

文章编号:1673-5005(2014)01-0001-07

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.01.001

# 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

李振华<sup>1</sup>, 邱隆伟<sup>1</sup>, 师政<sup>1</sup>, 唐勇<sup>2</sup>, 孔玉华<sup>2</sup>, 朱士波<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 新疆油田公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000)

**摘要:**通过岩心、铸体薄片、电子探针、包裹体等资料,对中拐地区二叠系佳木河组佳二段沸石类矿物成岩作用进行研究,并分析其对油气成藏的意义。结果表明:佳二段沸石类胶结是最主要的胶结类型,主要有浊沸石、片沸石和方沸石 3 种沸石类矿物;前期沸石的胶结保存了部分原始孔隙结构,为后期浊沸石和方沸石的溶蚀提供了物质基础。佳二段沸石类矿物主要分布在扇三角洲河道厚层的砂砾岩体中,其形成与火山物质密切相关;地层水化学性质、pH 值以及离子的性质和比率、温度和压力等决定了沸石类型的转化:沸石从上到下的转化序列为方沸石-片沸石-浊沸石,除了沸石矿物的转化,斜长石的钠长石化也形成了部分浊沸石;浊沸石含量和溶蚀强度决定了储层质量,其次生孔隙发育带是寻找有利油气储层的目标区域。

**关键词:**沸石类矿物;火山物质;转化序列;浊沸石溶蚀;次生孔隙

中图分类号:P 37; TE 122.1

文献标志码:A

## Diagenesis of zeolite minerals and its significance for hydrocarbon accumulation in the second member of Jiamuhe formation of Zhongguai area, Junggar Basin

LI Zhen-hua<sup>1</sup>, QIU Long-wei<sup>1</sup>, SHI-Zheng<sup>1</sup>, TANG-Yong<sup>2</sup>, KONG Yu-hua<sup>2</sup>, ZHU Shi-bo<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Exploration and Development Research Institute of Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China)

**Abstract:** Diagenesis of zeolite minerals and its significance in hydrocarbon accumulation in the second member of Jiamuhe formation of Zhongguai area were studied using data from the core, casting thin section observation, electron probe and inclusions. The results show that there are three kinds of zeolites, which include laumontite, heulandite and analcite in the second member of Jiamuhe formation of Zhongguai area, Junggar Basin. Zeolite cementation is the main type of cementation. The cementation of early zeolite reserved some of the original pores, which formed a foundation for the dissolution of laumontite and analcite at the later stages. The zeolites whose formation is closely related to volcanic material are mainly distributed in the glutenite of fan delta river in the formation. The formation of zeolite types is determined by the chemical properties of surrounding water; the pH value, the properties of the ions and their ratios between each other, and the temperature and pressure. The transforming sequence of zeolite is from analcite, to heulandites, and then laumontite downwards. Additionally, albitization of plagioclase can also form some part of laumontite. Enriched reservoirs, in which the secondary pores are favorable for oil and gas accumulation, can be determined by the content of laumontite and the degree of dissolution.

**Key words:** zeolite minerals; volcanic materials; transforming sequence; laumontite dissolution; secondary pore

从 20 世纪 60 年代开始,国外学者对沸石的形成、蚀变和成岩作用进行了大量研究。Hay<sup>[1]</sup>统计世界各地沸石矿物的形成与分布,认为沸石矿物的形

成与火山物质有关;Moncure 等<sup>[2]</sup>研究了帕萨特方山下沸石矿物垂向的分布,讨论了沸石矿物成岩序列;Iijima<sup>[3]</sup>分析了沸石矿物与储层物性的关系,认为沸

收稿日期:2013-08-20

基金项目:中国石油大学(华东)研究生创新工程项目(CX2013003)

作者简介:李振华(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为油气地质和油藏描述。E-mail: xiaojie901@126.com。

石在一定程度上能够影响储层孔隙度。国内研究起步相对较晚,朱国华<sup>[4-5]</sup>研究了鄂尔多斯盆地沸石类矿物的成岩作用;张立飞<sup>[6]</sup>研究陕北三叠系延长组浊沸石的成因并对浊沸石形成条件进行了理论计算;朱世发等<sup>[7]</sup>对准噶尔盆地西北缘二叠系沸石矿物成岩作用进行了较系统的研究,认为沸石溶蚀带是有利的油气储集区域。准噶尔盆地西北缘二叠系中拐地区为一南东倾的单斜,西邻红车断裂带,北以红三井东侧断裂为界。佳木河组勘探面积约为1100 km<sup>2</sup>,埋深为3.0~5.5 km,自下而上分为佳一段、佳二段和佳三段。佳二段地层主要为扇三角洲相,沉积了大量砂砾岩,沉积期发育多期火山活动。储层含有大量的沸石类矿物,沸石的成岩作用对储层质量有不同程度的破坏和改善。早期强烈的压实和胶结作用使得砂体中的原生孔隙损失殆尽,后期沸石矿物溶蚀明显改善储层的物性。因此,笔者通过研究区26口井铸体薄片、电子探针、包裹体等分析,对沸石类型、岩石学特征、分布和成因进行研究,明确沸石的成岩作用类型和溶蚀机制,分析沸石溶蚀与油气成藏的关系,为下一步佳木河组油气勘探提供依据。

## 1 沸石类矿物岩石学特征及分布规律

铸体薄片和电子探针观察分析表明研究区佳木河组主要发育浊沸石、片沸石和方沸石3种沸石类矿物。沸石类矿物以胶结物形式充填于粒间孔隙、粒内孔隙、裂缝以及火山岩气孔中。

### 1.1 沸石矿物岩石学特征

(1) 浊沸石( $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )。浊沸石一般见于粗粒级的砂砾岩中,柱状浊沸石解理发育,常以半充填—全充填分布于粒间孔隙和裂隙(图1(a))或充填于火山岩气孔(图1(b)),连生状晶体以全充填式发育在砂、砾岩的粒间孔隙中,放射状晶体一般分布于熔岩气孔中<sup>[8]</sup>,研究区浊沸石溶解作用发育且溶蚀孔常被方解石充填(图1(b))。

(2) 片沸石( $(\text{Ca}, \text{Na}_2)\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )。无色或因铁质浸染表现为砖红色,片状晶体大致沿碎屑颗粒边缘垂直生长,常以半充填式产于砂、砾岩的粒间孔隙中;板状和条状晶体者则以半充填或全充填式产于火山岩及碎屑岩的裂隙中;连生状者为全充填式,充填于熔岩气孔或粒间孔隙中<sup>[7-8]</sup>(图1(c)),片沸石常与浊沸石呈交代状产出。

(3) 方沸石( $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )。无色或白色,透明到半透明,正交光下全消光,晶体呈偏三八面体和二十四面体。方沸石在研究区内各类岩石的裂缝、粒间和气孔中均有发育,自形粒状者方沸石通

常以半充填式为主,均质状者常为全充填式<sup>[7-8]</sup>,区内方沸石含量相对较少,溶蚀较发育(图1(d))。

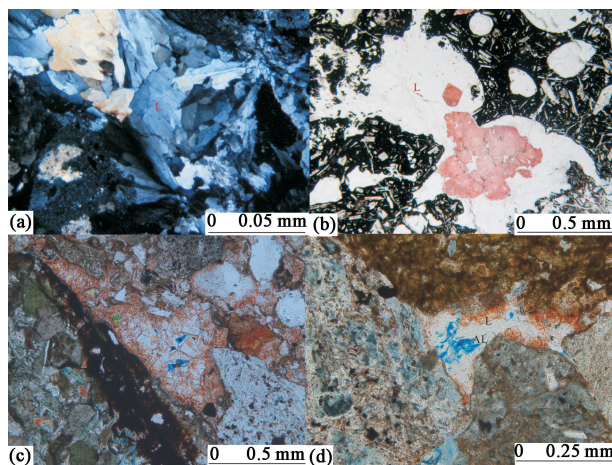


图1 佳二段主要沸石类矿物及镜下特征

Fig. 1 Main zeolite minerals and their microscopic characteristics in the second member of Jiamuhe formation

### 1.2 沸石矿物宏观分布特征

研究区佳木河组佳二段沸石类矿物的形成与火山物质密切相关,佳二段除直接沉积凝灰质泥岩,还含有大量的凝灰岩岩屑和安山岩岩屑(图2(a),(b)),这些火山物质的早期水化是形成沸石矿物的主要物质基础<sup>[1-3]</sup>。佳二段浊沸石、片沸石和方沸石平均含量分别为5.2%、1.8%和0.2%。扇三角洲平原三种沸石类矿物平均含量分别为1.1%、3%和0.3%。扇三角洲前缘分别为8.3%、0.15%和0.15%(图2(c),(d)),浊沸石是前缘亚相最主要的胶结物(图2)。

佳二段沉积时期火山活动频繁,红车断裂带和红3井东侧断裂附近凝灰质含量高,凝灰质沸石化作用形成了大量的片沸石和部分方沸石,离断裂带距离越大,凝灰质含量逐渐减少,片沸石含量逐渐降低,浊沸石含量逐渐升高。3种沸石类矿物中方沸石含量最低,拐12井、车67和车501三口井中含量较高,其他井含量较低(图3)。

沸石的分布受岩石类型、碎屑组分、粒度、分选等因素影响<sup>[9-15]</sup>。岩心和铸体薄片观察分析,沸石类胶结物通常充填在分选较好、粒度较粗的砂砾岩粒间孔隙中。多期河道叠置的粗碎屑岩更容易发育沸石类矿物(图1(a),(c),(d)),而粒度较细的薄层砂体很少有沸石类矿物分布,泥岩中则几乎没有分布。镜下观察发现凝灰岩岩屑通常会发生片沸石化,但由于粒度细,片沸石含量相比粗砂砾岩中充填的浊沸石含量要低的多。

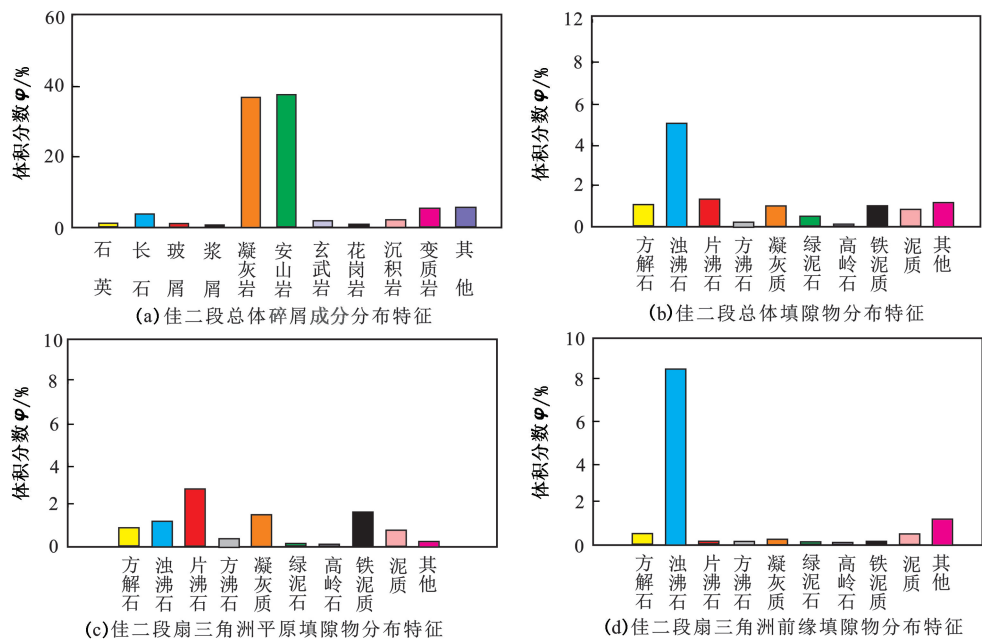
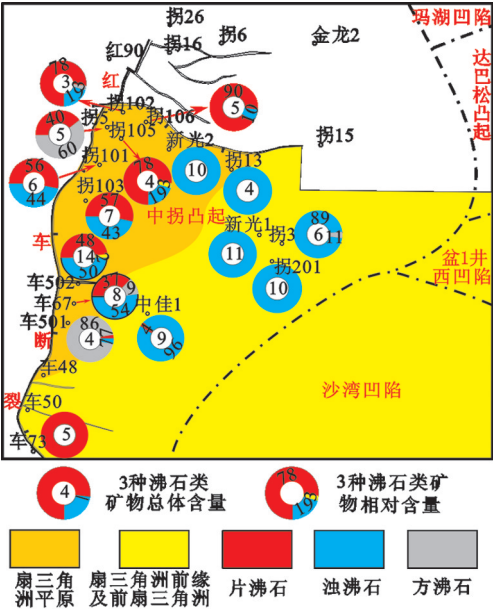


图 2 佳二段岩屑及填隙物分布特征

Fig. 2 Clastic and interstitial matrix distribution characteristics in the second member of Jiamuhe formation



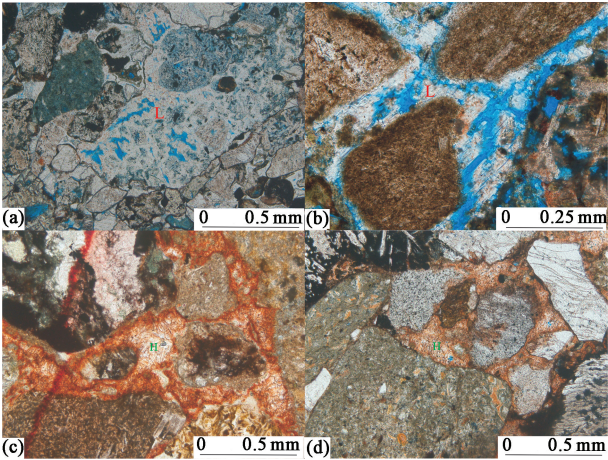


图 4 佳木河组佳二段沸石胶结和溶蚀  
Fig. 4 Cementation and dissolution of zeolite minerals in the second member of Jiamuhe formation

3 沸石类矿物的成岩模式

3.1 沸石的析出

佳二段储层中含有大量的凝灰岩岩屑,而凝灰

岩岩屑含有大量低温不稳定矿物。受红车断裂带和红 3 井东侧断裂影响,佳二段沉积及后期,大气水不断沿断层进入地层并在逆掩过程横向流动,同时储层中还有大量渗透在沉积物中的地下水和岩层中存在的孔隙水。它们使原来不稳定的富硅铝火山玻璃和长石类矿物发生水解作用,使其中的  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  等碱质离子释放出来,提高了水溶液的 pH 值,使溶液呈强碱性。在火山堆积物余热或深部热液影响下,岩层温度升高,促使碱性溶液与 Si、Al 等物质作用形成沸石<sup>[1-2,7]</sup>。

3.2 沸石类矿物的成因及转化过程

研究区佳二段片沸石、浊沸石盐水包裹体均一温度主要分布区间为 60 ~ 80 °C 和 110 ~ 130 °C (图 5)。浊沸石和片沸石成因不同,浊沸石由石英和斜长石在孔隙水的参与下形成<sup>[4-6,12]</sup>或由片沸石转化形成<sup>[7]</sup>;片沸石则由火山物质水解的斜发沸石直接转化或是在一定的温度(约为 100 °C)和压力下,由方沸石转化形成<sup>[7]</sup>(图 6,左半部分据文献<sup>[7]</sup>)。

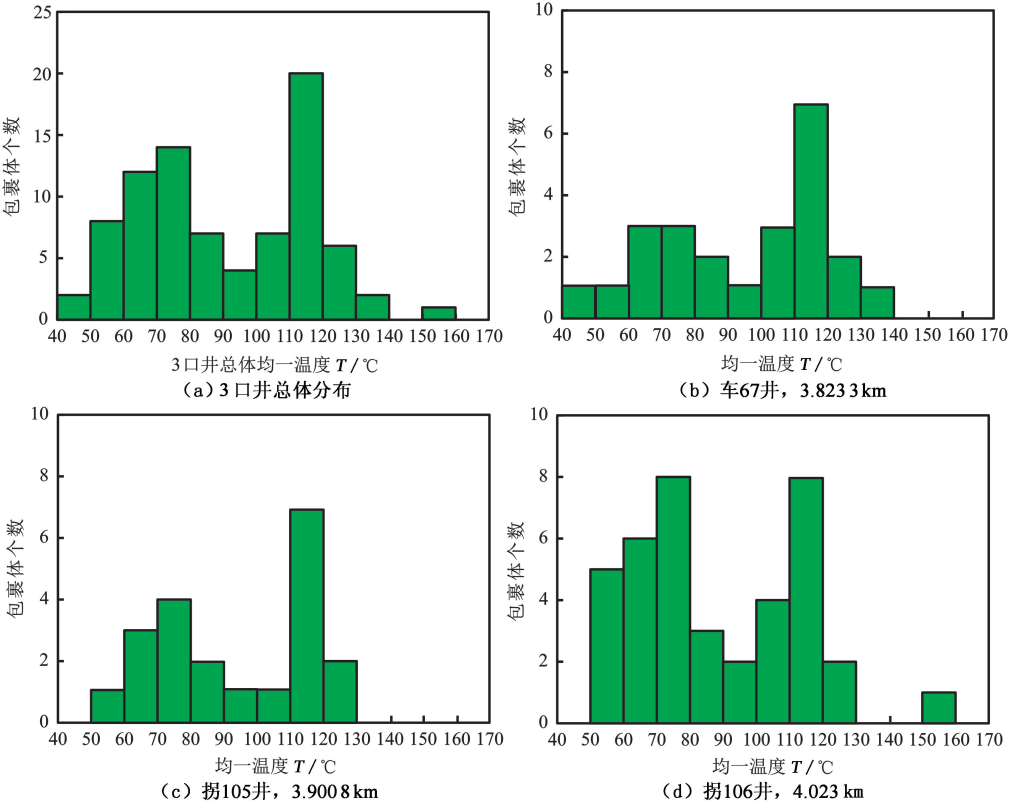


图 5 包裹体均一温度分布  
Fig. 5 Distribution of homogenization temperature of fluid inclusions

渗入佳二段的大气水带动储层中的地下水和间隙水,当遇到凝灰岩层时,凝灰岩迅速分解释放出大量  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  等碱质离子。随着释放离子的增多,蒙脱石最先从饱和碱性水介质中析出,由于

凝灰岩水解的速率大于蒙脱石沉淀的速率,水介质的盐碱度不断增强,钾长石和钠长石析出,随后斜发沸石和方石英沉淀。斜发沸石的析出改变了孔隙水的离子比率,使得更多的火山玻璃水解,早期形成的

蒙脱石转化为伊蒙混层,斜发沸石向片沸石或方沸石转化。斜发沸石向方沸石的转化可表达为

$$\text{Na}_{1.02}\text{K}_{0.82}\text{Ca}_{0.15}\text{Al}_{2.26}\text{Si}_{9.84}\text{O}_{24} \cdot 8\text{H}_2\text{O} (\text{斜发沸石}) +$$

$$1.14\text{Na}^+ = 2.16\text{NaAlSi}_{2.57}\text{O}_{7.14} \cdot \text{H}_2\text{O} (\text{方沸石}) + 0.15\text{Ca}^{2+} + 0.82\text{K}^+ + 4.29\text{SiO}_2 + 5.8\text{H}_2\text{O}. \quad (1)$$

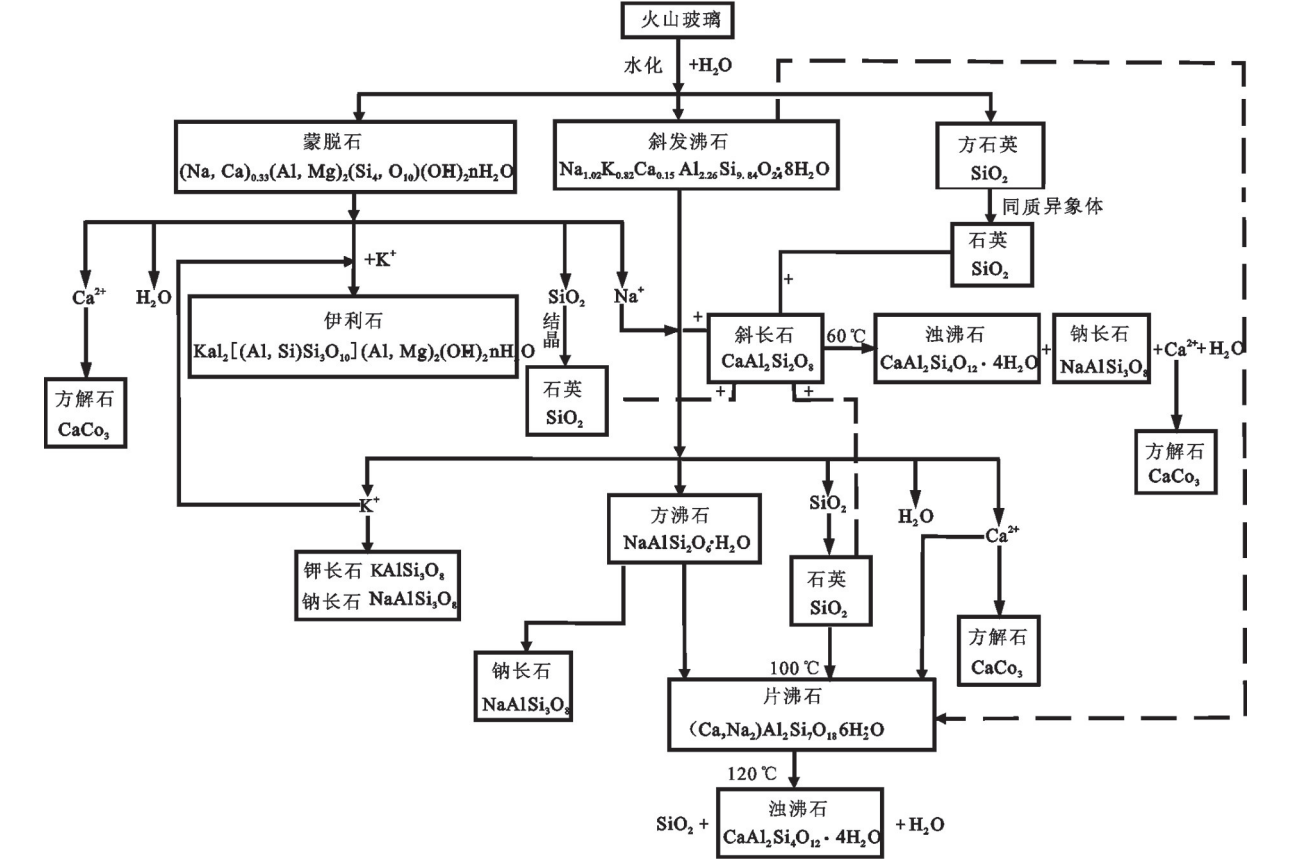


图 6 佳二段沸石类矿物成岩模式

Fig. 6 Diagenetic model of zeolite minerals in the second member of Jiamuhe formation

随着温度和压力的上升,石英饱和度降低,石英取代了方石英,此时石英与斜长石颗粒或安山岩中的斜长石作用形成早期浊沸石,并进一步释放出  $\text{Ca}^{2+}$ ,随着  $\text{Ca}^{2+}$  增多,方解石开始沉淀,斜长石向浊沸石的转化<sup>[2,7,14]</sup>可表达为

$$2\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 (\text{钙长石}) + 2\text{Na}^+ + 4\text{H}_2\text{O} + 6\text{SiO}_2 = 2\text{NaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_8 (\text{钠长石}) + \text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O} (\text{浊沸石}) + \text{Ca}^{2+}. \quad (2)$$

地层水化学性质、pH 以及离子的性质和比率、温度和压力等决定了沸石类型的转化<sup>[14,15]</sup>。火山玻璃含有多种离子且硅铝比很高,首先倾向于向多离子类型和高硅铝比的沸石类矿物转化(如斜发沸石),在一定的温度(约为 100 °C)和压力下,早期形成的斜发沸石和方沸石开始向片沸石转化,随着温度的继续升高(约为 120 °C),片沸石又向浊沸石转变<sup>[16-18]</sup>,同时形成的  $\text{SiO}_2$  参与沸石及其他硅酸盐的析出。

3.3 成岩演化序列及沸石类矿物成岩模式

研究区佳二段在西北高部位主要分布片沸石和

方沸石,东南低部位则主要为浊沸石,沸石类矿物自上而下的转化序列为火山玻璃—斜发沸石—方沸石—片沸石—浊沸石<sup>[7]</sup>。

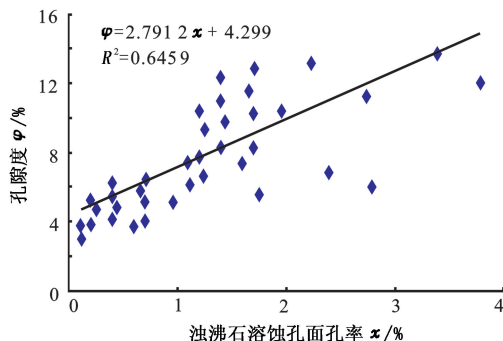
中拐地区佳木河组构造演化分为早期快速埋藏、构造抬升和再埋藏 3 个阶段<sup>[19]</sup>。早期快速埋藏阶段,佳木河组主要发育方沸石、片沸石、浊沸石和方解石等矿物的胶结;构造抬升阶段,佳木河组地层被抬升至地表并遭受大气水淋滤,沸石类矿物发生溶解;构造抬升再埋藏阶段,玛湖凹陷、沙湾凹陷的风成组和佳木河组烃源岩进入成熟阶段,产生的  $\text{CO}_2$  和短链的脂肪酸沿断裂和裂缝向斜坡上方的中拐凸起运移并溶解沸石类矿物。综合各方面资料总结佳二段成岩演化序列为:(早期快速埋藏)绿泥石胶结—I 期片沸石/浊沸石胶结—I 期方沸石胶结—I 期方解石胶结—(构造抬升)溶蚀作用—(构造抬升再埋藏阶段)II 期方沸石胶结—II 期片沸石胶结—II 期浊沸石胶结—II 期方解石胶结—(佳木河组和风成组有机质热演化释放有机酸)溶蚀作

用—Ⅲ期方沸石胶结—Ⅲ期片沸石胶结—Ⅲ期浊沸石胶结—Ⅲ期方解石胶结—(乌尔禾组有机质演化释放有机酸)溶蚀作用—Ⅳ期方沸石胶结—Ⅳ期片沸石胶结—Ⅳ期浊沸石胶结。佳二段沸石类矿物成岩模式如图6所示。

## 4 沸石溶蚀孔隙与油气成藏关系

### 4.1 储层储集空间类型

研究区佳二段储层储集空间有原生孔隙、次生孔隙和裂缝3类。原生孔隙由于压实和成岩作用的强烈改造几乎损失殆尽。裂缝集中分布在断裂带附近,主要是构造挤压形成的,分布范围有限。次生孔隙是佳二段最主要的储集空间,包括浊沸石溶孔



(图4(a),(b))、方沸石溶孔(图1(d))、安山岩岩屑溶孔和长石颗粒溶孔等,浊沸石溶孔是最主要的次生孔隙类型,广泛分布于扇三角洲河道砂砾岩体中。浊沸石强烈溶蚀带深度为2.8~3.0 km、3.05~3.15 km和4.08~4.15 km。镜下观察浊沸石溶孔面孔率为0.1%~3.8%,平均为0.94%,浊沸石溶蚀孔面孔率与孔隙度有较好的正相关关系(图7(a))。储层孔隙度不仅与浊沸石溶蚀有关,还与浊沸石含量相关(图7(b))。铸体薄片观察结合物性资料、试油试气资料分析认为只有当浊沸石含量大于5%,浊沸石溶孔面孔率大于1%时,浊沸石溶蚀增孔才有意义,对储层孔隙度贡献明显。研究区浊沸石次生孔隙发育带可作为寻找有利储层的岩矿标志。

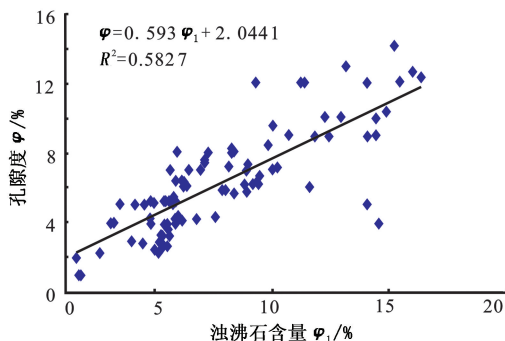


图7 佳二段浊沸石溶蚀孔面孔率、含量与孔隙度关系

Fig.7 Relationship between laumontite dissolution rate of face, content and porosity in the second member of Jiamuhe formation

### 4.2 沸石次生溶孔与油气分布关系

佳二段已找到的油藏主要集中在浊沸石次生溶孔中,浊沸石的溶蚀强度明显影响了储层产量。在浊沸石强溶蚀带,单井油气当量一般大于5 t/d,如中佳1井产气2000 m³/d,产油10 t/d,车502井产气约500 m³/d,产油12.3 t/d;在浊沸石弱溶蚀带、浊沸石溶蚀带单井油气当量一般小于5 t/d,如新光1井产气2600 m³/d,产油0.45 t/d,拐201井产气780 m³/d,产油0.25 t/d。佳二段浊沸石溶蚀对储层改善意义重大,大量浊沸石次生溶孔为佳二段油藏提供了良好的储集条件。

## 5 结论

(1)佳二段主要的沸石类矿物有浊沸石、片沸石和方沸石,沸石类矿物的宏观分布受岩石类型、碎屑组分、粒度、分选等因素的控制。沸石类矿物充填在河道砂砾岩粒间孔隙和裂隙中,是佳二段最主要的胶结物类型。早期沸石类矿物胶结和交代作用抑制了压实作用,使原始孔隙结构得以保存,为后期浊沸石和方沸石溶蚀增孔奠定了物质基础。浊沸石和

方沸石的溶蚀产生了大量的次生孔隙,对储层物性改善明显。

(2)佳二段沸石类矿物形成与火山物质关系密切,沸石类矿物的分布表现出了一定的垂向分带性,在西北高部位主要分布片沸石和方沸石,东南低部位主要为浊沸石,沸石类矿物自上而下的转化序列为火山玻璃—斜发沸石—方沸石—片沸石—浊沸石。片沸石由火山物质水解的斜发沸石直接转化或是在一定的温度(约100℃)和压力下由方沸石转化形成。浊沸石则是斜长石与石英在Na⁺参与下形成或由片沸石转化形成,研究区浊沸石主要由片沸石转化形成的。

(3)沸石的溶蚀主要受沉积和成岩环境的影响,风化淋滤溶蚀和有机酸溶蚀是佳二段沸石的两种溶蚀机制。浊沸石溶孔是佳二段最主要的次生孔隙类型,浊沸石含量和溶蚀强度对储层质量影响很大,大量浊沸石次生溶孔为佳二段油藏提供了良好的储集条件。

### 参考文献:

[1] HAY R L. Zeolites and zeolites reactions in sedimentary

- [M]. New York: Geological Society of America, INC, 1966:1-85.
- [2] MONCURE G K, SURDAM R C, MCKAGUE H L. Zeolite diagenesis below Pahute Mesa[J]. Nevada Test Site Clays Clay Miner, 1981,29(5):385-396.
- [3] IJIMA A. Zeolites in petroleum and natural gas reservoirs[M]//BISH D L, MING D W. Natural zeolites: occurrence, properties, applications. Washington: Mineralogical Society of America, 2001:347-402.
- [4] 朱国华. 陕北延长统砂体成岩作用与油气富集的关系[J]. 石油勘探开发, 1985,6(1):1-7.
- ZHU Guo-hua. Relations between the accumulation of hydrocarbons and the diagenesis of yanchang sandbodies in Shanxi province[J]. Petroleum Exploration and Development, 1985,6(1):1-7.
- [5] 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, 1985,6(1):1-7.
- ZHU Guo-hua. Formation of lomonitic sand bodies with secondary porosity and their relationship with hydrocarbons[J]. Acta Petrolei Sinica, 1985,6(1):1-7.
- [6] 张立飞. 陕北三叠系延长统浊沸石的成因及形成条件的理论计算[J]. 岩石学报, 1992,8(2):145-152.
- ZHANG Li-fei. Origin of laumontite and condition for its formation in trassic yanchang series, north Shanxi [J]. Acta Petrologica Sinica, 1992,8(2):145-152.
- [7] 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, 2011,4(11):1602-1612.
- ZHU Shi-fa, ZHU Xiao-min, WANG Xu-long, et al. The diagenesis of zeolite minerals and its accumulation significance in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Science China, 2011,4(11):1602-1612.
- [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, 1991,12(3):253-261.
- SUN Yu-shan, CAO Zi-qiang. Characteristics and distribution of zeolite group minerals in Karamay Oilfields[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1991,12(3):253-261.
- [9] 张顺存, 仲伟军, 梁则亮, 等. 准噶尔盆地车拐地区侏罗系八道湾组储层成岩作用特征分析[J]. 岩性油气藏, 2010,23(5):49-53.
- ZHANG Shun-cun, ZHONG Wei-jun, LIANG Ze-liang, et al. Analysis of characteristics of reservoir diagenesis of the Jurassic eight bay group in Cheguai area of the Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2010,23(5):49-53.
- [10] 程日辉, 沈艳杰, 颜景波, 等. 海拉尔盆地火山碎屑岩的成岩作用[J]. 岩石学报, 2010,26(1):28-35.
- CHENG Ri-hui, SHEN Yan-Jie, YAN Jing-bo, et al. Diagenesis of volcanoclastic rocks in Hailaer Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010,26(1):28-35.
- [11] CHIPERA S J, GOFF F, GOFF C J, et al. Zeolitization of intracaldera sediments and rhyolitic rocks in the 1.25 Ma lake of Valles caldera, New Mexico, USA[J]. J Volcanol Geoth Res, 2008,178:317-330.
- [12] 杨晓萍, 张保民, 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, 2005,32(3):37-40.
- YANG Xiao-ping, ZHANG Bao-min, TAO Shi-zhen. Laumontite and its significance for petroleum exploration in Jurassic Shaximiao reservoir, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005,32(3):37-40.
- [13] 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(1):107-114.
- FU Guo-min, DONG Man-cang, ZHANG Zhi-sheng, et al. Formation process and distribution of laumontite in Yanchang3 reservoir of Fuxian exploration area in north Shanxi province and the controls of the high quality reservoirs[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2010,35(1):107-114.
- [14] BROXTON D E, BISH D L, WARREN R G. Distribution and chemistry of diagenetic minerals at Yucca Mountain, Nye County, Nevada[J]. Clays Clay Miner, 1987,35:89-110.
- [15] MARINER R H, SURDAM R C. Alkalinity and formation of zeolites in saline alkaline lakes[J]. Science, 1970,170:977-980.
- [16] DONAHOE R J, DIBBLE W E. Some observations on the mechanism of zeolite crystallization[J]. Geol Soc Am Abstr Prog, 1982,14:475-476.
- [17] KOICHI A, TOSHIE K. Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis[J]. Sedimentology, 1980,27:179-188.
- [18] CHO M, MARUYAMA S, LIOU J G. An experimental investigation of heulandite-laumontite equilibrium at 1000 to 2000 bar Pfluid[J]. Contrib Mineral Petrol, 1987,97:43-50.
- [19] 谭开俊, 张帆, 吴晓智, 等. 准噶尔盆地西北缘盆地耦合与油气成藏[J]. 天然气工业, 2008,28(5):10-13.
- TAN Kai-jun, ZHANG Fan, WU Xiao-zhi, et al. Basin-range coupling and hydrocarbon accumulation at the northwestern margin of the Junggar Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008,28(5):10-13.