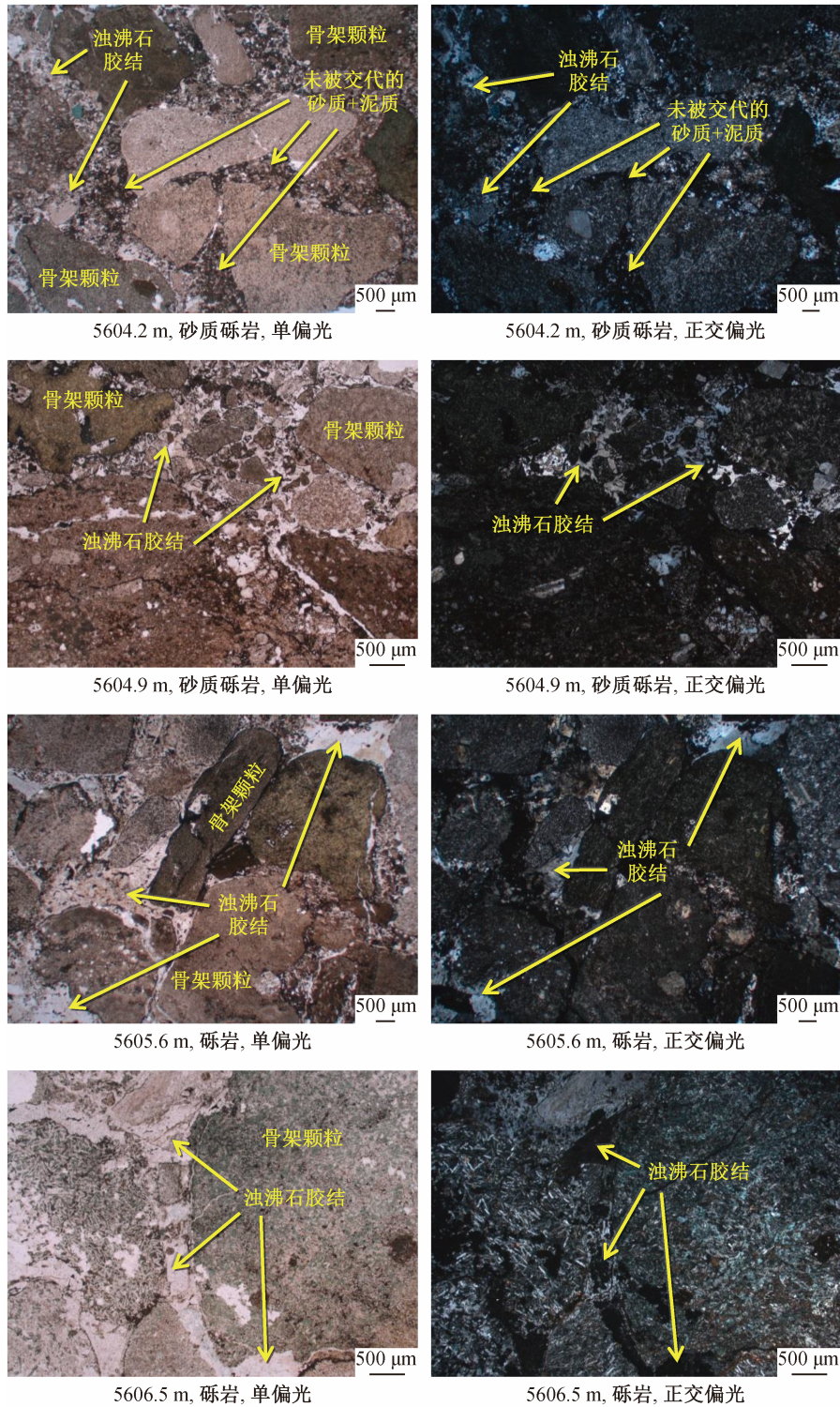


图 8 中佳 2 井区 ZJHW201 井砾岩储层中的浊沸石充填
Fig. 8 Laumontite filling and reservoir densification of Well ZHJW201 in Well ZJ2 Block

火山岩及火山碎屑岩区, 与研究区西部红车断裂带以西石炭系母岩区的钙碱性安山岩、玄武岩和角砾岩密切相关。虽然浊沸石的早期胶结破坏了原生孔隙结构, 使原生孔隙减少, 降低了油气储集性能,

但增强了储层的抗压能力; 浊沸石后期溶蚀产生的次生孔隙明显地改善了储集层的物性。可见, 浊沸石对储层物性的积极作用和消极作用都很明显, 以大量充填于砾石骨架颗粒之间孔隙中发生致密化的

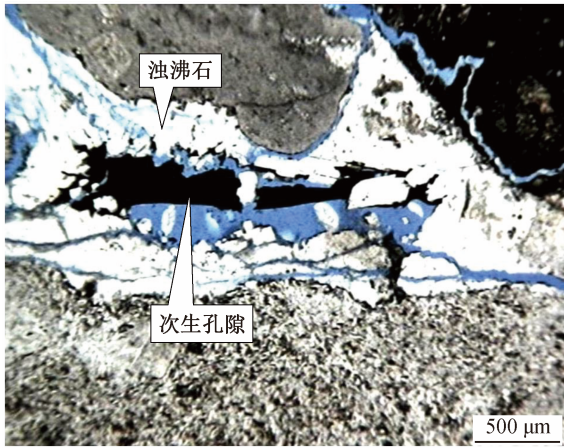


图9 佳木河组砾石骨架颗粒之间的浊沸石及浊沸石胶结溶蚀孔(XG1井, 4558.06 m)

Fig. 9 Corrosion pores of intergravel laumontite and laumontite cementation between gravel skeleton particles in Jiamuhe Formation (Well XG1, 4558.06 m)

消极作用为主, 后期溶蚀改造作用为辅。

综上所述, 无论是浊沸石的积极作用还是消极作用, 研究区砾岩储层中沸石类矿物的含量、胶结程度及后期溶蚀程度对整个中拐地区的油气储集性

能都有十分重要得影响, 揭示其内在成因机理和分布规律, 对含油气储层的评价、甜点预测和后期的储层改造具有重要的指导意义。

4 讨论

在大部分硅铝酸盐晶体构造中, 金属阳离子都限制在硅氧四面体构成的晶体骨架空隙间, 除非晶体结构被破坏, 这些金属阳离子很难自由活动。由于浊沸石晶体骨架内部空间较大, 金属阳离子位于晶体相互连通的孔道或晶体骨架内部, 阳离子可自由地通过孔道发生交换作用而不破坏其晶体骨架。

浊沸石形成于碱性环境中, 酸性环境有利于浊沸石溶蚀。特别是在强酸性环境(如酸化压裂时使用的土酸, 主要成分为盐酸和氢氟酸)中, 浊沸石和绿泥石遇强酸发生溶蚀, 会分别转化氢氧化铝胶体和氢氧化铁胶体沉淀, 造成储层伤害, 因此浊沸石胶结的储层具有潜在的酸敏特性。

当流体中 H^+ 浓度增加时, 不断置换 Ca^{2+} 和 Na^+ 等连接四面体的金属阳离子, 导致纳米级笼架状结构“坍塌”, 形成硅铝酸, 当溶液中硅铝酸浓度达到

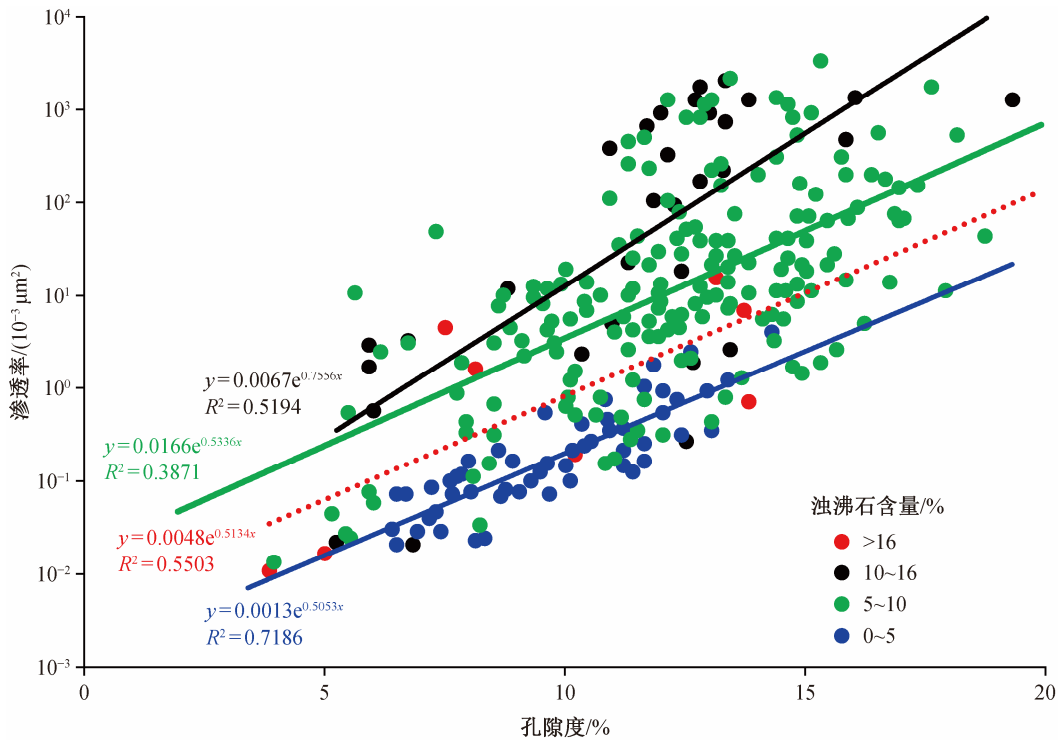


图10 ZJ2 区块佳木河组不同浊沸石含量的孔隙度与渗透率散点图

Fig. 10 Scatter plot of porosity and permeability depending on different laumontite content in Jiamuhe Formation of Well ZJ2 Block

一定值后,会发生缩聚反应,形成 Si-O-Si 的三维网络结构,将水分“锁住”,从而形成凝胶沉淀,堵塞喉道,造成储层伤害。

因此,对于以浊沸石胶结为主的砾岩储层,应尽量避免采用土酸进行酸化的方式进行储层改造。实验表明,乙酸等有机弱酸在浊沸石中的胶体沉淀较少,对储层的伤害较小,因此可以采用有机弱酸结合 Ca^{2+} 和 Fe^{2+} 等二价离子的络合剂进行酸化,改善储层的物性,进而对储层进行改造。

5 结论

1) 在成岩压实过程中,母岩类型及地层孔隙水的化学性质对沸石的形成起重要作用。沸石不但充填在安山质砾石内原生火山岩气孔中,而且大量分布在砾石骨架颗粒之间的孔隙中,占胶结物含量的 80% 以上,与研究区基性和碱性火山质母岩的成分密切相关。母岩区大量石炭系碱性火山凝灰质沉积提供了有利于浊沸石形成的金属离子和铝硅酸根离子,利于后期成岩过程中浊沸石的形成。

2) 准噶尔盆地西北缘砾岩储层中的沸石胶结物有内生作用和外生作用两种成因类型。内生作用形成的沸石与喷出岩的低温热液作用阶段或接触交代作用有关,由于矿物晶格间的空腔发育,晶格易出现缺陷,矿物易发生变形,因此形成的浊沸石充填于安山质砾石内部的原生气孔中。外生作用形成的沸石与含玻璃质较高的各种火山熔岩和凝灰岩的蚀变作用有关,充填在砾石骨架颗粒之间的孔隙中,使储层发生致密化。风化淋滤作用是研究区浊沸石典型的外生作用成因,在碱性岩风化壳下部埋藏较深的砂岩和砾岩中,长期的风化淋滤使金属离子和硅铝酸根迁移和富集,在风化淋滤带以下的潜流带砾岩储层中发生沸石的化学胶结。

3) 沸石对储层物性的影响具有明显的积极作用和消极作用,以引起致密化的消极作用为主。成岩早期的胶结作用破坏原生孔隙结构,使孔隙减少,降低油气储集性能,但同时增强了储层的抗压能力。后期成藏充注和排烃期大量有机酸进入储层,由于浊沸石的稳定性差,当地层中流体性质从碱性变成酸性时,浊沸石被溶蚀,形成溶蚀孔,明显地改善储集层的物性条件,并为原油在储层中提供富集场所。沸石类矿物的含量、胶结程度及后期的溶蚀程度控制了储层的储集性能。

参考文献

- [1] 梁浩, 罗权生, 孔宏伟, 等. 三塘湖盆地火山岩中沸石的成因及其储层意义. 沉积学报, 2011, 29(3): 537-543
- [2] 孙惠敏. 含沸石储层测井评价方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018
- [3] 李斌, 高云霞, 管英柱, 等. 靖安油田上三叠系延长统浊沸石的形成及对储层的影响. 油气地质与采收率, 2003, 10(1): 9-11
- [4] 宋虹玉. 火山岩储层中沸石矿物的分布、成因及转化规律的研究及其对油气勘探的影响. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(4): 176
- [5] 付国民, 董满仓, 张志升, 等. 浊沸石形成与分布及其对优质储层的控制作用: 以陕北富县探区延长组长 3 油层为例. 地球科学(中国地质大学学报), 2010, 35(1): 107-114
- [6] 王涛, 张生银, 魏璞, 等. 沸石类矿物成因及其对储层储集性能的影响. 岩性油气藏, 2022, 34(1): 175-186
- [7] 李金峰. 准噶尔盆地中拐地区二叠系砂砾岩储层沸石类成岩矿物形成机制及储层意义研究[D]. 南京: 南京大学, 2019
- [8] 孟祥超, 徐洋, 韩守华, 等. 中拐地区上乌尔禾组浊沸石展布规律及优质储层预测. 东北石油大学学报, 2013, 37(1): 16-23
- [9] 史燕青, 季汉成, 张国一, 等. 准噶尔盆地阜东斜坡梧桐沟组储层沸石分布特征及成因机制. 石油科学通报, 2021, 6(1): 1-15
- [10] 左霜. 玛湖环带二叠系乌尔禾组含浊沸石储层物性评价方法[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018
- [11] 胡津, 王冠民, 王朝, 等. 志丹-安塞地区延长组下组合方解石与浊沸石胶结物含量变化对储层致密化差异的控制. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(2): 129-140
- [12] 李乐, 姚光庆, 刘永河, 等. 大港油田塘 10 井区沙河街组方沸石白云岩储层特征. 石油学报, 2015, 36(10): 1210-1220
- [13] 卢文忠, 朱国华, 李大成, 等. 川中地区侏罗系下沙溪庙组浊沸石砂岩储层的发现及意义. 中国石油勘探, 2004, 9(5): 53-58
- [14] 杨晓萍, 张宝民, 刘桂侠, 等. 四川盆地侏罗系沙溪庙组含浊沸石砂岩储层特征及其油层改造建议. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005, 20(2): 6-10