

砂岩中某些成岩现象与有机质 和粘土矿物演化关系的探讨

——以东濮凹陷渐新世储层成岩变化为例

高延新 尹旭东

(石油工业部石油勘探开发科学研究院)

在东濮凹陷渐新统砂泥岩层序成岩作用研究的基础上,本文着重探讨了砂岩中所发生的成岩作用与有机质和粘土矿物的转化关系。发现混层粘土矿物的转化与有机质的热演化之间密切相关;同时,粘土矿物和有机质的演化又通过对孔隙水介质性质的影响,在一定程度上控制了砂岩中所发生的成岩作用。对于这种相关性的认识,将有助于我们对其他盆地的有机质演化和次生孔隙的形成做出预测。同时,本文还从理论上讨论了这些成岩反应和变化所经历的可能途径。

众所周知,一切化学成岩变化都是在水介质的参与下进行的,那么有机质和粘土矿物的演化必然影响孔隙水介质所含的离子类型和浓度及其物理化学条件;一旦孔隙水的物理化学条件和所含离子的浓度发生变化,必然会导致某些矿物的溶解和另一些矿物的沉淀。所以成岩变化和有机质及粘土矿物演化之间具有密切关系,两者相互影响,相互促进。这就是本文要讨论的问题。

一. 储层的成岩现象和组合

我们对埋深在1400—4300m之间的渐新世三角洲前缘砂岩储层进行了系统的铸体薄片(200余块)、扫描电镜(300余块)和物性分析,发现同一沉积环境的砂岩储层从浅到深,有规律地出现不同成岩现象组合。这种成岩现象组合具有一定的深度分布范围。根据不同深度所见的成岩现象组合特点,再结合有机质、粘土矿物演化及镜煤反射率等参数,将东濮凹陷渐新世储层的成岩作用划分为四个阶段(见表1)。

1. 成岩阶段早期

该地区储层在成岩阶段早期(埋深在1500m以上较少发生化学成岩变化),以物理压实作用和固结作用为主,表现为软性矿物(如黑云母等)发生变形和长条状的颗粒趋于定向排列。随埋深增加,颗粒由点接触逐渐向线接触变化,紧密度也逐渐增加。在此阶段,胶结作用不太发育,孔隙度较高(图1),主要为原生孔隙。

表1 东濮凹陷内成岩阶段的划分及其特点

成岩阶段	埋 深	孔隙水性质	热解温度	镜煤反射率	成岩现象组合	主要胶结物组合	粘土矿物组合				演化特点 有机质	孔隙特点	
							蒙	混	伊	高		类型	孔隙度
成岩早期	压实阶段 1500米 以上	酸 ↓ 碱	大部分 小于 410°	小于 0.5	软性矿物变形 脆性矿物破裂	基质起胶结 作用 早期方解石					细菌 氧化 阶段 还原 阶段	原生	10 20
成岩晚期	压实—胶结阶段 1500— 2500	碱 ↓ 酸	大部分 为 410°— 420°	小于 0.5	早期方解石沉 淀、方沸石沉 淀、颗粒的方 解石化、石英 次生加大	早期方解石 方沸石					细菌 发酵 阶段	混合	
后生早期	溶蚀阶段 2500— 3200	酸 ↓ 碱	83%的 样品在 420°— 430°	大于 0.5	碎屑颗粒的溶 蚀、胶结物的 溶蚀、基质的 溶蚀	残余方解石 晚期 铁方解石					脱羧基 液态烃 产生 阶段	次生 孔隙 为主	
后生晚期	交代再胶结阶段 3200— 4500	碱	81.2% 的样品 大于 430°	大于 0.55	颗粒的铁白云 石化、硬石并 化、铁白云石 沉淀、硬石并 沉淀、自生绿 泥石	铁方解石 铁白云石 硬石膏					凝析油 湿气 阶段	次生 和 残余 孔隙	

2. 成岩阶段晚期

当储层进入早期后生阶段（1500—2500m），即开始发生一系列变化，最明显的是出现化学成岩变化，大量的方解石和方沸石胶结物开始沉淀，形成方解石和方沸石自生矿物组合，并充填原生孔隙，致使孔隙度大幅度降低（图1）。方解石胶结物常呈连晶状，同时伴有大量的碎屑颗粒方解石化现象。方沸石也常呈片状分布在孔隙之间。

3. 后生阶段早期

在后生阶段早期，砂岩层内发生着另一种强烈的成岩现象——溶蚀作用。在薄片及扫描电镜中均能见到大量的碎屑颗粒和胶结物遭到强烈的溶蚀，某些石英颗粒被溶成港湾状，长石颗粒被溶成蜂窝状，还有的碎屑颗粒几乎被溶掉，同时一些生物碎片也遭强烈溶蚀。

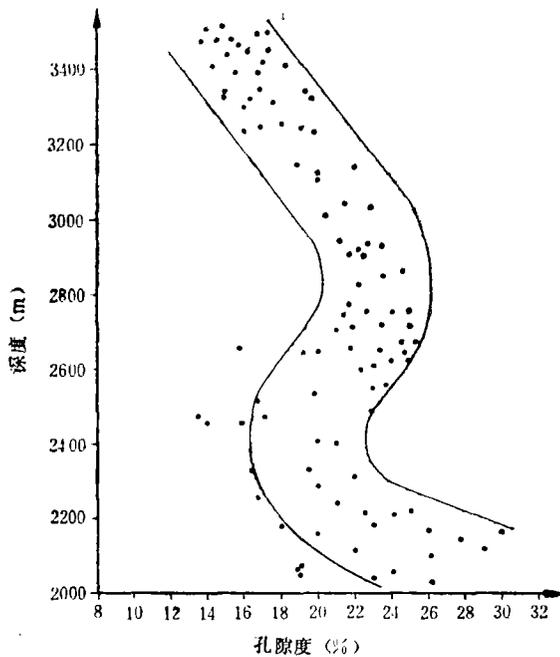


图1 文留地区井段平均孔隙度与井深关系图
（文204井、文95井、文96井、文15-1井、文140井）

在某些样品中,碳酸盐胶结物几乎全部被溶蚀、淋滤,仅见少量残余方解石。至此阶段,岩石的孔隙度又有所增加(图1),孔隙类型主要是由溶蚀作用产生的次生孔隙,也有部分残余的原生孔隙。

4. 后生阶段晚期

当储层进入3200m以下,即晚期后生阶段,岩石内可见到粒间孔隙被铁白云石、硬石膏和铁方解石充填,其中有些孔隙几乎被胶结物填满,同时颗粒的硬石膏化、铁白云石化非常强烈,常见一些硬石膏具碎屑颗粒外形,仅在中间残留有原来的碎屑矿物。铁方解石的铁白云石化也常有发育,表现为颗粒中间为铁方解石,周围为铁白云石。后生阶段晚期的次生矿物组合与成岩作用晚期的次生矿物组合明显不同,前者为铁白云石、硬石膏和铁方解石胶结物组合,后者为方解石和方沸石组合。该阶段的储层孔隙度明显降低(图1)。

很明显,在该地区储层从浅到深,内部发生了规律性的变化:首先是压实、固结等物理变化,较少见沉淀的胶结物。随深度的增加(1500—2500m),开始大量出现方解石和方沸石胶结物,并伴有颗粒的方解石化等成岩现象,但少见铁白云石和硬石膏等矿物,储层孔隙度也明显降低。深度进一步增加(2500—3200m),发生颗粒和胶结物的强烈溶蚀,形成大量的次生孔隙,伴有某些粘土矿物如高岭石的大量形成。最后(3200m以下)发生铁白云石和硬石膏的大量沉淀,同时伴有颗粒的硬石膏化和铁白云石化,形成铁白云石和硬石膏矿物组合。

综上所述,东濮凹陷的砂岩储层从浅到深存在一个从压实到胶结、溶蚀再胶结的成岩层序,每一阶段都具有各自的成岩矿物组合和岩石学特点。

二. 东濮凹陷渐新统的有机质和粘土矿物演化特点

我们选择不同深度范围内的深湖相泥岩及其邻近砂层的117块泥页岩,作了有机质和粘土矿物分析,发现有机质和粘土矿物随深度增加发生有规律的变化(见表1)。在成岩阶段早期(1500m以上),有机质处于细菌氧化和还原阶段,大部分样品的热解温度小于410℃(表2),到成岩作用晚期阶段(1500—2500m)有机质开始出现细菌发酵作用,大部分样品的热解温度介于410—420℃之间;后生作用早期阶段,83%的样品热解温度分布在420—430℃之间;到后生作用晚期阶段,有机质已进入凝析油和湿气形成阶段,81.2%的样品热解温度在430℃以上。据程克明等人研究,生油岩的正烷烃奇偶优势随埋深不断变化,埋深2550m以前生油岩中正烷烃具明显的奇数优势,OEP值一般大于1.20,最大达2.5,超过2500m以后奇碳优势基本消失。2500m以上烃转化率小于3%,超过2500m以后逐渐增加,在3400m达到最高峰,烃转换率高达25%;到3900m以后,烃转换率又降到3%以下。在2500m以上,由于干酪根未发生大量热降解成烃,因而干酪根保持较高的H/C比,2500m以下,由于干酪根成熟并发生侧链基的大量降解,所以H/C比急剧下降。由上述可见,有机质随着埋深增加,在温度压力作用下发生规律性的变化,这些变化无疑影响到砂岩孔隙水的性质和特点。

粘土矿物种类随深度变化与有机质演化基本相符(表3)。随深度增加,伊利石和伊

表 2 北区有机质热解温度分析表

地区	井深 (m)	400—410℃	411—420℃	421—430℃	431—440℃
文 明 寨	2000以上	21%	42%	31.0%	5%
	2000—2500	0	66.7%	33.3%	0
	2500—3200	0	9%	40.9%	50%
	3200以下	没	做	样	
濮 城 地 区	2000以上	没	做	样	
	2000—2500	0	0	83.3%	16.7%
	2500—3200	0	0	58.8%	41.2%
	3200以下	0	0	18.8%	81.2%
文 留 地 区	2000以上	没	做	样	
	2000—2500	28.5%	42.8%	28.5%	0
	2500—3200	11.0%	11.0%	55.6%	22.0%
	3200以下	0	0	0	100%

表 3 北区粘土矿物类型变化特点

地区	井 深	类型								
		I			I/S			K		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
文 明 寨	2000m以上	65	37	51.1	43	20	31.2	18	3	8.77
	2000—2500	68	38	53.1	48	23	32.4	16	3	7.8
	2500—3200	73	43	52.9	41	20	33.9	12	3	9.17
	3200m以下	55	51	52.7	38	34	35.7	7	6	6
濮 城 地 区	2000m以上		没	作	样					
	2000—2500	69	38	52	42	21	25	17	4	8.79
	2500—3200	59	24	47.23	45	22	32.22	35	4	12.7
	3200m以下	65	44	52.5	39	26	31.8	16	3	10.6
文 留 地 区	2000m以上			没	作	样				
	2000—2500			没	作	样				
	2500—3200	83	42	90.3	33	12	25.7	14	2	8.1
	3200m以下	95	42	67	31	20	24.4	11	4	6.8

利石/蒙脱石混层矿物的百分含量有增加的趋势,在2500—3200m之间, I/S混层矿物的最大值和平均值都达到高峰, 3200m以下混层矿物百分含量降低, 伊利石含量增高。对部分地区砂岩中的粘土矿物作分析发现(表4),在2500m以下,砂岩中粘土矿物已不含蒙脱石,而泥岩中仍含有蒙脱石,说明砂岩中活跃的孔隙水有利于粘土矿物的转化。南部地区I/S混层矿物随深度变化的规律不明显,但在2500—3200m之间大量出现蠕虫

表4 南部砂岩中粘土矿物变化特点

类 型	粘土矿物	2000m以上	2000—2500m	2500—3200m	3200m以下
		蒙脱石 (S)	最大值	/	0
	最小值	/	0	0	0
	平均值	/	0	0	0
伊 利 石 (I)	最大值	/	59.0	55.0	61.0
	最小值	/	56.0	24.0	23.0
	平均值	/	57.5	36.0	42.0
伊/蒙 混 层 (I/S)	最大值	/	29.0	39.0	34.0
	最小值	/	25.0	20.0	11
	平均值	/	27.0	25.0	20.8
高 岭 石 (K)	最大值	/	9.0	45.0	19.0
	最小值	/	6.0	0	0
	平均值	/	7.6	24.9	39.0
绿 泥 石 (C)	最大值	/	10.0	27.6	55.0
	最小值	/	6.0	6.0	7
	平均值	/	8.0	14	33.2

状高岭石(这已被X-衍射及扫描电镜所证实)。我们认为高岭石的大量形成可能与脱羟基作用产生的酸性孔隙水对长石的淋滤、溶蚀有关。绿泥石在3200m以下大量出现。

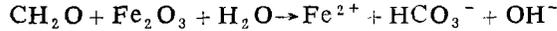
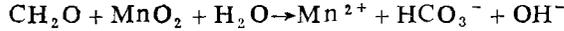
上面的分析研究表明,不同成岩阶段具有不同的成岩现象组合,同时在不同的成岩阶段有机质和粘土矿物也具有各自的特点。它们之间存在某些相互影响和相互促进作用,一定的有机质和粘土矿物演化阶段发生一定的成岩现象组合。

三.机理讨论

沉积物的成岩变化受控于多种因素,是一个复杂的变化过程。归纳起来主要受四方面因素的控制,成岩环境的物理条件、物理化学条件、构造条件和岩石本身的性质。由于我们的研究仅限于东濮凹陷渐新世储层,因此可以假设不同深度砂岩所经受的构造影响是相同的。再者,我们的研究对象是同一物源在相同环境下形成的砂岩体,因此可以假设不同深度的砂岩其本身的性质基本相似。但是,不同深度的储层所处的物理化学条件不同,即所处的温度压力和流体介质不同,随埋深的增加,成岩环境的温度和压力有所增加,同时有机质和粘土矿物也发生相应的变化,它们的变化反过来又使成岩环境的物理化学条件,特别是流体介质的性质发生变化,从而导致了一系列成岩变化。

在成岩作用早期阶段,特别是沉积物埋藏的早期阶段,孔隙水的化学性质与沉积时的底水性质相差不大,富含 Ca^{2+} , Na^+ 和 Mg^{2+} 等金属离子,铁、锰离子以高价态的 Fe^{3+}

和 Mn^{4+} 存在。随埋深增加温度升高,在温度作用下有机质发生细菌氧化作用和还原硫作用,并与 Fe^{3+} 和 Mn^{4+} 发生反应:



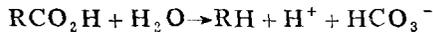
产生 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 及 HCO_3^- 和 OH^- 。这些反应都产生 OH^- 离子,使孔隙水逐渐变为弱碱性,但尚未破坏碎屑矿物与环境的化学平衡关系,不足以引起强烈的化学变化。但随深度增加,温度和压力也增加,使压力在沉积物埋藏初期成为主要的成岩营力。这种成岩环境决定了在成岩作用早期压实固结是主要的成岩作用,不可能发生大量的胶结物沉淀和溶蚀。

在成岩作用晚期(1500—2500m),温度和压力继续增加,有机质除发生细菌氧化和还原硫作用外,细菌发酵作用开始发育,但有机质尚未进入成熟期。同时,蒙脱石类粘土矿物已开始向I/S混层矿物转化(表1),排出层间水,有机质在细菌作用和层间水的催化下,发生一系列反应,生成 HCO_3^- 和 OH^- 离子,孔隙水继续向偏碱性发展,使沉积物组份与孔隙水介质之间的化学平衡被破坏,发生明显的化学成岩变化。弱碱性的孔隙水环境有利于方解石沉淀,由上述反应产生的 HCO_3^- 和 OH^- 与孔隙水中存在的 Ca^{2+} 发生反应,形成大量方解石胶结物:

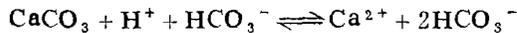


与方解石胶结作用相伴生的是碱性富Al、Si条件下方沸石的沉淀、胶结。这就形成了成岩作用晚期阶段的方解石和方沸石胶结物的共生组合现象。

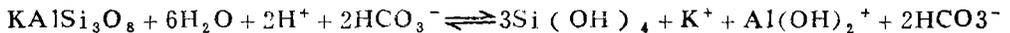
在后生阶段早期(2500—3200m之间),成岩环境的特点是压力不再是主要的变化营力,压实、固结作用对岩石性质的影响已不显著。随埋深增加温度进一步上升,有机质进入成熟阶段(热解温度为420—430℃),并发生脱羟基反应:



形成大量烃类、 H^+ 和 HCO_3^- ,同时粘土矿物也大量向混层矿物转化,排出层间水。由于层间水及 H^+ 和 HCO_3^- 离子的加入,使孔隙水变为酸性,具有强烈的溶蚀性,从而使沉积物处于一个还原的酸性环境中。这就是说,由于有机质的脱羟基作用和粘土矿物的转化,完全破坏了碎屑矿物及胶结物与孔隙水体在成岩晚期建立的平衡关系。为了达到与新环境的平衡,砂岩储层发生了一系列的化学变化,主要是一些在这种弱酸性、弱还原条件下不稳定的碎屑矿物如长石、方解石、方沸石胶结物遭到强烈的溶蚀;而一些新的矿物沉淀出来,如高岭石。其中以方解石的溶蚀最为强烈,



由此反应形成的 HCO_3^- 与 H^+ 结合又可造成钾长石的溶解:



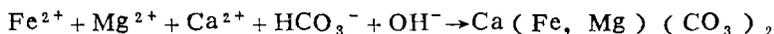
此反应产物可进一步反应形成高岭石:



上述一系列反应解释了为什么在后生作用早期阶段方解石和长石的强烈溶蚀,也解释了该阶段砂岩储层中含高岭石较多的原因,但这些反应都归因于有机质脱羟基作用和粘土矿物转化引起的孔隙水介质的 P^H 值变化。由于胶结物和矿物颗粒的溶蚀作用,在该阶

段的储层中主要发育次生孔隙，包括次生粒间孔、铸模孔和粒内孔。

到晚期成岩阶段，有机质已进入凝析油和湿气阶段，热解质高于430℃，与上一阶段相比，已没有大量CO₂生成。上一阶段方解石和长石的溶蚀作用，消耗了孔隙水中的H⁺和HCO₃⁻，溶蚀的结果还使大量K⁺、Na⁺、Ca²⁺和Mg²⁺等金属离子进入孔隙溶液，造成了一个弱碱性的、富金属离子的孔隙介质；其中部K⁺、Na⁺离子被粘土矿物的转化所吸收。同时在碱性条件下发生下列反应：



此反应形成大量铁白云石。同时Ca²⁺离子和SO₄²⁻离子发生反应形成硬石膏。因此在后生作用晚期主要发育铁白云石沉淀和颗粒的铁白云石化、方解石的铁白云石化，硬石膏沉淀和颗粒的硬石膏化等成岩现象。

四、结 论

由上面的讨论可见，各成岩阶段成岩现象的出现与有机质和粘土矿物的演化有着密切关系。随温度和压力的增加，有机质和粘土矿物不断演化，它们的转化改变了成岩环境的物理化学条件，从而破坏了成岩环境的化学平衡关系，为了达到新的平衡，必然会发生一系列成岩反应并形成新的成岩现象。包括新矿物的沉淀、碎屑矿物及胶结物的溶蚀和交代，并进而影响到储层的孔隙度和渗透率等物性条件。因此，深入研究成岩后生过程中有机质、粘土矿物的演化及其与成岩现象的关系，对于我们探讨盆地内的成岩规律，以及研究一个沉积盆地内油气的生成、运移和储集都具有一定的理论和实用意义。

(收稿日期：1987年3月31日)

APPROACHES TO THE DIAGENESIS OF
SANDSTONES AND THE RELATIONSHIP BETWEEN
ORGANIC MATTER AND CLAY MINERAL

—An Example of Diagenetic Changes in Oligocene
Reservoir of Dongpu Depression

Gao Yanxing

Yi Xudong

(Research Institute of Petroleum Exploration and
Development, Ministry of Petroleum Industry)

Abstract

Based on the researches on the diagenesis of Oligocene sandstone-mudstone sequences in Dongpu Depression, the authors of this paper analyse the diagenesis and the relationship between organic matter and clay mineral. It reveals that the transformation of the clay minerals is closely related to the thermal evolution of organic matter. Simultaneously, the diagenesis of the sandstones would, somehow, depend on the evolution of organic matter and through their influence on the property of porous water. The understanding of such a relationship would be favourable for the prediction of secondary porosity and the evolution of organic matter in other basin. Meanwhile, the possible diagenesis reaction and changes are also discussed theoretically.