

文章编号: 0253-2697(2016)06-0695-11 DOI:10.7623/syxb201606001

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

郭沫贞 寿建峰 徐 洋 郭华军 邹志文 韩守华

(中国石油杭州地质研究院 浙江杭州 310023)

摘要:准噶尔盆地中拐—西北缘地区深层二叠系碎屑岩中普遍发育沸石类胶结物,主要有浊沸石、片沸石及方沸石。成岩后期由于烃源岩热演化及大气淡水作用导致成岩介质环境由碱性环境部分转化为酸性环境,形成沸石次生孔隙发育带,这对在二叠系深层碎屑岩中寻找有利储集体意义重大。通过对该区 120 余口井 1400 多片铸体薄片分析,结合岩心、扫描电镜、电子探针、黏土矿物及物源区母岩性质等综合研究,认为:①3 类沸石胶结物在时空上呈规律性发育。横向上从盆缘向盆内,沸石成带分布,依次发育片沸石、方沸石和浊沸石;纵向从下至上,浊沸石胶结程度减弱,方沸石胶结程度增强。②母岩成分的差异是形成不同沸石矿物的物质基础。在碱性成岩环境中,富中基性火山岩屑的碎屑岩,易形成以浊沸石为主的沸石胶结物;富中酸性、酸性火山岩屑的碎屑岩,易形成以方沸石为主的沸石胶结物。③在同一性质岩屑组成的情况下,成岩流体性质决定了沸石的纵横向分布特征。湖盆中心 pH 值高、盐度高及钙离子富集,易形成浊沸石胶结;湖盆边缘 pH 值降低、盐度降低及钙离子富集程度减少,易形成方沸石、片沸石胶结。通过对各类沸石胶结物分布特征及形成条件研究,提出了中拐—西北缘地区碎屑岩沸石胶结物的发育规律,这对认识中拐—西北缘地区碎屑岩岩矿特征、成岩环境及寻找沸石溶蚀孔型储层有重要指导意义。

关键词:沸石胶结物;分布规律;控制因素;二叠系;准噶尔盆地

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Distribution and controlling factors of Permian zeolite cements in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin

Guo Mozhen Shou Jiangfeng Xu Yang Guo Huajun Zou Zhiwen Han Shouhua

(PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Zhejiang Hangzhou 310023, China)

Abstract: The zeolite cements are well developed in deep Permian clastic rocks of Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin, including laumontite, heulandite and analcite. Due to the thermal evolution of source rocks and meteoric fresh water action in late diagenesis stage, diagenetic medium environment was partially changed from alkaline environment to acidic environment, thus forming the development zones of zeolite secondary pores. This has great significance to find favorable reservoir bodies in deep Permian clastic rocks. Based on the thin slice analysis of 1400 pieces of castings in more than 120 wells in combination with core observation, scanning electron microscopy, electron probe, clay mineral and provenance parent rock lithology analysis, and etc., the following conclusion is obtained: (1) Three types of zeolite cements show a regularity in spatiotemporal development. Horizontally from basin edge to basin center, zeolite shows a belt-like distribution; in this zone, heulandite, analcite and laumontite are developed sequentially; vertically from bottom to top, the cementation degree of laumontite is decreased, while that of analcite is increased. (2) Differences in parent rock components provide the material basis to form various zeolite minerals. In the alkaline diagenetic environment, clastic rocks rich in intermediate-basic volcanic debris were prone to form zeolite cements dominated by laumontite; clastic rocks rich in intermediate-acid and acid volcanic debris were prone to form zeolite cements dominated by analcite. (3) Under the condition of debris components with the same properties, the horizontal and vertical distribution characteristics of zeolite are determined by diagenetic fluid properties. The lacustrine basin center is characterized by high pH value, high salinity and rich calciumion, and an advantage for forming laumontite cements; the basin edge is characterized by a reduction in pH value, salinity and calciumion enrichment degree, and an advantage for forming analcite and heulandite cements. Through the research on the distribution characteristics and formation conditions of various zeolite cements, the development law of clastic zeolite cements in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin was put forward in this study, which has an important guiding significance for understanding the characteristics and diagenetic environment of clastic rocks as well as finding favorable zeolite solution-pore reservoirs in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin.

Key words: zeolite cement; distribution law; control factors; Permian; Junggar Basin

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB239002)资助。

第一作者及通信作者:郭沫贞,男,1974年3月生,1997年获江汉石油学院学士学位,2000年获石油大学(北京)硕士学位,现为中国石油杭州地质研究院高级工程师,主要从事油气储层及油藏评价研究。Email:guomz_hz@petrochina.com.cn

引用:郭沫贞,寿建峰,徐洋,郭华军,邹志文,韩守华.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.

Cite:Guo Mozhen,Shou Jiangfeng,Xu Yang,Guo Huajun,Zou Zhiwen,Han Shouhua.Distribution and controlling factors of Permian zeolite cements in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin[J].Acta Petroli Sinica,2016,37(6):695-705.

准噶尔盆地中拐—西北缘地区二叠系碎屑岩成分成熟度极差,岩屑成分占到70%以上,岩屑类型主要为火山岩岩屑^[1-3],胶结物以浊沸石、片沸石、方沸石及方解石为主,次为硅质、高岭石及钠长石等^[4-6]。前人对该区沸石矿物的研究,多限于小范围、单类沸石胶结物如浊沸石、方沸石的研究^[1-8],对准噶尔盆地中拐—西北缘地区发育的3类沸石胶结物的成岩分布模式、时空分布规律和控制因素缺乏整体、系统的研究。目前勘探结果证实,中拐—西北缘地区二叠系已发现的油藏或高产油气井,其储集孔隙类型中沸石次生溶蚀孔占相当大的比例^[1,7,8]。因而对于埋深大于3500 m、成岩压实作用强烈、剩余原生孔不发育的二叠系深层油气勘探来说,沸石次生溶蚀孔的发育对研究区深层二叠系油气勘探意义重大,而沸石胶结物的分布规律、发育模式是研究沸石次生孔隙发育带的基础。

沸石作为碎屑岩自生矿物,在国内外多个盆地多个层位被广泛研究。如中国四川盆地川中地区侏罗系下沙溪庙组^[9-11]、鄂尔多斯盆地上三叠统延长组^[11-14]、松辽盆地北部白垩系泉头组、登娄库组和营城组^[15,16]、酒泉盆地白垩系下沟组^[17]及准噶尔盆地腹部和西北缘二叠系^[4-8,18],众多学者对沸石胶结物特别是浊沸石研究较深入。国外学者对美国加里弗尼亚 Santa Ynez 盆地第三系^[19]、美国 Southern San Joaquin 盆地中新统^[20]、南坦桑尼亚 Ruhuhu 盆地下三叠统^[21]、美国内华达州帕犹特方山^[22]、日本本州北部新庄盆地第三系剖面^[23]、美国新墨西哥州巴列 (Valles) 破火山口湖泊^[24]及美国伊诺湖现代沉积^[25]等盆地中沸石的分布规律也有深入研究,其研究主要集中在沸石矿物形成的原始物质构成、热力学条件、水介质环境及其后期溶蚀对储层性能改善等方面。沸石矿物成因中对浊沸石的研究较多,认为浊沸石的形成主要有4种途径:①高岭石和方解石反应生成浊沸石^[26];②斜长石、中基性火山岩岩屑及凝灰岩岩屑蚀变形成浊沸石^[13,27-33];③方沸石、片沸石转化形成浊沸石^[4,34-37];④温度介于200~250℃,低变质作用形成浊沸石^[26,38]。但随近年来不少研究者通过浊沸石产出的层位、现代湖泊沸石矿物分布^[24,25]、野外露头^[22,23]、包裹体分析^[12]、浊沸石的热力学条件[化学反应的吉布斯自由能增量(ΔG)]^[16,26,39]的研究,认为碎屑岩中浊沸石的形成主要为第②类、第③类成因。认为沸石的形成特别浊沸石的形成是在火山物质丰富、水介质为高pH值、高碱

金属浓度的碱性流体,并在一定的温度、压力条件下形成的^[27-33];或者是在钙离子富集的情况下,满足一定的温度和压力,早期形成的沸石(如斜发沸石和方沸石)向片沸石转化,片沸石进而转化为浊沸石^[4,34-37]。认为在沸石形成过程中流体碱度和盐度分布对沸石的分布也有明显的控制作用^[25,40]。其余2类成因,研究者认为其形成温压条件较高,在碎屑岩中形成浊沸石的难度较大,如高岭石和方解石反应生成浊沸石,其形成的最低温度约为174℃^[39]。

笔者依据研究区120口井1400多片铸体薄片镜下鉴定资料,50余块扫描电镜,300多块黏土矿物分析资料及9块样品电子探针分析资料,旨在分析研究区二叠系碎屑岩各类沸石胶结物的形成条件、各类沸石胶结物的纵横向分布特征及其控制因素,明确研究区碎屑岩沸石胶结物的发育规律,为研究区沸石溶蚀孔型储层预测奠定基础。

1 地质背景

准噶尔盆地是中国西北大型含油气盆地之一,盆地中拐—西北缘地区是中国石油新疆油田公司重要的油气产区,其构造位置处于红车断裂带、克百断裂带、乌夏断裂带等大型逆冲断裂带^[41-43]的东部、东南部及南部,盆1井西凹陷的西部及沙湾凹陷的北部,含中拐凸起、达巴松凸起、夏盐凸起、英西凹陷及玛湖凹陷(图1)。

研究区二叠系发育有佳木河组、风城组、夏子街组、下乌尔禾组和上乌尔禾组,二叠系各层组向盆地边缘依次超覆在石炭系之上。二叠系上乌尔禾组(P_3w)岩性以灰褐色砂砾岩为主,夹灰褐色泥质粉砂岩和砂岩,上部为褐色泥岩,上乌尔禾组与下伏地层不整合接触。下乌尔禾组(P_2w)岩性为褐色砂砾岩与褐色粉砂质泥岩、泥岩互层,与下伏地层呈整合接触关系。夏子街组(P_2x)岩性为灰褐色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、含砾砂岩与灰绿色、杂色砂砾岩互层,与下伏地层呈整合接触关系。下二叠统风城组(P_1f)岩性主要为灰绿色砂砾岩夹灰绿色细砂岩、粉砂质泥岩,底部为灰色凝灰岩,与下伏地层不整合接触。佳木河组(P_1j)上部主要为灰绿色、杂色砂砾岩夹薄层杂色泥岩,下部岩性较细,主要为灰色、灰黑色泥岩和泥质粉砂岩互层,夹有安山岩和凝灰岩,与下伏地层不整合接触。整体上二叠系由佳木河组发育的一套火山岩—火山碎屑岩和正常碎屑岩沉积,向上过渡为乌尔禾组发育的扇三角洲

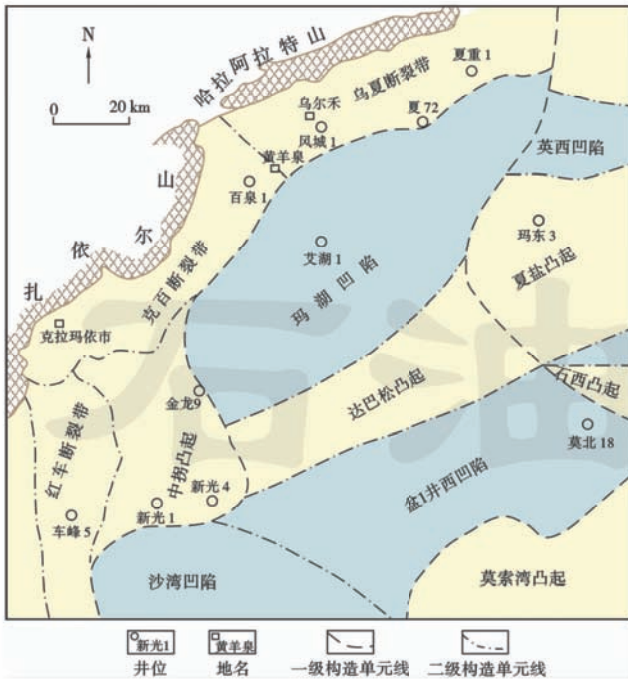


图1 准噶尔盆地中拐—西北缘地区构造位置

Fig. 1 Tectonic location of Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin

相和湖泊相。沉积岩性主要以砂砾岩为主夹有砂岩、泥岩和泥质粉砂岩。

2 沸石矿物岩石学特征及分布规律

通过对研究区二叠系铸体薄片、扫描电镜及电子探针等资料综合分析,在二叠系岩屑砂砾岩储层中,发现大量沸石矿物是以胶结物和裂隙充填物的形式产出,普遍见于粒间孔隙和裂缝中。沸石矿物呈完好的晶簇状出现,或被溶蚀呈港湾状和穿孔状保存。

2.1 沸石矿物岩石学特征

根据沸石镜下特征和前人X衍射及电子探针分析^[44],中拐—西北缘地区二叠系储层中主要发育浊沸石、方沸石和片沸石3种沸石矿物。

(1) 浊沸石:化学分子式为 $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 。主要发育在中拐地区、玛北及夏盐地区,显微镜下无色或白色,常见两组或一组解理,解理明显,消光角较大,为 $20^\circ \sim 30^\circ$ [图 2(a), 图 2(b)]。自形程度高,常呈柱状、连生状晶体,主要以半充填—全充填粒间孔隙形式析出 [图 3(a), 图 3(b)], 其形成一般晚于片沸石和绿泥石 [图 2(c), 图 2(d)], 而早于方解石析出。显微镜下矿物晶形明显、干净,多是成岩过程中直接析出,由片沸石和方沸石转化现象不明显。由于在成岩后期地层水和有机酸的作用下发生部分或全部溶蚀^[6], 呈现不规则的港湾状见于砂岩颗粒之间。

(2) 方沸石:化学分子式为 $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。主

要发育在中拐地区及夏子街地区,显微镜下无色或白色,为均质体矿物,正交镜下全消光,解理不发育。多以胶结物形式呈不规则状和球粒状充填于粒度较粗、杂基少的砂岩和砂砾岩的粒间孔隙中或微裂缝中 [图 2(e), 图 2(f)]。自形程度高,呈粒状或立方体 [图 3(c)], 其形成常早于方解石 [图 2(e)]。镜下常见早期形成的方沸石在成岩后期地层水和有机酸的作用下发生部分或全部溶蚀^[1], 呈现不规则的港湾状。

(3) 片沸石:为含钙、钠的铝硅酸矿物,化学分子式为 $(\text{Ca}, \text{Na}_2)\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。区内在西北缘及中拐地区西部普遍发育,显微镜下多呈褐色、黄褐色 [图 2(g), 图 2(h)], 呈片状和板状 [图 3(d)], 板条状晶体之间常发育有晶间孔。矿物自形程度较高,见一组完全解理,平行消光或呈消光角很小的斜消光。在成岩过程中一般最早析出,多沿着碎屑颗粒的边缘大致垂直生长 [图 2(d), 图 2(h)], 常以充填一半充填方式产出于碎屑岩粒间孔隙中。

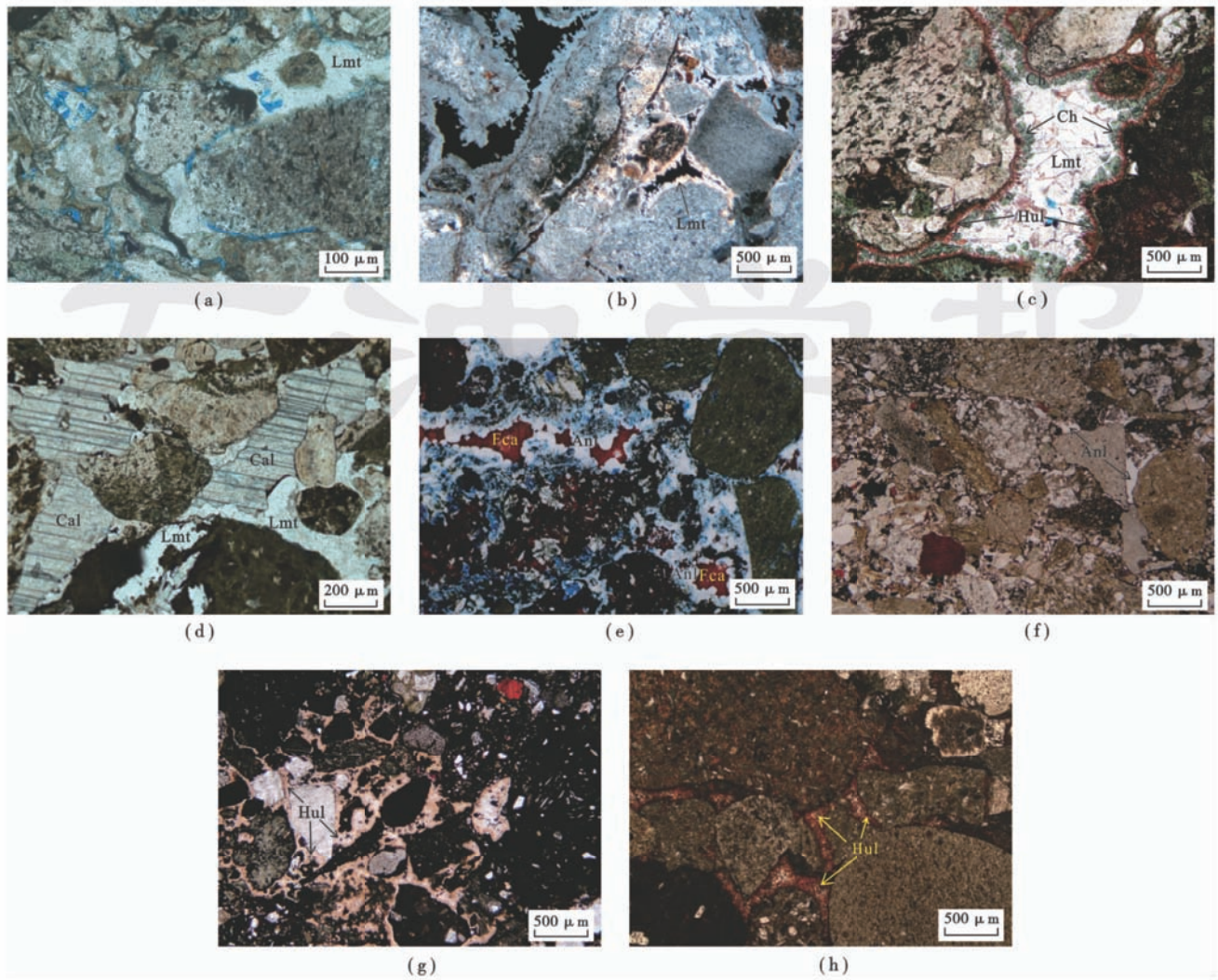
2.2 沸石矿物分布特征

2.2.1 纵向分布规律

依据X衍射黏土矿物成分及镜下鉴定填隙物含量各组(段)的平均含量分析,黏土矿物组成及碎屑岩胶结物组成有明显的规律性(图4)。纵向上自生矿物及组合特征呈现明显分带性^[8],以二叠系上乌尔禾组为界,其下部中、下二叠统碎屑岩黏土矿物以伊/蒙混层及绿泥石为主;胶结物类型主要为浊沸石、方沸石、片沸石、方解石及铁方解石,在上乌尔禾组局部发育有硅质和少量黄铁矿。上部百口泉组和克拉玛依组黏土矿物以高岭石为主,次为伊/蒙混层;胶结物主要以高岭石和方解石为主,次为硅质和菱铁矿。其中二叠系各类沸石在垂向上的分布呈现出规律性的变化,表现在浊沸石胶结物含量由下至上减少,由底部佳木河组平均含量2.4%向上至上乌尔禾组平均含量减至0.6%;而方沸石含量呈现出由少变多的趋势,由底部佳木河组平均含量1.2%向上部至下乌尔禾组平均含量增至2.2%;片沸石主要分布在佳木河组且分布于盆地边缘部位,含量为0.1%~1.5%,上部层位不发育。

2.2.2 平面分布特征

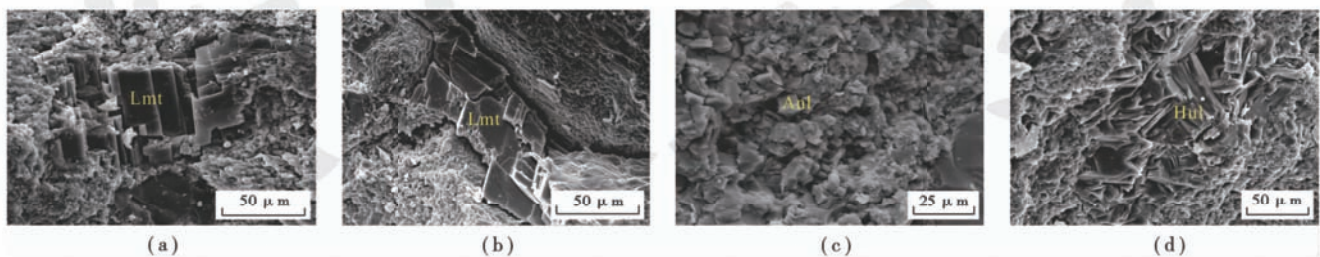
各类沸石的平面分布主要是根据研究区120余口井1400多片铸体薄片鉴定结果,按各井点鉴定结果的平均值,来分析不同类沸石胶结物的平面分布。通过分析,西北缘二叠系沸石胶结物在平面上呈规律性的变化(图5)。浊沸石胶结物主要分布在靠近盆地中心区带,有3个发育区:①中拐凸起东南部拐15井、新光1井及中佳1井一带的佳木河组,其含量比较高,平均最高可达6.0%以上,向盆地边缘减少;②中拐凸起的



(a) 含砾粗一中粒岩屑砂岩, 浊沸石(Lmt)胶结及浊沸石溶孔, P_3w , 金 205 井 3 814. 30 m, 铸体单偏光; (b) 岩屑砂砾岩, 浊沸石(Lmt)胶结溶蚀, 充填沥青, P_3w , 新光 1 井 4 558. 06 m, 铸体薄片正交光(加云母试板); (c) 岩屑砂砾岩, 粒间依次充填片沸石(Hul)、绿泥石(Ch)及浊沸石(Lmt), P_{1j} , 金龙 1 井 3 435. 65 m, 铸体单偏光; (d) 岩屑砂砾岩, 浊沸石(Lmt)早于方解石(Cal)形成, P_{1j} , 中佳 1 井 4 937. 00 m, 铸体单偏光; (e) 岩屑砂砾岩, 粒间方沸石(Anl)及铁方解石(Fca)充填, P_{1j} , 克 85095 井 2 916. 62 m, 铸体单偏光; (f) 岩屑砂砾岩, 方沸石(Anl)胶结, P_{1j} , 拐 5 井 3 254. 82 m, 铸体单偏光; (g) 不等粒岩屑砂岩, 片沸石(Hul)胶结, 残余孔中含油, P_{1j} , 拐 105 井 3 315. 08 m, 铸体单偏光; (h) 砂砾岩, 粒间片沸石(Hul)胶结, P_2w , 克 81 井 3 697. 35 m, 铸体单偏光。

图 2 中拐一西北缘地区二叠系沸石矿物微观特征

Fig. 2 Micro-features of Permian zeolite cements in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin



(a) 含砾中一粗粒岩屑砂岩, 粒间浊沸石(Lmt)晶体形态, P_2w , 玛 001 井 3 591. 26 m; (b) 中粗粒岩屑砂岩, 浊沸石(Lmt), P_3w , 金 201 井 4 117. 98 m; (c) 砂砾岩, 孔隙中析出方沸石(Anl), P_{1j} , 拐 5 井 3 254. 6 m; (d) 砂砾岩, 粒间片沸石(Hul)晶体形态, P_2w , 克 81 井 3 697. 35 m。

图 3 中拐一西北缘二叠系碎屑岩沸石胶结物扫描电镜微观特征

Fig. 3 SEM micro-features of Permian clastic zeolite cements in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin

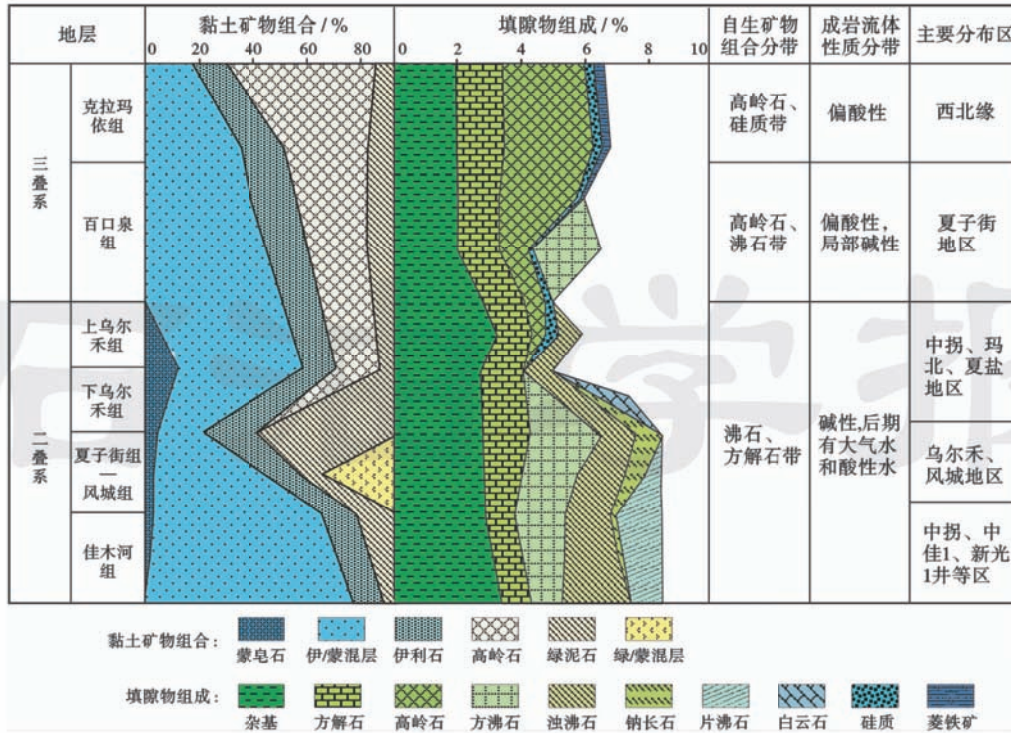


图 4 准噶尔盆地中拐—西北缘地区三叠系—二叠系黏土矿物、填隙物组成及流体性质综合分析

Fig. 4 Comprehensive analysis of Triassic-Permian clay minerals, interstitial material components and fluid properties in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin

克 80 井、金龙 2 井一带的上乌拉禾组；③夏盐凸起夏盐 2 井和玛北斜坡玛 2 井一带的下乌拉禾组，其含量平均在 0.5%~3.0%。方沸石主要分布在乌夏断裂带的夏子街地区、克百断裂带西南段的东部和中拐凸起西部一带，层位主要分布在夏子街组、风城组、佳木河组及三叠系的百口泉组，平均含量约为 1.5%。片沸石分布于盆地边缘部位，主要分布在中拐凸起西部一带的佳木河组和克百断裂带东北段的东部下乌拉禾组，含量为 0.1%~3.0%，其他区域分布较少。

总体上，沸石的分布呈现出由湖盆中心向湖盆边缘，依次发育浊沸石胶结区、方沸石胶结区和片沸石胶结区的规律性变化。如中拐凸起湖盆中心的新光 1 井、金龙 2 井一带的浊沸发育带，其含量最高可达 6% 以上，向盆地边缘含量减少；方沸石在拐 5 井一带发育，含量平均为 3.0%，其东西两侧含量减少；片沸石在盆地边部较发育，平均含量约为 1.5%，向湖盆中心发育程度减弱。

3 沸石矿物分布控制因素及胶结模式

3.1 沸石胶结物分布的控制因素

前述研究表明，准噶尔盆地西北缘不同沸石胶结物的分布呈现明显的规律性。通过对研究区不同沸石胶结物的岩矿特征、成岩环境、成岩流体性质分析，结

合国内外研究成果，认为研究区沸石的分布主要受控于母岩性质和成岩流体性质。母岩成分差异是形成不同沸石胶结物的物质基础，成岩流体性质决定了沸石胶结物的纵横向分布。

3.1.1 母岩成分的影响

前人对准噶尔盆地西北缘乌拉禾地区乌 8 井的沸石与岩矿组分的分析，认为片沸石形成的原始物质主要是中酸性火山岩和中酸性凝灰岩^[44]。笔者通过铸体薄片对不同类沸石胶结物与对应岩矿的组成进行分析(图 6)，发现浊沸石的发育程度与基性—中性火山岩屑有关，随浊沸石含量(占岩石组成的百分比)的增加，对应的基性—中性火山岩屑含量(占岩石碎屑颗粒百分比)增多，两者呈明显的正相关性[图 6(a)]，这类火山岩屑主要包括安山岩岩屑和对应的凝灰岩岩屑，少量玄武岩、辉长岩、辉绿岩等岩屑；而方沸石的发育程度与中酸性—酸性火山岩屑呈明显的正相关性[图 6(b)]，此类岩屑主要包括流纹岩、花岗岩岩屑及对应的凝灰岩岩屑，少量闪长岩、非细岩。不同区块其相关性关系式不同(图 6)，这与其岩屑含量和成岩流体矿化度有关，两者有一定互补作用。对应岩屑含量不高、但成岩流体盐度高、相应离子富集，也可形成对应的沸石胶结物；而片沸石与中酸性—酸性火山岩岩屑、基性—中性火山岩岩屑没有明显的相关性(图 7)。

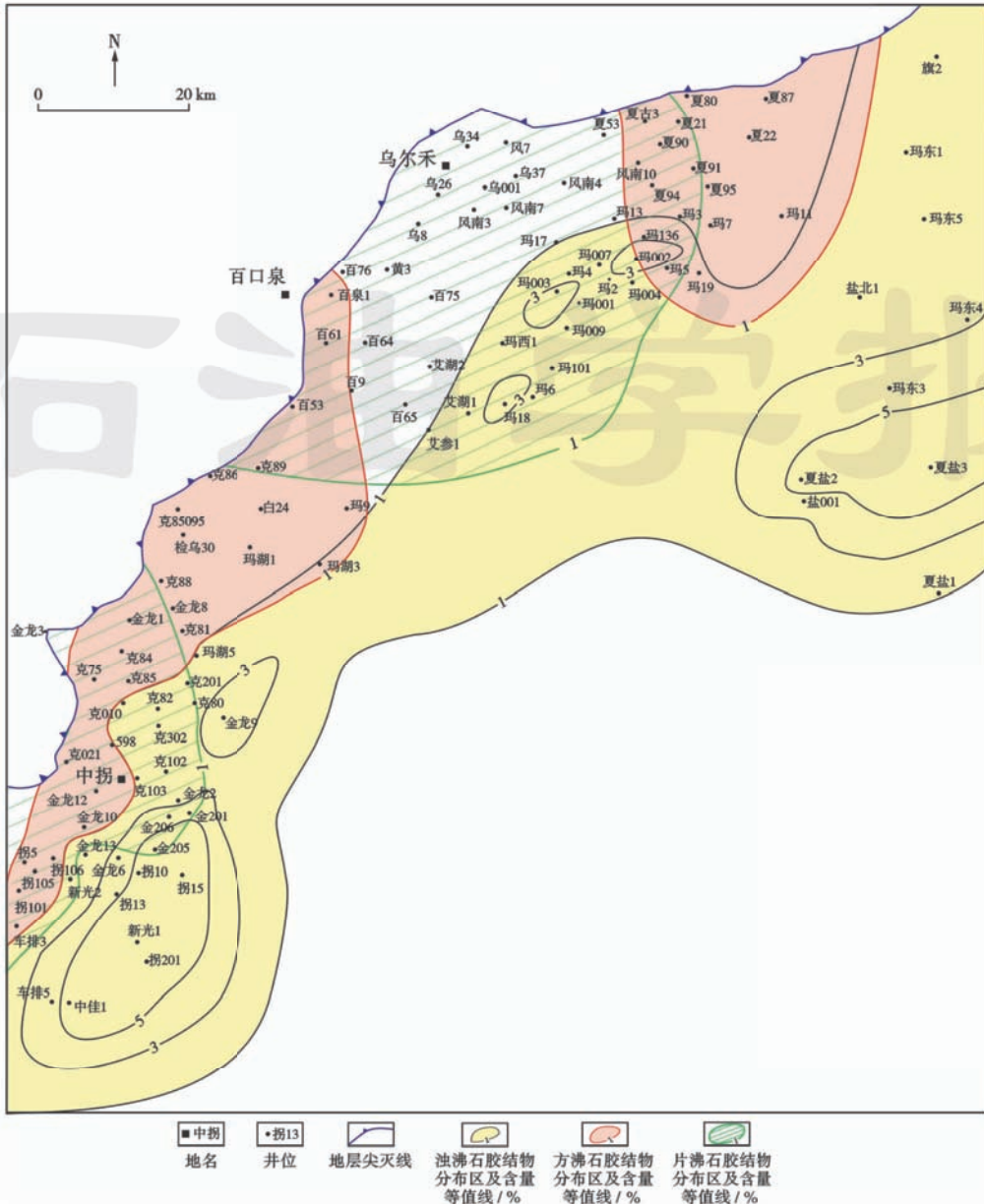


图5 准噶尔盆地中拐—西北缘地区二叠系不同沸石胶结物分布

Fig. 5 Distribution of Permian zeolite cements in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin

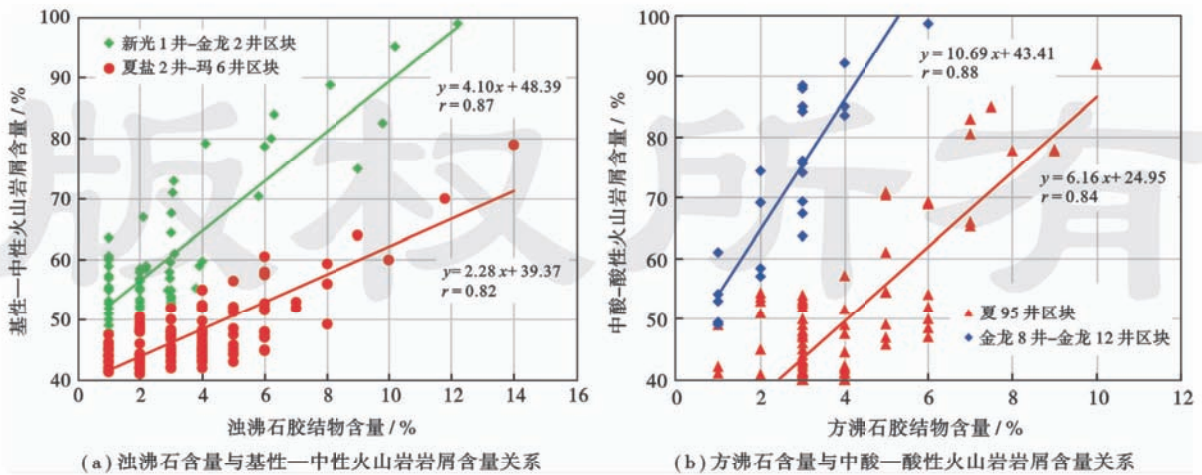


图6 沸石胶结物发育程度与岩矿组分关系

Fig. 6 Relationship between development degree of zeolite cements and rock components

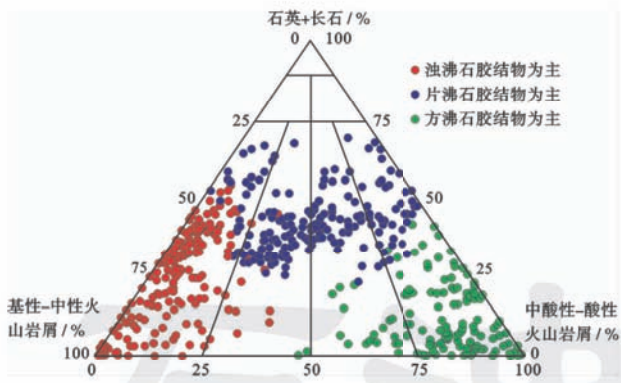


图 7 不同沸石胶结物与其岩矿组分含量的关系(沸石胶结物大于 1% 的情况)

Fig. 7 Relationship between different zeolite cements and rock components

为研究各类沸石胶结物对应的岩矿组成,将其岩石颗粒组分分为 3 类,分别为基性—中性火山岩屑、中酸性—酸性火山岩屑,及石英与长石总和。对每类沸石胶结物含量大于 1% 的岩石,作岩矿三角图分析。研究表明,浊沸石胶结物含量大于 1% 的碎屑岩,其岩矿成分以基性—中性火山岩屑含量为主,含量大于 40%,中酸性—酸性火山岩屑含量以小于 25% 为主,石英和长石含量以小于 50% 为主;方沸石胶结物含量大于 1% 对应碎屑岩的岩矿组分中,基性—中性火山岩屑含量以小于 30% 为主,中酸性—酸性火山岩屑含量以大于 45% 为主,石英和长石含量以小于 50% 为主;片沸石胶结物含量大于 1% 对应碎屑岩的岩矿组分中,基性—中性火山岩屑含量和中酸性—酸性火山岩屑含量相当,两者均以小于 50% 为主,石英和长石含量较高,主要在 25%~75% (图 7)。

各类沸石对应碎屑岩的岩矿特征表明,在研究区二叠系岩矿组分对不同沸石类的形成有明显的影 响作用。原始物质为中基性火山岩屑有利于浊沸石的形成,中酸性和酸性的火山岩屑有利方沸石的形成,片沸石在两类火岩岩屑中都有发育。此种关系与沸石的成分密切相关,中基性火岩岩屑中含有大量的斜长石,在碱性成岩环境中发生蚀变产生大量的钙离子,为浊沸石的形成提供了基础;而酸性、中酸性火山岩屑中存在大量的钠长石等酸性长石,为方沸石形成所需的钠离子提供了物性基础;而在此两类混合火山岩屑中,为片沸石的所需的钠离子和钙离子提供了基础。

在岩矿成分对沸石成因控制的基础上,通过对物源区母岩性质的分析,发现中拐—西北缘地区二叠系的沸石分布规律与母源区岩性有密切关系(图 8)。对比图 5 和图 8,发现新光 1 井和中拐 1 井地区、夏盐地区和玛北地区浊沸石比较发育的区域,其对应物源区

的母岩性质主要为中基性喷出岩、凝灰岩,而片沸石和方沸石发育区域对应物源区的母岩性质主要为中酸性—酸性喷出岩、凝灰岩,或者为两者的混合区。这表明在沉积区流体性质及成岩环境差异不大时,物源区为中基性火山岩、凝灰岩有利于以浊沸石为主的沸石类胶结物形成,物源区为花岗岩和酸性火山喷出岩、凝灰岩有利于以方沸石和片沸石为主的沸石类胶结物形成,但向沉积中心区域,皆有利于浊沸石形成,这与湖盆内成岩环境中流体性质的横向变化有关。

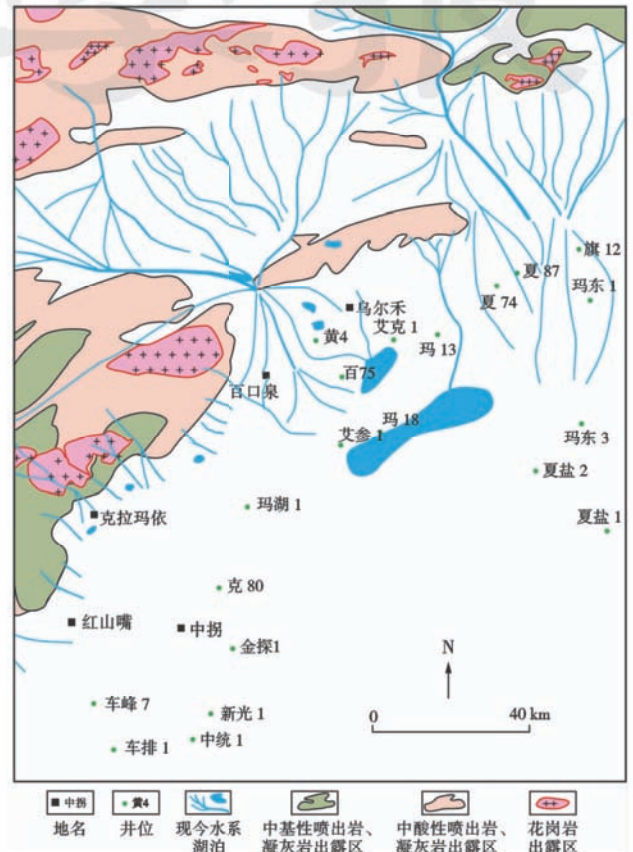


图 8 中拐—西北缘地区周边老山出露区岩性分布
Fig. 8 Lithologic distribution in exposed areas surrounding Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin

3.1.2 成岩流体性质的影响

前人 对 美 国 伊 诺 湖 现 代 沉 积 中 沸 石 的 分 布 研 究 表 明,从湖盆边缘到湖盆中心,由于水介质的 pH 值和盐度逐渐升高,依次沉积了丝光沸石、方沸石和钠长石,其沸石的硅含量依次降低,即由湖泊边缘的高硅沸石向湖泊中心的低硅沸石过渡^[25-40]。对中拐地区二叠系各类矿物的电子探针成分分析(表 1),计算出同一物源区浊沸石、方沸石和片沸石的 SiO₂/Al₂O₃ 比值依次分别为 2.3、2.8 和 3.7~4.1,表明在同一物源区,由湖盆中心向湖盆边缘,因水介质盐度和碱度的降低,造成沸石由低硅的浊沸石向高硅的片沸石发育的特征,这与该区的沸石分布规律相吻合(图 5)。

此外,研究区二叠系碎屑岩黏土矿物成分主要为伊/蒙混层、绿/蒙混层,析出的胶结物以各类沸石和方解石为主,表明二叠系长期处于碱性的高 pH 值的成岩环境^[8](图 4)。通过对同一物源区同一层位的地层水分析(表 2),表明由湖盆边缘向湖盆中心,地层水盐度升高;钙离子浓度及其所占总化度比例(钙离子富集程度)也升高;钾离子和钠离子浓度之和变化趋势不明显,但占总化度的比例是降低的,即钾离子和钠离子富集程度减弱。如对中拐凸起南斜坡属同一物源区的拐 5 井、拐 106 井及新光 2 井的佳木河组地层水分析,3 口井的地层水水型均为 CaCl₂ 型,湖盆边缘拐 5 井地层水的钙离子浓度所占总矿度之比为 18.3%,钾离子和钠离子浓度占总矿化度之比为 19.5%,总矿化度为 1 6318.97 mg/L;中间部位拐 106 井地层水的钙离子浓度所占总矿度之比为 29.5%,钾离子和钠离子浓度

占总矿化度之比为 6.6%,总矿化度为 55 519.05 mg/L;靠向湖盆中心新光 2 井地层水的钙离子浓度所占总矿度之比为 30.1%,钾离子和钠离子浓度总矿化度之比为 6%,总矿化度为 82 934.96 mg/L。对不同层位,由下部的佳木河组向上至乌尔禾组,其地层水的盐度和钙离子浓度是逐渐降低,而钾离子和钠离子浓度占总矿化度的比例有所升高(表 2)。如拐 5 井从佳木河组至夏子街组和乌尔禾组,其地层水的钙离子浓度所占总矿度之比分别降为 17.4%和 16.4%,钾离子和钠离子浓度占总矿化度之比分别为 19.9%和 21.5%,总矿化度分别降为 13 481.02 mg/L 和 12 080.57 mg/L。表明研究区地层水的盐度、钙离子富集程度由湖盆边缘向湖盆中心依次升高,而钾离子和钠离子富集程度减少;由下部地层向上部地层,地层水盐度和钙离子浓度依次降低。

表 1 中拐—西北缘地区二叠系沸石胶结物电子探针分析矿物成分

Table 1 Mineral components of Permian clastic zeolite in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin based on electron probe analysis

井号	层位	井深/m	岩性	MgO/ %	CaO/ %	Na ₂ O/ %	K ₂ O/ %	Al ₂ O ₃ / %	SiO ₂ / %	FeO/ %	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ / %	矿物 定名
克 80	P ₂ w	4 211.20	灰色含砾中砂岩	0.004	11.491	0.015	0.091	22.281	51.511	0.020	2.312	浊沸石
金 205	P ₃ w	3 843.83	灰色含砾粗砂岩	0.060	9.640	0.290	0.110	22.030	51.070	0.150	2.318	浊沸石
拐 5	P ₁ j	3 254.60	灰色砂砾岩	0.020	0.130	12.080	—	20.100	56.770	—	2.824	方沸石
克 81	P ₂ w	3 697.35	灰色砂砾岩	0.056	6.435	0.122	0.185	16.507	62.529	0.045	3.788	片沸石
玛 9	P ₂ w	3 846.48	灰色细砂岩	0.164	5.544	0.274	0.212	16.135	65.575	0.288	4.064	片沸石
				0.080	5.598	0.135	0.272	15.633	63.513	0.436	4.063	片沸石

表 2 中拐地区二叠系地层水水质统计

Table 2 Water properties of Permian clastic formation in Zhongguai area

井号	佳木河组					夏子街组					乌尔禾组				
	K ⁺ + Na ⁺		Ca ²⁺		总矿化度/ (mg·L ⁻¹)	K ⁺ + Na ⁺		Ca ²⁺		总矿化度/ (mg·L ⁻¹)	K ⁺ + Na ⁺		Ca ²⁺		总矿化度/ (mg·L ⁻¹)
	浓度/ (mg·L ⁻¹)	占总化 矿度百 分比/%	浓度/ (mg·L ⁻¹)	占总化 矿度百 分比/%		浓度/ (mg·L ⁻¹)	占总化 矿度百 分比/%	浓度/ (mg·L ⁻¹)	占总化 矿度百 分比/%		浓度/ (mg·L ⁻¹)	占总化 矿度百 分比/%	浓度/ (mg·L ⁻¹)	占总化 矿度百 分比/%	
拐 5	3 181	19.5	2 981	18.3	16 319	2 690	19.9	2 345	17.4	13 481	2 599	21.5	1 979	16.4	12 081
拐 101	4 797	17.4	5 477	19.9	27 551	4 086	18.3	4 234	18.9	22 376	2 113	14.2	2 616	17.6	14 889
拐 106	3 874	6.9	16 373	29.5	55 519	3 770	7.1	14 926	28.1	53 133	2 971	12.6	9 137	38.7	23 602
新光 2	5 479	6.6	24 968	30.1	82 936										
新光 1											2 504	10.1	9 384	37.8	24 825

在同一物源区,流体介质 pH 值、盐度和离子浓度的这种分布规律影响了该地区沸石矿物的横向分布。在湖盆中心高 pH 值、高盐度和高钙离子浓度的流体形成了低硅的浊沸石分布区;向湖盆边缘稍低碱性、稍低盐度、低钙离子浓度及富钾钠离子的流体形成高硅的片沸石发育,中间区域形成片沸石和方沸石的重叠区域。纵向上,由下部地层至上部地层,因地层水盐度、钙离子浓度和碱性流体介质 pH 值的降低,决定了浊沸石含量依次降低,方沸石由少变多的分布特征。

3.2 沸石矿物胶结模式

依据上述研究,提出了准噶尔盆地中拐—西北缘地

区二叠系沸石类矿物胶结模式(图 9)。由湖盆中心向湖盆边缘,随水介质钙离子浓度、盐度和碱度的降低,依次发育浊沸石胶结带、方沸石胶结带和片沸石胶结带。不同区域因物源岩性差异,其沸石种类和组合有差异。在物源区母岩以中基性、基性喷出岩及凝灰岩为主,中酸性火山岩屑次之的碎屑岩中,沸石胶结物主要以浊沸石和片沸石组合为主,方沸石次之。研究区主要发育在玛北、中拐及新光地区。在物源区母岩以酸性、中酸性火山岩及凝灰岩为主、中基性火山岩屑次之的碎屑岩中,沸石胶结物主要以方沸石为主,片沸石和浊沸石次之。研究区主要发育在西北缘地区的夏盐、乌尔禾、风城及百口泉等地区。

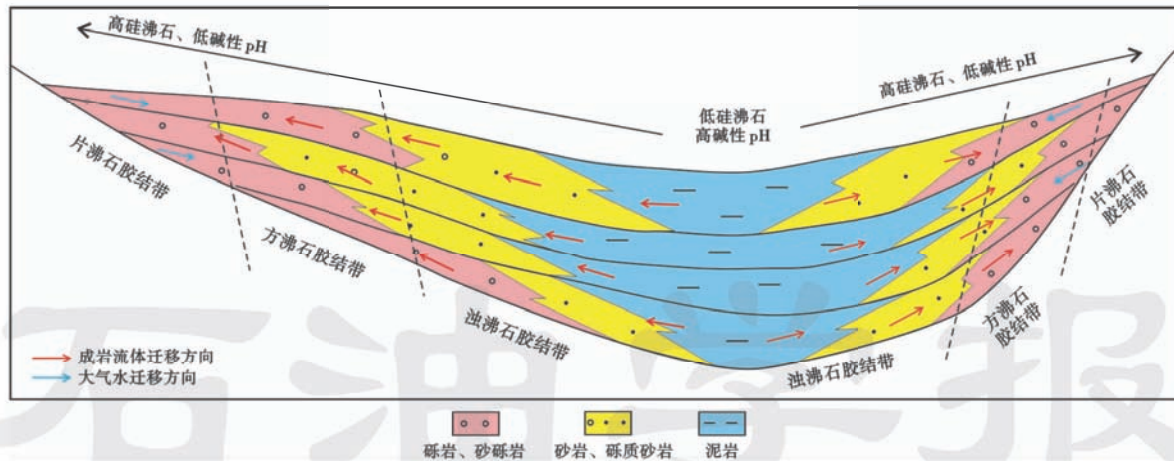


图9 准噶尔盆地中拐—西北缘地区二叠系沸石类矿物胶结模式

Fig. 9 Permian zeolite cementation model in Zhongguai-Northwest margin of Junggar Basin

4 沸石发育的油气意义

目前在研究区已发现有沸石类次生溶孔,如夏盐地区的方沸石溶蚀孔^[1,4,6],中拐凸起金龙2井区的浊沸石溶孔^[7]。中拐凸起发现了金龙2井区上乌尔禾组中型规模油气藏,其油藏中部埋藏深度为3900 m,储集层岩性主要为砂砾岩和含砾中—粗砂岩,其储集层属中低孔低渗型储层,储集空间中浊沸石次生溶蚀孔隙[图2(a)]占到总孔隙的60%^[8]。中拐凸起南斜坡已钻井在浊沸石胶结矿物中,常见在浊沸石溶蚀后被沥青充填现象[图2(b)]。表明研究区发育有沸石类溶孔型储层。根据区域构造演化、地层接触关系^[41,42,45,46],中拐凸起南斜坡二叠系有三期抬升暴露剥蚀期,分别是上乌尔禾组沉积末期至三叠系百口泉组沉积前、中下二叠统沉积后至上乌尔禾组沉积前、以及佳木河组沉积后^[45,46]。根据包裹体对油气充注史的研究,二叠系包裹体所测的均一温度,分别为30~50℃,70~90℃和110℃,分别代表了晚二叠世之前、中晚三叠世—早侏罗世成熟油和早—中白垩世高熟油的3期烃类充注^[47]。3期大气淡水和烃源岩在大量生油以前产生的有机酸^[48-50]为沸石矿物的溶蚀提供了充足的酸性来源。同时研究区沟通烃源岩的断裂及不整合面发育^[41,42,45,46],使研究区具有沸石类溶孔形成的条件。因此,在后期研究中结合不整合面及断裂研究,在沸石发育带中寻找沸石溶孔发育带,可作为储层研究的重要内容。这拓宽了中拐—西北缘地区二叠系深层油气勘探的思路,对深层二叠系油气勘探有重要意义。

5 结论

(1) 准噶尔盆地中拐—西北缘地区二叠系碎屑岩中发育片沸石、方沸石和浊沸石3类沸石胶结物。物

源差异是形成不同沸石胶结物的物质基础。母岩以中性火山岩为主的碎屑岩,沸石胶结物主要以浊沸石、片沸石为主,次为方沸石;母岩以中酸、酸性火山岩为主的碎屑岩,沸石胶结物以方沸石和片沸石为主,次为浊沸石。

(2) 在同一母岩性质的物源中,沸石的分布主要受成岩流体介质碱度、盐度及离子富集类型控制。由湖盆中心向湖盆边缘,由于水介质碱度、盐度及钙离子富集程度的降低,造成沸石由低硅的浊沸石向高硅的片沸石分布的特征。在准噶尔盆地西北缘和中拐地区表现为从盆内向盆缘,依次发育浊沸石胶结带、方沸石胶结带和片沸石胶结带。

(3) 研究表明靠湖盆中心发育有大面积的浊沸石胶结带,存在有沸石次生孔隙形成的条件,后期综合断裂、不整合面分布对酸性流体输导体系的分析,可对次生孔隙储层进行预测。这拓宽了研究区储层预测的思路,对准噶尔盆地中拐西北缘地区深层二叠系油气勘探有重大意义。

参 考 文 献

- [1] 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.
Han Shouhua, Yu Hezhong, Si Chunsong, et al. Corrosion of analcite in reservoir of Junggar Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2007, 28(3): 51-54.
- [2] 牛海青,陈世悦,张鹏,等.准噶尔盆地乌夏地区二叠系碎屑岩储层成岩作用与孔隙演化[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(2):749-758.
Niu Haiqing, Chen Shiyue, Zhang Peng, et al. Diagenesis and porosity evolution of Permian reservoir in Wu-Xia area, Junggar Basin[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(2): 749-758.
- [3] 邹才能,侯连华,匡立春,等.准噶尔盆地西缘二叠-三叠系扇控成岩储集相成因机理[J].地质科学,2007,42(3):587-601.

- Zou Caineng, Hou Lianhua, Kuang Lichun, et al. Genetic mechanism of diagenesis-reservoir facies of the fan-controlled Permian-Triassic in the western marginal area, Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(3): 587-601.
- [4] 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]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(3): 386-396.
- [5] 孙玉善. 应用沸石组合特征分析克拉玛依油区石炭二叠系成岩阶段与含油关系[J]. 新疆石油地质, 1993, 14(1): 25-33.
Sun Yushan. Significance of diagenetic stages to oil-bearing in Carboniferous and Permian formations of Karamay Oilfield as depicted by zeolite combination characteristic[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1993, 14(1): 25-33.
- [6] 朱世发, 朱筱敏, 刘学超, 等. 油气储层火山物质蚀变产物及其对储集空间的影响——以准噶尔盆地克-夏地区下二叠统为例[J]. 石油学报, 2014, 35(2): 276-285.
Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Liu Xuechao, et al. Alteration products of volcanic materials and their influence on reservoir space in hydrocarbon reservoirs: evidence from Lower Permian strata in Ke-Xia region, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(2): 276-285.
- [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_{3w} in Zhongguai Region [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(1): 16-23.
- [8] 孟祥超, 徐洋, 韩守华, 等. 准噶尔盆地西北缘夏子街组次生孔隙成因及储层预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(6): 11-15.
Meng Xiangchao, Xu Yang, Han Shouhua, et al. Origin of the secondary pores and reservoir prediction in Xiazijie Formation of Northwest Junggar Basin Margin [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2013, 32(6): 11-15.
- [9] 卢文忠, 朱国华, 李大成, 等. 川中地区侏罗系下沙溪庙组浊沸石砂岩储层的发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2004, 9(5): 53-58.
Lu Wenzhong, Zhu Guohua, Li Dacheng, et al. Discovery of sloanite sandstone reservoir of Jurassic Xiashaximiao Formation in Central Sichuan Region and its Significance[J]. China Petroleum Exploration, 2004, 9(5): 53-58.
- [10] 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.
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.
- [11] 杨晓萍, 张宝民, 雷振宇, 等. 含油气盆地中浊沸石的形成与分布及其对油气勘探的意义[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(2): 33-38.
Yang Xiaoping, Zhang Baomin, Lei Zhenyu, et al. Formation and distribution of laumontite cement in petroliferous basin and its significance for oil-gas exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(2): 33-38.
- [12] 杨晓萍, 裴梓楠, 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 Yanan. Formation process and distribution of laumontite in Yanchang Formation (Upper Triassic) of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 628-632.
- [13] 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): 1-8.
Zhu Guohua. Formation of laumontite sand bodies with secondary porosity and their relationship with hydrocarbons[J]. Acta Petrolei Sinica, 1985, 6(1): 1-8.
- [14] 柳益群. 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, 1996, 42(3): 215-222.
Liu Yiqun. The boundary between diagenesis and metamorphism: a discussion with reference to zeolite facies[J]. Geological Review, 1996, 42(3): 215-222.
- [15] 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.
- [16] 孟元林, 梁洪涛, 魏巍, 等. 浊沸石溶蚀过程的热力学计算与次生孔隙发育带预测——以徐家围子断陷深层为例[J]. 沉积学报, 2013, 31(3): 509-515.
Meng Yuanlin, Liang Hongtao, Wei Wei, et al. Thermodynamic calculations of the laumontite dissolution and prediction of secondary porosity zones: a case study of horizon of Xujiaweizi fault depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(3): 509-515.
- [17] 李军, 王炜, 王书勋. 青西油田沉凝灰岩储集特征[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(3): 288-290.
Li Jun, Wang Wei, Wang Shuxun. Bedded tuff reservoir in Qingxi oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(3): 288-290.
- [18] 门相勇, 赵文智, 胡素云, 等. 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, 2006, 33(2): 208-211.
Men Xiangyong, Zhao Wenzhi, Hu Suyun, et al. Characteristics of deep-buried fragmental reservoirs in central Junggar Basin and the effect of hydrocarbon emplacement on reservoirs' diagenetic mineral evolution[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(2): 208-211.
- [19] Helmod K P, Van De Kamp P C. Diagenetic mineralogy and controls on albitization and laumontite formation in Paleogene arkoses, Santa Ynez Mountains, California; part 2. aspects of porosity [M] // McDonald D A, Ronald R C. Clastic diagenesis. Austin, TX, USA: AAPG, 1984: 239-276.
- [20] Noh J H, Boles J R. Origin of zeolite cements in the Miocene sandstones, North Tejon oil fields, California[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1993, 63(2): 248-260.
- [21] Wopfner H, Markwort S, Semkiwa P M. Early diagenetic laumontite in the lower Triassic Manda Beds of the Ruhuhu Basin, southern Tanzania[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61(1): 65-72.
- [22] Moncure G K, Surdam R C, McKague H L. Zeolite diagenesis below Pahute Mesa, Nevada Test Site[J]. Clays and Clay Minerals, 1981, 29(5): 385-396.
- [23] Iijima 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.

- [24] 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]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 178(2): 317-330.
- [25] 夏燕青. 论自生沸石温度计的不可靠性[J]. *石油实验地质*, 1994, 16(1): 94-99.
Xia Yanqing. On the unreliability of authigenic zeolites as a thermometer[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1994, 16(1): 94-99.
- [26] 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 Triassic Yanchang series, North Shaanxi[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1992, 8(2): 145-152.
- [27] Crossey L J, Frost B R, Surdam R C. Secondary porosity in laumontite-bearing sandstones: part 2. aspects of Porosity Modification[M]// McDonald D A, Ronald R C. *Clastic diagenesis*. Austin, TX, USA: AAPG, 1984: 225-237.
- [28] Hay R L. *Zeolites and zeolite reactions in sedimentary*[M]. New York: The Geological Society of America, INC., 1966.
- [29] Hay R L. *Geologic occurrence of zeolites*[M]// Sand L B, Mump-ton F A. *Natural zeolites: occurrence, properties, use*. New York: Pergamon Press, 1978: 135-143.
- [30] Boles J R. *Zeolites in low-grade metamorphic rocks*[M]// Mump-ton F A. *Mineralogy and geology of natural zeolites*. Washington DC: Mineralogical Society America, 1989: 103-135.
- [31] Iijima A. A petrochemical aspect of the zeolite formation in volcaniclastic rocks[C]// *Proceedings of the 27th International Geological Congress*. Utrecht: VNU Science Press, 1984: 29-52.
- [32] Utada M. Zeolitization in the continental margin, with special reference to those in the Green tuff region in Japan[J]. *Yerbilimleri*, 1987, 14: 35-43.
- [33] Utada M. Hydrothermal alteration envelope relating to Kuroko-type mineralization: a review[J]. *Mining Geology*, 1988, 12: 79-92.
- [34] 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 Petrologica Sinica*, 2015, 36(10): 1210-1220.
- [35] Aoyagi K, Kazama T. Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis[J]. *Sedimentology*, 1980, 27(2): 179-188.
- [36] Cho M, Maruyama S, Liou J G. An experimental investigation of heulandite-laumontite equilibrium at 1000 to 2000 bar Pfluid[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 97(1): 43-50.
- [37] 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.
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*, 2014, 38(1): 1.
- [38] Winkler H G F. *Petrogenesis of metamorphic rocks*[M]. New York: Springer-Verlag, 1979.
- [39] 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.
- [40] Larsen D. Revisiting silicate authigenesis in the Pliocene - Pleistocene Lake Tecopa beds, southeastern California: depositional and hydrological controls[J]. *Geosphere*, 2008, 4(3): 612-639.
- [41] 雷振宇, 鲁兵, 蔚远江, 等. 准噶尔盆地西北缘构造演化与扇体形成和分布[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(1): 86-91.
Lei Zhenyu, Lu Bing, Wei Yuanjiang, et al. Tectonic evolution and development and distribution of fans on northwestern edge of Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(1): 86-91.
- [42] 陶国亮, 胡文瑄, 张义杰, 等. 准噶尔盆地西北缘北西向横断裂与油气成藏[J]. *石油学报*, 2006, 27(4): 23-28.
Tao Guoliang, Hu Wenxuan, Zhang Yijie, et al. NW-trending transverse faults and hydrocarbon accumulation in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 27(4): 23-28.
- [43] 王惠民, 吴华, 靳涛, 等. 准噶尔盆地西北缘油气富集规律[J]. *新疆地质*, 2005, 23(3): 278-282.
Wang Huimin, Wu Hua, Jin Tao, et al. Rule of hydrocarbons accumulation in the northwest edge of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2005, 23(3): 278-282.
- [44] 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 Yushan, Cao Ziqiang. Characteristics and distribution of zeolite group minerals in Karamay oilfields[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1991, 12(3): 253-261.
- [45] 孙国强, 史基安, 张顺存, 等. 准噶尔盆地中拐地区石炭—二叠纪火山岩特征及构造环境分析[J]. *地质科学*, 2012, 47(4): 993-1004.
Sun Guoqiang, Shi Ji'an, Zhang Shuncun, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of the Carboniferous-Permian volcanic rocks in Zhongguai area northwestern Junggar Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2012, 47(4): 993-1004.
- [46] 吴孔有, 查明, 柳广弟. 准噶尔盆地二叠系不整合面及其油气运聚特征[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(2): 53-57.
Wu Kongyou, Zha Ming, Liu Guangdi. The unconformity surface in the Permian of Junggar basin and the characters of oil-gas migration and accumulation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(2): 53-57.
- [47] 曹剑, 胡文瑄, 姚素平, 等. 准噶尔盆地西北缘油气成藏演化的包裹体地球化学研究[J]. *地质论评*, 2006, 52(5): 700-707.
Cao Jian, Hu Wenxuan, Yao Suping, et al. Evolution of petroleum migration and accumulation in the Northwestern margin of the Junggar Basin: fluid inclusion geochemistry[J]. *Geological Review*, 2006, 52(5): 700-707.
- [48] Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic and sandstone diagenesis[J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(1): 1-23.
- [49] 黄思静, 张萌, 朱世全, 等. 砂岩孔隙成因对孔隙度/渗透率关系的控制作用——以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组为例[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2004, 31(6): 648-653.
Huang Sijing, Zhang Meng, Zhu Shiquan, et al. Control of origin of pores over relationship of porosity to permeability in sandstone reservoir: a case study from Yanchang sandstone of Triassic of eastern Gansu, Ordos Basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2004, 31(6): 648-653.
- [50] Heydari E, Wade W J. Massive recrystallization of low-Mg calcite at high temperatures in hydrocarbon source rocks: implications for organic acids as factors in diagenesis[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(7): 1285-1303.