

鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂岩钠长石化 与热液成岩作用研究

李荣西^{1,2} 段立志^{1,2} 陈宝贇^{1,2} 夏冰^{1,2} 李靖波³

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 国土资源部成矿作用及其动力学开放研究实验室, 陕西 西安 710054; 3. 山西省忻州市煤炭工业局, 山西 忻州 034000)

摘要: 鄂尔多斯盆地延长组储层砂岩发育大量自生钠长石矿物, 其成因和产出与浊沸石有关, 含量和分布比浊沸石多而广泛, 但没有引起人们的注意。大量详细岩相学观察发现延长组储层砂岩发育丰富的自生钠长石, 其主要为由斜长石碎屑蚀变形成或呈胶结物充填分布在砂岩碎屑颗粒之间。钠长石中含有大量原生的发亮黄色荧光的油气包裹体, 表明其形成与油气注入同时。电子探针成分分析表明, 钠长石 Na_2O 含量较高, 几乎为斜长石的纯钠长石端员 ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), 没有钙长石端员 ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)。激光拉曼光谱特征反映出钠长石为沉积成岩期形成的低温钠长石, 而非来源于岩浆岩或者变质岩区的碎屑钠长石。应用 LA-MC-ICP/MS 原位微分析技术对钠长石进行的稀土元素分析表明, 延长组砂岩钠长石具有热水成岩作用地球化学特征, 属于热液成岩作用产物。认为大量钠长石形成与石油充注的同时进行导致了储层致密过程中岩性油藏的形成。延长组储层砂岩中热液成岩作用对油藏形成和分布意义重大, 值得重视和研究。

关键词: 钠长石 热液成岩作用 延长组 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P578.968; P581

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)02-0173-08

Albitization and hydrothermal diagenesis of Yanchang oil sandstone reservoir, Ordos Basin

LI Rong-xi^{1,2}, DUAN Li-zhi^{1,2}, CHEN Bao-yun^{1,2}, XIA Bing^{1,2} and LI Jing-bo³

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Open Laboratory of Mineralization and Its Dynamics, Ministry of Land and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Shanxi Xinzhou Bureau of Coal Industry, Xinzhou 034000, China)

Abstract: The Triassic low permeability reservoir sandstone of Yanchang Formation in Ordos Basin is composed of fine-grained arkose and feldspathic litharenite. Lots of research work has been devoted to the diagenesis of reservoir sandstone of Yanchang Formation. It is considered that the formation of secondary pore through dissolution of laumontite improved the reservoir property of sandstone, and the dissolution of laumontite was closely related to alteration of plagioclase. According to the equilibrium theory of mineral reaction, the laumontite formed by the alteration of plagioclase accompanied by the formation of albite is two times as many as the laumontite in quantity. Therefore, if laumontite of sandstone in Yanchang Formation was dissolved to form dissolution pores, the content of albite with more stability should be higher in theory. The sandstone of Yanchang Formation actually contains plentiful albite which was altered from plagioclase fragments and cements of authigenic minerals that filled the fragments. Microscopic observation indicates that plagioclase fragments were altered to form

收稿日期: 2011-07-01; 修订日期: 2011-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41173055)

作者简介: 李荣西(1966-), 男, 博士, 教授, 矿产普查与勘探专业, E-mail: rongxi99@163.com.

the assemblage of albite, laumontite and kaolinite. The formation of authigenic minerals of albite and kaolinite caused sandstone compaction and led to the formation of low permeability and low porosity reservoirs. Many primary hydrocarbon inclusions with bright yellow fluorescence contained in cleavages of albite show that albite was formed synchronously with reservoir compaction and oil accumulation, indicating that the formation and distribution of albite were closely related to the formation and distribution of reservoirs. The existence of albite and its significance were ignored because previous researchers focused their attention on laumontite dissolution. Composition analysis by means of electronic microprobe shows that chemical composition of albite in sandstone of Yanchang Formation reservoir is similar to that of standard albite mineral, in which the SiO_2 is from 67.07% to 68.51% and Al_2O_3 from 19.59% to 20.49%. Na_2O content of albite is high while K_2O and CaO content is very low. The albite is almost pure albite end member of plagioclase ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) without anorthite member of plagioclase ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Laser Raman spectrum analysis shows that albite in sandstone of Yanchang Formation is characterized by four obvious peaks at 293 cm^{-1} , 329 cm^{-1} , 407 cm^{-1} and 458 cm^{-1} respectively, implying that the albite is a sedimentary mineral formed during the diagenetic stage at the low temperature rather than a detrital mineral of magmatic or metamorphic rocks. The in-situ micro-analysis technology of LA-MC-ICP/MS was employed to analyze REE of albite. The results show that REE distribution curves are gentle or somewhat rightly-oblique. The average ΣREE of albite is 138.74×10^{-6} , which is close to that of the upper crust. The average δEu is 1.62, assuming strong positive Eu anomaly. The average δCe is 0.74, assuming weak negative Ce anomaly. Rare earth fractionation is weak with average $(\text{La}/\text{Yb})_n$ of 4.95 and average $(\text{La}/\text{Sm})_n$ of 1.88. Characteristics of REE suggest that albite is a product of the hydrothermal diagenesis. Combined with regional geological evolution history of Ordos Basin, the authors hold that albitization of sandstone reservoirs in Yanchang Formation of Ordos Basin was related to hydrothermal activity of Yanshanian period. It is suggested that the hydrothermal diagenesis of sandstone was closely related to the formation and distribution of oil reservoirs and therefore deserves attention and research.

Key words: albite; hydrothermal diagenesis; Yanchang Formation; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是在古生代稳定克拉通海相沉积盆地基础上发育的一个中生代内陆湖相盆地。在晚三叠世时期,鄂尔多斯盆地经历了一个完整的湖进-湖退沉积过程,发育了盆地中最主要的含油层系即三叠系延长组。依据岩性特征延长组自下而上依次被划分为长 10 到长 1 共 10 个油层组,其中长 10 至长 7 油层组属湖盆扩张发展期,长 6 至长 1 油层组属湖盆收缩衰亡期,长 7 油层组属湖盆发育的鼎盛时期,沉积了厚度巨大的深湖相富含有机质的暗色碳质泥岩和油页岩,被认为是鄂尔多斯盆地优质生油岩。延长组油气储层主要为三角洲前缘朵状砂体和三角洲分流河道砂体,岩性以中细砂和粉砂级的长石砂岩和长石岩屑砂岩为主,碎屑颗粒中长石碎屑(主要为斜长石)含量普遍超过 35%,而石英含量一般小于 35%,砂岩结构成熟度高而成分成熟度低,为典型的低孔隙度、低渗透性油层。

长期以来,人们对延长组储层砂体的成岩作用进行了大量的研究工作(朱国华,1985;柳益群,

1996;史基安等,2003),对延长组储层砂岩中的浊沸石及其与油气分布关系进行了深入细致的研究,认为浊沸石胶结物溶蚀作用改善了砂岩的物性,溶蚀作用形成的次生孔隙是油气储存的主要空间,并以此理论有效地指导了储层评价和油田勘探工作(张立飞,1992;赵孟为,1995;黄思静等,2001;杨晓萍等,2002)。鄂尔多斯盆地延长组储层砂岩普遍发育钠长石化作用,前人在研究过程中已经注意到延长组储层砂岩的钠长石化成岩作用现象(朱国华,1985;赵孟为,1995;黄思静等,2001;杨晓萍等,2002),但是,当时人们普遍将注意力集中在对浊沸石的研究而轻视或忽略了对钠长石化的研究,将其作为一般的成岩作用简要介绍而没有给予详细分析。近年来,我们在对延长组储层砂岩成岩作用研究中,借助成岩矿物组合及自生矿物成分分析,发现延长组储层砂岩含有较多的钠长石自生矿物,其中还包裹有大量液态烃包裹体,表明其与石油充注、成藏和分布关系密切,同时钠长石与浊沸石有成因联

系,对储层发育和油藏形成具有重要影响,因此对钠长石进行了初步研究。

1 延长组砂岩钠长石化特征

在偏光显微镜下,砂岩钠长石化形成的钠长石光性特征没有岩浆岩或者变质岩中的钠长石那样明显,几乎看不到聚片双晶,特别是由斜长石碎屑经钠长石化和高岭土化等蚀变作用形成的钠长石仍然保留着碎屑颗粒的形态特征,在显微镜下很容易将其归为碎屑颗粒范畴,因此前人一般只提到其高岭石

化。显微镜下仔细观察表明,延长组储层砂岩发育丰富的自生钠长石,其主要由斜长石碎屑蚀变形成或呈胶结物充填分布在砂岩碎屑颗粒之间。斜长石碎屑经钠长石化后其光性不均匀,表面既分布有因高岭石化而出现的糙面现象,同时又分布有非常纯净的呈白色或浅灰白色的“光亮”部分(图 1)。这些“光亮”部分即为新形成的钠长石,其基本上都发育钠长石典型的{001}和{010}两组解理。显微镜下光学性质测量表明,其为负延性,低负突起,Ⅰ级灰白-黄白干涉色,光性特征明显不同于碱性长石和其他斜长石类矿物。

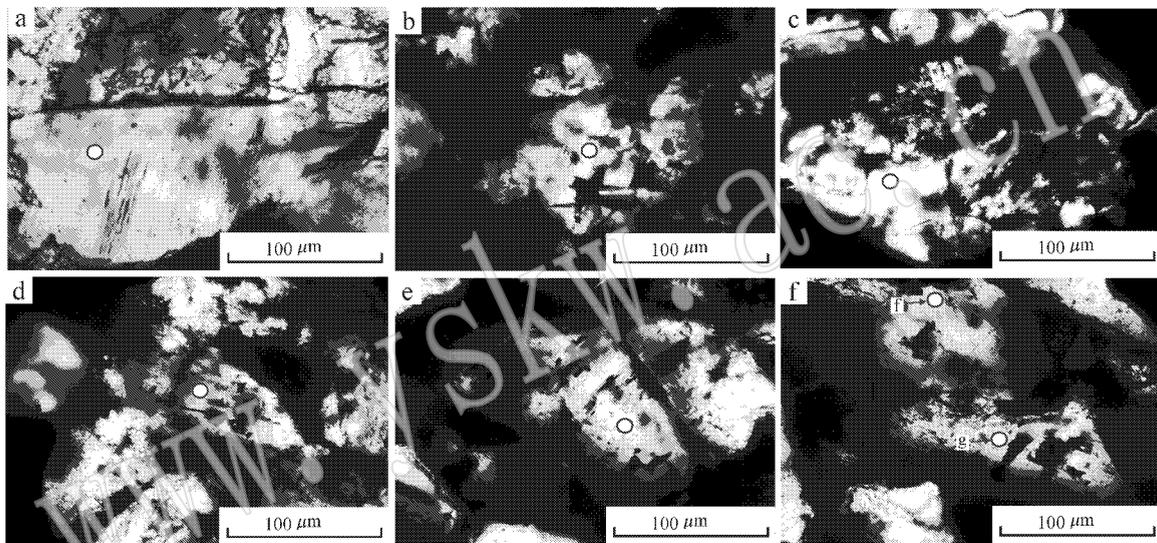


图 1 延长组砂岩钠长石正交偏光显微镜下照片特征

Fig. 1 Microscopic photographs of albite in sandstone of Yanchang Formation

a—耿 166 井,长 6; b, c—耿 108 井,长 4+5₁; d—耿 108 井,长 4+5₂; e, f—元 181 井,长 6。照片中钠长石矿物中空圆圈为电子探针分析点位,编号与表 1 中样品编号一致,其中照片 f 中有 f 和 g 两个分析点

a—Geng 166 well, Chang 6; b, c—Geng 108 well, Chang 4+5₁; d—Geng 108 well, Chang 4+5₂; e, f—Yuan 181 well, Chang 6; hollow circle in albite mineral indicates electron microprobe analytical point; serial number of the photo is consistent with serial number of the sample in Table 1; photo f has two analytical points (f and g)

大量观察发现,鄂尔多斯盆地延长组含油砂岩几乎都发育钠长石化现象,而且钠长石的两组解理中都分布有大量液态油包裹体,在荧光显微镜下均发亮黄色荧光,说明钠长石的形成与油气注入进入储层同时发生。一方面,大量钠长石自生矿物形成导致储层致密,另一方面,油气在同期大量充注,这样就形成了延长组低渗-特低渗岩性油藏。

2 钠长石成分特征

钠长石标准化学成分中 SiO₂ 为 68.7%, Na₂O

为 11.83%, Al₂O₃ 为 19.15%。笔者在长安大学西部矿产资源与工程地质教育部重点实验室进行了矿物电子探针成分分析,仪器为日本电子(JEOL)JXA-8100 型电子探针,实验条件:加速电压 25 kV,束斑 2~3 μm,束流 10 nA,分析时间 20 s,PRZ 修正,分析精度 2%±。表 1 为利用电子探针分析的延长组储层砂岩钠长石的化学成分。从表中可以看出,钠长石成分以 SiO₂、Na₂O 和 Al₂O₃ 为主,其中 SiO₂ 为 67.07%~68.51%, Na₂O 为 7.67%~12.07%, Al₂O₃ 为 19.59%~20.49%, 而 K₂O 和 CaO 含量非常低。延长组储层砂岩钠长石的化学成分与标准钠

表 1 延长组砂岩钠长石电子探针成分分析结果 $w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of albite in sandstone of Yanchang Formation

样品编号	a	b	c	d	e	f	g
SiO ₂	67.730	67.940	68.510	68.230	67.860	67.920	67.070
TiO ₂	-	0.016	-	-	-	0.015	0.129
Na ₂ O	11.670	11.810	12.070	11.230	7.780	9.310	7.670
K ₂ O	0.030	0.014	0.038	0.022	0.078	0.025	0.035
CaO	0.057	0.032	0.025	0.058	-	-	0.002
MgO	0.017	-	-	-	-	-	0.011
MnO	0.022	0.036	-	0.022	-	0.033	0.003
Al ₂ O ₃	19.840	19.590	19.790	19.890	20.320	20.290	20.490
FeO	0.016	0.091	0.018	0.063	0.032	0.084	0.083
Total	99.382	99.529	100.494	99.516	96.070	97.678	95.493

长石化学成分基本一致,只是元 181 井的钠长石 Na₂O 相对偏低, SiO₂ 和 Al₂O₃ 略为偏高。因此,延长组钠长石几乎为斜长石的纯钠长石端员 (NaAlSi₃O₈), 没有斜长石中的钙长石端员 (CaAl₂Si₂O₈)。

为了更进一步确定钠长石特征,还分析了不同层位储层砂岩钠长石的激光拉曼光谱。矿物晶体结构中不同官能团具有不同的拉曼光谱特征,矿物分子的对称伸缩振动模式和频率决定了矿物拉曼光谱峰的特征,长石类矿物作为架状硅酸盐矿物,其拉曼谱图主要表现为 Si—O 及 Al—O 的振动,包括 S(Al)—O 伸缩振动峰 105 ~ 1150 cm⁻¹, S(Al)—O—Si 弯曲振动峰 506 ~ 518 cm⁻¹ (徐培苍等,1995)。对于钠长石来说,根据激光光谱图可以区分出高温钠长石和低温钠长石 (徐培苍等,1995)。高温钠长石 Al³⁺ 在 4 个 T 位中的分布是无序的,其拉曼谱峰少,主要有 476 cm⁻¹ 和 512 cm⁻¹ 两个峰。而低温钠长石 Al³⁺ 在 4 个 T 位中的分布是有序的,对称性下降,拉曼谱峰明显多于高温钠长石,其中有 293、329、407 和 458 cm⁻¹ 等特征非常明显的尖峰,293 和 329 cm⁻¹ 峰是 Si—O 及 Al—O 的弯曲振动造成的,407 和 458 cm⁻¹ 峰是由于 Al—O—Si 伸缩振动所致 (徐培苍等,1995)。

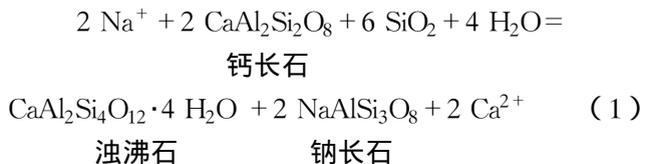
图 2 为延长组钠长石胶结物和重结晶钠长石的激光拉曼图谱,同时附有分析的钠长石显微镜下照片,从中可以看出,延长组不同层位的钠长石拉曼谱图中 293、329、407 和 458 cm⁻¹ 等 4 个特征峰非常明显,反映出延长组钠长石均为低温钠长石,说明延长组钠长石不是来源于岩浆成因或者变质成因的碎屑颗粒,而是沉积成岩期间形成的自生钠长石,这与显

显微镜下观察的钠长石产状特征完全一致。

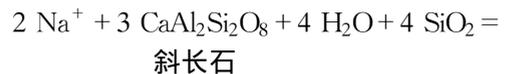
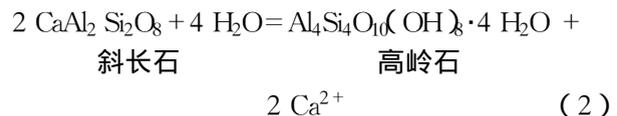
钠长石在鄂尔多斯盆地延长组各油层组储层砂岩中都普遍发育,而且以含油砂岩中最为常见。对延长组砂岩自生矿物大量分析结果统计表明,不同层位储层砂岩的蒙脱石、伊利石、钠长石等含量差别不大,而高岭石、绿泥石和方解石变化较大,这表明延长组砂岩自生成岩矿物主要受成岩作用类型和成岩环境控制,而埋藏成岩作用对成岩矿物形成影响不大。

3 延长组钠长石化作用机理探讨

前人对延长组砂体浊沸石进行了大量研究,认识到浊沸石溶解所形成的次生孔隙改善了砂岩的有效储集性能,认为浊沸石的形成主要与斜长石蚀变作用有关 (朱国华,1985),其原理是在孔隙水的参与下的水解作用使斜长石晶体结构中的金属阳离子溶于水而被带出,由于钙离子比钠离子容易先沉淀,斜长石中钙离子被释放到溶液中后先沉淀形成浊沸石,而孔隙水中的钠离子进入斜长石的晶格,从而使斜长石变成了钠长石。一般地,将上述成岩作用反应式表示如下:



显微镜下大量观察表明,延长组斜长石碎屑发生钠长石化后出现了“亮化”现象,同时显微镜下观察也发现斜长石碎屑也形成自生高岭石,出现钠长石、浊沸石和高岭石共生矿物组合,因此,斜长石蚀变作用同时存在下面的两个反应式:



其中反应 (2) 为斜长石的高岭石化作用,反应 (3) 形成了钠长石和高岭石共生矿物组合。

另外,在显微镜下发现钠长石呈胶结物充填分布在颗粒之间,其成分纯净,多色性明显,分布不规则,有不同程度的重结晶现象,在油层砂岩中此类钠

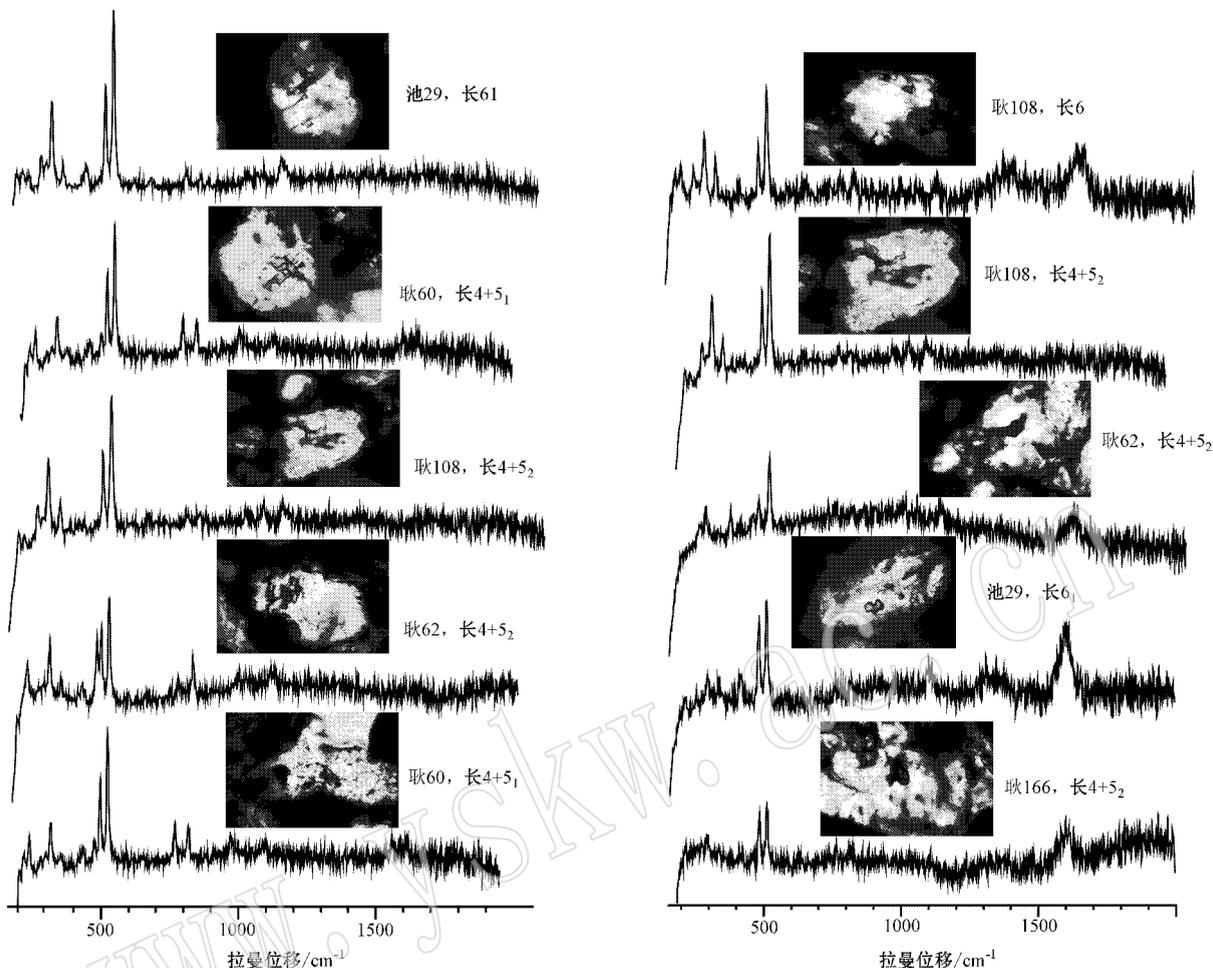


图 2 延长组储层砂岩钠长石激光拉曼光谱图

Fig. 2 Laser Raman spectra of albite in sandstone of Yanchang Formation

长石解理缝中也见有大量油气包裹体。一般认为此类钠长石是砂岩中火山物质发生水化作用以及蒙脱石转化形成的钠长石胶结物,认为火山物质水化及蒙脱石向伊利石(或绿泥石)转化过程中,促进了孔隙水中钠离子置换钙离子进入斜长石晶格导致斜长石变成钠长石,而斜长石中钙离子则被释放进入溶液中形成浊沸石的同时也形成了方解石。由于形成浊沸石和方解石使孔隙水中钙离子大量消耗,钠离子浓度相对加大,这样更有利于钠长石胶结物的形成(赵孟为,1995;黄思静等,2001;杨晓萍等,2002)。

由反应式(1)可以看出,一定量的斜长石蚀变作用形成的产物中,有2份钠长石和1份浊沸石,也就是延长组砂岩中除了含有浊沸石,而且还应该存在比浊沸石更丰富的钠长石。如果浊沸石在后期成岩作用中发生了溶解而形成溶蚀孔隙,那么比浊沸石稳定的钠长石含量对应地应该更高。事实上,大量岩矿鉴定证明钠长石含量确实高于浊沸石。但是,

由于人们普遍地将注意力放到浊沸石的研究上了,而忽视了对钠长石大量存在的事实。

4 钠长石化与热液成岩作用

对海底热水沉积研究表明,钠长石化作为热水沉积的标志性矿物在海底热液成岩成矿作用中普遍见到,是海底热液与海水混合后的沉淀物(Mills and Elderfield, 1995; 肖荣阁等, 2001)。热流体来源有其特殊的构造背景,大洋中脊裂谷构造环境中的热液沉积物温度在200℃以上,普通地热和陆缘海槽、弧后盆地裂谷环境中的热液沉积物多为中低温组合(温度在200℃以下)。当然,热液流体原始来源环境不同,其成分也不同。海相环境以海水及岩浆水为主要热水流体来源,陆相环境以天水、沉积建造水及岩浆水为热水流体来源(Mills and Elderfield, 1995; 肖荣阁等, 2001)。人们对碎屑岩中的钠长石形成环

境和地质条件也进行过探讨,杨桂芳等(2003)曾经对我国松辽盆地白垩系砂岩中的长石碎屑钠长石化作用研究表明,斜长石的钠长石化不受成岩温度和压力的制约。Kenneth 和 Peter(1984)研究认为斜长石碎屑开始发生钠长石化成岩温度为 110℃,斜长石基本完全钠长石化并与浊沸石一起共生形成对应的成岩温度约为 160℃。研究表明(Michaelis *et al.*, 1990),钠长石的形成与热液流体作用使斜长石碎屑发生蚀变而形成的成岩温度最高达约 300℃。

鄂尔多斯盆地构造上相对稳定,但是火山活动比较强烈。延长组长 2 至长 8 油层组均见大量火山物质,其中火山物质有两种产状:一种以火山碎屑颗粒分布在砂岩中,常见的火山碎屑主要为中酸性凝灰岩;另外一种是以薄层状分布在泥岩层或者砂岩层中,主要由由火山灰组成的沉凝灰岩和玻屑凝灰岩薄层,其中长 7 油层组顶部火山凝灰岩厚度大,在盆地范围内分布稳定,长 7 油层组油页岩和暗色泥岩中发育大量黄铁矿等硫化物以及富铀元素,地球化学特征指示了其沉积环境为缺氧的环境(张文正等 2008)。研究认为鄂尔多斯盆地存在热异常以及与岩浆作用有关的热力作用(杨兴科等,2006),因此,鄂尔多斯盆地具有与岩浆有关的热液活动地质背景。

为了研究钠长石成因及其代表的成岩流体特征,在西北大学大陆动力学国家重点实验室应用 LA-MC-ICP/MS 原位微分析技术,对延长组 12 个砂岩样中的自生钠长石进行了稀土元素分析测试,并对 REE 数据进行球粒陨石标准化。LA-MC-ICP/MS 仪器参数见表洪林等(2009)。分析结果表明延长组砂岩钠长石稀土配分曲线基本上呈平缓或者微弱右倾的特征(图 3),钠长石的 ΣREE 平均为 138.74×10^{-6} ,与上地壳 ΣREE 接近, δEu 为 1.62,表现为强的正异常特征, δCe 平均为 0.74,显示为弱的负异常特征, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 平均为 4.95, $(\text{La}/\text{Sm})_n$ 平均为 1.88,表明轻重稀土元素分馏作用较弱。大量研究表明(Mills and Elderfield, 1995; 肖荣阁等, 2001; Paul *et al.*, 2010),来源于海底热液流体普遍具有轻稀土富集、重稀土亏损、显著 Eu 正异常特征(以此代表纯热液流体端员组分组成),而正常海水的稀土元素特征以 LREE 亏损、HREE 富集和显著的 Ce 负异常为标志,海底热水沉积物作为热液流体和海水混合的产物,会兼有二者的一些特征。由于热液沉积物形成时,热液流体和海水混合比例不同,会产

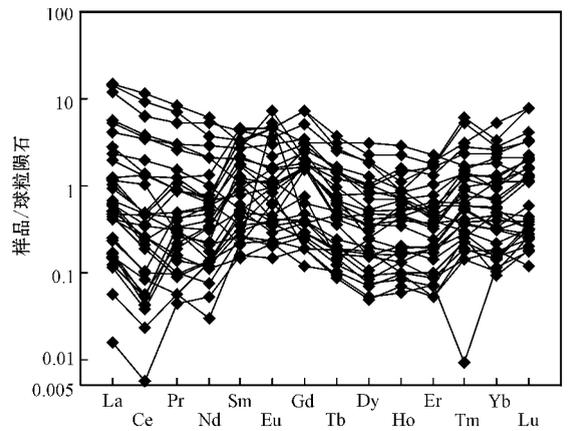


图 3 钠长石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线

Fig. 3 REE distribution curve of albite in sandstone of Yanchang Formation

生右倾斜程度不同的稀土元素配分模式(球粒陨石标准化)随海水混合比例增多,热液沉积物稀土元素配分曲线逐渐变得平坦,并且出现 Ce 负异常和 Eu 负异常特征。对比延长组钠长石稀土元素配分曲线特征可以看出,大部分钠长石的 LREE 富集, HREE 相对亏损, Eu 均不同程度地具有正异常,表明热液参与比例高,具有典型的热液沉积特征,而且成岩流体处于一种酸性-还原环境。但是,也有部分钠长石具有轻度 LREE 富集和 Ce 负异常,表明热流体参与比例较少,由此可以看出,延长组砂岩成岩过程中热流体参与程度不均匀。

越来越多的研究表明,热液流体的活动极其广泛,许多沉积盆地以及世界一些著名沉积矿床都发现有热液沉积岩,有人称为喷流沉积或喷气沉积等(Paul *et al.*, 2010; Anil *et al.*, 2010)。热液沉积及其成岩、成矿作用研究已成为现代成岩、成矿作用研究的热点。热液沉积物不同于普通沉积物,热液沉积岩种类繁多,主要与热液活动环境、温度压力等物理化学条件等有关。以上应用稀土元素对延长组普遍发育的钠长石成因进行示踪研究,只是一个新的尝试和初步成果。延长组储层砂岩中的钠长石以及热液作用值得重视和进一步研究,这对重新认识鄂尔多斯盆地油气形成时间、生烃门限深度、岩性油藏形成和分布以及勘探战略部署等均具有重要的指导意义。

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地延长组储层砂岩发育大量与

浊沸石共生的自生钠长石矿物,其主要由斜长石碎屑蚀变形成或呈胶结物充填分布在砂岩碎屑颗粒之间。钠长石形成与油气注入进入储层同时发生。大量钠长石形成导致储层致密,伴随石油大量充注,形成了延长组低渗-特低渗岩性油藏。

(2) 钠长石与标准钠长石化学成分基本一致,其 Na_2O 含量较高,几乎为斜长石的纯钠长石端员 ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), 没有斜长石中的钙长石端员 ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)。激光拉曼谱特征峰反映出钠长石为低温钠长石,说明其不是来源于岩浆岩或者变质岩区的碎屑颗粒,而为沉积成岩期间形成的自生钠长石。

(3) 稀土元素地球化学特征表明,延长组砂岩钠长石为热液成岩作用产物。延长组储层砂岩中的钠长石以及热液作用值得重视和进一步研究,这对鄂尔多斯盆地油气形成和勘探等具有重要的指导意义。

致谢 长庆油田勘探开发研究院邓秀琴、郭正权、张雪峰和李元昊等同志对本文研究给予了很多支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

Reference

- Anil L P, Durbar R, Balam V, *et al.* 2010. Formation of hydrothermal deposits at Kings Triple Junction, northern Lau back-arc basin SW Pacific: The geochemical perspectives [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 38(3~4): 121~130.
- Huang Sijing, Liu Jie, Shen Licheng, *et al.* 2001. Thermodynamic interpretation for the conditions of the formation of laumontite related to clastic diagenesis [J]. *Geological Review*, 47(3): 301~308 (in Chinese with English abstract).
- Kenneth P H and Peter C K. 1984. Diagenetic mineralogy and controls on albite formation and laumontite formation in Paleogene Arkoses, Santa Ynez Mountains, California [J]. *AAPG Memoir.*, 37: 249~259.
- Liu Yiqun and Li Wenhui. 1996. Diagenetic characteristics and porosity evolution of the oil-bearing arkoses in the Upper Triassic in the eastern Shan-Gan-Ning Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(3): 87~96 (in Chinese with English abstract).
- Michaelis W, Jenisch A and Richnow H H. 1990. Hydrothermal petroleum generation in Red Sea sediments from the Kebrut and Shaban Deep [J]. *Applied Geochemistry*, 5: 103~114.
- Mills R A and Elderfield H. 1995. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26°N mid-Atlantic Ridge [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(17): 3511~3524.
- Paul R C, Wolfgang B and Jeffrey S. 2010. Rare earth element abundances in hydrothermal fluids from the Manus Basin, Papua New Guinea: indicators of sub-seafloor hydrothermal processes in back-arc basin [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(19): 5494~5513.
- Shi Ji'an, Wang Jimpeng, Mao Minglu, *et al.* 2003. Reservoir sandstone diagenesis of Member 6 to 8 in Yanchang Formation (Triassic), Xifeng Oilfield, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 373~380 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Rongge, Zhang Hancheng, Chen Huiquan, *et al.* 2001. Hydrothermal sedimentary rock and indicators of minerals and rocks [J]. *Earth Science Frontiers*, 8(4): 379~385 (in Chinese with English abstract).
- Xu Peicang, Li Rubi, Wang Yongqiang, *et al.* 1995. Geological Application of Raman Spectroscopy [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 62~91 (in Chinese).
- Yang Guifang, Zhuo Shengguang, Niu Ben, *et al.* 2003. Albite formation of detrital feldspar in Cretaceous sandstones from the Songliao Basin [J]. *Geological Review*, 49(2): 213~218 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoping and Qiu Yanan. 2002. Formation process and distribution of laumontite in Yanchang Formation (Upper Triassic) of Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 628~632 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xingke, Yang Yongheng and Ji Lidian. 2006. Stages and characteristics of thermal actions in eastern part of Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 705~711 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning, *et al.* 2009. In situ strontium isotope analysis of fluid inclusion using LA-MC-ICPMS [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(4): 313~317 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lifei. 1992. Formation and theoretical calculation to conditions of laumontite in Triassic Yanchang Formation Northern Shaanxi [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 8(2): 145~152 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Yihua, *et al.* 2008. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin [J]. *Geochimica*, 37(1): 59~64 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Mengwei. 1995. Formation temperature of laumontite of Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(9): 58~63 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guohua. 1985. Formation of sand body with secondary pore of laumontite and relationship with oil and gas in Northern Shaanxi [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 3(2): 1~8 (in Chinese with English ab-

stract).

附中文参考文献

- 黄思静,刘洁,沈立成,等. 2001. 碎屑岩成岩过程中油沸石形成条件的热力学解释[J]. 地质论评, 47(3): 301~308.
- 柳益群,李文厚. 1996. 陕甘宁盆地东部上三叠统含油长石砂岩的成岩特点及孔隙演化[J]. 沉积学报, 14(3): 87~96.
- 史基安,王金鹏,毛明陆,等. 2003. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组长 6-8 段储层砂岩成岩作用研究[J]. 沉积学报, 21(3): 373~380.
- 肖荣阁,张汉城,陈卉泉,等. 2001. 热水沉积岩及矿物岩石标志[J]. 地学前缘, 8(4): 379~385.
- 徐培苍,李如璧,王永强,等. 1995. 地学中的拉曼光谱[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 62~91.
- 杨桂芳,卓胜广,牛奔,等. 2003. 松辽盆地白垩系砂岩长石碎屑

的钠长石化作用[J]. 地质论评, 49(2): 213~218.

- 杨晓萍,袁恽楠. 2002. 鄂尔多斯盆地三叠系延长统油沸石的形成分布与油气关系[J]. 沉积学报, 20(4): 628~632.
- 杨兴科,杨永恒,季丽丹. 2006. 鄂尔多斯盆地东部热力作用的期次和特点[J]. 地质学报, 80(5): 705~711.
- 袁洪林,高山,戴梦宁,等. 2009. 流体包裹体中 Sr 同位素的激光剥蚀多接收等离子体质谱原位微区分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 28(4): 313~317.
- 张立飞. 1992. 陕北三叠系延长统油沸石的成因及形成条件的理论计算[J]. 岩石学报, 8(2): 145~152.
- 张文正,杨华,杨奕华,等. 2008. 鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 37(1): 59~64.
- 赵孟为. 1995. 鄂尔多斯盆地油沸石的形成温度及其意义[J]. 石油学报, 16(9): 58~63.
- 朱国华. 1985. 陕北油沸石次生孔隙砂体的形成与油气关系[J]. 石油学报, 3(2): 1~8.

www.yskw.ac.cn