

# 铝硅酸盐矿物成岩演化对 形成过渡带气的影响

雷怀彦 师育新 房玄

(中国科学院兰州地质研究所, 兰州 730000)

**提要** 生油成气的过程不只是简单的有机物之间的转化,而是无机和有机两个系统综合运动的产物,它们之间相互联系相互制约。成岩作用伊始,两系统独立演化,均受成岩环境的制约。一旦环境适合于有机物裂化分解,两系统就共同发挥作用,通过质子的转移而相互作用。由于生物热催化过渡带气埋藏浅、热演化程度不高等特点,铝硅酸盐矿物成岩作用主要表现为:砂质岩以机械压实作用、胶结作用、溶解作用、矿化交代、自生矿物充填作用为主,泥质岩最显著的变化就是矿物的成岩演化,即蒙脱石→伊/蒙混层→伊利石,及蒙脱石→绿/蒙→绿泥石的成岩演化,其实质是有机与无机相互作用,即赋存在粘土中有机质的有机酸使砂质岩发生溶解,和碎屑岩溶解孔隙水中的  $Al^{3+}$  替代蒙脱石晶层间的  $Si^{4+}$ ,形成质子酸,对有机质形成过渡带气起着催化作用。

**关键词** 铝硅酸盐矿物 成岩演化 有机与无机相互作用 过渡带气

**第一作者简介** 雷怀彦 男 34岁 副研究员 沉积岩石学

## 1 砂质铝硅酸盐矿物成岩作用对形成过渡带气的贡献

砂质岩的成岩作用除了主要影响储层物性外,它还与泥岩系统发生物质交换,影响着赋存于泥岩中的有机质生气过程。

渤海湾盆地的辽河东部凹陷和胜利济阳拗陷均以河流—湖泊沉积为主体,湖平面的升降变化控制了沉积体系的发育,其碎屑沉积物主要为滨湖石英砂岩、三角洲分流河道长石石英砂岩、低弯度—高弯度曲流河岩屑砂岩。

### 1.1 压实作用

经快速堆积后的沉积物,在上覆地层不断增厚,碎屑物经历了上覆沉积物的不断压实,岩屑砂岩和含云母砂岩早期压实,丧失大量原生孔隙,塑性颗粒成定向排列,或弯曲变形(图版 I-1);中期成岩,此种类型岩石的化学压实作用也比较强烈,大量的岩屑和钠长石蒙脱石化,部分颗粒溶解成次生孔隙(图版 I-2、3)。含泥质低的石英砂岩、长石砂岩,早期压实石英、长石颗粒间以平直线状接触(图版 I-4);中期成岩,见大量的压裂纹(裂隙)和颗粒嵌入结构(图版 I-5)。

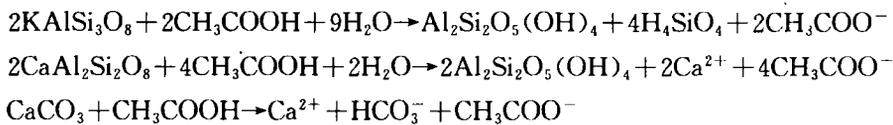
### 1.2 胶结作用

除了泥质和炭质胶结物外(图版 I-6);浅层埋藏期形成大量的环边状方解石胶结物(图

版 I - 7),较深埋藏期为铁方解石胶结物,即铁方解石交代长石的残余结构为孤岛状、锯齿状、补钉状等(图版 I - 8、I - 1),深埋藏期可见微晶粒状的白云石和铁白云胶结物(图版 I - 2),有时见砂岩粒间自生高岭石胶结物,呈假六方形(图版 I - 3、4),早期方解石胶结对原生孔隙的破坏较大,但对机械压实作用起到抑制或延缓作用,铁白云石和自生高岭石充填了大量的次生孔隙,但这些成岩自生矿物的形成对有机质脱羧基而成烃的化学反应的动态平衡非常有利。

### 1.3 压溶、溶解作用

砂质岩中所见溶解现象有两种情况:一种是压实作用增加到一定的强度,颗粒受压应力部位发生溶解,溶解产物在受张力部位的空间再沉淀,如石英、长石的次生加大现象。另一种是长石颗粒、碳酸盐岩颗粒在压实流体的化学作用下发生溶解,形成粒间溶孔(图版 I - 5),粒内溶孔(图版 I - 6)。关于溶解作用  $\text{CO}_2$  的来源,Magara(1981)指出:I 型干酪根在热演化过程中既可产生较多的烃类,又可产生大量的  $\text{CO}_2$ 。辽河、济阳凹陷沙河街组在 1400~3000m 深度内可见到大量的长石溶解和部分方解石溶解,并伴随玉髓和高岭石沉淀在孔隙中,这个阶段均处于中期成岩时期,有机质热演化成烃,并伴随着脱羧作用,于是有机酸与长石、方解石等发生化学反应:



### 1.4 交代作用

岩石中所见的交代现象主要为方解石、铁方解石交代斜长石,长石呈残云片状、锯齿状、孤岛状(图版 I - 8、I - 1)。铁白云石交代石英颗粒(图版 I - 2),铁白云石为菱形自形晶,并具暗色环边。方解石交代发生较早,深度较浅,一般在 1400m 以上,以交代斜长石为主,部分充填在原生孔隙中,铁方解石继方解石交代之后并有两期,第一期交代斜长石,个别交代方解石,第二期交代钙长石并充填部分次生孔隙,阴极发光显微镜下为暗红色,另一部分充填长石或石英的压裂缝中,其深度为 1400~2600m 之间。铁白云石交代相对较晚,一般在 2600m 以下,主要交代石英颗粒。

### 1.5 自生矿物的沉淀

自生矿物是成岩过程中不同物化条件下的化学沉淀物,因此它们在时间上和空间上组合关系具有一定的先后次序。显微镜下统计结果表明:

埋藏深度小于 1400m,为微晶方解石、菱铁矿、草莓状黄铁矿组合等。

埋藏深度为 1400~2600m,为微细晶铁方解石、白云石、石英第一次次生加大组合带。

埋藏深度 2600~3000m,为自生高岭石、绿泥石、铁白云石、石英第二次次生加大组合带。

#### 1.5.1 自生碳酸盐矿物

浅埋藏期,由于渤海湾和苏北盆地的断裂十分发育,成为大气淡水潜流作用的有利通道,从而使大气淡水参与成岩,形成早期环边状方解石,胶结在石英、长石颗粒间。此阶段,硫酸盐的细菌作用活跃,使部分有机质还原形成少量的甲烷,并有菱铁矿的草莓状的黄铁矿沉淀(图版 I - 7、I - 8、I - 1)。中深埋藏期,铁方解石和白云石交代斜长石矿物颗粒。

#### 1.5.2 石英次生加大作用

石英次生加大主要发生在石英砂岩和长石砂岩中,石英加大有二期:第一期发育深度为

1400~2600m,第二期加大发育深度为2600~3000m,而且第二期加大较第一期强烈。强烈的压实作用使石英颗粒受压实力部位发生压溶溶解,相对受张力部位产生沉淀(图版Ⅲ-2)。

### 1.5.3 自生高岭石

扫描电镜下观察到的砂岩孔隙中充填的自生高岭石为自形的假六方片状晶,集合体为手风琴状、书页状(图版Ⅲ-3、4)。自生高岭石的形成范围为2600~3000m,主要由于砂质铝硅酸盐矿物溶解为高岭石的形成提供了大量的活性铝离子,加之有机质成烃脱羧作用造成酸性介质环境,从而高岭石在砂岩次生孔隙中沉淀下来,这种自生高岭石的形成与油气源岩粘土矿物的转化以及有机质的脱羧作用密切相关,而且它并不是完全填充了次生孔隙空间,图版Ⅲ-3可以清楚的看出高岭石晶间微孔隙仍然较发育。

### 1.5.4 自生绿泥石

自生绿泥石从1400m就开始出现,特别是在2400~3000m范围内增加较快,这种绿泥石是蒙脱石/绿泥石混合层在成岩演化过程中演变的产物。另外一种是在砂岩中自生绿泥石(少量),它是由斜长石蚀变而来,主要充填在砂岩次生孔隙中。

## 1.6 砂质铝硅酸盐矿物成岩作用对形成过渡带气的贡献

砂质岩成岩作用除影响储层物性外,还与烃源岩发生物质交换,因此通过碎屑岩矿物标志可以寻找生物-热催化过渡带气(徐永昌,1993)。

1)砂质岩成岩压溶溶解作用使铝硅酸盐矿物发生溶解,并向孔隙流体中释放出大量的Al、Mg、Fe等离子,这些离子随着流体运移到毗邻的烃源岩并与有机岩载体粘土矿物发生反应。

表1 渤海湾盆地储层砂岩孔隙分布特征

Table 1 Distribution of the porosity in sandstone reservoirs of Bohaiwan Basin

样品号	深度 (m)	原生孔隙 %	次生孔隙 %	合计 %	面孔隙率 %
D-1	1741	8	12	20	5
D-2	1950	7	14	21	5
D-3	2156	4.5	18.5	23	8
D-11	2167	3.5	14.5	18	5
D-6	2510	1.5	12.5	14	3
D-7	2632	1	4	5	2.2
D-13	2655	1.2	2	3.2	2.2
D-10	2656	1	18	19	6
D-12	2675	0.5	17.5	18	4
D-8	2948	<0.5	2.5	3	1.7
D-18	3108	0.5	3.5	4	3
D-14	3216	0.5	14	14.5	4.5
D-15	3376	0.1	1.4	1.5	1.5

2)砂质岩成岩过程中原生孔隙逐渐减少,仅局部残存(图版Ⅲ-5、Ⅲ-6)。次生孔隙通过溶解、交代逐渐形成,显微镜下观察主要孔隙类型为原生孔隙、次生粒间溶孔(图版Ⅰ-3)、粒内溶孔(图版Ⅰ-2)、次生基质晶间孔(图版Ⅲ-3、4)、铸模孔(图版Ⅱ-6)和成岩矿物微裂隙孔(图版Ⅲ-7、8),原生和次生孔隙随深度变化的特征(表1)为:原生孔隙是要发育在800~2000m深度内,混合孔隙主要发育在1400~2600m深度内,次生孔隙主要发育在2000~

3000m。由此可见渤海湾盆地储层有两个高孔隙度发育带,即 1400~2600m 为混合孔隙发育带;2000~3000m 为次生孔隙发育带,构成过渡带气良好的储集空间。

3)成岩过程中大量铝硅酸盐的溶解和矿物的频频转化,如微晶铁方解石、白云石、石英次生加大,以及自生高岭石、绿泥石和铁白云石的形成都预示着有机质成烃脱羧作用和生物—热催化过渡带气存在的可能。

## 2 泥质铝硅酸盐矿物成岩作用对形成过渡带气的意义

### 2.1 有机—粘土复合体

作为有机质载体的粘土矿物,以吸附、捕获等多种方式与有机质结合成有机—粘土复合体,在沉积物沉积、搬运过程中,有机质大部分是以有机—粘土高聚合物的形式存在,其中粘土矿物是这种聚合作用的主要因素(王行信,1990)。形成这种聚合物的粘土矿物微粒质点的粒级为 0.2~2 $\mu\text{m}$ ,与有机质主要结合方式为:

1)以交换性有机质阳离子的形式置换粘土矿物层间阳离子,以这种方式结合的数量大,也较稳定。

2)以有机阳离子复合物的形式与粘土矿物结合。

3)以极性有机分子取代粘土矿物层间阳离子,在层间呈定向排列形式。

由于粘土矿物结构特征、矿物表面的原子化学性、电荷密度以及交换性阳离子的性质不同,对有机分子的吸附能力和结合特征也有所不同,如高岭石、伊利石和绿泥石均以晶体边缘不饱和铝、铁和氧原子的活性位置与有机分子结合成有机粘土复合体。蒙脱石不仅在表面晶体边缘活性位对有机质有强大的吸附作用,而且更重要的是大量有机分子进入蒙脱石的层间并呈定向排列,因此蒙石形成有机—粘土复合体的能力要比其它粘土矿物大得多。

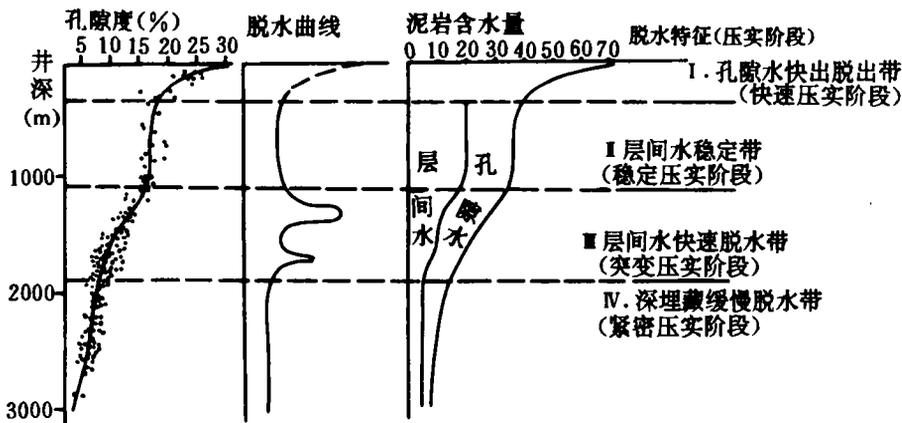


图 1 渤海湾盆地泥岩脱水特征的纵向变化

Fig. 1 Vertical change of mudstone dehydration in Bohaiwan Basin

### 2.2 泥岩的压实及粘土矿物的脱水作用

泥质沉积物在上覆沉积物载荷压力作用下表现为:泥岩体逐渐缩小和孔隙水呈阶段性排出(真炳钦次,1982),排水过程可划分为四个带(图1),如:

### 2.2.1 孔隙水快速脱出带

深度在0~400m,它是泥质沉积物在上覆地层的压力下,快速脱出大量的孔隙水,泥岩的孔隙度迅速从原始的70%减少到19%,随着泥岩的排水压实,泥岩渗透性减小,水力传导能力大大降低,随之出现一个相对稳定压实带。

### 2.2.2 层间水稳定带

埋藏深度400~1150m,蒙脱石的层间水是稳定的。泥质沉积物在上覆层压力下,缓慢地脱出孔隙水,孔隙度的变化,从19%变为16%。

### 2.2.3 层间水快速脱水带

此带的埋藏深度在1150~1900m。由于蒙脱石向伊利石和绿泥石转化析出大量的层间水,使矿物颗粒体积缩小,从而在泥岩中产生新的孔隙,增强了泥岩渗透率,因此,这一时期的孔隙度由原来的16%降低到7.6%。

### 2.2.4 深埋藏缓慢脱水带

经蒙脱石快速脱水以后,泥岩被再次压实变得更加致密,泥岩中尚有5%层间水和<7%的孔隙水,这时泥岩中的水是以束缚水状态存在。它们在泥岩中呈不连续状态分布,泥岩的脱水速度十分缓慢,如深度1900~2950m,孔隙度平均减小速度为0.15/100m。

## 2.3 粘土矿物成岩演化

粘土矿物在成岩作用过程中随着孔隙度流体性质的改变发生重要的变化,其中最主要的现象是蒙脱石向伊利石转化(Bruno, Lanson, 1992),即未转化前的蒙脱石为片状和绵絮状(图版IV-1),开始转变时,在蒙脱石的边棱生长细小的毛刺状伊利石(图版IV-2)。继而生长出较多,较明显的毛刺状伊利石(图版IV-3),再继续转化为毛刺状、朵状伊利石(图版IV-4),再者随成岩作用的强度增加,逐渐演化为毛刺状、丝缕状的伊利石(图版IV-5),最终转化为丝缕状的伊利石(图版IV-6)。经X衍射定量分析,各种粘土矿物在垂向剖面中演化特征绘成图2。

从图中可以看出:

1)蒙脱石:蒙脱石含量随深度由浅到深逐渐减少,但到1500~2600m之间,蒙脱石便迅速减少,从2600~3000m蒙脱石相对缓慢减少趋于消失。

2)伊/蒙混层矿物:伊/蒙混层矿物与蒙脱石的变化成反消长关系,当蒙脱石迅速减少的时候,正是伊/蒙混层矿物含量高的时候,这正说明部分蒙脱石的消失转化成了伊/蒙

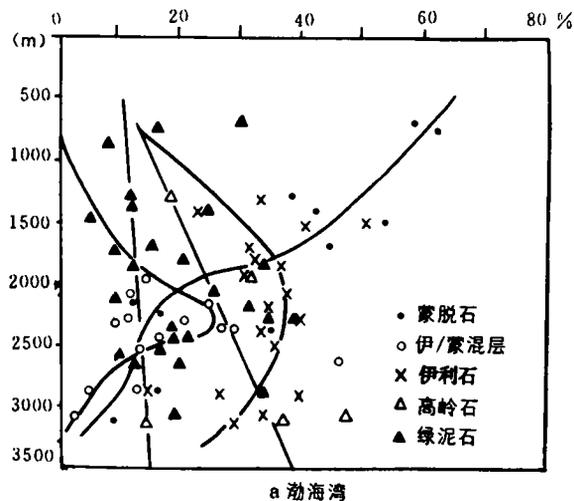


图2 粘土矿物在垂向剖面中的演化特征  
Fig. 2 Evolutionary characteristics of clay minerals in the vertical profile

混层矿物。

3)伊利石:伊利石从 1400~2000m 之间呈缓慢增加趋势,2000~3000m 又逐渐减少。

综上所述,蒙脱石在 1400~2600m 迅速减少,而伊/蒙混层矿物却迅速增加。

## 2.4 成岩作用形成过渡带气的意义

### 2.4.1 砂质岩与泥质铝硅酸盐矿物的相互作用

与烃源岩相邻的砂质岩在成岩过程中长石矿物发生大量溶解,溶解作用发生的深度一般在 1400~2600m,这个阶段也是有机质大量脱羧基时期,有机质的脱羧作用可以增强溶液中  $Al^{3+}$  的活性(Ronald C, Surdam, 1990),加速长石溶解作用的进一步发生,活性的  $Al^{3+}$  随孔隙流体与粘土矿物发生作用,使溶液中有足够的  $Al^{3+}$  取代粘土矿物晶体中的  $Si^{4+}$ 。另外一个重要作用就是碎屑岩中自生的石英和碳酸盐矿物沉淀,如石英的第一次加大和第次加大、初期方解石的沉淀,中期铁方解石、白云石的沉淀,最后铁白云石的沉淀消耗掉液体中的大量  $SiO_2$  和  $CO_2$  这些自生矿物的沉淀将成为产生更多的活性  $Al^{3+}$  的化学驱动力,进而使粘土矿物中铝替代硅成为可能。

### 2.4.2 蒙脱石向混合层粘土的急剧变化为泥岩孔隙流体的运移创造了有利条件

渤海湾盆地泥岩脱水特征的纵向变化表明,在泥岩的突变压实阶段之前,有机质处于未成熟阶段,没有大量的油气生成。在突变压实阶段,不仅有大量的油气生成,而且由于蒙脱石快速

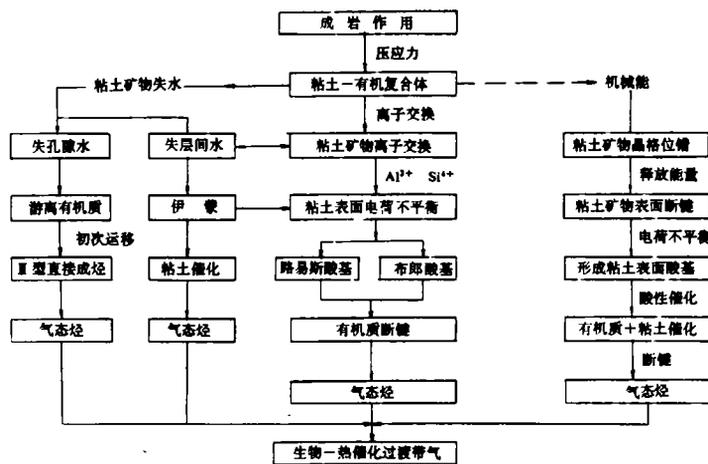


图 3 铝硅酸盐矿物参与下过渡带气的形成途径

Fig. 3 Diagram showing the forming ways of the transitional zone gas with the participation of aluminosilicate minerals

向伊利石或绿泥石转化,有大量的层间水从蒙脱石层间析出变成粒间水,粘土矿物颗粒体积缩小,使泥岩产生新的孔隙,提高了泥岩的渗透性。这一阶段泥岩孔隙度的快速减小,反映了泥岩在上覆地层压力下快速排出孔隙流体(油、气、水)和再一次被快速压实特征和规模。这一时期,脱吸附作用为油气的运移创造了有利的条件(张义纲,1991),蒙脱石向伊利石转化阶段,是油气运移的最主要时期。

### 2.4.3 粘土矿物的成岩作用与过渡带有机质成烃的关系

泥岩中的粘土矿物通过吸附作用与Ⅰ型有机质、Ⅱ型有机质结合成有机-粘土复合物,增强了抗生物降解的能力和沉积搬运的稳定性,但在成岩过程中压实作用首先使粘土矿物失去孔隙水和泥岩原生孔隙,伴随着游离有机质在微生物和孔隙水的作用下形成气态烃;其次,粘土矿物失去层间水,粘土矿物表面酸活性增强,蒙脱石向伊利石转化,使部分有机质形成气态烃;第三,在蒙脱石层间发生阳离子交换,即 $Al^{3+}$ 取代 $Si^{4+}$ ,导致粘土矿物表面电荷不平衡,形成路易斯酸基和布朗酸基,使大分子有机质断键而生成气态烃;第四,机械压实作用使部分蒙脱石发生晶格位错,并在矿物表面产生许多断键,形成表面酸基,降低有机质成烃的活化能,催化有机质转化为气态烃(图3)。

### 2.5 流体作用与有机质成烃

成岩作用过程中,压实作用使泥岩失去孔隙水、层间水、结构水,然而溶解作用又会增强岩石的渗漏作用,这种渗漏和扩散将会使孔隙水、压实流体携带大量的阳离子、有机基团等从泥岩中带进、带出,由此可见:流体场是无机矿物演化,有机质转化成烃所需离子的运输工具和进行化学反应的有效溶剂,生物热催化过渡带深度在1400~2200m,2200~3000m为泥岩压实孔隙水的大量排出时期,这两个阶段正处在铝硅酸盐矿物的溶解、次生碳酸盐的大量形成、蒙脱石向混层矿物转化的重要时期。

收稿日期:1994年10月15日

## 参 考 文 献

- (1)张义纲等,1991,天然气的生成聚集和保存,南京:河海大学出版社。
- (2)徐永昌等,1993,辽河盆地天然气的形成与演化,北京:科学出版社。
- (3)王行信,1990,有机粘土化学在油气生成研究中的意义,石油地质译文集。
- (4)真炳钦次,1982,压实与流体运移,北京:石油工业出版社。
- (5)Ronald C. Surdam, et al., 1990, Organic inorganic interaction and sandstone diagenesis, AAPG Memoir 37, 127.
- (6)Bruno Lanson, 1992, Characterization of the end of smectite - illite transformation, Clay Minerals, 49(1):40-52.

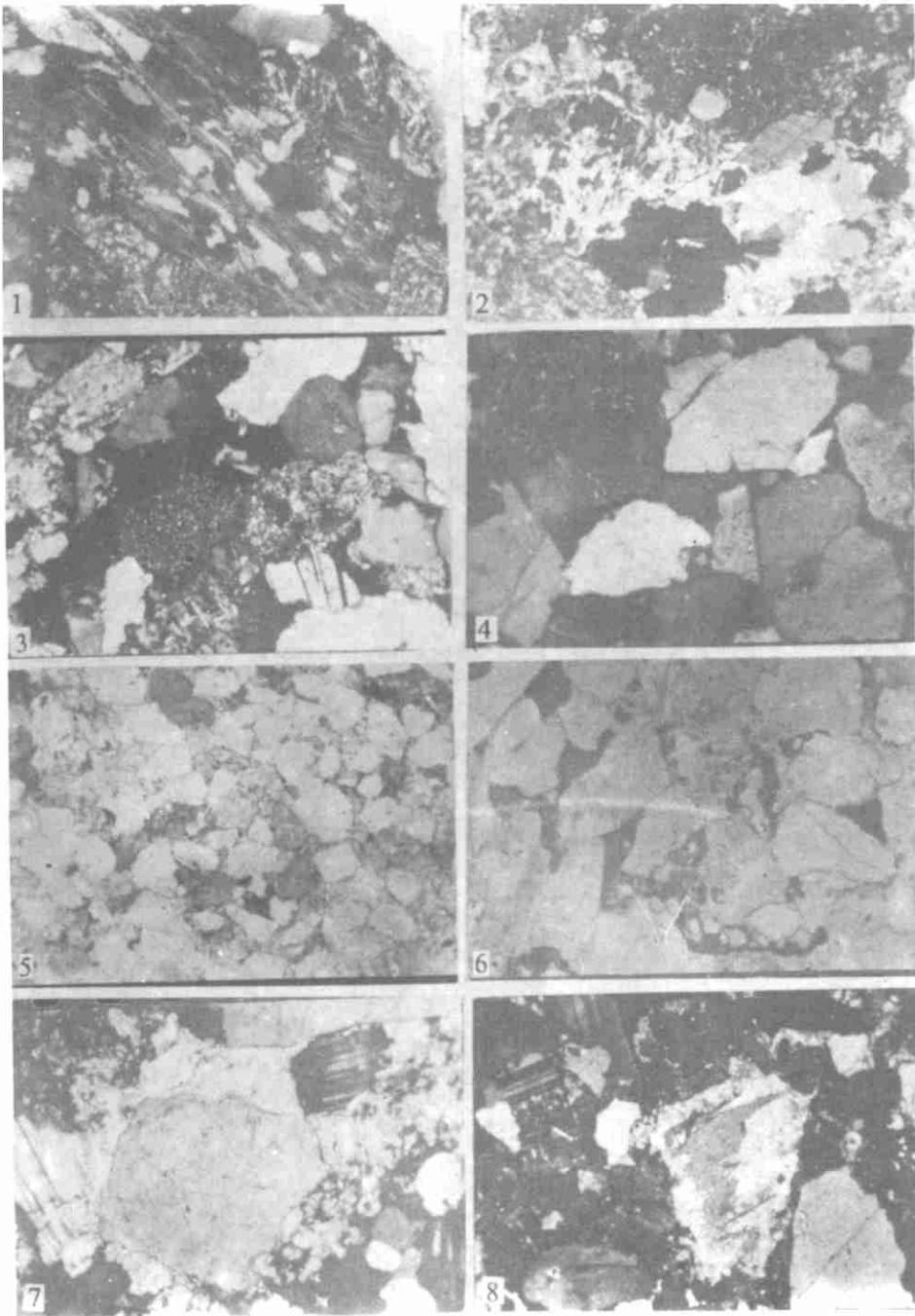
## Influences of the Diagenetic Evolution of Aluminosilicate Minerals on the Formation of the Transitional Zone Gas

Lei Huaiyan Shi Yuxin Fang Xuan

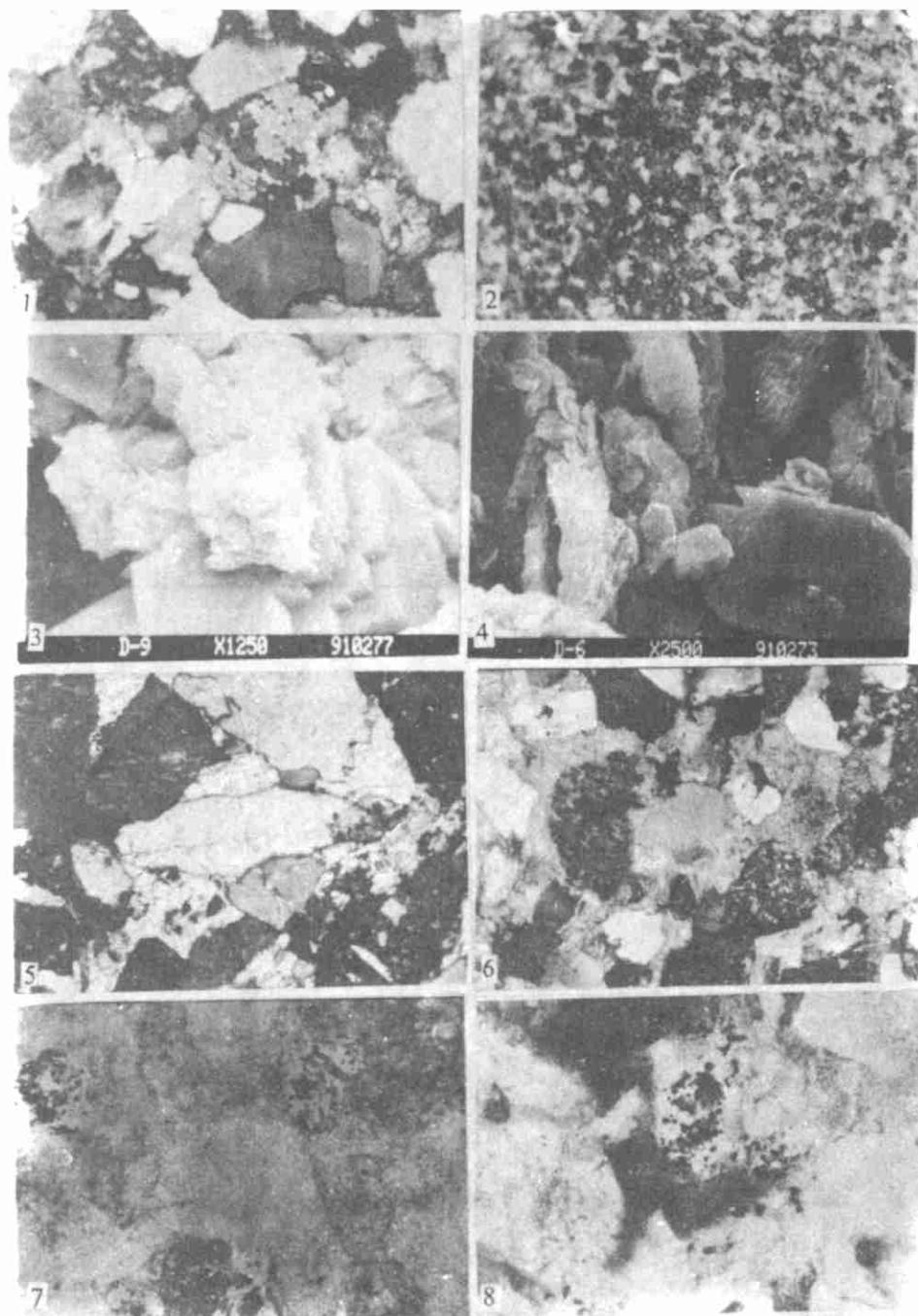
(Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 730000)

### Abstract

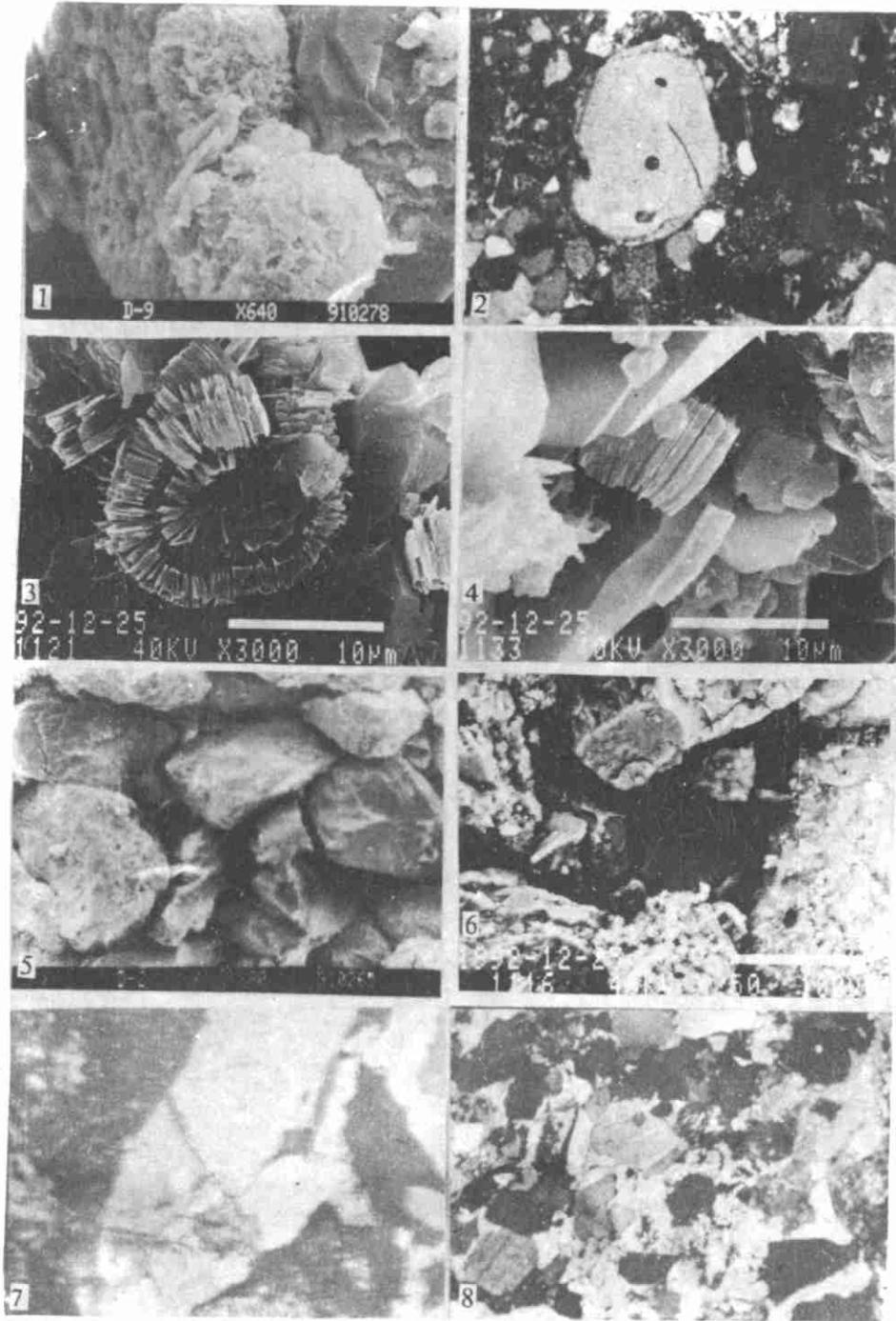
The formation of oil and gas is not a simple process of the transformation among organic matters. In other words, it is a result of the interaction between organic - inorganic matters which take place at the early diagenetic stage. The essence of this process is the clastic aluminosilicate mineral dissolution and diagenetic evolution of clay minerals during diagenesis in the transitional zone. In general, sandstone undergoes a series of diagenesis including compaction, cementation, dissolution, replacement and formation of authigenic minerals, while mudstone mainly changes its clay mineral composition by way of the  $M \rightarrow I/M \rightarrow I$  and  $M \rightarrow C/M \rightarrow C$  transformation which could produce proton acid when organic acid dissolves sandstone and replaces  $Si^{4+}$  in montmorillonite with  $Al^{3+}$  in pore water. The proton acid plays an important role in catalysis for the formation of the transitional zone natural gas.



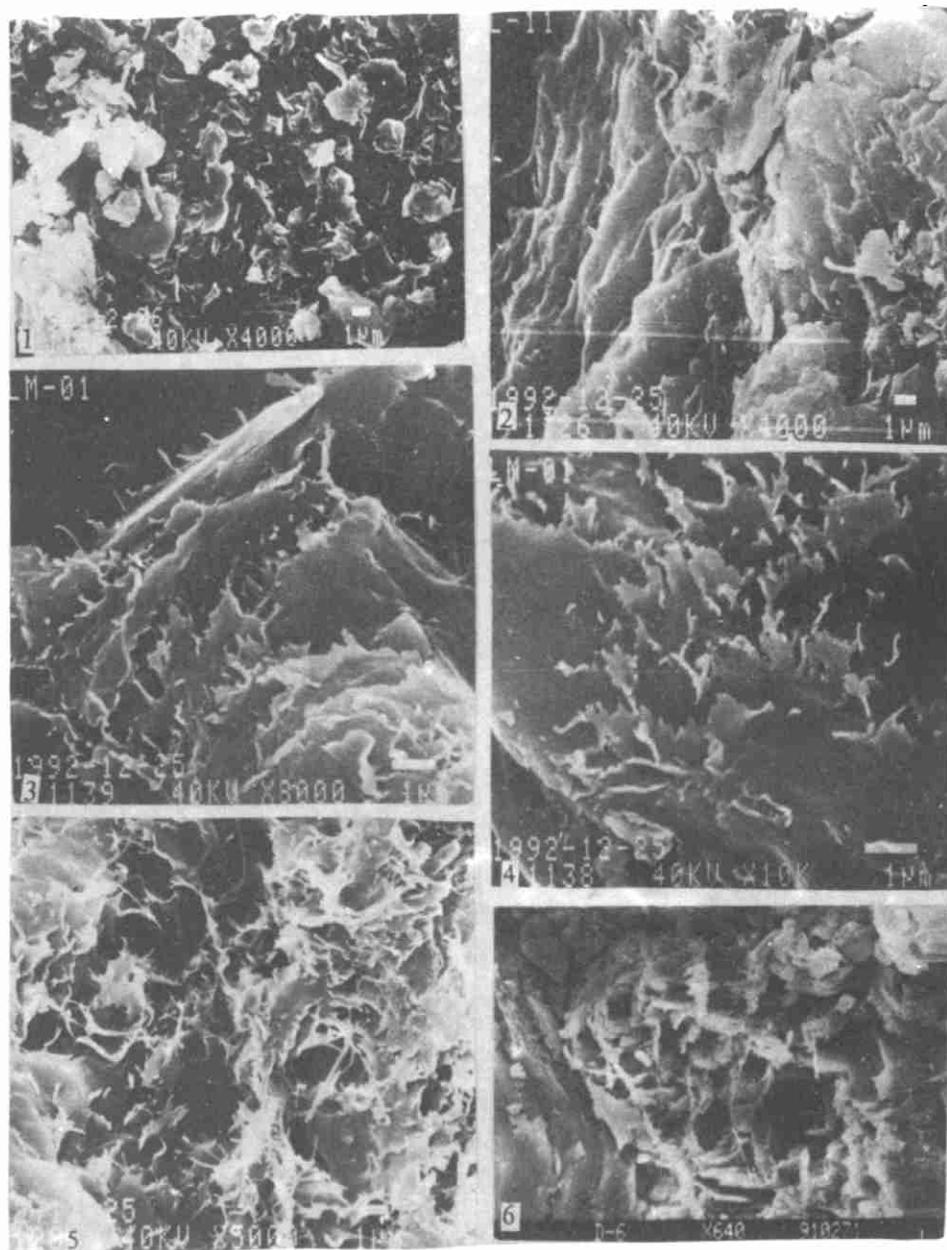
图版 1: 1. 黑云母长石砂岩, 黑云母、长石、石英颗粒定向排列。正交偏光,  $\times 100$ 。 2. 岩屑砂岩, 钠长石蒙脱石化, 粒间和粒内暗色为溶解孔隙。正交偏光,  $\times 50$ 。 3. 岩屑砂岩, 钠长石蒙脱石化, 粒间暗色为溶解孔隙。正交偏光,  $\times 100$ 。 4. 长石石英砂岩, 颗粒间以平直线状接触, 粒间暗色为原生粒间孔隙。 5. 长石砂岩, 颗粒间相互嵌入, 溶解参差状、个别颗粒见压裂纹, 暗色为炭质和方介石胶结物。单偏光,  $\times 50$ 。 6. 长石砂岩, 颗粒间为嵌入接触, 个别见压裂纹, 暗色为炭质胶结物。单偏光,  $\times 50$ 。 7. 岩屑长石砂岩, 长石颗粒周围环边状方解石胶结物, 暗色为泥质胶结物。正交偏光,  $\times 100$ 。 8. 岩屑长石砂岩, 方解石交代长石残余结构, 灰色为长石, 浅灰色为方解石。正交偏光,  $\times 100$ 。



**图版 I:** 1. 岩屑长石砂岩, 铁方解石交代长石残余结构, 暗色为孤岛状长石, 浅灰色为粒状铁方解石。正交偏光,  $\times 100$ 。  
 2. 白云质砂岩, 暗色菱形晶为铁白云石, 浅灰色棱形晶为白云石, 灰色为残余石英。单偏光,  $\times 100$ 。 3. 砂岩粒间孔隙中自生高岭石充填物, 高岭石为假六方形。扫描电镜,  $\times 1250$ 。 4. 砂岩粒间孔中自生高岭石充填物, 高岭石呈假六方形。扫描电镜,  $\times 2500$ 。 5. 岩屑砂岩, 斜长石溶解锯齿状结构, 溶解的孔隙和原生粒间孔被方解石充填。正交偏光,  $\times 100$ 。 6. 岩屑砂岩, 原生粒间充填的方解石溶解孔隙(黑色), 暗色为钠长石粘上化。正交偏光,  $\times 100$ 。 7. 长石砂岩, 暗色针状为菱铁矿, 暗色草莓状为黄铁矿集合体。单偏光,  $\times 300$ 。 8. 长石砂岩, 黑色为菱形、正方形黄铁矿, 单偏光,  $\times 300$ 。



图版 III: 1. 球状草莓状黄铁矿集合体。扫描电镜,  $\times 640$ 。 2. 岩屑砂岩, 石英次生加大边。正交偏光,  $\times 100$ 。 3. 自形假六方高岭石, 集合体为书页状。扫描电镜,  $\times 2500$ 。 4. 自形六方高岭石, 集合体为手风琴状。扫描电镜,  $\times 1250$ 。 5 和 6. 石英砂岩, 原生粒间孔, 三角形、多边形。扫描电镜,  $\times 80$ 。 7. 长石颗粒中的压裂纹、部分被方解石充填。正交偏光,  $\times 80$ 。 8. 长石砂岩, 长石、石英颗粒压裂缝, 被方解石充填。正交偏光,  $\times 50$ 。



图版 IV: 1. 蒙脱石, 片状, 花架状集合体。扫描电镜,  $\times 4000$ 。 2. 蒙脱石开始向伊利石转化, 边缘生长毛刺状伊利石。扫描电镜,  $\times 4000$ 。 3. 毛刺状伊/蒙混层矿物, 扫描电镜,  $\times 8000$ 。 4. 毛刺状、朵状伊/蒙混层矿物。扫描电镜,  $\times 10000$ 。 5. 蒙脱石强烈转化为伊/蒙混层矿物、毛刺状、丝缕状。扫描电镜,  $\times 5000$ 。 6. 伊利石, 丝缕状。扫描电镜,  $\times 640$ 。