

中国陆相湖盆沉积岩中方沸石的产状、成分和成因

贾业^{1,2},朱世发^{1,2},杨祎^{1,2},佟欢^{1,2},朱筱敏^{1,2}

[1. 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249]

摘要:天然方沸石是沉积岩中的常见矿物,与油气储层关系密切。在总结前人研究成果的基础上,对天然方沸石的产状、成分特点、成因类型以及方沸石对储层的影响进行了归纳。结果表明:方沸石是含有结晶水的架状结构硅酸盐矿物,平面上硅氧四面体构成封闭环,三维空间中具有笼状结构,结构内部的孔道有利于溶解作用的发生。陆相湖盆中的天然方沸石有5种典型产状,其中粒间胶结物和裂隙充填型方沸石的自形程度较高,喷溢型方沸石包括互相包裹状和不连续粗粒纹层状。方沸石成分的差异主要反映在Na⁺和K⁺的含量上,母岩为碱性火山岩时具有更高的K⁺含量,方沸石硅铝比主要在2.00~2.69。天然方沸石按成因可分为4大类,陆相湖盆中的方沸石以成岩成因和热水喷溢成因为主。沉积相类型控制着方沸石的形成和溶解,火山物质发育的扇三角洲前缘中常见粒间胶结物型方沸石,而深湖-半深湖亚相中常见热液喷溢型方沸石,后期酸性流体对方沸石的溶蚀因沉积相不同而存在差异。

关键词:火山物质蚀变;产状;喷流岩;天然方沸石;沉积岩;陆相湖盆;中国

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Occurrence, composition and origin of analcime in terrestrial lacustrine sedimentary rocks in China

Jia Ye^{1,2}, Zhu Shifa^{1,2}, Yang Yi^{1,2}, Tong Huan^{1,2}, Zhu Xiaomin^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: Natural analcime closely related to oil and gas reservoirs, is quite common in sedimentary rocks. We summarize the occurrence, composition, genesis of natural analcime and discuss its impact on reservoirs based on previous researches. The results show that analcime, a kind of silicate mineral containing crystalline water and of framework structure, is characterized by a silica-oxygen tetrahedron on map view to form a closed ring, and a cage structure in 3-D visualization space, the pore pathways in which are conducive to dissolution. There are five typical types of natural analcime in terrestrial lacustrine basins, among which the analcime with intergranular cements and fracture fillings is euhedral, and the exhalative analcime comes in two kinds of occurrence, namely, porphyritic texture and discontinuous coarse-grained laminae. The compositional differences of analcime concentrate on the content of Na and K ions: the K ion content tends to be higher, and the Si/Al ratio in analcime mainly ranges from 2.0 to 2.69, when it comes to alkaline volcanic rock as the host-rock. Among the four categories of natural analcime in terms of genesis, that in terrestrial lacustrine basins is mainly derived from diagenesis and hydrothermal exhalation. In all, sedimentary facies is key in the formation and dissolution of analcime; the analcime with intergranular cements is widely spread in the fan delta front developed from volcanic materials, while the analcime out of hydrothermal exhalation is common in the deep-semi-deep lacustrine subfacies; and dissolution of analcime by acidic fluid in the later stage is different in different sedimentary facies.

Key words: alteration of volcanic material, occurrence, exhalative rock, natural analcime, sedimentary rock, terrestrial lacustrine basin, China

收稿日期:2019-04-01;修订日期:2021-06-29。

第一作者简介:贾业(1997—)男,硕士,储层地质学。E-mail:493688330@qq.com。

通讯作者简介:朱世发(1982—),男,博士、教授、博士生导师,储层地质学与沉积学。E-mail:zhushifa_zsf@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41872102)。

尽管沸石矿物定名于18世纪中叶,但是由于缺乏对沸石经济价值的认识,在20世纪20年代之前鲜有对沸石的深入研究,绝大多数研究者认为沸石只能作为裂缝充填物或杏仁体出现于火成岩中^[1]。1928年Bradley首次记录了北美绿河组凝灰岩和油页岩中的自生方沸石^[2],自此不同学者在低级变质岩和沉积岩中大量发现沸石矿物^[3]。美国学者在20世纪90年代前后的研究表明,沉积岩中的沸石具有巨大的地质意义和潜在的经济价值^[4-6]。在种类繁多的沸石族矿物中,方沸石以自生矿物的形式在沉积岩中最为常见。国外研究者对自生方沸石的产状、形成环境和成因特征进行了探讨,归纳总结了方沸石在封闭和开放地下水系统中的形成转化模式^[7-8],并分析了沸石与油气储层之间的关系^[9]。2002年Neuhoff主编论文集,对国外的沸石研究成果进行了系统总结^[10]。

中国的方沸石研究起步晚于美国,但是由于中国的沉积盆地种类丰富、成岩作用复杂,研究进展十分迅速。随着新型分析测试手段的逐步应用,相关研究成果在近30年来大量涌现^[11-17]。目前,在中国的多个盆地的沉积地层中均发现有方沸石发育,例如准噶尔盆地^[11-12]西北缘风城组^[13-15,18]、中拐-车排子佳木河组和清水河组^[19-21]、吉木萨尔凹陷平地泉组^[22-23]、柴窝铺凹陷红雁池组^[24]、三塘湖盆地跃进沟剖面芦苇沟组^[25-27]、二连盆地白音查干凹陷^[28-29]和巴音都兰凹陷阿尔善组和腾格尔组^[30]、酒西盆地青西凹陷下沟组^[31]、渤海湾盆地北塘凹陷沙河街组三段^[32-33]、辽河西部凹陷沙四段^[34]、沧东凹陷孔店组二段^[35-36]、鄂尔多斯盆地白垩系路乐河组和罗汉洞组^[37-39],以及柴达木盆地古近系-新近系^[40]等。由于方沸石具有抗压、易溶的特点,对于优质油气储层的形成具有重要意义^[16],进行陆相湖盆方沸石的研究具有较大的科学意义和经济价值。

本文系统地归纳了中国陆相湖盆天然方沸石的研究成果,利用岩心、扫描电镜和铸体薄片照片总结了方沸石的产状类型,利用电子探针数据对方沸石的成分进行研究,通过硅铝比的计算推测方沸石的形成环境,对不同成因的方沸石进行了分类,并对储层物性的影响进行了讨论。

1 方沸石矿物学特征

沸石族矿物是一类以Na、Ca和Al元素为主并含有沸石水的架状结构硅酸盐矿物,方沸石属于其中的一种,化学通式为 $\text{Na}[\text{AlSi}_2\text{O}_6] \cdot \text{H}_2\text{O}$,是硅铝比(Si/Al)比值最低的低硅沸石,晶体在显微镜下为三八面体或二

十四面体^[39]。在分子结构上,方沸石中的硅氧四面体由桥氧进行连接,在平面上形成四元或六元的封闭环状结构(图1),在空间中形成笼状结构;单位晶胞中包含16个Al原子和32个Si原子,晶胞尺寸 $a = 1.67 \text{ nm}$ ^[37]。晶体结构中偶见 K_2O 代替 Na_2O (个别地区 K_2O 含量甚至可以达到5%),也可以含有极少量的CaO和MgO。沸石的基本结构特征包含3个部分:硅铝酸盐格架、格架中的孔道(穴)和阳离子,以及晶格中的沸石水^[41]。方沸石的格架密度和孔道直径都较大(0.26 nm),有利于流体进入晶格发生溶蚀^[42],特别是晶格中的Si—O—Al键在酸性条件下比Si—O—Si键更容易发生断裂^[43]。方沸石的镜下鉴定特征较为明显:在正交光下全消光,在薄片无色透明,{100}晶面的解理不完全,低负突起,可见聚片双晶;除此之外,方沸石以有解理和低负突起与石榴石相区别,以无色和不同晶面的解理与方钠石相区别,以解理发育与火山玻璃相区别^[44]。

2 方沸石在岩石中的产状

2.1 纹层状

纹层状方沸石常出现在湖相细粒沉积物(直径 $< 0.1 \text{ mm}$)中,在渤海湾盆地新生代地层内最为常见。泥晶方沸石往往和暗色粘土矿物或泥质方解石(白云石)以互层状出现,纹层组合类型存在差异(图2a—g),方沸石-方解石-粘土矿物组合、方沸石-粘土矿物组合和方沸石-(铁)白云石-粘土矿物组合较为常见,纹层厚度在几十微米到几百微米之间,重结晶作用和纹层间矿物的交代作用模糊了纹层的边界(图2c)。单偏光下方沸石纹层呈白-浅黄色(图2a,b),正交光下全消光(图2e,h)。沸石晶粒主要为它形泥级质点(直径 $< 5 \mu\text{m}$),少部分达到粉-细晶级别,光学显微镜下难以分辨轮廓;重结晶作用可能使晶粒变大、自形程度提高(图2c)。除去少数以“透镜状(似核状)”出现的集合体(图2i)之外,方沸石纹层与其他矿物纹层平行。

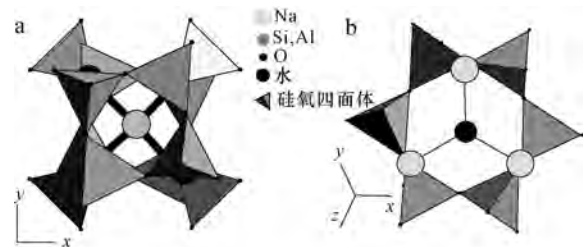


图1 方沸石晶体结构中的四元环(a)和六元环(b)^[39]

Fig. 1 Diagram showing the 4-membered ring (a) and 6-membered ring (b) in the crystalline structure of analcime^[39]

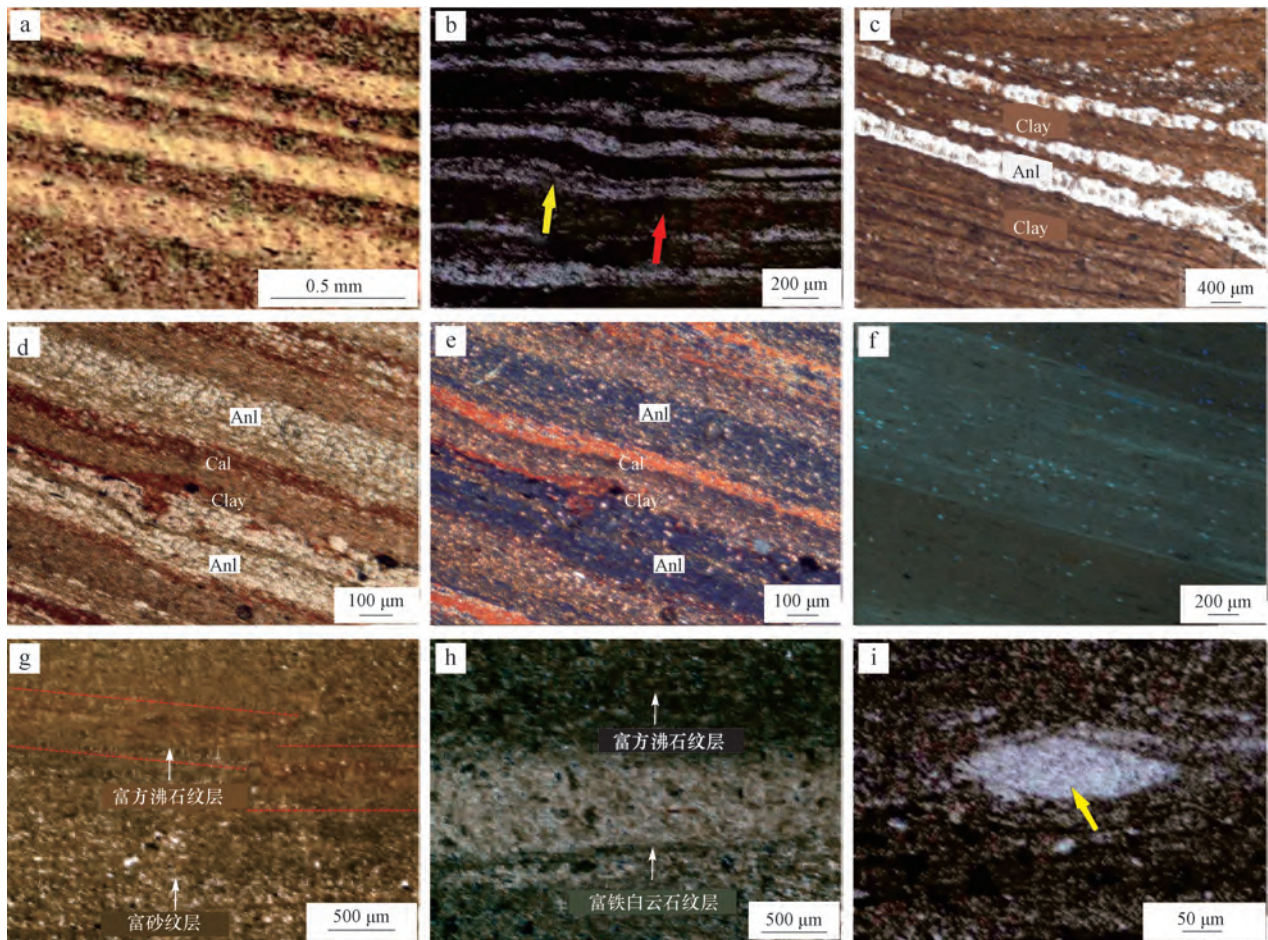


图2 渤海湾盆地不同凹陷内纹层状方沸石镜下照片^[32-36]

Fig. 2 Micrographs of laminated analcime from different sags of Bohai Bay Basin^[32-36]

a. 辽河西部凹陷沙四段, 含方沸石质泥岩, L57井, 埋深2 347.6 m, 普通薄片(+); b. 北塘凹陷沙三段, 方沸石纹层(黄色箭头所指)和白云石(红色箭头)成互层状, T12井, 埋深3 150.22 m, 普通薄片(-); c. 黄骅坳陷沧东凹陷孔二段, 纹层状方沸石在埋藏成岩过程中溶解-重结晶形成较为粗大的马牙状晶粒, 官X井, 埋深3 170.5 m, 普通薄片(-); d. 黄骅坳陷沧东凹陷孔二段, 纹层状微晶方沸石(Anl), 与粘土纹层(Clay)及微晶方解石(Cal)纹层间互, 官X井, 埋深2 980.5 m, 普通薄片(-); e. 与d视域相同, 方沸石全消光, 方解石具高级白干涉色, 普通薄片(+); f. 黄骅坳陷沧东凹陷孔二段, 页岩中的颗粒状方沸石纹层, 被黄白色沥青充填(蓝色荧光), 官X井, 埋深2 944.5 m, 荧光照片; g. 北塘凹陷沙三段, 纹层状白云岩, 富方沸石纹层及富铁白云石纹层发育, T12C井, 埋深3 146.4 m, 普通薄片(-); h. 与g视域相同, 普通薄片(+); i. 北塘凹陷沙三段, 方沸石(黄色箭头所指)呈似结核状、絮状均匀分布在白云岩中, T12C井, 埋深3 149.43 m, 普通薄片(-)

2.2 粒间胶结物

方沸石与埋藏成岩作用密切相关^[45-46], 以粒间胶结物的形式发育于火山岩屑质砂砾岩或粉砂岩中的方沸石, 通常位于近源沉积相带, 如扇三角洲和辫状河三角洲等^[18-22, 47]。对于此类方沸石, 前人根据其自形程度进行进一步细分^[22, 48-49]: 一种是连片出现的“胶状”方沸石, 镜下也可具有亮晶胶结物的特点(图3a); 另一种是自形程度高, 以球粒状单体出现的方沸石, 往往围绕岩屑、长石发育(图3b, c)或与粘土矿物伴生(图3d)。也有人以方沸石对孔隙充填程度分类^[15, 24], 将此类方沸石分为全充填型和半充填型, 半充填型方沸石自形程度较高。

成岩早期方沸石胶结物充填了部分原生孔隙, 提

高了储层的抗压实能力, 对储层的综合影响取决于后期溶蚀作用的强度, 溶蚀产生的次生孔隙可以作为油气储集空间(图3e, f)。这种产状的方沸石以准噶尔盆地西北缘二叠系-三叠系中的最为典型, 对储层的具体影响将在后面的章节中进行讨论。

2.3 交代产物

方沸石可以作为火山凝灰物质的交代产物出现, 自生方沸石围绕火山玻璃质或火山碎屑产出(图3b)。方沸石也可以交代钠长石(图3g), 这种情况下方沸石发育于钠长石的边部; 方沸石与方解石(图3h)、片沸石(图3i)等其他类型的沸石以及粘土矿物之间也存在交代关系, 交代关系反映了矿物形成的先后顺序。

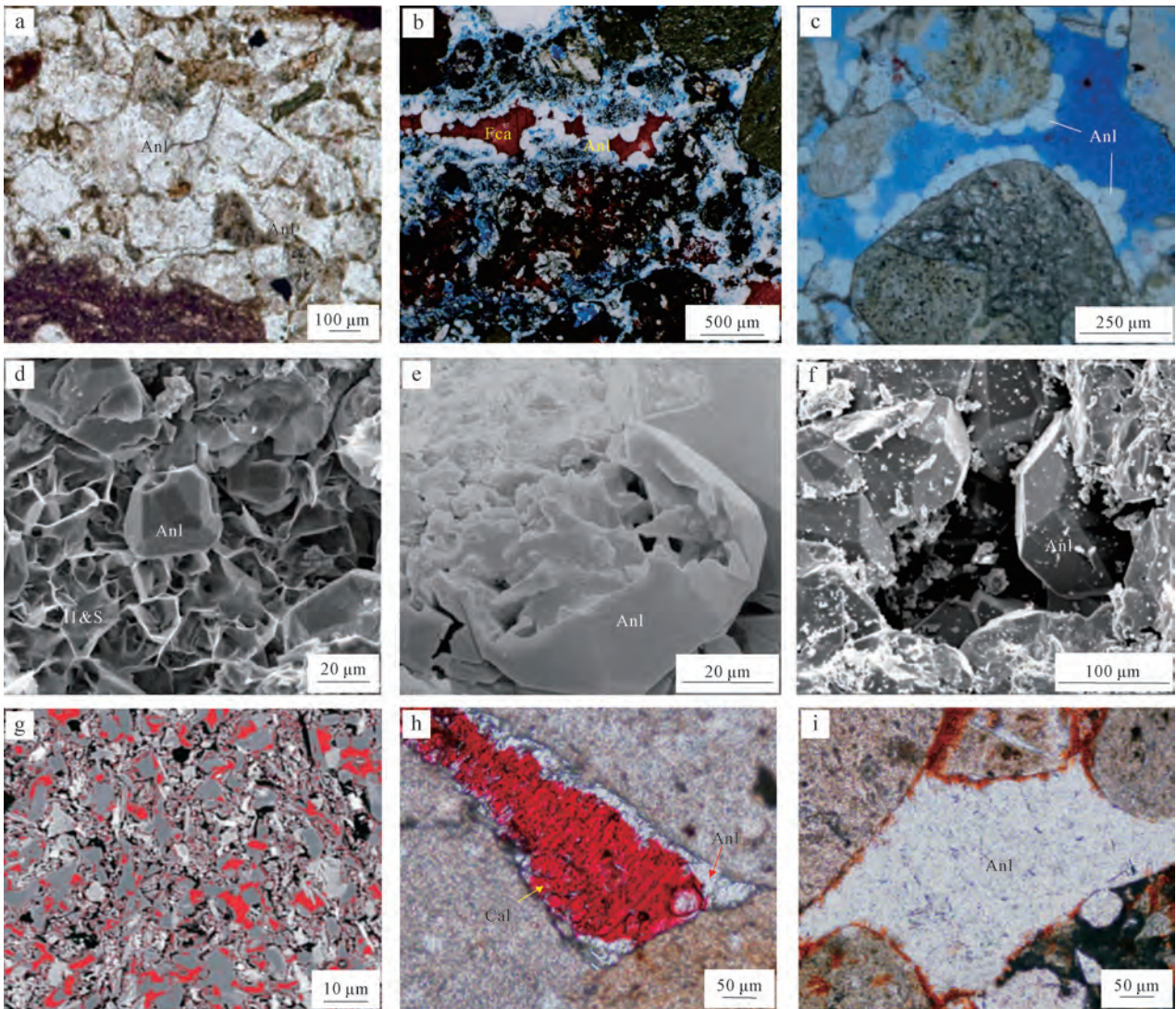


图3 中国不同含油气盆地内粒间胶结物和交代作用相关方沸石镜下照片^[13,15,21,24,35-36,39]

Fig. 3 Micrographs of analcime related to intergranular cements and metasomasis from different petroliferous basins of China^[13,15,21,24,35-36,39]

a. 渤海湾盆地黄骅坳陷沧东凹陷孔二段,亮晶方沸石(Anl)充填泥岩中砂质条带的粒间孔,GX井,埋深3 021 m,铸体薄片(-);b. 准噶尔盆地克一百断裂带佳木河组,岩屑砂砾岩中的粒间方沸石(Anl)及铁方解石(Fca)充填,克85095井,埋深2 916.62 m,铸体薄片(-);c. 准噶尔盆地车排子凹陷清水河组,球粒状方沸石胶结物,艾4井,埋深2 090.1 m,铸体薄片(-);d. 准噶尔盆地西北缘二叠系佳木河组,砂砾岩中的似蜂巢伊/蒙混层矿物(I & S)与方沸石(Anl)共生,方沸石发生溶蚀作用,T85722井,埋深2 547.25 m,扫描电镜照片;e. 准噶尔盆地西北缘二叠系风城组,砂岩中的方沸石溶蚀孔发育,检乌44井,埋深2 877.74 m,扫描电镜照片;f. 准噶尔盆地西北缘二叠系风城组,不等粒中砂岩晶间孔中的方沸石胶结物,克85453井,埋深2 900.33 m,扫描电镜照片;g. 鄂尔多斯盆地罗汉洞组,红色为方沸石,深灰色为钠长石,浅灰色为钾长石,埋深147 m,处理后的背散射电子图像;h. 准噶尔盆地柴窝堡凹陷红雁池组,亮晶方解石胶结物(Cal)被茜素红染色(黄色箭头所指),方解石周围方沸石沿颗粒边缘发育(红色箭头所指),柴参1侧1井,埋深3 060.93 m,普通薄片(-);i. 准噶尔盆地柴窝堡凹陷红雁池组,方沸石胶结物(Anl),全充填粒间孔隙,达1井,埋深2 733.50 m,普通薄片(-)

2.4 裂缝充填

构造裂缝系统是重要的流体运移通道,活跃的流体环境有利于成岩作用的发生^[50-51]。裂缝中的方解石和方沸石胶结物形成于不同时期(图4a,b),全充填的方沸石对裂缝具有较强的封闭作用(图4c),半充填或经历溶蚀的裂缝可以作为油气储集的场所(图4d,e)。裂缝充填型方沸石的自形程度相对较高(图4f),富钠的火山碎屑岩或火山岩是主要的物质来源。

2.5 喷溢组合型产状

这种产状的方沸石与特殊的沉积构造相伴出现,方沸石呈互相包裹状或不连续的粗粒层状。包裹状方沸石不具有成层性,与方解石、白云石和黄铁矿形成集合体(图5a-c);晶粒较粗的方沸石,表面存在微裂纹(图5d),可以形成不连续的层(图5e-g)。此类方沸石常与亚铁碳酸盐伴生,反映了偏还原的沉积成岩环境(图5f-i)。

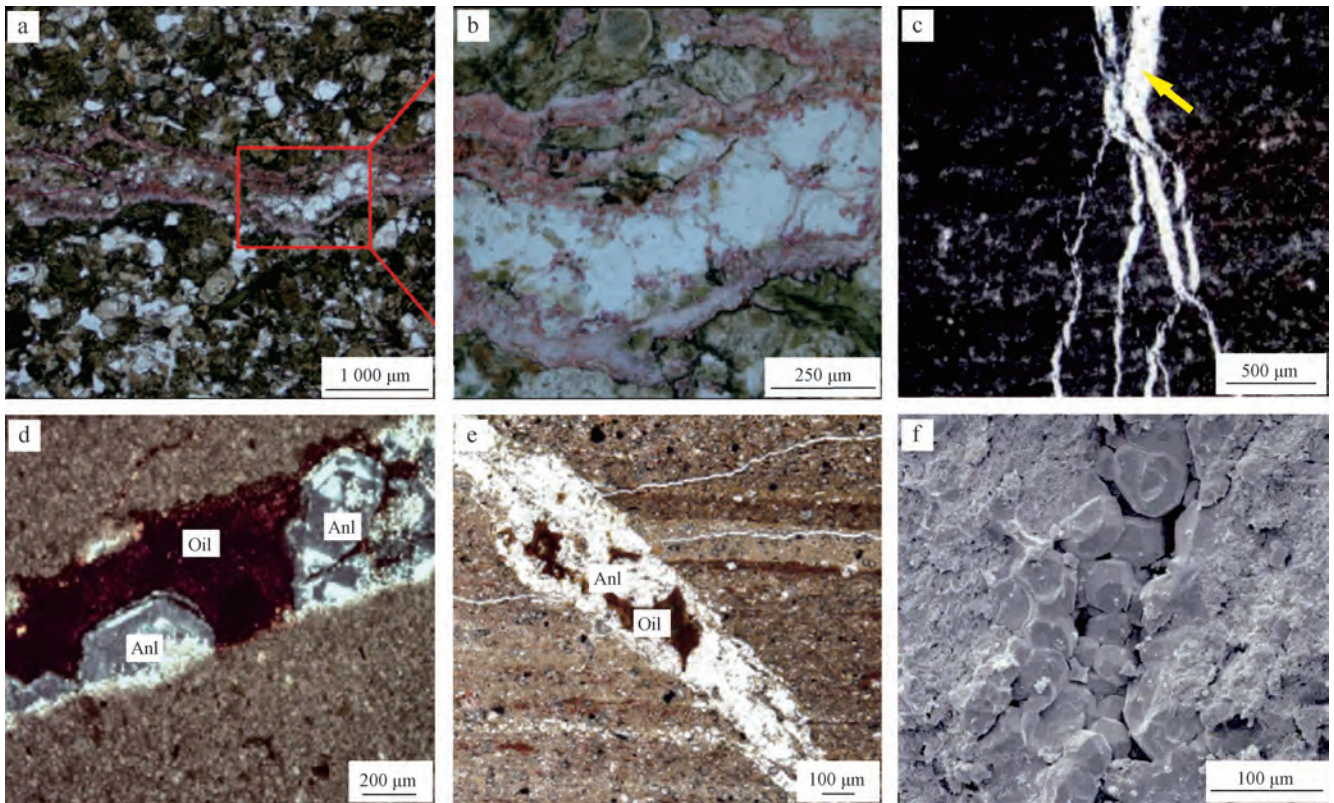


图4 中国不同含油气盆地内裂缝充填方沸石镜下照片^[21,34,36]

Fig. 4 Micrographs of analcime of fracture-filled type from different petroliferous basins of China^[21,34,36]

a. 准噶尔盆地车排子凹陷清水河组, 裂缝中充填方解石、白云石和方沸石, 石桥2井, 埋深4 326.51 m, 铸体薄片(-); b. 图a的局部放大, 裂缝中首先发育方沸石胶结物(Anl), 随后发育方解石胶结物(被茜素红染为红色), 石桥2井, 埋深4 326.51 m, 铸体薄片(-); c. 北塘凹陷沙三段, 方沸石充填白云岩中的张裂缝(黄色箭头), T12C井, 埋深3 126.54 m, 普通薄片(-); d. 黄骅坳陷沧东凹陷孔二段, 方沸石(Anl)部分充填层内错断缝, 残余孔隙空间充填油质沥青(Oil), 正交光下可见方沸发育双晶, 显异常光性, GX井, 埋深2 990.00 m, 普通薄片(-); e. 黄骅坳陷沧东凹陷孔二段, 方沸石(Anl)部分充填层内错断缝, 残余孔隙空间充填油质沥青(Oil), GX井, 埋深3 100.00 m, 普通薄片(-); f. 辽河西部凹陷沙四段, 含泥晶云岩中的裂缝被自形方沸石充填, L88井, 埋深2 570.83 m, 扫描电镜照片

3 方沸石化学成分

本文的化学成分研究主要基于方沸石的电子探针数据。理想情况下的方沸石分子式为 $\text{Na}[\text{AlSi}_2\text{O}_6] \cdot \text{H}_2\text{O}$, 现将不同地区方沸石中主要阳离子含量整理如图6所示。

各种金属氧化物的质量分数变化范围存在差异: K_2O 的范围在 0~4.44%, 平均为 0.48% ($n=9$); FeO 的范围在 0~0.26%, 平均为 0.095% ($n=9$); Na_2O 的范围在 5.58%~13.80%, 平均为 9.11% ($n=9$); Al_2O_3 的范围在 20.01%~26.33%, 平均为 21.92% ($n=11$); CaO 的范围在 0.007 5%~1.30%, 平均为 0.19% ($n=9$); SiO_2 的范围在 56.37%~66.36%, 平均为 60.91% ($n=11$); MgO 的范围在 0.007 5%~0.053%, 平均为 0.026% ($n=9$)。Na 是形成方沸石的关键元素, 除了辽河坳陷中的方沸石 K 含量较

高之外, Na 是不同地区方沸石中变化范围最大的元素, 金属元素含量的差异反映了母岩火山岩的性质差异。

除了矿物中各个元素的含量之外, 笔者总结了前人得到的中国不同地区方沸石硅铝比数据(表1)。

沸石的 Si/Al 比值介于 2.0~3.0。Si/Al 比值大于 2.69 的样品来自辽河凹陷沙四段和三塘湖盆地芦苇沟组; Si/Al 比值介于 2.43~2.69 的样品来自鄂尔多斯盆地白垩系的方沸石和北塘凹陷中的充填型方沸石; Si/Al 比值介于 2.00~2.28 的样品来自不同盆地的纹层状方沸石和柴窝堡凹陷红雁池组方沸石; Si/Al 比值在 2.43 左右的样品分别来自鄂尔多斯盆地白垩系、准噶尔盆地中拐凸起佳木河组和二连盆地白音查干凹陷白垩系的方沸石; Si/Al 比值小于 2 的样品来自酒西盆地地下沟组的团块状方沸石, 在误差允许的范围可视在 2.0~3.0。

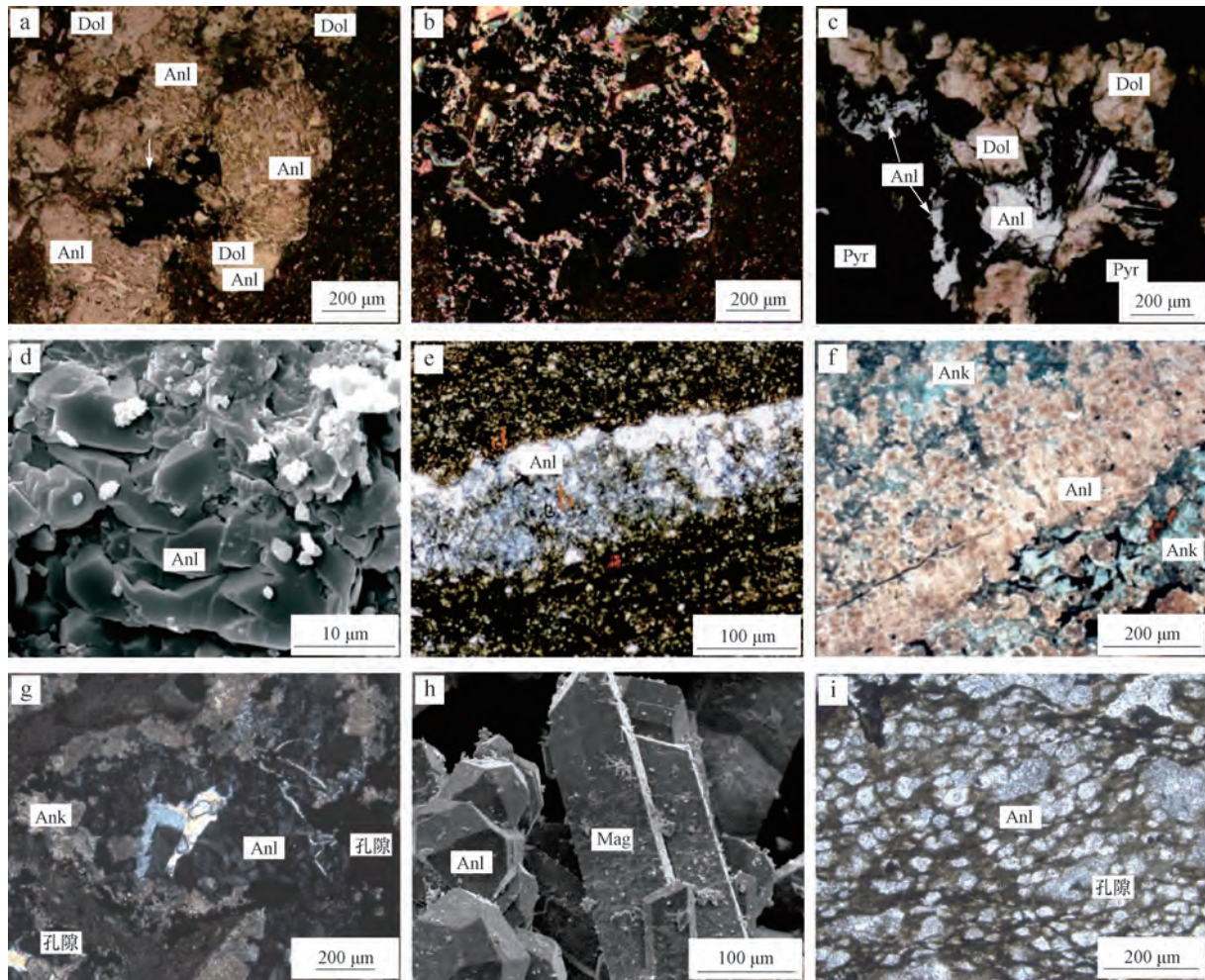


图5 中国不同含油气盆地内喷溢组合型方沸石镜下照片^[23,27,29,31]

Fig. 5 Micrographs of exhalative analcime from different petroliferous basins of China^[23,27,29,31]

a. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷平地泉组,白云石(Dol)和方沸石(Anl)类似火成岩中的斑晶,方沸石呈不规则细条纹状分布于白云石表面,两种矿物以类似条纹结构共生,黑色基质为含泥质组分的泥晶白云岩,富含有机质,发育显微纹层,白色箭头所指为沥青质,Sh2井,埋深2 417.5 m,普通薄片(-); b. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷平地泉组,方沸石全消光,a的正交光照片,Sh2井,埋深2 417.5 m,普通薄片(+); c. “斑晶”矿物显微特征,主要由方沸石(Anl)、白云石(Dol)和黄铁矿(Pyr)组成,方沸石晶面混浊,Sh2井,埋深2 499.5 m,普通薄片(-); d. 三塘湖盆地跃进沟地区二叠系芦草沟组,粗大块状方沸石(Anl)晶体,表面裂纹发育,埋深1 720.96 m, B-3井,扫描电镜; e. 酒泉盆地青西凹陷下白垩统下沟组,铁白云石和钠长石纹层中的方沸石纹层,窿103井,埋深4 589.60~4 589.65 m,普通薄片(-); f. 三塘湖盆地跃进沟地区二叠系芦草沟组,方沸石(Anl)和铁白云石(Ank)共生,铁白云石被染成蓝色, B-3井,埋深1 720 m,普通薄片(-); g. 二连盆地白音查干凹陷腾格尔组,钠沸石与方沸石(Anl)共生,沸石集合体边缘被含铁白云石(Ank)交代,锡3-69井,埋深1 772.8 m,普通薄片(+); h. 二连盆地白音查干凹陷腾格尔组,方沸石(Anl)与菱镁矿(Mag)共生,锡3-69井,埋深1 782.2 m,扫描电镜; i. 二连盆地白音查干凹陷腾格尔组,白云质泥岩中的方沸石颗粒,锡36井,埋深2 436.94 m,普通薄片(-)

4 方沸石成因

方沸石的形成原因较为复杂,在前人研究基础上,笔者根据赋存的岩石类型和地质作用方式将方沸石划分为4种成因类型,不同成因的方沸石具有不同的特征^[52-55]。①原生成因的方沸石(P型或I型),在火成岩中直接结晶出现,手标本下颗粒呈肉红色,晶粒大、自形程度高,颗粒表面溶蚀微孔或裂缝少见。②转变型方沸石(L型或X型),是富钠流体与石榴石等发生

离子交换和水化的产物,通常发生在岩浆冷凝期间或者固结之后,以保留石榴石假象,颗粒不规则,晶体表面粗糙、不平整,发育微孔和裂隙,含有放射状辉石、磁铁矿包裹体为特征。这两类方沸石可以出现在沉积岩的岩屑中。③热水喷溢成因方沸石(H型),可以进一步细分成2个亚类:一类是热液沿裂缝溢出形成的,不具有明显的喷口,方沸石在早期岩浆岩晶洞或沉积岩裂缝内结晶,特征与原生成因的方沸石相似,往往与中基性、碱性火山岩伴生;另一类具有明显的喷发产状,如水爆角砾岩、互相包裹状方沸石“斑晶”、条带状构

表1 中国陆相湖盆中方沸石硅铝比统计
Table 1 Statistics of Si/Al ratio in analcime from terrestrial lacustrine basins of China

盆地	地层	深度/m	SiO ₂ 含量/%	Al ₂ O ₃ 含量/%	Si/Al	样品数量/个	产状
鄂尔多斯盆地	白垩系路乐河组、 罗汉洞组	150 ~ 800	64.52	22.64	2.42	11 *	沉积型矿床
渤海湾盆地	北塘凹陷古近系 沙三段	3 090 ~ 3 130	63.28	26.33	2.04	5	纹层型、 充填型
	辽河拗陷古近系 沙四段	3 050 ~ 3 140	61.61	21.07	2.49	2	
酒西盆地	青西凹陷下白垩统 下沟组	4 300 ~ 4 400	57.02	23.34	2.08	4	纹层状
			54.14	23.58	1.95	4	团块状
三塘湖盆地	中二叠统芦草沟组	1 700 ~ 1 730	65.76	20.00	2.80	11 *	喷溢组合型
准噶尔盆地	中拐凸起二叠系 佳木河组	3 200 ~ 3 300	56.77	20.10	2.40	1	粒间胶结物
	吉木萨尔凹陷 二叠系平地泉组	3 780 ~ 3 800	62.29	20.45	2.59	3	喷溢组合型
	火烧山二叠系 平地泉组	1 500 ~ 1 700	59.63	20.08	2.64	5	粒间胶结物
	柴窝堡凹陷 中二叠统红雁池组	2 630 ~ 2 740	62.61	23.33	2.28	3	粒间胶结物、 裂缝充填型
二连盆地	巴音都兰凹陷 白垩系腾格尔组	1 000 ~ 1 300	60.62	21.83	2.36	6	粒间胶结物、 纹层状
	白音查干凹陷 白垩系腾格尔组	1 770 ~ 2 076	57.39	27.37	2.02	4	喷溢组合型、 裂缝充填型

注: * 样品测试值来自多篇文章加权平均^[23,27-32,34-36,37,39,49]。

造。④沉积成岩型方沸石(S型),主要有2大主要物质来源,碱性地层流体(盐湖)环境下火山物质的蚀变和富钠地层水流体环境下粘土矿物转化。实际上,这些过程都是在成岩作用阶段发生的,并非在同生阶段直接沉积或者沉淀形成,在砂岩中此类方沸石以胶结物或者交代物出现,在细粒沉积岩中呈纹层状。

前人的研究有时包含第五类方沸石成因——低级变质成因^[52],此种方沸石属于沸石相中的特殊矿物,一般与封闭条件下较长的埋藏时间和较高的地温梯度有关^[3]。但是与晚成岩阶段形成的方沸石相比,低级变质成因方沸石在形成时间和形成环境上并无明显差异^[16],因此本文中不再将其单独分为一类。结合前文对于方沸石产状的描述可知,中国的陆相湖盆沉积岩中主要以沉积成岩型和热水喷溢型方沸石为主。

4.1 热水喷溢成因

北美学者认为高于当地年平均气温5℃以上的地下水可以被称为热水,由于中国南北环境温度的差异,在北方高于25℃被界定为热水,而在南方要高于40℃^[56]。目前,海洋中的热水活动研究较为系统,以海底“黑烟囱”和“白烟囱”喷流模式最具代表性。所谓“黑烟囱”是指在大陆裂谷环境下形成的、以喷发金属硫化物为主的热水喷流模式,喷口外壁快速沉淀,随后通道内部硫化物结晶,反映了热水流体与海水的相互作用^[57]。而“白烟囱”是指一种与海底“黑烟囱”相似的沉积现象,表现为温度相对稍低的热水以及浅色硅酸盐矿物的喷流^[57-58]。海底热液系统涉及地壳深部的热液循环和浅部的热水喷流,指示了洋壳的增生^[57]。

中国的陆相湖盆中热水活动明显,在准噶尔盆地

吉木萨尔凹陷平地泉组^[23,59]、三塘湖盆地跃进沟剖面芦苇沟组^[25-27]、二连盆地白音查干凹陷腾格尔组^[28-29]、酒西盆地青西凹陷下沟组^[31]均有此类成因的方沸石发现。柳益群首先将酒西盆地内发现的一系列特殊沉积构造用“白烟囱”进行解释,湖相“白烟囱”模式较海洋规模小、水体浅、温度低,具有特殊的喷溢组合产状^[25-31]。这种产状对环境有很好的反映:在远离喷口的温度较低区域,热水沿着裂缝向上渗溢,在火山岩气孔中析出硅酸盐,或者在细粒沉积物中发育方沸石粒度较粗的纹层(图6e,f),代表了一种稳定的热卤水聚集区和热水矿物沉积场所;而在距喷口较近的温度较高区域,由于较高的温度和较为动荡的水体环境,方沸石往往和其他矿物紧密伴生形成互相包裹状(图6a—c)或者具有水爆角砾结构和条带状构造。

热水喷溢型方沸石在产状、伴生矿物、微量元素和稀土元素特征等方面具有一定的相似性,笔者总结了前人研究的喷流型方沸石发育地层的地球化学特征见表2。现代高温热泉的研究发现^[60-62],在有热泉发育的地层中,稀土元素球粒陨石标准化配分模式表现为轻微右倾型或平坦型,轻重稀土分异不明显; δEu 既有正异常也有负异常,同一地区不同的热泉喷口之间有差异性;由于受到地层的影响,热水可能淋滤硅铝质陆壳而具有较多的Al。

发育喷溢型方沸石地层的地球化学特征表明^[28-29,32],方沸石往往形成于咸水湖泊的深湖、半深湖还原环境;岩性以白云岩为主,白云石中铁含量较高;轻稀土富集、重稀土亏损,表现为右倾型; $\delta^{13}\text{C}$ 偏正

而 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负,与幔源的热液存在差异;而Sr同位素和Nd同位素则反映出深部物源的特点, δCe 异常的情况与海水或热液均存在差异,这可能是受到陆相水体混染导致的。综上所述,方沸石的形成是地幔热液与大气降水和湖水共同作用的结果。

中国的热水喷溢型方沸石多发于构造活动活跃的裂谷型盆地,例如三塘湖盆地、酒西盆地和渤海湾盆地,上述盆地发育方沸石的地层中断裂和火山物质较为发育,在准噶尔盆地吉木萨尔凹陷地层中也发现了弧面棱角状的火山玻璃,但是李红^[23]等人认为火山玻璃的存在证明蚀变作用较为微弱,侧面印证了该地区的方沸石是热水喷溢成因。深大断裂的发育对于喷溢型方沸石的形成十分关键,既可以为湖水下渗和深部热液的上涌提供通道,也可以为岩浆侵入和火山喷发提供途径。

4.2 沉积成岩成因

沉积成岩型方沸石是中国陆相湖盆中最为常见的类型,富钠的中酸性火山物质为方沸石的形成提供了物质基础,而成岩流体的性质决定了方沸石的形成速度以及在地层中的分布,碱性流体对方沸石的形成最为有利。中国学者对于此类成因的方沸石也进行了卓有成效的研究,其中以准噶尔盆地最为典型。朱世发^[15,18]等研究认为,方沸石是准噶尔盆地西北缘地层中重要的自生矿物,主要以胶结物的形式发育在火山岩屑质砂砾岩中,其形成受到水体盐度、地层温度和埋藏深度的综合影响。根据深度的不同,沸石类矿物在垂向分布上具有一定的先后顺序,如火山玻璃—斜发沸石、丝光沸石—方沸石—片沸石、浊沸石等形成序列。

火山物质,特别是火山玻璃的蚀变为粘土矿物和斜发沸石的形成提供了物质基础,斜发沸石可以在成岩作用的影响下进一步形成方沸石。形成方沸石的离子除了来自斜发沸石本身之外,还可以由蒙脱石向伊利石转化提供^[18]。如果方沸石继续埋藏,可能向其他类型的沸石或者钠长石发生转化,这种转化受到地层温度和孔隙流体中离子类型的影响,如在120℃的碱性环境下可以形成片沸石,随着温度的继续升高可以向浊沸石转化。 Ca^{2+} 的参与也可以使得方沸石形成方解石。

火山物质的蚀变可以产生多种离子,其中尤以充足的 Al^{3+} 和 Na^{+} 对于方沸石的形成最为重要。根据Si/Al比值的差异可以对沉积岩中的成岩型方沸石进一步划分,Coombes和Whetten研究认为^[63]:当方沸石中的Si/Al比值介于2.43~2.69时,其成因方式为碱性水

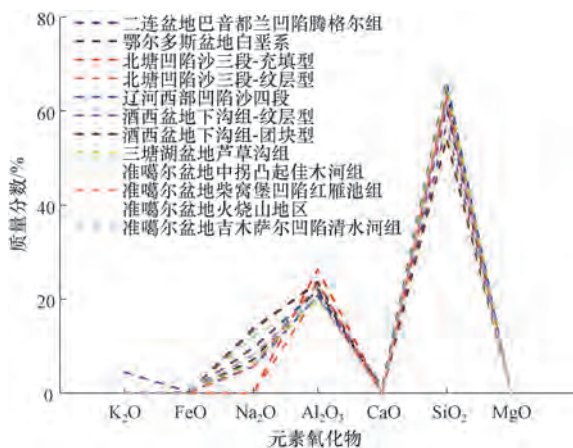


图6 中国陆相湖盆中方沸石主要元素含量对比

Fig.6 Diagrams showing the major element contents of analcime from terrestrial lacustrine basins of China

(北塘凹陷仅有Al和Si的电子探针数据,样品测试值来自多篇文章加权平均^[23,27-32,34-36,37,39,49]。)

表 2 热液喷流型方沸石的地球化学特征
Table 2 Geochemical characteristics of analcime out of hydrothermal exhalation

构造	层位	沉积环境	沉积水体性质	岩性	白云石类型	有序度	微量元素特征	REE/(10 ⁻⁶)	稀土特征	Eu 及 Ce 异常	$\delta^{13}\text{C}(\text{VPDB})/\%$	$\delta^{18}\text{O}(\text{VPDB})/\%$	均一化温度/°C
酒西盆地 青西凹陷	下白垩统 下沟组	深湖	咸水	白云岩	含铁白云石	0.36 ~ 0.63 (0.43)	Sr, Ba, Mn, Ni, Co, V 和 Cr 富集; Ti, Cs, Rb 和 Zr 亏损	a: 54.66 ~ 453.44 (171.97); b: 130.65 ~ 476.76 (270.53)	Eu 明显异常, Ce 弱异常	a: 1.79 ~ 5.82(3.86) b: 4.02 ~ 4.50(4.22)	a: -14.15 ~ -5.89 (-9.69); b: -11.86 ~ -9.70 (-10.78)	31.0 ~ 89.4	
三塘湖盆地 跃进沟	中二叠统 芦草沟组	半深湖 - 深湖	半咸 - 咸水、 强还原	白云岩	含铁白云石、白云石	0.48 ~ 0.58	—	19.68 ~ 202.53 (92.43)	Eu 负异常, Ce 弱正异常	-4.1 ~ 8.3 (-0.5)	-21.1 ~ 5.0 (-10.94)	37.6 ~ 127.5 (69.4)	
准噶尔盆地 吉木萨尔 凹陷	二叠系 平地泉组	半深湖 - 深湖	咸水、还原	泥晶白云岩、泥质岩	富铁白云石、方解石	—	Co, Cu, Ni, P, Zn 和 Rb 富集	80.34 ~ 435.20 (171.34)	LREE 富集, HREE 亏损	—	—	Cal: 134.7 ~ 400(180.68) Dol: 320.95	
渤海湾盆地 北塘凹陷	古近系 沙河街组	半深湖 - 深湖	还原	含方沸石白云岩、方沸石岩	铁白云石、白云石	—	Ba, Sr 和 Zn 富集; Ni, Cr, Rb 和 Co 等丰度偏低	127.09 ~ 204.08 (170.16)	Eu 弱负异常, Ce 正异常	$\delta^{13}\text{C}$ 偏正 2.8‰ ~ 6.3‰	$\delta^{18}\text{O}$ 偏负 -5.9‰ ~ 12.1‰	26.4 ~ 76.64 (50 - 60)	
二连盆地 白音查干 凹陷	白垩系 腾格尔组	半深湖 - 深湖	咸水、还原	白云质泥岩、泥质白云岩	铁白云石、白云石	—	Pb, Sb, Tl, W, Mo, 和 Bi 富集; V, Cr, Co 和 Ni 亏损	—	—	—	—	—	—

注:表中样品数据来自前人文献中测试结果^[23-29,38-39,60]。
“—”表示无数据;有序度、同位素和均一化温度来自于方沸石伴生的碳酸盐矿物。表中数据为:最小值 ~ 最大值(平均值)。
a 为纹层状泥晶含铁白云岩;b 为泥晶含铁白云石角砾岩。

和酸性火山玻璃反应,该成因的方沸石热稳定性较高;当 Si/Al 比值为 2.43 左右,其成因为埋藏变质作用(包括沉积岩后生作用),这种成因的方沸石具中等热稳定性;当 Si/Al 比值介于 2.00~2.28,为溶液析出型方沸石,是高碱性水与其他沉积物(如碎屑粘土矿物等)相互作用生成的,常与沉积的白云石共存,热稳定性差^[62]。

不同的成岩型方沸石往往混杂分布,碱性地层水环境可能是火山物质蚀变的结果,而火山物质大量发育可能受到构造活动与沉积相类型的控制。结合前文的电子探针研究,得到以下结论:①纹层状方沸石的 Si/Al 对应于溶液析出型,是成岩成因(粘土矿物转化);②热液喷流成因的方沸石的 Si/Al 变化范围较大,可能与形成时较高的温度和复杂的环境有关;③火山物质蚀变型方沸石是最常见的方沸石类型;④相同凹陷不同产状的方沸石可能具有不同的化学成因,而来自不同凹陷的方沸石可能具有相同的成因;⑤东西部陆相湖盆沉积岩中的方沸石之间没有明显的成因差异。

由于沉积型方沸石的形成受到地层水盐度的影响,而湖盆内水体从中部向边缘碱性逐渐减弱,横向上沸石种类从低硅的浊沸石向高硅的方沸石、片沸石发生变化。郭沫贞对准噶尔盆地西北缘中拐凸起部分湖盆中的沸石进行电子探针研究表明^[64],同一物源区浊沸石、方沸石和片沸石的 Si/Al 比值依次为 2.3, 2.8 和 3.7~4.1,存在逐渐升高的趋势,这与湖泊水体盐度

变化相吻合^[26-27]。

5 方沸石对油气储层的影响

方沸石对于油气储层的影响主要表现在两个方面^[1]。其一,成岩早期方沸石封闭了孔隙和裂缝空间,提高了储层的抗压实能力;致密胶结方沸石的发育对储层质量破坏最大,其发育受沉积相带控制,在沉积了大量火山岩屑的冲积扇相中较为常见(表 3)。其二,方沸石在地层中不稳定,生烃高峰前排出的有机酸以及粘土矿物转化所释放的无机酸都会使得方沸石发生溶解。朱世发、郭沫贞、韩守华、李振华等^[13-15,19,65]的研究表明:方沸石次生孔隙的发育能够大大改善储层物性。火山岩风化壳储层中也可以见到早期沸石充填物的大量溶解^[66]。浊沸石往往沿解理面和晶缝发生溶蚀,而方沸石的溶蚀从靠近颗粒的边缘部位开始(图 3e)。

不同产状的方沸石发育的环境存在差异,对储层产生的影响也并不相同。粘土矿物转变产生的方沸石和喷溢复合型产状方沸石发育于深湖和半深湖环境,与常规油气储层的关系不大,但与非常规油气储层(如致密油、页岩油等)的关系有待进一步探讨,因为方沸石可以影响岩石脆性,提高细粒沉积(如页岩)的可压裂性^[16,67-68]。总而言之,方沸石对于储层的影响除了与方沸石自身的性质有关之外,也受到物源体系和沉积相带的综合作用^[17-19,67,69]。

表 3 中国含油气盆地沉积岩中方沸石与沉积物源特征^[48-49]

Table 3 Analcime in sedimentary rocks in petroliferous basins of China and its provenance features^[48-49]

地区	埋深/m	发育层位	沉积相带	主要岩性	岩石类型	主要岩屑成分
准噶尔盆地 克拉玛依五一八区	4 060~4 280	二叠系乌尔禾组	洪积扇	砾岩、砂砾岩	火山岩屑质 砂砾岩	火山岩
准噶尔盆地西北缘 夏子街-玛湖西斜坡	3 100~3 300	三叠系克拉玛依组	扇三角洲前缘	细、中、粗砂岩, 砂砾岩	岩屑长石砂岩、 岩屑砂岩	火山岩
准噶尔盆地东部 火烧山	1 500~1 700	二叠系平地泉组	扇三角洲前缘	细、中、粗砂岩, 砂砾岩	长石岩屑砂岩、 岩屑长石砂岩	火山岩
塔里木盆地塔 北羊塔-英买力	4 250~4 550	白垩系巴什基奇克组, 古近系库姆格列木群底砂岩段	扇三角洲前缘、 辫状河三角洲前缘	细、中、粗砂岩, 砂砾岩	长石岩屑砂岩、 岩屑长石砂岩	火山岩
渤海湾盆地 沧东凹陷	2 900~3 400	古近系孔二段				
渤海湾盆地 北塘凹陷	3 050~3 140	古近系沙三段	前三角洲、 深湖、半深湖	粉砂岩、泥岩、 页岩	细粒沉积物, 与碳酸盐岩 混合沉积	—
渤海湾盆地 辽河拗陷	2 500~2 700	古近系沙四段				

注:“—”表示无数据。

6 结论

1) 中国的陆相湖盆中方沸石产状多样,包括纹层状、粒间胶结物、交代物、裂缝充填物和喷溢型5大类,产状的差异反映出成因环境的不同。

2) 可以采用硅铝比对不同成因的方沸石进行区分,绝大多数方沸石 Si/Al 比值介于 2.0~2.8,个别小于 2.0。

3) 不同成因类型的方沸石在产状和成分上存在差异。热液喷溢型方沸石常与(铁)白云石、方解石和黄铁矿互相紧密包裹;成岩型方沸石可以作为胶结物充填孔隙,交代产物方沸石可以和伊蒙混层粘土矿物共生或在火山物质边缘发育。

4) 方沸石的成岩变化可能破坏或者改善油气储层质量,后期是否发生酸性流体的溶蚀至关重要,这与沉积相带、断裂发育情况和有机质演化程度有关。

参 考 文 献

- [1] Hay R L. Occurrence of zeolites in sedimentary rocks; An overview [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2001, 45 (1): 217-234.
- [2] Bradley. Zeolite beds in the Green River Formation [J]. *Science*, 1928, 67(1725): 73-74.
- [3] Utada. Zeolites in burial diagenesis and low-grade metamorphic rocks [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2001, 45 (9): 277-304.
- [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] Vernik L. A new type of reservoir rock in volcanoclastic sequences [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(6): 830-836.
- [6] Noh J H, Boles J R. Origin of zeolite cements in the Miocene sandstones, north Tejon oil fields, California [J]. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1993, 63(2): 248-260.
- [7] Sheppard R A, Hay R L. Formation of zeolites in open hydrologic systems [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2001, 45 (1): 261-275.
- [8] Langella A, Cappelletti P, Gennaro R D. Zeolites in closed hydrologic systems [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2001, 45 (1): 235-260.
- [9] Iijima A. Zeolites in petroleum and natural gas reservoirs [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2001, 45 (1): 347-402.
- [10] Neuhoﬀ P S. Natural zeolites; occurrence, properties, applications [J]. *American Mineralogist*, 2002, 45(11-12): 1737-1738.
- [11] 孙玉善, 刘新年, 张艳秋, 等. 中国西部地区方沸石胶结相与碎屑岩次生优质储集层形成机制 [J]. *古地理学报*, 2014 (4): 517-526.
- Sun Yushan, Liu Xinnian, Zhang Yanqiu, et al. Analcite cementation facies and forming mechanism of high-quality secondary clastic rock reservoirs in western China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014 (4): 517-526.
- [12] 史燕青, 季汉成, 张国一, 等. 准噶尔盆地阜东斜坡梧桐沟组储层沸石分布特征及成因机制 [J]. *石油科学通报*, 2021, 6 (1): 1-15.
- Shi Yanqing, Ji Hancheng, Zhang Guoyi, et al. Characteristics and genetic mechanisms of widely distributed zeolites in the Wutonggou Formation reservoir in the southern Junggar Basin [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 6 (1): 1-15.
- [13] 郭沫贞, 徐洋, 寿建峰, 等. 准噶尔盆地西北缘二叠系碎屑岩次生孔隙发育控制因素 [J]. *沉积学报*, 2017, 35 (2): 330-342.
- Guo Mozhen, Xu Yang, Shou Jianfeng, et al. Controlling factors of secondary pore development and petroleum exploration significance of Permian clastic rocks in northwest margin of Junggar Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35 (2): 330-342.
- [14] 韩守华, 余和中, 斯春松, 等. 准噶尔盆地储层中方沸石的溶蚀作用 [J]. *石油学报*, 2007, 28 (3): 51-54+62.
- Han Shouhua, Yu Hezhong, Si Chunsong, et al. Corrosion of analcite in reservoir of Junggar Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28 (3): 51-54+62.
- [15] 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.
- [16] 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 & Experiment*, 2020, 42 (4): 596-603.
- [17] 孙玉善. 应用沸石组合特征分析克拉玛依油区石炭三叠系成岩阶段与含油关系 [J]. *新疆石油地质*, 1993, 14 (1): 25-31+33.
- Sun Yushan. Significance of diagenetic stages to oil bearing in Carboniferous and Permian formations of karamay oil field as depicted by zeolite combination characteristic [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1993, 14 (1): 25-31+33.
- [18] 朱世发, 朱筱敏, 吴冬, 等. 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*, 2014, 35 (1): 77-85.
- Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Wu Dong, et al. Alteration of volcanics and its controlling factors in the Lower Permian reservoirs at northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35 (1): 77-85.
- [19] 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, 38 (1): 1-7.
- Li Zhenhua, Qiu Longwei, Shi Zheng, 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 (Edition of Natural Science), 2014, 38(1): 1-7.
- [20] 王孝明, 操应长, 远光辉, 等. 中拐地区二叠系致密砂岩成岩作用及其控制因素[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(9): 46-54.
Wang Xiaoming, Cao Yingchang, Yuan Guanghui, et al. Diagenetic characteristics and controlling factors of the Permian tight sandstone reservoirs in Zhongguai area[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(9): 46-54.
- [21] 万青青, 刘洛夫, 肖飞, 等. 准噶尔盆地车排子地区下白垩统清水河组储层成岩作用及物性影响因素[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(7): 1264-1276.
Wan Qingqing, Liu Luofu, Xiao Fei, et al. Diagenesis and factors affecting reservoir properties of the Lower Cretaceous Qingshuihe Formation, Chepaizi area, Junggar Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1264-1276.
- [22] 许琳, 常秋生, 杨成克, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油储层特征及含油性[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 535-549.
Xu Lin, Chang Qiusheng, Yang Chengke, et al. Characteristics and oil bearing capability of shale oil reservoir in the Permian Lucaogou Formation, Jimusaer Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 535-549.
- [23] 李红, 柳益群, 张丽霞, 等. 准噶尔盆地东部中二叠统平地泉组具“斑状”结构热水喷流沉积岩的成因及地质意义[J]. 古地理学报, 2017, 19(2): 211-226.
Li Hong, Liu Yiqun, Zhang Lixia, et al. Origin and geological significance of sedimentary exhalative rocks with "porphyritic" structures in the Middle Permian Pingdiquan Formation, eastern Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(2): 211-226.
- [24] 于进, 张奎华, 林春明, 等. 准噶尔盆地柴窝堡凹陷二叠系储层成岩作用[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(3): 95-104.
Yu Jin, Zhang Kuihua, Lin Chunming, et al. Diagenesis characteristics of Permian reservoir in Chaiwopu Depression, Junggar Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(3): 95-104.
- [25] 柳益群, 周鼎武, 焦鑫, 等. 一类新型沉积岩: 地幔热液沉积岩——以中国新疆三塘湖地区为例[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 773-781.
Liu Yiqun, Zhou Dingwu, Jiao Xin, et al. A new type of sedimentary rocks: mantle-originated hydroclastites and hydrothermal exhalites, Santanghu Area, Xinjiang, NW China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 773-781.
- [26] 梁浩, 罗权生, 孔宏伟, 等. 三塘湖盆地火山岩中沸石的成因及其储层意义[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 537-543.
Liang Hao, Luo Quansheng, Kong Hongwei, et al. Formation and distribution of zeolite in volcanic rock and its effect on reservoirs in Santanhu Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 537-543.
- [27] 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, sanidine, dolomite, quartz, etc. in Lucaogou Formation, middle Permian, Santanghu Basin, northeast Xinjiang, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(2): 205-218.
- [28] 钟大康, 姜振昌, 郭强, 等. 内蒙古二连盆地白音查干凹陷热水沉积白云岩的发现及其地质与矿产意义[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 587-595.
Zhong Dakang, Jiang Zhenchang, Guo Qiang, et al. Discovery of hydrothermal dolostones in Baiyinchagan Sag of Erlian Basin, Inner Mongolia, and its geologic and mineral significance [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 587-595.
- [29] 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): 3733-3748.
Yang Zhe, Zhong Dakang, Zhangshuo, et al. Mineralogical and trace-element constrains on the genesis of zeolite in Lower Cretaceous lacustrine rocks from Baiyinchagan Sag, Erlian Basin, China [J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3733-3748.
- [30] 孙书洋, 朱筱敏, 魏巍, 等. 二连盆地巴音都兰凹陷阿尔善组云质岩储层特征[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(2): 87-98.
Sun Shuyang, Zhu Xiaomin, Wei Wei, et al. Characteristics of dolomitic reservoirs of Aershan Formation in Bayindulan Sag, Erlian Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(2): 87-98.
- [31] 郑荣才, 文华国, 李云, 等. 甘肃酒西盆地青西凹陷下白垩统下沟组湖相喷流岩物质组分与结构构造[J]. 古地理学报, 2018, 20(1): 1-18.
Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Li Yun, et al. Compositions and texture of lacustrine exhalative rocks from the Lower Cretaceous Xigou Formation in Qingxi sag of Jiuxi Basin, Gansu [J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(1): 1-18.
- [32] 林培贤, 林春明, 姚悦, 等. 渤海湾盆地北塘凹陷古近系沙河街组三段白云岩中方沸石的特征及成因[J]. 古地理学报, 2017, 19(2): 241-256.
Lin Peixian, Lin Chunming, Yao Yue, et al. Characteristics and causes of analcime distributed in dolostone of the Member 3 of Paleogene Shahejie Formation in Beitang sag, Bohai Bay Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(2): 241-256.
- [33] 李乐, 姚光庆, 刘永河, 等. 大港油田塘10井区沙河街组方沸石白云岩储层特征[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1210-1220.
Li Le, Yao Guangqing, Liu Yonghe, et al. Characteristics of analcime-dolomite reservoir from Shahejie Formation in Well Tang10 block of Dagang oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(10): 1210-1220.
- [34] 宋柏荣, 韩洪斗, 崔向东, 等. 渤海湾盆地辽河拗陷古近系沙河街组四段湖相方沸石白云岩成因分析[J]. 古地理学报, 2015, 17(1): 33-44.
Song Borong, Han Hongdou, Cui Xiangdong, et al. Petrogenesis analysis of lacustrine analcime dolostone of the Member 4 of Paleogene Shahejie Formation in Liaohe Depression, Bohai Bay Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(1): 33-44.
- [35] 邓远, 陈世悦, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段细粒沉积岩形成机理与环境演化[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 811-823.
Deng Yuan, Chen Shiyue, Pu Xiugang, et al. Formation mechanism and environmental evolution of fine-grained sedimentary rocks from

- the second member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 811–823.
- [36] 张跃, 陈世悦, 孟庆爱, 等. 黄骅坳陷沧东凹陷孔二段细粒沉积岩中方沸石的发现及其地质意义[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(4): 37–43.
- Zhang Yue, Chen Shiyue, Meng Qingai, et al. The discovery of analcime in fine-grained sedimentary rocks of the Second Member of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Huanghua Depression; implications for early diagenetic environment[J]. *Petroleum Exploration*, 2015, 20(4): 37–43.
- [37] 肖平. 鄂尔多斯盆地白垩系方沸石的矿物学研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- Xiao Ping. Mineralogical research on Cretaceous analcime in Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geoscience, 2014.
- [38] 肖平, 陆琦, 于吉顺. 鄂尔多斯盆地方沸石的高温 XRD 分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(2): 45–48.
- Xiao Ping, Lu Qi, Yu Jishun. High temperature XRD analysis of analcime in Ordos Basin[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 30(2): 45–48.
- [39] 阮青锋, 陆琦, 邱志惠, 等. 鄂尔多斯沉积型方沸石的晶体结构分析[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(6): 14–21.
- Ruan Qingfeng, Lu Qi, Qiu Zhihui, et al. Crystal structure solution from X-ray powder diffraction data of deposition analcime, Erdos, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(6): 14–21.
- [40] 甘贵元, 雷振锋, 赵东升, 等. 柴达木盆地西部南区沸石分布特征及成因[J]. *中国石油勘探*, 2009, 14(2): 46–49+7.
- Gan Guiyuan, Lei Zhenfeng, Zhao Dongsheng, et al. Zeolite distribution characteristics and contributing factors in southern region of west Qaidam Basin[J]. *Petroleum Exploration*, 2009, 14(2): 46–49+7.
- [41] 申少华, 张术根, 王大伟. 天然沸石及其开发利用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2000, 20(4): 34–38.
- Shen Shaohua, Zhang Shugen, Wang Dawei. Progress in the study of natural zeolite and its exploitation[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2000, 20(4): 34–38.
- [42] 崔光, 郭宜娇, 陈斌, 等. 沸石的结构和应用[J]. *北京信息科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(4): 54–58+63.
- Cui Guang, Guo Yijiao, Chen Bin, et al. Structure and applications of porous zeolite[J]. *Journal of Beijing Information Science & Technology University*, 2017, 32(4): 54–58+63.
- [43] 胡宏杰, 金梅, 曹耀华, 等. 沸石的水热化学合成工艺特征[J]. *矿产保护与利用*, 1999, 19(1): 16–19.
- Hu Hongjie, Jin Mei, Cao Yaohua, et al. Characteristics of zeolite synthesis and its hydrothermal chemistry[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 1999, 19(1): 16–19.
- [44] 陈世悦. 矿物岩石学[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2002: 31–44.
- Chen Shiyue. Mineralogy Petrology[M]. Qingdao: China University of Petroleum press, 2002: 31–44.
- [45] Remy R R. Distribution and origin of analcime in marginal lacustrine mudstones of the Green River Formation, south-central Uinta Basin, Utah[J]. *Clays & Clay Minerals*, 1989, 37(5): 419–432.
- [46] English P M. Formation of analcime and moganite at Lake Lewis, central Australia; significance of groundwater evolution in diagenesis[J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 143(3): 219–244.
- [47] 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.
- [48] 令伟伟. 准噶尔盆地东部火烧山地区平地泉组方沸石特征及成因分析[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- Ling Weiwei. Occurrence and origin analysis of analcime in Pingdiquan Formation, Huoshaoshan Area, eastern Junggar Basin, Xinjiang, China[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [49] 白杨. 新疆准噶尔东部火烧山二叠系平地泉组和吉木萨尔芦草沟组方沸石特征及与致密油的关系[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- Bai Yang. Characteristics and its correlation with oil of analcimes of the Permian Pingdiquan Formation in the east of Junggar Basin and Lucaogou Formation in the Jimusar Sag, Xinjiang[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [50] 纪杰, 吴孔友, 刘寅, 等. 准噶尔西北缘中拐地区红车断裂带胶结封闭作用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2019, 38(1): 17–25.
- Ji Jie, Wu Kongyou, Liu Yin, et al. Cementing and sealing actions of Hongche Fault Belt in Zhongguai area of northwest margin of Junggar Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(1): 17–25.
- [51] 张丽辰, 吴孔友, 何文军, 等. 准噶尔盆地北三台凸起断裂结构特征及成岩封闭作用[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(5): 607–616.
- Zhang Lichen, Wu Kongyou, He Wenjun, et al. Structural characteristics and diagenetic sealing of faults in the Beisantai Swell, Junggar basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(5): 607–616.
- [52] 白杨, 李哲萱, 张桥, 等. 方沸石的成因分类综述[J]. *西部资源*, 2016, 43(6): 54–57.
- Bai Yang, Li Zhexuan, Zhang Qiao, et al. The review of genetic classification of analcime[J]. *Western Resource*, 2016, 43(6): 54–57.
- [53] 蒋云, 赵珊茸, 马昌前, 等. 青藏高原原雄地区方沸石响岩的主要造岩矿物特征: 原生方沸石的证据[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2008, 33(3): 320–328.
- Jiang Yun, Zhao Shanrong, Ma Changqian, et al. Characteristics of rock-forming minerals of analcime phonolite in the Damxung Area, Qinghai-Tibet Plateau: evidence for primary analcime[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience*, 2008, 33(3): 320–328.
- [54] 于丽芳, 赵文霞, 陈建林, 等. 西藏当惹雍错富钾和富钠碱性火山岩的矿物学研究及其成因指示[J]. *大地构造与成矿学*, 2012, 36(2): 274–283.
- Yu Lifang, Zhao Wenxia, Chen Jianlin, et al. Mineralogical characteristics of the sodium-and potassic-rich alkaline volcanic rocks at Tangra Yumco, SE Tibet; implications for petrogenesis[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2012, 36(2): 274–283.
- [55] 赵文霞, 于丽芳, 陈建林, 等. 青藏米巴勒地区中新世钠质方沸石(霞石)响岩中单斜辉石环带研究: 对岩浆-构造演化的启示[J]. *岩石学报*, 2011, 27(7): 2073–2082.

- Zhao Wenxia, Yu Lifang, Chen Jianlin, et al. The zoning structure of clinopyroxene phenocrysts in the Miocene sodium analcime (nepheline) phonolite in Mibale area, Tibet: Implications for the magmatic and tectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(7): 2073 – 2082.
- [56] 陈先沛, 高计元, 陈多福, 等. 热水沉积作用的概念和几个岩石学标志[J]. *沉积学报*, 1992, 10(3): 124 – 132.
- Chen Xianpei, Gao Jiyuan, Chen Duofu, et al. The concept of hydrothermal sedimentation and its petrological criteria [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1992, 10(3): 124 – 132.
- [57] 李江海, 牛向龙, 冯军. 海底黑烟囱的识别研究及其科学意义 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 17 – 25.
- Li Jianghai, Niu Xianglong, Feng Jun. The identification of the fossil black smoker chimney and its implication for scientific research [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(1): 17 – 25.
- [58] 王兴涛. 现代海底热液活动的热液循环及烟囱体研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- Wang Xingtao. Studies on hydrothermal circulation and smokers of modern seafloor hydrothermal activity [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [59] 李学良, 张奎华, 林会喜, 等. 准噶尔盆地西北缘二叠系风城组储层发育特征及油气富集因素 [J]. *特种油气藏*, 2019, 26(1): 37 – 44.
- Li Xueliang, Zhang Kuihua, Lin Huixi, et al. Reservoir characterization and hydrocarbon enrichment factors of the Permian Fengcheng Formation in the northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(1): 37 – 44.
- [60] 李乐. 塘沽地区沙河街组含方沸石白云岩沉积环境及成因探讨 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- Li Le. Study on sedimentary environment and origin of analcime – bearing dolomite of Shahejie Formation in Tanggu Area [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
- [61] 王登红, 付小方, 应汉龙. 四川西部现代热泉沉积物地球化学特征及意义 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2007, 37(5): 878 – 883.
- Wang Denghong, Fu Xiaolong, Ying Hanlong. Geochemistry and significance of modern hot-spring sinters in western Sichuan [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(5): 878 – 883.
- [62] 肖昌浩, 王庆飞, 周兴志, 等. 腾冲地热区高温热水中稀土元素特征 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(6): 1938 – 1944.
- Xiao Changhao, Wang Qingfei, Zhou Xingzhi, et al. Rare-earth elements in hot spring waters in the Tengchong geothermal area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(6): 1938 – 1944.
- [63] Coombs D S, Whetten T. Composition of analcime from sedimentary and burial metamorphic rocks [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1967, 78(2): 269.
- [64] 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 Petrologica Sinica*, 2016, 37(6): 695 – 705.
- [65] 朱世发, 刘欣, 朱筱敏, 等. 准噶尔盆地克一百逆掩断裂带上下盘储层差异性及其形成机理 [J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 194 – 201.
- Zhu Shifa, Liu Xin, Zhu Xiaomin, et al. The formation mechanism of reservoir differences between the hanging wall and the foot wall of Ke-Bai overthrust fault, Junggar Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 194 – 201.
- [66] 田伟超, 卢双舫, 王伟明, 等. 三塘湖盆地卡拉岗组火山岩风化壳储层微纳孔隙演化机制及与含油性关系 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(6): 1281 – 1294.
- Tian Weichao, Lu Shuangfang, Wang Weiming, et al. Evolution mechanism of micro/nano scale pores in volcanic weathering crust reservoir in the Kalagang Formation in Santanghu Basin and their relationship with oil bearing property [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(6): 1281 – 1294.
- [67] 张文伟. 细粒沉积岩储层微观特征研究方法及应用 [J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(4): 11 – 15.
- Zhang Wenwei. Microcosmic characteristics of fine-grained sedimentary reservoirs and its application [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2019, 33(4): 11 – 15.
- [68] 刘秀婵, 陈西洋. 鄂尔多斯盆地富县地区长8油层组致密油成藏主控因素分析 [J]. *油气藏评价与开发*, 2019, 9(1): 1 – 7.
- Liu Xiuchan, Chen Xipan. Analysis on main controlling factors of tight oil reservoirs in Chang-8 reservoir of Fu County, Ordos Basin [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2019, 9(1): 1 – 7.
- [69] 陈贤良, 纪友亮, 杨克明. 川西中段上沙溪庙组层序格架下成岩相及储层评价 [J]. *断块油气田*, 2019, 26(5): 550 – 554.
- Chen Xianliang, Ji Youliang, Yang Keming. Diagenetic facies and reservoir evaluation in sequence framework of Upper Shaximiao Formation in middle area of western Sichuan Depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2019, 26(5): 550 – 554.

(编辑 张玉银)