我国东部三个中新生代含油盆地和坳(凹)陷泥岩压实特征

张博全 崔武林 王岫云 关振良 晏 皋

(中国地质大学,武汉 430074)

作者根据泥岩孔隙度、泥岩粘土矿物和泥岩孔隙流体压力,将我国东部三水、泌阳和黄骅三个中新生代含油气盆地和坳(凹)陷的泥岩压实划分为四个阶段,根据所划分的阶段总结了三个盆地和坳(凹)陷泥岩压实异同和原因。

关键词 泥岩压实 压实阶段 压实特征 压实差异

第一作者简介 张博全 男 55岁 副教授 石油地质

一、前 言

压实作用是使疏松的沉积物固结成岩的主要作用之一。压力主要来自上覆沉积物和水体的静水压力,其作用不仅可以排除沉积物中水、缩小体积、降低孔隙度,而且伴有结构构造或新矿物的形成,促进沉积物固结硬化。作用效果随沉积物性质而异,一般是细粒疏松和含水多的泥质沉积物变化最大,泥质沉积物比砂质沉积物容易压实。

压实作用是一种物理变化、化学变化、物理化学变化和矿物变化的过程。这一过程是在地壳运动中进行的,因而也是一种地质现象和地质作用。尤其是泥质沉积物由于压实变形的不可逆性,因此根据泥质沉积物的压实历程可以恢复一个地区的压实历史和地质发展史。

二、三个含油盆地和坳(凹)陷泥岩压实阶段划分和特征

根据泥岩实测孔隙度、泥岩粘土矿物和泥岩孔隙流体压力随深度的变化,将我国东部三水、泌阳、黄骅三个中新生代含油气盆地和坳(凹)陷的泥岩压实划分为四个压实阶段,这四个阶段的提法和粘土矿物与孔隙流体压力的范围以及有关特征,如表1所示。

(一)三水盆地

三水盆地实测泥岩孔隙度、粘土矿物成分与现今埋藏深度关系曲线如图1A。从图可以看出,泥岩孔隙度相当低,那怕在离现今地表500m处,孔隙度仅10%,这样低的孔隙度与三水盆地泥岩中高碳酸盐含量(一般20～30%)有关,除此还与下第三系渐新统华涌组末期的上升剥蚀有关。根据剥蚀厚度对泥岩孔隙度、粘土矿物成分随深度曲线进行剥蚀厚度校正后,其完整的压实曲线如图1B。根据校正后的压实曲线,其泥岩压实阶段划分如下:

1. 早期快速压实段(0～300m) 随着埋深和上覆负荷增加,孔隙水迅速排出,孔隙度急

剧下降，泥岩孔隙度由60%下降到20%，平均每百米孔隙度下降13.3%。由于埋藏浅，地温低，沉积物中粘土矿物成分未发生变化，孔隙流体压力为静水柱压力，属于正常压实。

表1　我国东部中新生代含油气盆地泥岩压实阶段划分

压实阶段	孔隙度 %	粘土矿物	脱　水	孔隙压力
(Ⅰ)早期快速压实阶段	60～20	纯蒙脱石带	孔隙水快速脱出	正常
(Ⅱ)早期稳定压实阶段	20～10	纯蒙脱石带	孔隙水缓慢脱出	正常
(Ⅲ)晚期快速压实阶段	10～5	蒙脱石-伊利石混合层带	孔隙水层间水快速脱出	异常（或部分异常）
(Ⅳ)晚期稳定压实阶段	<5	纯伊利石带	层间水缓慢脱出	异常或正常

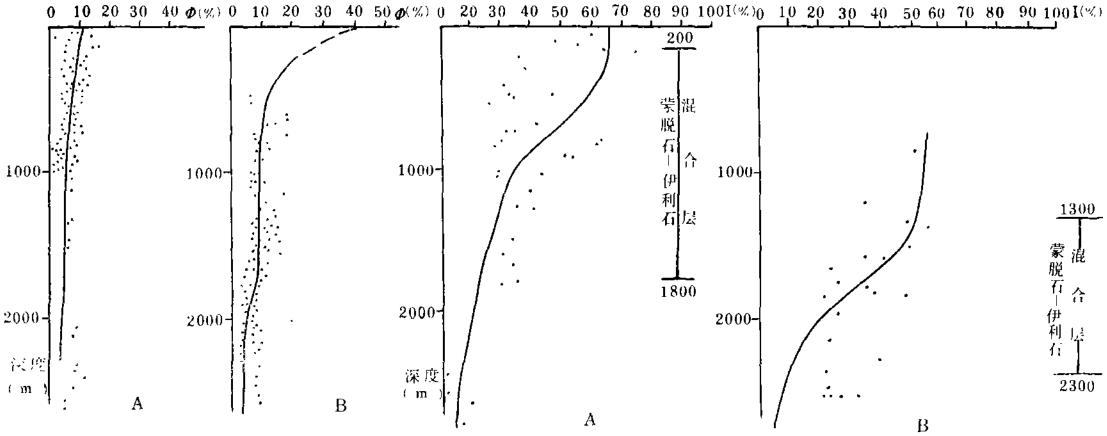

图1　三水盆地实测泥岩孔隙度和粘土矿物随深度变化关系曲线

A—现深度　　B—古深度

2. 早期缓慢压实段(300～1600m)　随着进一步深埋和上覆负荷的进一步增加，孔隙水排出变缓，孔隙度下降缓慢，从20%下降到10%，平均每百米孔隙度下降0.77%。由于埋藏较浅，地温较低，粘土矿物成分仍未变化，孔隙流体压力等于静水柱压力，亦属正常压实。

3. 晚期快速压实段(1600～2200m)　当埋深和上覆负荷进一步增加时，虽然孔隙水几乎脱出殆尽，由于地温已相当高，引起蒙脱石向伊利石转化，脱出层间水，形成蒙脱石-伊利石混合层带，再次出现快速脱水和剧烈压实阶段，孔隙度由10%下降到5%，每百米平均孔隙度下降0.83%。这阶段由于压实不平衡，地温水热增压，蒙脱石脱水以及有机质转化成油气，在盆地的某个地段，特别是深湖或半深湖区由于沉积物较细，流体排出不畅，更易出现异常高的流体压力的异常压实段或异常压实段与正常压实段相交替的混合压实段。而在盆地的边部沉积物较粗，流体排出流畅，通常仍为正常孔隙流体压力的正常压实段(图2)。

这阶段由于上覆负荷和地温均较高，造成砂岩中石英、长石细小颗粒的接触点上发生变形和溶蚀-压溶，压溶物质在较大的孔隙空间中沉淀下来，形成石英、长石的次生增大现象，此现象在相应深度的砂岩中能见到。

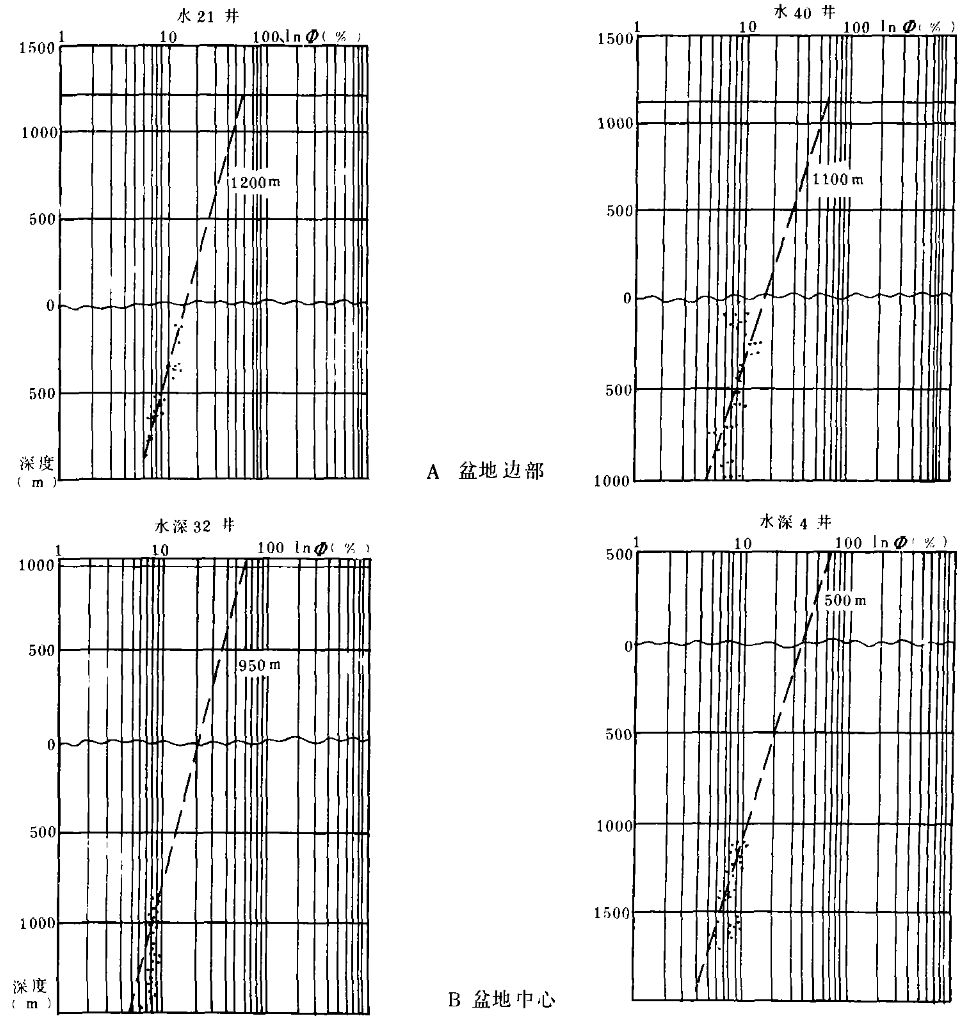

图2　三水盆地不同的压实曲线

4. 晚期压实段(>2200m)　当埋深进一步增加，上覆负荷越来越大时，泥岩中孔隙水和层间水都几乎排除殆尽，这时上覆负荷主要作用在固体颗粒上，造成紧密的缓慢压实。这阶段石英、长石由压溶引起的次生增大现象在砂岩中能普遍见到。

(二)泌阳凹陷

泌阳凹陷实测孔隙度、粘土矿物成份与现今埋藏深度关系曲线如图3A。从图3A中可以看出，泥岩孔隙度也是比较低的，在离现今地表1000m处，孔隙度也只有20%，本区泥岩中碳酸盐含量除个别层段外，一般小于10%。因此孔隙度偏低的主要原因是下第三系廖庄组末期存在着抬升剥蚀，对压实曲线进行剥蚀厚度校正后，才能恢复其压实曲线，的完整性(如图3B)。根据修正后的压实曲线，其压实阶段划分如下：

1. 早期快速压实段(0～300m)　泌阳凹陷初期压实也与三水盆地一样，只要地层上覆负荷稍增加，孔隙水即迅速排出，引起沉积物孔隙度的急剧降低，从60%降到30%，每百米平均下降10%。由于上覆负荷和地温不高，因此粘土矿物成分未发生变化，孔隙流体压力为静水压力，属于正常压实。

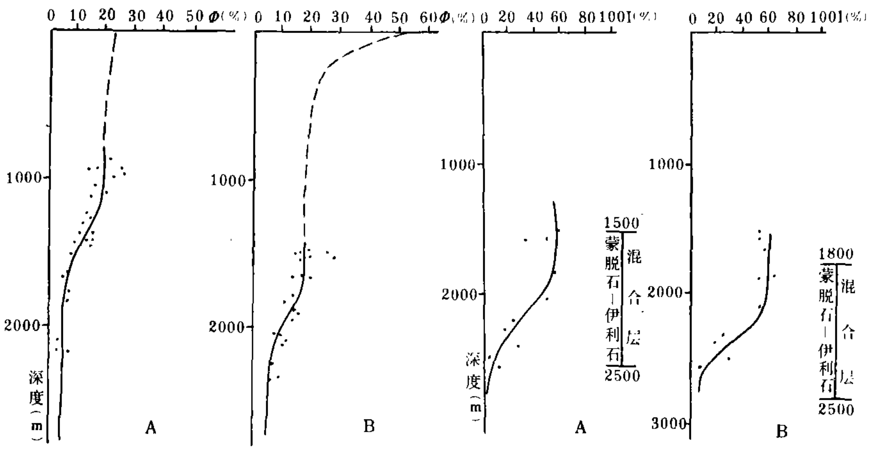

图3 泌阳凹陷实测泥岩孔隙度和粘土矿物随深度变化关系曲线

A—现深度 B—古深度

2. 早期缓慢压实段(300～1800m) 随埋深和上覆负荷增加，孔隙水缓慢排出，因而孔隙度随深度缓慢降低，从30%下降到20%，平均每百米孔隙度下降了30.67%。由于上覆压力和地温不高，因此，粘土矿物成份亦未发生变化，孔隙流体压力为静水压力，亦属正常压实。

3. 晚期快速压实段(1800～2300m) 由于埋深和上覆负荷的增大，地温增高，发生蒙脱石向伊利石的转化，形成蒙脱石—伊利石混合层，蒙脱石脱出层间水，孔隙度再次急剧下降，从20%下降到10%，平均每百米孔隙度下降2.0%。这阶段的总趋势是孔隙度下降，但在凹陷的深湖和半深湖区，沉积物较细，排水不畅，由于压实的不平衡，地温水热增压，蒙脱石脱水以及有机质转化成油气，极易形成异常高压，属于异常压实段或正常压实段与异常压实段相交替的混合压实段。在凹陷的边部由于沉积物较粗，流体输导条件良好，孔隙流体压力为静水压力，通常仍属于正常压实段，情况如三水盆地。

这阶段由于上覆负荷与地温已较高，造成砂岩中石英、长石的细小颗粒接触点上发生变形和压溶并产生次生增大现象，这一现象在相应深度的砂岩中较普遍出现。

4. 晚期缓慢压实段(>2300m) 当埋深进一步增加，上覆负荷越来越大，地温越来越高时，泌阳凹陷也和三水盆地一样，泥岩中孔隙水和层间水几乎排除殆尽。这时上覆负荷主要作用在固体颗粒上，造成紧密压实、变形和压溶。因而在砂岩中能普遍见到石英、长石的次生增大现象。

(三)黄骅拗陷

黄骅拗陷实测孔隙度、粘土矿物成份与现今埋藏深度的关系曲线如图4。由于本区地层在下第三系末虽有抬升剥蚀，但甚微，因而能显示压实曲线的完整性，据此，曲线压实阶段的划分如下：

1. 早期快速压实段(0～500m) 随埋深和上覆负荷增加，孔隙水迅速排出，孔隙度下降剧烈，从60%下降到30%，每百米平均下降6%，同样由于上覆压力和地温不高，粘土矿物成分未发生变化，孔隙流体压力为静水压力，属于正常压实。

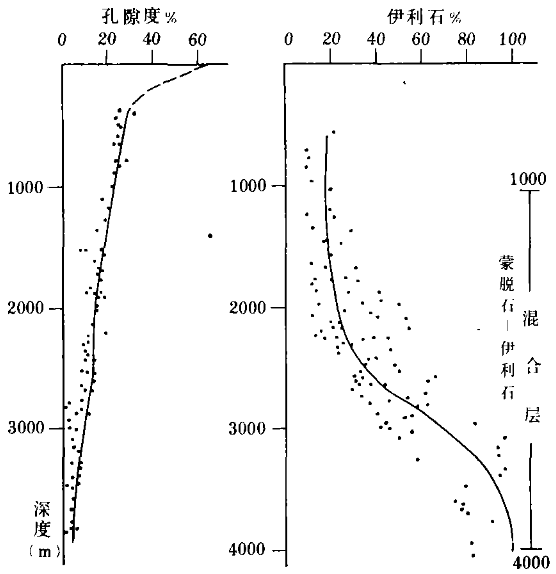

图4　黄骅拗陷实测泥岩孔隙度和粘土矿物随深度关系曲线

(左图据大港油田资料)

2. 早期缓慢压实段(500～2600m)　当埋深与上覆负荷进一步增加时，由于大部分孔隙水已排出，这阶段孔隙水的排出变得缓慢，泥岩孔隙度下降也显得缓慢，从30%下降到15%，每百米平均下降0.71%。由于上覆压力和温度还不很高，因此粘土矿物成分亦未发生变化，孔隙流体压力为静水压力，属于正常压实。

3. 晚期快速压实段(2600～3800m)　随着进一步埋深，当上覆负荷和地温进一步增高时，蒙脱石脱出层间水，形成蒙脱石－伊利石混合层，引起孔隙度再次急剧下降，从15%下降到5%，每百米平均下降孔隙度0.83%。这阶段在盆地的深湖、半深湖区，由于沉积物较细，流体排出不畅，加上水热增压，蒙脱石脱水以及有机质转化成油气，极易形成异常高的孔隙流体压力，为异常压实段或正常压实与异常压实相交替的混合压实段。而边部由于沉积物较粗，流体输导条件好，孔隙流体仍为静水压力，通常属于正常压实段，情况也与三水盆地类似。

这阶段由于上覆负荷和地温已相当高，因此在砂岩中石英、长石细小颗粒的接触点上发生压溶，并形成石英长石的次生增大现象。李绍光在《北大港构造带南北翼成岩后生作用与孔隙度的关系》一文中就详细论述了这一现象的发生，并论述了由于异常高的孔隙流体压力还延缓了这一现象发生的深度。

4. 晚期缓慢压实段(＞3800m)　由于埋深和上覆负荷的进一步增加，地温极高，泥岩中的孔隙水和层间水几乎排除殆尽，因而上覆负荷主要作用在固体颗粒上，造成更紧密地压实、变形与溶蚀。石英、长石的次生增大现象在砂岩中普遍出现。

三、有关压实差异的讨论

从上述论述中，可见我国东部三水、泌阳和黄骅等三个盆地和拗(凹)陷的泥岩压实既有共性，也有差异。它们的异同是：

1. 三个盆地和拗(凹)陷都存在四个压实阶段，即早期快速压实段、早期缓慢压实段、晚期快速压实段和晚期缓慢压实段。但它们在三个盆地和拗(凹)陷出现的深度不同(如表2)。

表2 我国东部三个盆地和拗(凹)陷压实阶段的深度(m)

压实阶段(m)	三水盆地	沁阳凹陷	黄骅拗陷
早期快速压实段	0～300	0～300	0～500
早期缓慢压实段	300～1600	300～1800	500～2600
晚期快速压实段	1600～2200	1800～2300	2600～3800
晚期缓慢压实段	＞2200	＞2300	＞3800

2. 三个盆地和拗(凹)陷的泥岩粘土矿物都经历了蒙脱石向伊利石的转化，并出现蒙脱石-伊利石混合层段，但它们在各个盆地和拗(凹)陷出现的深度不同(表3)。

表3 我国东部三个盆地和拗(凹)陷泥岩粘土矿物成分及各带的深度(m)

粘土矿物	三水盆地	沁阳凹陷	黄骅拗陷
纯蒙脱石带	＜1300	＜1800	＜1000
蒙脱石－伊利石混合层带	1300～2300	1800～2500	1000～4000
伊利石带	＞2300	＞2500	＞4000

3. 三个盆地和拗(凹)陷都在不同部位(一般是深湖和半深湖区)出现异常孔隙流体压力段或混合压力段，但它们在各个盆地和拗(凹)陷出现的深度不同(表4)。

表4 我国东部三个盆地和拗(凹)陷泥岩正常和异常孔隙流体压力段的深度(m)

孔隙流体压力段	三水盆地	泌阳凹陷	黄骅拗陷
正常压力段	＜1600	＜1800	＜2600
异常压力或混合压力段	1600～2200	1800～2300	2600～3800

4. 三个盆地和拗(凹)陷都在一定深度砂岩中出现了石英、长石的次生增大现象，但它们出现的深度在各个盆地和拗(凹)陷也是不同的(如表5)。

表5 我国东部三个盆地和拗(凹)陷石英、长石次生增大现象出现的深度(m)

次生增大	三水盆地	泌阳凹陷	黄骅拗陷
石英、长石次生增大	＞1600	＞1800	＞2500

5. 三个盆地和拗(凹)陷完整的压实曲线总的形态是大致相同的，但曲线各个阶段的转折深度和曲线距纵座标的距离是不同的(图5)。

我国东部三个盆地和拗(凹)陷从上面归纳的五个方面的异同来看，当然不是偶然的，而是有着深刻的内在联系。首先由于它们都是我国中新生代的含油气盆地和拗(凹)陷，泥岩所经历压实史是最近期的压实史，因而从压实曲线上可以明显地划分出四个压实阶段，明显地看到纯蒙脱石、蒙脱石-伊利石混合层及伊利石三个带和孔隙流体压力的正常段与异常段(其中也包括混合段)及砂岩中石英、长石压溶现象的出现。应该说凡是中新生代盆地的压实都具有以上归纳的特点。

但是它们也存在着差异，如各压实阶段在各个盆地或拗(凹)陷出现的深度是不同的，曲线距纵座标的距离也是不同的，这些差异是由于所处的大地构造位置、所经历的地层沉积历史、所经受的地温史造成的，如考虑到更加细致的原因，分析如下：

首先从大地构造看，我国三水、泌阳、黄骅等中新生代盆地和拗(凹)陷大地构造处于中国东部板块，为板块内部盆地。但自印支运动以来，由于中国板块南边发生了古特提斯洋壳向欧亚板块俯冲，稍晚印度板块和中国、欧亚板块的碰撞；北边欧亚板块向南推进、挤压以及东边太平洋洋壳运动方向发生转变和西太平洋沟弧体系的形成，使得中国东部中新生代盆地经历了形成期、发育期、萎缩期和结束期四个阶段(图6)。特别是结束期正好是喜山运动，发生了喜山、青藏高原急剧升起，因而使得中国东部中新生代盆地都不同程度地发生了抬升、剥蚀。从压实类型来说，大多属于减压实类型盆地(即开头沉积发生正压实，后来抬升剥蚀出现减压实)。反映在压实曲线上(用现深度与孔隙度作的压实曲线)，有不少盆地初期压实阶段曲线都是不完整的或不够完整的，如三水、泌阳。

其次从沉积作用看，影响压实曲线因素比较多。但主要的有三点：一是控制沉积物成

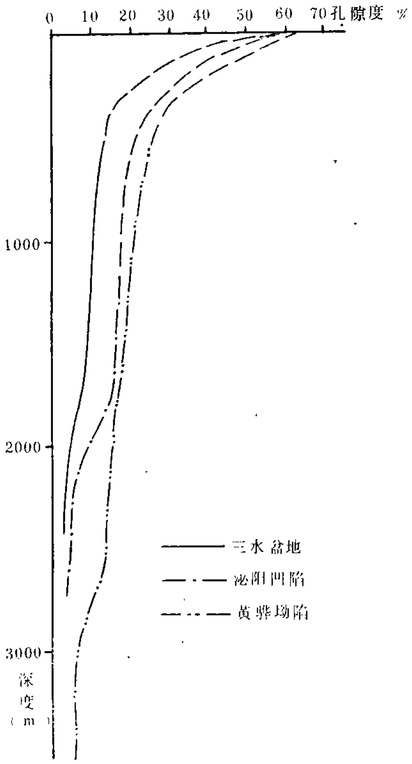

图5　我国东部三个盆地和拗(凹)陷压实曲线

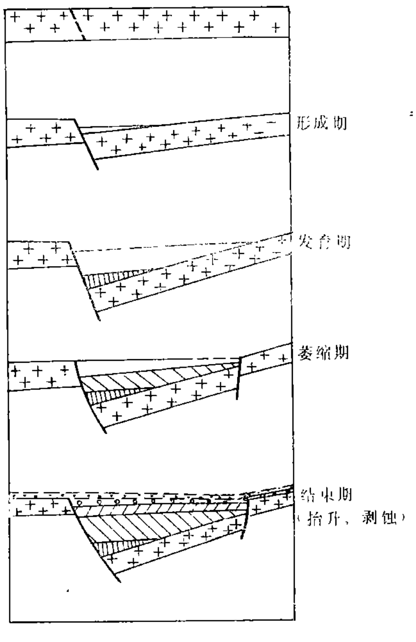

图6　单断凹陷演化形成示意图

分的母岩成分，如三水盆地由于周边地层有不少下古生界浅海碳酸盐岩，盆地沉积物中碳酸盐含量较高，反映在压实曲线上是极靠近深度座标轴，因而反映在孔隙度上是相应深度的孔隙度比别的盆地和拗(凹)陷小，如图5；二是沉积速率，凡是沉积速率大的，由于压实未平衡，因而欠压实现象严重，如黄骅拗陷沉积速率高达249m/Ma，因而晚期快速压实带约1200m，异常压力段1200m，反映在单井上是发生欠压实井数多，欠压实出现井段长；相反三水盆地沉积速率仅100m/Ma，因而晚期快速压实带仅600m，异常压力段也仅600m，出现欠压实的井数少，井段短；三是由于不同的沉积环境，压实曲线特征也不尽相同。往往深湖、半深湖相出现欠压实曲线，而滨湖、浅湖冲积平原、河流相为正常压实曲线。

最后从地温场看，三水、泌阳和黄骅盆地和拗(凹)陷是不同的，如表6。由于地温场不同，直接影响到压实结果和压实曲线的特征，如泌阳凹陷和三水盆地由于地温较高(5.0～5.7℃/100m)，因而泥岩蒙脱石粘土矿物向伊利石转化，出现深度大致分别从1300m与1800m开始，而且转化速度也较快，出现井段分别为700与1000m；而地温场较低(3.3℃/100m)的黄骅拗陷，泥岩蒙脱石粘土矿物开始向伊利石转化的深度大致在1000m左右，转化速度慢，因此蒙-伊混合层段出现的井段约3000m左右。

总之，控制泥岩压实和压实曲线的因素概括起来如图7。

表6 我国东部三个盆地和拗(凹)陷的地温梯度

地温梯度	三水盆地	泌阳凹陷	黄骅拗陷
℃/100m	5.7	5.0	3.3

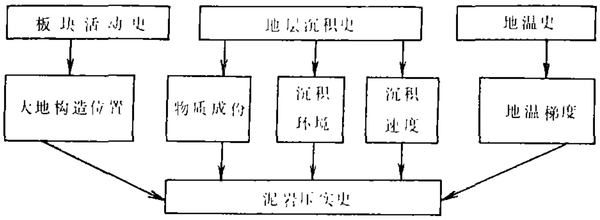

图7 泥岩压实的影响因素

结 束 语

泥岩压实及其特征的研究是一项基础研究工作，不仅有理论意义，而且对生产有实际意义。泥岩压实的第三阶段——晚期快速压实阶段就是与油气生成和运移紧密相联系的。泥岩压实从第一到第二阶段已进入缓慢压实(即不易压实)，突然出现快速压实(即较易压实)，其原因何在呢?这主要是由于泥岩在这个压实阶段中，其粘土矿物脱出层间水，其有机质大量转化成烃和排出有关。因此根据这阶段的深度和有关埋藏史资料就可以作出该区油气初次运移期图(详见陈发景主编的《压实与油气运移》)。此外泥岩压实资料也是盆地资源量计算、盆地数学模拟必不可少的基础资料。

(收稿日期:1989年3月7日)

参 考 文 献

[1]张博全等.石油实验地质,1985;7(4):284～293
[2]张博全等.地球科学,1990;15(1):37～46
[3]真柄钦次著,陈荷立译.压实与流体运移,1981
[4]Rieke Ⅲ H H,Chilingayian GV,徐怀大译.泥质沉积物的压实,1984
[5]李绍光等.石油学报,1982;(3):13～21

ON THE COMPACTION CHARATERISTICS OF MUDSTONES IN THE MESO-CENOZOIC PETROLIFEROUS BASINS OR DEPRESSIONS OF THE EAST CHINA

Zhang Boquan　Cui Wulin　Wang Xiuyun　Guan Zhenliang　Yan Gao
(China University of Geoscience)

Abstract

Based on the properties of the porosity, clay mineral and the pore fluid pressure of the mudstones, the durations for the mudstone compactions of the Meso-Cenozoic of Shanshui petroliferous Basin, and the Miyang and the Huanghua depressions can be divided into four stages respectively. In this paper, it summarizes the differences and similarities, as well as the genesis among the basin and the depressions on the basis mentioned above.