

准噶尔盆地中拐凸起二叠系佳木河组砂砾岩沸石胶结特征及其成岩机制分析

吴和源^{1,2,3}, 唐勇³, 孙玮⁴, 王学勇³, 常秋生³

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 中国石油新疆油田公司 博士后工作站, 新疆 克拉玛依 834000; 3. 中国石油新疆油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 中国石油新疆油田分公司采油二厂, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 准噶尔盆地中拐凸起佳木河组砂砾岩发育广泛的沸石胶结作用。沸石矿物的胶结特征以及胶结成岩机制分析对储层成因机理探索至关重要。以岩心观察为基础, 显微镜下分析为辅助, 结合电子探针等微区地化测试方法, 对中拐凸起佳木河组沸石胶结型砂砾岩岩石物性、沸石胶结、溶蚀特征进行了分析研究, 通过成岩作用分析, 建立起成岩环境以及沸石胶结成因之间的相互关系。研究表明, 佳木河组砂砾岩沸石类胶结作用类型主要有方沸石、浊沸石和片沸石, 不同类型沸石胶结不具有明显的分带性, 常形成多期、多类型沸石共同胶结, 这与不同阶段成岩环境关系密不可分, 是早期短暂开放性碱性成岩环境为基础、中期酸碱成岩环境交替为辅助、后期长期封闭型碱性成岩环境为主导的综合响应结果。

关键词: 沸石; 胶结作用; 准噶尔盆地; 佳木河组

中图分类号: P578.974; P588.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-6524(2018)01-0075-12

An analysis of the zeolite cement in sand-conglomerate and the diagenetic mechanism of Jiamuhe Formation, Zhongguai area, Junggar Basin

WU He-yuan^{1,2,3}, TANG Yong³, SUN Wei⁴, WANG Xue-yong³ and CHANG Qiu-sheng³

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Postdoctoral Workstation, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000 China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China; 4. No. 2 Oil Production Branch, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China)

Abstract: Zeolite cementation is extensively developed in sand-conglomerate of Jiamuhe Formation in Zhongguai bulge, Junggar Basin. The analysis of cement characteristics and diagenesis of zeolite is of great importance for genetic mechanism exploration of the reservoir. Based on core and microscope observation, in combination with geochemical test methods such as electronic microprobe analysis, the authors studied the lithologic features, cementation and dissolution characteristics of Jiamuhe Formation. The results show that the sand-conglomerate of Jiamuhe Formation has developed zeolite, analcite, laumontite, and heulandite. There is no obvious cement zonality between different types of zeolite. Meanwhile the sand-conglomerate is often cemented by multi-period and multi-type zeolite. It is concluded that these cement characteristics had an inseparable relationship with diagenetic environment. It was a comprehensive response result of different stages of diagenetic environment on the

收稿日期: 2017-04-24; 接受日期: 2017-11-07

基金项目: 国家油气重大专项(2016ZX05047001-004)

作者简介: 吴和源(1986-), 男, 博士后, 主要从事沉积学专业方面的研究, E-mail: wuheyuan0702@126.com。

basis of a transient openness alkaline diagenetic environment of the early stage, assisted by several alternations between acid-base diagenetic environments of the middle stage, and dominated by a long-term closed alkaline diagenetic environment of the late stage.

Key words: zeolite; cementation; Junggar Basin; Jiamuhe Formation

Fund support: National Oil and Gas Major Projects(2016ZX05047001-004)

20 世纪 60 年代,沸石成因机理的探索逐步进入地质学研究的视野(Hay, 1966),半个世纪以来较普遍认为,作为一种特别的自生铝硅酸盐矿物,沸石的形成多与火山物质密切相关,在适当的地层孔隙水化学性质、组分、温度及压力等因素控制下(Hay, 1966; Surdam and Sheppard, 1978; Surdam, 1984; Levy, 1984; Chipera *et al.*, 2008; 朱世发, 2011),沸石可形成于多种不同的环境(Iijima and Utada, 1972; Boles and Coombs, 1977; Iijima, 1984; Utada, 1987; Boles, 1989),且同区域范围也可形成多种类型的沸石胶结样式。作为碎屑岩胶结物中的一种,在碎屑岩成岩演化过程中,沸石的析出、胶结和溶蚀对油气储层储集物性具有不同程度的破坏与改善作用,因此其成因机理成为石油地质学家关注的重点。国内对沸石成因相关方面的研究取得了丰硕的成果(朱国华,1985; 张璞珊,1985; 门相勇,2006; 韩守华等,2007; 白清华等,2009; 李克永等,2010; 付国民等,2010; 梁浩等,2011; 朱世发,2011; 孟祥超等,2013),如早期的变质相矿物(张立飞,1992)到自生铝硅酸盐矿物(柳益群,1996)理论的提升、沸石形成条件的热力学阐释(黄思静等,2001)以及沸石演化序列的认识等(朱世发,2011; 朱世发等,2014; 李振华等,2014)。准噶尔盆地中拐凸起二叠系佳木河组因其厚层沸石胶结型砂砾岩油气藏的发现而成为近年来区域沸石研究关注的焦点,同时也掀起了对沸石与油气成藏之间关系的探讨(朱世发,2011),然而,多数的研究均聚焦于沸石溶蚀以及次生孔隙成因关系的讨论,对沸石在成岩作用过程中所扮演的角色未曾涉及。因此,结合多种研究手段,对佳木河组沸石胶结特征以及成岩机制进行深入探讨,将为碎屑岩沸石成因相关方面研究提供参考,也能为区域油气勘探提供线索。

1 地质背景

中拐凸起位于准噶尔盆地西北缘克百断裂带和红车断裂带的转换部位,东邻达巴松凸起,呈鼻隆形

态,北东以斜坡向玛湖凹陷过渡(图 1a),南以单斜形式倾向沙湾凹陷和盆 1 井西凹陷(陈新发等,2010; 张顺存等,2011; 孔玉华等,2014),由北向南呈现 3 个次级凹陷的构造格局。由于印支期区域构造抬升,下二叠统佳木河组表现为石炭纪不整合面之上以及上二叠统乌尔禾组(P_3w)不整合面之下的一套粗碎屑夹火山岩沉积。佳木河组沉积期,准噶尔盆地西北缘沉积环境主要受同生断裂引发的洪冲积扇控制,垂直断裂发育的多个洪冲积扇体快速近源卸载堆积,伴随零星的火山活动,形成佳木河组分选差、磨圆差、含大量火山碎屑以及泥质杂基的厚层砂砾岩。佳木河组具有三段式的岩性特点:上亚组灰褐色安山岩或英安岩;下亚组灰黑色泥岩、砂岩;中亚组厚层沸石胶结型砂砾岩,夹杂色泥岩以及火山岩。中亚组具厚度大、分布广、近烃源岩、岩性变化快的特点(图 1b),是区域油气增储的重点储层,也是沸石类胶结物发育的主要层位。

2 岩石特征

佳木河组沉积期,中拐凸起受洪冲积扇扇中-扇缘亚相控制,形成大套厚层沸石胶结型碎屑岩沉积,表现为以粗粒级砂砾岩为主,夹砂质中细砾岩、含砾中细砂岩以及含砾泥质粉细砂岩,呈现分选差,棱角-次棱角状,砾石之间多碎屑杂基支撑的特点,普遍含大量火山岩碎屑(凝灰岩、安山岩、玄武岩以及大量的玻屑),以次生溶蚀孔隙为主要储集空间,平均孔隙度约 6%~12%,渗透率 $0.45 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,具有低孔-低渗的储集物性特点。

依据粒径大小、压实强度、胶结程度以及溶蚀特征,将区域沸石胶结型碎屑岩归总为 4 个主要岩相类型,各岩相类型特征不一(表 1)。

① 粗粒径-强压实-弱胶结-微弱溶蚀成岩相(图 2a):主要发育于洪冲积扇扇中亚相,辫流线以及辫流砂岛微相,含大量的铁泥质杂基,碎屑泥质支撑,颗粒凹凸接触或线接触的特点,胶结物含量小于 5%,见方沸石、浊沸石、片沸石胶结,呈现少量微弱溶蚀孔隙,多表现为粒内

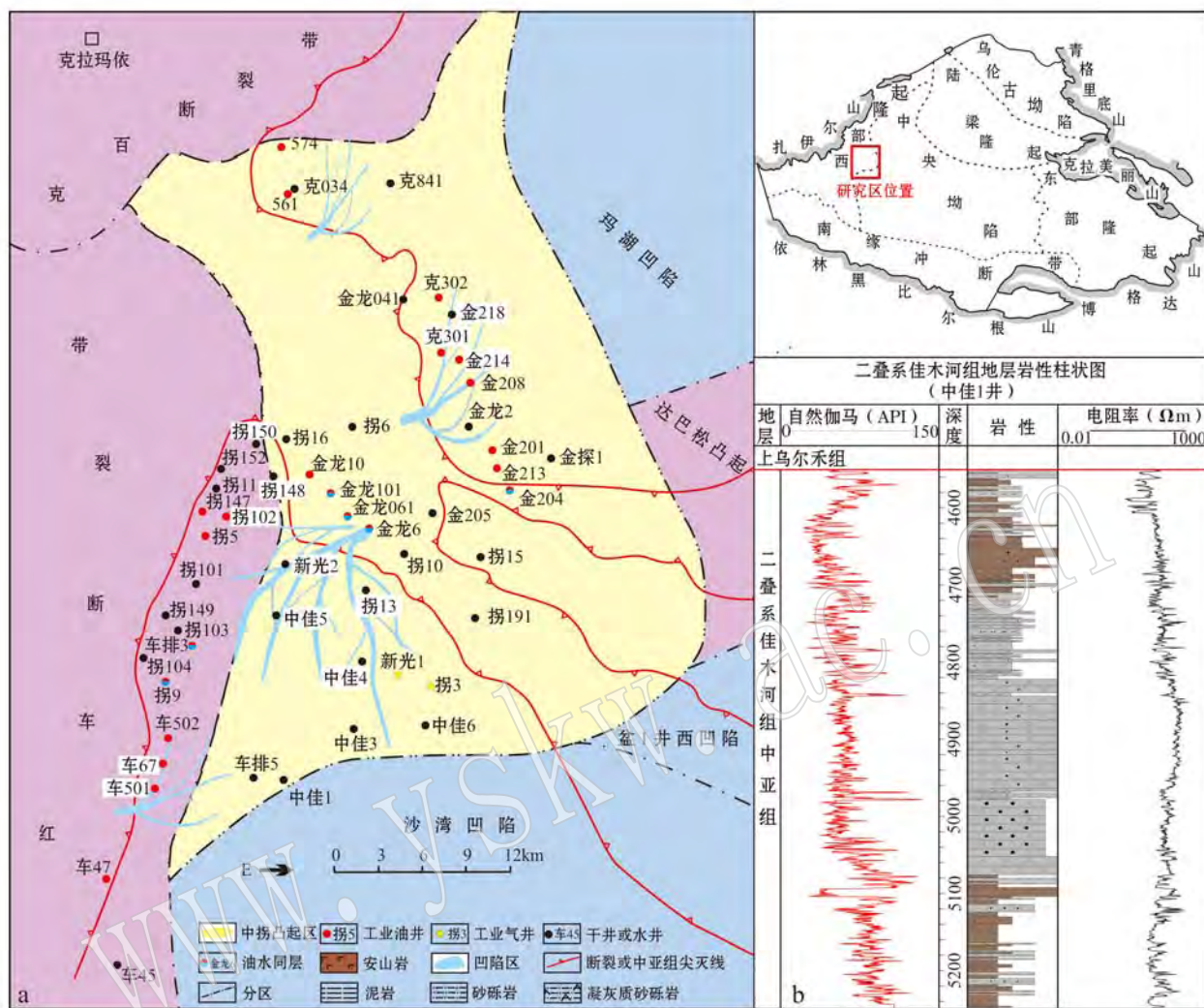


图 1 准噶尔盆地中拐凸起区域位置及中佳 1 井佳木河组中亚组综合柱状图

Fig. 1 Location of Zhongguai bulge and a comprehensive stratigraphic column of middle Jiamuhe Formation in Zhongjia 1 well in Junggar Basin

微溶孔。② 粗粒径-中等压实-中强胶结-溶蚀成岩相(图 2b): 主要发育于扇缘河道微相, 泥质含量较少, 颗粒支撑孔隙式胶结的特点, 胶结物含量 5%~15%, 以镶嵌状浊沸石类胶结为主, 含少量方解石, 颗粒呈点或点-线接触, 发育次生溶蚀孔隙, 表现为颗粒溶蚀或胶结物溶蚀孔。③ 细粒径-中等压实-中强胶结-弱溶蚀成岩相(图 2c): 发育于扇缘河口砂坝微相, 颗粒分选较好, 点或点-线接触, 胶结物含量 5%~10%, 主要为浊沸石和片沸石以及大量自生绿泥石, 溶蚀作用局限, 以微孔隙或微量次生孔缝为主要储集空间。④ 细粒径-强压实-无溶蚀成岩相(图 2d): 扇缘河道间湾微相以及扇中漫流带细粒沉积, 表现为砂质泥岩或泥质粉砂岩, 具大量的细粒泥质,

以片沸石为主要胶结物,含量低,颗粒多漂浮于泥质杂基中,具较低的渗透率。

3 沸石胶结特征

胶结作用是成岩演化过程中广泛存在的成岩作用类型,多表现为对碎屑沉积物原始孔隙的胶结充填或对次生孔隙的再次封堵。中拐凸起佳木河组碎屑岩沉积具多类型的胶结作用的特点,以沸石类胶结为主,见少量方解石胶结以及多期自生黏土矿物的充填,广泛的沸石类胶结作用是区域碎屑岩储层重要特征,也是储层致密表征的重要原因。利用成都理工大学油气藏重点实验室电子探针分析设备

表 1 佳木河组碎屑岩沸石发育特征与碎屑岩岩性-岩相对比

Table 1 Comparison between sedimentary facies and lithofacies of sand-conglomerate cemented by zeolite in Jiamuhe Formation

沉积相	亚相	微相	岩相	岩石类型	沸石胶结类型
洪冲积扇	扇中	辫流线	粗粒径-强压实-弱胶结-微弱溶蚀成岩相	含泥中粗砾岩	方沸石、片沸石、浊沸石
		辫流砂岛			
		漫流带	细粒径-强压实-无溶蚀成岩相	砂质细砾岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩	浊沸石、片沸石
	扇缘	河道间湾			
		扇缘河道		砂质中细砾岩	方沸石、浊沸石、片沸石
		河口砂坝			
			细粒径-中等压实-中/强胶结-弱溶蚀成岩相	含砾中粗砂岩	浊沸石、片沸石

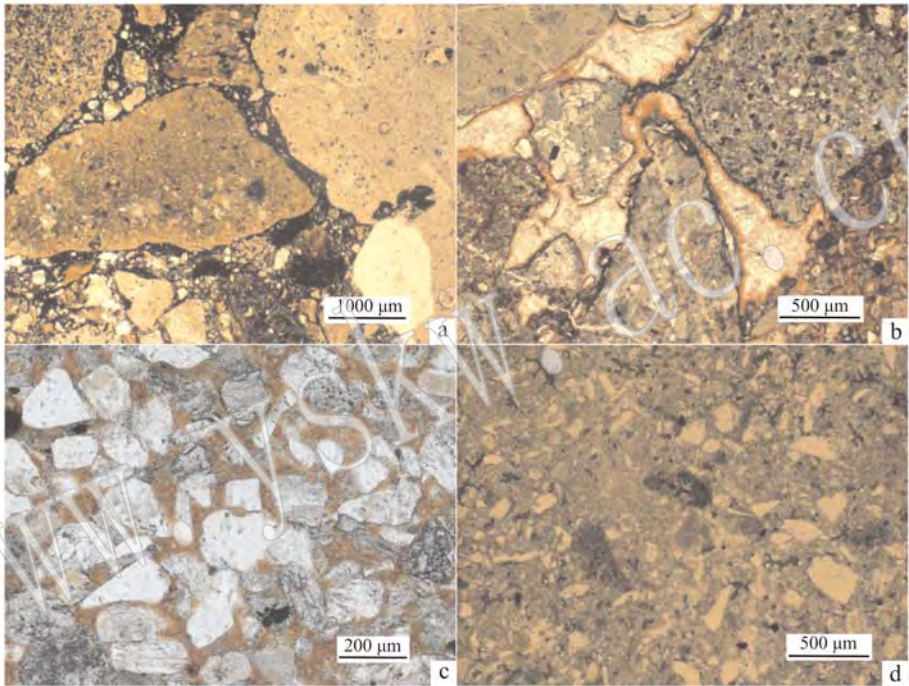


图 2 佳木河组沸石胶结型碎屑岩镜下特征(单偏光,普通薄片)

Fig. 2 Microscopic characteristics of sand-conglomerate cemented by laumontite in Jiamuhe Formation (plain light, rock thin section)

a—砂质中粗砾岩, 拐 147 井 3 311.1 m; b—中细砾岩, 拐 9 井, 3 564 m; c—中细砂岩, 拐 104 井, 3 314.5 m; d—粉砂岩, 拐 150 井, 2 562 m
a—sandy conglomerate, G147 well, 3 311.1 m; b—middle to fine conglomerate, G9 well, 3 564 m; c—middle to fine sandstone, G104 well, 3 314.5 m; d—siltstone, G150 well, 2 562 m

EPM1720,对不同岩性不同层位碎屑岩中沸石胶结物进行了成分分析,结果见表 2,结合扫描电镜以及显微镜下特征,发现佳木河组碎屑岩发育多种沸石胶结作用类型,主要包括浊沸石、片沸石、方沸石(图 3a),不同沸石类型之间不存在明显的区域分隔胶结特点,表现为多种胶结类型混合作用的特征。

3.1 方沸石

方沸石化学式为 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$,单偏光下无色或白色,透明到半透明,正交光下全消光,晶体呈等轴三八面体(图 4a~4c)。常见粒状方沸石晶体沿碎屑颗粒边缘分布(图 3b),局部完全充填粒间孔。

方沸石的胶结作用主要发育于中细砾岩及中粗砾岩,主要以半充填或全充填方式胶结颗粒粒间孔隙或微裂缝。

3.2 片沸石

片沸石化学式为 $(\text{Ca}, \text{Na}_2)\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$,各种岩相类型中均有发育,中细砂岩等区域粒度较小类型碎屑岩中片沸石胶结最为显著。单偏光下无色或因铁质侵染呈现砖红色,片状晶体常表现为沿碎屑颗粒边缘垂直生长的特点(图 4d~4f),具两种形态片沸石:它形泥晶片沸石和自形中细晶片沸石。它形泥晶片沸石多呈半充填或全充填于泥质粉细砂

表 2 中拐凸起二叠系佳木河组碎屑岩沸石类胶结物电子探针分析

$w_B/\%$

Table 2 Electron probe analysis of sand-conglomerate cemented by zeolites in Jiamuhe Formation

井位	深度/m	岩性	MgO	SiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	FeO	Al ₂ O ₃	BaO	SrO	沸石类型
车 501	3 873.8	砂质中细砾岩	0.005	56.962	0.000	0.021	21.723	0.198	0.027	21.066	0	0	方沸石
	3 834.7	砂质中细砾岩	0	62.138	0.012	0.032	17.362	0.134	0.083	20.241	0	0	
车 67	3 904.7	中细砂岩	0.116	66.990	0.001	0.833	0.771	12.042	1.606	17.069	0	0.572	片沸石
拐 103	3 156.4	中砂岩	0.073	67.406	0.001	0.317	1.208	11.803	0.990	17.477	0	0.725	片沸石
	3 470.4	含细砾粗砂岩	0.115	65.149	0.010	0.365	1.148	12.751	0.255	19.613	0	0.595	
中佳 3	4 851.7	细砂岩	0.030	57.918	0.003	0.204	0.573	18.916	0.445	21.911	0	0	浊沸石
克 841	3 236.2	砂质中细砾岩	0.098	49.238	0.020	0.091	0.100	22.984	0.057	27.413	0	0	
中佳 6	5 009.3	砂质细砾岩	0.123	52.793	0.018	0.111	0.209	21.822	0.183	24.741	0	0	
车 67	3 754.8	含细砾粗砂岩	0.822	53.172	0.041	0.368	0.415	20.317	1.005	23.860	0	0	

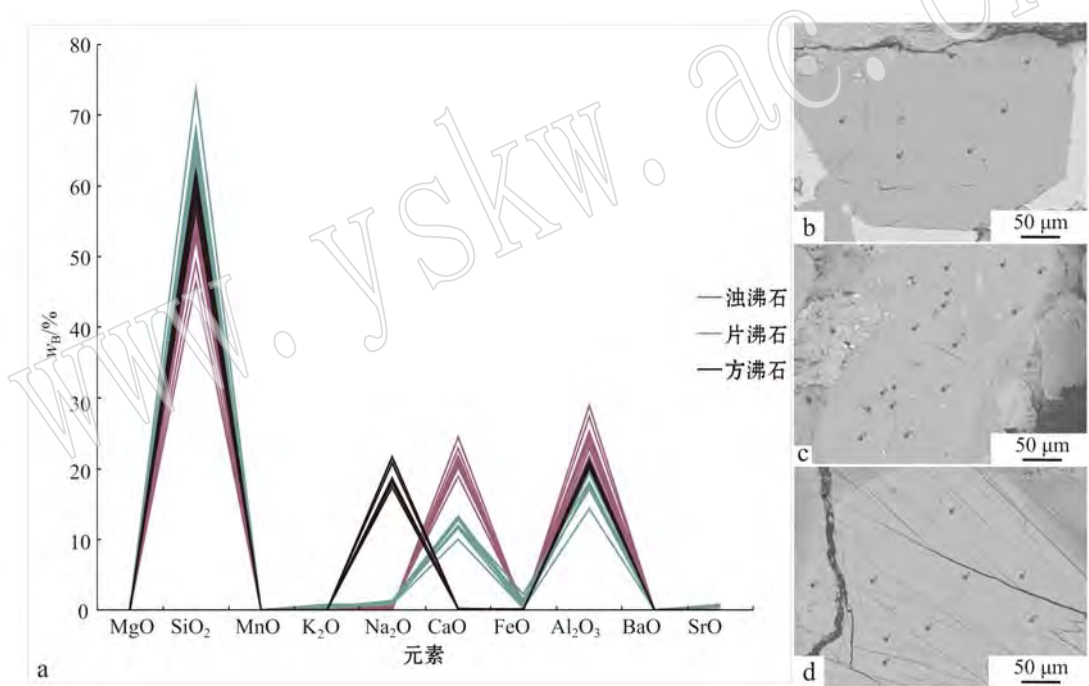


图 3 中拐凸起佳木河组沸石类胶结物主量元素特征

Fig. 3 Major element characteristics in zeolite minerals of Jiamuhe Formation

b—方沸石背散射特征, 车 501 井, 3 834.7 m; c—片沸石背散射特征, 拐 103 井, 3 156.4 m; d—浊沸石背散射特征, 中佳 6 井, 5 009.3 m
b—analcite (RSE), C501 well, 3 834.7 m; c—heulandite (RSE), G103 well, 3 156.4 m; d—laumontite (RSE), ZJ6 well, 5 009.3 m

岩碎屑颗粒之间,而自形中细晶片沸石多出现在中粗砂岩、砂砾岩或颗粒溶孔中,垂直颗粒边缘呈晶簇状(图 3c),与浊沸石或绿泥石等其他类型胶结物一起充填胶结粒间孔隙。

3.3 浊沸石

浊沸石化学式为 $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$, 广泛发育

于佳木河组不同类型碎屑岩中,解理发育,单偏光下无色透明,正交光下一级浅灰或暗灰色,扫描电镜下呈现板状或板柱状-针状,以半充填-全充填式胶结粒间孔隙,常表现为镶嵌状连生晶体形式产出(图 3d、图 4g~4i)。浊沸石具有明显的两期或多期胶结的特点,早期浊沸石多呈现镶嵌状胶结,碎屑颗粒呈

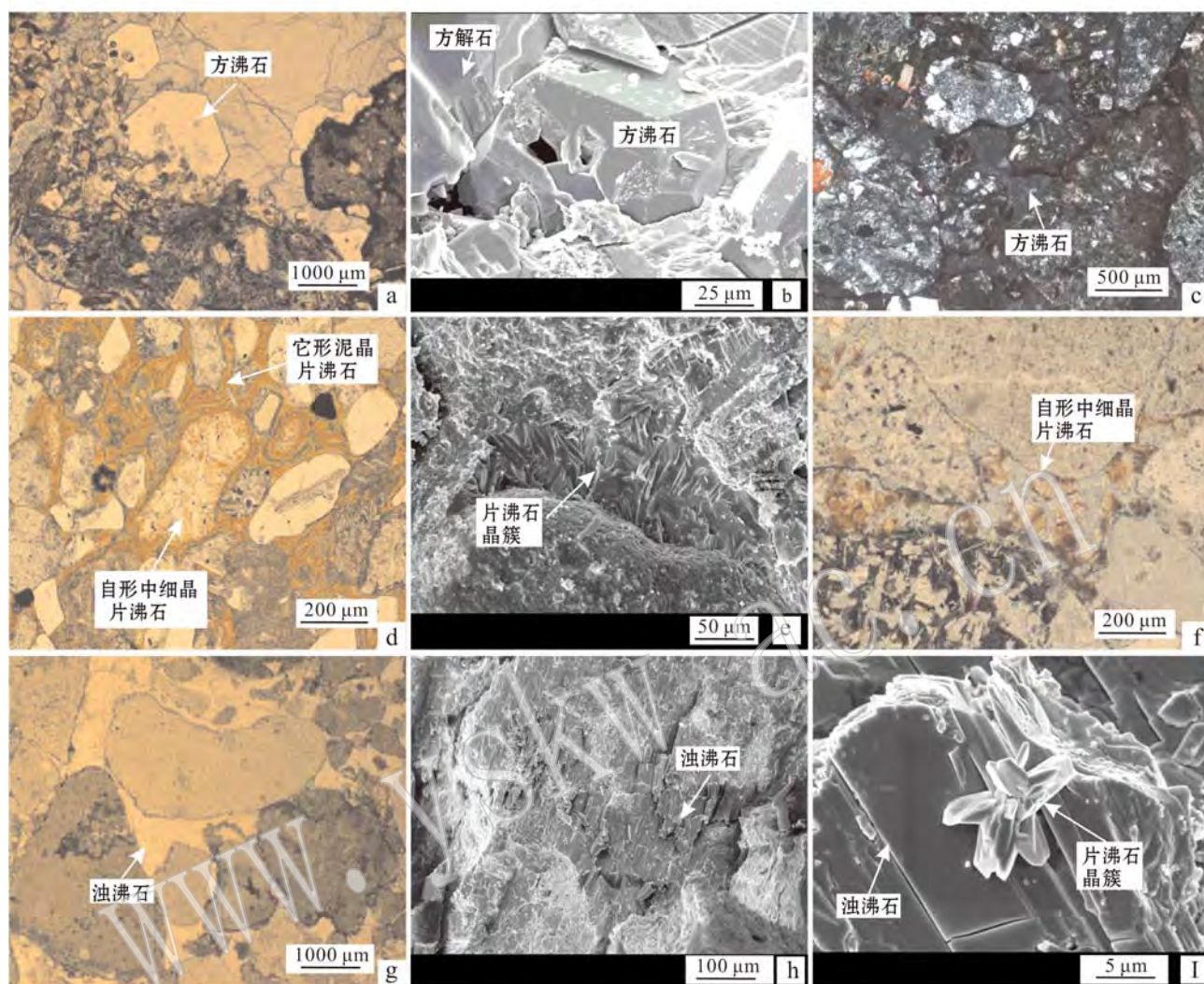


图 4 准噶尔盆地中拐凸起佳木河组沸石胶结特征

Fig. 4 Main zeolite minerals and their microscopic characteristics in Jiamuhe Formation

a—粒表粒状方沸石, 单偏光, 普通薄片, 车 501 井, 3 837 m; b—粒状方沸石, 扫描电镜, 车 501 井, 3 874 m; c—粒间方沸石镶嵌状胶结, 正交偏光, 铸体薄片, 车 501 井, 3 863 m; d—粒间它形泥晶片沸石胶结与颗粒溶孔自形中细晶片沸石, 单偏光, 普通薄片, 拐 103 井, 3 456.8 m; e—粒表垂直簇状片沸石, 扫描电镜, 拐 13 井, 3 462.5 m; f—粒间自形粒状片沸石与绿泥石充填, 单偏光, 普通薄片, 金龙 041 井, 3 462.4 m; g—粒间浊沸石镶嵌状胶结, 单偏光, 普通薄片, 新光 1 井, 4 588.9 m; h—浊沸石镶嵌状胶结, 扫描电镜, 中佳 6 井, 4 874.8 m; i—板状浊沸石溶蚀孔充填针柱状浊沸石, 扫描电镜, 中佳 5 井, 3 885.5 m

a—granular analcites on particle surface (plainlight, rock thin section), C501 well, 3 837 m; b—granular analcites (SEM), C501 well, 3 874 m; c—mosaic cement of analcites (crossed nicols, casting thin section), C501 well, 3 863 m; d—micrite heulandite of intergranular and fine grained heulandite in dissolution pores (plainlight, rock thin section), G103 well, 3 456.8 m; e—drusy heulandite vertical grain (SEM), G13 well, 3 462.5 m; f—intergranular heulandite and chlorite (plainlight, rock thin section), J1041 well, 3 462.4 m; g—intergranular laumontite (plainlight, rock thin section), XG1 well, 4 588.9 m; h—mosaic cement of laumontite (SEM), ZJ6 well, 4 874.8 m; i—columnar laumontite filled in dissolved pore of clintherform laumontite (SEM), ZJ5 well, 3 885.5 m

点接触, 颗粒原生孔隙基本被浊沸石全充填胶结, 后期溶蚀孔隙充填的二期或三期浊沸石在偏光显微镜下不易识别, 但扫描电镜分析呈现了溶蚀孔隙中的短板柱状或针状浊沸石, 且早期板状镶嵌浊沸石溶孔中见细板状-针状浊沸石晶体。

4 沸石溶蚀及再充填特征

有机酸溶蚀与大气淡水淋滤溶蚀对佳木河组有效储集体的形成具有关键性作用(李振华等, 2014),

尤其是地质历史时期多期油气充注过程(张义杰等, 2010; 林会喜等, 2013; 李振华等, 2013; 孟祥超等, 2015; 齐雯等, 2015), 是沸石胶结型砂砾岩储层次生孔隙形成的主控因素, 更是多样的沸石类胶结物溶蚀的主要原因。

地质历史时期, 随着烃源岩有机质热演化过程的持续进行, 大量二氧化碳被释放并形成碳酸, 降低了地层水的 pH 值, 同时, 佳木河组砂砾岩中含大量黏土矿物, 其成岩演化过程中蒙脱石向伊/蒙混层的转化过程也会释放出大量富含硅酸的酸性水, 这些酸性水随着压实作用或断裂通道进入砂砾岩层, 导致早期在碱性孔隙水中较稳定的沸石类以及碳酸盐类胶结物发生溶蚀。但由于有机酸对铝硅酸盐矿物溶解能力远大于碳酸盐矿物(Surdam, 1984)以及铝硅酸盐矿物中碱性系列较钙质系列易溶蚀的特点(Boles, 1971), 佳木河组碎屑岩中 3 种沸石溶蚀及次生孔隙再充填特征差异明显。

方沸石作为 3 种沸石胶结物中唯一的碱性系列铝硅酸盐矿物, 其溶蚀强度明显高于片沸石和浊沸石。除此化学特性外, 方沸石晶粒之间空间相对较大, 易于酸性流体的物质交换, 这也是较其他沸石类型易于溶蚀的另一个原因, 常形成粒状方沸石沿颗粒边缘的强烈溶蚀现象, 呈现镂空状的溶蚀晶体以及晶体颗粒上的广泛溶蚀微孔, 溶蚀孔隙多被方解石完全充填(图 5a、5b)。以放射晶簇状胶结的片沸石晶体颗粒细小且多充填于细粒碎屑中, 孔渗条件差, 酸性流体不易流动, 其溶蚀现象相对较少, 局部见片沸石胶结溶蚀孔隙被方解石完全充填的现象(图 5c)。浊沸石溶蚀孔发育明显, 多形成晶面溶蚀微孔以及溶蚀孔洞, 多数浊沸石溶蚀孔隙被后期胶结物充填, 见绿泥石、片沸石、镶晶状方解石以及短柱状针状浊沸石充填次生孔隙(图 5d~5i)。从沸石类矿物的溶蚀以及再充填可见, 佳木河组粗碎屑岩成岩环境整体以碱性成岩环境为主导, 酸性成岩环境只是其漫长碱性成岩过程中短暂的插曲。

5 沸石胶结成岩分析

大量显微观察结果表明佳木河组沸石胶结型砂砾岩具有两个显著的胶结特征: 其一, 浊沸石胶结为主体的碎屑岩中易出现少量片沸石共同胶结, 方沸石为主体的胶结区域常伴随大量的方解石胶结充填, 方沸石胶结区域基本不发育浊沸石与片沸石胶

结作用; 其二, 同区域纵向上沸石胶结类型变化复杂, 平面上沸石胶结不存在分带胶结的特点。这两个胶结特征说明了早期胶结作用钙碱性成岩流体对区域胶结作用具有实质控制作用以及沉积相、沉积微相碎屑组分与胶结类型之间关系密切。

中拐凸起佳木河组沉积期为洪冲积扇沉积环境, 具有微相变化快、碎屑杂基含量高的特点, 导致大套厚层粗碎屑沉积物中内部隔层多, 碎屑组分差异大。早期开放性碱性成岩环境中, 大量火山碎屑物质卸载堆积, 易溶火山碎屑物质大量溶蚀, 形成钾、钠、钙、镁等碱金属离子局部富集, 随着上覆沉积物逐渐增厚, 沉积物逐渐脱离开放性沉积环境, 形成封闭性碱性成岩环境, 但由于区域沉积碎屑组分的差异以及内部纵向或平面泥质隔层的遮挡, 形成了时空上钙碱性成岩环境差异分隔, 导致纵向或平面上早期方沸石、浊沸石与片沸石的不同胶结特征, 钙碱性成岩微环境中大量析出方沸石, 而碱性成岩环境中则析出大量浊沸石或片沸石, 胶结原生孔隙(图 6a~6c, 图 7a1~c1, a2~c2), 抑制了持续压实作用对原生孔隙结构的进一步破坏。

由于早期开放性碱性成岩环境下, 洪冲积扇沉积物中沸石类胶结作用发育的广泛性以及洪冲积扇体内部的封闭型, 佳木河组砂砾岩在成岩演化过程中长期处于弱碱性成岩环境, 成为多期沸石胶结的主要原因。印支运动期间, 区域地层抬升剥蚀, 开放性淡水淋滤溶蚀作用于不整合面, 形成对不整合面附近砂砾岩沸石胶结物的大量溶蚀, 改善了不整合面附近储集体的储集物性, 但深层储集体沸石胶结物的溶蚀并不明显, 直到晚三叠世末至早侏罗世, 风城组烃源岩发育较广泛的油气充注过程(曹剑等, 2006), 深层砂砾岩储集体在有机酸作用下, 发育广泛的沸石类胶结物溶蚀增孔现象, 形成大量易溶碎屑颗粒以及胶结物次生孔隙(图 6d, 图 7d1、7d2)。钙碱性成岩微环境中尤为明显, 方沸石大量溶蚀并形成大量火山碎屑长石斑晶溶孔, 但由于储层自身较封闭、致密的特点, 其溶蚀物质交换速率低下, 导致有机酸溶蚀却不易排出, 碱土金属原地富集, 酸性环境逐渐减弱, 碱性成岩作用恢复增强, 形成钙碱性沉积环境主导区域的大量方解石胶结充填次生孔隙(图 6e), 以及碱性成岩环境中浊沸石与片沸石、绿泥石等自生黏土矿物的原地充填胶结(图 6e1、6e2), 残留早期干沥青以及少量次生孔隙。而随后, 晚侏罗至早白垩世第2期油气充注有机酸溶蚀过程中, 沸

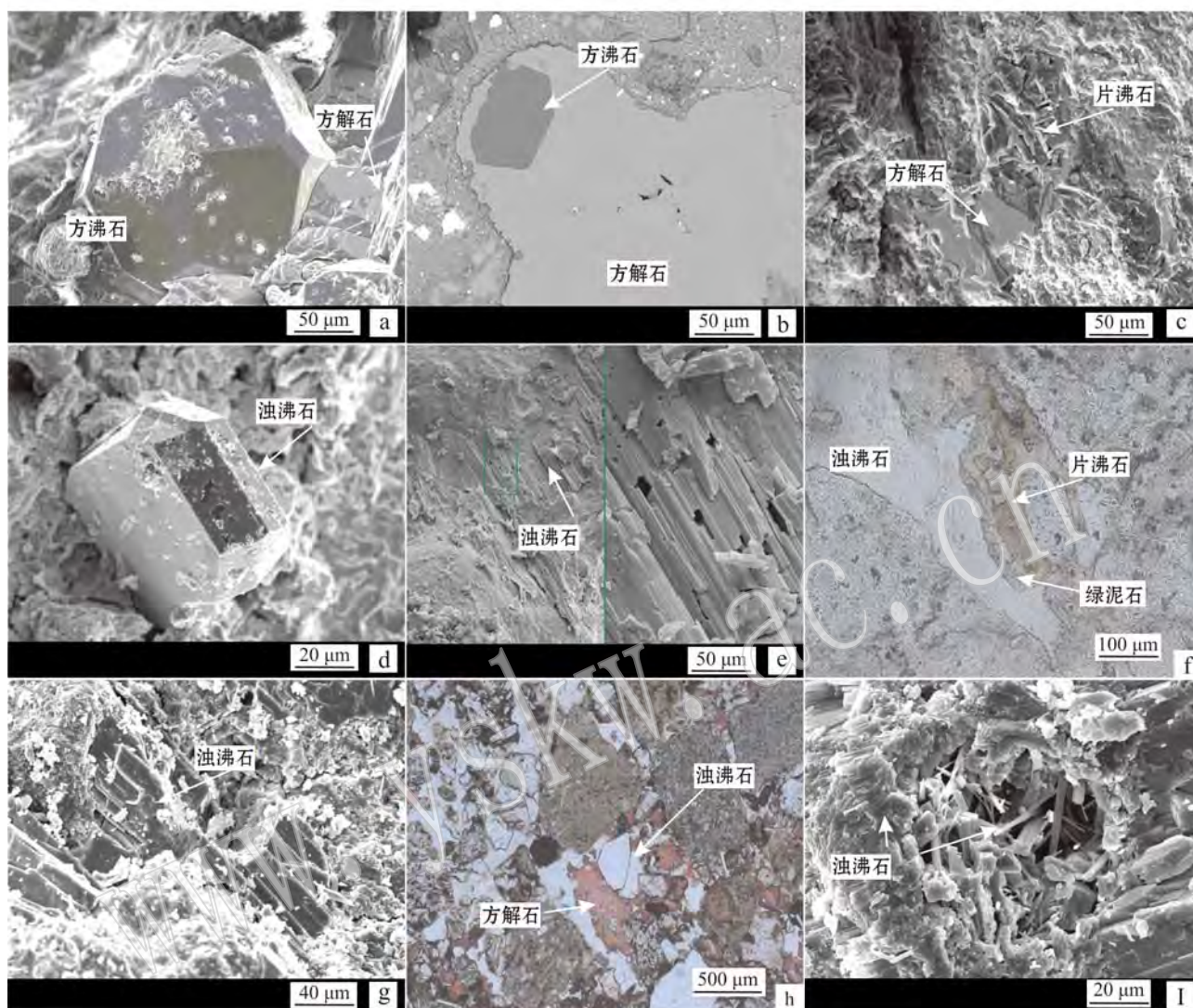


图 5 佳木河组砂砾岩沸石类胶结物溶蚀特征

Fig. 5 Dissolution characteristics of zeolite minerals in Jiamuhe Formation

a—方沸石晶体表面溶蚀微孔(扫描电镜), 车 501 井, 3 834.6 m; b—方沸石溶蚀残余, 溶孔被方解石全充填(背散射成像), 车 501 井, 3 873.8 m; c—晶簇状片沸石溶蚀孔隙被方解石充填(扫描电镜), 车 67 井, 3 904.6 m; d—板柱状浊沸石晶体表面溶蚀微孔(扫描电镜), 中佳 5 井, 3 927.7 m; e—簇晶状浊沸石溶蚀孔洞(扫描电镜), 车 502 井, 3 786.4 m; f—浊沸石溶蚀孔隙被绿泥石以及自形粒状片沸石充填(单偏光, 普通薄片), 拐 103 井, 3 462.5 m; g—簇晶状浊沸石胶结物溶蚀孔洞(扫描电镜), 拐 3 井, 3 641.1 m; h—簇晶状浊沸石溶蚀孔隙被方解石充填胶结(单偏光, 普通薄片茜素红染色), 拐 104 井, 3 314.5 m; i—簇晶状浊沸石溶蚀孔洞中充填后期针柱状浊沸石晶体(扫描电镜), 车 5 井, 4 705.2 m

a—dissolution micropores on analcites (RSE), C501 well, 3 834.6 m; b—residues of analcites corrosion (RSE), corrosion holes filled with calcite, C501well, 3 873.8 m; c—corrosion holes of druse heulandite filled with calcite (RSE), C67 well, 3 904.6 m; d—dissolution micropores in clintheriform laumontite (RSE), ZJ5 well, 3 927.7 m; e—dissolution pore in laumontite (RSE), C502 well, 3 786.4 m; f—dissolved pore filled with chlorite and heulandite (plainlight, rock thin section), G103 well, 3 462.5 m; g—dissolution pores in laumontite (RSE), G3 well, 3 461.1 m; h—dissolution pores of laumontite filled with calcite (plainlight, rock thin section dyed with alizarin red), G104 well, 3 314.5 m; i—dissolution pores of laumontite filled with clintheriform laumontite (SEM), C5 well, 4 705.2 m

石类胶结物溶蚀再充填也基本表现为相同样式(图 6f、6g, 图 7f1、7g1、7f2、7g2), 成岩演化过程中有机酸对沸石类胶结物的溶蚀并未很好改善砂砾岩物性条

件, 究其缘由, 归咎为环境的封闭性以及弱碱性成岩环境的长期主导性。

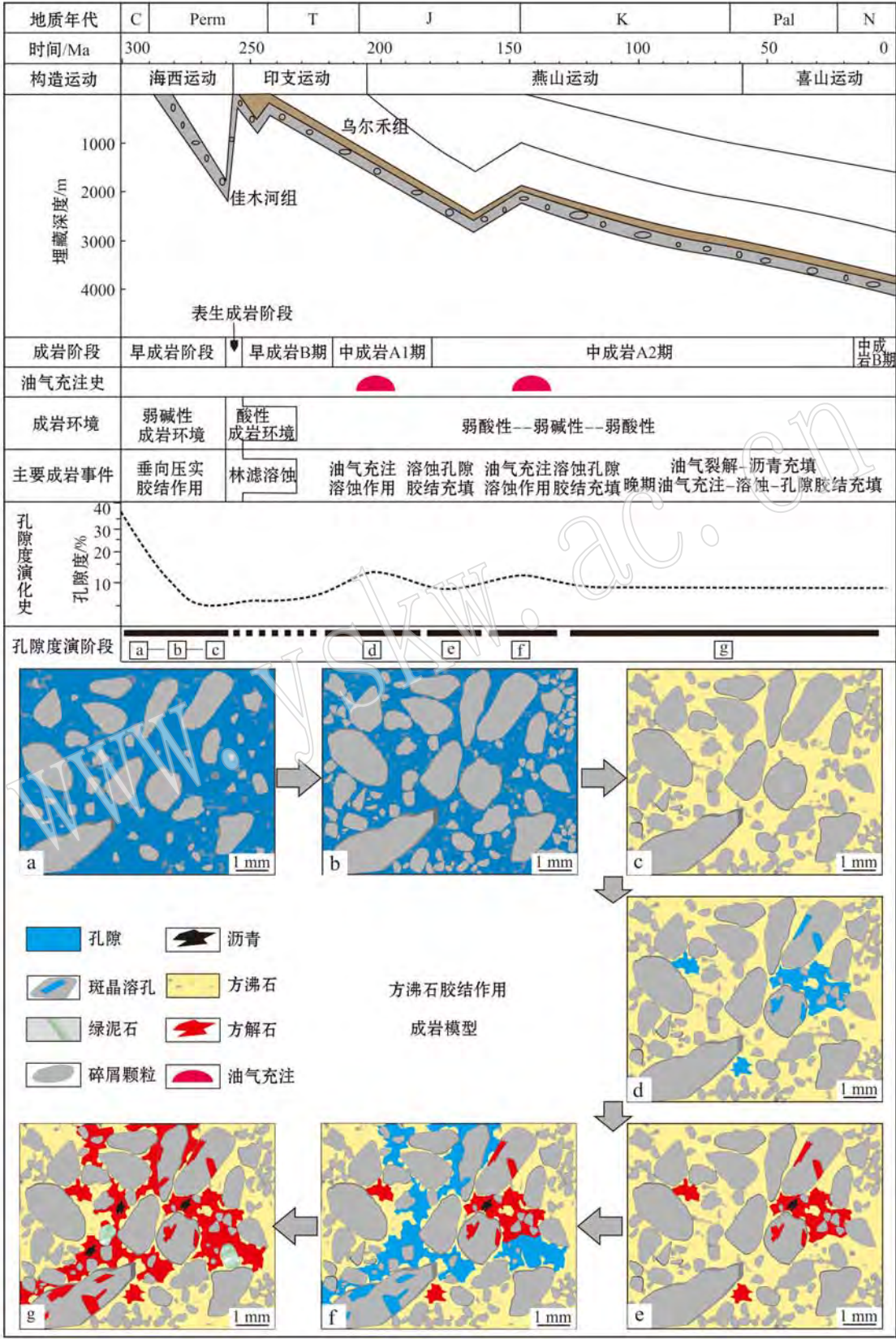


图 6 中拐凸起佳木河组方沸石胶结型碎屑岩成岩模型

Fig. 6 Diagenetic model of clastic rock cemented by analcite in Jiamuhe Formation

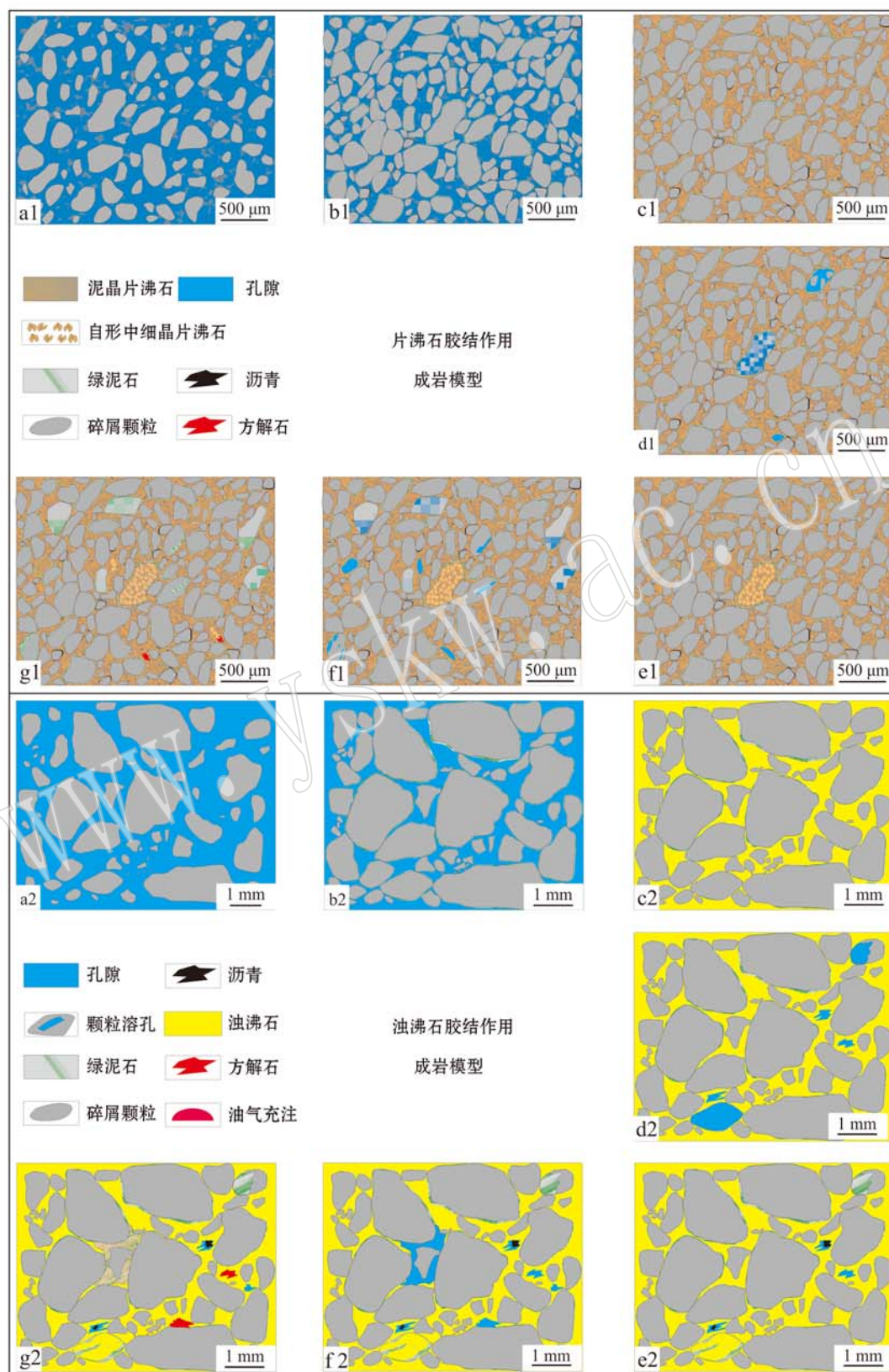


图 7 佳木河组碱性系列沸石胶结型碎屑岩成岩模型

Fig. 7 Diagenetic model of clastic rock cemented by alkaline zeolite in Jiamuhe Formation

6 结论

(1) 中拐凸起佳木河组砂砾岩储层具有3种类型沸石胶结: 方沸石、浊沸石、片沸石, 具纵向胶结类型变化快、平面沸石胶结不具分带性的特点。

(2) 早期开放性碱性成岩环境中大量火山碎屑物质的溶蚀是多样沸石胶结的基础, 不同沉积微相碎屑组分的差异是胶结类型差异的关键。

(3) 长期封闭型碱性成岩环境主导了佳木河组中后期成岩演化过程, 是早期沸石类胶结与晚期次生孔隙沸石类再充填的重要原因, 酸性成岩环境的短暂影响由于储层封闭、致密的原因未能在沸石类胶结物中形成长久保存的次生孔隙。

References

- Bai Qinghua, Liu Yiqun and Fan Tingting. 2009. Genesis and distribution of laumontite in Yanchang Formation of Upper Triassic in Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 42(2): 100~107(in Chinese).
- Boles J R. 1971. Synthesis of analcime from natural heulandite and clinoptilolite[J]. *American Mineralogist*, 56: 9~10.
- Boles J R. 1989. Zeolites in low-grade metamorphic rocks[A]. *Mineralogy and Geology of Natural Zeolites*[C]. Washington D C: Mineralogical Society America, 103~135.
- Boles J R and Coombs D S. 1977. Zeolite facies alteration of sandstones in the Southland Syncline, New Zealand[J]. *Am. J. Sci.*, 277: 982~1012.
- Cao Jian, Hu Wenxuan, Zhang Yijie, *et al.* 2006. The main factor controlling petroleum migration along unconformity in the Junggar Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(3): 399~406(in Chinese).
- Chen Xinfa, Jin Jun and Yang Haibo. 2010. Geological characteristics of gas reservoirs in the Upper Permian Jiamuhe Formation in Zhongguai salient, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 30(9): 19~21, 119(in Chinese).
- Chipera S J, Goff F, Goff C J, *et al.* 2008. Zeolitization of intracaldera sediments and rhyolitic rocks in the 1.25 Ma lake of Valles caldera, New Mexico, USA[J]. *J. Volcanol Geoth. RES.*, 178(2): 317~330.
- Fu Guomin, Dong Mancang, Zhang Zhisheng, *et al.* 2010. Formation process and distribution of laumontite in Yanchang 3 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 Geoscience*, 35(1): 107~114(in Chinese).
- Han Shouhua, Yu Hezhong, Si Chunsong, *et al.* 2007. Corrosion of analcime in reservoir of Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 28(3): 51~54, 62(in Chinese).
- Huang Sijing, Liu Jie, Shen Licheng, *et al.* 2001. Thermodynamic interpretation for the conditions of the formation of laumontite related to clastic diagenesis[J]. *Geological Review*, 47(3): 301~308(in Chinese).
- Kong Yuhua, Bao Haijuan, Li Zhenhua, *et al.* 2014. Sequence stratigraphic mode of Jiamuhe Formation in Zhongguai bulge, Junggar Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 21(5): 60~64, 154(in Chinese).
- Hay R L. 1966. *Zeolites and Zeolite Reactions in Sedimentary Rocks* [M]. New York: Geological Society of America, 1~85.
- Iijima A. 1984. A petrochemical aspect of the zeolite formation in volcaniclastic rocks[A]. *Proceedings of the 27th International Geological C: Utrecht*[C]. VNU Science Press, 29~52.
- Iijima A and Utada M. 1972. A critical review on the occurrence of zeolites in sedimentary rocks in Japan[J]. *Japan Geol. Geogr.*, 42: 61~84.
- Levy S S. 1984. Petrology of samples from drill holes USW H-3, H-4, and H-5, Yucca Mountain, Nevada[J]. *LOS Alamos NAT Lab Rept.*, 76~77.
- Li Keyong, Li Wenhui, Chen Quanhong, *et al.* 2010. Relationship between laumontite and reservoir of Yanchang formation in Liandaowan area, Ordos Basin[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 46(6): 23~28(in Chinese).
- Li Zhenhua, Qiu Longwei, Shi Zheng, *et al.* 2014. 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*, 38(1): 1~7(in Chinese).
- Li Zhenhua, Qiu Longwei, Sun Baoqiang, *et al.* 2013. Characteristics of fluid inclusion and charging events of natural gas in Permian Jiamuhe Formation of Zhongguai area, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 24(5): 931~939(in Chinese).
- Liang Hao, Luo Quansheng, Kong Hongwei, *et al.* 2011. Formation and distribution of zeolite in volcanic rock and its effect on reservoirs in Santanghu Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(3): 537~543(in Chinese).
- Lin Huixi, Zeng Zhiping, Gong Yajun, *et al.* 2013. Process analysis of hydrocarbon charging and adjustment in central area of Junggar Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 20(3): 316~320(in Chinese).
- Liu Yiqun. 1996. The boundary between diagenesis and metamorphism: A discussion with reference to zeolite facies[J]. *Geological Review*, 42(3): 215~222(in Chinese).
- Men Xiangyong, Zhao Wenzhi, Hu Suyun, *et al.* 2006. Characteristics of deep-buried fragmental reservoirs on central Junggar Basin and the effect of hydrocarbon emplacement on reservoirs diagenetic mineral evolution[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 33(2): 208~211(in Chinese).
- Meng Xiangchao, Chen Nenggui, Wang Haiming, *et al.* 2015. Sedimentary characteristics of glutenite and its favourable accumulation facies: A case study from T1b, Mabei Slope, Junggar Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(6): 1235~1246(in Chinese).
- Meng Xiangchao, Xu Yang, Han Shouhua, *et al.* 2013. Distribution rule of laumontite and favourable reservoir forecast of P_{3w} in Zhongguai Region[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 37(1): 16~23(in Chinese).

- Qi Wen, Pan Jianguo, Wang Guodong, *et al.* 2015. Fluid inclusion and hydrocarbon charge history for the reservoir of Baikouquan Formation in the Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(S1): 64~71(in Chinese).
- Surdam R. 1984. Secondary porosity formation in sandstone reservoir [J]. *AAPG Bulletin*, 68: 485~493.
- Surdam R C and Sheppard R A. 1978. Zeolites in saline, alkaline-lake deposits[A]. *Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Use*[C]. New York: Pergamon Press, 145~174.
- Utada M. 1987. Zeolitization in the continental margin, with special reference to those in the Green tuff region in Japan[J]. *Yerbilimleri*, 14: 35~43.
- Zhang Lifei. 1992. Origin of laumontite and condition for its formation in Trassic Yanchang Series, North Shaanxi[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 8(2): 145~152(in Chinese).
- Zhang Puhu. 1985. Diagenetic zeolite formation and porosity evolution in coarse clastic reservoir in Permian, Kramayi[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 6(2): 30~47(in Chinese).
- Zhang Shuncun, Yao Weijiang, Xing Chengzhi, *et al.* 2011. Lithofacies of volcanic rocks from Zhongguai swell to district-5 and district-8 in northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 32(1): 7~10(in Chinese).
- Zhang Yijie, Cao Jian and Hu Wenxuan. 2010. Timing of petroleum accumulation and the division of reservoir-forming assemblages, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 37(3): 257~262(in Chinese).
- Zhu Guohua. 1985. Formation of lomonitic sand bodies with secondary porosity and their relationship with hydrocarbons[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 6(1): 1~8 113(in Chinese).
- Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Wang Xulong, *et al.* 2011. Zeolite diagenesis and its control on petroleum reservoir quality of Permian in northwestern margin of Junggar Basin, China[J]. *Sci. China Earth Sci.*, 41(11): 1 602~1 612(in Chinese).
- Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Wu Dong, *et al.* 2014. Alteration of volcanics and its controlling factors in the Lower Permian reservoirs at northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 35(1): 77~85(in Chinese).
- 白清华, 柳益群, 樊婷婷. 2009. 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*, 42(2): 100~107.
- 曹 剑, 胡文瑄, 张义杰, 等. 2006. 准噶尔盆地油气沿不整合运移的主控因素分析[J]. *沉积学报*, 24(3): 399~406.
- 陈新发, 靳 军, 杨海波. 2010. 准噶尔盆地中拐凸起上二叠统佳木河组气藏地质特征[J]. *天然气工业*, 30(9): 19~21, 119.
- 付国民, 董满仓, 张志升, 等. 2010. 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)*, 1: 107~114.
- 韩守华, 余和中和, 斯春松, 等. 2007. 准噶尔盆地储层中方沸石的溶蚀作用[J]. *石油学报*, 28(3): 51~54, 62.
- 黄思静, 刘 洁, 沈立成, 等. 2001. 碎屑岩成岩过程中浊沸石形成条件的热力学解释[J]. *地质论评*, 47(3): 301~308.
- 孔玉华, 鲍海娟, 李振华, 等. 2014. 准噶尔盆地中拐凸起佳木河组层序地层模式[J]. *特种油气藏*, 21(5): 60~64, 154.
- 李克永, 李文厚, 陈全红, 等. 2010. 鄂尔多斯盆地镰刀湾地区延长组浊沸石分布与油藏关系[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 46(6): 23~28.
- 李振华, 邱隆伟, 师 政, 等. 2014. 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)*, 38(1): 1~7.
- 李振华, 邱隆伟, 孙宝强, 等. 2013. 准噶尔盆地中拐地区佳木河组流体包裹体特征及成藏期次划分[J]. *天然气地球科学*, 24(5): 931~939.
- 梁 浩, 罗权生, 孔宏伟, 等. 2011. 三塘湖盆地火山岩中沸石的成因及其储层意义[J]. *沉积学报*, 29(3): 537~543.
- 林会喜, 曾治平, 宫亚军, 等. 2013. 准噶尔盆地中部油气充注与调整过程分析[J]. *断块油气田*, 20(3): 316~320.
- 柳益群. 1996. 关于成岩作用与变质作用界线的讨论——从沸石相谈起[J]. *地质论评*, 42(3): 215~222 2.
- 门相勇, 赵文智, 胡素云, 等. 2006. 准噶尔盆地腹部二叠系、三叠系储集层特征及烃类侵位对深部储集层物性的影响[J]. *石油勘探与开发*, 33(2): 208~211 2.
- 孟祥超, 陈能贵, 王海明, 等. 2015. 砂砾岩沉积特征分析及有利储集相带确定——以玛北斜坡区百口泉组为例[J]. *沉积学报*, 33(6): 1 235~1 246.
- 孟祥超, 徐 洋, 韩守华, 等. 2013. 中拐地区上乌尔禾组浊沸石展布规律及优质储层预测[J]. *东北石油大学学报*, 37(1): 16~23.
- 齐 雯, 潘建国, 王国栋, 等. 2015. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区百口泉组储层流体包裹体特征及油气充注史[J]. *天然气地球科学*, 26(S1): 64~71.
- 张立飞. 1992. 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*, 8(2): 145~152.
- 张璞珊. 1985. 克拉玛依二叠系粗碎屑储集体中自生沸石的析出与孔隙演化[J]. *新疆石油地质*, 6(2): 30~47.
- 张顺存, 姚卫江, 邢成智, 等. 2011. 准噶尔盆地西北缘中拐凸起五、八区火山岩岩相特征[J]. *新疆石油地质*, 32(1): 7~10.
- 张义杰, 曹 剑, 胡文瑄. 2010. 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*, 37(3): 257~262.
- 朱国华. 1985. 陕北浊沸石次生孔隙砂体的形成与油气关系[J]. *石油学报*, 6(1): 1~8, 113.
- 朱世发, 朱筱敏, 王绪龙, 等. 2011. 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*, 41(11): 1 602~1 612.
- 朱世发, 朱筱敏, 吴 冬, 等. 2014. 准噶尔盆地西北缘下二叠统油气储层中火山物质蚀变及控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 35(1): 77~85.

附中文参考文献