

# 蒙脱石的成岩演变与石油的初次运移

王行信

(大庆油田科学研究设计院)

自从鲍尔斯提出成岩过程中蒙脱石脱水对油气初次运移的重要性以后,许多学者对成岩过程中蒙脱石的脱水反应特征及在油气初次运移中的意义进行了研究和讨论。一般认为成岩过程中蒙脱石的脱水为石油初次运移创造了下列有利条件:

1. 提供水介质来源;
2. 重新产生孔隙度;
3. 促进泥岩异常高压带的形成;
4. 由于蒙脱石层间水的加入,提高了烃类和脂肪酸在水中的溶解度,促进了石油的运移。

成岩过程中蒙脱石析出层间水只是蒙脱石成岩演变的一个方面,如果仅以脱水量的多少和烃类在水中溶解度的概念来评价蒙脱石的成岩演变对油气运移的影响,这显然是不够的。

关于松辽盆地白垩系泥岩粘土矿物成岩演变特征与有机变质作用和油气分布的关系,可参阅作者的有关论文<sup>[1][2]</sup>,这里不再赘述。

## 一、蒙脱石成岩演变和脱水速度的纵向变化

为了研究成岩过程中蒙脱石向伊利石演变速度的纵向变化,对三台凹陷徐11井岩心,进行了比较系统的采样和泥岩样品的分析。图1表示泥岩样品粘土矿物( $< 2\mu$ ) X-射线衍射分析的部分结果。右图表示膨胀性粘土底面间距的纵向变化。样品采用甘油饱和的定向薄膜样品。左图表示蒙脱石-伊利合混石层矿物中蒙脱石层的纵向变化,它是根据膨胀性粘土底面间距的大小计算得到的。膨胀性粘土底面间距的纵向变化,即蒙脱石向伊利石转化速度在纵向上的变化有两个明显的特征:

1. 在蒙脱石向伊利石转化的早期,具有两个蒙脱石层急剧减小的快速转化阶段。其中尤以第一阶段的变化最大,由100%的蒙脱石变成了只含30—40%蒙脱石层的蒙脱石-伊利石混合层矿物。第二快速阶段的变化相对较小,但是十分明显。

2. 与快速转化阶段相对应,在两个阶段之间和第二个快速阶段以后,存在着蒙脱石层几乎不变的相对稳定阶段。尤其是在第二快速阶段以后,蒙脱石层的减小速度是十分缓慢的。

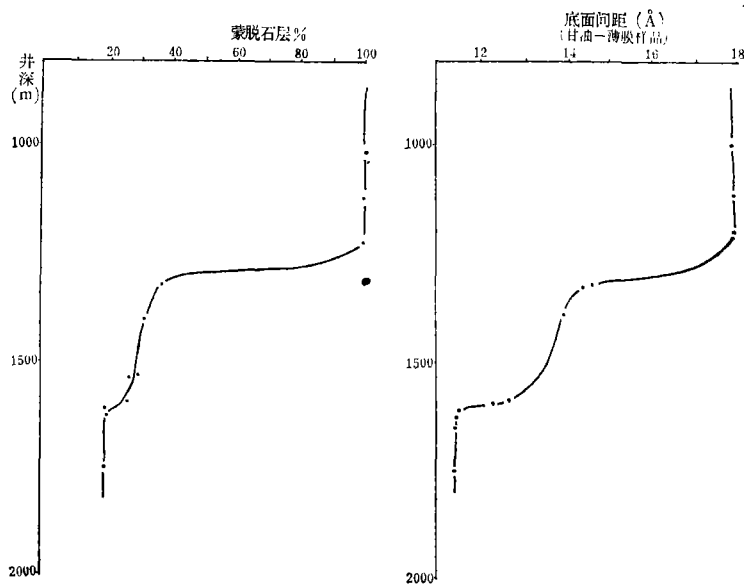


图1 徐11井膨胀粘性土的纵向变化

Fig.1 Vertical changes of expansible clays in San Zhao seg, Xu-11 Well

上述特征不仅与盆地内古12井的分析结果一致。而且也与国外一些盆地的报导一致。不同地区之间的差异只是由于各地地温梯度的不同，蒙脱石开始向伊利石转化的深度不同，两个快速转化带之间的垂直间隔不同。高地温地区与低地温地区相比不但蒙脱石开始向伊利石转化的埋藏深度浅，而且两个快速转化带之间的垂直间隔较短。

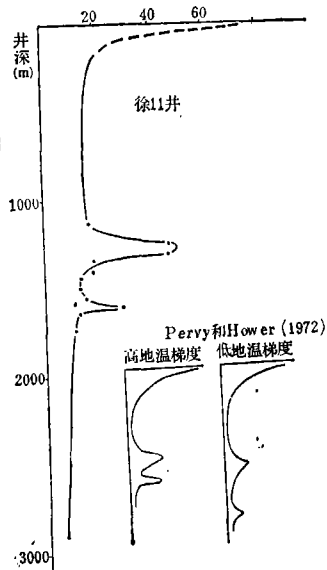


图2 徐11井粘土矿物脱水曲线

Fig.2 Dehydration curve of the clay minerals, Xu-11 Well

水曲线特征相似，反映了松辽盆地高地温场的特征。

在蒙脱石向伊利石转化过程中，伴随着蒙脱石晶体结构和化学组成的改变，同时有层间水的析出。粘土矿物脱水曲线就是表示蒙脱石脱水速度的纵向变化。Perry 和 Hower (1972) 的粘土矿物脱水曲线，就是以蒙脱石-伊利石混合层粘土中蒙脱石层在纵向上的减小速率作为脱水单位，用它表示脱水速率与埋藏深度的关系。徐11井的粘土矿物脱水曲线(图2)，也是以同样的方法作出的。徐11井的粘土矿物脱水曲线与佩里和豪尔的高地温地区粘土矿物脱水曲线特征相似，反映了松辽盆地高地温场的特征。

徐11井的粘土矿物脱水曲线(图2)，也是以同样的方法作出的。徐11井的粘土矿物脱水曲线与佩里和豪尔的高地温地区粘土矿物脱水曲线特征相似，反映了松辽盆地高地温场的特征。

由于蒙脱石的脱水速度决定于蒙脱石向混合层粘土转化的速度。因此，图 1 和图 2 的纵向变化特征是互相对应的。蒙脱石的快速转化带也就是粘土矿物的快速脱水带。

## 二、“负异常”标志着蒙脱石向混合层粘土转化和油气初次运移的开始

有机质向石油转化主要受温度的控制。在有机质进入过成熟阶段以前，生油岩的石油化程度（一般用总烃/有机碳比值，毫克/克表示）随着埋藏深度和温度的增加而增加。但是，不少资料表明，在生油门限深度附近，存在着一段随着埋藏深度增加，生油岩总烃/有机碳比值反而减小的“负异常”带。藤田认为它可以作为石油形成的一个依据，是烃类从生油岩中运移出去的结果。

据松辽盆地某些井段生油岩分析资料，发现在生油门限深度附近都有“负异常”特征。而且各井出现“负异常”的井深分别与各地混合层粘土的顶界深度一致。这说明在松辽盆地，蒙脱石快速向混合层粘土转化的时候，也是有机质开始大量生成石油和运移的时候。如图 1 和图 2 所示，在蒙脱石向伊利石转化的开始阶段，其转化速度和脱水速度最快。矿物结构的急剧变化，大大减小了粘土矿物对水和有机分子的吸附能力，使原来被蒙脱石吸附的水和烃类分子随着蒙脱石向伊利石的快速转化，从蒙脱石层间释放出来，并沿着新产生的孔隙运移出去，从而导致生油岩残余烃含量的减小。因此，“负异常”的出现不仅标志石油的开始生成，也标志着蒙脱石向混合层粘土转化和石油初次运移的开始。

## 三、蒙脱石向伊利石（或绿泥石）的快速转化时期是石油初次运移的最主要时期

1. 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条件。

松辽盆地白垩系泥岩脱水特征的纵向变化，孔隙水和层间水的含量是分别根据泥岩孔隙度的资料和粘土矿物 X-射线衍射分析的资料确定的。泥岩的脱水过程可划分为四个阶段：快速压实阶段，泥质沉积物在上覆地层的压力下快速脱出大量的孔隙水，泥岩的孔隙度迅速减小，同时也使蒙脱石层间最多保持两层水分子。随着泥岩的排水压实，泥岩的渗透性减小，水力传导能力大大降低，出现一个相对稳定的压实阶段。在稳定压实阶段内，蒙脱石的层间水是稳定的。在钙质蒙脱石的层间始终保持两个水分子层，其底面间距在自然状态下为 14—15 埃。泥岩此时缓慢脱出孔隙水。

在上述两个阶段，有机质尚处于未成熟阶段，没有大量油气生成。

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向伊利石或绿泥石转化，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度，提高了渗透性。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的特征和规模。因此，目前多数学者都认为这一时期是油气运移的最主要时期。在以后的紧密压实阶段，泥岩

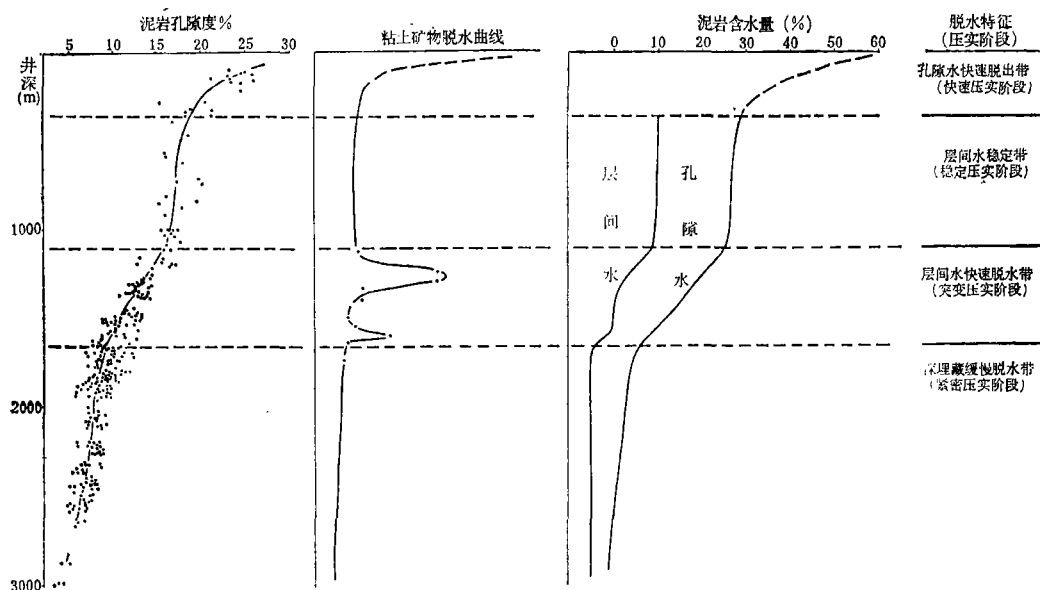


图3 松辽盆地泥岩脱水特征

Fig 3 Dehydration feature of shales, Songliao Basin.

变得更加致密，泥岩孔隙度在纵向的缓慢减小表明泥岩的脱水和压实速度是十分缓慢的，这种状态下石油的运移要比突变压实阶段困难的多。

2. 松辽盆地主要生油层的蒙脱石快速演变时期与盆地内油气运移的最主要时期一致。

图4是根据古龙凹陷和三台凹陷48口探井的实际钻井资料作出的。图中各点分别表示青山口组一段、二、三段和嫩江组一段生油层的底界在早白垩世末和晚白垩世末的埋藏深度。方框表示松辽盆地蒙脱石向伊利石快速转化的深度范围。在早白垩世末期，青山口组生油层绝大部分已处于蒙脱石的快速转化阶段，而嫩江组一段生油层的绝大部分蒙脱石均未开始向伊利石转化。到晚白垩世末期，青山口组生油层的绝大部分（尤其是青山口组一段）均已超过了蒙脱石向伊利石的快速演化阶段，处于紧密压实阶段。而嫩江组一段生油层的绝大部分正好处于蒙脱石快速向伊利石转化的阶段。

根据以往对盆地的地球化学和构造发育史的研究，青山口组生油层的油气生成和运移主要发生在早白垩世的末期，而嫩江组一段生油层的油气生成和运移主要在晚白垩世的末期。上述研究表明生油层中蒙脱石向伊利石的快速转化时期正是油气运移的最主要时期。

### 3. 原油的低成熟度特征

研究表明：松辽盆地粘土矿物的成岩演变与有机变质作用之间有着很好的对应关系。在蒙脱石快速向伊利石转化阶段，生成的是低成熟度的重质原油；在此阶段以后，有机质进入高温裂解阶段，则生成的是成熟度较高的轻质原油。因此，松辽盆地的原油的生成和运移无疑主要发生在蒙脱石快速向伊利石转化的阶段。

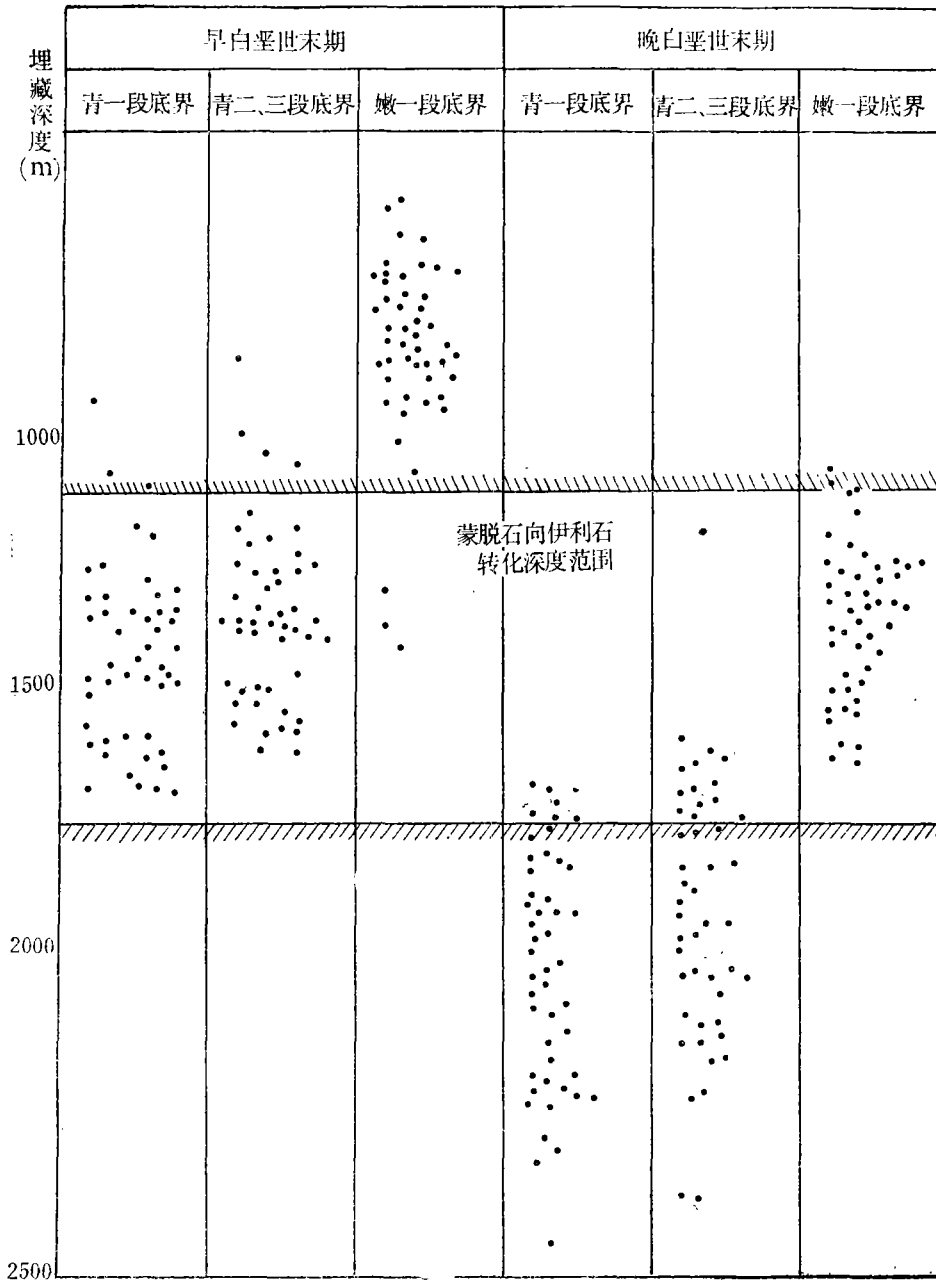


图4 松辽盆地主要生油层蒙脱石向伊利石转化时间  
 Fig. 4 Montmorillonite-illite conversion time of the main source rocks, Songliao Basin

#### 四、蒙脱石快速转化和脱水以后，生油岩排烃条件的变化

##### 1. 生油岩中油水性质的变化

在蒙脱石快速演变和脱水以后,随着埋藏深度的增加,粘土中水的含量不断减小,水的粘度随着增大。根据Low(1976)的资料,粘土中水的最终粘度可达8厘泊。这时粘土中的水,已不再是油气运移的介质。相反,油的粘度却随着埋藏深度和温度的增加而减小。Magara(1978)指出,油水相对渗透率与页岩压实程度的关系是:随着页岩的压实,水的相对渗透率减小,而油的相对渗透率增加。可以设想,在到达某一临界深度以后,生油岩中油的粘度要小于水的粘度。油的相对渗透率大于水的相对渗透率。这时原油将优先于水运移,即这时水呈束缚状态,而油呈油相运移。

最近对古31井黑帝庙油层原油的研究表明,其原油来自埋藏深度2000米以下的青山口组生油层(沿断裂带上升),原油比重为0.74—0.86,粘度0.7582厘泊,小于水的比重和粘度,更小于束缚水的粘度,证实了上述设想的存在。而且可以推断上述的临界深度,在古龙凹陷约在2000米左右。

Dickey(1975)曾指出,假定大部分孔隙水受粘土束缚的和实际上是不流动的,这时任何有关相对渗透率和平衡饱和度的概念就变得不重要了,如果某些粘土表面是油润湿的,而不是水润湿的话,那么即使在原油饱和度很低(1—10%)的情况下,油也可以呈一种连续的油相流动。我们在分析古龙凹陷青山口组的生油岩时,当样品被砸碎用蒸馏水浸泡时,有时可见到在水面上有一层黄褐色油膜。从这些生油岩洗油前后孔隙度的对比(表1)中也可见到,洗油后其孔隙度成倍增加,说明在洗油前泥岩孔隙中有较多的烃类。因此,作者认为在古龙凹陷青山口组(尤其是青一段)生油岩具备油相运移的条件。

表1 古17井泥岩洗油前后孔隙度的对比

Table 1 Comparison between pre-de-oiled and post-de-oiled of shale porosity

层位	编号	井深 (米)	洗油前孔隙度%	洗油后孔隙度%
青二、三段	10	2212.47	3.7	8.4
	11	2215.47	2.5	6.9
	12	2218.94	1.8	5.7

## 2. 孔隙特征的变化

随着泥岩的进一步脱水和压实,泥岩逐渐由塑性变成刚性。在异常高的孔隙流体压力和构造应力作用下,泥岩的微裂缝逐渐发育。为了研究泥岩孔隙的纵向变化,我们除了测定泥岩孔隙度外,还对部分样品用等温脱吸附的方法测定了泥岩孔容,平均孔径和孔径大小分布特征(图5)。

(1)在蒙脱石快速演变和脱水阶段,随着埋藏深度的增加,泥岩孔隙度和平均孔径很快减小,在孔径分布中,大于200埃的大孔隙比例的减小尤为明显。

泥岩被快速压实后,它的总孔隙度降到10%以下,平均孔径小于15埃。由于它的孔隙空间一般是扁平状,所以其有效孔隙半径要比测定值小得多。石油中复杂有机环状结

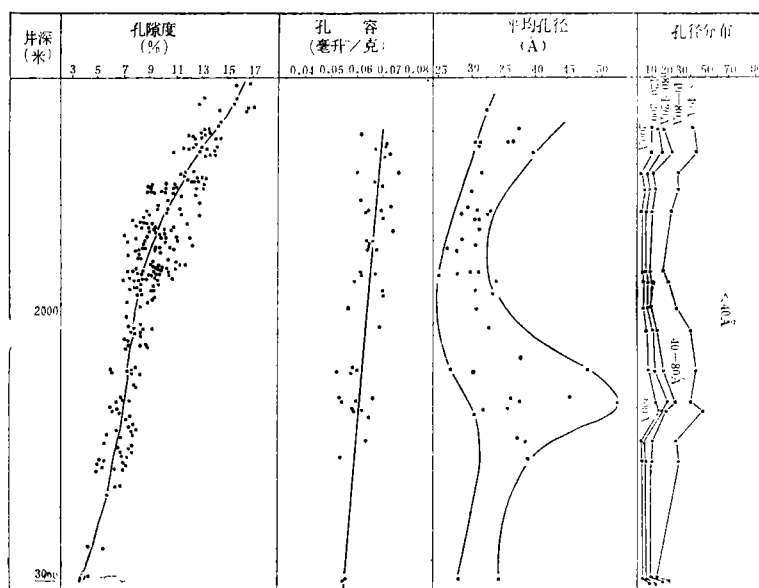


图5 泥岩孔隙特征的纵向变化

Fig.5 Vertical changes of pores of shale

构分子的有效直径是10—30埃,沥青分子的有效直径是50—100埃,两者均大于泥岩孔隙的有效直径。因此,经蒙脱石快速脱水和又一次压实以后,泥岩的孔隙通道已不能成为石油运移的主要通道。

(2)在蒙脱石快速脱水和压实后,随着埋藏深度的增加,泥岩的孔隙度和孔容缓慢减小。但是,在好的生油岩中,泥岩的平均孔径和孔径大于200埃的部分却明显增加。图5中这些孔径增大的样品都取自青山口组一段的生油岩。岩心观察和扫描电镜的研究表明,这些孔隙实际上是以微裂缝形式存在。

(3)孔隙特征的扫描电镜观察 用扫描电镜研究了古龙凹陷泥岩孔隙特征的纵向变化,在蒙脱石快速演变和脱水以前,由于上覆地层重力压实的结果,泥岩的孔隙和裂缝不仅很细,而且无方向性,泥岩呈粘性变形特征(图版I, 1)。

在蒙脱石快速演变阶段,由于蒙脱石脱水使泥岩再次产生孔隙。这种孔隙往往表现为水平方向的微裂缝,在上覆地层的不均匀压实下呈现各种形式的扭曲,显示了塑性变形特征(图版I, 2)。

随着埋藏深度的增加,泥岩被进一步压实、泥岩的孔隙和裂缝也不断变细,水平裂缝的方向性逐渐明显(图版I, 3、4),反映了泥岩随着水的排出,塑性减小,刚性增加。

在生油岩中,由于石油生成和裂解的影响,刚性泥岩具异常高的孔隙流体压力,因此,泥岩中的微裂缝特别发育,不仅方向性清楚,而且在泥岩中多呈条带状富集(图版I, 5)。相邻的泉头组绿灰色泥岩微裂缝的发育就不如上覆的青一段生油岩(图版I, 6)。

(4) 断层和节理的发育 泥岩中水平裂缝的发育极大地降低了岩石的机械强度, 它们在构造应力或差异压实作用下产生垂向裂隙。这些垂向裂隙不仅在盆地扶余油层的取心中经常可以见到, 在该油田的注水开发中亦证实扶余油层中的东西向垂直裂隙, 裂缝成为水窜的通道。

松辽盆地的地震勘探资料表明: 通常处于蒙脱石快速演变阶段以下的扶余油层比一般处于蒙脱石快速演变阶段的葡萄花油层, 断层要发育得多(表2)。

勘探表明: 古龙凹陷青山口组(埋藏深度大于2000米)泥岩裂隙中已发现很好的油气显示。英12井已在泥岩裂隙中获得工业油流, 成为引人注目的一种新的储集层类型。因此, 泥岩裂隙不仅是蒙脱石快速脱水以后油气运移的主要通道, 而且也可以成为一种具有一定潜力的储油孔隙, 特别是在构造断裂带附近。

表2 扶余油层与葡萄花油层断层发育程度对比

Table 2 Comparison of fault developments between Putaohua formation and Fuyu formation

已发现断层数 层位 (条)	地 区	
	三 台 凹 陷	大 庆 长 垣 及 其 西 部
葡萄花油层 (Putaohua formafion)	83	58
扶 余 油 层 (Fuyu formafion)	490	120

## 五、讨 论

油气的生成和初次运移都是在粘土岩中进行的。它与粘土矿物的成岩演变, 特别是与蒙脱石在成岩过程中向伊利石和绿泥石的转化反应有着密切的联系。在一个沉积盆地内, 蒙脱石向伊利石转化的埋藏深度与油气生成的门限深度往往是十分一致或相近的, 蒙脱石快速向伊利石转化的时期。也是盆地内油气运移和聚集的最有利时期。但是, 目前关于油气初次运移的各种假设往往着重于油气初次运移时期油气相态的讨论, 而忽视粘土矿物成岩演变对油气运移条件所带来的各种影响。水溶论者强调了蒙脱石脱水作为油气运移介质的重要性。但是, 笔者认为这是不够的, 因为蒙脱石脱水只是它成岩变化的一个方面, 而蒙脱石成岩演变对油气运移的影响并非仅此而已, 而且由于油在水中的溶解度很低。从蒙脱石层间析出的水量一般都只占泥岩体积的10—15%, 所以靠溶解状态迁移出去的烃类只是很小一部分, 因此, 水溶论遭到多数学者的反对。

笔者认为生油岩生成的油气能否从生油岩运移出去, 主要决定于有无推动油气运移的动力和适合于油气运移的通道。前者目前一般都认为在生油岩内部存在的异常高的流体压力是推动油气运移的主要动力来源。因此, 决定油气运移的关键在于是否有适于油气运移的通道。这不仅与泥岩本身的孔隙特征(大小和连通性等)有关, 而且与油气



本身的性质（成熟度、粘度和相态）有关。在一定条件下还与油气的受到的压力差有关，较大的压力梯度有利于油气通过较小的孔隙喉道。但是，关键的问题是要求油气的物理化学特征与泥岩孔隙特征的配合，而这又是和蒙脱石的成岩变化密切相关的。在成岩过程中蒙脱石的成岩演变特征不仅可以影响和反映有机变质作用的性质和油气特征，而且蒙脱石的成岩演变过程又直接影响泥岩的压实过程和孔隙特征。

在讨论蒙脱石成岩演变对油气运移的影响时，注意蒙脱石向伊利石转化的下列特点是必要的：

### 1. 蒙脱石向伊利石转化和脱水的突变性

蒙脱石向伊利石的转化和脱水不但是同时发生，而且这种转化不是匀速缓慢进行，而是具有突变性。80%蒙脱石层的转化是在纵向上很短的距离内完成的，在松辽盆地这个距离只有300—400米。这一时期是泥岩内矿物颗粒体积、孔隙体积剧烈变化的时期，也是油气运移的最有利时期。它与盆地油气生成在时间上的一致性，对评价蒙脱石成岩演变在石油运移中的意义是十分重要的。

2. 再生孔隙的方向性 在蒙脱石向伊利石转化时，矿物体积的变化主要表现为结晶格架单层厚度的减薄，由蒙脱石的15埃变为伊利石的10埃。由这一变化引起的孔隙度的增加往往具有水平裂缝的性质，使泥岩具有较好的渗透性。泥岩的再次压实过程就是孔隙流体（油、气、水）从泥岩裂缝和孔隙中被挤出来的过程。从泥岩的孔隙分布资料和扫描电镜观察表明这时泥岩中存在较大的孔隙和裂缝。所以这时的烃类除了以溶解状态运移外，可能还存在冲刷等其它方式的运移。蒂索和魏尔特把原油的不规则正烷烃分布图看作是冲刷型运移的证据，并且认为这种运移发生在不太成熟的生油岩中。作者认为这种情况对蒙脱石快速转化阶段来说可能是合适的。

作者认为不能用一般的烃在水中溶解度的概念来评价上述过程中水与油的关系以及它在油气运移中的作用，其理由是：

1. 在蒙脱石脱水反应以前，水和有机分子共存于粘土矿物结构之中，许多有机分子通过水的氢键与粘土矿物结合，当蒙脱石向伊利石转化时，两者又同时从蒙脱石层间析出共存于泥岩的孔隙和裂隙中，这种水具有较大的粘度和密度，对烃类有较大的溶解度。

2. 在有机质向石油转化时，有大量的CO<sub>2</sub>生成，它的存在大大提高了烃在水中的溶解度。

3. 在石油生成的低成熟度阶段，烃分子中存在大量的杂原子（S、N、O）。普赖斯（1973）指出，烃分子上这些杂原子的存在提高了烃在水中的溶解度。

由于上述原因，这时烃在水中的溶解度远远比正常情况下的试验数据要大得多。

（收稿日期1983年3月31日）

### 参 考 文 献

- 〔1〕 王行信、辛国强1980，松辽盆地白垩系泥岩粘土矿物纵向演变与有机变质作用的关系，石油勘探与开发 2期12—20。
- 〔2〕 王行信、辛国强1980，松辽盆地白垩系泥岩粘土矿物的成岩演变及其与油气分布的关系，石油

学报增刊42—49。

- [3] 藤田嘉彦1977, The Role of Shale Porosity Anomaly in Hydrocarbon Exploration, 石油技术协会志42, 2 107—114.
- [4] Magara k. 1978, Significance of the expulsion of water in oil-phase primary migration, Bull. Can. pet Geol. 26 No.1 123-131.
- [5] Dickey P. A 1975, Possible primary migration of oil from source rock in oil Phase, Bull. A.A. P. G. 59.2. 337-345.

## DIAGENETIC EVOLUTION OF MONTMORILLONITE AND PRIMARY MIGRATION OF PETROLEUM

Wang Xingxin

(Scientific Research and Design Institute of Daqing Oil Field)

### Abstract

In this paper the author presents the evolution features of montmorillonite to illite during the diagenetic process of the Cretaceous shales of Songliao Basin and their effects on primary migration of petroleum.

1. During the diagenetic process, the conversion of montmorillonite into illite can be characterized by a high speed at the early stage and a relatively stable one at the late stage.

2. In Songliao Basin, the depth at which the "negative anomaly" occurred well matches with the top depth where montmorillonite transformed into illite, resulting from the diagenetic changes of montmorillonite. The occurrence of the "negative anomaly" marked the beginning of the conversion of montmorillonite into illite and the primary migration of petroleum in Songliao Basin.

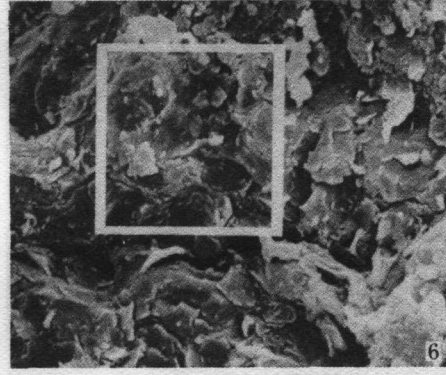
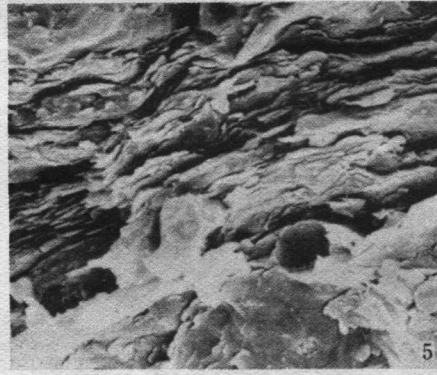
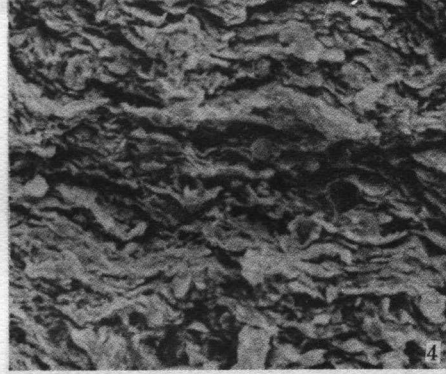
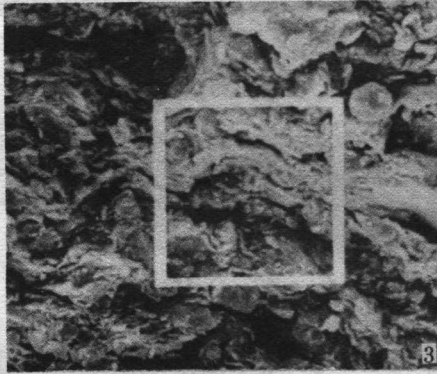
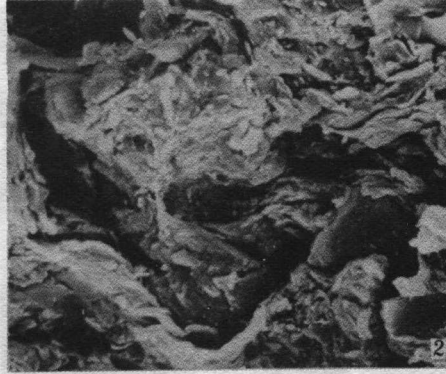
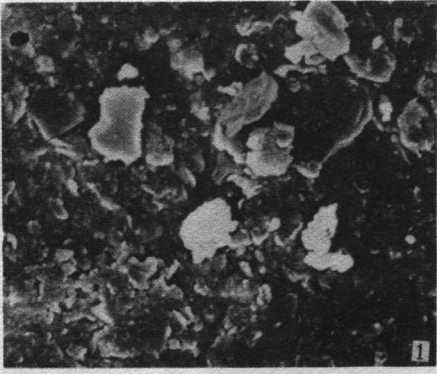
3. The rapid conversion of montmorillonite into illite provided a favourable condition for hydrocarbon migration. The vertical variations in mudstone porosity, the lower maturation of crude oil and the excellent consistency between the rapid conversion stage of montmorillonite into illite in main source beds and the hydrocarbon migration stage in Songliao Basin have indicated that the rapid conversion stage of montmorillonite into illite is also the most important stage of hydrocarbon migration in Songliao Basin.

4. The study on the porous features of shale and the vertical variations in oil-

water properties has shown that the conditions for hydrocarbon expulsion from source beds vary at different conversion stages of montmorillonite into illite. At the early rapid evolution stage, because of the greater variations in volumes of mineral grains, more rapid dehydration, larger porosity and variations of shales, crude oil could migrate in any status. Thus the rapid compaction process of shale was also the resqueezed-out process of oil-gas-water from pores and fractures of shale. At the late relatively stable stage, the source beds were further compacted, the shale porosity decreased and the rigidity increased, the microfractures developed. At this time, specific gravity and viscosity of oil have become lower than those of water, the water within shale existed in the form of irreducible water, while crude oil migrated in the form of oil phase along fractures and faults.

5. Sufficient pressure gradient and favourable path are the key to primary migration of hydrocarbon. However, since the source beds generally have abnormal pressure, the hydrocarbon migration from the source beds mainly depends on the suitable path for migration. The influence of the hydrocarbon migration by the diagenetic evolution of montmorillonite is shown in the first place in the shale porosity. The rapid conversion of montmorillonite into illite, not only produced large quantity of interstitial water but also provided some suitable path for hydrocarbon migration.

In this paper, the author puts emphasis on the study of variation in the relationship between porous features of source rocks and oil-water at different evolution stages, while estimating the influence of conversion of montmorillonite on hydrocarbon migration. And, there are now many obstacles in this study and some problems remain uncertain.



1. 古12井, 1号, 井深1005米,  $\times 2000$ 。 2. 古12井, 6号, 井深1388米,  $\times 2000$ 。 3. 古12井, 9号, 井深1609米,  $\times 2000$ 。 4. 古12井, 12号, 井深1708米,  $\times 2000$ 。 5. 古17井, 33号, 井深2376米,  $\times 2500$ 。 6. 古17井, 36号, 井深2412米,  $\times 2500$ 。