

# 辽河盆地沙河街组砂岩中碳酸盐胶结作用对孔隙演化控制机理研究<sup>①</sup>

薛莲花 史基安 晋慧娟

(中国科学院兰州地质研究所, 兰州 730000)

**提 要** 碳酸盐胶结作用是辽河盆地地下第三系沙河街组砂岩中最常见的胶结作用之一, 碳酸盐胶结物含量变化大、分布范围广。本文运用扫描电镜、阴极发光、氧碳同位素等方法, 对研究区砂岩储层中碳酸盐胶结物的发育状况、形成机制进行了分析, 认为有机质演化过程中产生的有机酸、CO<sub>2</sub> 改变了砂岩的成岩地球化学环境, 既为碳酸盐胶结物的溶解创造了条件, 又为其沉淀提供了物质来源, 从而对砂岩储层孔隙的发育、演化产生重要影响。

**关键词** 砂岩 碳酸盐胶结作用 有机酸 氧碳同位素 孔隙演化

**第一作者简介** 薛莲花 女 30 岁 助理研究员 沉积学

碳酸盐胶结作用是碎屑岩成岩过程中一种重要的孔隙减少作用, 碳酸盐胶结物的沉淀与溶解直接影响到其孔隙的发育状况<sup>①</sup>。辽河盆地地下第三系沙河街组是辽河油田主要的生、储油岩系。其中砂岩是盆地内发育最广泛、最重要的储层, 并在成岩过程中经历了压实、硅质胶结、碳酸盐胶结、以及溶解、交代等成岩作用, 其中碳酸盐胶结作用可分为多期次, 胶结物类型复杂, 分布广。本文在研究成岩作用的基础上, 剖析了碳酸盐胶结物的形成时期及孔隙流体的性质, 阐述了碳酸盐胶结作用对孔隙演化的控制机理, 以及它与烃类侵位的关系。

## 1 研究区砂岩储层的基本特征

### 1.1 沉积学特征

辽河盆地地下第三系沙河街组是在早第三纪盆地进入裂谷发育阶段伴随盆地内初始裂陷经快速深陷到逐步收缩、衰亡的整个过程中沉积的一套巨厚的生储油岩系。早第三纪辽河裂谷湖盆呈狭长状北东方向展布, 具有湖盆窄、岸线长、与周边凸起高差大的特点, 物源区剥蚀速度快, 物源方向多, 与岸线垂直或斜交, 造成了扇三角洲沉积的有利条件<sup>②</sup>。因此下第三系的沉积体具有相带窄、岩性变化大、平面上东西分带、南北分段和纵向上受湖盆演化阶段控制的特点。上述沉积特征决定了研究区砂岩体层层叠置、迭合连片, 且单层厚度变化大, 横向上分布不稳定的特征。砂岩类型主要为长石砂岩, 砂岩成分成熟度及结构成熟度均较低, 石

① 国家自然科学基金资助项目(基金课题编号:49272119)

② 于天欣, 辽河断陷隐蔽油气藏形成条件及分布规律, 辽河石油勘探与开发, 1991, 1(1)。

英颗粒的含量一般在 40%~60%,长石含量为 20%~40%,有时可达 50%以上,岩屑含量为 14%~30%,最高可达 40%,主要为泥质岩屑、火山岩屑,砂岩中普遍含有黑云母及白去母碎片。

## 1.2 储集砂岩主要的成岩类型及特征

### 1.2.1 压实作用

研究区砂岩的成分成熟度较低,砂岩中含有较多的可塑性碎屑颗粒,如泥质岩屑、火山岩屑、片状云母等,它们在岩石中很容易挤压变形。经压实作用后,云母弯曲变形,泥质岩屑被挤入孔隙中形成假杂基,刚性颗粒则被压裂。随着压实作用的增强,颗粒的接触类型逐渐由点接触、线接触变为凹凸、缝合状接触。岩石薄片资料表明,沙河街组压实作用有两个主要作用时期,一是早期成岩阶段,埋深小于 2000 m,对于泥质含量较高的砂岩埋深在 1300 m 处即被压实;二是当埋深大于 2500 m,由于压实作用,颗粒间凹凸、缝合状接触类型增多。

### 1.2.2 胶结作用

研究区砂岩中主要胶结作用类型有:硅质胶结作用、碳酸盐胶结作用、粘土矿物胶结作用等(表 1)。

表 1 主要成岩作用类型及特征

Table 1 Characteristics and types of major diagenesis

成岩作用类型		主要特征
压实作用		颗粒挤压变形、破裂;颗粒间呈凹凸缝合状接触
主要胶结作用	硅质胶结	石英次生加大和隐晶质玉髓充填孔隙
	碳酸盐胶结	镶嵌状、晶粒状方解石和白云石
	自生高岭石	呈假六方书页状集合体
	自生伊利石	呈丝缕状、球状或弯曲薄片状
	自生绿泥石	呈叶片状
	自生长石	主要为自生纳长石晶体
交代作用	交代碎屑颗粒	主要为碳酸盐矿物交代石英、长石颗粒
	交代胶结物	铁方解石交代白云石及石英次生加大边
溶解作用		长石等不稳定碎屑组分的溶解碳酸盐胶结物的溶解

硅质胶结物的含量多在 5%—10%之间,其类型主要为隐晶质玉髓及石英次生加大,另外还有少量充填孔隙的自生石英晶粒。石英次生加大可分为弱次生加大和强次生加大两种类型。石英弱次生加大在薄片表现为仅有个别石英颗粒有次生加大边,且加大边较窄,强次生加大通常表现为多个石英颗粒具次生加大边,加大边较宽,一般仅在埋深大于 2600 m 的砂岩中见到。

碳酸盐胶结物的含量在 0%—30%之间,其分布范围较广,从 1300—3700 m 均可见到。本区碳酸盐胶结可分为早、晚两期,以晚期为主。扫描电镜及碳酸盐染色资料表明,碳酸盐胶结物类型多样,有方解石、白云石、铁方解石、铁白云石,它们在砂岩中呈嵌晶状或晶粒状充填孔隙,其中铁白云石、铁方解石的形成晚于白云石、方解石,铁白云石多呈自形晶粒出现在

砂岩中。充填孔隙的白云石在阴极发光显微镜下发暗红色光,第一世代方解石发桔红色光,第二世代方解石发亮桔黄色光。结合碳酸盐染色资料可以确定第二世代方解石为铁方解石。

扫描电镜及X—衍射资料综合分析表明研究区砂岩自生粘土矿物主要是高岭石、伊利石及绿泥石。自生高岭石呈假六方板状集合体,伊利石呈丝缕状、球状或弯曲薄片状。绿泥石呈叶片状,与自生石英共生。这些自生粘土矿物或是附着在颗粒表面,或是杂乱堆积在颗粒间孔隙中。另外,还可见到高岭石向绿泥石转变的现象。

其它自生矿物主要是长石及少量铁质胶结物。自生长石主要为次生加大和自生钠长石晶体两种形式,多分布在2600 m以下。铁质胶结物则以孔隙充填或斑块状出现在砂岩中。

### 1.2.3 溶解作用

研究区砂岩中的溶解作用,主要表现为长石等不稳定矿物颗粒的溶解和碳酸盐胶结物的溶解。溶解作用的时期可分为两期,第一期溶解作用发生在晚期碳酸盐胶结物形成之前,主要是长石颗粒和早期碳酸盐胶结物的溶解。扫描电镜及岩石薄片资料表明,长石颗粒的溶解既有钙长石的溶解,也有钾长石的溶解。早期碳酸盐的溶解表现在因其溶解使埋深在200—2500 m的砂岩呈差异压实现象,同一样品中部分颗粒排列紧密,部分颗粒呈点接触或个别颗粒呈漂浮状,形成非均匀次生孔隙。第二期溶解作用发生在晚期碳酸盐胶结物形成之后,主要表现为晚期碳酸盐胶结物的选择性溶解,形成港湾状溶蚀孔隙。

### 1.2.4 交代作用

研究区砂岩中的交代作用主要表现为碳酸盐矿物对碎屑矿物颗粒的交代和晚期碳酸盐矿物对早期碳酸盐胶结物的交代。主要有铁方解石交代石英、长石颗粒,使之边缘呈港湾状,或交代整个颗粒后依然保留了长石颗粒的形状,并可见到碳酸盐交代石英颗粒的次生加大边,说明碳酸盐交代作用发生较晚。

## 2 碳酸盐胶结作用的主要控制因素

### 2.1 碳酸盐胶结物的形成阶段

根据镜质体反射率、有机质演化阶段及砂岩成岩过程中自生矿物的类型及成岩温度等标志,可将研究区碎屑岩成岩阶段划分为两个阶段(见表2)。

从表中可以看出,早期碳酸盐胶结物是在埋深小于2100米,成岩温度小于80℃的早期成岩阶段沉淀的,晚期碳酸盐胶结物是在埋深大于2500米的中成岩阶段B期形成的,这时的成岩温度大于93℃,已达到生油门限温度。

### 2.2 物质来源

研究区砂岩中如此类型繁多的碳酸盐胶结物的沉淀,必然要消耗钙离子和其它阳离子,因此,孔隙水中有一定数量的 $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 及 $CO_3^{2-}$ 等离子是碳酸盐胶结物形成的前提,这些离子的来源是控制碳酸盐胶结物沉淀的一个主要因素。

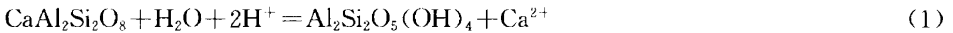
参与形成白云石、铁白云石、铁方解石的 $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 离子的来源,与辽河盆地沙河街组砂岩的组成有关。大量黑云母及火山岩屑的蚀变,及粘土矿物的转变能提供充分的 $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 离子,既形成含铁碳酸盐又形成绿泥石<sup>[2]</sup>,另外,从岩石薄片见有较丰富的不透明铁质胶结物,说明该区砂岩成岩过程中、 $Fe^{2+}$ 是十分充足的。

表 2 研究区沙河街组碎屑岩成岩作用阶段划分特征

Table 2 General diagenetic stages of shahejie formation sandstone

成岩阶段的划分		早期成岩阶段	中期成岩阶段	
			A	B
埋藏深度 (m)		<2100	2100—2500	>2500
镜质体反射率 (%)		0.36—0.47	0.47—0.53	0.53—1.30
地 温 (°C)		<80	80—93	93—160
砂 岩 的 埋 藏 成 岩 作 用	自生高岭石			
	早期碳酸盐沉淀			
	石英弱次生加大			
	长石等矿物溶解			
	石英强次生加大			
	自生绿泥石			
	铁方解石胶结与交代			
	铁白云石及钠长石沉淀			
	次生孔隙			
油气的形成				
有机质成熟度		未成熟	次成熟	成 熟

对于  $\text{Ca}^{2+}$  的来源,笔者在对辽河盆地沙河街组砂岩的鉴定中发现大量钙长石溶解及早期碳酸盐胶结物溶解的证据,因此至少有两种来源是可以确定的,一是钙长石的溶解,即:



二是早期碳酸盐的溶解,即:



碳岩中碳酸盐胶结物和钙质泥岩中碳酸盐矿物的氧碳同位素分析数据(图 1)表明砂岩中早期碳酸盐胶结物的氧碳稳定同位素值与泥岩中的同位素特征差异不大<sup>[3]</sup>,而晚期碳酸盐胶结物的氧碳同位素则很轻,说明早期碳酸盐胶结物的沉淀是成岩早期发酵细菌在还原环境中分解有机质,使残余富含重同位素的  $\text{HCO}_3^-$  与岩石中的钙离子相结合形成的。而晚期碳酸盐胶结物中的部分  $\text{CO}_3^{2-}$  与有机质演化过程中有机酸的脱羧作用有关,即有机酸脱羧产生富轻同位素的  $\text{CO}_2$  参与形成晚期碳酸盐胶结物,反应如下:



### 2.3 控制碳酸盐胶结作用的地球化学条件

碳酸盐的沉淀与溶解反映了孔隙水中碳酸盐溶解度的变化,而碳酸盐溶解度对孔隙流体的 pH 值、温度及  $\text{CO}_2$  分压等地球化学条件极为敏感,通常认为 pH 值升高、温度升高及

CO<sub>2</sub> 分压降低有利于碳酸盐的沉淀<sup>[4]</sup>。

早期成岩阶段，温度低于 80℃，有机质经细菌分解而形成有利于碳酸盐沉淀的环境。当砂岩进入中成岩阶段，温度超过 80℃时，有机质成熟过程中释放的大量有机酸进入储层系统，使孔隙水的 pH 值降低，造成了早期碳酸盐和铝硅酸盐的溶解<sup>[5,6]</sup>，反应如(1)、(2)所示。碳酸盐溶解作用将导致储层中 CO<sub>2</sub> 分压的增大。如果 CO<sub>2</sub> 分压的值未超过反应(2)平衡常数所要求的数量，碳酸盐的溶解作用就不会停止。当成岩温度超过 100℃时有机酸的脱羧作用大量释放 CO<sub>2</sub>，使得储层中的 CO<sub>2</sub> 分压超过了反应(2)平衡常数所要求的数量(但孔隙水的 pH 值仍为铝硅酸盐矿物平衡所决定)溶解了的碳酸盐又再次沉淀下来，并由于有机酸脱羧产生的富轻同位素的 CO<sub>2</sub> 的加入，使得此时沉淀的碳酸盐矿物的氧碳同位素值降低。随着成岩温度的继续升高，有机质脱羧作用产生的 CO<sub>2</sub> 愈来愈多，若孔隙流体的 pH 值为 CO<sub>2</sub> 分压控制时，又将造成晚期碳酸盐的溶解<sup>[3]</sup>。

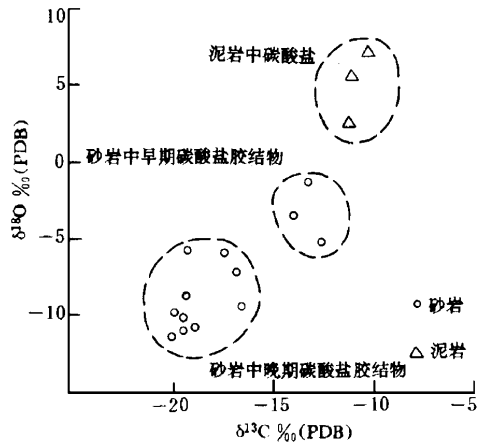


图 1 砂岩碳酸盐胶结物氧碳稳定同位素特征  
Fig. 1 Characteristics of stable oxygen and carbon isotopes of carbonate minerals in sandstone and mudstone

从上述成岩过程中地球化学条件的变化可以看出，pH 值是呈波浪起伏变化的，而且在不同阶段控制 pH 值的主要因素各不相同。首先早期碳酸盐胶结物的形成表明孔隙水的 pH 值较高，它的溶解说明孔隙水的 pH 值由高变低，其次是晚期碳酸盐的沉淀又表明 pH 值由低变高。

### 3 碳酸盐胶结作用对孔隙演化的影响

通过对研究区砂岩岩石薄片、铸体薄片的观察，我们发现了这样一个事实，即泥质含量较高的砂岩在 1300 m 左右即被压实，孔隙不发育，而泥质含量较低的硅质或钙质胶结的砂岩即使在 2000 m 以下孔隙仍然很发育，甚至当埋深大于 3000 m 时，孔隙度也没有明显减少(图 2)。是什么原因使得这些砂岩的孔隙得以保存而未被压实呢？笔者认为是由于早期成岩阶段碳酸盐胶结物的搞压实能力较泥质强，可起支撑作用，使压实作用减弱，孔隙才得以保存。另外，当埋深增加，砂岩进入中期成岩阶段后，早

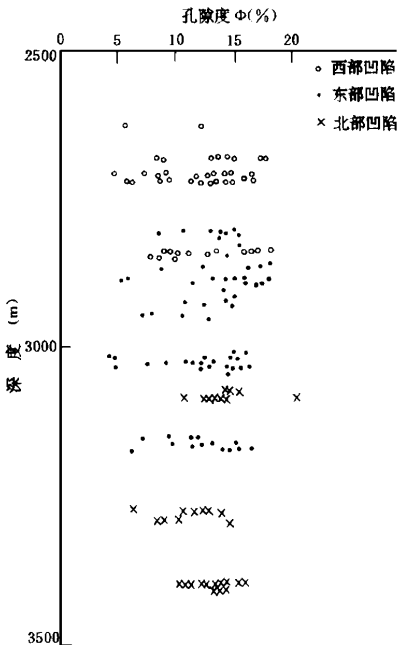


图 2 砂岩孔隙度与埋藏深度关系图  
Fig. 2 Porosity versus depth plot for lower Tertiary shahejie formation sandstone in Liaohe Basin

期碳酸盐胶结物被溶解,也使得岩石的孔隙增加。

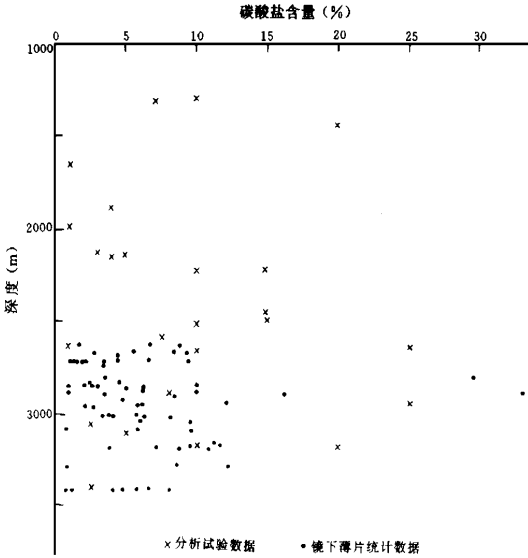


图3 砂岩的碳酸盐含量与埋藏深度关系图

Fig. 3 Plot of carbonate cement volume versus depth for lower Tertiary Shahejie formation sandstone in Liaohe basin

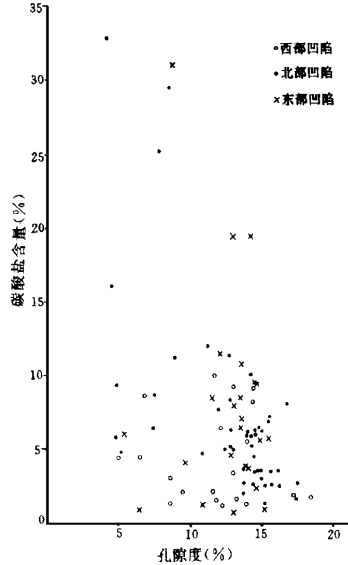


图4 砂岩的碳酸盐含量与孔隙度关系图

Fig. 4 Plot showing relationship between carbonate cement volume and porosity of Shahejie formation sandstone

从碳酸盐含量与深度关系图(图3)可以看出,碳酸盐的含量与深度没有对应关系,而且碳酸盐含量与孔隙度之间也没有明显的负相关关系(图4),这说明目前状况下砂岩中碳酸盐胶结物的存在对孔隙度的影响不大。笔者认为由于孔隙流体的运动,导致深部和浅部地层中广泛存在着碳酸盐的沉淀,因此从深度上反映不出碳酸盐含量的变化。按照正常的孔隙度演变规律,碳酸盐胶结物的形成必然会使孔隙度降低,并且碳酸盐胶结物的含量越高,所占据的孔隙也越多,因此,在辽河盆地沙河街组砂岩中,碳酸盐胶结物形成的同时或之前,必然进行着孔隙增加的作用,即在孔隙因胶结作用而减少的同时,也进行着次生孔隙的形成作用<sup>[7]</sup>。薄片及扫描电镜资料表明,正是碳酸盐胶结物及长石等不稳定矿物的溶解,而产生了大量的次生孔隙。通过研究区砂岩成岩作用的研究,各种成岩事件对孔隙度的影响概括如下(表3)。

表3 砂岩成岩事件与孔隙度变化的关系

Table 3 Relationship between diagenesis and porosity of eandstone

成岩阶段	成岩事件	孔隙度变化
早期成岩阶段	压实作用,早期碳酸盐沉淀,高岭石沉淀,石英弱次生加大。	减少
中期成岩阶段	A 早期碳酸盐溶解,长石溶解,高岭石沉淀。	增加
	B 石英强次生加大,自生绿泥石沉淀,晚期碳酸盐沉淀,钾长石、钙长石溶解,钠长石沉淀。	减少

笔者认为在早期成岩过程中,由于机械压实作用,泥质含量高的砂岩因缺少抗压实基质,孔隙迅速减少,而泥质含量少的砂岩中,因早期碳酸盐胶结物可起支撑作用,使压实作用减弱,孔隙损失相对较少。此期孔隙的损失主要因机械压实作用造成,这是辽河盆地沙河街组砂岩孔隙损失的主要阶段。中期成岩阶段,孔隙的演化比较复杂,一方面大量胶结物沉淀,另一方面又形成次生孔隙,从而造成胶结物含量对孔隙度影响不大的假象。中期成岩阶段 A 期,有机质尚未成熟,大量有机酸先于油气生成,因其强水溶性而进入砂岩,使长石等不稳定颗粒和早期碳酸盐胶结物溶解,增加了砂岩的孔隙度。同时长石溶解产生的高岭石沉淀又使孔隙度降低,但这时矿物溶解的体积大于矿物沉淀的体积,总体上孔隙度增大,为油气进入砂岩储层创造了条件。中成岩阶段 B 期,有机质成熟,油气进入砂岩储层,对于含油砂岩来说,油气的进入抑制了晚期碳酸盐胶结物的沉淀,因此,含油砂岩中晚期碳酸盐胶结物极为罕见。对于非含油砂岩,晚期碳酸盐胶结物的沉淀,使得中成岩阶段 A 期增加的孔隙重新被充填,并由于孔隙流体的运移,导致浅部地层中的碳酸盐沉淀,随着成岩温度的升高,有机质脱羧产生的  $\text{CO}_2$  增多,也导致部分晚期碳酸盐胶结物的溶解,因此,从深度上看,碳酸盐胶结物的含量无明显差异。

## 结 论

辽河盆地第三系沙河街组砂岩成岩过程中主要有两期碳酸盐胶结物形成,一是早期成岩阶段沉淀的碳酸盐矿物,二是中成岩阶段 B 期形成的碳酸盐胶结物。形成碳酸盐矿物的物质来源与其砂岩组成、有机质的演化密切相关。早期碳酸盐胶结物既造成孔隙的损失,又为后期溶解形成次生孔隙创造了条件,客观上为后来的油气侵入奠定了基础。晚期碳酸盐胶结物的形成,晚于油气的侵入。对于含油砂岩,油气的侵入抑制了晚期碳酸盐的沉淀,而非含油砂岩,晚期碳酸盐的沉淀,重新充填了中成岩阶段早期形成的次生孔隙,造成了砂岩的孔隙度降低,虽部分溶解也形成了次生孔隙,但与油气主要运移期不相匹配,且数量有限,不能作为有效孔隙。总之,早、晚两期碳酸盐胶结物在孔隙演化过程中所起的作用各不相同。

收修改稿日期:1995年8月4日

## 参 考 文 献

- [1] Thomas R. Taylor, The influence of calcite dissolution on reservoir porosity in Miocene sandstones, Picaroon field, offshore TEXAS GULF COAST *Journal of Sedimentary Petrology*, 1990, 60(3):322-334.
- [2] 郑浚茂,庞明编著,碎屑储集岩的成岩作用研究,武汉:中国地质大学出版社,1989.
- [3] 史基安,晋慧娟,薛莲花,长石砂岩中长石溶解作用发育机理及其影响因素分析, *沉积学报*, 1994, 12(3).
- [4] 梅博文主译,杨文宽审订,储层地球化学,西安:西北大学出版社,1992.
- [5] Ronald C. Surdam, Laura J. Crossey, E. Sven Hagen and Henry P. Heasler, Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis, AAPG Memoir 37, p. 127, in D. A. McDonald and R. C. Surdam eds: *Clastic diagenesis*. 1984.
- [6] Surdam, R. C., L. J. Crossey, E. S. Hagen and H. P. Heasler, Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis, *AAPG Bulletin* 1989, 73, 3-16.
- [7] M. Ben Baccar and B. Fritz, Geochemical modelling of sandstone diagenesis and its consequences on the evolution of porosity. *Applied Geochemistry*, 1993, 8. 285-295.

## Study of Controlling Mechanism of Carbonate Cementation on Porosity Evolution in Lower Tertiary Sandstones of the Liaohe Basin

*Xue Lianhua Shi Jian and Jin Huijuan*

(Lanzhou Institute of geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

### Abstract

In sandstone carbonate cementation is an important porosity reduction process. Timing of carbonate precipitation and dissolution influences on development and evolution of porosity directly. In Liaohe Basin Low—Tertiary sandstones carbonate cement average content is 10%, the maximum can be to 30%. The extent of carbonate cement distribution varies widely with present depth from 1300 m to 3700 m, and species of carbonate cement are calcite, ferriferous calcite, dolomite and ferriferous dolomite.

The SEM, cathodoluminescence emission, oxygen and carbon stable isotopes, etc. analytical methods are adopted in the research of the development mechanism of the carbonate cement in Liaohe Basin reservoir sandstones. Through research, the author indicates that (1) there were two episodes carbonate cementation took place in sandstones, and the formation of carbonate cement is related to the sandstone composition, evolution of organic matter and the characteristics of water; (2) there are different influence of two episodes carbonate cementation on porosity, and effect on the emplacement of hydrocarbon. Early episode precipitated carbonate cement caused pore loss and provided a condition for dissolution secondary porosity, and emplacement of hydrocarbon, late episode carbonate cement precipitation is related to CO<sub>2</sub> generated by deoxidation of organic matter and reprecipitated in the dissolution porosity, so that a large amount of porosity lost in the B episode of Mid—diagenesis.

**Key Words:** Sandstone Carbonate cementation Organic acid Oxygen and carbon isotopes Porosity evolution