

## 泥岩化学压实作用研究进展

李 超<sup>1,2,3</sup>, 罗晓容<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院地球科学研究院,  
北京 100029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**埋藏过程中,泥岩化学压实作用在岩石孔隙演化、微观结构及异常压力形成中起着非常重要的作用,但目前对于泥岩化学压实作用研究还十分薄弱。系统总结了泥岩化学压实作用机理、化学压实作用导致的泥岩结构变化、化学压实作用地球物理响应及判识等方面的最新研究进展,并讨论了泥岩化学压实作用研究中的几个关键问题。结果表明:化学压实作用受化学动力学控制,温度、时间及矿物成分是最主要的影响因素,蒙脱石向伊利石转化是泥岩中最普遍和最重要的化学压实作用;化学压实作用过程中,黏土矿物层间水转化为自由水导致的体积膨胀可能并不明显,但是蒙脱石向伊利石转化可能引起骨架弱化、有效应力转移效应,伴随黏土成岩过程的硅质胶结和结构变化将显著降低泥岩渗透率,并可能明显改变泥岩压实系数;蒙脱石向伊利石转化导致泥岩有效应力-孔隙度关系变化,使得压实曲线从蒙脱石曲线向伊利石曲线转换,测井响应上表现为声波时差减小和密度增大的趋势。目前,泥岩化学压实作用研究中仍需进一步深入的问题主要包括化学压实作用与黏土矿物结构、有机质对泥岩压实作用的影响、化学压实作用与泥岩流变学特征、化学欠压实与化学压实不平衡以及化学成岩泥岩超压预测方法等。

**关键词:**化学压实作用;黏土矿物;蒙脱石向伊利石转化;结构变化;应力转移;压实曲线;测井响应  
**中图分类号:**P584 **文献标志码:**A

## Review on Mudstone Chemical Compaction

LI Chao<sup>1,2,3</sup>, LUO Xiao-rong<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Mudstone chemical compaction plays a very important role in the pore evolution, microstructure and formation of abnormal pressure, but there has been weak research on it so far. Recent research progresses about mudstone chemical compaction were systematically summarized, including action mechanism, mudstone texture changes, well logging interpretation and identification; finally, the key issues in mudstone chemical compaction were discussed. The results show that the chemical compaction mainly refers to smectite-illite transition, which is controlled by chemical kinetics and affected by temperature, time and mineral composition; it may be not obvious that the bulk volume expansion is caused by the conversion of interlayer water into intergranular water in clay mineral, and the chemical compaction may cause skeletal weakening

收稿日期:2017-10-20

基金项目:国家科技重大专项项目(2017ZX05008-004);国家自然科学基金项目(41372151);  
中国科学院 A 类战略性先导科技专项项目(XDA14010202)

作者简介:李 超(1989-),男,山东淄博人,中国科学院大学理学博士研究生,E-mail:lichaoapu@126.com。

通讯作者:罗晓容(1959-),男,四川成都人,研究员,博士研究生导师,理学博士,E-mail:luoxr@mail.iggcas.ac.cn。

and the effective stress transfer; the siliceous cementation and aligned clay mineral fabric significantly reduce the permeability of mudstone, and may obviously alter the mudstone compaction coefficient during clay diagenesis process; the smectite-illite transition causes the change of the relationship between effective stress and porosity of mudstone, and the logging response shows decreasing acoustic value and increasing density value; in addition, the mudstone chemical compaction shows higher speed ratio of longitudinal and transverse waves( $V_p/V_s$ ), and lower wave impedance and shear modulus. Some key problems in mudstone chemical compaction still need to be further studied, including the chemical compaction and the structure of clay mineral, the effect of organic matter on mudstone chemical compaction, the chemical compaction and characteristics of mudstone rheology, the difference between chemical undercompaction and compaction disequilibrium, and the prediction method of mudstone overpressure in the process of chemical diagenesis.

**Key words:** chemical compaction; clay mineral; smectite-illite transition; structure change; load transfer; compaction curve; logging response

## 0 引言

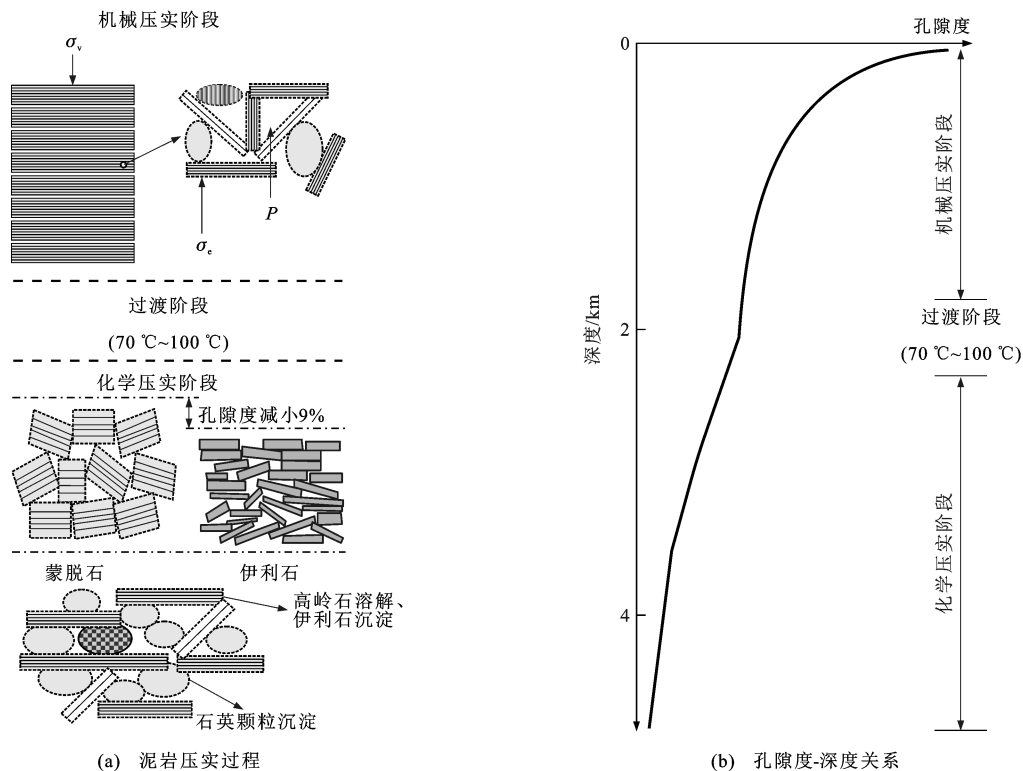
泥岩是含油气盆地中分布最广的沉积岩,在含油气系统中起着非常重要的作用,既可以作为烃源岩、盖层,也可以作为油气储集层。泥岩的物理化学性质除了受控于原始矿物组成和沉积颗粒结构之外,沉积后的成岩作用起着更重要的控制作用<sup>[1]</sup>。Athy 等认为,泥岩的成岩过程以机械压实作用为主,孔隙度受控于有效应力,在相当的埋深范围内泥岩物性变化符合一定规律<sup>[2-5]</sup>。但实际上泥岩的机械压实作用过程十分复杂,受黏土矿物类型、颗粒机械强度、颗粒粒径、比表面积以及表面电荷等多重因素的影响<sup>[6-8]</sup>。孔隙流体能够顺畅排出条件下,机械压实作用使得泥岩孔隙度从沉积时的 80% 减小到 10%,渗透率可减小 10 个数量级<sup>[9]</sup>。泥岩的机械压实作用所涉及的研究内容包括泥岩压实机理、岩石物性与有效应力关系、正常压实趋势及其影响因素、压实作用与异常压力关系等<sup>[3,10-17]</sup>。

越来越多研究发现,泥岩孔隙度的变化不仅受到有效应力的控制,而且与埋藏时间、温度和矿物成分等都有关系,泥岩的成岩作用并非仅仅是机械的,化学成岩变化也起到了重要的作用<sup>[18-21]</sup>。随着埋深增大,地层温度升高,化学成岩作用对于泥岩孔隙度、孔隙结构的变化以及泥岩地层中异常压力形成等的控制作用越来越明显<sup>[13-14,22]</sup>,故泥岩中的化学成岩作用通常被称为化学压实作用<sup>[19-20]</sup>。随着埋深增大,泥岩压实过程趋向于以化学压实作用为主,随着油气勘探向深层扩展,深部地层的化学压实作用备受重视<sup>[14,16]</sup>。

本文拟通过国内外文献调研,总结化学压实作用及其成因机理,认识化学压实作用对泥岩结构变化的影响,讨论化学压实作用地球物理响应及判识方法,并提出目前泥岩化学压实作用研究存在问题及重点研究方向。

## 1 机理

泥质沉积物中包含着不同的矿物组分、有机质和孔隙流体,其中最主要的为黏土矿物,其次为石英、长石、碳酸盐岩、无定形硅质等。在泥质沉积物埋藏过程中,随着上覆负荷以及温度的增加,这些物质的化学组分控制着泥质沉积物的物理、化学成岩作用<sup>[23]</sup>,导致孔隙流体排出,促进颗粒骨架重新排列,矿物发生溶解和沉淀,泥质沉积物的固结程度不断增加<sup>[24]</sup>,这些过程统称为泥岩压实作用。泥岩中黏土矿物反应是决定机械压实作用和化学压实作用的重要因素,因此,以泥岩中黏土矿物的转换作为化学作用发生的标识,泥岩的压实作用可划分为 3 个阶段:机械压实阶段、过渡阶段以及化学压实阶段<sup>[19-20]</sup>(图 1)。机械压实阶段,机械压实作用主要发生在 2~3 km 以浅的埋深,孔隙度演化主要受有效应力控制<sup>[8,13-14]</sup>;过渡阶段由于泥岩中黏土矿物开始转化,所以开始发生化学压实作用,但是此时机械压实作用仍在继续<sup>[16,19]</sup>;化学压实阶段,化学压实作用随埋深增加逐渐增强,在深埋成岩阶段起主导作用<sup>[18]</sup>。泥岩中发生的化学压实作用过程都可表述为化学动力学过程,因此,时间、温度和矿物成分往往被用来标识化学压实作用的程度<sup>[15,21,25]</sup>。从机械压实作用到化学压实作用的转变并不固定,取



$\sigma_v$  为静岩压力;  $P$  为孔隙压力;  $\sigma_e$  为有效应力;  $\sigma_e = \sigma_v - P$ ; 图件引自文献[19], 有所修改

图1 泥岩压实作用及孔隙度演化示意图

Fig.1 Schematic Representation of Mudstone Compaction and Porosity Evolution

决于矿物组成和埋藏历史,例如富蒙脱石的泥岩与富高岭石的泥岩相比,其化学压实作用发育在相对较浅处<sup>[19]</sup>。

泥岩中黏土矿物转化,特别是蒙脱石向伊利石转化是最为普遍的化学压实作用,不仅引起矿物成分变化,而且与泥岩孔隙结构变化及异常压力的形成演化关系密切<sup>[26-27]</sup>。因此,泥岩中黏土矿物转化一直是关注的焦点,尽管前人在蒙脱石向伊利石转化的化学动力学特征方面做了很多研究,但对蒙脱石向伊利石转化反应机制的认识仍然存在争议<sup>[28]</sup>。目前主流的认识可归结为脱水转化反应<sup>[29-31]</sup>和溶解-沉淀反应<sup>[32-35]</sup>两种模型。

脱水转化反应模型认为蒙脱石向伊利石转化过程中继承了2:1层黏土矿物的基本结构,而仅发生了单元层内化学成分的变化<sup>[36-37]</sup>。蒙脱石和伊利石都是以两层硅氧四面体夹一层铝氧八面体构成单元层的片状矿物,蒙脱石单元层之间吸附2~8层水分子,伊利石单元层之间吸附 $K^+$ <sup>[38]</sup>。随着埋深增加及温度升高,蒙脱石脱水,一部分正四面体中的 $Si^{4+}$ 被 $Al^{3+}$ 替代,由此产生的电荷不平衡通过单元层之间吸附 $K^+$ 而实现,进而形成蒙伊混层直至形成伊利石<sup>[23]</sup>。而蒙脱石向伊利石转化需要的 $K^+$ 、 $Al^{3+}$

多来自于同一泥岩地层中钾长石或云母的溶解<sup>[37]</sup>。

溶解-沉淀反应模型则认为蒙脱石向伊利石转化是一个蒙脱石溶解、伊利石同时结晶生长的平衡过程<sup>[27]</sup>。其间蒙脱石不断溶解,伊利石附于蒙脱石结晶生长并形成伊利石聚集体,最后形成粒度更大的伊利石晶体<sup>[39]</sup>。溶解-沉淀反应可不需要外来的 $Al^{3+}$ 源,形成伊利石所需的 $Al^{3+}$ 就来自蒙脱石本身,只要岩石中钾长石或云母溶解提供 $K^+$ 即可<sup>[40]</sup>。

实际盆地地质条件十分复杂,蒙脱石向伊利石转化过程可能涉及许多化学反应<sup>[41-43]</sup>。但无论何种机制,总体上蒙脱石向伊利石转化都是蒙脱石减少、伊利石增多的“伊利石化”过程,都需要有外来的 $K^+$ 补充。溶解-沉淀反应比脱水转化反应所消耗 $K^+$ 要少得多,而释放更多的 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 和 $Si^{4+}$ 等<sup>[44]</sup>。

一般认为,蒙脱石向伊利石转化过程可用一级化学动力学方程描述,但在不同盆地中其活化能和频率因子各不相同<sup>[45-48]</sup>。Velde等研究认为,蒙脱石向伊利石转化是一个二级反应,蒙脱石先转化为蒙伊混层,之后蒙伊混层再转化为伊利石,并发现如果用一个二级反应的动力学方程来描述蒙脱石向伊利石转化过程,在研究的8个盆地中所得到的化学

动力学参数是一致的<sup>[49]</sup>。

碎屑高岭石也是泥岩中承担负载的碎屑骨架的一部分,当地层温度超过 130 °C 且钾长石可提供  $K^+$  的条件下,高岭石向伊利石转化释放出结构水<sup>[19,26-27]</sup>。此外,泥岩或多或少含有一定量粉砂或细砂级石英颗粒,石英的溶解、沉淀也是泥岩中常见的化学压实作用<sup>[19]</sup>。

## 2 泥岩结构变化

化学压实作用对于泥岩孔隙自由水含量、有效孔隙度、渗透率、流体压力及其他性质产生深刻影响。除了孔隙度减小之外,总结前人提出泥岩化学压实作用导致的泥岩结构相关变化,主要包括黏土矿物脱水导致的体积膨胀、骨架弱化及应力转移效应、化学压实作用改变泥岩有效应力-孔隙度关系及化学压实作用降低泥岩渗透率等<sup>[22,29,42,50-54]</sup>。

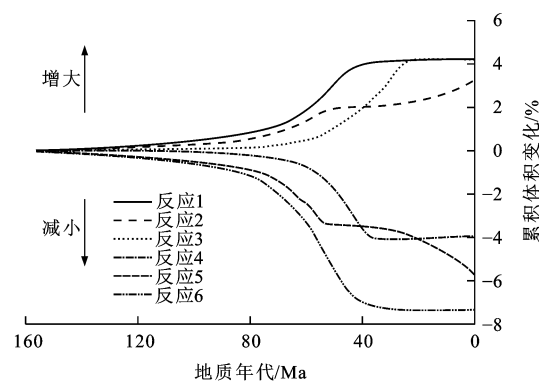
### 2.1 黏土矿物脱水导致的体积膨胀

蒙脱石是泥质沉积物中最普遍的黏土矿物。与伊利石相比,蒙脱石晶体结构中含有大量的层间水,因此,黏土矿物转化的一个必然结果是脱水作用<sup>[38]</sup>。蒙脱石向伊利石转化过程中释放出层间水,进入孔隙空间转化为自由水。蒙脱石层间最后 1、2 层吸附水分子可视为结构水,密度比自由水大,在变成自由水时具有体积膨胀的趋势<sup>[36-38]</sup>。蒙脱石转化引起的孔隙水体积膨胀一直以来被认为是超压的成因之一<sup>[29]</sup>,可以改变泥岩地层孔隙度与埋深的关系<sup>[3]</sup>。

目前普遍认为,黏土矿物脱水主要取决于温度和时间,但是对于黏土矿物转化脱水阶段及结构水的密度素有争议<sup>[36,38,55]</sup>。Powers 最早将蒙脱石脱水过程划分为两个阶段,即物理脱水及化学脱水阶段<sup>[38]</sup>。Burst 进一步将蒙脱石最后两分子层间水化学脱水过程分为两个阶段<sup>[36]</sup>。Perry 等指出蒙脱石向伊利石转化从无序变为有序层过程属于不同脱水阶段,将蒙脱石脱水划分为 4 个阶段<sup>[55]</sup>。Colten-Bradley 强调温度对脱水作用的影响,认为当温度小于 60 °C 时会脱出一个水层,在 67 °C ~ 81 °C 期间脱出第二个水层,最后一个水层脱出需要的温度更高,为 172 °C ~ 192 °C<sup>[56]</sup>。

前人对于蒙脱石最后几层结构水密度的认识并不一致<sup>[36,57-58]</sup>,因此,蒙脱石脱水导致的岩石体积变化存在分歧<sup>[3]</sup>。Powers 认为全部由蒙脱石组成的不含自由孔隙水的泥岩在层间水的密度取  $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  条件下,脱水导致的体积增加约 20%<sup>[38]</sup>。Burst 指出蒙脱石最后两分子水约占泥岩体积的 15%,层间

水密度取  $1.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  时脱水导致的岩石体积膨胀仅 2%<sup>[36]</sup>。Magara 认为泥岩原始自由水体积约为 20%,非蒙脱石矿物体积分数为 30%,按照层间水密度( $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )计算出脱水导致的体积膨胀不足 6%<sup>[58]</sup>。同时,蒙脱石向伊利石转化时,水由层间位置转移到了粒间位置,引起黏土颗粒的减小和有效孔隙度、渗透率的增大,因而岩石总体积膨胀的可能性不大<sup>[3]</sup>。Luo 通过数值模拟分析指出,实际地质条件下蒙脱石脱水过程持续时间很长,并且可能伴随泥岩渗透率的变化,因此,即便设蒙脱石层间最后两层吸附水密度为  $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,在实际盆地演化过程中体积膨胀效应亦可忽略不计<sup>[51]</sup>。Swarbrick 等指出层间水密度为  $1.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  条件下,根据前人提出的不同动力学模型计算出纯蒙脱石泥岩在封闭体系内脱水导致的体积变化从增大 4.1% 到减小 7.4%<sup>[59]</sup>(图 2)。



图件引自文献<sup>[59]</sup>,有所修改

图 2 蒙脱石向伊利石转化过程中岩石体积变化

Fig. 2 Volume Changes Associated with Six Reaction Pathways for Smectite-illite Transition

综上所述,在沉积盆地演化过程中,蒙脱石向伊利石转化释放的流体体积相对很小,层间水解附释放的时间很长,加之实际泥岩也不可能完全封闭,蒙脱石脱出增加的自由水在这样长的时间内可逐渐释放出来,因此,蒙脱石脱水一般不会导致泥岩孔隙体积与结构的明显变化。

### 2.2 骨架弱化及应力转移效应

蒙脱石向伊利石转化过程中,束缚水转化为层间水增加了页岩系统中可动水体积,减小了一部分负载黏土矿物颗粒的体积,而且还可以造成一些刚性矿物溶解,使得页岩内部支撑力降低,造成岩石骨架弱化效应<sup>[22,60]</sup>。当这个过程发生在一个封闭系统中时,释放的孔隙水不能及时排出孔隙,上覆应力则从颗粒体系转移到流体系统<sup>[42]</sup>,导致孔隙压力增加,该过程亦称为应力转移<sup>[46]</sup>。高岭石转换

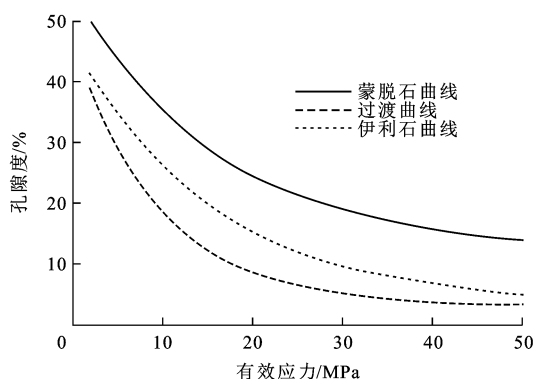


为伊利石的成岩反应亦能够导致类似的流体压力增加效应<sup>[46]</sup>。

应力转移机制可能在泥岩埋藏成岩过程中普遍发生,并且可能是深部泥页岩超压形成的重要机制,如石英颗粒发生压溶,溶解的石英在局部孔隙空间再沉淀,或造成流体从页岩排出或使得流体压力增大<sup>[52]</sup>。化石碎屑发生压溶作用或者受酸性流体作用发生溶解也可能导致类似效应<sup>[46]</sup>。烃源岩内固态干酪根转化为液态烃也将导致干酪根承受的负载减少,骨架颗粒负荷与孔隙流体压力重新分配,导致孔隙流体压力增大形成超压<sup>[42]</sup>。

### 2.3 化学压实作用改变泥岩有效应力-孔隙度关系

蒙脱石向伊利石转化过程中,黏土颗粒骨架的破坏和改变将影响沉积物的压实特征<sup>[22,60]</sup>。在泥岩不发生化学压实作用条件下,机械压实作用不会使泥岩孔隙度减小到0,而是随着有效应力增大会逐渐接近一个极小值<sup>[15,22,61]</sup>。在机械压实作用下,蒙脱石压实达到的最小孔隙度与最后两层单分子水层的保持有关,大约为12%。蒙脱石向伊利石转化过程中,蒙脱石脱去最后两层吸附水,新形成的伊利石比表面积较小,吸附水能力也较低。假定蒙脱石脱水体积为9%,那么蒙脱石向伊利石转化之后,临界孔隙度减小到3%<sup>[22]</sup>。新形成的伊利石往往趋向于垂直最大主应力方向发生定向排列<sup>[62-65]</sup>,这种结构将有利于压实作用的进行。因而,在相同的有效应力条件下,以伊利石为主的泥岩孔隙度总是低于以蒙脱石为主的泥岩,二者的有效应力-孔隙度关系也具有明显差异,蒙脱石向伊利石转化过程中泥岩压实曲线从蒙脱石曲线向伊利石曲线逐渐过渡<sup>[22,60,66]</sup>(图3)。



图件引自文献[22],有所修改

图3 蒙脱石和伊利石有效应力-孔隙度关系

Fig. 3 Relationships Between Effective Stress and Porosity of Smectite and Illite

泥岩的压实系数越大,孔隙度和渗透性随埋深增加而减小的幅度就越大,在相同时间内孔隙

流体排出的量也就越大,从而增加了压实增压机制的效应<sup>[3,53]</sup>。同样,自生伊利石比高岭石颗粒更细,因此,高岭石向伊利石转化过程也可引起泥岩压实系数的变化,但与蒙脱石向伊利石转化效应相反<sup>[15]</sup>。

### 2.4 化学压实作用降低泥岩渗透率

化学压实作用引起泥岩物性变化的另一种方式是黏土矿物转化释放出的物质发生就地的胶结作用,从而降低泥岩渗透率<sup>[50-52]</sup>。

蒙脱石向伊利石转化过程中, $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 等的释放提供了沉淀物质来源,形成的胶结物有可能堵塞喉道而使得渗透率降低<sup>[67]</sup>。Boles等认为蒙脱石向伊利石转化过程所释放的 $\text{Si}^{4+}$ 可以达到所形成的伊利石总量的24.5%<sup>[44]</sup>。Foster指出,在蒙脱石向伊利石转化过程中产生的 $\text{Si}^{4+}$ 多以 $\text{SiO}_2$ 的形式直接进入水中,由于 $\text{SiO}_2$ 在水中的溶解度很低,往往就近在泥岩孔隙中沉淀,形成不同形式的硅质胶结<sup>[68]</sup>。Kalani等对泥岩显微薄片观察发现,随着埋深增大,化学压实作用增强,泥岩内微晶石英显著增多<sup>[69]</sup>。

蒙脱石向伊利石转化过程中,析出的其他阳离子除部分可参与泥岩黏土矿物成岩反应形成新的组分外,如 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 参与蒙脱石向绿泥石转化,而 $\text{Ca}^{2+}$ 则形成碳酸盐矿物胶结物,其余可以呈各种无机阳离子或呈各种有机络合物的形式,随着压实流体进入砂岩孔隙<sup>[70]</sup>。

泥岩渗透率降低的程度主要取决于黏土颗粒结构、胶结物总量和胶结方式<sup>[13-14]</sup>。Williams等认为由于黏土矿物颗粒比表面积较大,蒙脱石向伊利石转化过程中释放的 $\text{Si}^{4+}$ 很容易吸附在其表面,形成栉节状胶结物,这种胶结方式对喉道空间的减小应更为重要,会大大降低泥岩渗透率<sup>[71]</sup>。

## 3 地球物理响应及判识

泥岩成岩作用改变了岩石物理属性,这些变化可以不同程度地表现在地球物理响应上。泥岩声波速度/时差-有效应力、体积密度-有效应力关系、声波速度/时差-密度关系、纵横波速度比、波阻抗和剪切模量等可以反映出泥岩机械压实作用与化学压实作用之间的差异<sup>[60,72-77]</sup>。

### 3.1 岩石物理特征

泥岩机械压实作用是随有效应力的增大,孔隙度减小、密度增大的过程。不均衡压实作用会阻止压实作用进一步发生,形成超压,造成沉积物孔

隙度随深度的变化偏离正常压实趋势,形成欠压实现象。超压带内任一点的孔隙度都可以在正常压实趋势线上找到等值的一点,对应的深度称为等当深度<sup>[3]</sup>。超压带内任一点可以视为地层在埋藏到等当深度时完全封闭,不均衡压实作用将导致超压以静岩压力梯度随深度增加,有效应力在埋藏过程中保持恒定,表现为岩石孔隙度不再随深度减小,密度也不再增大<sup>[42]</sup>。

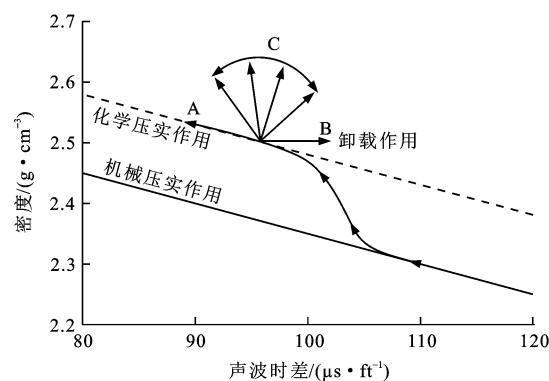
对于处于化学压实阶段的泥岩,蒙脱石向伊利石转化过程中,释放层间水进入孔隙中,减小了负载颗粒的体积,有效应力从骨架颗粒转移到孔隙流体上,可能导致超压形成<sup>[22]</sup>。因而早期将蒙脱石向伊利石转化看做是一个卸载过程,即当蒙脱石向伊利石转化引起有效应力减小,泥岩孔隙发生弹性回弹,导致速度减小,密度变化不明显<sup>[72]</sup>。近年来的研究认为,蒙脱石向伊利石转化过程并不完全对应弹性卸载过程,在消除因异常流体压力产生而发生的卸载效应后,可以确定出有效应力-孔隙度变化趋势从蒙脱石曲线向伊利石曲线转换<sup>[54,73]</sup>。蒙脱石具有大量的结合水,表现出缓慢的压实趋势,随着蒙脱石向伊利石转化,有效应力-孔隙度变化趋势从蒙脱石曲线向伊利石曲线偏移<sup>[22,60,78-79]</sup>。

化学压实作用伴随硅质胶结物的沉淀,并且黏土矿物颗粒排列的有序度亦随之增加,促使泥岩固结更为彻底,从而增大了泥岩密度<sup>[16,22]</sup>。

### 3.2 判识方法

不同成因引起岩石物理性质的变化差异可以明显地表现在声波时差-密度交会图上<sup>[73,78-80]</sup>。在声波时差-密度交会图上,蒙脱石曲线代表机械压实阶段,伊利石曲线代表化学压实阶段,其间存在一个过渡阶段<sup>[76-77,81]</sup>。随着黏土沉积物固结成泥岩过程,声波时差逐渐减小,而地层密度逐渐增大,因此,在声波时差-密度交会图上,泥岩整体的压实趋势随着深度增大从右边底部逐渐到左边顶部(图4)。

在化学成岩过程中,若泥岩有效应力不减小,泥岩必然发生孔隙水的排出,压实作用继续发生,泥岩的声波时差-密度交会图沿着蒙脱石曲线逐渐向伊利石曲线过渡,而后沿着伊利石压实趋势线继续发生压实作用,而并不会使其偏离(图4中箭头A)。黏土成岩反应取决于地层温度和埋藏时间,因此,图4中过渡区的开始点在较高的地温梯度或缓慢埋藏条件下,会向声波时差变大及密度减小方向偏移,反之亦然。若各种原因造成孔隙流体排出受到有效阻止,对应的泥岩层产生异常压力,有效应力从负载颗



A 为化学压实作用;B 为卸载作用;C 为处于 A 和 B 之间的过渡区;  
图件引自文献[81],有所修改

图4 泥岩化学压实作用测井响应及识别

Fig. 4 Diagram of Well Logging Response and Identification for Mudstone Chemical Compaction

粒转移至流体系统,使得具有较大纵横比的连通孔隙开启<sup>[82]</sup>,但对孔隙度的增加微乎其微,因此,卸载作用对应着声波速度降低,而并不引起密度明显变化,从而导致声波时差-密度交会图中压实曲线沿着密度不变且声波时差增大方向偏移(图4中箭头B)。在这两种极端作用之间的地质条件下,声波时差-密度变化趋势向处于纯粹化学压实作用及卸载作用之间的扇形方向变化(图4中箭头C)。

泥岩的机械压实作用向化学压实作用转变还直接体现在岩石物理参数及地球物理属性差异上<sup>[83]</sup>。在化学压实阶段,黏土矿物定向性排列使得颗粒骨架变得更加紧密,同时颗粒之间矿物沉淀使得沉积物被胶结形成内聚力,从而泥岩强度变大。因此,与机械压实作用相比,化学压实作用明显增大了泥岩的剪切模量和地震波速度,同时纵波阻抗也明显增大<sup>[83]</sup>。

地震波横波速度( $V_s$ )主要受控于岩石基质,基本不受孔隙流的影响,而纵波速度( $V_p$ )则取决于基质和流体<sup>[84]</sup>。处于化学压实阶段的泥岩如果发生孔隙流体滞留,使得泥岩维持较大的孔隙和较多的流体,进而纵波速度减小比横波速度更快,从而纵横波速度比( $V_p/V_s$ )呈现异常低值。因此,深部泥岩超压段  $V_p/V_s$  值减小的特征可以作为识别化学压实阶段泥岩超压的有效方法<sup>[85]</sup>。

## 4 重点研究方向

泥岩的机械压实作用和化学压实作用是沉积盆地内泥质沉积物埋藏过程中最普遍和最重要的地质过程,控制着泥岩岩石结构、物性演化、流体流动等。过去100年内,研究人员对泥岩机械压实作用机理

及影响因素研究得较为充分,而对泥岩化学压实作用研究则远远不够。本文在全面总结目前泥岩化学压实作用研究的进展基础上,尝试提出化学压实作用研究中有待进一步深入研究的重点问题。

#### 4.1 化学压实作用与黏土矿物结构

泥岩孔隙度和渗透率最初具有各向同性,随着埋深和温度的加大,各向异性逐渐增强,研究表明其是泥岩黏土结构定向排列导致的<sup>[3]</sup>。Charpentier等研究认为单纯的应力作用并不能导致颗粒重新定向,而在深埋条件下,几百米深度范围内泥岩黏土矿物各向异性突变现象只能用化学成岩作用来解释<sup>[63]</sup>。Nygard等则认为机械压实作用使得矿物颗粒排列方向更加规则,而化学胶结物保持泥岩的微观结构,阻碍了黏土矿物颗粒重新排列,尽管化学压实作用可以使孔隙度减小,但是对机械压实作用引起的颗粒重新排列没有明显影响<sup>[13-14]</sup>。Ho等认为在机械压实阶段,黏土矿物板状形态使得排列趋向于定向,形成平行层面排列方式,而在化学压实阶段蒙脱石向伊利石转化极大增强了黏土矿物颗粒定向排列<sup>[62,64-65]</sup>。

目前,关于泥岩中黏土矿物结构的影响因素研究仍然存在诸多不确定性,在深层地质条件下泥岩中黏土矿物结构形成与矿物成岩作用关系、硅质胶结发育规律以及对泥岩压实特征和泥岩物性的影响仍需要进一步开展更为精细的研究工作。

#### 4.2 有机质对泥岩压实作用的影响

泥页岩是有机质赋存的主要介质,有机质不仅影响着泥岩机械压实作用过程,而且有机质热解过程本身就是泥岩内非常重要的化学成岩过程,对泥岩物性、流体成分与流体压力都起着非常重要的作用<sup>[17,86-89]</sup>。

由于干酪根比大多数无机颗粒更柔软,延展性更好,压实作用更容易发生,所以当有机质含量高时,在机械压实阶段就可能使得泥岩更快地压实<sup>[88-89]</sup>。此外,有机质热演化过程中,部分显微组分发生芳香聚合作用,芳香聚片逐渐变大,并沿垂直最大主应力方向紧密排列,芳香聚片间距逐渐减小<sup>[90]</sup>,该过程亦可以导致泥岩孔隙度的降低。因此,在有机质大量转化为石油和天然气之前,富有机质页岩孔隙度和渗透率往往很低,有机质含量不同导致的孔隙度差异可达10%<sup>[89]</sup>。有机质孔隙作为页岩储集空间的重要组成部分,最多可占泥岩孔隙度的50%。但是,正如粒间孔一样,若泥页岩在持续埋藏过程中没有很好的保存条件,已形成的有机

质孔隙可能会减少<sup>[88]</sup>。

有机质孔隙在后续埋藏过程中的有效保存除了受控于有效应力外,还可能与骨架矿物的韧性以及干酪根的几何形态密切相关,但其机制目前并不清楚<sup>[88-89,91]</sup>。因此,富有机质泥岩压实过程中孔隙度演化比纯泥岩更为复杂,似乎应该表述为有效应力、有机质含量、成熟度等多因素的综合关系<sup>[17,88]</sup>。

#### 4.3 化学压实作用与泥岩流变学特征

Schneider等强调泥质沉积物中存在黏性变形行为,应该与化学成岩作用相关,而且是不可逆的<sup>[92]</sup>。在沉积物压实方程中引入与温度相关的黏滞项,随着温度和埋藏时间增大,模拟获得的非机械压实作用造成的孔隙度减小也很明显。但建立的流变学模型中对沉积物实际流变特征作了过度简化,导致对细粒沉积物压实过程中黏性变形特征的认识不够深入。Suetnova等研究发现,在正常压实范围内,泥质岩孔隙度往往要小于按机械压实机理预测的孔隙度,认为黏性形变效应对于泥岩而言在地质时间尺度非常重要<sup>[93]</sup>。

压溶是一种特殊的化学压实作用<sup>[19]</sup>,其效果具有蠕变变形特征<sup>[94]</sup>。目前,对于泥页岩中压溶作用的研究还十分薄弱,考虑压溶作用建立孔隙度与有效应力、时间及温度的关系,对压实过程中孔隙度和流体压力变化可以给出较为客观的评价<sup>[33,91-93]</sup>。

#### 4.4 化学欠压实与化学压实不平衡

当泥岩进入化学压实阶段时,在蒙脱石向伊利石转化过程中释放结构水,黏土矿物颗粒水平排列得到加强,矿物颗粒之间形成了近平行的板状扁平孔隙。这些孔隙具有较强塑性,即使在非常低的有效应力作用下,扁平孔隙也趋向于闭合。如果成岩过程中孔隙水的排出得到有效抑制,孔隙压力增大至静岩压力,此时作用于岩石上的有效应力接近于0,板状孔隙将维持开启为多余孔隙水提供空间,随着泥岩化学压实作用的进行泥岩仍然维持较大的孔隙度。Goult等称黏土矿物成岩作用造成孔隙中水的排出受阻而使泥岩的扁平孔隙保持张开的现象为化学欠压实<sup>[16]</sup>。实际上,在深层条件下黏土矿物转化晚期所产生的孔隙水是有限的,难以产生接近静岩压力的异常高压,因此,化学欠压实现象似乎另有解释<sup>[95]</sup>。

值得注意的是,在机械压实作用中欠压实与压实不平衡含义相同<sup>[42]</sup>,但是在化学压实作用中,化学压实不平衡指的是泥岩在化学压实阶段相关的溶解、沉淀等化学成岩反应进行程度与所经历



的最高地层温度之间的不平衡,意味着泥岩中的一些矿物化学反应相对于最大温度来说没有足够的时间来完成<sup>[83]</sup>,从而表现出与该温度不一致的岩石物理特征。

#### 4.5 化学成岩泥岩超压预测方法

声波速度/时差、电阻率、密度与有效应力的关系是异常压力预测的基础<sup>[96]</sup>。压力预测的精确性取决于用来确定泥岩压实趋势的岩石性质的一致性,通过将正常压实段的压实趋势线外推到异常压力段,利用异常压力段岩石属性偏离正常趋势的大小来预测压力<sup>[97]</sup>。处于化学压实阶段的泥岩表现出明显不同的特征,泥岩孔隙度随温度增大而减小,而与有效应力关系不明显。尽管化学成岩阶段的泥岩声波测井同样对于异常压力具有明显的响应,但是在机械压实不平衡地层中建立的孔隙度与有效应力之间的对应关系,不能反映深部受化学压实作用影响的超压带压力分布规律,传统压力预测方法很难预测与化学压实作用有关的超压<sup>[98-100]</sup>。

考虑化学压实作用的泥岩孔隙压力预测的关键是使用独立于有效应力-孔隙度关系的方法<sup>[96]</sup>,前人提出了伊利石压实曲线法<sup>[54]</sup>、流体滞留深度法(FRD)<sup>[96]</sup>、纵横波速度比法<sup>[85]</sup>以及数值模拟法<sup>[101]</sup>等。由于对于泥岩化学压实作用及其与异常压力关系的认识还很薄弱,目前还没有普遍适用于经历过化学成岩作用的泥岩压力预测模型。

## 5 结 语

(1)化学压实作用在泥质沉积物中十分普遍且重要,主要受到时间、温度和矿物成分影响。随埋深增加和温度升高,泥岩化学压实作用对于岩石性质的影响逐渐变强,甚至起主导作用。目前研究较为清楚的化学压实作用是黏土矿物转化,尤以蒙脱石向伊利石转化为最。

(2)黏土矿物成岩转化过程中,矿物层间水脱水及其密度变化导致的泥岩体积膨胀可能性不大,但可能伴随泥岩骨架弱化、有效应力向流体系统转移等效应,而伴随黏土成岩过程的硅质胶结和结构变化将显著降低泥岩渗透率,并可能明显改变泥岩压实系数。

(3)蒙脱石向伊利石转化过程导致有效应力-孔隙度关系变化,使得压实曲线从蒙脱石曲线向伊利石曲线转换,测井响应上表现为声波时差减小和密度增大的趋势。这种变化往往与卸载作用效应相叠加,对应的压实曲线在声波时差-密度交会图中向着

密度不变、声波时差增大的方向偏移。泥岩的化学压实作用还表现出较低的纵横波速度比以及较高的波阻抗和剪切模量。

(4)目前,泥岩的化学压实作用研究中存在许多需要进一步研究认识的问题,包括化学压实作用与黏土矿物结构、有机质对泥岩压实作用的影响、化学压实作用与泥岩流变学特征、化学欠压实与化学压实不平衡以及化学成岩泥岩超压预测方法等。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] APLIN A C, MACQUAKER J H S. Mudstone Diversity: Origin and Implications for Source, Seal, and Reservoir Properties in Petroleum Systems[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.
- [2] ATHY L F. Density, Porosity, and Compaction of Sedimentary Rocks[J]. AAPG Bulletin, 1930, 14(1): 1-24.
- [3] MAGARA K. Compaction and Fluid Migration: Practical Petroleum Geology [M]. Amsterdam: Elsevier, 1978.
- [4] SKEMPTON A W. The Consolidation of Clays by Gravitational Compaction[J]. Quarterly Journal of the Geological Society, 1969, 125(1/2/3/4): 373-411.
- [5] BURLAND J B. On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 329-378.
- [6] NOORAIEPOUR M, MONDOL N H, HELLEVANG H, et al. Experimental Mechanical Compaction of Reconstituted Shale and Mudstone Aggregates: Investigation of Petrophysical and Acoustic Properties of SW Barents Sea Cap Rock Sequences[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 80: 265-292.
- [7] HOLBROOK P. The Primary Controls over Sediment Compaction[J]. AAPG Memoir, 2002, 76: 21-32.
- [8] YANG Y L, APLIN A C. Definition and Practical Application of Mudstone Porosity-effective Stress Relationships[J]. Petroleum Geoscience, 2004, 10(2): 153-162.
- [9] DEWHURST D N, APLIN A C, SARDA J P, et al. Compaction-driven Evolution of Porosity and Permeability in Natural Mudstones: An Experimental Study [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1998, 103(B1): 651-661.
- [10] LUO X R, VASSEUR G. Contributions of Compaction and Aquathermal Pressuring to Geopressure and the Influence of Environmental Conditions [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(10): 1550-1559.



- [11] LUO X R, VASSEUR G. Modelling of Pore Pressure Evolution Associated with Sedimentation and Uplift in Sedimentary Basins[J]. *Basin Research*, 1995, 7(1): 35-52.
- [12] APLIN A C, YANG Y L, HANSEN S. Assessment of  $\beta$ , the Compression Coefficient of Mudstones and Its Relationship with Detailed Lithology[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(8): 955-963.
- [13] NYGARD R, GUTIERREZ M, GAUTAM R, et al. Compaction Behavior of Argillaceous Sediments as Function of Diagenesis[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(3): 349-362.
- [14] NYGARD R, GUTIERREZ M, HOEG K, et al. Influence of Burial History on Microstructure and Compaction Behavior of Kimmeridge Clay[J]. *Petroleum Geoscience*, 2004, 10(3): 259-270.
- [15] MONDOL N H, BJORLYKKE K, JAHREN J, et al. Experimental Mechanical Compaction of Clay Mineral Aggregates: Changes in Physical Properties of Mudstones During Burial[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(5): 289-311.
- [16] GOULTY N R, RAMDHAN A M, JONES S J. Chemical Compaction of Mudrocks in the Presence of Overpressure[J]. *Petroleum Geoscience*, 2012, 18(4): 471-479.
- [17] LI C, ZHANG L K, LUO X R, et al. Calibration of the Mudrock Compaction Curve by Eliminating the Effect of Organic Matter in Organic-rich Shales: Application to the Southern Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 620-635.
- [18] SCHMOKER J W, GAUTIER D L. Compaction of Basin Sediments: Modeling Based on Time-temperature History[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B6): 7379-7386.
- [19] 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.
- [20] BJORLYKKE K. Principle Aspects of Compaction and Fluid Flow in Mudstones[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1999, 158: 73-78.
- [21] STORVOLL V, BJORLYKKE K, MONDOL N H. Velocity-depth Trends in Mesozoic and Cenozoic Sediments from the Norwegian Shelf[J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(3): 359-381.
- [22] LAHANN R W, SWARBRICK R E. Overpressure Generation by Load Transfer Following Shale Framework Weakening Due to Smectite Diagenesis[J]. *Geofluids*, 2011, 11(4): 362-375.
- [23] POTTER P E, MAYNARD J B, DEPETRIS P J. *Mud and Mudstones: Introduction and Overview*[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [24] BJORLYKKE K, HOEG K. Effects of Burial Diagenesis on Stresses, Compaction and Fluid Flow in Sedimentary Basins[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 14(3): 267-276.
- [25] LANDER R H, WALDERHAUG O. Predicting Porosity Through Simulating Sandstone Compaction and Quartz Cementation[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(3): 433-449.
- [26] GIORGETTI G, MATA M P, PEACOR D R. TEM Study of the Mechanism of Transformation of Detrital Kaolinite and Muscovite to Illite/Smectite in Sediments of the Salton Sea Geothermal Field[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2000, 12(5): 923-934.
- [27] NADEAU P H, PEACOR D R, YAN J, et al. I-S Precipitation in Pore Space as the Cause of Geopressuring in Mesozoic Mudstones, Egersund Basin, Norwegian Continental Shelf[J]. *American Mineralogist*, 2002, 87(11/12): 1580-1589.
- [28] YANG X S. *Mathematical Modelling of Compaction and Diagenesis in Sedimentary Basins*[D]. Oxford: University of Oxford, 1997.
- [29] BETHKE C M. Inverse Hydrologic Analysis of the Distribution and Origin of Gulf Coast-type Geopressured Zones[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B6): 6535-6545.
- [30] VELDE B, VASSEUR G. Estimation of the Diagenetic Smectite to Illite Transformation in Time-temperature Space[J]. *American Mineralogist*, 1992, 77(9/10): 967-976.
- [31] HUANG W L, LONGO J M, PEVEAR D R. An Experimentally Derived Kinetic Model for Smectite-to-illite Conversion and Its Use as a Geothermometer[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1993, 41(2): 162-177.
- [32] WALDERHAUG O. Kinetic Modeling of Quartz Cementation and Porosity Loss in Deeply Buried Sandstone Reservoirs[J]. *AAPG Bulletin*, 1996, 80(5): 731-745.
- [33] FOWLER A C, YANG X S. Pressure Solution and Viscous Compaction in Sedimentary Basins[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B6): 12989-12997.
- [34] 石广仁. 蒙皂石向伊利石转化的溶解沉淀模型[J]. *石油学报*, 2006, 27(6): 47-50.  
SHI Guang-ren. Dissolution-precipitation Model for Smectite-illite Transformation[J]. *Acta Petrolei Sinica*,

- 2006, 27(6): 47-50.
- [35] 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 Guang-ren. Numerical Modeling for the Smectite to Illite Transformation: Dissolution-precipitation Model and Kinetic Model[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5): 693-700.
- [36] BURST J F. Diagenesis of Gulf Coast Clayed Sediments and Its Possible Relation to Petroleum Migration[J]. AAPG Bulletin, 1969, 53(1): 73-93.
- [37] HOWER J, ESLINGER E V, HOWER M E, et al. Mechanism of Burial Metamorphism of Argillaceous Sediment; 1. Mineralogical and Chemical Evidence[J]. Geological Society of America Bulletin, 1976, 87(5): 725-737.
- [38] POWERS M C. Fluid-release Mechanisms in Compacting Marine Mudrocks and Their Importance in Oil Exploration[J]. AAPG Bulletin, 1967, 51(7): 1240-1254.
- [39] INOUE A, UTADA M, WAKITA K. Smectite-to-illite Conversion in Natural Hydrothermal Systems[J]. Applied Clay Science, 1992, 7(1/2/3): 131-145.
- [40] RASK J H, BRYNDZIA L T, BRAUNSDORF N R, et al. Smectite Illitization in Pliocene-age Gulf of Mexico Mudrocks[J]. Clays and Clay Minerals, 1997, 45(1): 99-109.
- [41] AHN J H, PEACOR D R. Transmission and Analytical Electron Microscopy of the Smectite-to-illite Transition [J]. Clays and Clay Minerals, 1986, 34(2): 165-179.
- [42] OSBORNE M J, SWARBRICK R E. Mechanisms for Generating Overpressure in Sedimentary Basins: A Reevaluation[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 1023-1041.
- [43] OSBORNE M J, SWARBRICK R E. Diagenesis in North Sea HPHT Clastic Reservoirs-consequences for Porosity and Overpressure Prediction[J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(4): 337-353.
- [44] BOLES J R, FRANKS S G. Clay Diagenesis in Wilcox Sandstones of Southwest Texas: Implications of Smectite Diagenesis on Sandstone Cementation[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1979, 49(1): 55-70.
- [45] EBERL D, HOWER J. The Hydrothermal Transformation of Sodium and Potassium Smectite into Mixed-layer Clay [J]. Clays and Clay Minerals, 1977, 25(3): 215-227.
- [46] LAHANN R W, ROBERSON H E. Dissolution of Silica from Montmorillonite: Effect of Solution Chemistry[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(12): 1937-1943.
- [47] ELLIOTT W C, MATISOFF G. Evaluation of Kinetic Models for the Smectite to Illite Transformation[J]. Clays and Clay Minerals, 1996, 44(1): 77-87.
- [48] 季峻峰, BROWNE P R L, 刘英俊, 等. 活动地热区蒙皂石向伊利石转变的动力学模型[J]. 科学通报, 1997, 42(21): 2313-2316.
- JI Jun-feng, BROWNE P R L, LIU Ying-jun, et al. Kinetic Model for the Smectite to Illite Transformation in Active Geothermal Systems[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(21): 2313-2316.
- [49] VELDE B, VASSEUR G. Estimation of the Diagenetic Smectite to Illite Transformation in Time-temperature Space[J]. American Mineralogist, 1992, 77(9/10): 967-976.
- [50] FREED R L, PEACOR D R. Geopressured Shale and Sealing Effect of Smectite to Illite Transition [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(10): 1223-1232.
- [51] LUO X R. Modelling of Abnormal Pressure and Associated Geological Phenomena in Sedimentary Basins [D]. Montpellier: University of Montpellier II, 1994.
- [52] BJORKUM P A, NADEAU P H. Temperature Controlled Porosity/Permeability Reduction Fluid Migration and Petroleum Exploration in Sedimentary Basins [J]. APPEA Journal, 1998, 38(1): 453-464.
- [53] 罗晓容. 数值盆地模拟方法在地质研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 6-10.
- LUO Xiao-rong. The Application of Numerical Basin Modeling in Geological Studies[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2): 6-10.
- [54] LAHANN R. Impact of Smectite Diagenesis on Compaction Modeling and Compaction Equilibrium [J]. AAPG Memoir, 2002, 76: 61-72.
- [55] PERRY E A, HOWER J. Late-stage Dehydration in Deeply Buried Pelitic Sediments[J]. AAPG Bulletin, 1972, 56(10): 2013-2021.
- [56] 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.
- [57] MARTIN R T. Adsorbed Water on Clay: A Review [J]. Clays and Clay Minerals, 1960, 9(1): 28-70.
- [58] MAGARA K. Reevaluation of Montmorillonite Dehydration as Cause of Abnormal Pressure and Hydrocarbon Migration[J]. AAPG Bulletin, 1975, 59(2): 292-302.

- [59] SWARBRICK R E, OSBORNE M J, YARDLEY G S. Comparison of Overpressure Magnitude Resulting from the Main Generating Mechanisms[J]. AAPG Memoir, 2002, 76: 1-12.
- [60] LAHANN R W, LAHANN W, MCCARTY D K, et al. Influence of Clay Diagenesis on Shale Velocities and Fluid-pressure[C]// OTC Program Committee. The 2001 Offshore Technology Conference. Houston: OTC Program Committee, 2001: 13046.
- [61] BROWN K M, RANSOM B. Porosity Corrections for Smectite-rich Sediments: Impact on Studies of Compaction, Fluid Generation, and Tectonic History[J]. Geology, 1996, 24(9): 843-846.
- [62] HO N C, PEACOR D R, VAN DER PLUIJM B A. Preferred Orientation of Phyllosilicates in Gulf Coast Mudstones and Relation to the Smectite-illite Transition[J]. Clays and Clay Minerals, 1999, 47(4): 495-504.
- [63] CHARPENTIER D, WORDEN R H, DILLON C G, et al. Fabric Development and the Smectite to Illite Transition in Gulf of Mexico Mudstones: An Image Analysis Approach[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78/79: 459-463.
- [64] APLIN A C, MATENAAR I F, VAN DER PLUIJM B A. Influence of Mechanical Compaction and Chemical Diagenesis on the Microfabric and Fluid Flow Properties of Gulf of Mexico Mudstones[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78/79: 449-451.
- [65] APLIN A C, MATENAAR I F, MCCARTY D K, et al. Influence of Mechanical Compaction and Clay Mineral Diagenesis on the Microfabric and Pore-scale Properties of Deep-water Gulf of Mexico Mudstones[J]. Clays and Clay Minerals, 2006, 54(4): 500-514.
- [66] PLUMLEY W J. Abnormally High Fluid Pressure: Survey of Some Basic Principles[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(3): 414-430.
- [67] THYBERG B, JAHREN J, WINJE T, et al. Quartz Cementation in Late Cretaceous Mudstones, Northern North Sea: Changes in Rock Properties Due to Dissolution of Smectite and Precipitation of Micro-quartz Crystals[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(8): 1752-1764.
- [68] FOSTER W R. Smectite-illite Transformation: Its Role in Generating and Maintaining Geopressure[C]// SEG. 1982 SEG Annual Meeting, Dallas: SEG, 1982: 506-508.
- [69] KALANI M, ZADEH M K, JAHREN J, et al. Effect of Diagenesis on Pore Pressures in Fine-grained Rocks in the Egersund Basin, Central North Sea[J]. Norwegian Journal of Geology, 2015, 95(2): 171-189.
- [70] APLIN A C, FLEET A J, MACQUAKER J H S. Mudstones and Mudstones: Physical and Fluid-flow Properties[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1999, 158: 1-8.
- [71] WILLIAMS L A, PARKS G A, CRERAR D A. Silica Diagenesis: I. Solubility Controls[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1985, 55(3): 301-311.
- [72] KATAHARA K. Analysis of Overpressure on the Gulf of Mexico Shelf[C]// OTC Program Committee. The 2003 Offshore Technology Conference. Houston: OTC Program Committee, 2003: 15293.
- [73] KATAHARA K. Overpressure and Shale Properties: Stress Unloading or Smectite-illite Transformation[C]// SEG. 2006 SEG Annual Meeting, New Orleans: SEG, 2006: 1520-1524.
- [74] TINGAY M R P, HILLIS R R, SWARBRICK R E, et al. 'Vertically Transferred' Overpressures in Brunei: Evidence for a New Mechanism for the Formation of High-magnitude Overpressure[J]. Geology, 2007, 35(11): 1023-1026.
- [75] 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.
- [76] GOULTY N R, SARGENT C, ANDRAS S P, et al. Compaction of Diagenetically Altered Mudstones Part 1: Mechanical and Chemical Contributions[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 77: 703-713.
- [77] GOULTY N R, SARGENT C. Compaction of Diagenetically Altered Mudstones Part 2: Implications for Pore Pressure Estimation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 77: 806-818.
- [78] DUTTA N C. Geopressure Prediction Using Seismic Data: Current Status and the Road Ahead[J]. Geophysics, 2002, 67(6): 2012-2041.
- [79] HOESNI M J. Origins of Overpressure in the Malay Basin and Its Influence on Petroleum Systems[D]. Durham: University of Durham, 2004.
- [80] RAMDHAN A M, GOULTY N R. Overpressure and Mudrock Compaction in the Lower Kutai Basin, Indonesia: A Radical Reappraisal[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(10): 1725-1744.
- [81] SARGENT C, GOULTY N R, CICCHINO A M P, et al. Budge-fudge Method of Pore-pressure Estimation from Wireline Logs with Application to Cretaceous Mudstones at Haltenbanken[J]. Petroleum Geoscience, 2015, 21(4): 219-232.



- [ 82 ] BOWERS G L, KATSUBE T J. The Role of Shale Pore Structure on the Sensitivity of Wire-line Logs to Overpressure[J]. AAPG Memoir, 2002, 76: 43-60.
- [ 83 ] STORVOLL V, BREVIK I. Identifying Time, Temperature, and Mineralogical Effects on Chemical Compaction in Shales by Rock Physics Relations [J]. The Leading Edge, 2008, 27(6): 750-756.
- [ 84 ] DUTTA N C. Deepwater Geohazard Prediction Using Prestack Inversion of Large Offset  $P$ -wave Data and Rock Model[J]. The Leading Edge, 2002, 21(2): 193-198.
- [ 85 ] JOHN A. Pore-pressure Prediction Challenges in Chemical Compaction Regimes: An Alternative  $V_p/V_s$ -based Approach[J]. Interpretation, 2016, 4(4): 443-454.
- [ 86 ] LUO X R, VASSEUR G. Geopressuring Mechanism of Organic Matter Cracking: Numerical Modeling[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(6): 856-874.
- [ 87 ] 李超, 张立宽, 罗晓容, 等. 泥岩压实研究中有有机质导致声波时差异常的定量校正方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2016, 40(3): 77-87.  
LI Chao, ZHANG Li-kuan, LUO Xiao-rong, et al. A Quantitative Method for Revising Abnormally High Sonic Data in Rich-organic Rock During Compaction Study[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2016, 40(3): 77-87.
- [ 88 ] CREMON M, BURNHAM A K, LIU Y M, et al. Modified Athy-law Compaction to Account for Porosity Generation and Preservation from Kerogen Conversion in Terzaghi-like Models of Petroleum Source Rocks[C]// AAPG. AAPG 2017 Annual Convention and Exhibition. Houston: AAPG, 2017: 90291.
- [ 89 ] BURNHAM A K. Porosity and Permeability of Green River Oil Shale and Their Changes During Retorting [J]. Fuel, 2017, 203: 208-213.
- [ 90 ] HOWER J C, DAVIS A. Vitrinite Reflectance Anisotropy as a Tectonic Fabric Element[J]. Geology, 1981, 9(4): 165-168.
- [ 91 ] FISHMAN N S, HACKLEY P C, LOWERS H A, et al. The Nature of Porosity in Organic-rich Mudstones of the Upper Jurassic Kimmeridge Clay Formation, North Sea, Offshore United Kingdom[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103: 32-50.
- [ 92 ] SCHNEIDER F, POTDEVIN J L, WOLF S, et al. Mechanical and Chemical Compaction Model for Sedimentary Basin Simulators[J]. Tectonophysics, 1996, 263(1/2/3/4): 307-317.
- [ 93 ] SUETNOVA E, VASSEUR G. 1-D Modelling Rock Compaction in Sedimentary Basins Using a Viscoelastic Rheology[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 178(3/4): 373-383.
- [ 94 ] DEWERS T, HAJASH A. Rate Laws for Water-assisted Compaction and Stress-induced Water-rock Interaction in Sandstones [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1995, 100(B7): 13093-13112.
- [ 95 ] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 973-998.  
ZHAO Jing-zhou, LI Jun, XU Ze-yang. Advances in the Origin of Overpressures in Sedimentary Basins [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(9): 973-998.
- [ 96 ] SWARBRICK R. Review of Pore-pressure Prediction Challenges in High-temperature Areas[J]. The Leading Edge, 2012, 31(11): 1288-1294.
- [ 97 ] ZHANG J C. Pore Pressure Prediction from Well Logs: Methods, Modifications, and New Approaches[J]. Earth-science Reviews, 2011, 108(1/2): 50-63.
- [ 98 ] ALBERTY M W, MCLEAN M R. Emerging Trends in Pressure Prediction[C]// OTC Program Committee. The 2003 Offshore Technology Conference. Houston: OTC Program Committee, 2003: 15290.
- [ 99 ] GOULTY N R, RAMDHAN A M. The Challenge of Pore Pressure Estimation in Diagenetically Consolidated Mudrocks[J]. First Break, 2012, 30(12): 67-72.
- [ 100 ] ZHANG J, YIN S. Real-time Pore Pressure Detection: Indicators and Improved Methods[J]. Geofluids, 2017, 1: 1-12.
- [ 101 ] NGUYEN B T T, KIDO M, OKAWA N, et al. Compaction of Smectite-rich Mudstone and Its Influence on Pore Pressure in the Deepwater Joetsu Basin, Sea of Japan[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 78: 848-869.