

# 松辽盆地砂岩中成岩次生矿物特征

杨桂芳<sup>1</sup>, 卓胜广<sup>1</sup>, 滕玉洪<sup>1</sup>, 牛 奔<sup>2</sup>, 鄂俊杰<sup>3</sup>

(1. 大庆石油学院 秦皇岛分院, 河北 秦皇岛 066000; 2. 中海石油有限公司  
上海分公司, 上海 200030; 3. 中国石油 冀东油田, 河北 唐山 063004)

**摘要:** 砂岩在成岩过程中, 次生矿物多达 20 余种。次生石英、钠长石、方解石和浊沸石等的形成不同程度地影响了砂岩的储集物性。形成次生石英的 SiO<sub>2</sub> 主要来源于碎屑长石的溶解粘土矿物的转化。次生长石与长石的钠长石化过程有关, 斜长石钠长石化始于成岩早期, 而钾长石的钠长石化则需较高的成岩条件才能进行。次生方解石主要为成岩早期的无机 CaCO<sub>3</sub> 沉淀。浊沸石则是晚成岩阶段的稳定矿物, 并与成岩晚期钠长石化有关。

**关键词:** 钠长石化; 次生长石; 次生石英; 成岩作用; 湖相砂岩; 白垩系; 松辽盆地

**中图分类号:** TE122. 2

**文献标识码:** A

松辽盆地位于中国东北部, 是大型的陆相含油气盆地。盆内主要为白垩系地层的大型河流相、三角洲相和湖泊相沉积<sup>[1]</sup>。储集层岩石类型主要为岩屑长石砂岩和长石砂岩, 其成分成熟度和结构成熟度均较低<sup>[2]</sup>。在成岩的后生变化中, 新形成的次生矿物主要有 20 余种, 但真正能够影响砂岩储集物性的次生矿物主要为自生石英、长石和方解石。砂岩的原始杂基、孔隙充填物和次生粘土矿物的成岩变化也是影响砂岩储集物性的重要因素。本文将通过井心砂岩样品系统测试, 运用热动力学原理, 对主要成岩次生矿物的形成及发育进行探讨。

## 1 测试结果和自生矿物特征

石英的偏光显微镜和电子探针测试结果如下。核心颗粒与次生长边具有一致的光性特征。次生石英加大边虽然显得较为干净(图版 1), 但实际上电子探针测试结果证实, 由于次生加大是伴随着缓慢的成岩作用的结晶生长过程, 次生加大边微量元素成分的变化反映了成岩过程中孔隙流体成分的变化特征。比较原始核心颗粒的微量元素, 可发现有明显差异(表 1)。

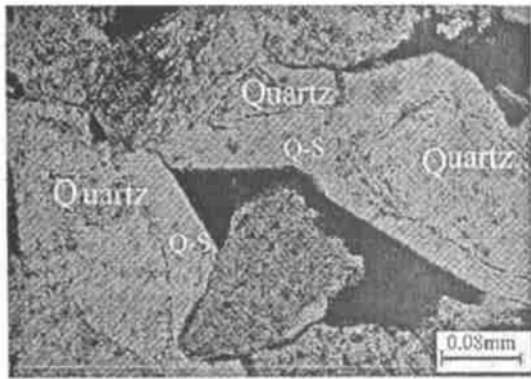
表 1 碎屑石英颗粒核心与次生加大边含微量元素对比(电子探针测试结果)

Table 1 Comparison of trace element content between the core and secondary enlarged margins of lithic quartz grains (testing results by electron microprobe)

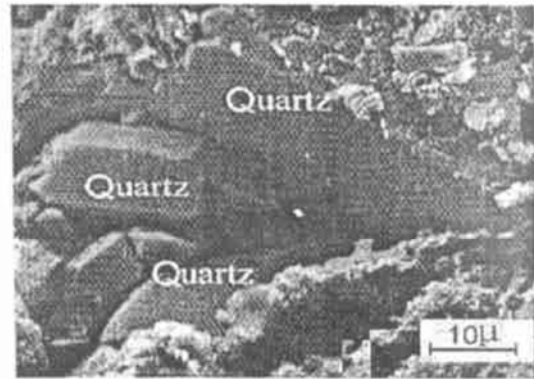
井号	井深/m	层位	原生颗粒/次生加大边			
			Na <sub>2</sub> O/%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	MnO/%	FeO/%
萨 5 井	1 526	泉四段	0.00/0.15	0.00/0.05	0.00/0.16	0.00/0.02
	1 575.9	泉三段	0.02/0.07	0.00/0.39	0.08/0.13	0.00/0.05
	2 483.4	泉一段	0.02/0.04	0.23/0.15	0.00/0.00	0.01/0.03
	2 710.8	登四段	0.05/0.04	0.00/0.68	0.00/0.00	0.01/0.06
	2 931.1	登三段	0.07/0.03	0.12/0.05	0.00/0.02	0.00/0.11
	3 055.3	登二段	0.02/0.02	0.00/0.15	0.04/0.00	0.00/0.04
朝深 2 井	2 338.8	登四段	0.04/0.04	0.00/0.07	0.07/0.00	0.00/0.00
	2 450.7	登三段	0.13/0.22	0.11/0.44	0.00/0.00	0.00/0.18
	2 567.5	登二段	0.03/0.05	0.00/0.41	0.06/0.13	0.00/0.05
	2 754.1	登二段	0.02/0.07	0.00/0.14	0.03/0.00	0.00/0.18
	2 818.6	登一段	0.02/0.00	0.00/0.23	0.16/0.05	0.00/0.00

注: 样品分析为电子探针测试结果, 由大庆研究院地质实验室电子探针测试(1986)。

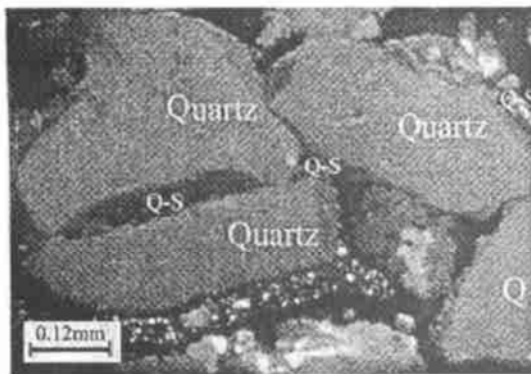
### 图版说明



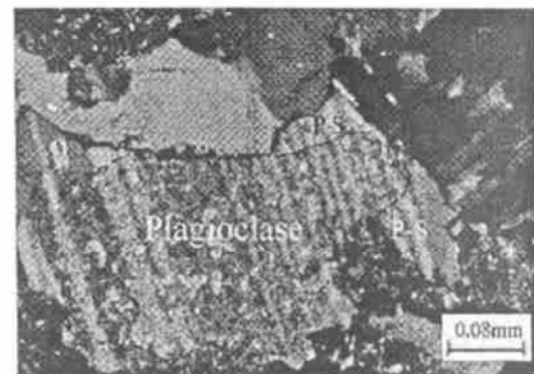
1. 铸体薄片在单偏光镜下: Quartz 为碎屑石英颗粒; Q-S为次生石英加大边 (松辽盆地卫深3井, 井深: 2 157m)



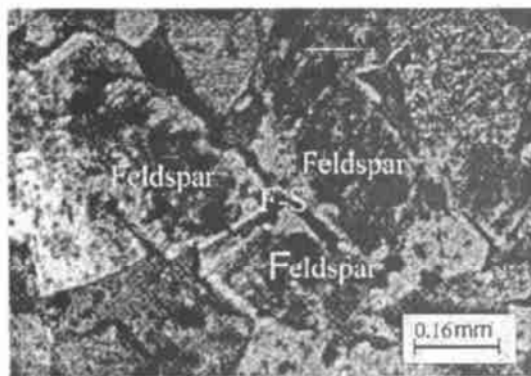
2. 扫描电镜下: Quartz 为自生石英晶粒、次生加大晶面 (松辽盆地升67井, 井深1 818m)



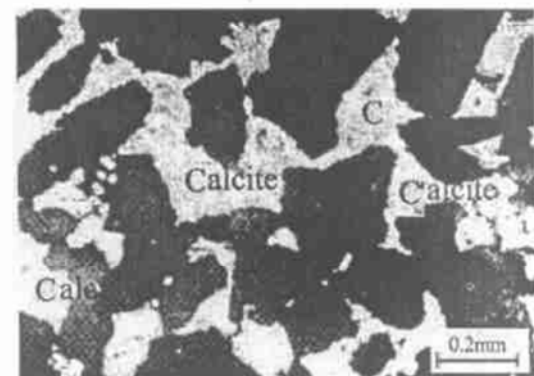
3. 阴极发光照片: Quartz 为碎屑石英颗粒; Q-S为次生石英加大边 (松辽盆地升502井, 井深2 034.5m)



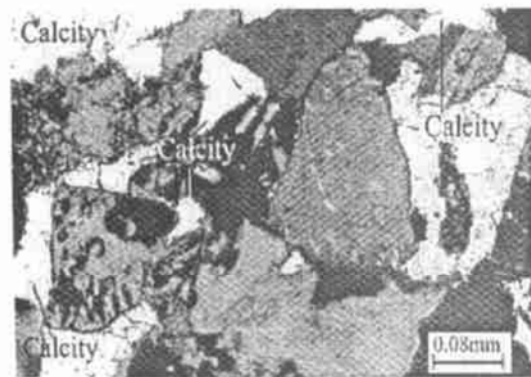
4. 正交偏光镜下: Plagioclase 为碎屑斜长石; P-S为次生斜长石加大边 (斜长石钠长石化) (松辽盆地卫深3井, 井深: 2 759m)



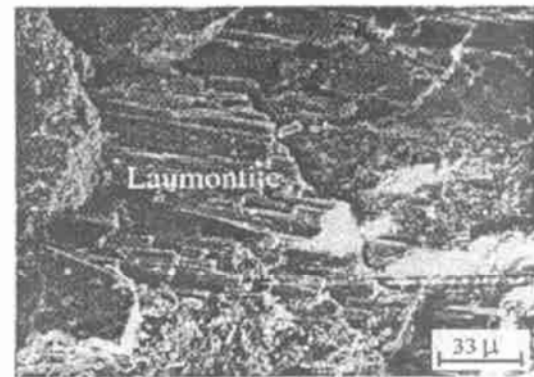
5. 正交偏光镜下: Feldspar 为碎屑长石; F-S为次生长石加大边 (长石钠长石化) (松辽盆地卫深3井, 井深2 157m)



6. 阴极发光照片: Calcite 为自生方解石充填砂岩孔隙 (松辽盆地卫升502井, 井深: 2 677m)



7. 正交偏光镜下: Calcite 为自生方解石交代砂岩碎屑颗粒 (松辽盆地卫深3井, 井深: 2 538m)



8. 扫描电镜下: Laumontite 为自生浊沸石充填砂岩孔隙 (松辽盆地升54井, 井深2 165m)

利用扫描电镜分析观察砂岩成岩后的自生石英特征,不仅碎屑石英颗粒表面的次生加大晶面发育,颗粒间还可见完整的自生石英晶粒(图版2)。

对多口井不同埋藏深度下的碎屑长石进行茜素红染色实验(钾长石颗粒染色后呈黄色,斜长石染色后呈粉红色)。统计结果显示,随着埋藏深度的增加,斜长石颗粒有明显增多的趋势,而钾长石颗粒却不断减少。埋深小于500m时,斜长石和钾长石相对含量基本相等;当埋深在1000~1500m时,钾长石含量明显减少,而斜长石含量相对增多;当埋深达到2000m左右,钾长石基本消失。它们的相对百分含量随深度变化的特征见图1。

斜长石的电子探针分析结果显示,随着埋藏深度的增加(500~3000m),斜长石碎屑颗粒中的 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 成分从84%到99.03%呈不断增多趋势,而 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 则从16%到0.97%呈明显减少趋势(图2)。

钠长石化过程既有交代转化现象,也有沿碎屑

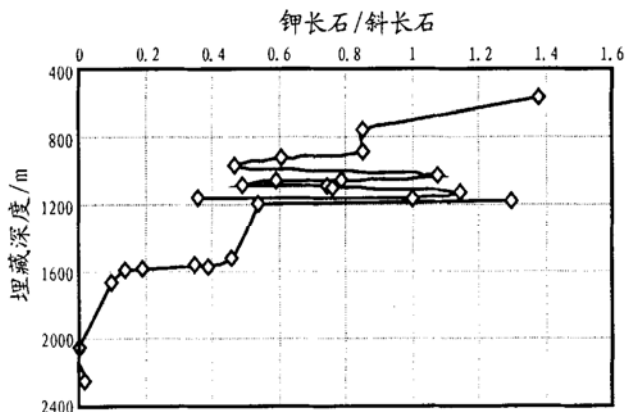


图1 钾/斜长石(比值)随埋藏深度变化特征

Fig. 1 A curve showing the ratio of K-feldspar to plagioclase changing with burial depth

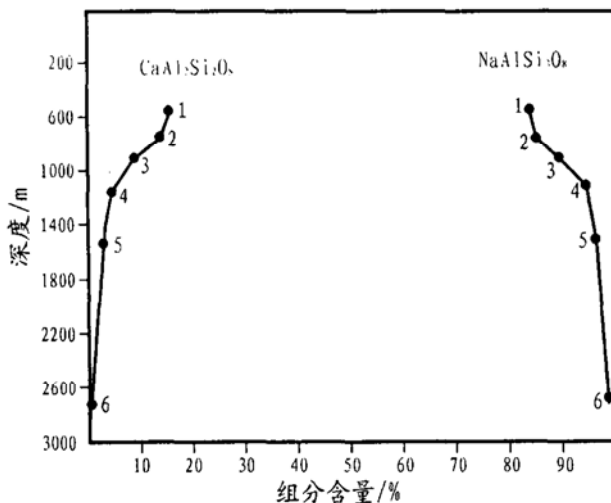


图2 斜长石中含钙钠组分随深度变化特征

Fig. 2 Curves showing the Ca- and Na-bearing components in plagioclase changing with depth

长石颗粒边缘的次生加大现象(图版4、5)。碎屑长石次生加大边宽度一般为0.01~0.04mm,个别达0.06mm左右,局部可占碎屑长石的6%~10%,但不超过砂岩体积的1%。单偏光下干净透明,正交偏光下次生边与核心碎屑消光位不同。

碳酸盐岩的茜素红染色观测结果证实,次生碳酸盐矿物主要为方解石及少量含铁白云石和菱铁矿等,它们极不均匀地充填于砂岩颗粒之间。成岩早期的次生方解石较为富集而且发育,以填充形式为主,占据较大的孔隙空间(图版6),多为无铁方解石(茜素红染红色);成岩晚期的次生方解石相对零星分布,以交代形式为主,强烈交代颗粒及先期胶结物(图版7),一般为富铁方解石(茜素红染紫红色)。

碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )分析表明,成岩早期的次生碳酸盐主要来自无机成因。经过对120块不同层位的钙质砂岩样品分析, $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-6.72\text{‰} \pm 5.5\text{‰}$ (PDB)之间,其中大多数样品(92%)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $0.00\text{‰} \sim 16.34\text{‰}$ (PDB)。

显微镜下和扫描电子显微镜观察次生浊沸石常常独立地出现在盆地的较深部位( $> 1600\text{m}$ )。它的产状同次生方解石一样,呈胶结物形式充填于砂岩孔隙中(图版8)。由于浊沸石在成岩中形成较晚,常常强烈地交代着碎屑颗粒组分和早期的胶结物。通过数百块薄片的观测统计,次生浊沸石在砂岩中呈局部层位富集,占砂岩体积的2%~10%不等,平均为6.8%,局部层位高达12%。浊沸石的形成进一步缩小了深层砂岩的孔隙空间。

此外,显微镜下观察和X衍射分析显示砂岩中岩屑内的粘土矿物成分和杂基粘土矿物成分不同。在成岩作用过程中影响储层孔隙结构的是杂基中成分、结构可变化的粘土矿物,如蒙脱石、高岭石等。

## 2 自生矿物与成岩作用

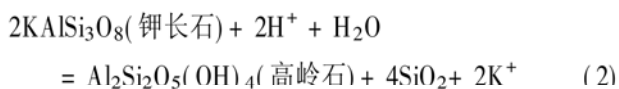
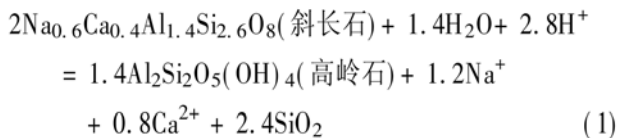
松辽盆地是经过晚侏罗系、白垩系、上下第三系和第四系相对连续接受沉积的大型集水盆地,沉积物是随上覆盖层厚度增加的渐进成岩作用过程,现今地温场具有地温梯度高、大地热流高的特点。依据59口测温井的资料统计,盆地的平均地温梯度为 $3.8\text{℃}/100\text{m}$ ;若考虑到盆地边缘和北部地表水的影响,按盆地主要生油区和产油区计算,平均地温梯度为 $4.2\text{℃}/100\text{m}$ <sup>[1]</sup>。

### 2.1 次生石英

次生石英能够损失较大的砂岩原生孔隙空间已是不争的事实,但有关次生石英的 $\text{SiO}_2$ 来源仍是讨

论的焦点<sup>[3-6]</sup>。用压溶作用观点来解释石英碎屑颗粒的次生长,尤其是海相砂岩,确有其道理<sup>[7]</sup>。然而在松辽盆地,由于砂岩的成分成熟度低,石英碎屑颗粒间的压溶现象并不多见。即便在埋藏较深部层位中有石英颗粒间的镶嵌、交错和挤压等现象,通过阴极发光观察,这一“挤压”现象也仅仅是发生于次生加大边之间的拥挤生长,并非压溶现象(见图版3)。次生石英普遍存在于砂岩中,石英颗粒的次生加大生长是砂岩成岩过程中主要的次生矿物之一。通过对松辽盆地数十口井的样品测试分析,次生石英平均约占砂岩体积的3%左右,在较深层位(>2000m)高达8%以上(图3)。但值得提出的是,由蒙脱石向伊利石转化主要发生于中成岩阶段<sup>[8]</sup>,而石英的次生长是随着成岩强度增大而不断发育的。远离泥岩层或进入成岩晚期由粘土转化而来的SiO<sub>2</sub>能否直接进入砂岩中或最终能进入多少,这是值得讨论的问题。

本文通过大量的岩矿鉴定发现,次生石英的发育与碎屑长石的溶解有密切关系。在碎屑长石溶解的发育层位次生石英相应也比较发育,伴随着碎屑长石的溶解可释放出大量的SiO<sub>2</sub>,而且可以直接沉淀结晶或沿原生石英颗粒边缘次生再生长<sup>[9]</sup>。其过程可用下式表示:



据(1)式,每溶解1cm<sup>3</sup>斜长石可产生0.27cm<sup>3</sup>的SiO<sub>2</sub>,相当于0.72g的SiO<sub>2</sub>。

据(2)式,每溶解1cm<sup>3</sup>钾长石将产生0.42cm<sup>3</sup>

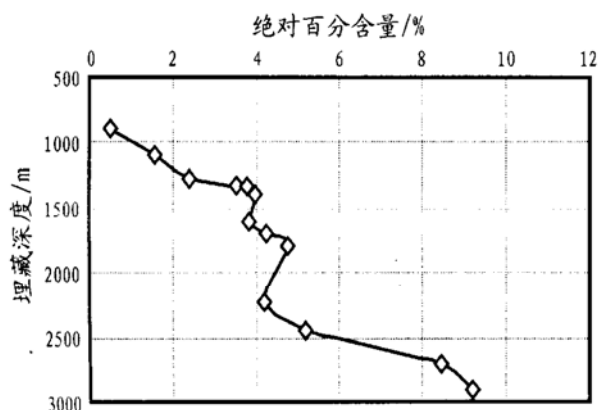


图3 成岩次生石英随埋藏深度的变化

Fig. 3 A curve showing diagenetic secondary quartz changing with burial depth

的SiO<sub>2</sub>的体积量<sup>[5]</sup>。

通过对(1)和(2)两式进行热力学平衡方程吉布斯自由能(ΔG<sup>0</sup>)及熵值(ΔS<sup>0</sup>)计算得出:

$$(1) \text{式} \quad \Delta G^0 = -131.6 \text{ kJ/mol} \quad (\text{标准状态}) \\ \Delta S^0 = -100.3 \text{ J/mol} \quad (\text{标准状态})$$

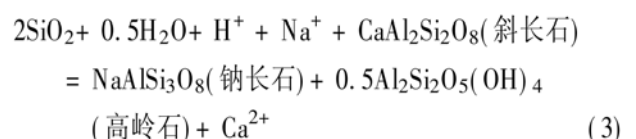
$$(2) \text{式} \quad \Delta G^0 = 18.03 \text{ kJ/mol} \quad (\text{标准状态}) \\ \Delta S^0 = 72.8 \text{ J/mol} \quad (\text{标准状态})$$

依据热力学平衡原理,(1)式中吉布斯自由能(ΔG<sup>0</sup>)及熵值(ΔS<sup>0</sup>)均为负值,表明斜长石的溶解过程即使在常温常压条件下也可进行<sup>[10]</sup>。从能量平衡的角度看,这是一个自发过程,并随着温度和压力的增高反应更加彻底。(2)式中吉布斯自由能(ΔG<sup>0</sup>)及熵值(ΔS<sup>0</sup>)均为正值,表明钾长石溶解需要较高的成岩条件。从非标准状态下吉布斯自由能公式 ΔG<sub>T</sub><sup>0</sup> = ΔG<sup>0</sup> - ΔS<sup>0</sup>(T - 298) (T指华氏温度)分析,钾长石溶解必须满足一定的温压条件,反应方程才能向右进行(ΔG<sub>T</sub><sup>0</sup> < 0)。由此可以认为,碎屑长石的溶解伴随着整个成岩演化过程,在晚成岩阶段由于钾长石溶解的参与使得次生石英的物质来源更加丰富。

## 2.2 次生长石

次生长石的生长与发育实际上就是钠长石化的结果。在成岩过程中随着成岩环境的变化,不稳定的长石组分不断向稳定的钠长石组分端元转化<sup>[4]</sup>。这一过程基本改变了原矿物的化学成分和结构特征。关于长石的钠长石化已有许多报道<sup>[11,12]</sup>,钠长石化受多方面地质因素的控制,不同沉积盆地的钠长石化作用有各自的特点。从松辽盆地数百口井心长石染色统计资料分析,随着埋藏深度的增加,斜长石和钾长石相对百分含量有规律地变化。微观上长石的钠长石化表示为K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup>离子的迁移与富集过程。由于Na<sup>+</sup>离子在半径上要比K<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup>小得多,成岩过程中,富钠或纯钠长石的化学稳定性相对要高得多。迁移与富集的结果是,碎屑长石中K<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup>离子不断减少,而Na<sup>+</sup>离子不断富集。

钠长石化出现的温度与深度说法不一<sup>[3,4,11]</sup>。从热力学自由能的角度分析认为,斜长石的钠长石化可以普遍发育在较低温度下,而钾长石的钠长石化需要在较高的温度、压力条件下才能进行。一般情况下钠长石化与次生高岭石的生成有密切联系,其过程如下:



### 2.3 次生碳酸盐矿物

砂岩在成岩过程中形成的次生碳酸盐矿物主要为方解石及少量含铁白云石和菱铁矿等,它们极不均匀地充填于砂岩颗粒之间。在湖相砂岩中,次生碳酸盐含量一般占砂岩体积的0~1%左右,但在局部发育层位可占砂岩体积的20%~30%(表2),成为砂岩的重要胶结物之一。

在砂岩中,次生方解石多为泥晶方解石和连晶方解石。泥晶方解石一般为含铁方解石,在砂岩中同其它微晶碳酸盐矿物一起呈团块状泥晶集合体填充于颗粒间;连晶方解石是松辽盆地储集砂岩中常见的胶结物之一,以连晶形式充填粒间孔隙。铁白云石仅见于某些局部层段的滨浅湖砂岩中。菱铁矿则以散状自形晶粒分布于白垩系底部的砂岩中。

次生方解石为成岩作用下的自生矿物,但其发育程度是否有随着成岩作用的深入而有规律的发育呢?从松辽盆地湖相砂岩成岩作用研究中还看不出有这种规律,通过若干钻井取心分析结果统计,次生碳酸盐矿物的发育与深度(成岩强度)似乎无多大的关系(表2)。但有两个特点值得讨论:一是,砂岩中次生碳酸盐富集的层位往往分布在与泥岩接触带附近,常常形成钙质砂岩层,俗称烃源岩的“顶钙”和“底钙”层<sup>[13]</sup>;二是,在碳酸盐富集的砂岩中,次生碳酸盐含量一般占砂岩体积的20%~30%或者更高,表明只有在成岩早期才具有如此大的填充空间。因此认为,在松辽盆地砂岩中的次生方解石可分为早期和晚期两种类型。次生碳酸盐的来源除了与原生沉积介质有关外,与成岩早期(埋深<1000m)泥岩脱水也有一定关系。泥岩中由于不同成因的钾离子取代了蒙脱石表面吸附着的钙离子,当泥岩受压实作用脱水时,往往会把这些钙带出泥岩,并在其附近的砂岩中沉淀<sup>[14,15]</sup>。在松辽盆地,泥岩快速脱水带的埋藏深度在0~350m,泥岩沉积物的含水率很快就由80%下降到30%左右<sup>[13]</sup>。由此不难理解在大套泥岩的顶、底层发育有钙质砂岩这一特征。

本区的碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )分析表明,这些钙质砂

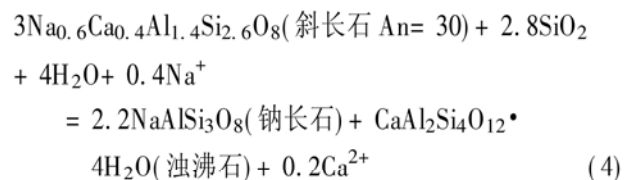
表2 不同井段砂岩中的自生方解石分布特征  
Table 2 Distribution characteristics of authigenic calcite in the sandstone of different depth

井号	样品深度/m	次生方解石/%	样品总有效孔隙度/%
升62井	1733.70	30	8
升67井	1738.00	23.8	6.9
萨5井	1587.8	25	7.7
萨5井	2480.17	29	9.1
卫深3井	2538.00	30.4	

岩层中的方解石以无机碳成因为主。这也表明大多数次生碳酸盐的沉淀没有受到成岩期后有机质的影响,而是发生在有机质溶解和油气运移之前。

### 2.4 次生浊沸石

浊沸石是晚期成岩作用的产物<sup>[16,17]</sup>。在松辽盆地的砂岩中,自生浊沸石不像在其它盆地中呈相带分布(方沸石—斜发沸石—浊沸石等)。浊沸石形成的物质条件可以是多方面的。如Hav(1966)等的一种提法,认为与火山碎屑岩有关<sup>[18]</sup>;但在松辽盆地的白垩系砂岩并非如此,它是在较高的温度(>200℃)和压力下,由富钙贫碳酸根离子的碱性孔隙溶液与斜长石或部分岩屑相互作用产生的<sup>[16]</sup>。埋藏在深处的斜长石的钠长石化过程常伴随着浊沸石的产生。



通过对上式计算得出,每形成1cm<sup>3</sup>的钠长石就会有0.9cm<sup>3</sup>的浊沸石生成。可见在成岩作用晚期,大量、彻底的长石钠长石化作用必将提供丰富的浊沸石物质基础,进一步填充砂岩的原生粒间孔隙。

## 3 结论

通过对中国松辽盆地白垩系湖相砂岩成岩次生矿物的研究,初步得出如下结论:

(a) 砂岩中碎屑石英和长石颗粒的次生加大生长是损失砂岩原始孔隙的主要因素之一,其成因与粘土矿物的转化和碎屑长石的溶解作用有关。

(b) 斜长石的溶解和钠长石化作用可在较低温度、压力条件下的成岩早期发生,而钾长石的钠长石化要求在较高的温度、压力条件下才能进行。

(c) 砂岩中的次生方解石可分为早期和晚期两种类型:成岩早期的次生方解石以填充形式为主,占据较大的孔隙空间,多为无铁方解石(茜素红染红色);成岩晚期的次生方解石相对零星分布,以交代形式为主,一般为富铁方解石(茜素红染紫红色)。

(d) 成岩晚期出现的自生浊沸石进一步填充砂岩的孔隙空间。彻底的钠长石化作用为浊沸石的发育生长提供了物质基础。

### 参考文献:

[1] 杨万里,高瑞祺,郭庆福,等.松辽盆地陆相油气生成运移和聚

- 集[M]. 哈尔滨: 黑龙江省科学技术出版社, 1985. 52- 59.
- [2] 杜博民, 等. 松辽盆地北部储集层特征及成岩演变[J]. 石油与天然气地质, 1984, 5(2): 122- 131.
- [3] 邢顺荃. 砂岩中自生石英和长石的演变特征及其地质意义[J]. 大庆石油地质与开发, 1983, 2(3): 15- 19.
- [4] 卓胜广, 等. 松辽盆地白垩系砂岩成岩作用[J]. 地质科学, 1992, (增刊): 216- 223.
- [5] 柳益群, 等译. 碎屑岩的成岩作用[A]. 西安: 西北大学出版社, 1986. 1- 148.
- [6] 张峭楠, 等. 川西致密砂岩的石英次生加大及其对储层的影响[J]. 地质论评, 1998, 44(6): 649- 653.
- [7] Leader F, Park W. Porosity reduction in sandstone by quartz overgrowth[J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(11): 1713.
- [8] 邢顺荃, 等. 大庆油田砂岩中自生粘土矿物的研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1987, 6(1): 11- 17.
- [9] 周书欣, 卓胜广. 松辽盆地北部中一深层砂岩的次生孔隙研究[J]. 地质科学, 1991, (1): 48- 58.
- [10] 饶纪龙. 地球化学的热力学[M]. 北京: 科学出版社, 1979. 77- 107.
- [11] Boles J R. Active albitization of plagioclase[J]. Gulf Coast Tertiary Am J Sci, 1982, 282: 165- 180.
- [12] 陆红. 江苏地区侏罗-白垩系储层砂岩的成岩作用研究[J]. 石油实验地质, 1997, 19(3): 228- 231.
- [13] 辛国强. 松辽盆地白垩系混合层粘土矿物及其地质意义[J]. 石油实验地质, 1981, 3(1): 38- 42.
- [14] 朱家祥, 等. 碎屑岩成油组合的成岩作用研究[J]. 石油实验地质, 1988, 10(3): 223- 230.
- [15] 陈强路. 松辽盆地东南部物性盖层特征[J]. 石油实验地质, 2000, 22(2): 175- 183.
- [16] 邢顺荃, 等. 砂岩中浊沸石的形成条件及其地质意义[J]. 大庆石油地质与开发, 1982, 4(2): 18- 22.
- [17] 刘俊. 松辽盆地南部影响储油物性因素的初步分析[J]. 石油实验地质, 1982, 4(2): 121- 128.
- [18] Kaiser W R. Predicting reservoir quality and diagenetic history in the Frio Formation (Oligocene) of Texas[J]. AAPG Memoir, 1984, (37): 195.

## CHARACTERISTICS OF DIAGENETIC SECONDARY MINERALS IN THE SANDSTONE OF THE SONGLIAO BASIN

YANG Guifang<sup>1</sup>, ZHUO Sheng-guang<sup>1</sup>, TENG Yuhong<sup>1</sup>, NIU Ben<sup>2</sup>, E Jurjie<sup>3</sup>

(1. Qinhuangdao Branch, Daqing Petroleum College, Qinhuangdao, Hebei 066000, China;

2. Shanghai Branch, CNOOC, Shanghai 200030, China; 3. Jidong Oilfield, CNPC, Tangshan, Hebei 063004, China)

**Abstract:** During the diagenetic process of sandstone, secondary minerals were up to more than 20 kinds. The formation of secondary quartz, albitite, calcite and laumontite affected the storage physical properties of sandstone in different degrees. The SiO<sub>2</sub> forming secondary quartz mainly came from the transformation of dissolved clay mineral in clastic feldspar. Secondary feldspar was related to the albitization process of feldspar, the albitization of plagioclase began at the early stage of diagenesis, and the albitization of K-feldspar can only undergo under higher diagenetic conditions. Secondary calcite was mainly inorganic CaCO<sub>3</sub> deposit in the early stage of diagenesis. Laumontite was stable mineral in the late diagenetic stage, and was related to the albitization in the late stage of diagenesis.

**Key words:** albitization; secondary feldspar; secondary quartz; diagenesis; lake-facies sandstone; Cretaceous; the Songliao Basin