

引用格式:王继远,王斌,邱岐,等.沸石成因及其控储机制研究进展[J].油气地质与采收率,2025,32(1):29-39.  
WANG Jiyuan, WANG Bin, QIU Qi, et al. Progress in zeolite origin and its control for reservoir development[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2025, 32(1): 29-39.

## 沸石成因及其控储机制研究进展

王继远<sup>1,2</sup>, 王斌<sup>1,2</sup>, 邱岐<sup>1,2</sup>, 李振明<sup>1,2</sup>, 孙中良<sup>1,2</sup>, 马龙杰<sup>3</sup>

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126; 3. 中国石化西北油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**沸石是富火山岩屑和富长石碎屑岩中重要的成岩矿物之一,对碎屑岩储层发育具有重要意义。对于沸石类矿物在中国各主要盆地的分布特征、成因及控储机制已有诸多研究,但尚未形成统一认识。在前人研究成果的基础上,结合准噶尔盆地腹部最新钻井资料,系统分析沸石类矿物在中国各主要盆地的分布,并针对其成因和控储机制开展研究。沸石类矿物的分布主要受火山岩屑和长石等组分、较强水动力条件、成岩流体成分、温度和压力等条件的综合控制,多见于各类三角洲的水道体系;沸石成因复杂,其中火山物质蚀变、斜长石钠长石化和热液作用是最主要成因,当前各盆地中以前两者最为常见。沸石类矿物对碎屑岩储层的发育多为促进作用,早期沸石以其高硬度有效提高储层抗压实能力,成岩期沸石类矿物脱去晶间水释放孔隙空间;沸石类矿物易受温度影响发生转化,转化前后矿物之间的密度差导致孔隙空间的增大;此外,酸性流体的溶蚀增孔也是沸石最重要的控储机制之一。

**关键词:**沸石;火山岩屑蚀变;钠长石化;成因;控储机制;碎屑岩储层

文章编号:1009-9603(2025)01-0029-11

DOI:10.13673/j.pgre.202311007

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## Progress in zeolite origin and its control for reservoir development

WANG Jiyuan<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>1,2</sup>, QIU Qi<sup>1,2</sup>, LI Zhenming<sup>1,2</sup>, SUN Zhongliang<sup>1,2</sup>, MA Longjie<sup>3</sup>

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Wuxi City, Jiangsu Province, 214126, China; 2. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi City, Jiangsu Province, 214126, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

**Abstract:** Zeolite is one of the essential diagenetic minerals in volcanic and feldspar-rich clastic rocks, which is of great significance in the development of clastic rock reservoirs. There have been many studies on the distribution characteristics, genesis, and reservoir control mechanisms of zeolite minerals in major basins of China, but a unified understanding has not yet been formed. According to the previous research, combined with the latest drilling data in the hinterland of Junggar Basin, this paper systematically summarized and analyzed the distribution of zeolite minerals in major basins in China and studied their genesis and reservoir control mechanisms. The distribution of zeolite minerals is mainly controlled by components such as volcanic debris and feldspar, strong hydrodynamic conditions, the composition of diagenetic fluids, temperatures and pressures, and other comprehensive conditions. They are commonly found in various waterway systems in deltas. The genesis of zeolites is complex, with volcanic material alteration, plagioclase albitization, and hydrothermalism being the leading causes. Currently, the former two are the most common in various basins. Zeolite minerals have a positive effect on the development of clastic rock reservoirs. Zeolites effectively improve the reservoir's anti-compaction ability with high hardness in the early stages, and zeolite minerals remove intergranular water and re-

收稿日期:2023-11-02。

作者简介:王继远(1990—),男,黑龙江绥化人,工程师,博士,从事油气储层表征与评价工作。E-mail:wangjy1992.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“准噶尔盆地石炭-二叠系潜力评价与目标优选”(P21077-1),中国石化基础前瞻项目“准噶尔盆地腹部下组合油气成藏条件与勘探方向”(2023JCQZ0037)。

lease pore space during the diagenetic period. In addition, zeolite minerals are prone to transformations under the influence of temperature, and the density difference between minerals before and after transformation increases pore space. The pore enlargement resulting from the acidic fluid dissolution is also one of the most important storage control mechanisms of zeolites.

**Key words:** zeolite; volcanic debris alteration; albitization; origin; reservoir controlling mechanism; clastic reservoir

沸石是一种含水的碱或碱土金属硅铝酸盐矿物,当前全球范围内已发现多种沸石类矿物,其中常见的有方沸石、片沸石、浊沸石、斜发沸石、菱沸石、毛沸石、丝光沸石、钙十字沸石等,它们在碎屑岩中分布广泛,中国松辽盆地白垩系泉头组、四川盆地侏罗系沙溪庙组、鄂尔多斯盆地三叠系延长组及准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系上乌尔禾组均不同程度的发育沸石类矿物<sup>[1-5]</sup>。准噶尔盆地腹部地区最新钻探结果揭示,二叠系上乌尔禾组和三叠系百口泉组碎屑岩储层中浊沸石发育。关于沸石类矿物对碎屑岩储层发育的影响目前主要有2种观点:一是认为其作为胶结物大量充填孔隙空间,降低储层物性,对储层发育具有负作用;二是认为其作为早期胶结物起到抗压实作用,后期经过酸性流体溶蚀可产生大量次生孔隙,对储层发育具有积极意义<sup>[6-11]</sup>。沸石类矿物在不同层位、不同沉积相带及岩性中均有分布,且成因复杂;前人研究表明,各盆地碎屑岩储层中浊沸石分布最广,与储层发育关系最为密切,其形成主要受火山物质蚀变、斜长石钠长石化、热液成因等因素控制<sup>[12-18]</sup>,也有学者认为沸石类矿物,特别是浊沸石是低温变质成因<sup>[19]</sup>。以准噶尔盆地为例,扇三角洲平原及前缘的水下分流河

道砂砾岩和细砂岩中火山岩屑的水化蚀变是沸石形成的主要机制,后期有机酸进入储层,以浊沸石为主的沸石类矿物大量溶蚀。总之,沸石类矿物成因复杂,既有沉积成因,也可能是成岩作用或变质作用的产物,但无论何种成因,其存在与储层发育状况密切相关,特别是对于准噶尔盆地腹部下组合而言,浊沸石是三叠系百口泉组和二叠系上乌尔禾组碎屑岩储层的主要胶结物类型之一,其存在对深层-超深层碎屑岩储层的发育具有重要作用,值得深入研究。笔者在大量分析前人研究资料的基础上,结合准噶尔盆地腹部最新钻探成果,探讨沸石类矿物的成因,分析其对储层孔隙发育的影响,为准噶尔盆地深层-超深层富沸石碎屑岩优质储层成因机理的研究提供支撑。

## 1 中国主要盆地沸石分布特征

沸石类矿物在中国各盆地碎屑岩中广泛分布,不同盆地沸石种类及含量差别较大,但除了准噶尔盆地西北缘,各盆地沸石类矿物组合均相对较简单,大多以浊沸石、方沸石和钠沸石为主(表1)。从分布层位上看,石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白

表1 中国各盆地碎屑岩沸石类矿物分布特征

Table1 Distribution characteristics of zeolites in clastic rocks of various basins in China

盆地	沸石类型	层位	主要沉积环境	成因	数据来源
松辽盆地	浊沸石	白垩系泉头组、登娄库组	辫状河三角洲	斜长石钠长石化	文献[1]
四川盆地	浊沸石	侏罗系沙溪庙组	三角洲前缘水下分流河道、河口坝	火山物质蚀变	文献[2]、[19]
鄂尔多斯盆地	浊沸石	三叠系延长组	三角洲平原河道、前缘水下分流河道、河口坝、决口扇	斜长石钠长石化、火山物质蚀变	文献[15]
准噶尔盆地腹部	浊沸石	二叠系上乌尔禾组、三叠系百口泉组、石炭系	三角洲前缘水下分流河道	火山物质蚀变	
准噶尔盆地西北缘	浊沸石、片沸石、方沸石、斜发沸石、钙沸石、钠沸石、辉沸石	二叠系佳木河组、下乌尔禾组	扇三角洲平原、前缘水下分流河道	火山物质蚀变、孔隙水结晶	文献[9]、[20]
准噶尔盆地吉木萨尔凹陷	方沸石	二叠系芦草沟组	湖相	火山物质蚀变、斜长石钠长石化、热液成因	文献[21]
柴达木盆地	方沸石、钠沸石	新近系上干柴沟组	辫状河三角洲	热液成因	文献[22]
二连盆地	方沸石、钠沸石	下白垩统腾格尔组	湖相	热液成因	文献[23]

歪系、古近系和新近系均有发育。

东部地区主要在松辽盆地和二连盆地的白垩系发育沸石,前者以浊沸石为主,后者则主要为方沸石和钠沸石。松辽盆地浊沸石以白垩系泉头组和登娄库组最为发育,岩性为粉砂质泥岩与厚层砂岩互层,为辫状河三角洲沉积。由于松辽盆地地温梯度较高,成岩作用强,浊沸石多以胶结物形式充填在中细粒长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩的粒间孔隙中,并强烈交代长石类矿物。前人研究表明,松辽盆地浊沸石中常见长石残留,并可见长石向浊沸石转化的过渡状态,结合包裹体测温数据(110~143℃),认为浊沸石是斜长石钠长石化的产物<sup>[1]</sup>。二连盆地沸石类矿物主要为方沸石和钠沸石,产于下白垩统腾格尔组的湖相沉积。微量元素测试分析结果显示,该区含方沸石和钠沸石层段富集亲硫元素(Pb、Sb、Cd、Tl)、钨钼组元素(Mo、W、Bi),而亏损大离子亲石元素(Rb、Cs),指示沉积时非正常的湖相水体环境和中高温深源碱性热液流体的加入<sup>[23]</sup>,即该区方沸石和钠沸石为中高温热液成因。

将四川盆地与鄂尔多斯盆地归为中部地区进行讨论,二者沸石矿物类型为浊沸石。浊沸石在四川盆地发育于侏罗系沙溪庙组,以三角洲前缘水下分流河道和河口坝微相最为发育。该区浊沸石以胶结物形式充填于颗粒间及溶蚀孔内,或交代长石和岩屑,其常与绿泥石环边共生,认为是低压、开放的碱性环境下火山物质蚀变的产物<sup>[14,24]</sup>。鄂尔多斯盆地浊沸石发育于三叠系延长组,沉积环境主要为三角洲平原河道、前缘水下分流河道、河口坝和决口扇<sup>[25]</sup>,其成因主要为斜长石钠长石化,同时以凝灰质为主的火山物质蚀变也有一定贡献<sup>[15]</sup>。

西部地区沸石主要发育于准噶尔盆地和柴达木盆地,其中准噶尔盆地沸石类矿物种类多样,浊沸石、片沸石、方沸石、斜发沸石、钙沸石、钠沸石和辉沸石均有发育,又以西北缘玛湖凹陷及其周缘地区最为发育,腹部地区主要发育浊沸石,吉木萨尔凹陷主要发育方沸石<sup>[9,21]</sup>。从发育层位上看,沸石在准噶尔盆地主要发育于石炭系、二叠系佳木河组、下乌尔禾组、上乌尔禾组及三叠系百口泉组,腹部地区浊沸石为火山物质蚀变成因,西北缘除火山物质蚀变,孔隙水结晶也有一定贡献,而吉木萨尔凹陷除火山物质蚀变、斜长石钠长石化,还包含热液成因;柴达木盆地沸石发育于古近系一新近系的辫状河三角洲沉积,以方沸石和钠沸石为主,为热液成因<sup>[22]</sup>。

## 2 沸石成因综述

前文系统总结了我国各主要盆地沸石类矿物的分布特征,并将其成因进行了初步阐述。现有研究认为沸石类矿物的成因以火山物质蚀变、斜长石钠长石化、热液成因3种类型为主,针对不同类型成因展开详细探讨。

### 2.1 火山物质蚀变

火山物质被认为是沸石形成的重要物质基础<sup>[9]</sup>,多数学者认为四川盆地、鄂尔多斯盆地和准噶尔盆地碎屑岩中的沸石为火山物质蚀变成因<sup>[15,21-27]</sup>。沸石分布层位的岩石类型以岩屑砂岩居多,且岩屑成分中凝灰岩、中-基性火山岩屑占比较高,同时沸石的形成需要碱性环境以及充足的Na、Ca、Si、Al等离子,火山物质中易溶组分含量高,蚀变过程释放大量K、Na、Ca、Mg等离子,使孔隙水呈碱性,有利于沸石的沉淀。在鄂尔多斯盆地佳县佳芦河剖面长7组底部的凝灰岩中可直接观察到浊沸石化现象,薄片可见浊沸石大量连晶基底式胶结,压实程度低,指示火山物质成岩早期的水解为浊沸石的大量沉淀提供了物质基础<sup>[15]</sup>。准噶尔盆地玛湖地区沸石类胶结物与凝灰岩砾石的含量具有较好的相关性,沸石往往与凝灰岩和中基性火山岩屑伴生(图1)<sup>[10,17,26]</sup>。四川盆地侏罗系沙溪庙组浊沸石含量与火山岩屑含量同样具有较好的正相关关系<sup>[14]</sup>。此外,准噶尔盆地腹部地区最新钻探成果显示,在石炭系的火山岩中也发现了大量自生浊沸石,从其产出位置看,应为凝灰岩脱玻化的产物。

大量实例证明沸石的出现与火山岩屑,特别是凝灰岩和中-基性火山岩屑具有密切关系(图1),但是不同地区甚至同一物源区不同层位的沸石类矿

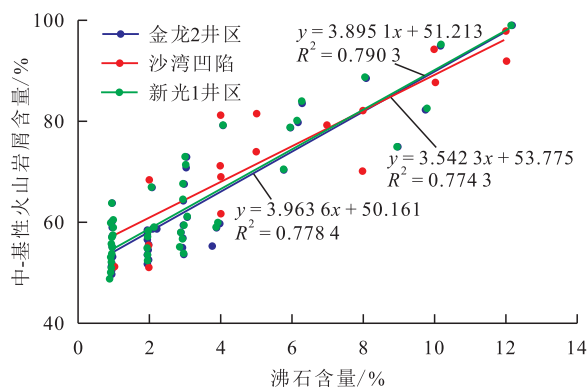


图1 沸石含量与火山岩屑含量的相关关系<sup>[10,26]</sup>

Fig.1 Correlation between zeolite content and volcanic debris content<sup>[10,26]</sup>

物种类差别巨大,这可能与地层温度和地层水的化学性质有关。IJIMA 基于埋深由浅至深提出了4条沸石分布带(图2)<sup>[27]</sup>:①斜发沸石、丝光沸石带;②方沸石、片沸石带;③方沸石、浊沸石带;④钠长石、浊沸石带。

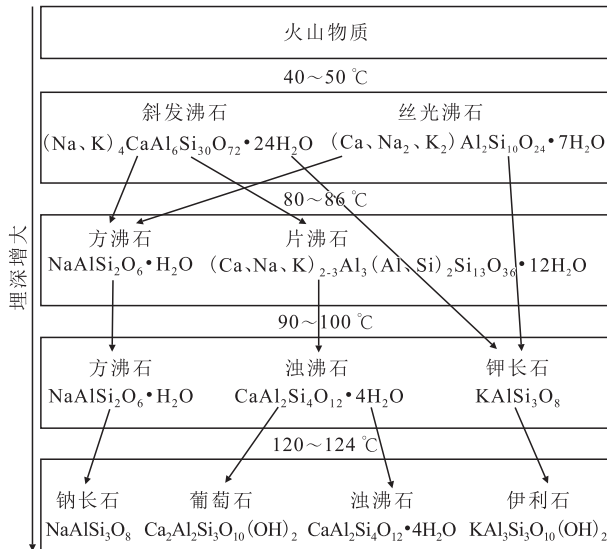


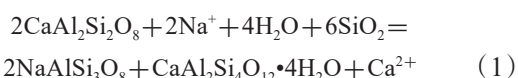
图2 火山物质蚀变及沸石转化过程(据文献[27]修改)

Fig.2 Volcanic material alteration and zeolite transformation process (Modified according to Reference [27])

从上述划分方案中可以看出,随着温度的升高,沸石逐渐向热稳定性更高的浊沸石转化,这与准噶尔盆地的勘探实际基本一致,西北缘的玛湖凹陷及其周缘埋深相对较浅,以斜发沸石、片沸石、方沸石占比最高,向腹部凹陷区随着埋深的增大,温度升高,至6 000 m以下层位,沸石类矿物以浊沸石为主,几乎未见其他沸石,同时可见自生钠长石与浊沸石伴生。

## 2.2 斜长石钠长石化

斜长石钠长石化是沸石形成的另一种重要机制,松辽盆地白垩系和鄂尔多斯盆地三叠系延长组碎屑岩中的浊沸石被认为主要是斜长石钠长石化产物,也有学者认为延长组的浊沸石是火山物质蚀变的产物。杨晓萍等认为延长组长6段中浊沸石与该段高斜长石含量有关<sup>[2]</sup>,二者同属架状硅铝酸盐,斜长石向钠长石的转化过程中提供大量Ca<sup>2+</sup>,为浊沸石的形成提供了物质条件,具体反应式为:



热力学研究认为,斜长石钠长石化的温度上限为90.33 °C<sup>[28]</sup>,前人在富县延长组长3段碎屑岩储层的浊沸石胶结物中发现了大量盐水包裹体<sup>[29]</sup>,其均一温度介于85~100 °C,符合斜长石向钠长石转

化的热力学条件。此外,研究区并未发现其他类沸石的残余痕迹,凝灰岩与浊沸石的平面分布并不具有相关性,局部甚至呈负相关(图3),表明火山物质蚀变并非该区浊沸石形成的主因。王龙等针对延长组富浊沸石砂岩段开展了大量岩石薄片镜下分析,发现浊沸石交代斜长石现象普遍,扫描电镜下多处发育钠长石、钙长石与浊沸石共生现象<sup>[15]</sup>。定量统计结果也表明浊沸石含量与长石的分布具有较好的一致性,也表明该区斜长石钠长石化是浊沸石形成的主要因素。

值得注意的是,斜长石的水解并不一定都伴随浊沸石的沉淀,这一反应过程受酸碱度、Ca<sup>2+</sup>和Na<sup>+</sup>等离子浓度、CO<sub>2</sub>分压、温度、压力等多种因素综合控制。黄可可等通过研究认为,不同组分的斜长石溶解形成浊沸石的能力存在差异,相同外部条件下,Ca<sup>2+</sup>含量越高,斜长石的稳定性越差,越易溶蚀<sup>[29]</sup>。封闭体系下,斜长石钠长石化形成浊沸石受温度影响最大,随着温度的升高,斜长石向浊沸石的转化程度增强;而在开放体系下,受外来Na<sup>+</sup>影响,上述反应过程在较低温度下即可进行,且随着温度的升高转化程度逐渐减弱,离子浓度和温度相同的条件下,这一反应过程又随着压力的增大而减弱<sup>[29-30]</sup>。此外,在成岩过程中,浊沸石并非唯一的Ca<sup>2+</sup>消耗体,方解石与浊沸石之间会存在Ca<sup>2+</sup>竞争关系,二者沉淀的优先权取决于地层水、温度、压力对各组分之间的平衡。低温条件下,方解石饱和Ca<sup>2+</sup>的浓度比浊沸石低,说明同等条件下方解石会优先沉淀;而随着温度的升高,方解石沉淀区域变窄,浊沸石的沉淀区域明显拓宽;离子浓度相同的情况下,高CO<sub>2</sub>分压下浊沸石与方解石均较稳定;而在弱碱性条件下,随着CO<sub>2</sub>分压的增大,浊沸石优先沉淀;相对较强的碱性条件下,随着CO<sub>2</sub>分压的增大,方解石优先沉淀。二者均处于平衡状态时,随着温度的升高,浊沸石沉淀所需的CO<sub>2</sub>分压增大(图4)。总之,体系的开放程度、斜长石组分、温度、压力、pH值以及CO<sub>2</sub>分压均在不同程度上控制了浊沸石的沉淀。

## 2.3 热液作用

热液成因的沸石主要见于二连盆地、柴达木盆地和准噶尔盆地吉木萨尔凹陷<sup>[22-24]</sup>。吉木萨尔凹陷和三塘湖盆地二叠系芦苇沟组发育方沸石,李红等研究认为三塘湖盆地方沸石为湖底热液喷流成因<sup>[31]</sup>。杨喆等通过对二连盆地地下白垩统方沸石的Si/Al值、共生矿物组合及微量元素分布特征的研究

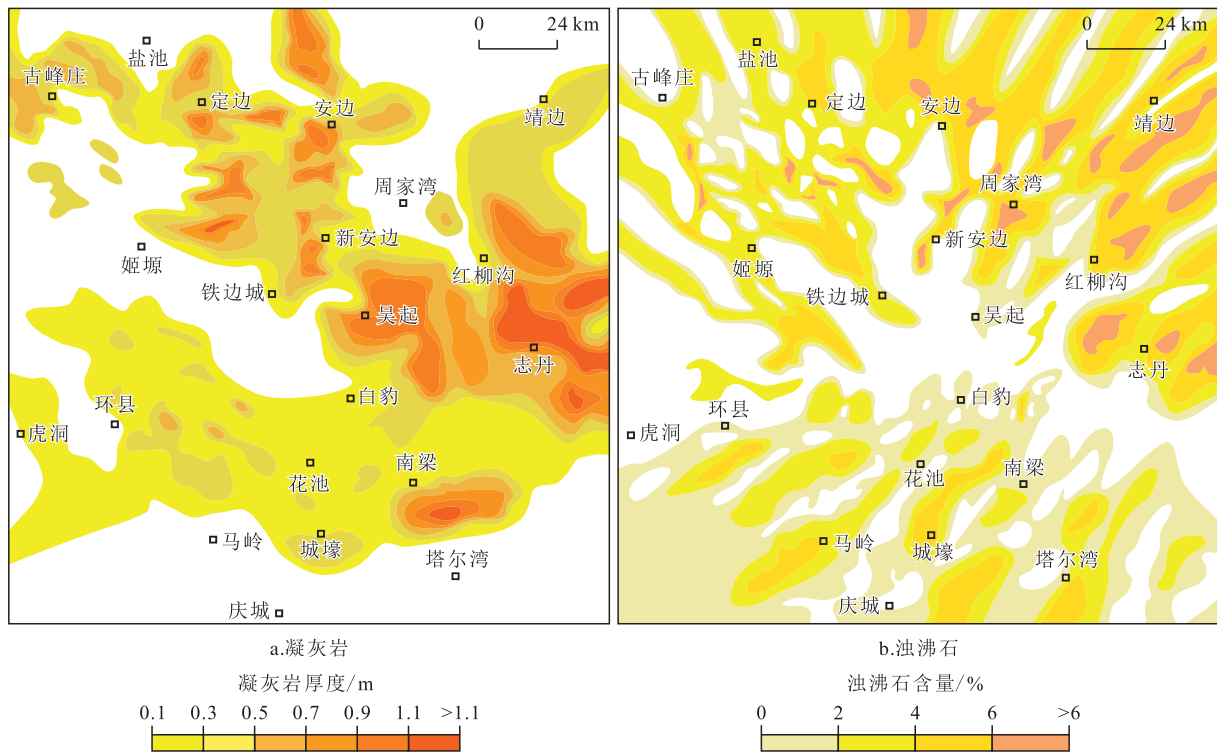


图3 鄂尔多斯盆地中—上三叠统延长组长9油层组凝灰岩及浊沸石平面分布(据文献[15]修改)  
 Fig.3 Plan distribution of tuff and laumontite in Yanchang Formation 9 of middle-upper Triassic in Ordos Basin  
 (Modified according to Reference [15])

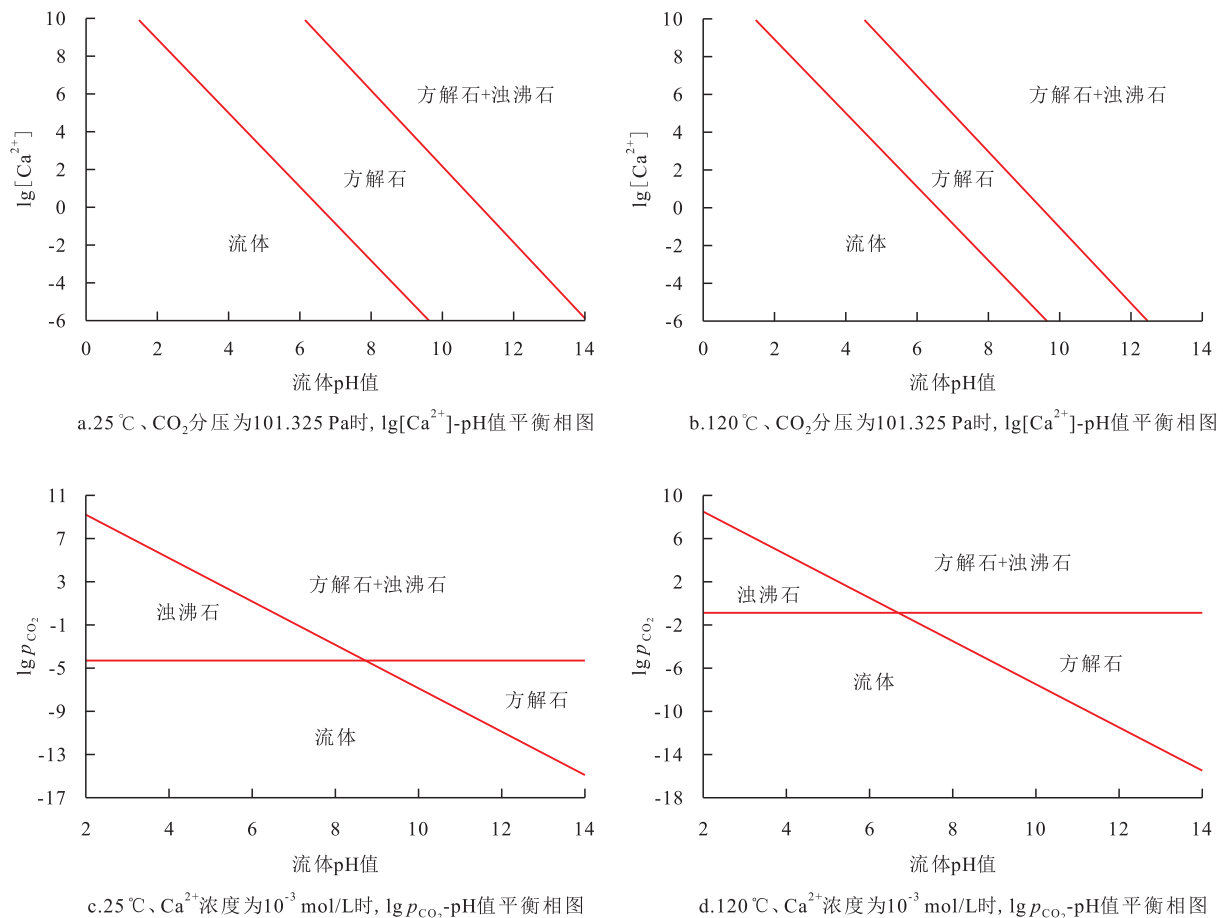
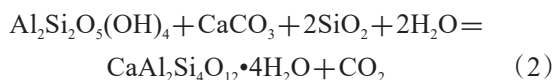


图4 不同温度条件下浊沸石-方解石-流体系统的lg[Ca²⁺]-pH值和lg pCO₂-pH值平衡相图(据文献[29]修改)  
 Fig.4 Equilibrium phase diagrams of lg [Ca²⁺]-pH value and lg pCO₂-pH value of laumontite-calcite-fluid system under different temperature conditions (Modified according to Reference [29])

认为,该区方沸石和钠沸石富集亲硫元素(Pb、Sb、Cd、Ti)、钨钼组元素(Mo、W、Bi),亏损大离子亲石元素(Rb、Cs),指示沉积时非正常的湖相水体环境和中高温深源碱性热液流体的加入<sup>[23,32-34]</sup>。从目前的研究来看,热液成因的沸石主要为方沸石和钠沸石,集中分布于湖相细粒沉积,在砂岩中鲜有发现。热液作用主要发育于海底及陆内湖盆中处于张性构造背景下的高热量区<sup>[35-38]</sup>。热液成因的沸石主要是基于共生矿物组合及具有高温热流指示意义的微量元素分布特征识别,共生矿物组合中重晶石、立方体状黄铁矿、放射状自形菱镁矿及伴生的滑石组合被认为是中高温热液成因<sup>[39-43]</sup>。实验证明当温度介于300~500℃时,热液体系内可形成稳定的四角三八面体方沸石,后期随着温度降至200~300℃,逐渐析出钠沸石,该过程往往伴随黄铁矿和重晶石的沉淀<sup>[40]</sup>。

在元素组成上,前人研究认为Ba和Sb是热水沉积的指示性元素<sup>[41-42]</sup>;Mo、W和Bi等钨钼组元素也属于高温成矿元素,其富集往往指示高温岩浆热液作用<sup>[32]</sup>,特别是Mo元素常与黄铁矿共同形成于高温还原环境,也有学者认为Mo在碱性热液环境中更易富集<sup>[33]</sup>。刘英俊等认为Sb、Mo和Bi元素均来自深源,这些元素的富集可能代表热液流体中有深源物质的加入<sup>[44-45]</sup>。大离子亲石元素Rb和Cs的地球化学活动性强,容易随热液迁移扩散<sup>[46-47]</sup>。因此,Rb、Cs、Mo、Bi等元素在含沸石层位中的富集可能指示深部流体热液作用。现有针对热液成因沸石的研究主要是基于上述共生矿物组合及微量元素、稀土元素等的分布特征开展。

除了火山物质蚀变、斜长石钠长石化和热液作用3种成因,也有学者认为封闭体系下高岭石和方解石经埋藏变质作用也可转化形成浊沸石<sup>[48]</sup>,反应式如下:



满足埋藏变质转化过程的砂岩一般经历早期的高岭石沉淀、硅质胶结(石英次生加大)、晚期方解石胶结的成岩演化过程,而浊沸石是变质作用下的最终产物。该反应需要体系完全封闭,除H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>外,没有任何组分的进出。从各盆地浊沸石的形成环境、共生矿物组合及埋深来看,不太可能满足上述反应过程的条件,特别是各地层最晚也仅处于中成岩阶段B期,远未达到变质作用所需的温度条件(200~250℃),同时由于油气的充注及其他成

岩流体的进出也不能满足完全封闭的转化环境,因此以现今准噶尔、鄂尔多斯等盆地的勘探实践来看<sup>[15,25,49]</sup>,埋藏变质成因不是碎屑岩储层中浊沸石形成的主要因素。

### 3 沸石控储机制

碎屑岩储层中沸石类矿物大多以胶结物形式充填于碎屑颗粒间,也有部分以交代长石等形式出现。关于沸石对碎屑岩储层的影响,前人开展了大量研究,大多认为沸石类矿物的存在对储层物性的改善具有积极意义<sup>[8-9,14]</sup>,也有学者认为沸石作为胶结物大量占据孔隙空间,对储层发育具有负作用<sup>[13,18]</sup>。笔者基于前人大量研究资料,结合准噶尔盆地腹部地区最新研究成果,认为沸石的控储机制主要可以概括为沸石溶蚀增孔和不稳定沸石转化增孔2种类型。

#### 3.1 沸石溶蚀增孔

与碎屑岩中其他自生矿物和骨架矿物相比,沸石比重相对较小、硬度大,特别是浊沸石硬度可以达到6,是方解石的2倍(表2),因此早期沸石类矿物的沉淀可以有效抵抗压实减孔效应。同时,作为一种含水的架状硅铝酸盐矿物,沸石在酸性条件下易发生溶蚀产生大量次生孔隙,可有效改善储层物性。以浊沸石为例,早成岩期至中成岩早期,随着地层温度的升高,干酪根发生裂解脱羧,成岩环境由早期的碱性变为酸性,脂类分解释放大量CO<sub>2</sub>,使得成岩体系中CO<sub>2</sub>分压增大,从前文分析可知浊沸石溶解平衡所需的CO<sub>2</sub>分压远高于方解石,因此在初始阶段高CO<sub>2</sub>分压下,浊沸石优先溶蚀并伴随方解石的沉淀<sup>[15,35,39]</sup>,反应式为:

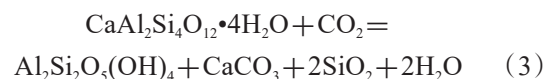
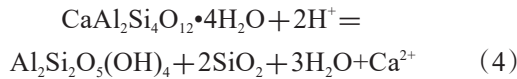


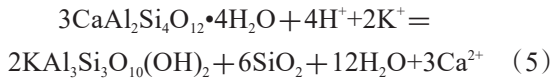
表2 碎屑岩典型自生矿物物理性质  
Table2 Physical properties of typical authigenic minerals in clastic rocks

碎屑岩类型	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	硬度
浊沸石	2.32	6.0
片沸石	2.2	3.5~4.0
方沸石	2.0~2.2	5.5
斜发沸石	2.16	4.0~5.0
方解石	2.71	3.0
斜长石	2.6	6.0~6.5
钾长石	2.54~2.57	6.0
石英	2.65	7.0

随着温度的进一步升高达到生烃门限后,干酪根热解产生的有机酸进入储层,孔隙水酸性进一步增强,浊沸石大量溶蚀,其反应式为:



当地层中K<sup>+</sup>富集时,浊沸石溶蚀的同时会产生伊利石,反应式为:



从上述各反应过程可知,浊沸石的溶蚀是受温度、pH值、压力、成岩体系中离子类型及浓度综合控制的过程。在实际研究中,可以根据与浊沸石共生的矿物组合,特别是伊利石和方解石辅助判断浊沸石的溶蚀反应过程。

关于沸石类矿物的溶蚀增孔效应,前人开展了大量研究,但是不同地区沸石差异溶蚀显著。鄂尔多斯盆地延长组以浊沸石溶蚀为主,浊沸石的次生溶孔是延长组致密砂岩储层物性改善的重要因素;准噶尔盆地西北缘克-夏地区二叠系砂砾岩中以方沸石溶蚀为主,片沸石和浊沸石溶蚀较弱或基本不溶<sup>[9]</sup>,这可能与该区CaCl<sub>2</sub>型地层水有关,高Ca<sup>2+</sup>离子浓度抑制了二者的溶蚀;而玛湖凹陷及腹部深洼区则以浊沸石溶蚀为主,从盆地边缘至腹部凹陷区具有方沸石、片沸石、浊沸石分带沉积的特点,埋藏越浅,越靠近断裂带方沸石相对发育,随着埋深的

增大以及远离断裂带逐渐由方沸石向片沸石和浊沸石过渡,浊沸石可能为最终的稳定产物。从不同沸石类碎屑岩储层物性分布特征来看(图5),浅部层位方沸石对孔渗的贡献最大,而中深层则以浊沸石增孔效应最为显著,对比而言,浊沸石的溶蚀增孔效应强于方沸石和片沸石。虽然也有学者认为沸石类矿物的大量胶结降低了储层物性<sup>[13,18]</sup>,但是从沸石的成岩演化过程分析,即使该过程没有发生沸石类矿物的沉淀,反应也会向其他矿物端元进行,如方解石、自生石英、伊利石、绿泥石等黏土矿物;与其他矿物相比,浊沸石的抗压性及后期易溶的特点使其具有更大的有效储层发育潜力。

### 3.2 不稳定沸石转化增孔

前人研究已经证实,在斜发沸石-片沸石-方沸石-浊沸石序列中,稳定性自左向右逐渐增大。在埋藏成岩过程中,早期不稳定沸石如斜发沸石和片沸石向稳定浊沸石的多级转化过程中,释放结晶水产生大量晶间孔,而各类沸石密度的差异,也会在转化过程中具有一定的增孔效应;同时,沸石类矿物由于骨架密度较低,在转化为高密度的其他矿物时会释放一定孔隙空间,改善储层物性。

不稳定的斜发沸石和片沸石钾含量相对较高,在成岩过程中随着温度的升高,转化为稳定组分过程中释放大量K<sup>+</sup>,导致成岩体系中K<sup>+</sup>过饱和,有利于钾长石的沉淀,该过程由于结晶水的释放以及反

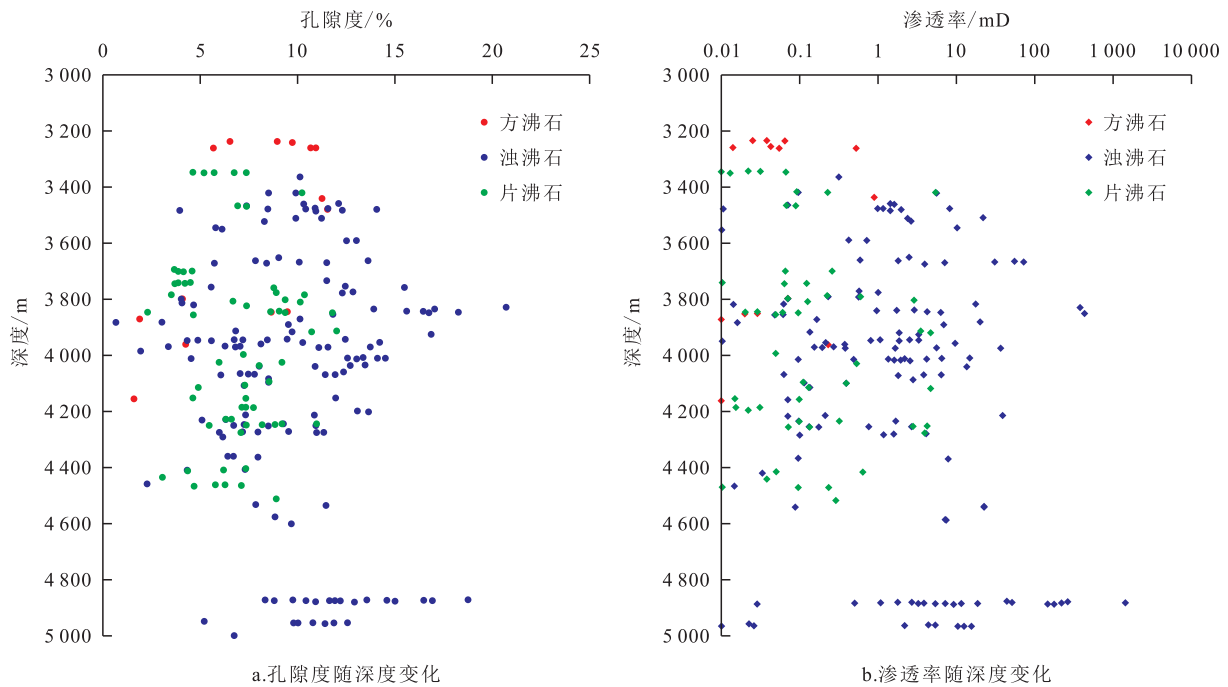


图5 准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷二叠系不同沸石类碎屑岩储层物性分布特征(部分数据来自文献[18])  
Fig.5 Physical property distribution characteristics of different zeolite calstic rock reservoirs of the Permian in Mahu depression, northwestern margin of Junggar Basin (Part data coming from Reference [18])

应前后矿物的密度差,可释放胶结空间,产生可观的次生孔隙。前人研究认为,2%~6%的自生钾长石的体积相当于5%~17%的富钾片沸石,也就是说富钾片沸石如果全部转化为自生钾长石可释放3%~11%的体积,如果产物为钾长石和石英则释放2%~5%的体积;结合各矿物密度,上述转化过程最多可释放70%的胶结空间,孔隙度最多可增加30%<sup>[50]</sup>。

从图2可以看出,成岩早期的斜发沸石和片沸石均为高含结晶水矿物,随着埋深的增大,温度升高,逐渐向稳定的方沸石和浊沸石转化,该过程产生大量晶间孔,即使不如上述理想情况下释放的孔隙空间大,但仍具有较好的增孔效应,特别是对于深层致密碎屑岩储层,在原生孔隙不发育的情况下,该转化过程可大幅度改善储层物性。ZHOU等针对准噶尔盆地玛湖凹陷佳木河组砂砾岩储层中沸石的蚀变转化对储层的影响开展了定量研究,认为沸石的单位变化可带来22.16%的晶间孔增量,如果储层中浊沸石含量为30%,其形成过程中可增加6.6%的孔隙度<sup>[26]</sup>。值得注意的是,ZHOU等的研究并未有效区分溶蚀孔和晶间孔,定量统计时往往将二者统一认为是晶间孔,但也足以说明沸石转化过程中对储层的贡献,以浊沸石为最终产物的转化过程常伴随着钠长石、方解石和石英等的沉淀,因此也可以从共生矿物组合角度辅助判断沸石转化过程的发生。

## 4 结论

(1)沸石类矿物在碎屑岩储层,特别是富火山岩屑和富长石碎屑岩中广泛分布。从目前勘探实践来看,沸石已不是前人最初认识中的变质产物,在成岩各阶段均可产生。其中,火山物质蚀变和斜长石钠长石化可能是沸石形成的主要原因,局部地区可能存在热液成因。

(2)沸石多以胶结物/交代形式存在于碎屑岩中,是成岩期的重要产物,其存在对碎屑岩储层发育影响复杂,但目前看多为积极作用。早期沸石胶结占据孔隙空间,相比其他自生矿物,其硬度大,可有效增强储层的抗压能力;成岩过程中,沸石类矿物的转化释放结晶水产生晶间孔,同时沸石类矿物转化前后产物的密度差也会释放一定孔隙空间;此外,有机酸的溶蚀是沸石类矿物增孔的另一重要途径。

(3)沸石类矿物的存在对碎屑岩储层发育具有

重要意义,但其成因目前尚未形成统一认识,即使当前研究已经揭示其与火山岩屑和长石的存在具有一定联系,但并非所有富火山岩屑和富长石碎屑岩中都发育沸石,这可能与成岩流体成分、温压环境和成岩体系的封闭性有关;在控储机制方面,溶蚀和转化增孔是沸石类矿物最主要的控储机制,但不同地区和层位的沸石类矿物种类和分布的非均质性极强,需进一步明确不同沸石的成因机制;同时其增孔的定量表征精度还有待进一步提高。因此,关于沸石的成因和控储机制还需在接下来的工作中深入研究。

## 参考文献

- [1] 王成,邵红梅,洪淑新,等.松辽盆地北部深层碎屑岩浊沸石成因、演化及与油气关系研究[J].矿物岩石地球化学通报,2004,23(3):213-218.  
WANG Cheng, SHAO Hongmei, HONG Shuxin, et al. Formation and evolution of laumontite and relationship between oil and gas in the clastic rock of the deep strata of the north Songliao basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 23(3): 213-218.
- [2] 杨晓萍,裘怿楠.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组浊沸石的形成机理、分布规律与油气关系[J].沉积学报,2002,20(4):628-632.  
YANG Xiaoping, QIU Yinan. Formation process and distribution of laumontite in Yanchang formation (Upper Triassic) of Ordos basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 628-632.
- [3] ZHU Shifa, ZHU Xiaomin, WANG Xulong, et al. Zeolite diagenesis and its control on petroleum reservoir quality of Permian in northwestern margin of Junggar Basin, China [J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 55(3): 386-396.
- [4] LI Ji, ZHANG Wenjie, XIANG Baoli, et al. Characteristics of dissolved pores and dissolution mechanism of zeolite-rich reservoirs in the Wuerhe Formation in Mahu area, Junggar Basin [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2022, 40(1): 421-441.
- [5] 卿元华,吕正祥,赵福,等.川中东北部中侏罗统沙一段致密砂岩中自生浊沸石形成机理[J].矿物岩石地球化学通报,2020,39(3):536-547.  
QING Yuanhua, LÜ Zhengxiang, ZHAO Fu, et al. Formation mechanism of authigenic laumontites in tight sandstone of member 1 of the middle Jurassic Shaximiao formation in the north-eastern central Sichuan basin [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2020, 39(3): 536-547.
- [6] 连丽霞,杨红霞.准噶尔盆地西北缘中拐地区二叠系沸石类矿物对储层的影响[J].地质论评,2017,63(S1):91-94.  
LIAN Lixia, YANG Hongxia. Impact of zeolite minerals on reservoir of Permian in Zhongguai Salient, the northwestern of Junggar basin [J]. Geological Review, 2017, 63(S1): 91-94.
- [7] 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[J].东北石油大学学报,2013,37(1):16-23.
- MENG Xiangchao, XU Yang, HAN Shouhua, et al. Distribution rule of Laumontite and favorable reservoir forecast of P<sub>3w</sub> in Zhongguai region[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(1): 16-23.
- [8] 吴和源,唐勇,常秋生.准噶尔盆地中拐凸起佳木河组沸石类胶结砂砾岩储集层成因机理[J].新疆石油地质,2017,38(3):281-288.
- WU Heyuan, TANG Yong, CHANG Qiusheng. Genesis of sandy conglomerate reservoirs cemented by zeolites in Jiamuhe formation of Zhongguai swell, Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(3): 281-288.
- [9] 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,2011,41(11):1602-1612.
- ZHU Shifa, ZHU Xiaomin, WANG Xulong, et al. Zeolite diagenesis and its control on petroleum reservoir quality of Permian in northwestern margin of Junggar Basin, China[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2011, 41(11): 1602-1612.
- [10] 郭沫贞,寿建峰,徐洋,等.准噶尔盆地中拐—西北缘地区二叠系沸石胶结物分布与控制因素[J].石油学报,2016,37(6):695-705.
- GUO Mozhen, SHOU Jianfeng, XU Yang, et al. Distribution and controlling factors of Permian zeolite cements in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6): 695-705.
- [11] 杨宝星,林仲虔,古世祥.松辽盆地北部下白垩统下部含浊沸石砂岩的成岩作用[J].石油与天然气地质,1991,(1):1-9, T001, T002.
- YANG Baoxing, LIN Zhongqian, GU Shixiang. Diagenesis of laumontite bearing sandstones in lower part of lower cretaceous, north Songliao basin[J]. Oil and Gas Geology, 1991, (1): 1-9, T001, T002.
- [12] 邵红梅,刘招君,王成,等.松辽盆地北部深层砂岩成岩作用与孔隙演化[J].世界地质,2005,24(1):58-62.
- SHAO Hongmei, LIU Zhaojun, WANG Cheng, et al. Diagenesis and pore evolution of deep sandstone in north of Songliao Basin[J]. Global Geology, 2005, 24(1): 58-62.
- [13] 王小娟,洪海涛,吴长江,等.四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组致密砂岩储层特征及成因[J].吉林大学学报:地球科学版,2022,52(4):1037-1051.
- WANG Xiaojuan, HONG Haitao, WU Changjiang, et al. Characteristics and formation mechanisms of tight sandstone reservoirs in Jurassic Shaximiao formation, central of Sichuan basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2022, 52(4): 1037-1051.
- [14] 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,2005,32(3):37-40,44.
- YANG Xiaoping, ZHANG Baomin, TAO Shizhen. Laumontite and its significance for petroleum exploration in Jurassic Shaximiao reservoir, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3): 37-40, 44.
- [15] 王龙,邓秀芹,楚美娟,等.沉积岩中自生浊沸石的形成、分布及油气意义——以鄂尔多斯盆地中—上三叠统延长组为例[J].地质论评,2022,68(6):2188-2206.
- WANG Long, DENG Xiuqin, CHU Meijuan, et al. Formation and distribution of laumontite in sedimentary sequences and their exploration significance-A case study on the Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Geological Review, 2022, 68(6): 2188-2206.
- [16] 郭晖,纪宝强,杨森,等.准噶尔盆地环玛湖凹陷二叠系砂砾岩储层沸石类胶结物的形成及石油地质意义[J].石油学报,2022,43(3):341-354.
- GUO Hui, JI Baoqiang, YANG Sen, et al. Formation of zeolite cements in Permian sandy conglomerate reservoir in the circum-Mahu sag, Junggar Basin and its petroleum geological significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(3): 341-354.
- [17] 连丽霞,王剑,马聪,等.准噶尔盆地西北缘沸石发育特征及成储机理初探:以玛南地区二叠系乌尔禾组为例[J].高校地质学报,2021,27(1):102-110.
- LIAN Lixia, WANG Jian, MA Cong, et al. Characteristics and formation mechanism of zeolite in the northwestern margin of Junggar basin: A case study of the Permian Urho formation in Manan area [J]. Geological Journal of China Universities, 2021, 27(1): 102-110.
- [18] 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[J].岩性油气藏,2022,34(1):175-186.
- WANG Tao, ZHANG Shengyin, WEI Pu, et al. Genesis of zeolite minerals and its influences on reservoir properties[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(1): 175-186.
- [19] 陈少云,杨勇强,邱隆伟,等.川中地区侏罗系沙溪庙组储层特征及控制因素[J].天然气地球科学,2022,33(10):1597-1610.
- CHEN Shaoyun, YANG Yongqiang, QIU Longwei, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(10): 1597-1610.
- [20] 雷海艳,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 Haiyan, FAN Shun, XIAN Benzong, et al. Genesis and corrosion mechanism of zeolite of Lower Urho Formation of Permian in Mahu Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(5): 102-112.
- [21] 马聪,王剑,潘晓慧,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组页岩油储层方沸石成因与甜点意义[J].石油实验地质,2020,42(4):596-603.
- MA Cong, WANG Jian, PAN Xiaohui, et al. Origin and significance of "sweet spots" of analcites in shale oil reservoirs in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(4): 596-603.
- [22] 甘贵元,雷振锋,赵东升,等.柴达木盆地西南部南区沸石分布特征及成因[J].中国石油勘探,2009,14(2):46-49.
- GAN Guiyuan, LEI Zhenfeng, ZHAO Dongsheng, et al. Zeolite distribution characteristics and contributing factors in south-

- ern region of west Qaidam basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2009, 14(2): 46-49.
- [23] 杨喆, 钟大康, 张硕, 等. 二连盆地白音查干凹陷下白垩统湖相沸石成因: 来自矿物学、微量元素特征的证据 [J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3 733-3 748.  
YANG Zhe, ZHONG Dakang, ZHANG Shuo, et al. Mineralogical and trace-element constrains on the genesis of zeolite in lower Cretaceous lacustrine rocks from Baiyinchagan sag, Eri-lian basin, China [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3 733-3 748.
- [24] 袁珍, 郑艳忠, 袁海莉, 等. 鄂尔多斯盆地东南缘延长组浊沸石胶结物特征及其成岩模式 [J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2020, 50(1): 124-134.  
YUAN Zhen, ZHENG Yanzhong, YUAN Haili, et al. Study on the characteristics and diagenesis model of laumontite cement in Yanchang Formation in the southeastern margin of Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2020, 50(1): 124-134.
- [25] 杜贵超, 杨兆林, 尹洪荣, 等. 鄂尔多斯盆地东南部长<sub>7</sub>段泥页岩储层有机质发育特征及富集模式 [J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(6): 1-11.  
DU Guichao, YANG Zhaolin, YIN Hongrong, et al. Developmental characteristics of organic matter and its enrichment model in shale reservoirs of Chang<sub>7</sub> Member in Yanchang Formation of southeast Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(6): 1-11.
- [26] ZHOU Junjun, WU Haiguang, WANG Jian, et al. Quantitative assessment of the effects of zeolite alteration processes on deep clastic reservoirs-A case study of the Jiamuhe Formation in the Shawan Sag, Junggar Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023: 154.
- [27] IJIMA A. Zeolites in petroleum and natural gas reservoirs [J]. *Geo Science World*, 2001, 45(1): 347-402.
- [28] 齐世超. 鄂尔多斯盆地陇东地区上三叠统延长组砂岩的成岩作用及浊沸石热力学研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011.  
QI Shichao. The diagenesis of the sandstone in Chang 8-10 Layer, Yanchang Formation, Late Triassic of Ordos Basin and the thermodynamics behavior of laumontite [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [29] 黄可可, 钟怡江, 刘磊, 等. 成岩体系中斜长石向浊沸石转变的热力学过程 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2016, 43(4): 497-506.  
HUANG Keke, ZHONG Yijiang, LIU Lei, et al. Analysis of alteration process of plagioclase feldspar to laumontite during diagenesis by thermodynamic method [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2016, 43(4): 497-506.
- [30] 黄思静, 刘洁, 沈立成, 等. 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*, 2001, 47(3): 301-308.  
HUANG Sijing, LIU Jie, SHEN Licheng, et al. Thermodynamic interpretation for the conditions of the formation of laumontite related to clastic diagenesis [J]. *Geological Review*, 2001, 47(3): 301-308.
- [31] 李红, 柳益群, 梁浩, 等. 三塘湖盆地二叠系陆相热水沉积方沸石岩特征及成因分析 [J]. *沉积学报*, 2012, 30(2): 205-218.  
LI Hong, LIU Yiqun, LIANG Hao, et al. Lithology and origin analysis of sublacustrine hydrothermal deposits characterized by analcime in Lucaogou Formation, Middle Permian, Santanghu Basin, northeast Xinjiang, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(2): 205-218.
- [32] 胡开明, 唐增才, 孟祥随, 等. 浙西大铜坑斑岩型钨钼矿床成岩成矿年代学 [J]. *地球科学*, 2016, 41(9): 1 435-1 450.  
HU Kaiming, TANG Zengcai, MENG Xiangsui, et al. Chronology of petrogenesis and mineralization of Datongkeng porphyry w-mo deposit in west Zhejiang [J]. *Earth Science*, 2016, 41(9): 1 435-1 450.
- [33] PARSAPOOR A, KHALILI M, MACKIZADEH M A. The behaviour of trace and rare earth elements (REE) during hydrothermal alteration in the Rangan area (central Iran) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(2): 123-134.
- [34] 贾三石, 王恩德, 付建飞, 等. 辽西排山楼金矿床微量元素地球化学特征及深部找矿预测研究 [J]. *地球化学*, 2011, 40(3): 266-279.  
JIA Sanshi, WANG Ende, FU Jianfei, et al. Geochemical characteristics of trace elements and deep prediction of the Paishanlou gold deposit, Fuxin, western Liaoning [J]. *Geochimica*, 2011, 40(3): 266-279.
- [35] 肖鑫, 周涛发, 范裕, 等. 安徽铜陵新桥铜硫金矿床的成因: 来自两类黄铁矿微形貌学、地球化学特征的证据 [J]. *岩石学报*, 2016, 32(2): 369-376.  
XIAO Xin, ZHOU Taofa, FAN Yu, et al. LA-ICP-MS in situ trace elements and FE-SEM analysis of pyrite from the Xinqiao Cu-Au-S deposit in Tongling, Anhui and its constraints on the ore genesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(2): 369-376.
- [36] PROL-LEDESMA R M, CANET C, VILLANUEVA-ESTRADA R E, et al. Morphology of pyrite in particulate matter from shallow submarine hydrothermal vents [J]. *American Mineralogist*, 2010, 95(10): 1 500-1 507.
- [37] MUROWCHICK J B, BARNES H L. Effects of temperature and degree of supersaturation on pyrite morphology [J]. *Geochemical Transactions*, 1987, 1(1): 23-33.
- [38] LONNIE J, MACHEL H G. Pervasive dolomitization with subsequent hydrothermal alteration in the Clarke Lake gas Field, Middle Devonian Slave Point formation, British Columbia, Canada [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1 739-1 761.
- [39] HERRERO M J, MARTÍN-PÉREZ A, ALONSO-ZARZA A M, et al. Petrography and geochemistry of the magnesites and dolostones of the Ediacaran Ibor Group (635 to 542 Ma), Western Spain: Evidences of their hydrothermal origin [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 240(3/4): 71-84.
- [40] GHOBARKAR H, SCH F O. Effect of temperature on hydrothermal synthesis of analcime and viséite [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 1999, 60(3): 163-167.
- [41] 周永章, 涂光炽, EDWARD H C, 等. 粤西古水剖面震旦系顶部层状硅岩的热水成因属性: 岩石学和地球化学证据 [J]. *沉积学报*, 1994, 12(3): 1-11.

- ZHOU Yongzhang, TU Guangchi, EDWARD H C, et al. Hydrothermal origin of top Sinian Chert formation at Gushui, western Guangdong, China: petrologic and geochemical evidence [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(3): 1-11.
- [42] MURRAY R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: General principles and applications [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3/4): 213-232.
- [43] CHUDAIEV O, CHUDAIEVA V, SUGIMORI K, et al. Geochemistry of recent hydrothermal systems of Mendeleev volcano, Kuril islands, Russia [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88(1/3): 95-100.
- [44] 刘英俊. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 283-336.  
LIU Yingjun. *Element geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 1984: 283-336.
- [45] KARAKAYA M, KARAKAYA N, KÜPELI S, et al. Mineralogy and geochemical behavior of trace elements of hydrothermal alteration types in the volcanogenic massive sulfide deposits, NE Turkey [J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48: 197-224.
- [46] 付伟, 周永章, 杨志军, 等. 藏南江孜盆地地下白垩统硅化层的地质地球化学特征及其成矿意义 [J]. *现代地质*, 2005, 19(2): 267-273.  
FU Wei, ZHOU Yongzhang, YANG Zhijun, et al. Geological and geochemical characteristics of the silicified rocks in Jiangzi Basin and their implications for mineralization [J]. *Geoscience*, 2005, 19(2): 267-273.
- [47] SCHIJF J. Alkali elements (Na, K, Rb) and alkaline earth elements (Mg, Ca, Sr, Ba) in the anoxic brine of Orca basin, northern Gulf of Mexico [J]. *Chemical Geology*, 2007, 243(3/4): 255-274.
- [48] 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 Lifei. Origin of laumontite and condition for its formation in Trassic Yangchang series, North Shanxi [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1992, 8(2): 145-152.
- [49] 张关龙, 王继远, 王斌, 等. 准噶尔盆地腹部深层—超深层碎屑岩储层发育特征与孔隙演化定量表征 [J]. *石油实验地质*, 2023, 45(4): 620-631.  
ZHANG Guanlong, WANG Jiyuan, WANG Bin, et al. Development characteristics and quantitative characterization of pore evolution of deep and ultra-deep clastic reservoirs in the hinterland of the Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(4): 620-631.
- [50] WEIBEL R, OLIVARIUS M, JAKOBSEN C F, et al. Thermogenic degradation of early zeolite cement: An important process for generating anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs? [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 103: 620-645.

编辑 邹滢滢

## 山东省陆相断陷盆地页岩油勘探开发重点实验室获批筹建

山东省科技厅日前发布了“山东省重点实验室重组(第二批)批复筹建”名单,勘探开发研究院牵头组织申报的山东省陆相断陷盆地页岩油勘探开发重点实验室成功入选。

该实验室以矿场需求为导向,打通“科研—生产—实验”一体化运行堵点,形成科研—生产—实验协同、勘探—开发多学科交叉的大实验模式,推动矿场问题的高效解决。持续深化页岩油“资源评价、储层表征、赋存机理、流动机理、立体开发”全链条场景化研究,形成可复制的工作模式,加速基础理论、关键技术迭代提升。瞄准有利岩相预测、剩余油分布规律等矿场关键问题,打造储层全息表征、超大规模物理模拟、二氧化碳驱在线核磁等基础性、前瞻性实验技术,持续完善胜利特色的实验技术体系。依托基于大数据的样本构建,提高分析化验生产率,加快实验分析范式转变。

实验室筹建后,将致力于破解陆相页岩油规模增储与高效开发难题,形成陆相断陷盆地页岩油勘探开发原创理论、关键技术体系及高层次学术创新团队,引领页岩油产业绿色低碳高质量发展,支撑百万吨级页岩油产能基地建设。