

文章编号: 1000-0550(2006)04-0461-07

# 超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型及应用<sup>①</sup>

孟元林<sup>1</sup> 黄文彪<sup>1</sup> 王粤川<sup>2</sup> 孙洪斌<sup>3</sup> 殷秀兰<sup>4</sup> 肖丽华<sup>1</sup> 高建军<sup>3</sup> 胡宝林<sup>5</sup>

(1 大庆石油学院 黑龙江大庆 163318; 2 中国海洋石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300452;

3 中国石油辽河油田分公司 辽宁盘锦 124010; 4 中国地质环境监测院 北京 100081; 5 中国石油大庆油田第五采油厂 黑龙江大庆 163513)

**摘要** 在目前的粘土矿物转化化学动力学模型中,人们仅考虑了温度、时间和流体介质的影响。然而新近的一些研究表明,超压可以抑制粘土矿物的转化,增加反应活化能。通过超压调节反应活化能,建立超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型,并根据渤海湾盆地板桥凹陷、歧北凹陷超压发育井和歧南凹陷超压不发育井的粘土矿物实测资料,确定了相关参数。模拟结果表明,在超压井中,伊蒙混层中蒙皂石层含量  $S\%$  的计算值与实测数据吻合较好,但与 Pytte 和 Reynolds(1989)模型的预测结果相差甚远,在压力系数为 1.2~1.7 的地层中,超压对  $S\%$  的抑制最大可达 15%~20%。由于在蒙皂石向伊利石转化的过程中,释放出大量  $Si^{4+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $Na^{+}$  等阳离子,所以超压对粘土矿物转化的抑制,导致了泥岩中这些阳离子生成量的减少和相邻砂岩中许多胶结作用的延迟,这非常有利于深层(埋深 >3 500 m)优质储层的发育和油气藏的形成。

**关键词** 超压 粘土矿物 优质储层 成岩作用 盆地模拟 深层 化学动力学 黄骅拗陷

**第一作者简介** 孟元林 男 1961 年出生 博士 教授 储层与石油地质

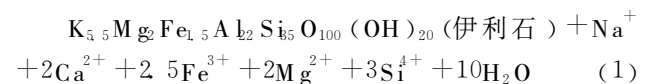
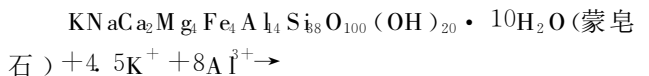
**中图分类号** TE122.2<sup>+</sup>3 **文献标识码** A

粘土矿物是沉积盆地中广泛存在的一种铝硅酸盐矿物,它对油气的生成、运移、储集、封盖和油层污染具有十分重要的意义。粘土矿物伊蒙混层(I/S)中蒙皂石层的含量( $S\%$ ),目前已成为成岩阶段划分、有机质成熟度研究、盆地模拟和成岩作用数值模拟的一项重要参数。传统的地质学认为,粘土矿物的成分和转化主要受温度、时间、介质条件以及泥岩组成的影响<sup>[1~8]</sup>,已有的粘土矿物转化的化学动力学模型也只考虑了温度、时间和流体介质对粘土矿物转化的影响,而没有考虑压力或超压的影响<sup>[2~7]</sup>。但是新近的一些研究表明,压力或超压对粘土矿物的转化和矿物组成具有明显的控制作用<sup>[9~18]</sup>。我国许多中、新生代沉积盆地发育超压<sup>[12]</sup>,所以在应用粘土矿物资料进行烃源岩评价、成岩阶段划分和成岩作用数值模拟时,必须考虑超压对粘土矿物演化的影响。本文试图建立超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型,并以渤海湾盆地黄骅拗陷中区为例,说明这一模型的应用。

## 1 粘土矿物转化的化学动力学模型及存在的问题

研究表明<sup>[17]</sup>,沉积盆地内粘土矿物的组成和变

化主要受沉积物源、沉积环境和成岩作用三大因素的控制,而在我国最常见的淡水或微咸水盆地(地层)中,成岩作用是影响泥岩粘土矿物纵向变化的主要因素,对于具体的含油气盆地而言,蒙皂石转化为伊利石的过程主要受温度、时间和介质条件的影响。在成岩压实过程中,随埋深和地温的增加,粘土矿物中的蒙皂石不断析出层间水,从介质中吸收  $K^{+}$  和  $Al^{3+}$ ,经 I/S 混层转化为伊利石,从而使得蒙皂石层在 I/S 混层中所占的比例  $S\%$  越来越小。近年来对蒙皂石向伊利石转化的机理已有大量的研究<sup>[17, 18]</sup>,提出了许多反应机制。但无论用何种理论解释蒙皂石向伊利石转化的反应,其最常见的反应方程式可表示如下<sup>[17, 19]</sup>:



其动态过程可用化学动力学方程描述<sup>[2~8]</sup>,比较常用的是 Pytte 和 Reynolds 于 1989 年提出的蒙皂石向伊利石转化的化学动力学模型,其通式如下<sup>[3]</sup>:

$$-dS/dt = k \cdot S^a (K^{+}/Na^{+})^b \quad (2)$$

$$K^{+}/Na^{+} = 74.2 \exp(-2490/T) \quad (3)$$

① 国家“十五”重大科技攻关项目(2003BA613A-01)和国家自然科学基金项目(批准号:4037102)共同资助。

收稿日期:2005-11-10; 收修改稿日期:2006-12-13

$$k = A \cdot \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] \quad (4)$$

式中  $S$  为 I/S 混层中蒙皂石层的含量 (%) ;  $t$  为时间 (秒) ;  $T$  为温度 (K) ;  $A$  为频率因子 (cal/mol) ;  $E_a$  为活化能 (kcal/mol) ;  $R$  为气体常数 (1.987 cal/K · mol) ;  $k$  为反应速率 ;  $a$ 、 $b$  为常数,  $a=5$ ,  $b=1$ 。

由上可见,目前的化学动力学模型没有考虑压力或超压的影响。然而,国内外的一些研究表明,压力和超压对粘土矿物的转化具有明显的抑制作用<sup>[9~18]</sup>,例如:Perry和Hower曾比较了美国墨西哥湾不同地温梯度的两口井中蒙皂石向伊利石转化的温度-深度关系,发现两口井泥岩中蒙皂石向伊利石转化的程度相同,低地温梯度的B井与高地温梯度的A井相比,不仅埋深远大于A井,而且地层温度也高于A井。这就意味着压力对蒙皂石向伊利石转化具有抑制作用<sup>[15]</sup>。Colten-Bradley发现,粘土矿物脱水温度随流体压力和层间水密度增大而升高<sup>[14]</sup>。也就是说,压力对粘土矿物脱水的影响需要较高温度来补偿。由于超压盆地内,在埋深相同的情况下,其地层压力高于正常静水压力,所以在超压地层中,粘土矿物转化速率较慢,转化受到超压的抑制。我们的成岩物理模拟试验也支持上述观点<sup>[9]</sup>,在280~430°C的模拟温度范围内,相同温度点55MPa压力条件下粘土矿物的转化程度明显低于25MPa。

超压对蒙皂石转化的抑制可用Le Chatlier定律解释。当蒙皂石脱出高密度的层间水(密度约为1.16~1.46 g/cm<sup>3</sup>),进入岩石孔隙时,将发生膨胀,并导致流体压力增加<sup>[20]</sup>;另一方面,蒙皂石格架的破坏、Si<sup>4+</sup>的释放、硅质胶结物的沉淀、伊利石的重排,可以导致泥岩渗透率降低,阻止流体的排放,促使超压发育<sup>[21]</sup>。根据Le Chatlier定律,流体压力增加的结果,将阻止蒙皂石的进一步脱水,抑制蒙皂石的转化<sup>[9, 10, 14]</sup>。此外,由式(1)可见,蒙皂石向伊利石转化时,需要从介质中吸取K<sup>+</sup>、Al<sup>3+</sup>等金属阳离子,而K<sup>+</sup>、Al<sup>3+</sup>主要来源于有机酸对铝硅酸盐矿物、碳酸盐矿物和植物碎屑的溶解以及压溶作用<sup>[17]</sup>,但超压对有机酸的生成、机械压实和压溶具有抑制作用<sup>[9]</sup>,这样必将导致环境介质中K<sup>+</sup>、Al<sup>3+</sup>等金属阳离子浓度的减小,不利于超压背景下粘土矿物的转化。

## 2 超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型

Carroll(1999)认为超压可以改变化学反应的频率

因子<sup>[10]</sup>,从而导致反应速率降低,但这有悖于化学动力学的基本原理。业已证明,超压影响粘土矿物转化和其他成岩反应的主要原因是增加了反应的活化能<sup>[9, 12, 16, 22, 23]</sup>。据此,本文在传统化学动力学模型的基础上,建立了超压背景下蒙皂石向伊利石转化的化学动力学模型:

$$-dS/dt = k \cdot S^a (K^+ / Na^+)^b \quad (5)$$

$$K^+ / Na^+ = 74.2 \exp(-2490/T) \quad (6)$$

$$k = A \cdot \exp\left[-\frac{E_a + E_{pa}}{RT}\right] \quad (7)$$

$$E_{pa} = R \cdot \ln(1 + \lambda \cdot P_a) \quad (8)$$

式中 $\lambda$ 为超压校正系数, $\lambda \geq 0$ ;  $P_a$ 为超压(MPa),实测地层压力与静水压力之差;  $E_{pa}$ 为超压所增加的活化能(kcal/mol)。其他参数同上。

由式(5)~(8)可见,在正常压实条件下,地层压力属于静水压力系统, $P_a=0$ ,此时, $E_{pa}=0$ ,我们的模型与Pytte和Reynolds(1989)的模型完全相同。在超压背景下,即 $P_a > 0$ 时, $E_{pa} > 0$ ,粘土矿物转化所需的活化能增加,反应速率 $k$ 降低,蒙皂石向伊利石转化的速度变慢,由此实现了超压对粘土矿物转化的抑制。

## 3 应用实例

### 3.1 地质背景

黄骅坳陷位于渤海湾盆地中北部,从南到北分为南区、中区和北区三个探区,中区包括板桥凹陷、歧北凹陷和歧南凹陷三个次级构造单元(图1)。新生界从下到上依次发育古近系沙河街组(Es)、东营组(Ed),新近系馆陶组(Ng)、明化镇组(Nm)和第四系(Q)。歧北凹陷的物源主要来自北部的燕山褶皱带,古近纪期间快速堆积了5000~7000m厚的湖相砂、泥岩沉积。在东营组和沙河街组2800m以下的地层中发育超压,压力系数在1.0~1.6之间(图2)。目前已发现的深层油气藏(埋深>3500m),如马东、马西和马棚口油气田,主要分布在超压地层中。板桥凹陷的主要物源为西部的沧县隆起,大部分地区超压发育,压力系数最高可达1.7(图2)。而歧南凹陷的物源主要来自东南的埕宁隆起,沉积速率相对较慢,基本不发育超压,压力系数<1.2。

### 3.2 粘土矿物转化特征

渤海湾盆地黄骅坳陷歧南凹陷属于正常压力系统,粘土矿物的转化具连续性,I/S混层中蒙皂石含量 $S\%$ 随深度单调减小(图3A);歧北凹陷和板桥凹

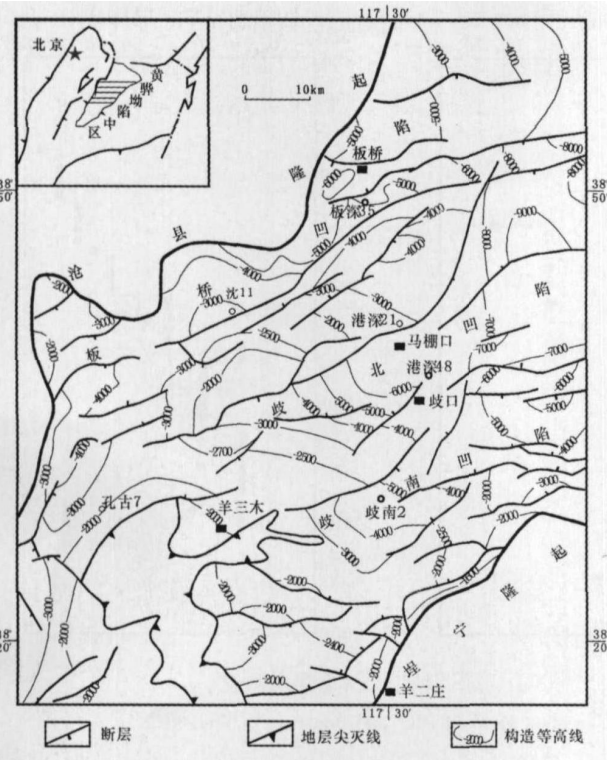


图 1 黄骅坳陷中区构造略图

Fig 1 Sketch tectonics of the Mid-Huanghua Depression

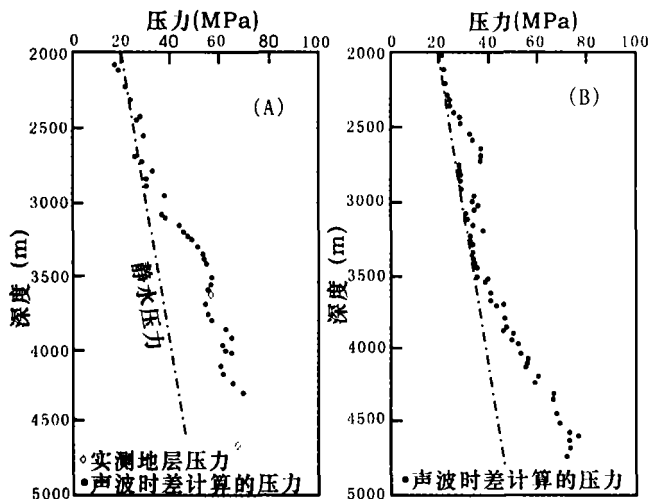


图 2 港深 48 井 (A) 和板深 35 井 (B) 地层压力剖面图

Fig 2 Formation pressure profiles for Gangshen 48 Well (A) and Banshen 35 Well (B)

陷超压发育, I/S 混层中蒙皂石的含量  $S_0\%$  随深度的变化不连续, 呈阶梯状跳跃 (图 3B、C), 这可能是超压动态积累和释放的结果。Burst 和 Perry 在美国海湾地区的研究表明<sup>[15, 24]</sup>, 蒙皂石向伊利石的转化存在两个高峰期。应凤祥根据我国具体的地质情况, 将 I/S 混层转化带分为蒙皂石带 (S)、渐变带 (G)、第一

迅速转化带 (I)、第二迅速转化带 (II) 和第三转化带 (III) (图 3)<sup>[8]</sup>。第一迅速转化带和第二迅速转化带分别对应于中成岩阶段  $A_1$  亚期和  $A_2$  亚期。在正常压力地层中, 温度是蒙皂石转化的主控因素, 即使在每个迅速转化带内, 蒙皂石的转化也是连续的。然而, 在超压地层中, 除了温度影响蒙皂石转化外, 超压也控制着蒙皂石向伊利石的转化。超压增加了蒙皂石层间水的稳定性, 提高了蒙皂石向伊利石转化的反应活化能。在地层超压发育期间, 蒙皂石的转化速率减慢, 甚至停顿; 超压释放后, 孔隙流体压力降低, 蒙皂石继续转化。Du Rouchet 的研究表明<sup>[26]</sup>, 当超压体系中的孔隙压力达到上覆地层压力的 70%~90% 时, 超压地层开始产生裂缝。随着裂缝的产生, 烃类和其他孔隙流体排出, 孔隙流体压力逐渐下降, 当孔隙流体压力下降到上覆地层静水压力的 60% 时, 裂缝合拢, 形成新的封闭系统。超压如此往复的形成、释放, 导致了蒙皂石呈间歇式向伊利石转化。于是, 在超压地层中, 无论是在蒙皂石向伊利石转化的渐变带, 还是在迅速转化带, 伊蒙混层中蒙皂石层的含量均随深度呈阶梯式变化 (图 3B、C)。

### 3.3 模拟过程及参数的选取

为了研究超压对粘土矿物转化的影响、验证超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型, 本文在超压发育的板桥凹陷、歧北凹陷和超压不发育的歧南凹陷, 分别选取了板深 35 井、港深 48 井和歧南 2 井进行了试算, 计算过程如下:

第一步: 根据未受超压抑制的歧南 2 井的镜质组反射率  $R_0$  实测数据, 用  $E_{asy} \% R_0$  模型, 反演其古大地热流<sup>[23, 27]</sup>。然后根据大地热流的折射原理<sup>[28, 29]</sup>, 由歧南 2 井的古大地热流导出港深 48 井和板深 35 井的大地热流, 并以此恢复这两口井的古地温。

第二步: 应用 Pytte 和 Reynolds 的化学动力学模型<sup>[3]</sup>, 模拟这两口井粘土矿物的转化过程, 图 4 为现今这两口井 I/S 混层中蒙皂石层含量  $S_0\%$  的实测值和模拟值。由图 4 可见, 港深 48 井  $S_0\%$  实测值与用 Pytte 和 Reynolds (1989) 化学动力学模型计算的差值  $\Delta S_0\%$  可达 15%, 板深 35 井最大差值  $\Delta S_0\%$  几乎达到 20%, 这是由于超压抑制引起的, 亦可称为超压对粘土矿物转化的贡献值。

第三步: 应用式 (5)~(8) 进行超压校正。由计算机按一定步长  $\Delta\lambda$ , 修正超压校正系数, 即  $\lambda = \lambda \pm \Delta\lambda$ , 反复计算, 直到计算结果达到规定的精度。试算

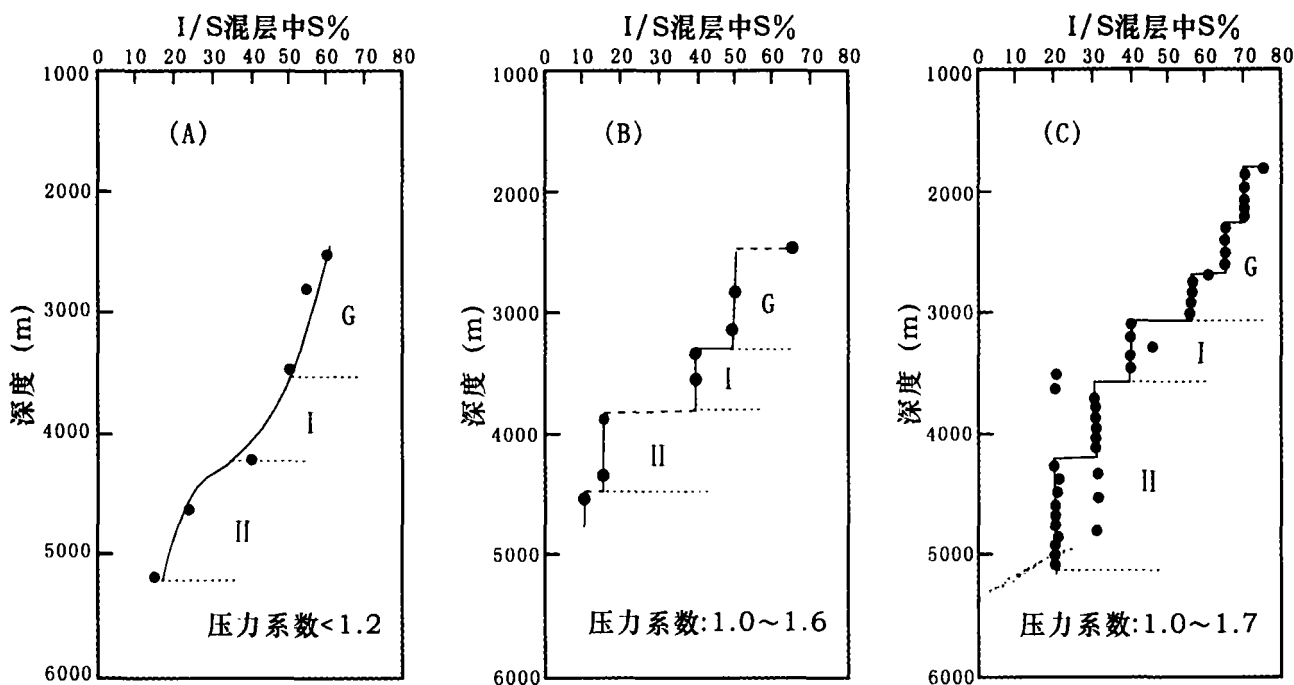


图 3 歧南 2 井 (A)、港深 48 井 (B) 和板深 35 井 (C)<sup>[25]</sup> I/S 混层中 S% 含量实测值

Fig 3 The measured S% in I/S for Qinan 2 Well (A), Gangshen 48 Well (B) and Banshen 35 Well (C)<sup>[25]</sup>

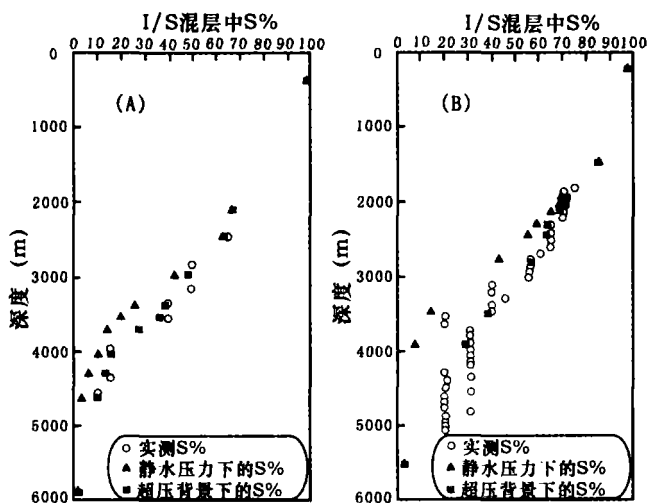


图 4 港深 48 井 (A) 和板深 35 井 (B) 深度—S% 关系图

Fig 4 The measured and modeled S% in I/S profiles for Gangshen 48 Well (A) and Banshen 35 Well (B)

结果表明,当  $\lambda=0.75$  时,用新建立的化学动力学模型所模拟的结果与实测数据吻合较好(图 4)。由图可见,港深 48 井 2 800 m 以下实测的蒙皂石向伊利石转化速率比静水压力条件下慢,这是超压抑制的结果。板深 35 井在 2 000 m 以下蒙皂石向伊利石的转化开始受到超压抑制,但在 2 000 ~ 3 500 m 超压较小(图 2B),超压的抑制作用较弱(图 4B),3 500 m 以下超压值较高,超压抑制比较明显(图 4B)。

经超压校正之后,即可恢复研究区各超压井的粘土矿物转化史。图 5 展示了港深 48 井不同压力条件下的粘土矿物演化史。由图 5 可见,当地层中发育超压时,在东营组沉积早期,沙三段底部的 I/S 混层中蒙皂石层含量小于 70%,进入无序混层带;在东营组沉积晚期,进入部分有序混层带 ( $S\% < 50\%$ );在馆陶组沉积中期,达到有序混层带 ( $S\% < 35\%$ );直到明化镇组沉积初期,沙三段才进入超点阵有序混层带 ( $S\% < 15\%$ )。若港深 48 井没有超压,则沙三段在沙二段沉积早期便进入无序混层带(图 5B),在沙一段沉积中期即进入部分有序混层带,而在东营组沉积中期就进入了有序混层带,在馆陶组沉积早期就进入了超点阵有序混层带。由于超压的存在,使得沙三段粘土矿物转化过程被大大推迟。其他层位亦然,恕不赘述。

由式(1)可知,在蒙皂石向伊利石转化的过程中,释放出  $Si^{4+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $Ca^{2+}$  和  $Na^+$ 。这将触发砂岩中一系列成岩作用的发生,  $Si^{4+}$  可促使浅处砂岩中石英自生加大和高岭石的形成;  $Ca^{2+}$  可形成早期方解石胶结物;在温度更高的情况下,蒙皂石向伊利石的转化所放出的  $Fe^{3+}$  和  $Mg^{2+}$  可使之形成铁方解石和绿泥石;更多的  $Na^+$  为钠长石化和长石加大提供了物质来源<sup>[9, 17, 30]</sup>。正是这一系列胶结物的形成,使得深层砂岩的孔隙度不断减小,直至失去储集性能。

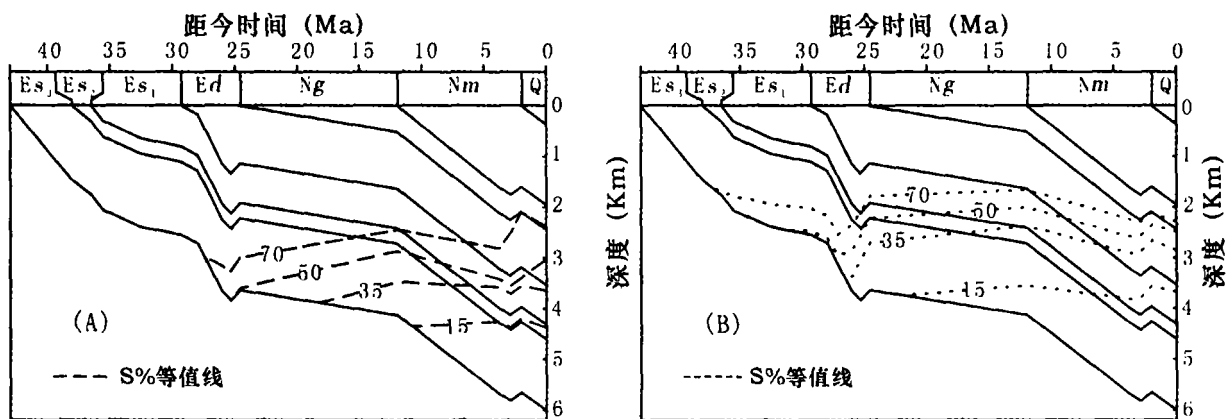


图 5 港深 48 井超压背景下粘土矿物演化史 (A) 和假想静水压力下粘土矿物演化史 (B)

Fig 5 The evolution history of clay minerals for Gangshen 48 Well in overpressure setting (A) and that in hypothetical normal pressure setting (B)

然而,由于超压的存在,可使粘土矿物的转化被推迟,一系列不利于孔隙发育的胶结作用都被相应延缓,例如:港深 48 井沙一段 ( $E_{s1}$ ) 现今的埋深为 3 527 ~ 4 297 m,歧南 2 井为 3 019 ~ 3 731 m,前者的埋深大于后者,但超压发育的港深 48 井沙一段的胶结作用比超压不发育的歧南 2 井还弱。歧南 2 井沙一段的胶结物含量在 7.0% ~ 21.0% 之间,平均为 13.1%,而港深 48 井沙一段的胶结物含量在 1.0% ~ 26.0% 之间,平均为 9.2%。由此可见,超压对粘土矿物转化的抑制,有利于深层胶结作用的减缓和储层孔隙的保存。这也是黄骅拗陷深层超压地层中,能够发育优质储层和形成油气藏的主要原因之一。

这里需要补充说明的是,超压与深层的成岩作用和储层物性密切相关。超压除了抑制粘土矿物转化和胶结作用之外,还可以减缓机械压实作用、抑制有机酸的生成和储层的溶解作用。在超压地层中,孔隙流体承担了部分上覆地层压力,从而减缓了机械压实作用<sup>[31]</sup>,1MPa 的超压相当于有效埋深减少了 41.82 m<sup>[9, 32]</sup>。已有的研究表明,超压在抑制有机质热演化的同时,也抑制了有机酸的生成和溶解作用<sup>[33]</sup>。成岩物理模拟实验也支持了这一观点,泥岩有机酸的生成量,在温度相同的条件下随压力的增加而减小<sup>[9]</sup>;而且超压的释放有利于泥岩中已生成有机酸向相邻储层的运移,促进次生孔隙的形成<sup>[34]</sup>。所以,超压对有机酸生成的抑制必将导致储层溶解作用的延迟,使次生孔隙带发育在更深的地层中。此外,超压囊内砂体中超压的释放,还有利于溶解物质的排出和储层物性的改善<sup>[35]</sup>。所以,黄骅拗陷,乃至中国其他盆地的深层油气勘探,应集中于超压地层中。

## 4 结论

黄骅拗陷中区古近系泥岩中蒙皂石向伊利石的转化受到超压的抑制。由于超压对粘土矿物转化的抑制,延迟了储层中一系列胶结作用的发生,有利于在深层发育优质储层,形成深层油气藏,所以深层油气藏勘探应集中在超压地层中。本文在黄骅拗陷所建立的适合于超压背景下的化学动力学模型可推广到其他超压盆地,当然,其合理性需要更多的实例加以证明。

## 参考文献 (References)

- 1 Buhmann C. Smectite-to-illite conversion in a geothermally and lithologically complex Permian sedimentary sequence. *Clays and Clay Minerals* 1992, 40(1): 53~64
- 2 孟元林,肖丽华,王建国,等. 粘土矿物转化的化学动力学模型与应用. *沉积学报*, 1996, 14(2): 110~116 [Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Wang Jianguo, et al. Kinetic model of clay mineral transformation and its application. *Acta Sedimentologica Sinica* 1996, 14(2): 110~116]
- 3 Pytte A M, Reynolds R C. The thermal transformation of smectite to illite. In: *Thermal History of Sedimentary Basins*. New York: Springer-Verlag 1989. 133~140
- 4 Huang W L, Longo J M, Pever D R. An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. *Clays and Clay Minerals* 1993, 41(2): 162~177
- 5 郭秋麟,米石云,石广仁,等. 盆地模拟原理方法. 北京:石油工业出版社, 1998. 87~88 [Guo Qiulin, Mi Shiyun, Shi Guangren, et al. *The Theories and Techniques of Basin Modeling*. Beijing: Petroleum Industry Press 1998. 87~88]
- 6 Elliot W C, Aronson I L, Matisoff G, et al. Kinetics of the smectite to illite transformation in Denver Basin: Clay mineral K-Ar data and mathematical model result. *AAPG Bulletin* 1991, 75(1): 436~462

- 7 Meng Y L, Yang J S, Xiao L H, et al. Diagenetic evolution modeling system and its application. In: Hao Dongheng, ed. Treatises of XIII Kerulien International Conference of Geology. Shijiazhuang: Shijiazhuang University of Economics, 2001. 25~27
- 8 应凤祥, 罗平, 何东博, 等. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟. 北京: 石油工业出版社, 2004. 61~76 [Ying Fengxiang, Luo Ping, He Dongbo, et al. Diagenesis and Numerical Modeling in Chinese Petroliferous Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004. 61~76]
- 9 孟元林. 歧北凹陷沙河街组超压背景下的成岩作用研究与数值模拟 [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2004. 33~42 [Meng Yuanlin. Study on diagenesis and numerical modeling of the Shahejie Formation in overpressure setting in the Qibei Depression [Ph D dissertation]. Beijing: China University of Geosciences, 2004. 33~42]
- 10 Carr A D. A vitrinite reflectance kinetic model incorporating overpressure retardation. *Marine and Petroleum Geology*, 1999, 16: 355~377
- 11 李军, 张林, 曹中, 等. 大港探区深层异常孔隙成因机理. 勘探家, 1999, 12: 20~24 [Li Jun, Zhang Lin, Cao Zhong, et al. Formation mechanism for deep abnormal pores of Dagang exploration area. *Petroleum Explorationist*, 1999, 4(4): 20~24]
- 12 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理. 北京: 科学出版社, 2005. 14~15 [Hao Fang. Kinetics of Hydrocarbon Generation and Mechanisms of Petroleum Accumulation in Overpressure Basins. Beijing: Science Press, 2005. 14~15]
- 13 Hao F, Li S T, Sun Y C, et al. Overpressure retardation of organic matter maturation and hydrocarbon generation: a case study from the Yinghehai and Qiongdongnan basins offshore South China Sea. *AAPG Bulletin*, 1995, 79: 551~562
- 14 Colten Bradley V A. Role of pressure in smectite dehydration-effects on geopressure and smectite-to-illite transformation. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(11): 1414~1427
- 15 Perry E A, Hower J. Burial diagenesis in Gulf coast pelitic sediments. *Clays and Clay Minerals*, 1970, 28: 165~177
- 16 李会军, 吴泰然, 郝银全, 等. 异常压力对有机质的抑制作用及其石油地质意义. 沉积学报, 2004, 22(4): 737~741 [Li Huijun, Wu Tairan, Hao Yinquan, et al. Overpressure retardation of organic matter and its significance for petroleum geology. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 737~741]
- 17 徐同台, 王行信, 张有瑜, 等. 中国含油气盆地粘土矿物. 北京: 石油工业出版社, 2003. 37~84 [Xu Tongtai, Wang Xingxin, Zhang Youyu, et al. Clay Minerals in Chinese Petroliferous Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003. 37~84]
- 18 周张健. 蒙皂石伊利石化的控制因素、转化机制及其转化模型的研究综述. 地质科技情报, 1994, 13(4): 41~46 [Zhou Zhangjian. Summary of the study for illitization of the smectite on its controlling factors, transformation mechanism and models. *Geological Science and Technology Information*, 1994, 13(4): 41~46]
- 19 Hower J. Shale diagenesis. In: Longstaffe F T, ed. *Clays and Resource Geologist Short Course Handbook*, Mineralogical Association of Canada, 1981. 60~77
- 20 Powers M C. Fluid release mechanisms in compacting marine mudrocks and their importance in oil exploration. *AAPG Bulletin*, 1967, 51(7): 1240~1254
- 21 Nordgård Bolås H M, Hemannud C, Teige G M G. Origin of overpressure in shales: Constraints from basin modeling. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(2): 193~211
- 22 姜峰, 杜建国, 王万春, 等. 高温高压模拟实验研究. 沉积学报, 1998, 16(3): 153~155 [Jiang Feng, Du Jianguo, Wang Wanchun, et al. The study on high pressure-high temperature aqueous pyrolysis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 153~155]
- 23 肖丽华, 孟元林, 张连雪, 等. 超压地层中镜质组反射率的计算. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 14~17 [Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Zhang Lianxue, et al. Vitrinite reflectance modeling in the overpressured formations. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(1): 14~17]
- 24 Burst J R. Diagenesis of Gulf Coast clayey sediments and its possible relation to petroleum migration. *AAPG Bulletin*, 1969, 53(1): 73~93
- 25 Li Huijun, Wu Tairan, Ma Zongjin, et al. Pressure retardation of organic maturation in clastic reservoirs: a case study from the Banqiao Sag, Eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 24(12): 20~23
- 26 Du Rouchet J. Stress fields: a key to oil migration. *AAPG Bulletin*, 1981, 65(1): 74~85
- 27 Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(10): 1559~1570
- 28 Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Zhang Jing. Basin modeling by gravity-magnetics and electrical information and its application. In: Li S T and Liu B T, eds. *Basin Analysis: Global Sedimentary Geology and Sedimentology*. The Netherlands: VSP, 1997. 97~207
- 29 张菊明, 熊亮萍. 有限单元法在地热研究中的应用. 北京: 科学出版社, 1986. 15~22 [Zhang Juming, Xiong Liangping. The Applications of Finite Element in Geothermal Researches. Beijing: Science Press, 1986. 15~22]
- 30 郑浚茂, 庞明. 碎屑储集层的成岩作用研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989. 53~85 [Zheng Junmao, Pang Ming. The Diagenesis Researches of the Clastic Reservoir Rocks. Wuhan: China Geological University Publishing House, 1989. 53~85]
- 31 Gulyas J and Cade C A. Prediction of porosity in compacted sands. In: Kupecz J A, Gulyas J G and Bloch S, eds. *Reservoir Quality Prediction in Sandstones and Carbonates*. AAPG Memoir 1997, 69: 19~27
- 32 孟元林, 刘德来, 贺如, 等. 歧北凹陷超压背景下的成岩场分析与储层孔隙度预测. 沉积学报, 2005, 23(3): 389~396 [Meng Yuanlin, Liu Delai, He Ru, et al. Diagenetic field analysis and porosity prediction of the Shahejie Formation (E<sub>3</sub>) in overpressure setting in the Qibei depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3): 389~396]
- 33 肖丽华, 孟元林, 牛嘉玉, 等. 歧口凹陷沙河街组成岩史分析和成岩阶段预测. 地质科学, 2005, 40(3): 346~362 [Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Niu Jiayu, et al. Diagenetic history and diagenetic stages prediction of Shahejie Formation in the Qikou sag. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(3): 346~362]
- 34 Barth T, Bjørlykke K. Organic acids from source rock maturation: generation potentials, transport mechanisms and relevance for mineral dia-

genesis Applied Geochemistry, 1993, 8: 325~337  
 35 Wilkinson M, Darby D, Haszeldine R S et al Secondary porosity generation during deep burial associated with overpressure leak-off Fluid

mar Formation United Kingdom Central graben AAPG Bulletin, 1997, 8(5): 803~813

## A Kinetic Model of Clay Mineral Transformation in Overpressure Setting and Its Applications

MENG Yuan-lin<sup>1</sup> HUANG Wen-biao<sup>1</sup> WANG Yue-chuan<sup>2</sup> SUN Hong-bin<sup>3</sup>  
 YIN Xiu-lan<sup>4</sup> XIAO Li-hua<sup>1</sup> GAO Jian-jun<sup>3</sup> HU Bao-lin<sup>5</sup>

(1. Daqing Petroleum Institute Daqing, Heilongjiang 163318; 2. Tianjin Branch of China Offshore Oil Corporation, Tianjin 300452;

3. Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010; 4. China Institute of Geoenvironmental Monitoring, Beijing 100081;

5. Daqing Oilfield Company Ltd., PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163513)

**Abstract** The models are currently applied to model the smectite-to-illite transformation in petroleum basins using time, temperature and the composition of fluids as controlling parameters. However, small number recent studies have indicated that overpressure will retard the clay mineral transformations and enhance the activity energy of kinetic reactions. Using the data collected from both the overpressured wells and the normally pressured wells, a new kinetic model incorporating overpressure was developed, in which overpressure modifies activity energy. The model was tested in the Banqiao Sag, the Qibei Sag and the Qinan Sag of the Bohaiwan basin, China. As the results show that the computed smectite contents  $S\%$  in I/S mixed-layer are coincident with the measured data, but significantly different from that predicted by Pytter and Reynolds's model (1989), and the smectite contents  $S\%$  in I/S mixed layer are retarded by 15%~20% in the overpressure formations with the pressure coefficient of 1.2~1.7. Because lots of such cations as  $Si^{4+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  and  $Na^{+}$  are yielded in the smectite-to-illite conversion, the retardations of mineral transformations lead to the decrease of the action productions in the mudstones and the postpone of the cementations in the adjacent sandstones, which is propitious to develop high-quality reservoirs and to form hydrocarbon pools in the deep overpressured basin.

**Key words** overpressure, clay mineral, high-quality reservoir, diagenesis, basin modeling, deep horizon, kinetics, Huanghua depression