

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

史燕青^{1,2}, 季汉成^{1,2*}, 张国一³, 王剑⁴, 宋兴国^{1,2}, 刘尽贤^{1,5}

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

3 中国石油吉林油田勘探开发研究院, 吉林松原 138000

4 中国石油新疆油田公司实验检测研究院, 新疆克拉玛依 834000

5 中国石化集团华东油气分公司泰州采油厂, 江苏泰州 225300

* 通信作者, jhch@cup.edu.cn

收稿日期: 2020-12-01

中国石油天然气集团有限公司—中国石油大学(北京)战略合作科技专项(ZLZX2020-01)资助

摘要 准噶尔盆地南部阜康凹陷东斜坡上二叠统梧桐沟组储层富含多种类型的沸石。沸石类矿物通常在碎屑岩、特别是火山碎屑岩中集中发育。沸石对油气储层的储集性能具有重要的影响,但其成因机制仍存在争议。本研究利用扫描电镜、电子探针和光学显微镜识别了梧桐沟组的主要4种沸石类型: 浊沸石、方沸石, 部分片沸石以及少量斜发沸石。浊沸石和方沸石在研究区梧桐沟组含量较高, 分别占沸石总含量的60%和30%, 片沸石则相对含量较少, 斜发沸石含量最少。阜东斜坡梧桐沟组沸石的分布特征主要受沉积微相、物源、地层水性质等因素的影响。在水下分流河道、河口坝等储层物性发育较好的微相中, 沸石含量越高; 并且在靠近南部博格达山物源区的地区, 有利于沸石的发育, 沸石含量高。此外, 在CaCl₂型地层水环境下, 沸石的含量(主要为浊沸石)明显高于其它地层水环境。在高沸石含量的情况下(大于5%), 沸石的含量与孔隙度、渗透率呈负相关关系, 表明沸石胶结物的溶蚀作用对储层的物性和储集性能具有明显的改善作用。目前主流观点认为准噶尔盆地二叠系的沸石是由火山物质蚀变并依次转化而来, 近期的研究中, 将准西北缘二叠系的沸石划分为高温成因和低温成因两种, 高温成因是由凝灰物质蚀变转化而来, 低温成因则是由孔隙水结晶形成。早期的浊沸石遭受酸性流体的溶蚀, 后期孔隙水在溶蚀孔隙中富集结晶形成第二期沸石。不同于传统意义上“火山物质水化”和沸石之间相互转化, 通过扫描电镜和能谱分析, 阜东斜坡梧桐沟组的沸石产生与长石的转化密切相关, 其中浊沸石和片沸石主要来自于斜长石在碱性条件下的钠长石化, 而方沸石则可能来自于钾长石在碱性条件下的转化作用。

关键词 准噶尔盆地; 梧桐沟组; 沸石; 溶蚀; 形成机制

Characteristics and genetic mechanisms of widely distributed zeolites in the Wutonggou Formation reservoir in the southern Junggar Basin

SHI Yanqing^{1,2}, JI Hancheng^{1,2}, ZHANG Guoyi³, WANG Jian⁴, SONG Xingguo^{1,2}, LIU Jinxian^{1,5}

1 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

引用格式: 史燕青, 季汉成, 张国一, 王剑, 宋兴国, 刘尽贤. 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, 01: 1-15

SHI Yanqing, JI Hancheng, ZHANG Guoyi, WANG Jian, SONG Xingguo, LIU Jinxian. Characteristics and genetic mechanisms of widely distributed zeolites in the Wutonggou Formation reservoir in the southern Junggar Basin. Petroleum Science Bulletin, 2021, 01: 1-15. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.001

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Exploration & Development Research Institute, PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan 138000, China

4 Research Institute of Experiment and Detection, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China

5 Oil Production Plant of East China Branch Company, SINOPEC, Taizhou 225300, China

Abstract Widely distributed zeolites were identified in the upper Permian Wutonggou Formation in the east slope of the Fukang sag of the southern Junggar Basin, NW China. Zeolites are usually found in clastic rocks, especially in pyroclastic rocks. Zeolite has an important influence on the reservoir properties of oil and gas reservoirs, however, the genetic mechanisms are still controversial. Four types of zeolites were identified by using scanning electron microscopy (SEM), electron microprobe analysis and optical microscopy. The content of laumontite and analcite are greater in the study area, accounting for 60% and 30% of total zeolite, while the content of heulandite is relatively lower, and clinoptilolite the lowest. The distribution characteristics of zeolites in the Wutonggou Formation are mainly affected by sedimentary microfacies, provenance and stratum water properties. There is more zeolite in the microfacies with better physical reservoir properties, such as subaqueous distributary channels and river mouth bars in a deltaic sedimentary environment. And in the area close to the southern Bogda mountain source area, this is beneficial to the formation of zeolites. Meanwhile, in the CaCl_2 stratum water environment, the content of zeolites (mainly laumontite) is obviously higher than that in other stratum water environments. When the zeolite content is greater than 5%, the content of zeolite is negatively correlated with porosity and permeability, indicating that the dissolution of zeolite cement could significantly improve the physical properties and storage performance of the reservoir. It is generally accepted that Permian zeolites in the Junggar Basin are derived from volcanic material alteration. In a recent study, zeolites in the study area are subdivided using the two kinds of genetic mechanisms, high and low temperature. The high temperature genetic mechanism is related to the alteration of tuff material, while the low temperature genetic mechanism is considered as crystallization caused by pore water. In the early stage, zeolite was dissolved by acid fluid; and in the later stage, pore water was enriched and crystallized to form the second stage zeolite. SEM images and energy-dispersive X-ray analysis show that it is different from the traditional sense of volcanic material hydration and zeolites transformed into other zeolite minerals. Zeolites in the Wutonggou Formation are more likely related to the transformation of different types of feldspars. Laumontite and heulandite mainly come from the albitization of plagioclase in an alkaline diagenetic environment, whereas analcime may come from the conversion of potassium feldspar in alkaline conditions.

Keywords Junggar Basin; Wutonggou Formation; zeolites; dissolution; formation mechanism

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.001

0 引言

沸石类矿物通常在碎屑岩、特别是火山碎屑岩中集中发育。沸石对油气储层的储集性能具有重要的影响。一方面,沸石类矿物的析出会充填孔隙,破坏原始孔隙结构,减少原生孔隙储集空间;另一方面,在成岩后期沸石胶结物会在酸性孔隙流体或有机酸的作用下发生溶蚀,形成次生孔隙,明显改善储集层的物性条件^[1];沸石类胶结物被溶蚀形成的次生孔隙对储层质量的改善具有重要意义,如鄂尔多斯盆地的安塞油田和静安油田三叠系延长组的主要储集空间为沸石胶结物被溶蚀后形成的次生溶孔^[1];在准噶尔盆地西北缘的二叠系储层中,储集空间50%以上的孔隙为沸石类、长石类矿物溶蚀作用贡献^[2]。

由于沸石类矿物对油气储层储集空间的重要作用,沸石的形成、蚀变以及成岩作用得到了国内外学者广泛的关注。沸石类的研究在国外起步较早, Hay^[3]首先对世界各地沉积岩中沸石矿物的分布和形成进行统计研究,提出沸石类矿物的形成与火山物质密切相关;

后来有学者在美国内华达州帕犹特方山系统研究了沸石的垂向分带性,并提出了沸石成岩模式及成岩序列^[4];在后续的研究中, Iijima^[5]系统综述了在油气储层中的沸石矿物,研究了沸石矿物对储层物性的影响。国内对于沸石矿物的研究多集中在鄂尔多斯盆地和准噶尔盆地,学者们先后对鄂尔多斯盆地三叠系延长组和四川盆地沙溪庙组内沸石的成因机制、溶蚀过程进行了研究,并且预测了受控于沸石溶蚀的有利储层区带的分布特征^[1, 6-7];前人对准噶尔盆地沸石的研究主要集中在准西北缘,如克拉玛依油田储层中沸石的分布规律以及成因机制^[8];后来又又有学者对准噶尔盆地西北缘二叠系储层中沸石的分布规律、分带性、成岩作用、成因以及对储层质量的影响过程进行了大量的研究^[2, 9-10]。另外准噶尔盆地东南缘,例如吉木萨尔凹陷目前是油气勘探开发的热点,尤其是对致密油、页岩油储层^[11-12]。

沸石类矿物的形成过程复杂,目前对于沸石成因机制取得了一定的进展。一,沸石矿物的形成及分布与物源、孔隙流体的pH以及沉积相的发育有关。沸

石类矿物在碱性孔隙流体环境下形成,当pH值为7~9时,主要发育硅铝比值高的矿物,如斜发沸石等;当pH值大于9时,则发育硅铝比值较低的矿物,如片沸石、浊沸石、方沸石等^[3]。二,在原生孔隙发育较好的沉积微相中,孔隙流体在这些沉积微相中流通性更好,有利于流体与颗粒之间的离子交换和沸石的胶结^[6-7]。三,随着埋藏深度的增加,储层中发生着火山岩屑—斜发沸石—方沸石—片沸石—浊沸石的转化序列,在垂向上出现沸石垂直分带的特征^[2-3]。四,关于沸石的成因机制,除了主要认为的火山物质蚀变转化来源和沸石之间的转化之外,还有一些其他的成因。如斜长石的钠长石化可以形成浊沸石、斜长石可以直接水化形成浊沸石、孔隙水结晶可以形成浊沸石、蒙脱石和方解石的反应也可以形成浊沸石^[10,13-15]。

本次研究的对象为准噶尔盆地南缘阜康凹陷东斜坡的上二叠统梧桐沟组,该层系是淮南缘的重要油气储层层系,富含沸石类矿物,目前针对该地区 and 层位的沸石研究仍然是空白。本研究通过铸体薄片、扫描电镜、能谱及电子探针等技术方法,结合大量的统计工作和前人研究成果,研究了阜东斜坡梧桐沟组中沸石类矿物的类型、含量、岩石学特征及其对储层质量的影响,进一步探讨了各类沸石的成因机制。

1 区域地质背景

准噶尔盆地构造演化极其复杂,早期演化受古亚洲洋的开裂和闭合的控制,晚期则受到了特提斯洋的关闭和青藏高原隆升的影响^[14-18]。盆地的演化先后经历碰撞成盆阶段、压陷挠曲阶段、挠曲—拗陷阶段、拗陷—沉降阶段和再生前陆盆地阶段^[19]。石炭纪末至第四纪,经历了晚海西、印支、燕山及喜山等多旋回的构造运动,形成了现今的复合叠加盆地属性和隆凹格局。阜康凹陷位于准噶尔盆地东南缘,北接东道海子凹陷,南临北天山山前冲断带,西接莫南凸起,东临北三台凸起。阜康凹陷是淮南缘从早二叠世开始发育的东西走向的凹陷,中生代早期进一步沉降,在印支期、燕山期和喜山期经过了多次构造叠加改造^[19]。阜康凹陷东斜坡(阜东斜坡)是指准噶尔盆地阜康断裂带以北,北三台凸起西南侧、西侧广大的西倾斜坡带,位于昌吉凹陷东端与博格达山山前冲断带北侧的结合部,是阜康生油凹陷的东侧上倾部位,构造位置十分有利(图1)。

阜东斜坡自石炭系至第四系都有发育,记录了盆地复杂的沉积—构造演化历史。本次研究的层位是上二叠统梧桐沟组,该组顶部与三叠系韭菜园子组整合

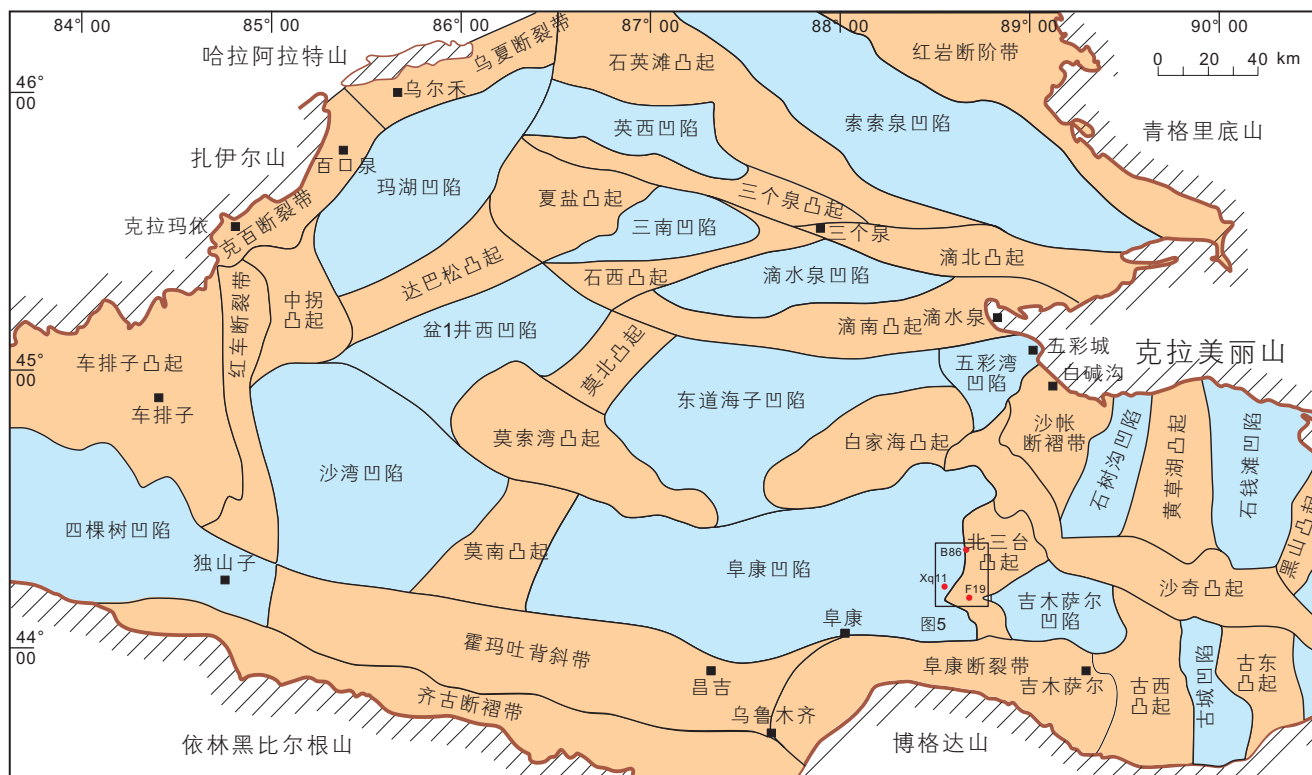


图1 准噶尔盆地构造分区图

Fig. 1 Tectonic zoning map of the Junggar Basin

接触，与中二叠统平地泉组呈不整合接触。

淮南缘梧桐沟组的沉积相研究目前还没有达成共识，王厚坤等(2010)^[20]认为梧桐沟组以湖泊沉积为

主，夹河流和三角洲沉积。不同时期，纵向上沉积相发育存在差异；早期为扇三角洲—湖底扇—滨浅湖沉积体系，中期为滨浅湖—滨岸滩坝沉积体系，晚期为

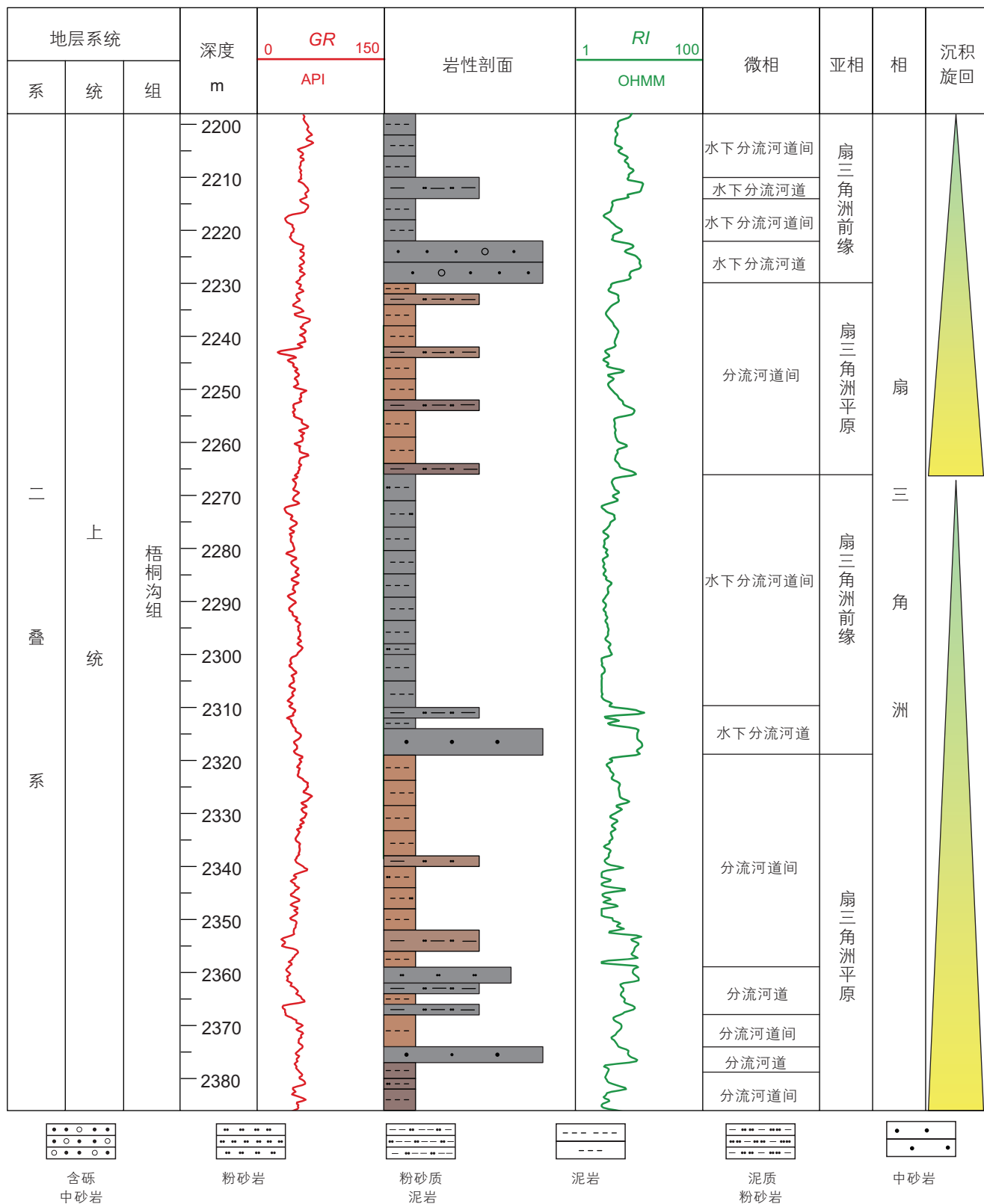


图2 阜东斜坡梧桐沟组单井沉积相剖面图(XQ026井)

Fig. 2 Sedimentary facies profile of the Wutonggou Formation in the eastern slope of the Fukang Sag (well XQ026)

湖泊相, 滩坝变小; 李玲等(2015)^[21]认为北三台地区梧桐沟组发育曲流河沉积, 主要为河道亚相; 姚宗全等(2015)^[22]对北三台地区进行研究认为梧桐沟组沉积期主要发育扇三角洲和冲积扇; 近期在对北三台凸起和吉木萨尔凹陷梧桐沟组沉积环境的综合研究认为, 该组主要发育冲积扇—扇三角洲沉积^[21], 梧桐沟组的中上段在阜东斜坡主体为扇三角洲沉积, 进一步可划分出两个大的正旋回(图2)。梧桐沟组储层以细砂岩、中砂岩和含砾砂岩为主, 按成分主要为岩屑质砂岩和长石质岩屑砂岩(图3), 岩屑以中基性岩屑为主; 胶结类型以沸石胶结、钙质胶结以及泥质胶结为主; 黏土矿物以伊蒙混层、高岭石为主。储层成岩作用类型主要有压实、胶结、溶解和交代等, 处于中成岩A期^[19]。储集空间类型以原生粒间孔、粒内溶孔和剩余粒间孔为主; 储层孔隙度总体以中孔为主, 渗透率以低渗、特低渗为主, 属于中孔低渗类储层^[21]。沉积的物源主要来自于博格达山石炭系火山岩基底, 部分来自东北天山早古生代岛弧火山岩, 为沉积区提供了充足的火山碎屑物质^[22]。

2 沸石类矿物的岩石学特征与分布特征

本研究选取了阜东斜坡 11 口井的梧桐沟组岩心样

品磨制薄片 150 块, 通过光学显微镜和扫描电子显微镜进行识别鉴定, 一共识别出 4 种沸石矿物, 分别为浊沸石、方沸石, 部分片沸石以及少量斜发沸石。

2.1 沸石的岩石学特征

2.1.1 浊沸石

化学分子式为 $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 浊沸石在研究区内含量最高, 部分薄片含量最高可达 18%, 约占总体沸石含量的 60%。浊沸石主要以长轴柱状(图 4a, 4b)的形式产出, 在镜下常可见一组解理, 部分发育两组解理。浊沸石在中砂、细砂岩中较发育, 常以胶结物的形式充填粒间孔隙, 部分交代长石和岩屑。在粉砂岩和泥岩中发育较少, 只在部分裂缝或溶孔中有浊沸石以胶结的形式发育。浊沸石的硅铝比偏低, 对孔隙流体 pH 值变化敏感, 耐酸性差, 容易发生溶蚀, 形成次生溶蚀。在研究区, 普遍可见浊沸石胶结物被溶蚀(图 4a), 以及浊沸石溶孔被方解石充填的现象(浊沸石溶解可为方解石的析出提供 Ca^{2+})。

2.1.2 方沸石

化学分子式为 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 浊沸石在研究区较为常见, 部分薄片含量可达 13%, 占沸石总体含量的 30% 左右。方沸石部分以等轴粒状形式产出, 大部分以连生状晶体(图 4c, 4d)的形式发育。属于均质

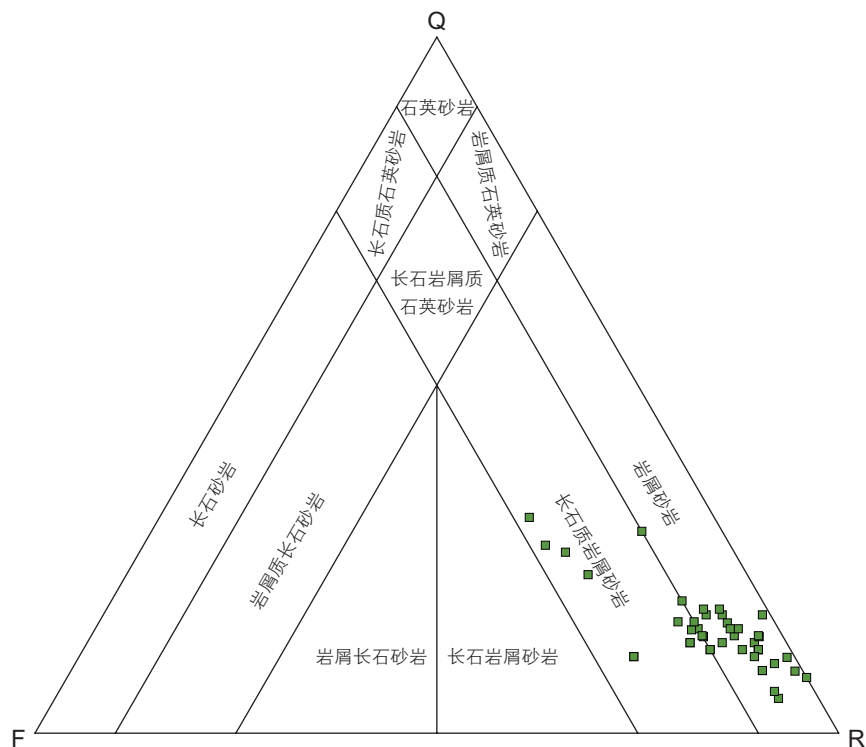
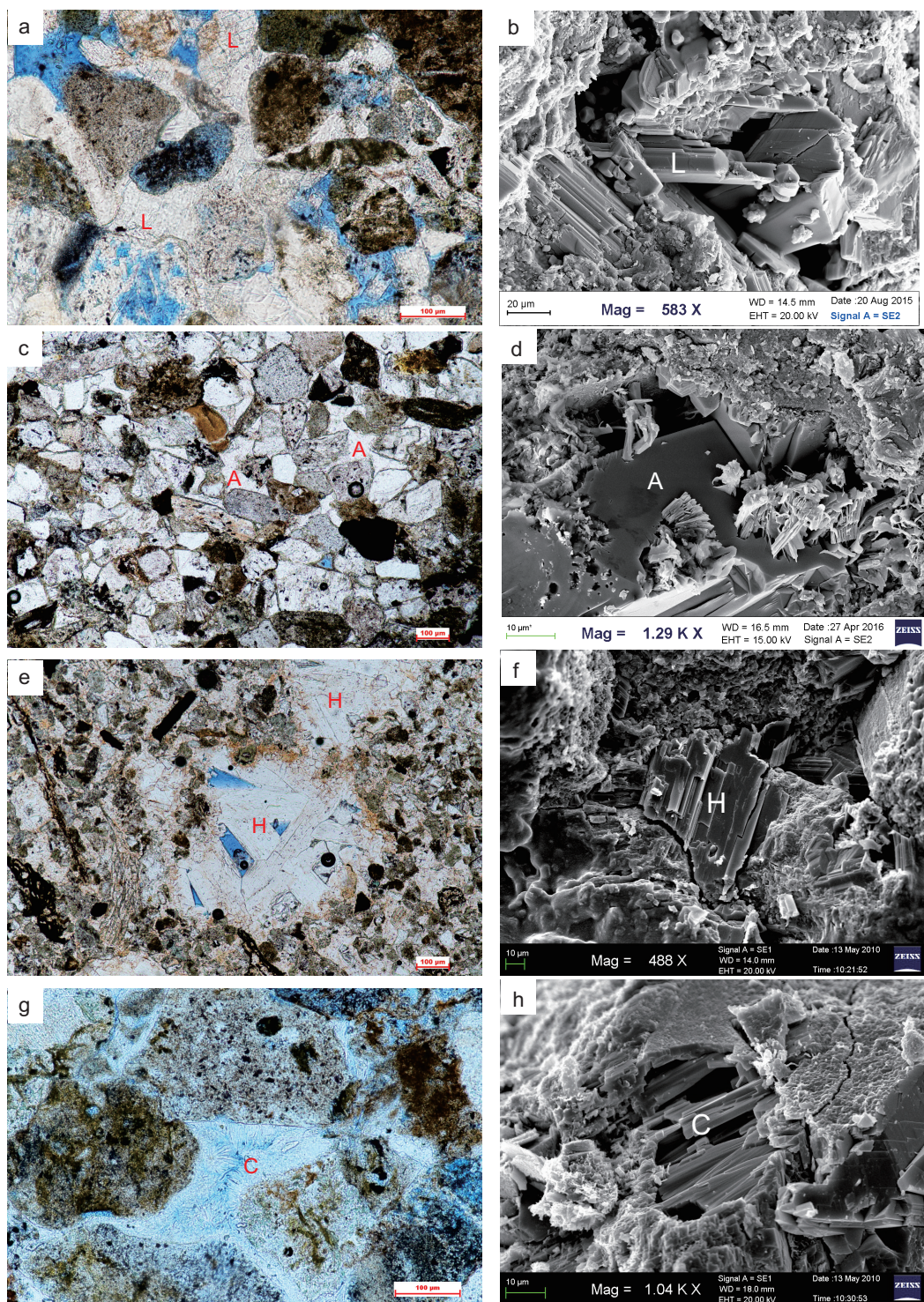


图 3 阜东斜坡梧桐沟组储层砂岩碎屑成分投点图

Fig. 3 Sandstone clastic composition distribution of the Wutonggou Formation reservoir in the eastern slope of the Fukang Sag



(a) 粒间浊沸石(L)胶结物部分被溶蚀, 形成次生溶孔, XQ8井, 2249.3 m; (b) 柱状浊沸石(L)充填孔隙, XQ17井, 3605.59 m; (c) 方沸石(A)充填粒间孔隙, XQ14井, 2646.2 m; (d) 连生晶状方沸石(A)充填粒间孔隙, 部分形成溶蚀孔隙, F001井, 1660.16 m; (e) 垂直颗粒生长的片沸石(H), XQ5井, 2871.75 m; (f) 板状片沸石(H)充填粒间孔隙, XQ8井, 2250.455 m; (g) 纤维状的斜发沸石(C)充填孔隙, XQ026井, 2328 m; (h) 针状斜发沸石(C)充填粒间孔隙, XQ026井, 2257 m

图4 阜东斜坡梧桐沟组主要沸石类型及显微下特征

Fig. 4 Main zeolites types and microscopic characteristics in Wutonggou Formation in the eastern slope of the Fukang Sag

体矿物, 在单偏光下白色或半透明, 不发育解理, 在正交偏光下全消光。与浊沸石类似, 方沸石在粒度较

粗的中、细砂岩中较发育, 在粉砂岩和泥岩中较少见。以均质状(连生晶体)充填孔隙(图4c)的形式发育为

主, 部分(自形粒状颗粒)为半充填形式。类似于浊沸石, 属于硅铝比低的矿物, 耐酸性差, 容易发生溶蚀作用, 产生次生溶孔。

2.1.3 片沸石

化学分子式为 $(Ca, Na_2) Al_2 Si_7 O_{18} \cdot 6H_2O$, 片沸石在研究区出现较少, 部分薄片含量可达 5%, 占沸石总体含量的 10% 左右。以片状或板状(图 4e, 4f)形态产出, 在镜下可见一组完全解理。片沸石大部分以垂直于颗粒边缘(图 4e)的形式充填孔隙, 且板条状晶体之间存在晶间孔隙。相较于浊沸石和方沸石, 片沸石属于高硅铝比矿物, 耐酸性较强, 相对较难被酸性流体溶蚀。

2.1.4 斜发沸石

化学分子式为 $(Na, K, Ca)_{2-3} Al_3 (Al, Si)_2 Si_{13} O_{36} \cdot 12H_2O$,

在研究区储层中含量少, 占沸石总体含量小于 5%。斜发沸石主要以板条状、纤维状和针柱状充填孔隙(图 4g, 4h), 属于火山岩屑溶解后早期析出的沸石, 研究区中大部分已经发生转化, 可能转化为方沸石^[2]。

2.2 沸石类矿物的分布特征

沸石矿物的分布特征主要受沉积微相、物源、沉积物岩性以及孔隙流体性质等因素的影响。对阜东斜坡不同井位的沸石含量统计, 与沉积相的平面分布叠置关系显示, 阜东斜坡二叠系梧桐沟组沸石的分布受到沉积微相的控制, 沸石一般发育在物性较好, 原生孔隙较发育的微相中, 如三角洲前缘的水下分流河道(图 5); 在前三角洲和滨浅湖微相中, 则沸石发育相对较少(图 5)。在纵向上叠置的多期水下分流河道砂

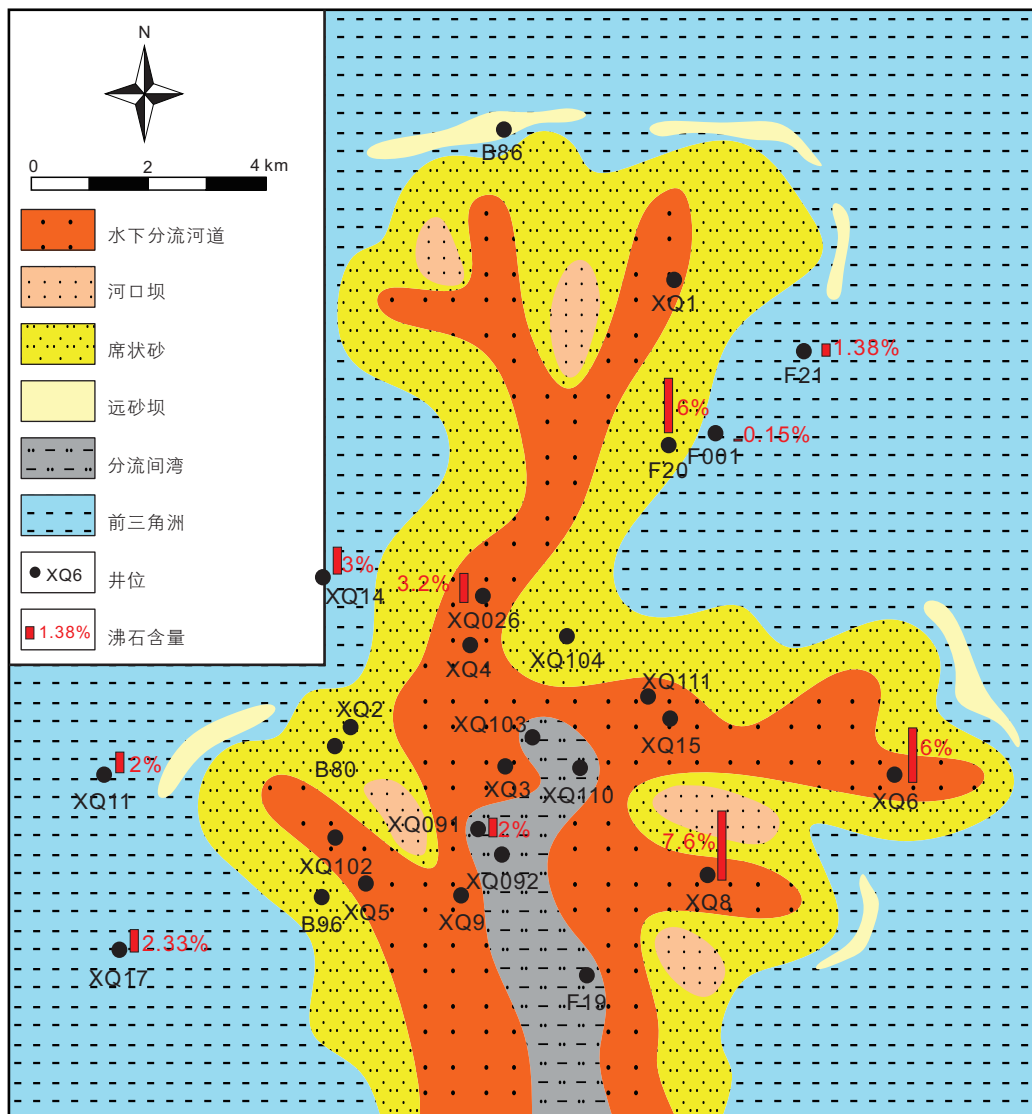


图 5 阜东斜坡梧桐沟组沉积微相及沸石含量分布图

Fig. 5 Distribution of sedimentary microfacies and zeolites content in Wutonggou Formation in the eastern slope of the Fukang Sag

体中,受压实作用相对较弱,原生孔隙发育保留较好,孔隙流体的流通性好,流体与火山岩屑发生离子交换,更利于沸石类矿物的形成。而在前三角洲与滨浅湖微相中,岩性以粉砂岩和泥岩为主,受压实作用影响更大,原生孔隙保留较少,不利于孔隙流体的流动以及离子交换,故不利于沸石矿物的析出。物源对沸石的分布特征也有一定影响,靠近物源方向的区域沸石含量相对较高。研究区梧桐沟组沉积期的物源主要是受到南部博格达山的控制,总体上靠近南部区域的沸石含量比其他区域要高(图5),造成这种现象的原因可能是博格达山广泛发育的火山岩基底为阜东斜坡的梧桐沟组提供了大量的火山物质,为沸石的产生提供了物质基础。

结合研究区沸石分布特征以及地层水特点,可分析得出孔隙流体的特征在一定程度上能够控制沸石的分布。对阜东斜坡不同井位的地层水特征和沸石的含量对应关系统计显示(表1),在 CaCl_2 型地层水环境下,沸石的含量明显高于在 NaHCO_3 型和 MgCl_2 型地层层水的环境。原因是在 CaCl_2 型地层水环境中,富钙型沸石(如浊沸石和片沸石)更易析出,这也和阜东斜坡梧桐沟组普遍高的浊沸石含量相符;相应的,在 NaHCO_3 型地层水条件下,富钠型沸石(如方沸石和斜发沸石)含量更高。

3 沸石与储层物性的关系

沸石作为自生硅铝酸盐矿物,在成岩演化过程中,其析出、胶结和溶蚀对于油气储层储集性能有不同程度的破坏和改善作用。通常沸石的析出和充填,破坏了原始孔隙结构,使原生孔隙减少,降低了储集性能;而后期沸石溶蚀所产生的次生孔隙,会明显改善储集

层的物性条件^[7,10];同时沸石类矿物与火山玻璃、方解石等存在一定的转化关系,同样可对储层物性造成明显影响,例如沸石类矿物蚀变形成方解石,后期富镁卤水交代,形成白云石,是云质岩类的最主要成因类型,方解石后期溶蚀,也会形成一定量的溶蚀孔隙;沸石类蚀变形成黏土矿物,后期转化为大量的绿泥石,是裂缝和气孔主要的充填物。

本研究结合储层的物性测试结果与储层薄片的镜下观察,研究了沸石对储层物性的影响。可见沸石的溶蚀作用对于阜东斜坡梧桐沟组储层具有明显的影响,例如在XQ17的3415.3 m处,沸石胶结物发生轻微溶蚀,而该处储层的孔隙度渗透率都比较低(图6a),有效孔隙度为13.7%,渗透率为2.27 mD;而随着沸石胶结物溶蚀程度的增加,储层的物性发生明显改善,例如在F21的1607.8 m处(图6b),沸石胶结物溶蚀较严重,而储层的有效孔隙度达到18.6%,渗透率达到38.4 mD;在F23的1696.45 m处,梧桐沟组储层的有效孔隙度为26.4%,渗透率达到1090 mD,而在镜下可见,沸石胶结物几乎全部被溶蚀(图6c)。

进一步统计了储层中沸石的含量与孔隙度、渗透率的关系可见,在高沸石含量的情况下(>5%),沸石的含量与孔隙度呈负相关关系、与渗透率呈一定的指数负相关关系(图7),说明沸石胶结物的溶蚀作用,对储层的物性和储集性能,具有明显的改善作用。

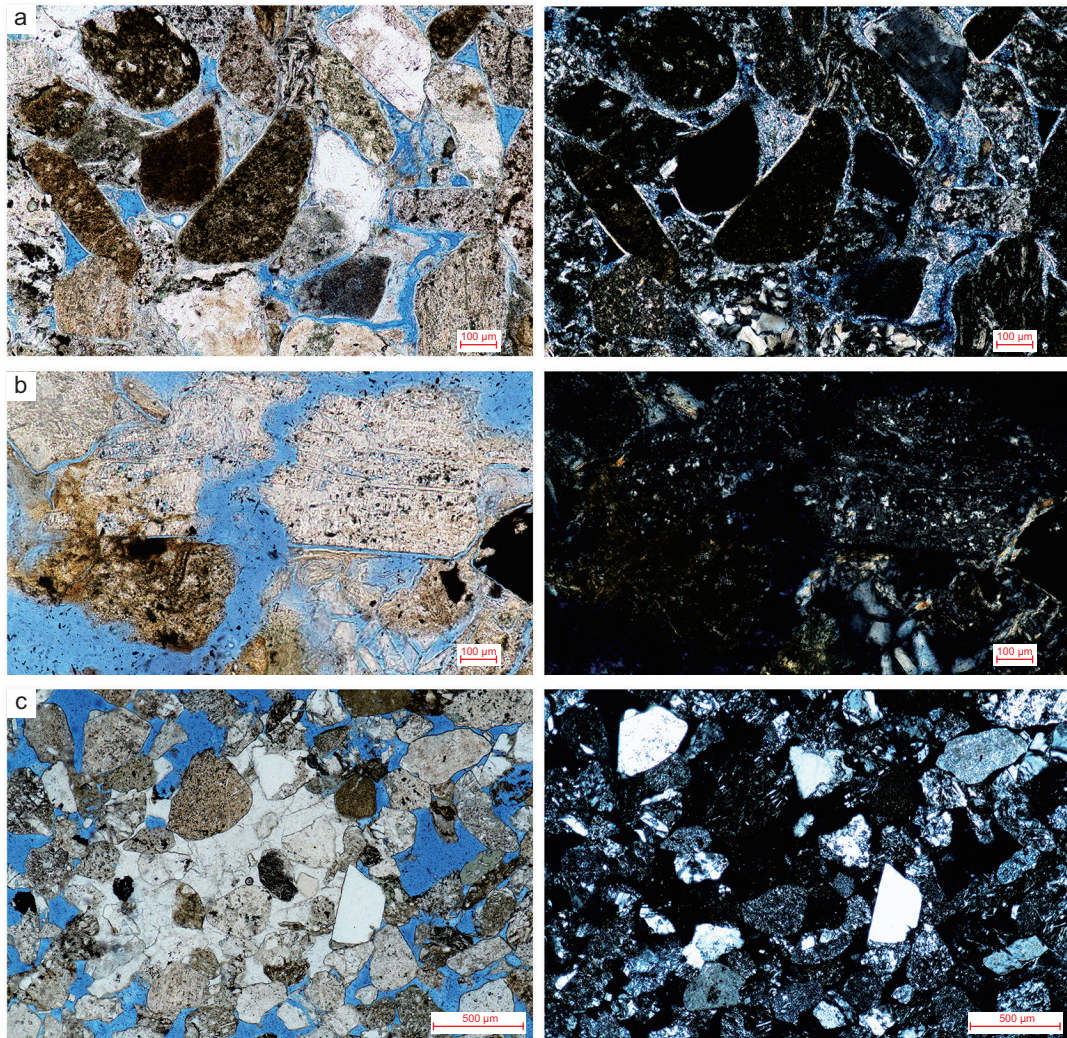
4 沸石类矿物的成因机理探讨

目前对于沸石类矿物的成因,普遍认为和火山物质密切相关^[2],成岩作用早期,大气降水进入地层后,火山碎屑物质大量被溶解,且向孔隙流体释放了大量 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 等碱性金属离子,同时地层水性质也

表1 阜东斜坡梧桐沟组地层水特征

Table 1 Formation water characteristics of Wutonggou Formation in the eastern slope of the Fukang Sag

井号	深度/m	pH	总矿化度/(mg/L)	水型	沸石含量/%
XQ4	2139.80	8.0	36903.63	MgCl_2	4
XQ4	2139.24	7.0	28319.00	CaCl_2	8
XQ4	2138.84	7.0	29379.01	CaCl_2	8
F20	1687.00	7.2	19846.75	CaCl_2	6
F21	1607.80	8.0	25154.65	CaCl_2	5
F23	1695.65	7.2	17807.90	CaCl_2	8
XQ11	3138.70	7.2	15761.42	NaHCO_3	5
XQ14	2756.00	7.0	22194.53	CaCl_2	10
XQ17	3415.65	7.0	22625.39	CaCl_2	7



(a) XQ17- 3415.3 m; (b) F21-1607.8 m; (c) F23-1696.45 m

图 6 阜东斜坡梧桐沟组储层岩石薄片镜下特征 (左为单偏光, 右为正交光)

Fig. 6 Microscopic characteristics of Wutonggou Formation reservoir rocks in the eastern slope of the Fukang Sag (PPL on the left, XPL on the right)

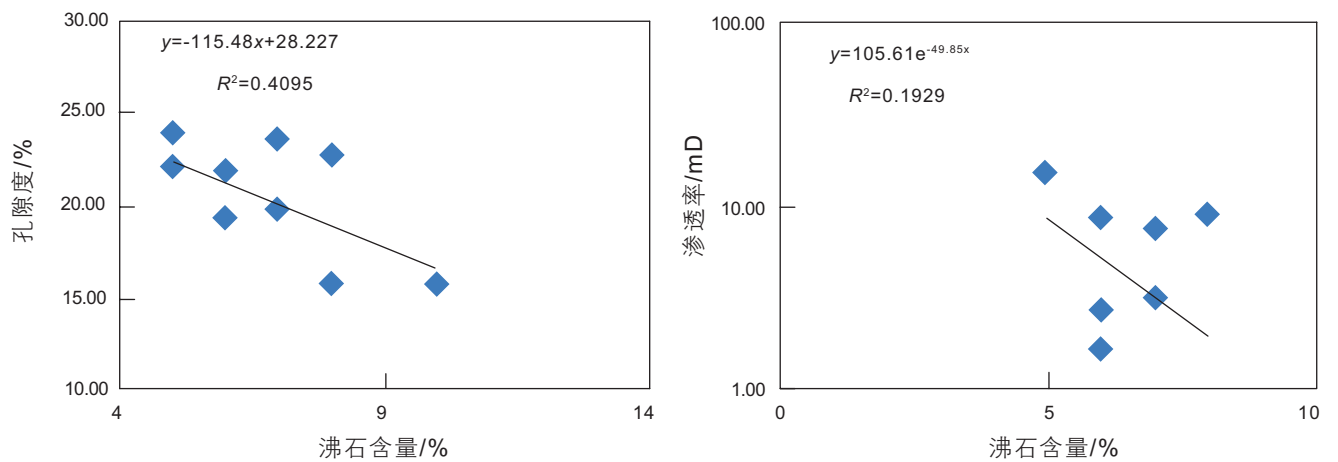


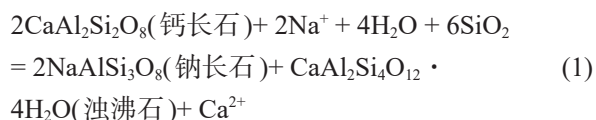
图 7 阜东斜坡梧桐沟组沸石含量与孔隙度、渗透率关系图

Fig. 7 The relation diagram of zeolite content, porosity and permeability in the eastern slope of the Fukang Sag

逐渐变为碱性。随着埋深的增加,地层温度升高,火山碎屑物质溶解速率也不断增快,地层水中离子矿化度也不断升高。孔隙流体达到过饱和状态后,首先从流体中析出的矿物是蒙脱石,随后由于火山碎屑物质的水解速率持续增加,在孔隙流体盐碱度足够高的条件下,斜发沸石是最早析出的沸石类矿物,斜发沸石的析出改变孔隙水比率,斜发沸石开始向方沸石转化,随后在钙离子富集的情况下,早期形成的斜发沸石和富钠的方沸石开始向片沸石转化^[2],片沸石进一步转化为浊沸石^[24-26],这一过程就是目前所共识的火山岩屑—斜发沸石—方沸石—片沸石—浊沸石的演化序列。然而,目前对于沸石的形成过程,大多局限于宏观的理论推测,缺乏细致的矿物学研究。本研究中,通过显微镜下初步鉴定,进一步进行扫描电镜图像采集和能谱分析,准确鉴定了浊沸石、方沸石、片沸石、钠长石、钾长石等主要矿物(图8),在此基础上,开展图像分析和能谱分析,研究了沸石类矿物与相关矿物之间的转化关系,探讨了各类沸石的成因机制。

4.1 浊沸石

浊沸石是阜东斜坡梧桐沟组储层中含量最高的胶结物,通过大量的扫描电镜研究发现以下规律,浊沸石的出现通常和钠长石密切共生,通常柱状的浊沸石在长石颗粒间自形生长(图9),而长石则通常发生溶蚀,周缘呈现港湾状,表面发育溶蚀孔。一些情况下,可见浊沸石以长轴柱状形态充填孔隙,沿着钠长石颗粒边缘逐步交代钠长石(图9a, 9b和图9c);而一些情况下,自形的浊沸石晶体内部,可见残余的钠长石残余物(图9c);在一些情况下甚至可见钠长石向浊沸石过渡结构(图9d)。上述现象说明,阜东斜坡梧桐沟组浊沸石的成因与斜长石密切相关,而不是由片沸石转化而来^[2]。目前的研究表明,浊沸石可以由石英和斜长石在孔隙水的参与下形成^[27-28],具体表现为富钙的斜长石在碱性条件下发生钠长石化,伴随形成富钙的浊沸石,具体反应式为:



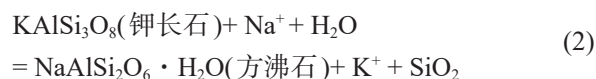
在鄂尔多斯盆地上三叠统延长组和松辽盆地深层碎屑岩储层以及四川盆地侏罗系沙溪庙组,均见到了浊沸石交代斜长石,并且斜长石和沸石过渡转化的现象^[1, 6, 10, 13],类似现象均被解释为斜长石钠长石化进而产生浊沸石。在太平洋沿岸的中生代和新生代沉积盆地中的浊沸石,以及加利福尼亚North Tejon油田

的中新统储层中的浊沸石,也被解释为上述成因模式^[27-28]。

4.2 方沸石

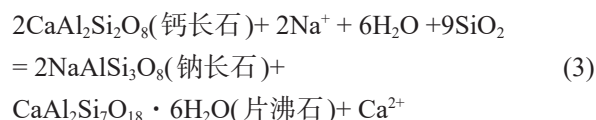
方沸石为典型的富钠沸石,目前研究主要认为方沸石来源于斜发沸石的转化^[2],而通过对阜东斜坡梧桐沟组大量的扫描电镜观察研究发现,研究区的方沸石与钾长石密切伴生(图10),通常可见方沸石自形生长并填充胶结钾长石颗粒(图10a),而钾长石则发生溶蚀,呈现出港湾状形态(图10b),在一些情况下,可见方沸石穿插入钾长石并且交代钾长石的现象(图10c和10d)。

从理论上讲,碱性长石和方沸石都属于架状硅铝酸盐,成分和结构相似,在孔隙流体中 Na^+ 丰富的情况下,钾长石可逐渐向方沸石进行转化。其反应式可表述为:



4.3 片沸石

片沸石在阜东斜坡梧桐沟组发育较少,对于片沸石的成因,目前研究较少,目前有研究认为片沸石由火山物质水解的斜发沸石直接转化或者由方沸石在一定的温压条件下转化而来^[2, 10]。而在本研究中没有见到沸石相互转化的现象,反而常见片沸石与钠长石密切伴生,可见片沸石以自形状态充填钠长石颗粒之间的孔隙(图11)。片沸石与浊沸石相似,都属于富钙沸石,而研究区的片沸石与浊沸石有类似的产出状态和矿物共生关系。前面的讨论中得出,阜东斜坡梧桐沟组的浊沸石主要来自于斜长石在碱性条件下的钠长石化,可以推测片沸石的产生也与长石的转化密切相关,片沸石中的Ca离子来自于长石颗粒,具体反应式可表述为:



目前在准噶尔盆地中关于沸石矿物成因机制的研究主要集中在准西北缘玛湖凹陷的二叠系储层,主体认为准噶尔盆地二叠系的沸石是由火山物质蚀变并依次转化而来^[2, 10],近期的研究中,将准西北缘二叠系的沸石划分为高温成因和低温成因两种,高温成因即凝灰物质的蚀变并转化,而低温成因则为孔隙水结晶而来,即早期的浊沸石受酸性流体的溶蚀,后期孔隙水在溶蚀孔隙中富集结晶形成两期沸石^[29]。本文的研

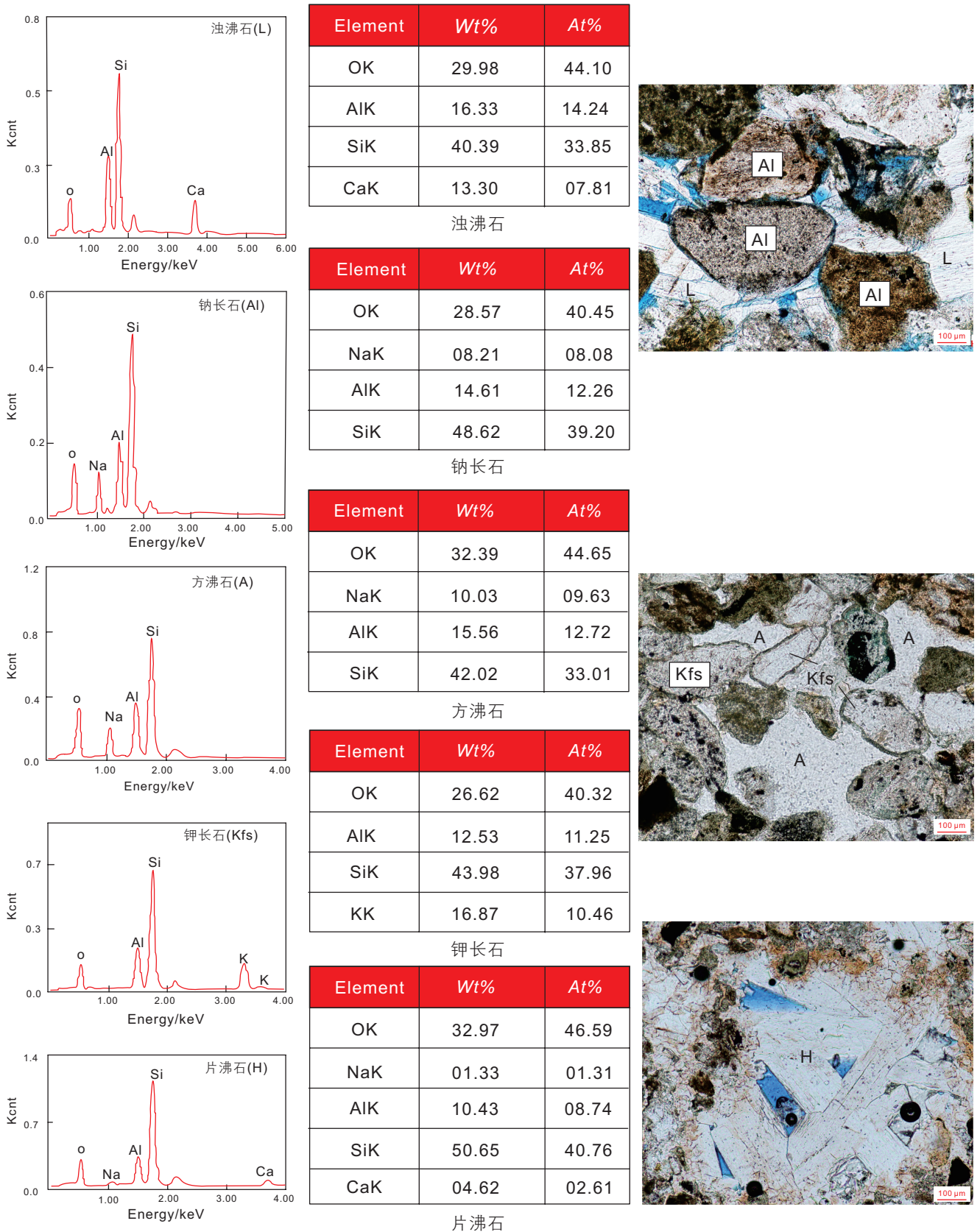
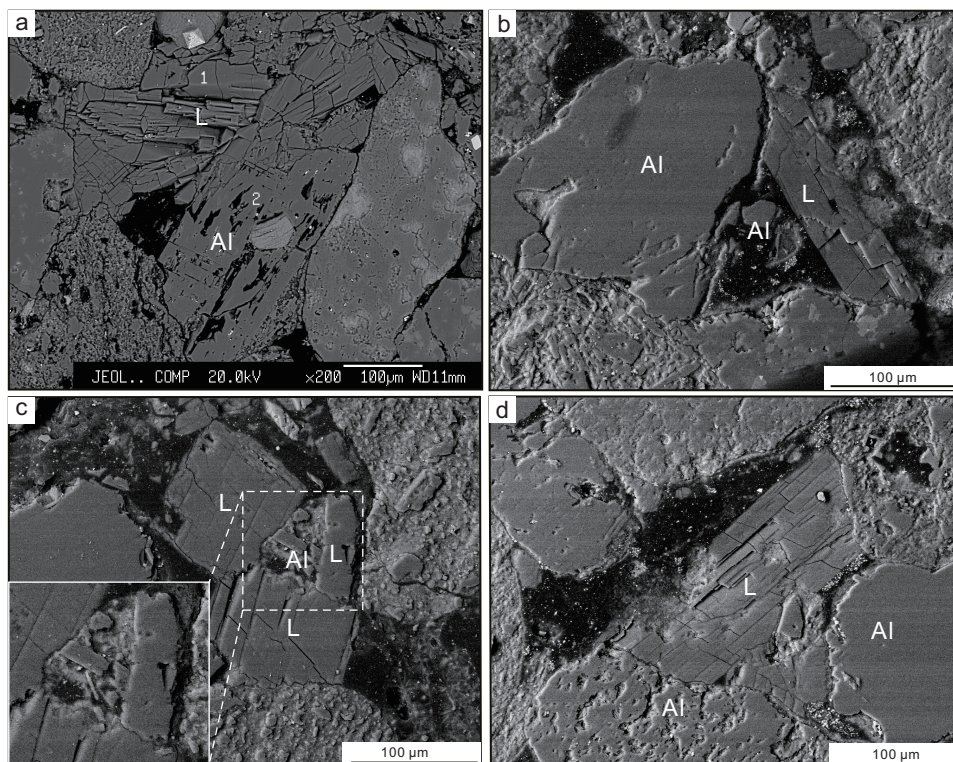


图 8 阜东斜坡梧桐沟组沸石与长石矿物能谱分析部分结果 (Wt% 质量百分比; At% 原子百分比)

Fig. 8 The energy spectrum analysis of zeolite and feldspar in the Wutonggou Formation in the eastern slope of the Fukang Sag (Wt%—mass percentage; At%—atomic percentage)



(a) 浊沸石(L)交代钠长石(Al), 见钠长石溶蚀残留; (b) 钠长石(Al)溶蚀, 浊沸石(L)充填部分溶蚀孔; (c) 浊沸石(L)自形程度较好, 中间残留钠长石(Al); (d) 浊沸石(L)交代钠长石(Al)

图9 浊沸石及周围矿物电子探针及扫描电镜照片(L: 浊沸石; Al: 钠长石; a为电子探针照片, bcd为扫描电镜照片)

Fig. 9 SEM photographs of laumontite and surrounding minerals (L: laumontite; Al: albite; a: EPMA; bcd: SEM)

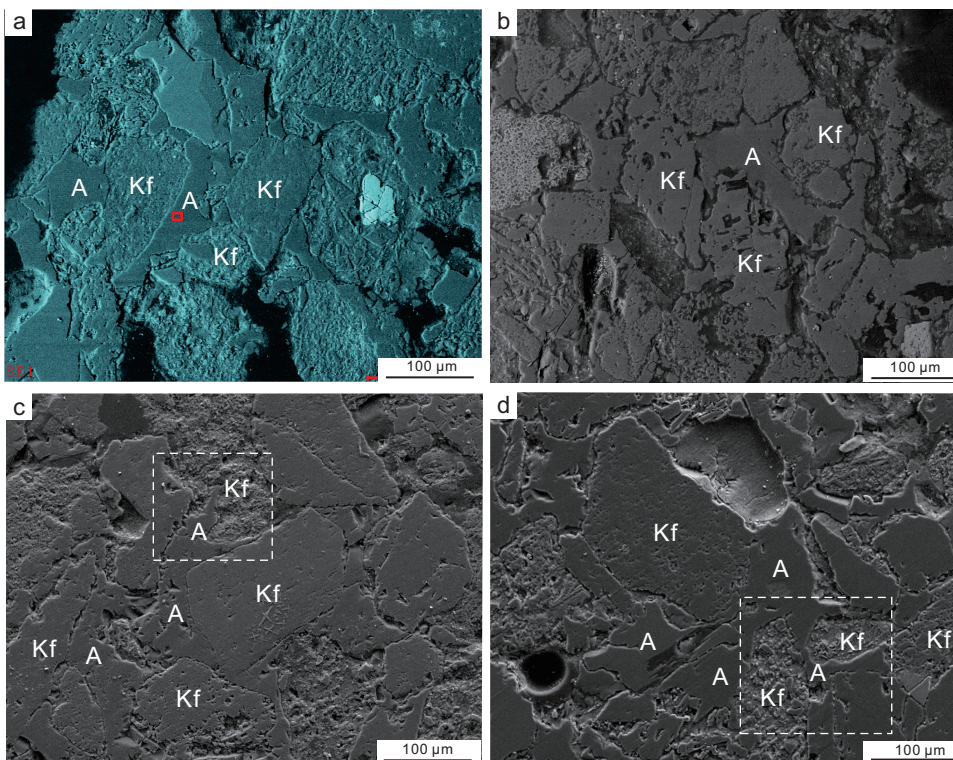


图10 方沸石及周围矿物扫描电镜照片(A: 方沸石; Kf: 钾长石)

Fig. 10 SEM photographs of the analcite and surrounding minerals (A: analcite; Kf: orthoclase)

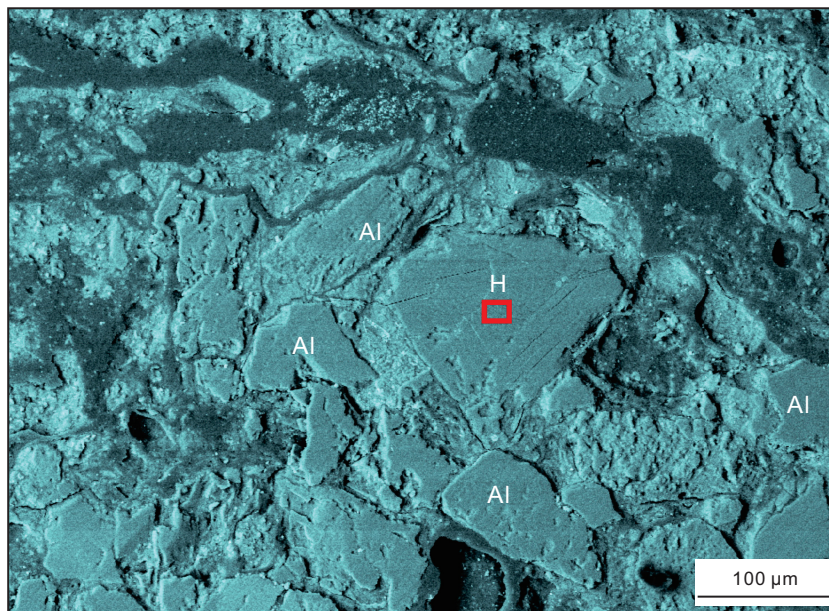


图 11 片沸石及周围矿物SEM照片(H: 片沸石; Al: 钠长石)

Fig. 11 SEM photographs of heulandite and surrounding minerals (H: heulandite; Al: albite)

究表明, 淮南缘阜东斜坡梧桐沟组中, 斜发沸石含量极少, 同时没有见到沸石相互转化的证据。相应的, 阜东斜坡梧桐沟中发现了沸石和长石转化的证据, 表明沸石矿物的形成与长石矿物有密切联系, 可见浊沸石与钠长石存在明显的共生和转化关系, 方沸石与钾长石密切伴生, 片沸石与钠长石密切伴生。因此阜东斜坡梧桐沟组中的沸石矿物可能不同于常规的火山物质水化并转化成因, 而是来源于长石的转化。而梧桐沟组砂岩中含量丰富的长石碎屑(图 2)为沸石的形成提供了物质基础。

5 结论

(1)阜东斜坡梧桐沟组储层中主要含有 4 种沸石矿物, 浊沸石、方沸石, 部分片沸石以及少量斜发沸石。浊沸石和方沸石在研究区含量较高, 片沸石则相对含量较少, 斜发沸石含量最少。

(2)阜东斜坡梧桐沟组沸石的分布特征主要受沉积微相、物源、地层水性质等因素的影响。在水下分流通河道等储层物性发育较好的微相中, 沸石含量越高, 并且在靠近南部博格达山物源区的地区, 有利于沸石的发育, 沸石含量高。同时, 在 CaCl_2 型地层水环境下, 沸石的含量(主体为浊沸石)明显高于其他地层水环境。

(3)在高沸石含量的情况下($> 5\%$), 沸石的含量与孔隙度、渗透率呈负相关关系, 表明沸石胶结物的溶蚀作用, 对储层的物性和储集性能, 具有明显的改善作用。

(4)不同于传统意义上的火山物质水化和沸石之间相互转化成因, 阜东斜坡梧桐沟组的沸石产生与长石的转化密切相关, 其中浊沸石和片沸石主要来自于斜长石在碱性条件下的钠长石化, 而方沸石则可能来自于钾长石在碱性条件下的转化作用。

参考文献

- [1] 朱国华. 陕北浊沸石次生孔隙砂体的形成与油气关系[J]. 石油学报, 1985, 1: 4-11+116-117. [ZHU G H. Formation of lomonitic sand bodies with secondary porosity and their relationship with hydrocarbons[J]. ACTA PETROLEI SINICA, 1985,1: 4-11+116-117.]
- [2] 朱世发, 朱筱敏, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地西北缘二叠系沸石矿物成岩作用及对油气的意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 041(011): 1602-1612. [ZHU S F, ZHU X M, WANG X L, et al. Zeolite diagenesis and its control on petroleum reservoir quality of Permian in northwestern margin of Junggar Basin, China[J]. Sci China Earth Sci, 2011, 041(011): 1602-1612.]
- [3] HAY R L. Zeolites and zeolitic reactions in sedimentary rocks[J]. Geological Society of America Special Papers, 1966, 85: 1-122.
- [4] MONCURE G K, SURDAM R C, MCKAGUE H L. Zeolite diagenesis below pahute mesa, Nevada Test Site[J]. Clays & Clay Minerals,

- 1981, 29(5): 385–396.
- [5] AZUMA, IJIMA. Zeolites in petroleum and natural gas reservoirs[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2001, 45 (1): 347–402.
- [6] 杨晓萍, 张宝民, 陶士振. 四川盆地侏罗系沙溪庙组浊沸石特征及油气勘探意义[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 03: 42–45+49. [YANG X P, ZHANG B M, TAO S Z. Laumontite and its significance for petroleum exploration in Jurassic Shaximiao reservoir, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 03: 42–45+49.]
- [7] 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[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2010, 35(01): 107–114. [FU G M, DONG M C, ZHANG Z S. et al. Formation process and distribution of laumontite in Yanchang 3 reservoir of Fuxian exploration area in North Shaanxi province and the controls of the high quality reservoirs[J]. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(01): 107–114.]
- [8] 孙玉善, 曹自强. 克拉玛依油区沸石类矿物特征及分布规律[J]. *新疆石油地质*, 1991, 3: 253–261. [SUN Y S, CAO Z Q. Characteristics and distribution of zeolite group minerals in Karamay Oilfields[J]. *Xinjinag Petroleum Geology*, 1991, 3: 253–261.]
- [9] 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[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2012, 32(4): 176–176. [SONG H Y. Distribution, genesis and transformation of zeolite minerals in volcanic rock reservoir and its influence on oil and gas exploration[J]. *Chinese petroleum and chemical standards and quality*, 2012, 32(4): 176–176.]
- [10] 李振华, 邱隆伟, 师政, 等. 准噶尔盆地中拐地区佳二段沸石类矿物成岩作用及其对油气成藏的意义[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2014, 038(1): 1–1. [LI Z H, QIU L W, SHI Z, et al. Diagenesis of zeolite minerals and its significance for hydrocarbon accumulation in the second member of Jiamuhe formation of Zhongguai area, Junggar Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2014, 038(1): 1–1.]
- [11] 陈志明, 陈昊枢, 廖新维, 张家丽, 于伟. 基于试井分析的新疆吉木萨尔页岩油藏人工缝网参数反演研究. *石油科学通报*, 2019, 03: 263–272(in Chinese). [CHEN Z M, CHEN H S, LIAO X W, et al. A well-test based study for parameter estimations of artificial fracture networks in the Jimusar shale reservoir in Xinjiang. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 03: 263–272.]
- [12] 马铨峥, 杨胜来, 陈浩, 王璐, 钱坤, 孟展, 雷浩, 王智林. 致密油储集层CO₂吞吐效果及影响因素分析——以新疆吉木萨尔凹陷芦草沟组为例. *石油科学通报*, 2018, 04: 434–445(in Chinese). [MA Q Z, YANG S L, CHEN H, et al. Effect and influencing factors of CO₂ huff and puff in a tight oil reservoir—Taking the Lucaogou formation in the Xinjiang Jimsar sag as an example. *Petroleum Science Bulletin*, 2018, 04: 434–445.]
- [13] 白清华, 柳益群, 樊婷婷. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组浊沸石分布及其成因分析[J]. *西北地质*, 2009, 2: 104–111. [BAI Q H, LIU Y Q, FAN T T. Genesis and distribution of laumontite in Yanchang Formation of upper Triassic in Ordos Basin[J]. *NORTHERN GEOLOGY*, 2009, 2: 104–111.]
- [14] JAHN B M, WINDLEY B, NATAL B, et al. Phanerozoic continental growth in Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23(5): 599–603.
- [15] WINDLEY B F, ALEXEIV D, XIAO W, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(1): 31–47.
- [16] XIAO W, HAN C, CHAO Y, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2–4): 102–117.
- [17] 舒良树, 卢华复, 夏飞, 等. 天山地区多期构造与新生代盆山耦合[J]. *地质学报*, 2003, 77(004): 159. [SHU L S, LU H X, XIA F, et al. The multistage tectonics and Cenozoic basin-mountain coupling in Tianshan area[J]. *ACTA GEOLOGICA SINICA*, 2003, 77(004): 159.]
- [18] ZHONG L, PENG S. Detrital zircon geochronology and its provenance implications: responses to Jurassic through Neogene basin-range interactions along northern margin of the Tarim Basin, Northwest China[C]. *中国科学院地质与地球物理研究所第十届(2010年度)学术年会论文集(上)*, 2011: 13.
- [19] 蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 准噶尔盆地的类型和构造演化[J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 431–440. [CAI Z X, CHEN F J, JIA Z Y. Types and tectonic evolution of Jungar Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 431–440.]
- [20] 王厚坤, 王斌, 杨和山, 等. 准噶尔吉木萨尔凹陷二叠系梧桐沟组沉积相[J]. *天然气技术与经济*, 2010, 04(3): 20–22. [WANG H K, WANG B, YANG H S, et al. Sedimentary facies of Permian Wutonggou Formation in Jimsar sag, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Technology*, 2010, 04(3): 20–22.]
- [21] 李玲, 德勒恰提, 陈春勇, 等. 北三台凸起东南缘梧桐沟组储集层成岩演化特征[J]. *新疆石油地质*, 2015, 36(4): 409–414. [LI L, DE L Q T, CHEN C Y, et al. Diagenetic evolution of Wutonggou reservoir in southeastern margin of Beisantai Swell, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(4): 409–414.]
- [22] 姚宗全, 德勒恰提, 许学龙, 等. 准噶尔盆地北三台地区二叠系梧桐沟组沉积环境研究[J]. *西部探矿工程*, 2015, 8: 157–161. [YAO Z Q, DE L Q T, XU X L, et al. Sedimentary environment of Permian Wutonggou Formation in Beisantai area, Junggar Basin[J]. *Western Exploration Project*, 2015, 8: 157–161.]
- [23] SHI Y, JI H, YU J, et al. Provenance and sedimentary evolution from the Middle Permian to Early Triassic around the Bogda Mountain,

- NW China: A tectonic inversion responding to the consolidation of Pangea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 104:169.
- [24] DONAHOE R, DIBBLE W. Some observations on the mechanism of zeolite crystallization[J]. *Geol Soc Am Abstr Prog*, 1982, 14: 475–476.
- [25] AOYAGI K, KAZAMA T. Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis[J]. *Sedimentology*, 1980, 27(2): 179–188.
- [26] CHO M, MARUYAMA S, LIOU J G. An experimental investigation of heulandite-laumontite equilibrium at 1000 to 2000 bar P_{fluid} [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1987, 97(1): 43–50.
- [27] RICHARD J, STEWART, et al. Widespread occurrence of laumontite in late mesozoic and tertiary basins of Pacific margin[J]: ABSTRACT. *Bulletin*, 1977, 61.
- [28] JIN H N, BOLES J R. Origin of zeolite cements in the Miocene sandstones, North Tejon oil fields, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1993, 63(2): 248–260.
- [29] 雷艳海, 樊顺, 鲜本忠, 等. 玛湖凹陷二叠系下乌尔禾组沸石成因及溶蚀机制[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(5): 102–112. [LEI H Y, FAN S, XIAN B Z, et al. Genesis and corrosion mechanism of zeolite of Lower Urhe Formation of Permian in Mahu Depression[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(5): 102–112.]

(责任编辑 刘冬冬 编辑 付娟娟)