

文章编号: 1000-0550(2012)03-0469-08

# 莺歌海盆地黏土矿物异常转化及其地质意义<sup>①</sup>

孟凡晋<sup>1,2</sup> 肖丽华<sup>1</sup> 谢玉洪<sup>3</sup> 王振峰<sup>3</sup> 刘景环<sup>3</sup> 童传新<sup>4</sup> 张伙兰<sup>3</sup>  
高煜婷<sup>1</sup> 孟元林<sup>1</sup> 魏巍<sup>1</sup> 赵晓庆<sup>5</sup>

(1. 东北石油大学 黑龙江大庆 163318; 2. University of Houston, Houston, TX 77204 - 2024;

3. 中国海洋石油总公司西部分公司 广东湛江 524000; 4. 中国地质大学 武汉 430074; 5. 中国石油大学(北京) 北京 102249)

**摘要** 莺歌海盆地因其异常高压和高温热流体强烈活动而孕育了多种特殊地质现象。应用分析化验资料与热力学计算相结合的方法,研究了莺歌海盆地黏土矿物转化的特征,分析了其成因。结果表明,莺歌海盆地发育三种黏土矿物转化类型:正常演化型、快速演化型和缓慢演化型。其中超压抑制黏土矿物转化,形成黏土矿物缓慢演化型;高温热流体活动促进黏土矿物转化,形成黏土矿物快速演化型。超压对黏土矿物转化的抑制作用延缓了H<sup>+</sup>、阳离子和层间水的排出,减弱了胶结作用和溶蚀作用,有利于在深部形成优质储层。热流体的活动加速了黏土矿物转化,增强了储层的胶结作用,不利于深部优质储层的发育。

**关键词** 黏土矿物异常转化 超压 热流体 次生孔隙 成岩作用

**第一作者简介** 孟凡晋 女 1989年出生 硕士 储层与石油地质 E-mail: fanjinm@gmail.com

**中图分类号** TE122 **文献标识码** A

黏土矿物是陆相含油气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、封盖具有十分重要的意义<sup>[1-15]</sup>。研究表明<sup>[16]</sup>,沉积盆地内黏土矿物的组成和变化主要受物源、沉积环境和成岩作用三大因素的控制,而在我国大多数含油气沉积盆地中,成岩作用是影响泥岩黏土矿物纵向变化的主要因素。对于具体的沉积盆地而言,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,黏土矿物中的蒙皂石不断析出层间水,从介质中吸收K<sup>+</sup>等阳离子,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。根据S%的大小,应凤祥将黏土矿物的转化在纵向上划分为五个转化带,即蒙皂石带(S% > 70%)、渐变带(50% < S% < 70%)、第一迅速转化带(35% < S% < 50%)、第二迅速转化带(15% < S% < 35%)和第三转化带(S% < 15%)<sup>[17]</sup>,也有人将后四者分别称为R0、R1、R2和R3带<sup>[18]</sup>。但莺歌海盆地是一个新生代盆地,异常高压发育,热流体活动剧烈<sup>[19]</sup>,黏土矿物转化规律异常复杂,不服从上述规律。本文试图在搜集莺歌海盆地已有黏土矿物转化测试资料的基础上,完成一些新的测试,研究其纵向上的演化规律,探讨其成因

及其石油地质意义,为该盆地的油气资源评价、成岩作用研究和储层质量预测提供科学的依据。

## 1 区域地质概况

莺歌海盆地是南海北部大陆架发育的一个新生代沉积盆地,面积约11 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。新生界自下而上依次发育始新统、渐新统的崖城组和陵水组,中新统的三亚组、梅山组和黄流组,上新统的莺歌海组以及第四系乐东组,总厚度达17 km<sup>[19,20]</sup>。莺歌海盆地崖城组为陆相沉积,从陵水组开始发育海相沉积。从盆地边部到中心,依次发育海岸平原、(扇)三角洲、滨海相、浅海相、半深海相,在盆地中央还发育盆底扇、滑塌体带等。根据构造变形特征,将莺歌海盆地划分为莺东斜坡、莺西斜坡、中央坳陷三个一级构造单元(图1)<sup>[21]</sup>。中央坳陷包括临高凸起、底辟构造带两个正向构造单元。由于盆地基底快速沉降和细粒沉积物快速充填,莺歌海盆地普遍发育超压<sup>[20,22]</sup>。莺歌海盆地超压体系主要分布于盆地的中央坳陷。在中新世莺歌海组沉积时期,中央坳陷三亚组和梅山组的半深海相泥质沉积物沿断裂上冲,刺穿上覆地层,形成底辟构造,伴随着底辟的发育,深部富含CO<sub>2</sub>的高温热流体沿断层进入浅部地层,加速了有机质的热

①国家自然科学基金项目(批准号:40872076)、国家“十一五”科技攻关项目(编号:2008ZX-05023-004)和黑龙江研究生创新科研基金(批准号:YJSCX2011-418HLJ)联合资助。

收稿日期:2011-07-02; 收修稿日期:2011-08-17

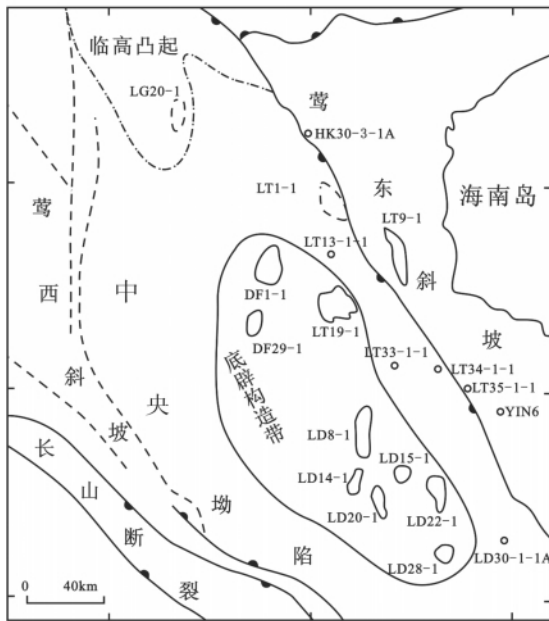


图1 莺歌海盆地构造单元<sup>[11]</sup>

Fig.1 Structural units of Yinggehai Basin<sup>[11]</sup>

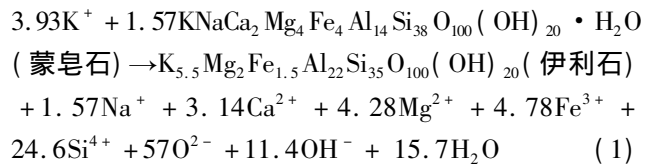
演化。东方区和乐东区分别位于底辟构造带的北部和南部(图1),具有高温、超压的特征,二者的DST实测地温梯度平均值分别为44.2℃/km、40.6℃/km,实测压力系数分别为1.95、1.80。中央坳陷东南部的LD30-1-1A井区及其周围地区,在底辟构造带

之外,没有热流体活动,但由于发育巨厚的欠压实泥岩,泥岩孔隙度高,热导率低,超压发育,地温梯度很高,LD30-1-1A井实测地温梯度为43.3℃/km,DST实测压力系数最高可达2.4,这一地区一般称为东南区。莺东斜坡区位于盆地的东部,既不发育超压,也没有热流体的活动,具有正常的温度和压力环境。而临高凸起区也没有热流体活动,仅在3673m以下的泥岩中出现弱超压,压力系数平均为1.38。

## 2 黏土矿物转化的三种模式、成因及其地质意义

### 2.1 正常演化型

莺歌海盆地的莺东斜坡区具有正常的温、压特征。临高凸起带只有在3500m以深才发育超压,因此在3500m以浅,黏土矿物转化属于正常演化型(图2)。随埋深的增加,蒙皂石经I/S混层,转化为伊利石,I/S混层中的S%逐渐减小,伊利石含量增加,这一过程可用下式表示<sup>[2]</sup>:



此外,随埋深和地温的增加,黏土矿物中的高岭

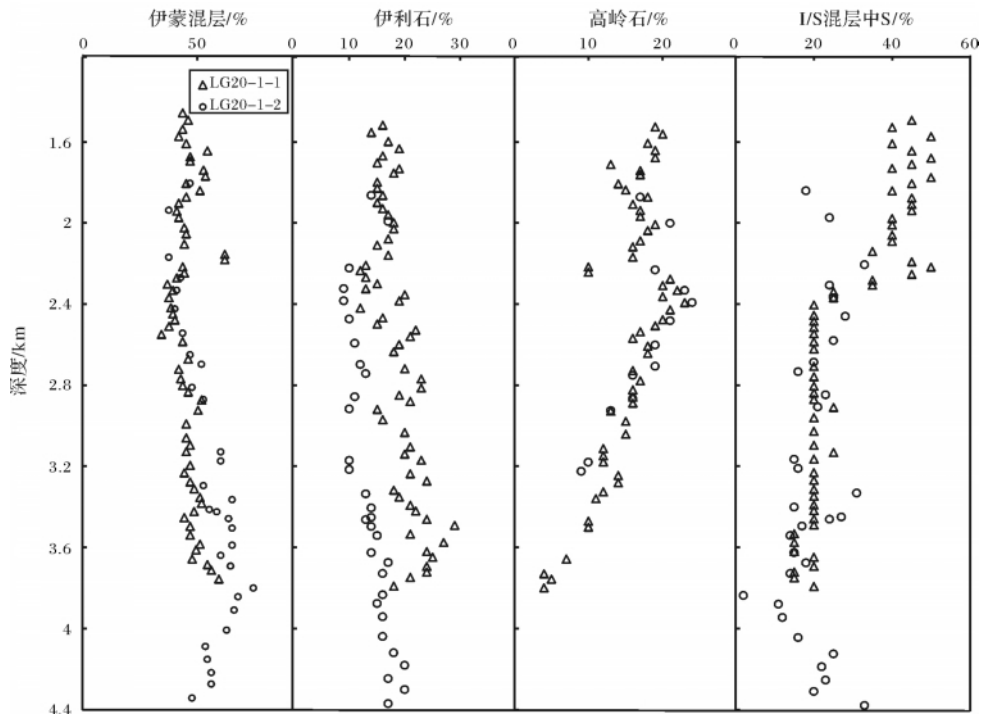


图2 莺歌海盆地临高凸起区泥岩黏土矿物组成与演化剖面图

Fig.2 The profile of constituents and evolution of the clay minerals in Lingao Uplift Zone, Yinggehai Basin

石还逐渐发生伊利石化,因此高岭石随埋深的增加而减小,并最终消失(图2),高岭石的伊利石化可用下式表示:

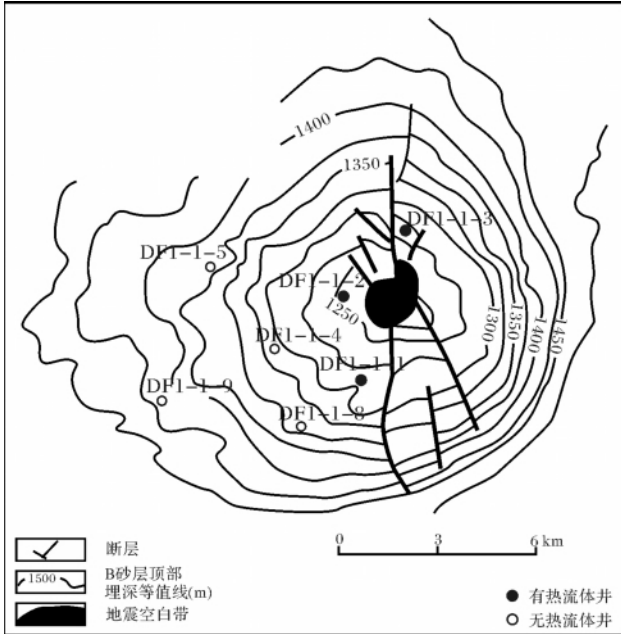
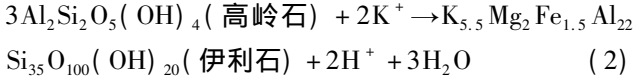


图3 东方1-1构造井位图<sup>[23]</sup>

Fig.3 Location and structural map of Dongfang 1-1

由于随埋深的增加,高岭石的伊利石化和蒙皂石向伊利石的转化程度增高,二者共同导致了伊利石随埋深的增加而增加的趋势(图2)。

### 2.2 快速演化型

在新近纪,莺歌海盆地发育了大规模的底辟作用和富含CO<sub>2</sub>高温热流体的活动<sup>[22]</sup>,并形成一系列底辟构造(图1),DF1-1构造就是其中之一(图1,图3)<sup>[21-23]</sup>。在莺歌海期,该构造发育了一系列南北向张性断层,当热流体由深部超压带通过断裂向浅层和地表运移时,运移通道附近的地热场和孔隙流体的化学成分就会受到影响,例如:位于DF1-1构造南北向断裂周围的DF1-1-2井,在1200m处,记录当时热流体温度的流体包裹体均一温度高达200℃<sup>[23]</sup>! 高温热流体的强烈活动,势必影响到岩石的成岩作用和水-岩反应,使黏土矿物的转化出现异常(图4)。在正常情况下,蒙皂石向伊利石转化是渐变的,但在高温热流体作用下,黏土矿物的转化出现跃变,位于东方1-1构造南北向断裂周围的DF1-1-1井、DF1-1-2井、DF1-1-3井、DF1-1-7井(图3),在1200~1500m深度范围内热流体活动强烈(图4),储层中CO<sub>2</sub>的含量骤增至40%以上,I/S混层中的S%出现跃变,由R0带跳跃到R2、R3带,缺失R1带。

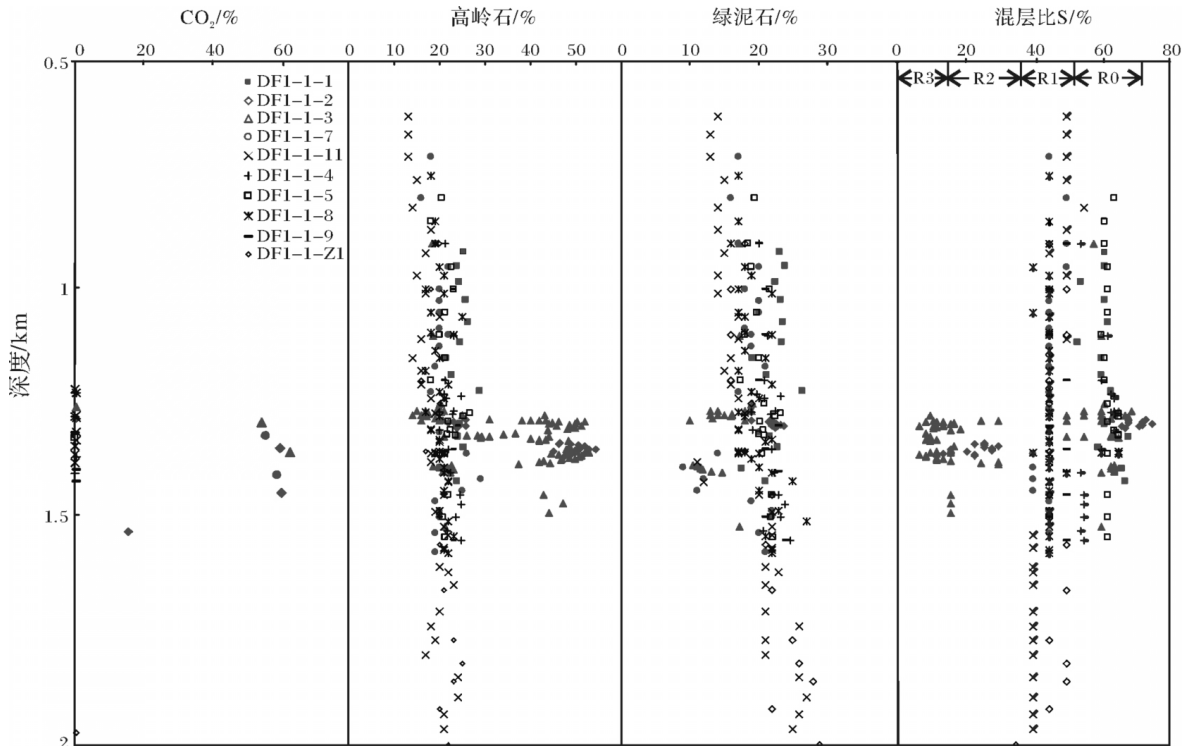
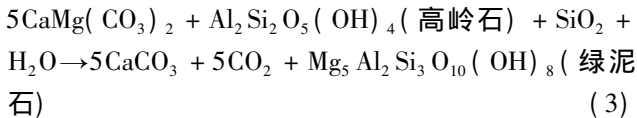


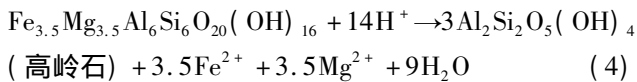
图4 东方1-1构造泥岩高岭石、绿泥石、I/S混层中S%演化趋势图

Fig.4 Evolution of kaolinite, chlorite and S% in S% of DF1-1 anticline

莺歌海盆地热流体的活动不仅加速了黏土矿物的转化,而且改变了黏土矿物转化的方向。在大多数盆地中,随着埋深和地温的增加,地层中的高岭石经高岭石/绿泥石混层,逐渐向绿泥石转化,直至消失<sup>[17]</sup>,反应式如下:



而在莺歌海盆地东方区,富含 $\text{CO}_2$ 的高温酸性热流体使得绿泥石变得极不稳定,向高岭石转化,并析出了过量的 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Fe}^{2+}$ ,造成了在热流体活动段(1 200~1 500 m)绿泥石含量减少和高岭石含量增加的现象(图4),反应式如下:



上述两个反应在地下可能同时发生,但其难易程度不同,可以通过热力学中吉布斯自由能增量的计算结果加以研究。在热力学研究中,化学反应的吉布斯自由能增量( $\Delta G$ )可作为热力学过程方向和限度的判据,以及过程不可逆性大小的量度。当 $\Delta G > 0$ 时,过程不可能自动发生; $\Delta G = 0$ ,过程平衡; $\Delta G < 0$ ,过程自动发生(不可逆)。 $\Delta G$ 值越低,说明自动过程越易发生,而且反应越快。本文选用受热流体影响的DF1-1-3井的实测温、压数据,分别计算了高岭石绿泥石化(式3)和绿泥石高岭石化(式4)的自由能增量。结果表明,这两个反应的自由能增量均为负值,且在趋势上都随着深度和地温的增加而降低,说明这两个反应在地下均可发生,且均随温度的增加,反应越来越剧烈。然而,在数值上,反应(4)的自由能增量远远小于反应(3)(图5),即在酸性条件下,绿泥石向高岭石转化的反应远比高岭石向绿泥石转化的反应易于发生。这一计算结果与实测数据完全吻合(图4)在1 200~1 600 m热流体活动强烈,受热流体影响的DF1-1-1井、DF1-1-2井、DF1-1-3井和DF1-1-7井的绿泥石减少,高岭石增加,这是绿泥石向高岭石转化的结果。

由式(1)~(4)可见,在黏土矿物转化的过程中,排出大量 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$ 等阳离子,这些阳离子从泥岩进入砂岩后,沉淀下来,形成胶结物,例如: $\text{Si}^{4+}$ 沉淀下来可形成自生石英, $\text{Na}^+$ 可为砂岩的钠长石化提供物质来源。特别是与热流体活动伴生的 $\text{CO}_2$ ,从深处沿断裂上涌,进入储层后,转化成大量 $\text{CO}_3^{2-}$ 与阳离子结合后,形成大量菱铁矿、铁白云石

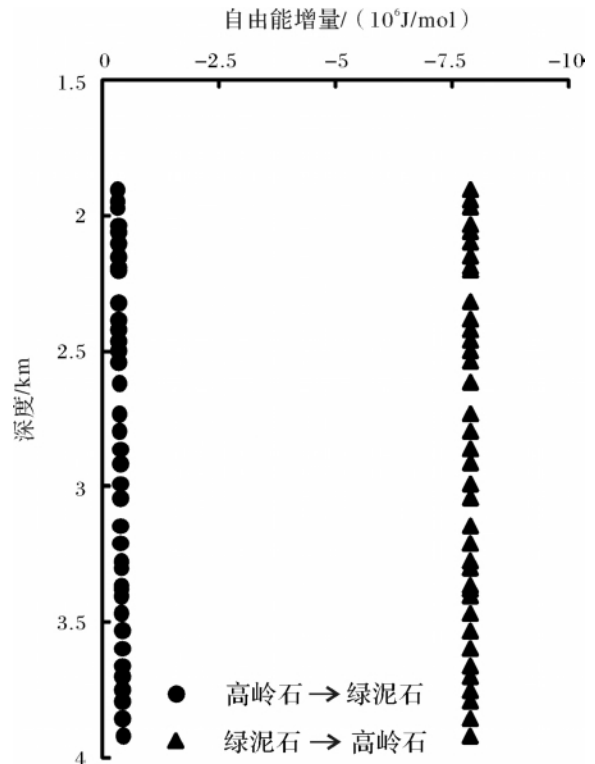


图5 黏土矿物转化过程的自由能增量

Fig. 5 Increments of free energy in clay minerals' transformation

和铁方解石(图6)。在同一深度下,DF1-1构造中有热流体活动的井段(DF1-1-3)和无热流体活动的井段(DF1-1-5)相比,储层天然气中的 $\text{CO}_2$ 含量增加,黏土矿物迅速转化,伊/蒙混层中蒙皂石层的含量 $S\%$ 急剧降低,菱铁矿、铁白云石、白云石和铁方解石大量出现。碳酸盐胶结物的大量形成势必影响储层的物性<sup>[24]</sup>。也就是说,热流体的活动加速了黏土矿物转化,使泥岩各种阳离子的排放量增加,可以导致砂岩胶结物的大量形成,不利于优质储层发育。

### 2.3 缓慢演化型

莺歌海盆地多样的温、压特征孕育了特殊的黏土矿物转化规律。研究表明,东南区泥岩的黏土矿物转化明显慢于莺东斜坡区和临高构造带。随埋深和地温的增加,东南区LD30-1-1A井和莺东斜坡区LT33-1-1井I/S混层中蒙皂石层的含量 $S\%$ 均逐渐减小,但前者的转化速率明显低于后者。在2 300 m以深,在同一深度前者的伊/蒙混层中蒙皂石层的含量 $S\%$ 明显高于后者(图7),例如:在2 500 m处,东南区LD30-1-1A井伊/蒙混层中 $S\%$ 为80%左右,而LT33-1-1井只有50%左右。尽管LD30-1-1A井的地温梯

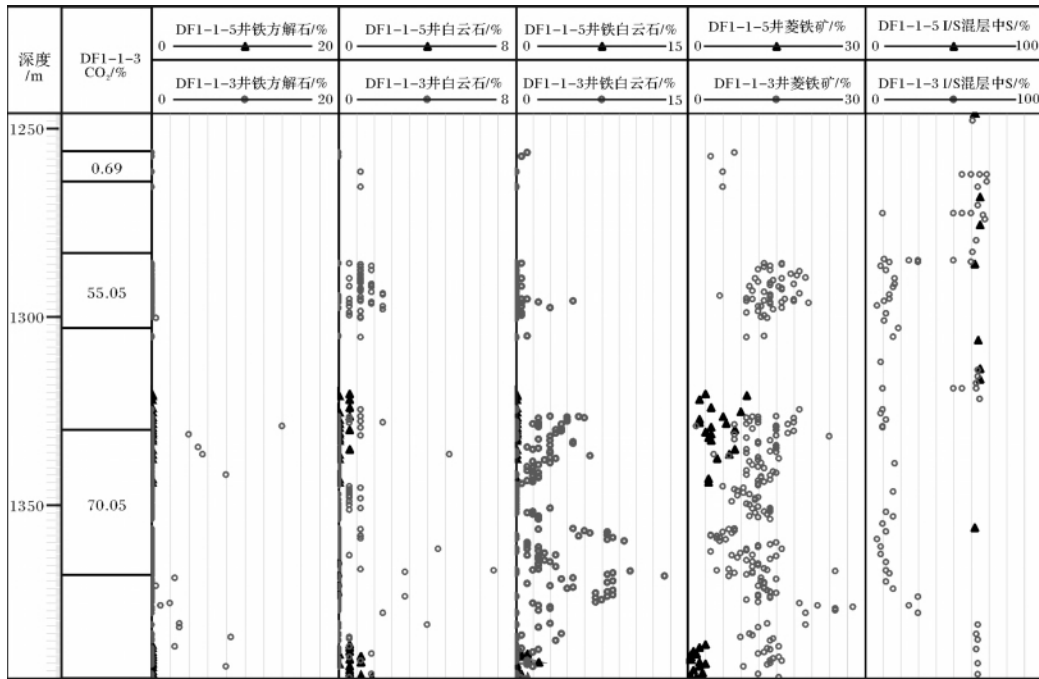


图 6 DF1-1 构造热流体活动对碳酸盐胶结的影响

Fig. 6 Influence of geothermal fluids' on the carbonate cementation in DF1-1 anticline

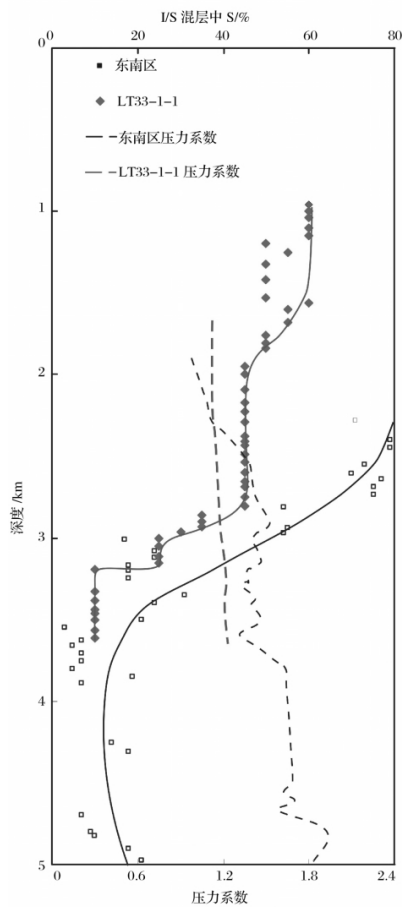


图 7 超压对黏土矿物转化的抑制作用

Fig. 7 Overpressure retardation on clay mineral transformation

度高达  $43.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$  ,而 LT33-1-1 只有  $33.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$  ,按照常理 LD30-1-1A 井的黏土矿物转化应该比 LT33-1-1 井更快 ,但实际情况并非如此 ,其原因是在 2 300 m 以下 ,LD30-1-1A 井开始发育超压 ,压力系数  $> 1.2$  ,而 LT30-1-1A 井仍为正常静水压力 ,压力系数  $\approx 1.0$  ,超压不仅抵消了地温对黏土矿物转化的影响 ,而且还进一步抑制了东南区 LT30-1-1A 井黏土矿物的转化 ,使其黏土矿物转化变慢。

超压对黏土矿物转化的抑制作用在世界上其他地区也有发现<sup>[4,9,25]</sup> ,其机理可用 Le Chartier 定律解释<sup>[25]</sup> 。当蒙皂石脱出高密度的层间水(密度约为  $1.16 \sim 1.46 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) ,进入岩石孔隙时 ,将发生膨胀 ,并导致流体压力增加<sup>[1]</sup> ;另一方面 ,蒙皂石格架的破坏、 $\text{Si}^{4+}$  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>[26]</sup> 。根据 Le Chartier 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。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  $\text{K}^+$  等金属阳离子 ,而  $\text{K}^+$  主要来源于有机酸对铝硅酸盐矿物和植物碎屑的溶解<sup>[14,27-29]</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>[30-32]</sup> ,这样必将导致环境介质中  $\text{K}^+$  等金属阳离子浓度的减小 ,不利于超压背景下黏土矿

物的转化。

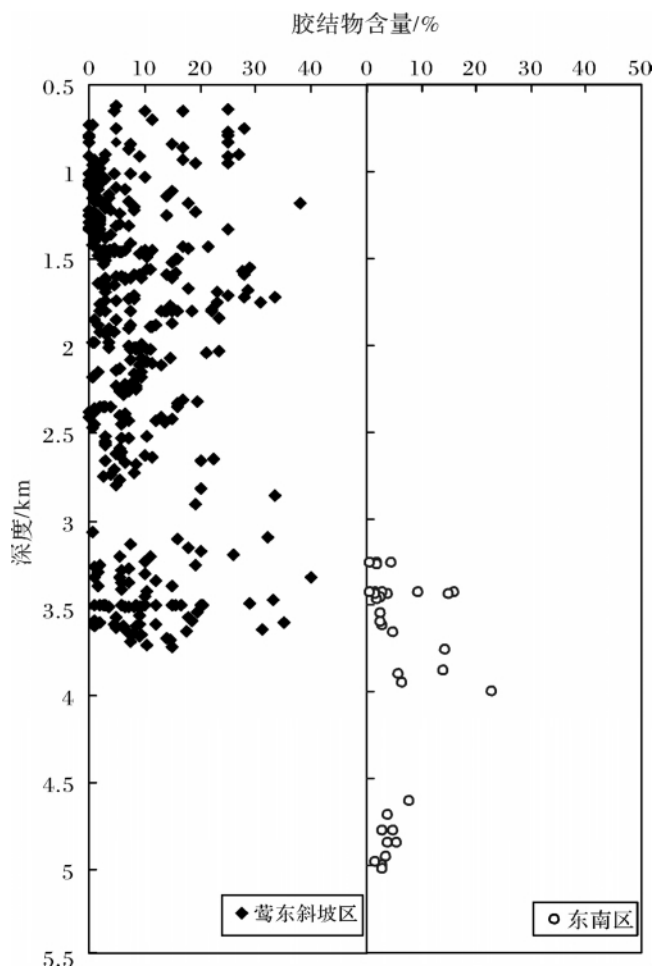


图8 黏土矿物转化对胶结作用的影响

Fig. 8 Influence of clay minerals transformation on the cementation

由于超压抑制黏土矿物转化,所以在超压区黏土矿物转化过程中,泥岩中 $H^+$ 、层间水和各种阳离子的排放将被减缓,储层的溶蚀作用和胶结作用都被减弱,使次生孔隙发育带出现在深部更深的地层中,有利于深层优质储层的形成。这种情况在我国渤海湾盆地也曾出现<sup>[30,31]</sup>。在莺歌海盆地,由于超压对黏土矿物转化的抑制,尽管东南区的地温梯度高达 $43.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,而莺东斜坡区只有 $33.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,按照常理,东南区的胶结作用应该比莺东斜坡区更强,但实际情况并非如此。如图8所示,在3500m左右,莺东斜坡区胶结物含量要远远大于东南区的胶结物含量,这刚好与之前所述的两个地区黏土矿物转化程度的变化趋势相一致。

### 3 结论

(1) 在莺歌海盆地存在正常演化型、快速演化型和缓慢演化型三种黏土矿物转化模式。其中快速演化型由热流体活动对黏土矿物转化的促进作用引起,而超压对黏土矿物的抑制作用导致了黏土矿物的缓慢演化。

(2) 在热流体活动区,黏土矿物转化加速,阳离子排放量增加,再加上来自深部的二氧化碳形成的 $\text{CO}_3^{2-}$ ,可形成大量(含铁)碳酸盐胶结物,使储层的胶结作用增强。

(3) 在超压区,黏土矿物转化较慢,泥岩中 $H^+$ 、层间水和各种金属阳离子的排放将被减缓,储层的溶蚀作用和胶结作用都被减弱,有利于深层优质储层的形成。

### 参考文献 (References)

- 1 Powers M C. Fluid-release mechanisms in compacting marine mudrocks and their importance in oil exploration [J]. AAPG Bulletin, 1967, 51 (7): 1240-1254
- 2 Perry E A, Hower J. Burial diagenesis in Gulf coast pelitic sediments [J]. Clays and Clay Minerals, 1970: 165-177
- 3 Giles M R, Marshall J D. Constraints on the development of secondary porosity in the subsurface: re-evaluation of process [J]. Marine and Petroleum Geology, 1986, 3: 243-255
- 4 Colten-Bradley V A. Role of pressure in smectite dehydration-effects on geopressure and smectite-to-illite transformation [J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(11): 1414-1427
- 5 Pytte A M, Reynolds R C. The thermal transformation of smectite to illite [C]//Naeser N D, T H McCulloh. Thermal History of Sedimentary Basins. New York: Springer Verlag, 1989: 133-140
- 6 Buhmann C. Smectite-to-illite conversion in a geothermally and lithologically complex Permian sedimentary sequence [J]. Clays and Clay Minerals, 1992, 40(1): 53-64
- 7 Bjorlykke K. Clay mineral diagenesis in sedimentary basins—a key to the prediction of rock properties. Examples from the North Sea Basin [J]. Clay Minerals, 1998, 33(1): 15-34
- 8 应凤祥, 何东博, 龙玉梅, 等. SY/T5477—2003. 中华人民共和国石油天然气行业标准碎屑岩成岩阶段划分[S]. 北京: 石油工业出版社, 2003 [Ying Fengxiang, He Dongbo, Long Yumei, et al. SY/T5477—2003. The Division of Diagenetic Stages in Clastic Rocks (Petroleum Industry Criterion in P. R. C.) [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003]
- 9 孟元林, 黄文彪, 王粤川, 等. 超压背景下黏土矿物转化的化学动力学模型及应用 [J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 461-467 [Meng Yuanlin, Huang Wenbiao, Wang Yuechuan, et al. A kinetic model of clay mineral transformation in overpressure setting and its applications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 461-467]

- 10 石广仁. 蒙皂石转化伊利石的数值模拟-溶解沉淀模型与化学动力学模型[J]. 沉积学报, 2007, 25(5): 693-700 [Shi Guangren. Numerical modeling for the smectite to illite transformation: dissolution-precipitation model and kinetic model[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5): 693-700]
- 11 Tingay M R P, Hillis R R, Swarbrick R E, *et al.* Origin of overpressure and pore-pressure prediction in the Baram province, Brunei [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(1): 51-74
- 12 施振飞, 张振城, 叶绍东, 等. 苏北盆地高邮凹陷阜宁组储层次生孔隙成因机制探讨[J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 429-436 [Shi Zhenfei, Zhang Zhencheng, Ye Shaodong, *et al.* The mechanism of secondary pores in the reservoir of Funing Formation in Gaoyou depression of Subei basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 429-436]
- 13 孟元林, 吴巍, 姜文亚, 等. 双清地区储层异常高孔带分布与成因分析[J]. 中国海上油气, 2008, 20(3): 146-151 [Meng Yuanlin, Wu Wei, Jiang Wenya, *et al.* An analysis of abnormal high porosity zone distribution and origin in reservoir rocks in Shuangqing area [J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 20(3): 146-151]
- 14 郑浚茂, 庞明. 碎屑储集岩的成岩作用研究[M]. 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[M]. Wuhan: China Geological University Publishing House, 1989: 53-85]
- 15 赵澄林, 陈纯芳. 渤海湾早第三纪油区岩相古地理及储层[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003 [Zhao Chenglin, Chen Chunfang. Lithofacies-Paleogeography and Reservoir Study of Early Tertiary in Bohai Bay Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003]
- 16 徐同台, 王行信, 张有瑜, 等. 中国含油气盆地黏土矿物[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003 [Xu Tongtai, Wang Xingxin, Zhang Youyu, *et al.* Clay Minerals of Chinese Oil-Bearing Basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003]
- 17 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作用数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 61-76 [Ying Fengxiang, Luo Ping, He Dongbo, *et al.* Diageneses and Numerical Modeling of Chinese Petroliferous Basins [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 61-76]
- 18 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 76-96 [Hao Fang. Kinetics of Hydrocarbon Generation and Mechanism of Petroleum Accumulation in Overpressure Basins [M]. Beijing: Science Press, 2005: 76-96]
- 19 朱伟林. 南海北部大陆边缘盆地天然气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007 [Zhu Weilin. Natural-Gas Geology of Continental Margin Basin in Northern South China Sea [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007]
- 20 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004 [Gong Zaisheng, Li Sitian. Accumulation Dynamics of Continental Margin Basins in Northern South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 2004]
- 21 朱伟林, 王振峰, 黄保家. 莺歌海盆地天然气成藏动力学[J]. 地球科学, 29(5): 563-568 [Zhu Weilin, Wang Zhenfeng, Huang Baojia. Dynamics of gas accumulation in Yinggehai Basin [J]. Earth Science, 29(5): 563-568]
- 22 王振峰, 罗晓容. 莺歌海盆地高温高压地层钻井压力预测技术研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004 [Wang Zhenfeng, Luo Xiaorong. Study of Pre-Monitoring Technology of High Temperature and High Pressure Formations in Yingqiong Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004]
- 23 解习农, 姜涛, 王华, 等. 莺歌海盆地底辟带热流体突破的地层水化学证据[J]. 岩石学报, 2006a, 22(8): 43-48 [Xie Xinong, Jiang Tao, Wang Hua, *et al.* Expulsion of overpressured fluid revealed by geochemistry of formation water in the diapiric structures of Yinggehai basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006a, 22(8): 43-48]
- 24 薛莲花, 史基安, 晋慧娟. 辽河盆地沙河街组砂岩中碳酸盐胶结作用对孔隙演化控制机理研究[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 102-109 [Xue Lianhua, Shi Jian, Jin Huijuan. Study of controlling mechanism of carbonate cementation on porosity evolution in lower Tertiary sandstones of the Liaohe Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(2): 102-109]
- 25 Carr A D. A vitrinite reflectance kinetic model incorporating overpressure retardation [J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16: 355-377
- 26 Nordgr rd Bol s H M, Hermanrud C, Teige G M G. Origin of overpressure in shales: Constraints from basin modeling [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(2): 193-211
- 27 孟元林, 修洪文, 孟凡晋, 等. 用泥岩热解资料预测储层次生孔隙发育带[J]. 天然气工业, 2008, 28(10): 41-43 [Meng Yuanlin, Xiu Hongwen, Meng Fanjin, *et al.* Prediction of secondary pore zone in reservoirs with rock-eval data of mudstone [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(10): 41-43]
- 28 孟元林, 刘文慧, 孟凡晋, 等. 松辽盆地徐家围子断陷深层异常高孔带分布特征与成因分析[J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 75-84 [Meng Yuanlin, Liu Wenhui, Meng Fanjin, *et al.* Distribution and origin of anomalously high porosity zones of the Xujiaweizi Fault Depression in Songliao Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(1): 75-84]
- 29 孟元林, 高煜婷, 吴河勇, 等. 松辽盆地北部中浅层区域成岩规律及影响因素[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 97-106 [Meng Yuanlin, Gao Yuting, Wu Heyong, *et al.* Regional diagenetic regularity and controlling factors of middle-shallow horizons in the northern Songliao Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(1): 97-106]
- 30 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[D]. 北京: 中国地质大学, 2004: 33-42 [Meng Yuanlin. Study on diageneses 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]
- 31 Meng Yuanlin, Li Bin, Wang Zhiguo, *et al.* Overpressure retardation of organic acid generation and clastic reservoirs dissolution in central Huanghua Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(1): 40-43
- 32 肖丽华, 高煜婷, 田伟志, 等. 超压对机械压实的抑制与孔隙度

预测[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(1): 400-406 [Xiao Lihua, Gao Yuting, Tian Weizhi, *et al.* Retardation of mechanical compaction of elastic rocks by overpressures and porosity prediction

[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(1): 400-406]

## Abnormal Transformation of the Clay Minerals in Yinggehai Basin and Its Significances

MENG Fan-jin<sup>1,2</sup> XIAO Li-hua<sup>1</sup> XIE Yu-hong<sup>4</sup> WANG Zhen-feng<sup>3</sup>  
LIU Jing-huan<sup>3</sup> TONG Chuan-xin<sup>4</sup> ZHANG Huo-lan<sup>3</sup> GAO Yu-ting<sup>1</sup>  
MENG Yuan-lin<sup>1</sup> WEI Wei<sup>1</sup> ZHAO Xiao-qing<sup>5</sup>

(1. Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318;

2. University of Houston, Houston Texas 77204-2024;

3. China National Offshore Oil Corporation, Western Branch, Zhanjiang, Guangdong 524000;

4. China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074; 5. China University of Petroleum, Beijing 102249)

**Abstract:** Yinggehai Basin is a Cenozoic marine sedimentary basin with total sediment of 17 km, occupying an area of  $11 \times 10^4 \text{ km}^2$ , located in the continental shelf of South China Sea. The basin is structurally composed of Yingdong Slope, Yingxi Slope and Central Depression. Due to the existence of the overpressures and the movements of geothermal fluids, there are various unusual geological phenomena in Yinggehai Basin. There exist three types of clay mineral transformations in the basin, normal transformation, faster transformation and slower transformation. The Cenozoic group in Yingdong Slope develops hydrostatic pressure, and the clay minerals transform regularly. With the increase of buried depth and temperature, smectite transforms into illite by illite/smectite mixed layer, and smectite layer content S% in illite/smectite mixed layer decreases gradually. There exist overpressures in the Cenozoic group of Central Depression. DST measured pressure coefficient even reaches 2.4 in LD30-1-1A well district located in the southeast of the depression. As the measured S% in I/S data show that the overpressures retard the transformation of clay minerals, the clay minerals transform more slowly in the overpressure formation, and the S% in I/S mixed layer is 10% ~ 30% higher than that of formations with a hydrostatic pressure at the same depth in Yingdong Slope. Overpressure's retardation also resulted in the put-off of the expulsion of  $\text{H}^+$ , interlayer water and various cations, which lead the dissolution and cementation of the contiguous reservoirs to be weakened. The cements of Cenozoic group reservoirs in LD30-1-1A well are lower 50% than that of Yingdong Slope at the same depth. During Neocene, a large scale of diapirism developed, and geothermal fluids richer in  $\text{CO}_2$  with a temperature of  $200^\circ\text{C}$  were active in Central Depression. The activity of geothermal fluids accelerated the transformation of clay minerals. The S% in I/S mixed layer jumped to zone R2 or R3 from zone R0 abruptly, without going through zone R1. Meanwhile, chlorite turned to kaolinite unusually in the acid environment, which is confirmed by the Gibbs free energy increment computations. The quick transformation of clay minerals lead to a large amount of such cations as  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$  expelled from the mudstones. These cations entered the adjacent sandstones and precipitated to form siderite, ankerite, dolomite and ferrocaltite, which filled the pores of the reservoirs and reduced the porosity of the reservoirs.

**Key words:** overpressure; hot fluid; clay mineral transformation; secondary porosity; diagenesis