

松辽盆地白垩系泥岩粘土矿物成岩 演变特征及其地质意义

王 行 信

(大庆石油管理局勘探开发研究院)

本文总结了松辽盆地白垩系泥岩粘土矿物成岩演变的温度、深度和反应速度特征,以及在不同沉积环境下的成岩演变模式,着重讨论了反应与油气生成、运移和分类的关系,以及对砂岩成岩作用的影响。

松辽盆地粘土矿物成岩演变特征的研究始于1978年。1980年为研究粘土矿物的纵向变化和脱水特征,在古龙凹陷和三肇凹陷分别钻了两口探井:古12井和徐11井,从井深1000m开始至井底(分别为2667m和2011m)作系统地定点取心和采样分析。几年来,共分析了数百口探井和资料井的两万余块样品,进行了粘土矿物成岩演变特征与油气生成、运移关系的研究,本文是近年来研究成果的初步总结。

一、粘土矿物成岩演变特征

粘土矿物的成岩变化特征受埋藏深度、温度、时间和主要离子活度等因素的影响。松辽盆地白垩系泥岩粘土矿物的成岩演变有以下几个特征:

(一) 温度和深度界线

目前一般认为粘土矿物成岩变化主要受温度的控制。盆地内大量的分析结果表明,不同地区由于构造发展史的差异,地层中蒙脱石向混合层粘土转化的顶界深度是各不相同的。但是,恢复到最大古埋藏深度后,其顶界深度约在1250—1450m左右。相应的地层温度在62—70℃左右。唯膨润土夹层可以例外,它甚至在1900m深处仍然以分散性蒙脱石为主要组分。

盆地内混合层粘土转化为伊利石和绿泥石的顶界深度在2500—3000m,目前相应的地层温度在110—120℃。泥岩中高岭石消失,转化成伊利石和绿泥石的深度在1800—2000m,相应的地层温度在90℃左右。

时间对于粘土矿物成岩演变的影响,从世界范围来看是十分明显的。世界上中生代沉积盆地,蒙脱石向混合层粘土转化的埋藏深度一般在1200—1500m左右,相应的地层温度在60—75℃。在新生代第三系沉积盆地内,蒙脱石向混合层粘土转化的地层温度在80—110℃之间,相应的埋藏深度均大于2000m。时间可以补偿温度的不足,但是,在松辽盆地白垩系各层间,它们在时间上的差异对粘土矿物成岩反应的影响并不十分明显。盆地边部钻遇的白垩纪下部地层和侏罗纪地层,由于埋藏深度浅,泥岩中的蒙脱石并未向混合层粘土转化。在盆地中心的古龙凹陷内,由于埋藏较深,嫩江组上部(3—5段)的泥岩已经发生蒙脱石向混合层粘土的转化,其转化的顶界深度在1300—1500m左右。上述特征说明,松辽盆地粘土矿物的成岩演变主要受地层埋藏深度和温度的控制,并且其深度与温度范围与世界其它中生代沉积盆地一致。地层层位对盆地内粘土矿物成岩演变的影响目前还并不十分明显。

(二) 成岩反应速度

图1表示古12井和徐11井泥岩蒙脱石-伊利石混合层中蒙脱石层百分含量的纵向变化。从图中可见,在蒙脱石向伊利石转化过程中,反应速度不是均匀的,有两个快速转化阶段,在两个快速转化阶段之间,则处于相对稳定的状态。这与国外的一些报道相类似。

粘土矿物成岩演变的快速转化特征,使粘土矿物在纵向的演变具有明显的界线。以蒙脱石向混合层粘土转化而言,界线上下两块样品的井深往往只相差几米或不到1m,但粘土矿物特征的变化却十分明显,在甘油饱和的定向薄膜样品的X射线衍射图上,蒙脱石的(001)反射在 $18\text{\AA}$ 左右,而蒙脱石-伊利石混合层的反射峰在 $14.5\text{\AA}$ 附近。另外,泥岩中高岭石和混合层粘土在剖面上的消失亦是如此,都是在很短的垂直距离内明显地表现出来。

(三) 沉积环境的影响

蒙脱石向伊利石转化时必须要有 K^+ 的参加,而蒙脱石向绿泥石转化时要有 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的参加。因此,泥岩成岩介质中主要离子的活度直接影响蒙脱石的成岩反应特征,而介质中主要离子的活度又直接与泥岩的原始沉积环境和成岩压实过程有关。分析结果表明,沉积环境对蒙脱石成岩反应特征的影响是十分明显的。在富含有机质的生油凹陷(古龙凹陷和三肇凹陷)中,蒙脱石开始向混合层粘土转化时,同时形成蒙脱石-绿泥石和蒙脱石-伊利石两种混合层粘土矿物,而且前者比后者发育,而在滨州线以北的广大河流相带及大庆长垣北部大型三角洲的核心部分,蒙脱石-伊利石混合层明显较蒙脱石-绿泥石混合层发育,而且前者出现深度较浅,后者出现较深。

松辽盆地不同沉积相带蒙脱石的成岩演变一般模式可用图2表示。

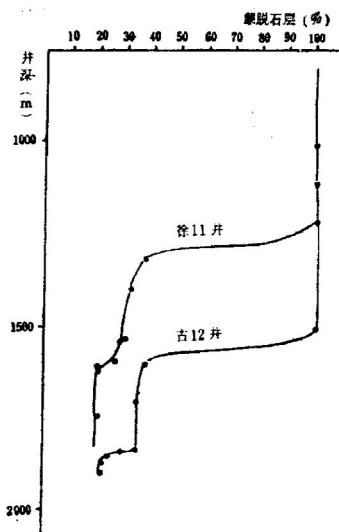


图1 蒙脱石-伊利石混合层中蒙脱石层百分含量的纵向变化

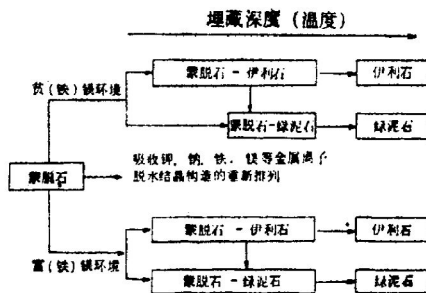
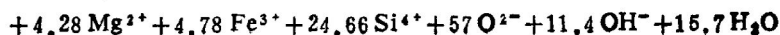
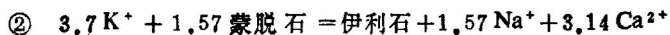
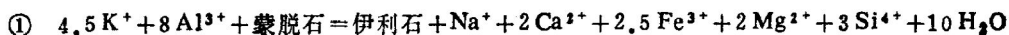


图2 松辽盆地粘土矿物成岩演变模式

二、地质意义

(一) 蒙脱石成岩演变对砂岩胶结作用的影响

在蒙脱石成岩过程中,它不能通过简单的阳离子交换转变成伊利石,而包含了化学组成的改变。Hower (1976) 等人提出两个如下反应方程式:



在上述两个反应中，一个共同的特点是反应的结果除生成伊利石外，均同时析出 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 和 Si^{4+} 各种阳离子和水。同时，这时也是有机质向烃类转化的时期。因此，这时从泥岩层进入邻近砂层孔隙的流体是富含多种金属离子， CO_2 和烃类物质的混合液，它们进入砂体后将在以下两个方面直接影响砂岩的成岩作用：

(1) 改变砂岩孔隙流体的介质条件，破坏了原来岩石骨架和孔隙流体之间的化学平衡，使一些不稳定的组分在新的条件下被溶解或交代。其中最常见的是碎屑长石，早期碳酸盐被溶解和交代，产生次生孔隙。斜长石的钠长石化和方解石的白云石化。

(2) 在砂岩孔隙中形成新的沉淀，其中最常见的是碳酸钙， SiO_2 和自生粘土矿物沉淀。

盆地内砂岩碳酸盐胶结物的分布具有两个明显的特征：

(1) 一般均富集于砂层与泥岩的接触面上，在厚层砂岩的中部，碳酸盐的含量一般很少或不含。这是由于碳酸钙的溶解度与 CO_2 的分压成正比，当富含 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的流体从泥岩进入砂层时，由于孔隙流体压力的突然降低使 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 变成过饱和，在砂岩孔隙中很快形成 CaCO_3 沉淀，即通常说的“顶钙”和“底钙”。这类似于富含 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的泉水喷出地面时形成美丽的泉华一样。由于地下流体一般向上运移总要比向下运移有利，所以一般“底钙”比“顶钙”发育，这一特征在电测图上表现得十分清楚。

(2) 生油凹陷砂体前缘薄层砂岩的 CaCO_3 胶结物，比砂体核部厚层砂岩发育。这是由于前者处于流体从泥岩进入砂岩的前哨位置，厚层泥岩发育，泥/砂岩比值大，所以泥岩粘土矿物成岩作用对砂岩胶结作用影响的重要性亦随之增加。砂岩中 CaCO_3 胶结物的上述分布特征，说明砂岩中碳酸盐胶结作用与泥岩的蒙脱石成岩变化有着密切关系。对金 6 井砂岩碳酸盐胶结物的碳、氧同位素分析和对三召凹陷内砂岩碳酸盐胶结物中液体包裹体的测温研究，均表明其碳酸盐胶结物的形成温度在 140°C 以上，证明它们是在成岩过程中的产物，其成因与生油岩中有机质热解作用密切相关，即来源于相邻的泥岩。

在蒙脱石向伊利石转化过程中析出的 SiO_2 ，一般认为它是砂岩石英次生加大的 SiO_2 来源之一。松辽盆地泥岩粘土矿物 ($<2\mu\text{m}$) 化学组成的纵向变化表明：在混合层粘土带，随着埋藏深度的增加， SiO_2 的含量明显减少，这正好与盆地内砂岩石英次生加大在此深度范围内明显增强的特征相一致，反映了它们之间的成因联系。另外，在同样的埋藏深度，处于生油凹陷的砂岩其石英次生加大程度，要比处于砂岩体主体和核部的大庆长垣和滨北地区发育，这与 Phillip 等人 (1963) 和 Flichtbaner (1967) 对道格砂岩的报道一致，反映了泥/砂岩比值增大， SiO_2 自生作用增强，表明这些 SiO_2 是从泥岩中“漏”出来的。

砂岩中自生粘土矿物的沉淀，是泥岩粘土矿物成岩演变对砂岩胶结作用影响的重要组成部分。除了自生高岭石的形成是典型的化学（或胶体）沉淀外，砂岩胶结物中广泛存在的蒙脱石-绿泥石混合层和绿泥石与泥岩中蒙脱石的成岩演变有着密切的关系，它为蒙脱石向绿泥石的转化提供了所需的 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 。

另外，蒙脱石成岩反应中析出的 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 也是砂岩碳酸盐胶结物铁白云石化的必要组分。

(二) 粘土矿物成岩演变与有机变质作用的关系

粘土矿物成岩演变特征的研究，不仅为地层成岩阶段的划分提供了重要的标志，而且它与生油岩的有机变质作用之间也存在密切的关系。表 1 表示不同成岩阶段泥岩的粘土矿物演化特征及其与有机变质作用的对应关系。

粘土矿物成岩演变与有机变质作用之间的紧密关系，反映了两者之间有着成因的联系和相似的温度界线。松辽盆地蒙脱石向蒙脱石-伊利石混合层转化的温度 ($62-70^\circ\text{C}$) 与有机质生油的门限温度 ($63-70^\circ\text{C}$) 完全一致，与世界上其它白垩纪沉积盆地的研究结果也基本一致。盆地内混合层粘土消失，最终变为分散性伊利石和绿泥石的深度（和温度）界线，正好与盆地内液态烃消失，最终都裂解

表1 泥岩的成岩阶段与有机变质作用的关系

成岩阶段		粘土矿物演化特征		最大埋藏深度 (m)	有机变质作用	生成烃类
早成岩阶段		大量分散性蒙脱石		1 200—1 500	未成熟相	生化甲烷
中成岩阶段	早期	混合层	C.E.C. ≈ 17.5	1 800—2 000	低成熟相	重质原油
	晚期	粘土	C.E.C. ≈ 12.5	2 500—3 000	高成熟相	轻油和气
晚成岩阶段		分散性绿泥石		大于2 500—3 000	变质相	干气

成为干气的深度（和温度）界线一致。目前，把泥岩中混合层粘土出现和消失的深度界线，作为石油生成和裂解成干气的深度界线，在石油天然气勘探中已得到承认和应用。

（三）对石油初次运移的影响

1. 蒙脱石脱水时期与油气运移时期一致

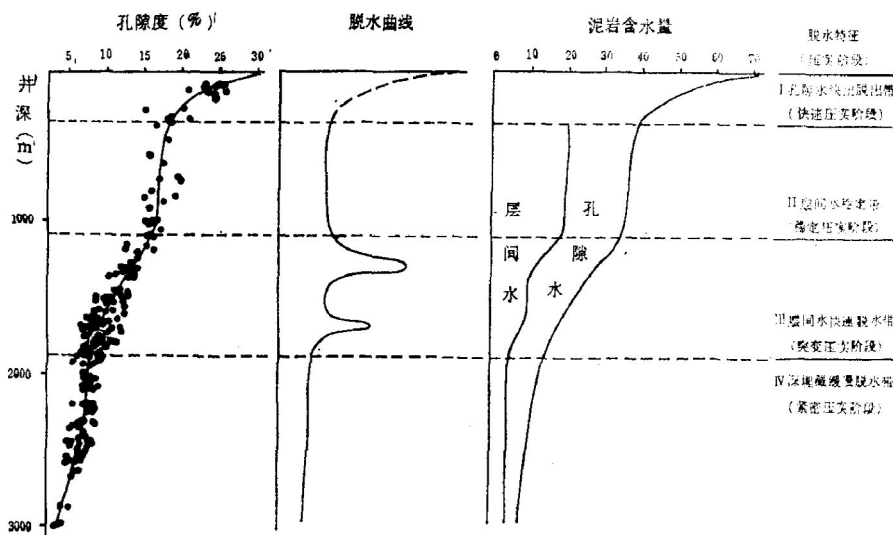


图3 松辽盆地泥岩脱水特征

图3表示松辽盆地泥岩脱水特征的纵向变化，从图可见在蒙脱石快速向伊利石或绿泥石转化时期，由于粘土矿物颗粒体积缩小和层间水的析出，使泥岩再次产生孔隙，提高了泥岩的渗透性，图中所示的这一阶段泥岩孔隙度的再次迅速减小，反映了泥岩在上覆地层压力下，快速排出孔隙流体（包括油、气、水）和再次被快速压实的特征和规模。因此，这一时期是泥岩颗粒体积、孔隙和孔隙流体发生剧烈变化和重新调整的时期，它无疑也是油气运移最有利的时期。

根据以往对盆地构造发展史和生油岩有机地化指标的研究，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，而嫩江组一段主要在晚白垩世的末期。图4各点分别表示古龙凹陷和三肇凹陷48口探井剖面中，青山口组和嫩江组一段生油层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。青山口组生油层中蒙脱石向伊利石的转化，主要发生在早白垩世末期，而嫩江组一段生油层，主要发生在晚白垩世末。上述结果表明松辽盆地主要生油层的油气生成和运移时期，与其生油层中蒙脱石向伊利石快速转化的时期一致。

2. 蒙脱石快速脱水以后生油岩排烃条件的变化

在蒙脱石快速演变和脱水时期，生油岩的排烃是油气与蒙脱石析出的层间水，在压力的驱动下沿

着新产生的孔隙，从生油岩中挤出去的。在蒙脱石快速脱水以后，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，这时粘土中的水已不再是油气运移的介质，而成为束缚水。相反随着埋藏深度和温度的增加油的比重和粘度减小。Magara (1978) 曾指出，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。因此可以设想，在到达某一临界深度以后，生油岩中油的粘度要大于水的粘度。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，即水呈束缚态，而油呈油相运移。根据作者的研究，松辽盆地古龙凹陷上述的临界深度约在 2000 m 左右。

另外，经蒙脱石脱水和泥岩被再次快速压实以后，生油岩的物理性质和孔隙特征亦发生明显的变化，图 5 表示古龙凹陷泥岩孔隙特征的纵向变化。从图可见，泥岩被再次快速压实以后，它的孔隙度降到 10% 以下，平均孔隙半径小于 15 Å。由于泥岩的孔隙空间一般是扁平的，所以其有效孔隙半径要比测定值小得多。石油中复杂环状结构分子的有效直径是 10—30 Å，沥青分子的有效直径是 50—100 Å，两者均大于泥岩孔隙的有效直径。因此，这时的泥岩孔隙通道已不能成为石油的主要运移通道。

从图 5 还可见，在蒙脱石快速脱水以后，泥岩的孔隙度和孔容继续随着埋藏深度的增加而减小，

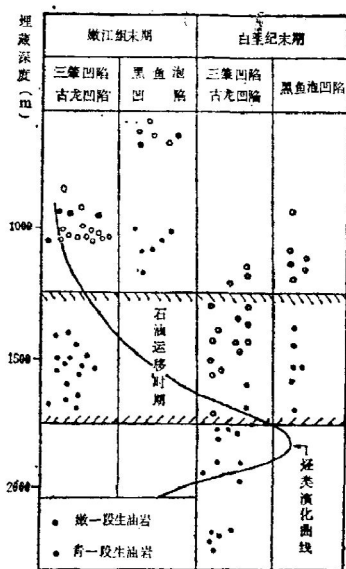


图 4 松辽盆地主要生油层蒙脱石向伊利石转化时间

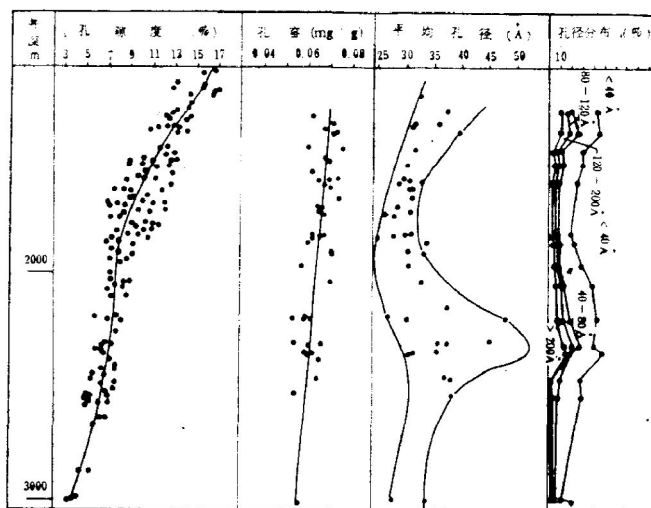


图 5 泥岩孔隙特征的纵向变化

但是平均孔隙半径却有局部增大的趋势。这些孔隙增大部分的样品都取自青山口组一段的生油岩，其平均孔隙半径增大的原因，从孔径分布曲线中可以明显地看出，主要是由于孔径大于 200 Å 的大孔隙比例明显增加，根据现场岩心观察和室内扫描电镜研究，这些大孔隙实际都是平行泥岩层理面的微裂缝。在扫描电镜下，它们在生油岩中呈不均匀分布，局部呈条带状密集分布。

泥岩中水平裂缝的发育极大地降低了岩石的机械强度，在构造应力或差异压实作用下产生垂向裂隙。这些泥岩裂隙不仅是油气运移的良好通道，而且本身又是很好的储油空间。在古龙凹陷埋藏深度大于 2000 m 的青山口组厚层泥岩裂隙中已获得工业油气流，成为引人注目的一种新的储集层类型。

综上所述，在蒙脱石快速脱水以后油气初次运移，以沿生油岩微裂隙为通道的油相运移为主。

(四) 粘土矿物脱水深度与油气分布深度的关系

图 6 是根据对徐 11 井和古 12 井岩心样品的泥岩孔隙度和粘土矿物 (<2 μm) 的 x 射线衍射分析结果，作出的粘土矿物脱水曲线。为了搞清粘土矿物脱水深度与油气分布深度的关系，对盆地北部 12 km² 内 363 口含油气探井和资料井的 5219 层油气层进行了统计研究。各地区蒙脱石快速脱水的顶界

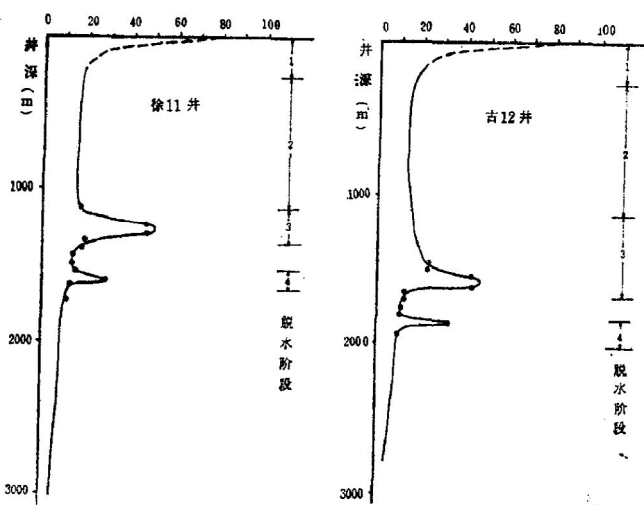


图6 松辽盆地粘土矿物脱水曲线

深度根据分析结果确定,底界深度根据古12井和徐11井的粘土矿物脱水曲线特征,由顶界深度向下推450 m来确定。由此确定的底界深度经有实际分析资料地区的验证,结果十分相近。

图7是盆地北部油气分布深度与粘土矿物脱水深度的关系,从图中可见:

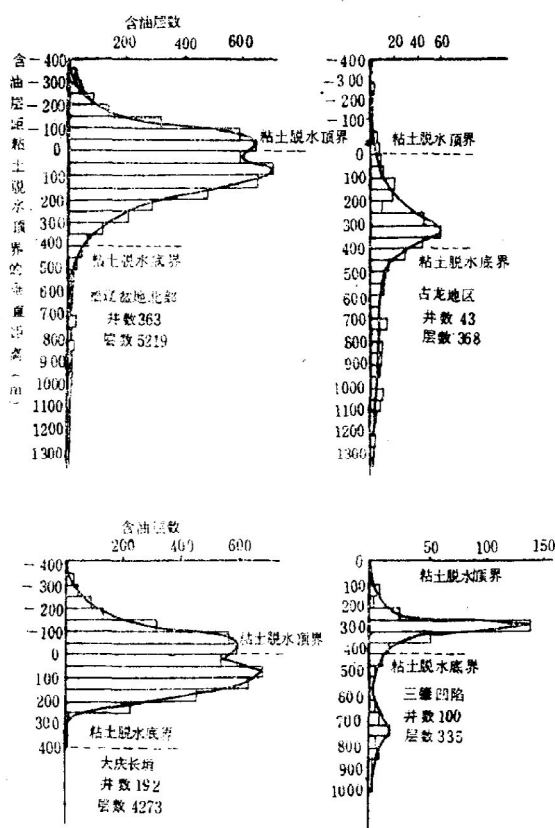


图7 油层分布深度与粘土矿物脱水深度的关系

(1) 粘土矿物快速脱水顶界附近是油层的主要分带。在5219层油气层中,仅185层在目前粘土矿物快速脱水的底界以下,占总层数的3.5%、而96.5%的油气层位于此底界以上,其中80%的产油层集中分布在顶界深度以上150 m和以下200 m (共计350 m)的垂直距离内。

(2) 不同地区粘土矿物脱水深度与油层分布深度关系的差异,反映它们构造发展史的差异。

a. 油气沿蒙脱石快速脱水顶界上升的垂直距离受构造幅度的控制:在大庆长垣,油气从顶界向上运移的最大垂直距离在400 m以内,与大庆长垣目前的含油高度385 m是一致的,而古龙地区油气沿“顶界”上升的距离与该区龙虎泡构造的高度幅度一致。

b. 在三肇和古龙地区,油气层主要分布在蒙脱石快速脱水的顶界以下,反映了这两地区没有象大庆长垣那样的大幅度构造隆起,而是以小幅构造和岩性油藏为主的石油地质特征,油气层的分布深度受储集层埋藏深度的控制。另外,上述区域的另一特征

是在蒙脱石快速脱水底界以下仍有较多的油气层分布，它反映了上述区域在嫩江组末期油气进入储集层以后，仍处于持续下沉的长期生油凹陷的特征。

CHARACTERISTICS OF DIAGENESIS AND EVOLUTION OF THE CLAY MINERALS IN CRETACEOUS MUDROCK IN SONGLIAO BASIN

Wang Xingxin

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Daqing
Petroleum Administration)

Abstract

The period of hydrocarbon generation and migration of major source beds in the Songliao Basin fitted in with that of the montmorillonite which changed rapidly into illite (or chlorite). More than 80% oil and gas pools are distributed in mixed-layer clay belt and its overlying strata. After rapid dewatering of the montmorillonite, the pore characters and oil-water properties of the source beds changed distinctly, oil migrated in oil phase and water was in binding phase. Newly developed micro-fractures then became the main passage of hydrocarbon migration.

The diagenesis of the clay minerals and the reaction of organic matter towards hydrocarbon conversion of the source rocks played an important role in sandstone diagenesis. It has been proved by study that the development of carbonate, SiO_2 , authigenic clay minerals, the secondary pores in the sandstone and the diagenesis of clastic minerals bore close relation in origin to the above mentioned reaction products.

杜博民教授逝世

我国著名石油地质学家、大庆市科学技术协会副主席、大庆石油学院勘探系前系主任杜博民教授，因患脑血栓病医治无效，于1988年1月8日病逝，终年69岁。

杜博民教授原籍贵州省大方县，1943年毕业于国立重庆大学理学院地质系，曾任中国石油公司甘青分公司勘探处助理地质师、玉门油田钻井大队地质电测队队长和地质处处长、西安石油勘探局地质师、大庆石油学院勘探系系主任、科研处处长、教授及哈尔滨师范大学教授等职，为我国的石油地质事业作出过可贵的贡献。

(党仁珊)