



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2407165

引用格式:许晨航,李军,吴涛,等.准噶尔盆地腹部地区泥页岩成岩演化阶段及其对超压发育的影响[J].科学技术与工程,2025,25(17):7080-7091.

Xu Chenhang, Li Jun, Wu Tao, et al. Diagenetic evolution stage of mud shale and its influence on overpressure development in the central Junggar Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(17): 7080-7091.

## 准噶尔盆地腹部地区泥页岩成岩演化阶段及其对超压发育的影响

许晨航<sup>1,2</sup>, 李军<sup>1,2\*</sup>, 吴涛<sup>3</sup>, 吾尔妮萨罕·麦麦提敏<sup>3</sup>, 杜治伟<sup>1,2</sup>, 范佳怡<sup>1,2</sup>, 马鸿斌<sup>1,2</sup>

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710065; 2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 西安 710065;

3. 中国石油新疆油田公司, 克拉玛依 834000)

**摘要** 泥页岩的成岩作用研究是成岩体系、孔隙结构以及地层超压成因分析的重要内容。综合运用X衍射、测井曲线、实测孔隙度等资料,定量分析了准噶尔盆地腹部地区黏土矿物转化量,结合温度、测井曲线、孔隙度等厘定了泥页岩成岩演化阶段,并探讨了超压发育机制。研究表明,准噶尔盆地腹部地区泥页岩的成岩演化主要可以分为3个阶段。在0~2400 m,机械压实主导阶段,该阶段黏土矿物含量主要受沉积物源影响,含量及转化量变化不大,声波测井计算孔隙度略大于密度测井计算孔隙度,声波时差(AC)、密度(DEN)、补偿中子(CNL)曲线均减小,电阻率(RT)曲线增大。在2400~4200 m,化学压实与机械压实过渡阶段,伊蒙混层开始向伊利石、绿泥石转化,密度测井计算孔隙度与声波测井计算孔隙度相当,AC、DEN、CNL曲线减小幅度变缓,RT曲线小幅反转。在4200 m以下,化学压实主导阶段,黏土矿物开始大量转化,长石开始大量溶蚀。随着深度增加,温度压力逐渐升高,温度达到120℃左右时,高岭石向伊利石转化,钾长石含量几乎降为0%,密度测井计算孔隙度小幅偏离正常演化趋势,声波测井计算孔隙度大幅偏离正常演化趋势,AC、DEN、CNL、RT曲线均发生反转。超压成因为复合成因,化学压实是研究区超压的主要成因之一。

**关键词** 泥页岩成岩作用; 孔隙演化; 测井响应; 超压; 准噶尔盆地腹部

中图分类号 P618.13; 文献标志码 A

### Diagenetic Evolution Stage of Mud Shale and Its Influence on Overpressure Development in the Central Junggar Basin

XU Chen-hang<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>1,2\*</sup>, WU Tao<sup>3</sup>, WUERNISAHAN·Maimaitimin<sup>3</sup>, DU Zhi-wei<sup>1,2</sup>,  
FAN Jia-yi<sup>1,2</sup>, MA Hong-bin<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China)

**[Abstract]** The study of diagenesis of shale is an important part of the analysis of diagenesis system, pore structure and formation overpressure. Based on the data of X-ray diffraction, logging curve and measured porosity, the transformation amount of clay minerals in the hinterland of Junggar Basin was quantitatively analyzed. Combined with temperature, logging curve and porosity, the diagenetic evolution stage of shale was determined, and the mechanism of overpressure development was discussed. The study shows that the diagenetic evolution of shale in the hinterland of Junggar Basin can be divided into three stages. At the dominant stage of mechanical compaction from 0 m to 2400 m, the clay mineral content in this stage is mainly affected by sediment sources, and the content and conversion amount have little change. The porosity calculated by acoustic logging is slightly larger than that calculated by density logging. The sonic time difference (AC), density (DEN) and compensated neutron (CNL) curves all decrease, while the resistivity (RT) curves increase. From 2400 m to 4200 m, during the transition stage between chemical compaction and mechanical compaction, illite-montmorillonite mixed layer began to transform into illite and chlorite, and the porosity calculated by density logging is equivalent to that calculated by acoustic logging. The curve of AC, DEN and CNL decreases slowly, and the RT curve slightly reverses. Below 4200 m,

收稿日期: 2024-09-25 修订日期: 2025-03-20

基金项目: 西安石油大学青年科研创新团队(2019QNKYCXTD06)

第一作者: 许晨航(1999—),男,汉族,河南郑州人,硕士研究生。研究方向:非常规油气地质学、储层地质学。E-mail:743113172@qq.com。

\*通信作者: 李军(1982—),男,汉族,重庆万州人,博士,副教授。研究方向:非常规油气、油气成藏地质学及天然气地质学。E-mail:lijun@xsyu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

in the dominant stage of chemical compaction, clay minerals begin to transform in large quantities, and feldspar begins to dissolve in large quantities. With the increase of depth, temperature and pressure gradually increase. When the temperature reaches about 120 °C, kaolinite transforms into illite, and the content of potassium feldspar drops to almost 0%. The porosity calculated by density logging slightly deviates from the normal evolution trend, while the porosity calculated by sonic logging significantly deviates from the normal evolution trend, and the AC, DEN, CNL and RT curves all invert. Chemical compaction is one of the main causes of overpressure in the study area.

[**Keywords**] mud shale diagenesis; pore evolution; logging response; overpressure; hinterland of Junggar Basin

对于成岩作用,早在 20 世纪就已经受到学者的广泛关注,不过早期的研究主要针对砂岩及碳酸盐岩储层<sup>[1]</sup>,经过近 50 年的发展,研究方向逐渐转向泥页岩,并从定性描述其对储层影响逐渐向量化精细描述储层成岩作用特征转变<sup>[1-3]</sup>。泥页岩的成岩作用是现今非常规油气勘探及油气储层地质学研究热点之一,同时也是研究较为薄弱的方向之一<sup>[1]</sup>。除此之外,泥页岩成岩演化分析还是超压成因研究的重要内容之一。

现在的研究认为,泥页岩的成岩作用相对复杂,埋藏深度、黏土矿物、地层温度、流体酸碱性及地层超压都会对泥页岩的成岩作用有所影响。目前主要取得的研究进展如下。第一,泥页岩的成岩演化主要被分为机械压实、机械压实-化学压实过渡段及化学压实阶段,过渡段是化学压实和机械压实同时存在的阶段<sup>[1,4-6]</sup>。不同阶段对超压发育、孔隙结构演化、测井响应影响不同。第二,早期的研究指出成岩演化主要受到温度和控制,随着研究的深入,发现温度、时间、压力、应力、流体酸碱性都对成岩作用有影响,温度、压力、应力场等耦合下的成岩作用研究是未来泥页岩成岩作用研究的一个热点<sup>[1]</sup>。第三,超压研究的进展,尤其是对化学压实成因超压研究的不断深入,对泥页岩成岩作用研究产生了巨大影响<sup>[6-7]</sup>。吴涛等<sup>[8]</sup>认为超压可以促进溶蚀作用,田兵等<sup>[9]</sup>认为超压可以抑制黏土矿物转化,抑制碳酸盐矿物及硅质矿物的胶结。

前人研究表明,准噶尔盆地腹部深层地层广泛发育超压,而成岩作用(化学压实)对超压形成具有重要作用<sup>[10-11]</sup>。莫索湾凸起上的超压顶界面一般位于 J<sub>1s</sub>,深度位于 4 000 ~ 4 600 m,莫索湾凸起东部超压段压力(最高可达到 105.98 MPa,压力系数最高可达到 2.11)要高于莫索湾凸起西部超压段压力(最高可达到 78.50 MPa,压力系数最高可达到 1.59)。莫索湾凸起主要分布在西南部,超压的平面特征表现为明显的东强西弱,由凸起内向凸起外超压有逐渐减弱的趋势<sup>[10]</sup>。

目前世界上许多盆地划分压实阶段时只考虑了温度这一因素,实际上,成岩阶段的改变会导致岩石物理化学性质发生变化,其在测井曲线、孔隙

演化等方向都会有相应的特征出现。Neddeau 等<sup>[12]</sup>在划分时只考虑了温度与有效应力,并没有考虑黏土矿物的转化、孔隙演化、测井曲线特征对阶段划分的影响;Gouly 等<sup>[13]</sup>在划分时虽考虑了黏土矿物对其的影响,但也没有考虑其他特征对其相应阶段的划分是否具有一致性;刘阳等<sup>[14]</sup>在对鄂尔多斯盆地成岩序列划分时,将其划分为机械压实-胶结作用、溶蚀作用;王飞腾等<sup>[15]</sup>通过热模拟实验对黏土矿物转化进行了定量表征,其研究表明,随着成岩演化程度加深,高岭石含量呈现递减趋势,而伊利石及伊利石/蒙皂石(I/S)混层矿物则表现出显著富集特征,绿泥石含量则相对稳定或呈现微量增长现象。

研究证明,仅依靠温度这一因素并不能十分准确地划分成岩阶段,有一定的局限性。除此之外,泥页岩的成岩阶段划分并不局限于机械压实段与化学压实段,越来越多的学者注意到,在机械压实段与化学压实段之间应存在一个过渡段,过渡段的特征与机械压实段与化学压实段特征都不完全相同。特别是在超压发育的盆地,往往这样的特征更加明显。

现以准噶尔盆地腹部地区侏罗系及其上覆地层为主要研究对象,综合运用 X 衍射、实测孔隙度、测井曲线等实验资料,定量分析黏土矿物转化量,并结合温度、孔隙度、测井曲线等因素划分研究区成岩演化阶段,并探讨各种黏土矿物发生转化的环境和转化程度,厘清泥页岩的成岩演化不同阶段的测井响应、孔隙演化及超压发育的特征。

## 1 地质背景

准噶尔盆地位于中国新疆北部,占地面积约  $1.36 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,是一个大型叠合含油气盆地<sup>[16]</sup>。准噶尔盆地地处欧亚大陆板块东部的边缘,是由构造、岩浆等多期多种地质作用形成的。盆地内部地貌多样,构造运动复杂多变,被扎伊尔山、克拉美丽山、北天山和青格里底山所环绕。它是一个经历了多次构造运动的大型含油气盆地,由 8 个主要构造单元组成,包括乌伦古坳陷、陆梁隆起、中央隆起、中央坳陷、东部隆起、车排子隆起、克夏断阶带和北

天山山前拗陷。中央拗陷、中央隆起和北天山山前拗陷的一部分构成了盆地的腹部地区,其中包括四棵树凹陷、昌吉凹陷、中拐凸起、马桥凸起、白家海凸起、玛湖凹陷、达巴松凸起、盆1井西凹陷、莫索湾凸起、莫北凸起和东道海子北凹陷<sup>[17-19]</sup>(图1)。

盆地自古生代至第四纪经历了海西、印支、燕山、喜山运动的多旋回构造发展,即:晚石炭世—早二叠世的海相或残留海相前陆盆地阶段,中—晚二叠世的陆相前陆盆地阶段,三叠—白垩纪的陆内拗陷阶段,第三—第四纪的类前陆盆地阶段,总体来看沉积了石炭系至第四系地层,即:盆地自下而上发育了石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系<sup>[20-21]</sup>。

## 2 泥页岩的矿物组成及成岩阶段划分

### 2.1 矿物组成特征

蒙脱石、伊利石、绿泥石、伊/蒙混层、高岭石等黏土矿物是泥页岩的重要组成部分。黏土矿物之间的相互转化,是泥页岩中成岩作用研究的重点<sup>[22]</sup>。借助X射线衍射实验资料,并结合地质报告具体分析泥页岩中主要的4种黏土矿物含量随深度变化特征。

根据X射线衍射实验资料,发现研究区从浅层

到深层都不含单独的蒙脱石,蒙脱石均以伊/蒙混层的形式存在。伊/蒙混层的含量在浅层的变化主要受到沉积物源的影响<sup>[23]</sup>。随着深度的增加,温度的升高,伊/蒙混层的含量会逐渐减少,直到接近0%[图2(d)]。

伊利石的含量在纵向上总体呈现增加的趋势,在0~2 400 m的地层中,伊利石的含量主要受到沉积物源的影响,因此含量变化不大;在2 400~4 200 m,伊利石有小幅增加,说明伊/蒙混层、钾长石等矿物已经开始向伊利石转化<sup>[24-25]</sup>;在4 200 m以下,伊利石含量大量增加[图2(a)]。

高岭石的含量从上到下也呈现增加的趋势,在0~2 400 m的浅层深度,高岭石的含量主要受到沉积物源变化的影响,含量非常少,上下变化不大;在2 400~4 200 m,高岭石含量与上覆地层变化不大,说明其他矿物还没有开始向高岭石转化;在4 200 m以下,高岭石含量开始大量增加,其他黏土矿物开始发生高岭石化<sup>[26]</sup>[图2(b)]。

绿泥石的含量与高岭石含量的变化趋势较一致。在0~2 400 m的浅层深度,含量非常少,上下变化不大;在2 400~4 200 m,绿泥石含量有所增加,但幅度较小;在4 200 m以下,含量开始大量增加。

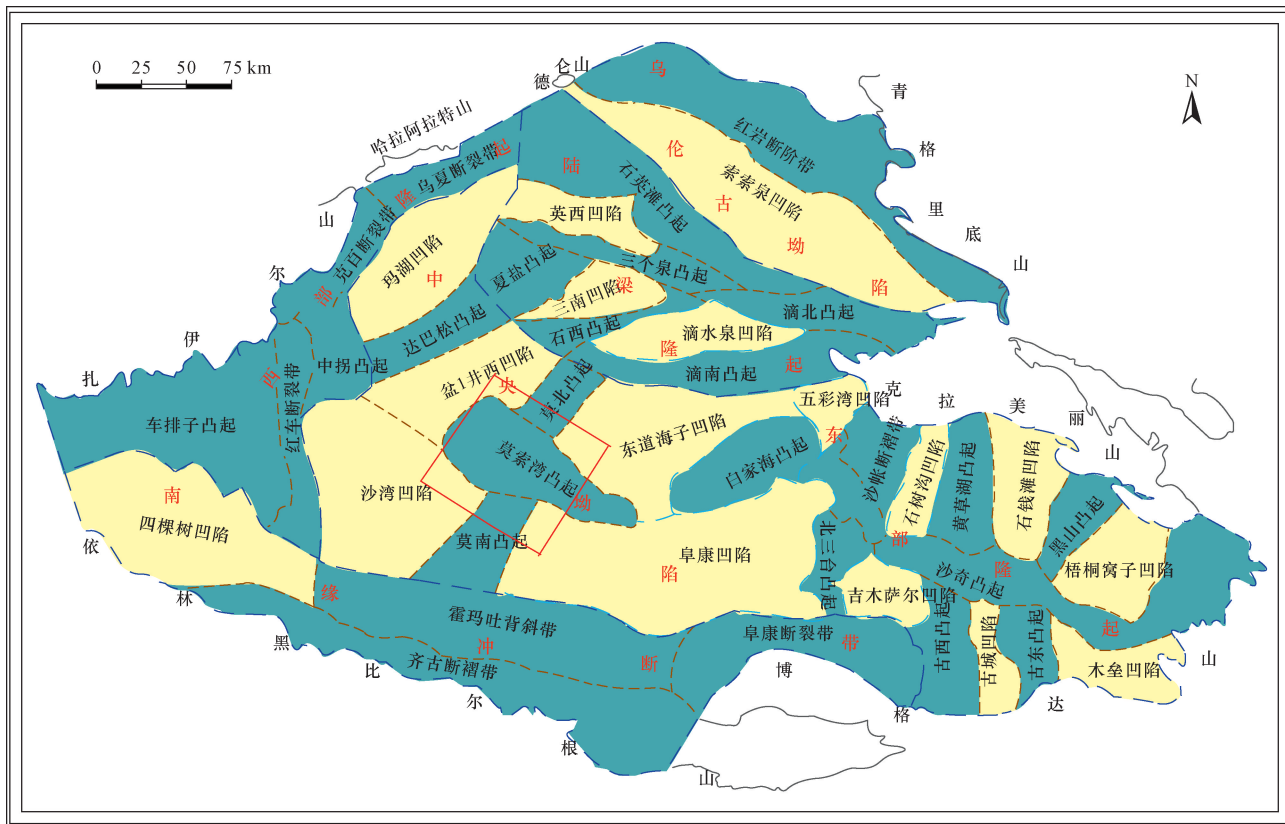


图1 准噶尔盆地构造单元划分图  
Fig. 1 Division map of tectonic units in Junggar Basin

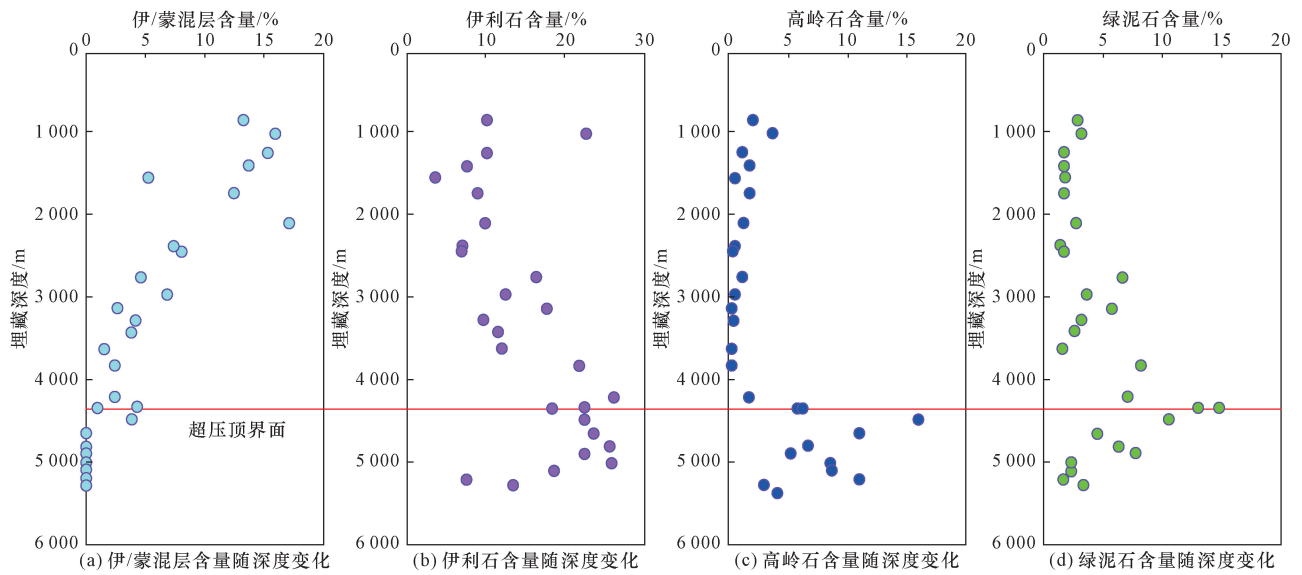


图2 不同黏土矿物含量随深度变化图

Fig. 2 The variation of different clay mineral content with depth

2.2 黏土矿物转化

黏土矿物之间会相互转化,一种黏土矿物可以同时转化为两种甚至多种不同的矿物,除此之外,长石溶蚀也可以产生不同的黏土矿物<sup>[24-26]</sup>。但矿物之间的转化关系并不十分清楚,哪种反应是主要的,哪种反应是次要的;矿物有多少是原始沉积下来的,多少是其他矿物转化而来;有多少转化为了其他矿物。这些问题都不是十分明确。

单纯分析黏土矿物的含量并不能说明实际有哪些反应发生。因此借助不同矿物之间的相关性,并结合相应的地质条件来分析具体发生了哪种反应。

2.2.1 伊利石转化特征

伊利石的含量与伊/蒙混层含量呈负相关,说明伊利石的生成与伊/蒙混层中蒙脱石的伊利石化有关;长石的含量与伊利石的含量也有负相关性,但钾长石和斜长石与伊利石含量的相关性并不一致,与钾长石的负相关性更强,与斜长石的稍弱,这与斜长石需要先钠长石化后,钠长石再生成伊利石有关<sup>[25]</sup>;伊利石与高岭石含量的相关性有明显的两段性,正相关性的部分是因为长石溶蚀生成伊利石与高岭石,而负相关性的部分则是高岭石在 120 °C 以上的环境下发生伊利石化导致的(图 3)。

蒙脱石的伊利石化[反应式(1)]是伊利石的第一个重要来源,其一直是黏土矿物转化中研究的重点,蒙脱石的伊利石化会改变泥页岩的化学成分,获取泥页岩化学流体中的钾离子,释放亚铁离子和镁离子<sup>[26-28]</sup>,这会引发化学流体中酸碱性发生改变。伊利石的第二个来源是钾长石的伊利石化[反

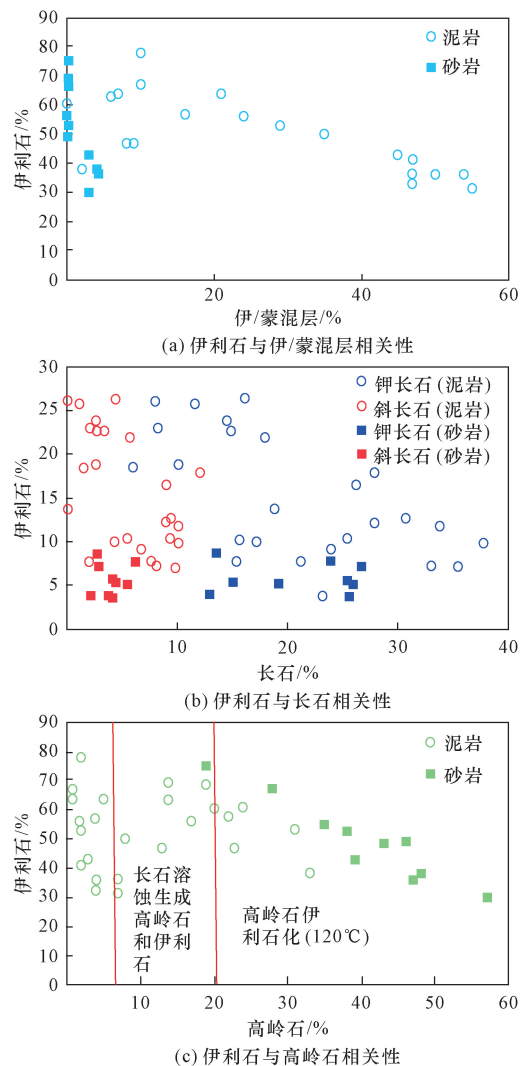
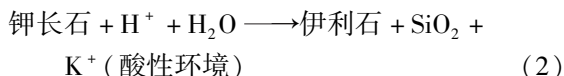


图3 伊利石与不同矿物相关性图

Fig. 3 Correlation diagram of illite and different minerals

应式(2)],这个反应需要在酸性环境下才能发生,因此随着深度的增加,成岩阶段的改变,岩石中流体环境变为酸性,部分钾长石开始向伊利石转变<sup>[25]</sup>。伊利石的第三个来源是高岭石的伊利石化[反应式(6)],反应条件苛刻,需要温度在120℃以上<sup>[25,28]</sup>。

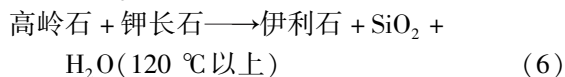
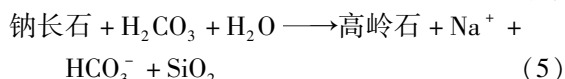
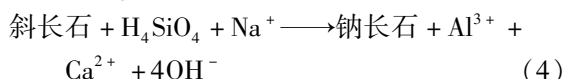
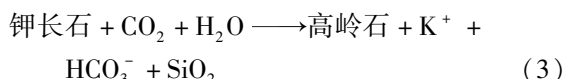


### 2.2.2 高岭石转化特征

高岭石的含量与钾长石含量、斜长石含量呈现负相关性,与伊利石相同的是,钾长石和斜长石与高岭石含量的相关性并不一致,钾长石的负相关性更强,斜长石的稍弱(图4),这与钾长石可直接生成高岭石,但斜长石需要先钠长石化后[反应式(4)],钠长石再生成高岭石有关[反应式(5)]。

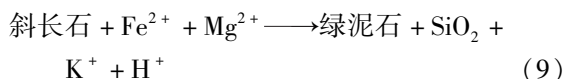
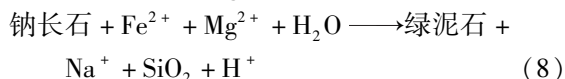
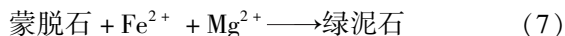
钾长石的高岭石化[反应式(3)]是高岭石的主要来源,斜长石的高岭石化过程需要先钠长石化或

钙长石化[反应式(4)]<sup>[25]</sup>,钙长石和钠长石在一定条件下会转化为高岭石[反应式(5)],涉及产出高岭石的还有一个重要的反应,可伊利石的高岭石化[反应式(6)],此反应需要较高的温度(120~140℃为开始大量转化所需要的温度),并且需要有充足的钾离子参与<sup>[24-26]</sup>,而钾离子可以由剩余的钾长石及岩石流体中游离的钾离子提供。此反应对于压力的敏感性还并不明确,目前公开发表的文献中还未见到有对此反应的压力条件进行探讨。



### 2.2.3 绿泥石转化特征

绿泥石的含量与长石含量、伊/蒙混层含量呈负相关。绿泥石与伊/蒙混层含量的负相关性说明了伊/蒙混层中的蒙脱石部分发生了绿泥石化;而其与长石含量较弱的负相关性也证明了长石绿泥石化<sup>[29]</sup>的发生(图5)。绿泥石是一种较为特殊的矿物,不同反应生成的绿泥石的化学成分可能有所不同。而绿泥石化学成分的不同也往往指示了不同的地质现象<sup>[30]</sup>。



## 2.3 定量估算黏土矿物转化量

### 2.3.1 定量估算方法

定量估算黏土矿物转化率是一个比较困难且复杂的问题<sup>[31]</sup>,通过X射线衍射技术,能够对全岩矿物及黏土矿物的相对含量进行测定。然而,黏土矿物的检测结果同时反映了陆源物质输入和成岩演化的影响,难以将二者明确区分。因此,准确量化泥岩中成岩矿物的含量成为划分成岩体系的重要前提之一。

从岩石薄片、扫描电镜以及X射线衍射的实验结果分析可知,石英化学性质稳定,主要受沉积物源的影响,从物源区至沉积-成岩过程中具有很好的可比性;长石(钾长石和斜长石)主要是陆源输入,是陆源矿物。研究区陆源输入矿物中石英与长石的含量变化特征较平稳,相关性变化小,表明研究

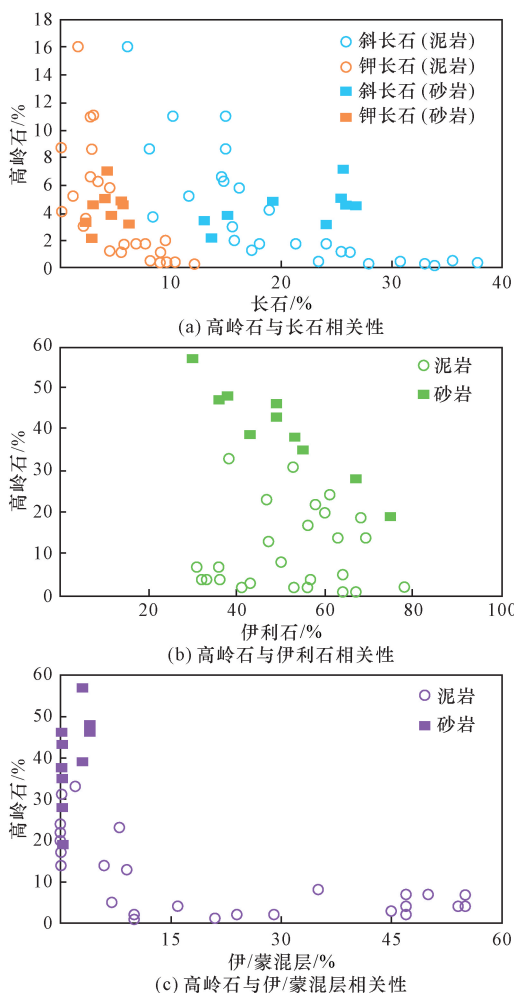


图4 高岭石与不同矿物相关性图

Fig. 4 Correlation diagram between kaolinite and different minerals

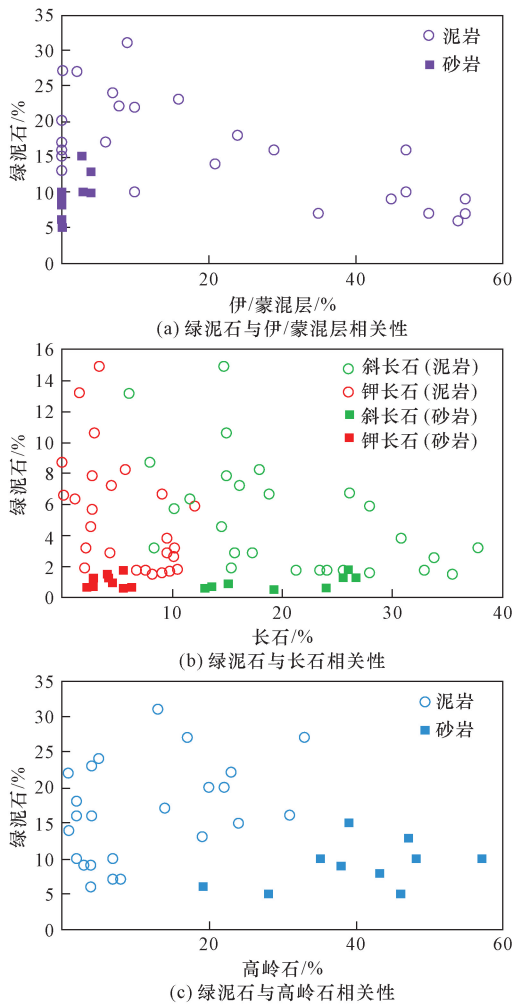


图5 绿泥石与不同矿物相关性图

Fig. 5 Correlation diagram between chlorite and different minerals

区各层段陆源矿物的输入具有稳定性,可以用石英来代替陆源矿物的输入<sup>[32]</sup>。

采用刘菲等<sup>[32]</sup>在2019年提出的方法进行估算。刘菲等<sup>[32]</sup>认为浅部地层埋深较浅,此时成岩作用较弱,矿物的组成基本保持沉积时的特征,因此可以将浅部地层的矿物含量作为参照,即

$$C_s = C_t \quad (10)$$

式(10)中: $C_s$ 为浅部地层的黏土矿物含量; $C_t$ 为陆源输入的黏土矿物含量。

后采取不同黏土矿物与石英含量的比值来估算其转化量,即

$$C_t = Q_0 C_s / Q_s \quad (11)$$

式(11)中: $Q_0$ 为所求深度地层的石英含量; $Q_s$ 为浅部地层的石英含量。

进而可以根据每个样品中的石英含量来估算来自陆源输入的黏土矿物含量,进而求得成岩转化的黏土矿物含量,即

$$C_d = C_{XRD} - C_t \quad (12)$$

式(12)中: $C_d$ 为成岩转化的黏土矿物含量; $C_{XRD}$ 为全岩X衍射实验实测的黏土矿物含量。

以M28井为例计算黏土矿物转化量。M28井浅层泥页岩中石英含量平均值为36.43%;黏土矿物总量平均值为27.35%,其中:伊/蒙混层相对含量平均值为48%;伊利石相对含量平均值为37%;高岭石相对含量平均值为6.17%;绿泥石相对含量平均值为8.83%。

以浅层泥页岩中石英含量的平均值为标准值,即 $C_s = C_t = 36.43%$ 。以M28井3118m处伊利石含量为例:地层中石英含量为30.4%,伊利石绝对含量17.889%,此时陆源输入伊利石含量应为: $(37\% \times 27.35 \times 100\% / 36.43\%) \times 30.4\% = 8.44%$ ;伊利石通过转化而来的量为 $C_d = 17.889\% - 8.44\% = 9.45%$ 。

### 2.3.2 黏土矿物转化量

借此来估算泥页岩中黏土矿物的转化量,分析各种黏土矿物发生转化或被转化的条件及深度(图6)。

通过计算,在0~2400m的浅部地层中,伊/蒙混层的转化量几乎为0%或者呈现略微的正值(<5%),可以判断在这个阶段,伊/蒙混层并没有大量向其他矿物开始转化;伊利石几乎没有向其他矿物转化,也没有其他矿物向伊利石转化,伊利石的转化量几乎为0%或呈现较小的负值(<5%);高岭石的含量只受沉积物源的影响,因此转化量几乎为0%,或者呈现略微的负值(>-5%);绿泥石的转化量也没有特别大的变化,转化量几乎为0%。

在2400~4200m,伊/蒙混层的转化量为-5%~-10%,并且数值有逐渐加大的趋势,说明伊/蒙混层在这个阶段开始向其他黏土矿物转变;此阶段伊利石转化量为3%~9%,此时其他矿物已经开始向伊利石转化,但转化量较小;刺激的高岭石转化量较小,没有大的变化,此阶段高岭石与其他矿物之间的转化还未达到大量反应的环境条件;而绿泥石转化量有轻微的起伏,出现了一段转化量增加的现象,为0.5%~4.6%,说明有矿物向绿泥石转化,结合环境因素及反应条件,推测是伊/蒙混层中的蒙脱石部分向绿泥石转化。

在4200m以深的地层中,伊/蒙混层开始大量向其他矿物转化,其转化量可达-7%~-18%[图3(a)];此阶段其他矿物开始大量向伊利石转化,伊利石转化量可达到7%~14%,这个阶段是大多数矿物快速反应的阶段,上述提到的反应式(1)、式(2)以及式(6)都会在此阶段发生;在这部分深度

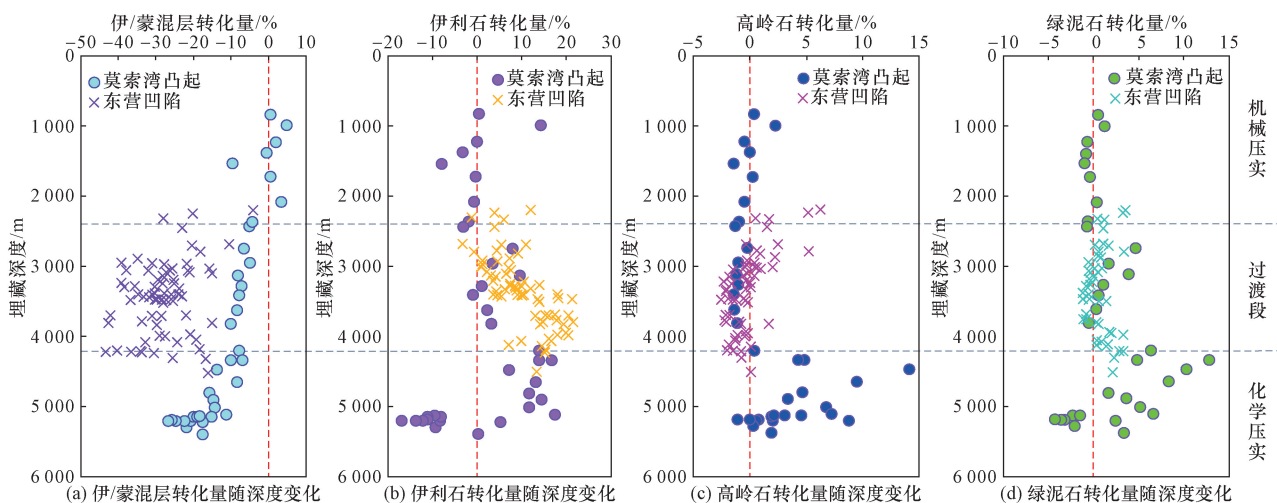


图6 不同黏土矿物转化量随深度变化图

Fig. 6 The transformation of different clay minerals with depth

的地层中,高岭石的转化量也快速增加,可达到1.71%~16%。这个阶段高岭石的主要来源是长石的溶蚀,即长石的高岭石化,当温度达到120℃左右时,剩余的钾长石又会跟高岭石反应生成伊利石;相同的是,绿泥石的转化量也呈现出大量增加的现象,此时除了伊/蒙混层中的蒙脱石向绿泥石转化外,还有长石也会部分转化为绿泥石。

通过对比东营凹陷的黏土矿物转化量发现<sup>[32]</sup>,东营凹陷的黏土矿物转化量也有相同的特征,伊/蒙混层向其他矿物大量转化;伊利石在中部地层段转化量开始随深度增加逐渐增大;高岭石中浅部地层转化量较小,深部地层开始有大量转化的趋势出现;绿泥石与高岭石特征较一致,浅部地层转化较少,随着深度增加,温度升高,开始大量转化<sup>[33]</sup>。

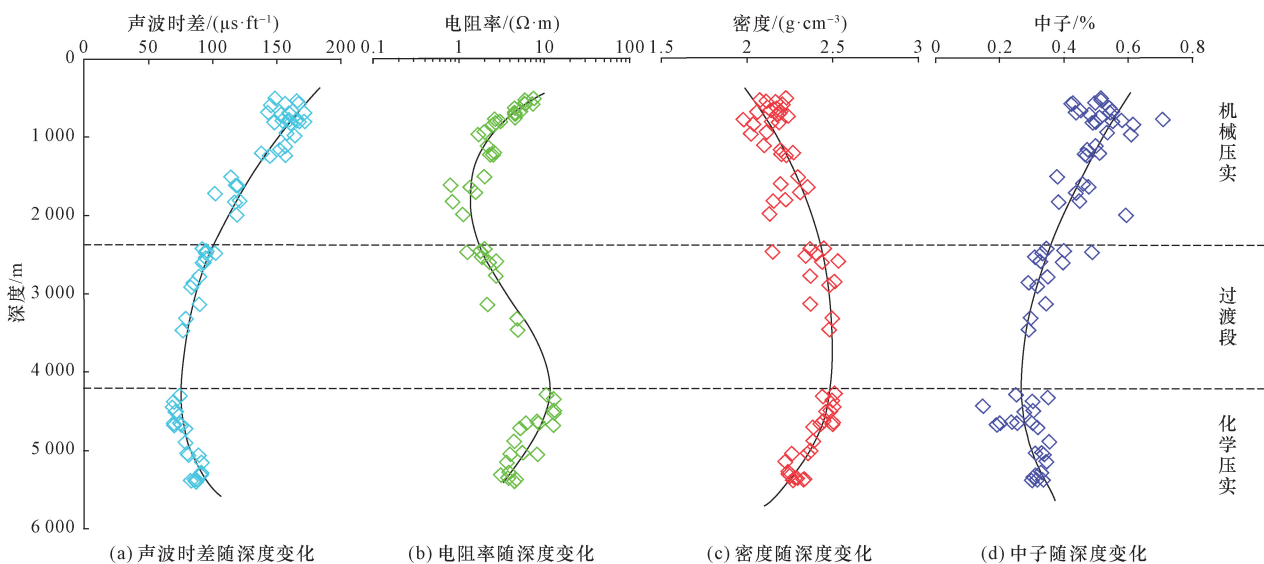
### 3 不同阶段孔隙度演化及测井响应特征

#### 3.1 测井曲线响应特征

借助测井曲线资料。研究发现在不同阶段,声波时差曲线、密度曲线、电阻率曲线以及中子曲线都表现出不同的特征。

##### 3.1.1 基础测井曲线响应特征

研究发现,测井曲线从浅到深也具有与成岩演化相符的三段性(图7)。在0~2400m的浅层深度,声波时差(AC)逐渐减小,减小幅度较大;电阻率(RT)也呈现逐渐减小的特征;密度(DEN)则随着深度增加逐渐增大;补偿中子(CNL)随着深度增加逐渐减小。在2400~4200m深度中,此阶段化学压



$1 \mu\text{s}/\text{ft} = 3.28 \mu\text{s}/\text{m}$

图7 M28井测井曲线随深度变化图

Fig. 7 M28 well logging curve with depth change diagram

实逐渐开始,并逐渐增强,机械压实还未结束,但随深度逐渐减弱;AC虽仍随深度增加而减小,但减小幅度变弱;RT曲线则出现反转,随深度增加而增加,但增加幅度并不大,RT曲线在此阶段的反转可能是埋藏较浅时,RT数据较为杂乱,准确性不高的原因;DEN虽仍随深度增加而增大,但增大的趋势有所减小;CNL同样呈现减小的趋势,但幅度有所减小。在4 200 m以下深度中,机械压实完全结束,地层中以化学压实为主。AC出现反转,随深度增加而增加;RT则再次反转,随深度增加而减小,但减小幅度不如浅部地层;DEN也出现反转,随深度增加而逐渐减小;CNL同样有所反转,随深度增加而呈现增大的趋势。说明在化学压实阶段,大量黏土矿物转化改变了泥页岩的物理特性,导致测井曲线出现反转。

### 3.1.2 声波时差拟合

化学压实成因超压可导致声波时差偏移正常幅度,根据式(13)<sup>[34-35]</sup>,声波时差-密度交会图有较好的线性关系,根据声波时差-密度交会图可以得到化学压实阶段泥页岩的声波时差随深度的变化趋势。

$$\Delta t = \Delta t_0 - 200\rho \quad (13)$$

式(13)中: $\Delta t$ 为泥页岩声波时差; $\Delta t_0$ 为地表声波时差; $\rho$ 为泥页岩密度。

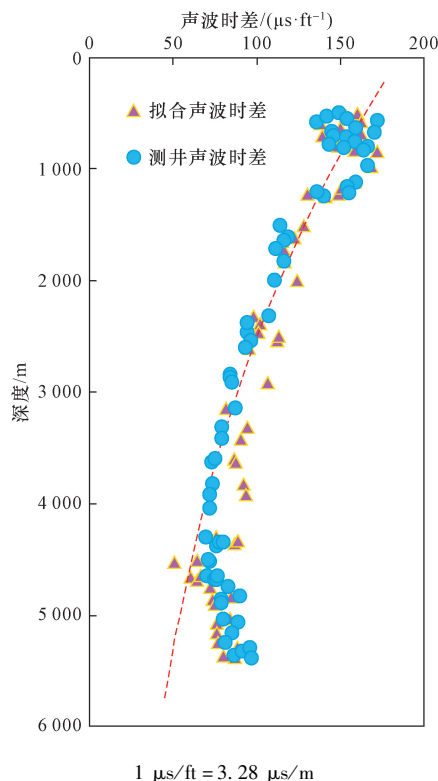


图8 M28井测井声波时差与拟合声波时差随深度变化图  
Fig. 8 M28 well logging acoustic time difference and fitting acoustic time difference with depth change diagram

可以发现,拟合后的声波时差与测井获得的声波时差也有明显的三段性(图8)。在0~2 400 m的深度中,测井AC与拟合AC大小相当;在2 400~4 200 m的深度中,修正AC要大于测井AC,这是受化学压实开始,部分黏土矿物开始转化导致岩石组分及空间结构有所变化的影响;而在4 200 m以下地层,有所反转,修正AC略微小于测井AC。

### 3.2 孔隙度演化特征

吾尔妮萨罕·麦麦提敏等<sup>[10]</sup>运用孔隙度对比法<sup>[7,36-37]</sup>判断了超压成因,以研究区M28井为研究对象,借助X-射线衍射实验和完井地质报告,综合计算并确定了不同深度段的泥页岩骨架密度,并据此计算了M28井的密度孔隙度及声波孔隙度(图9)。

研究发现,M28井的密度测井计算孔隙度和声波测井计算孔隙度的也有三段变化,M28井的孔隙演化界面与黏土矿物的变化界面相一致,地表至2 400 m,声波测井计算孔隙度略大于密度测井计算孔隙度,这个阶段的黏土矿物基本没有开始转化;2 400~4 200 m,密度测井计算孔隙度与声波测井计算孔隙度基本相当,此阶段部分黏土矿物已经达到反应条件,开始向其他矿物转化;在4 200 m往深的地层,从超压顶界面开始,密度测井计算孔隙度与声波测井计算孔隙度均变大且声波测井计算孔隙度偏转幅度更大,从密度测井计算孔隙度和声波

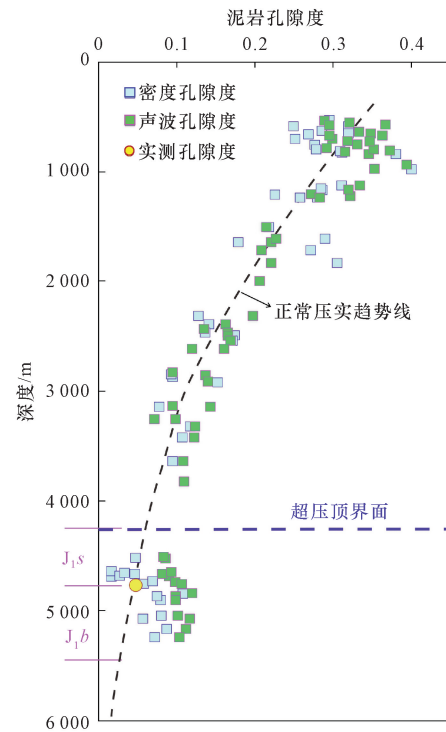


图9 M28井密度计算孔隙度和声波计算孔隙度随深度变化图<sup>[10]</sup>  
Fig. 9 Porosity calculated by density and porosity calculated by acoustic wave with depth in well M28<sup>[10]</sup>

测井计算孔隙度的偏转幅度也可以证明,研究区深层超压成因应该为非欠压实成因<sup>[7,10]</sup>。

根据不同盆地,不同学者提出的孔隙度模型有所差异(图10),但可以发现,只考虑机械压实的情况下,孔隙度会随着深度增加而减小<sup>[42]</sup>,在4 000 m左右深度以下(部分盆地在3 000 m左右)机械压实基本结束,孔隙度减少的幅度有所减缓(部分盆地几乎保持不变),甚至有部分盆地孔隙度出现反转。而MS1井在考虑了化学压实的情况下,孔隙度在4 300 m左右发生了反转。说明化学压实对孔隙度有积极影响<sup>[43]</sup>。

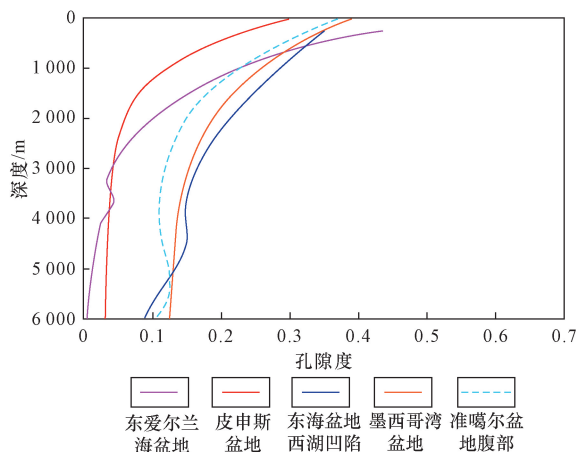


图10 不同盆地孔隙度演化图<sup>[38-41]</sup>

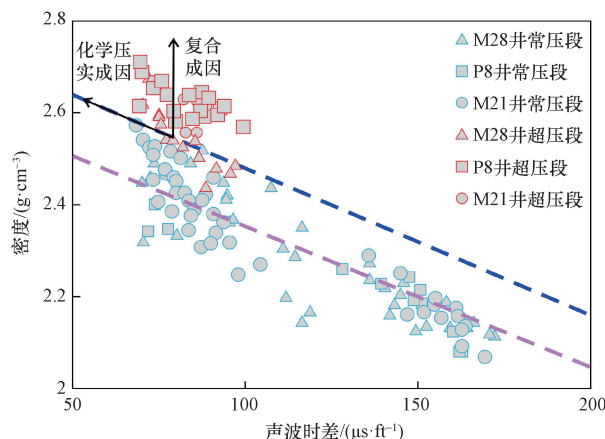
Fig. 10 Porosity evolution maps of different basins<sup>[38-41]</sup>

## 4 泥页岩成岩演化对超压发育的影响

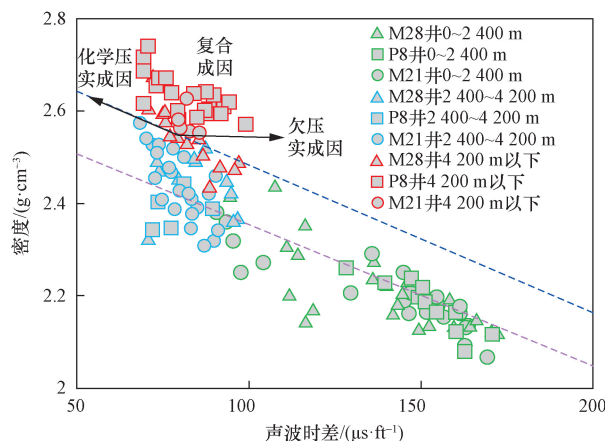
### 4.1 超压成因分析

针对准噶尔盆地腹部地区,有许多学者进行了超压成因的研究。姜林等<sup>[33]</sup>认为,烃类的作用、CO<sub>2</sub>作用和化学压实(黏土矿物转化)是莫索湾地区发育异常高压的主要原因;吴海生等<sup>[44]</sup>研究认为,烃源岩生烃、化学压实、地层剥蚀与抬升、构造挤压及油气充注都对准噶尔盆地腹部发育超压产生影响;吾尔妮萨罕·麦麦提敏等<sup>[10]</sup>认为,莫索湾凸起侏罗系广泛发育超压,主要为化学压实及压力传导的复合型成因。吾尔妮萨罕·麦麦提敏等<sup>[10]</sup>通过 Dutta 等提出的黏土矿物转化引起的地层压力变化的孔隙压力预测模型,定量计算出了化学压实对超压的贡献,莫索湾东部化学压实成因引起的压力系数介于1.4~1.5、西部化学压实成因引起的压力系数介于1.3~1.4<sup>[10]</sup>。

根据 Dutta 等<sup>[45-46]</sup>提出的声波时差-密度交会图判识方法,发现莫索湾凸起多口井超压段数据点均落于复合成因区域(图11),部分点位于机械压实及化学压实过渡段区域内。



(a) 常压/超压段声波时差-密度交会图



(b) 不同深度段声波时差-密度交会图

$$1 \mu\text{s}/\text{ft} = 3.28 \mu\text{s}/\text{m}$$

图11 莫索湾凸起声波时差-密度交会图

Fig. 11 Acoustic transit time-density crossplot of Mosuowan bulge

而声波时差-密度交会图也可发现明显的三段性,在0~2 400 m的深度段中,大部分数据点落于机械压实区域内;在2 400~4 200 m的深度段中,大部分数据点落于机械压实-化学压实过渡段区域内;在4 200 m以下深度段中,大部分数据点落于化学压实(复合成因)区域内。这与上文的研究结果相一致。

### 4.2 对超压发育的影响

准噶尔盆地腹部地区的成岩演化阶段划分为三段:机械压实段(0~2 400 m)、机械压实-化学压实过渡段(2 400~4 200 m)、化学压实段(4 200 m以下)。在机械压实为主的浅部的地层中,温度为25~70℃,黏土矿物的含量主要受沉积物源的影响<sup>[32]</sup>,此时地层压力系数较小,不发育超压;在机械压实-化学压实过渡段的地层中,温度为70~100℃,伊/蒙混层开始向伊利石、绿泥石转化,此阶段机械压实仍然存在,但化学压实开始产生,地层压力上升较为缓慢;在化学压实段的地层中,温度高于100℃,黏土矿物大量转化,长石溶蚀生成

高岭石、绿泥石与伊利石<sup>[25,47]</sup>。同时压力开始快速升高,说明超压的发育与黏土矿物的转化有关。随着深度增加,温度和压力逐渐升高,温度达到120℃左右时,高岭石开始向伊利石转化<sup>[24-25]</sup>,此时高岭石含量由6%降低为3%,钾长石含量几乎降为0%。

超压顶界面位于化学压实主导阶段界面之下200 m左右,密度测井计算孔隙度与声波测井计算孔隙度均变大且声波测井计算孔隙度偏转幅度更大,说明超压段黏土矿物大量转化增加了孔隙的连通性。超压顶界面与化学压实主导界面不统一的原因可能是,压力增加其实是一个渐进的过程,不会瞬间增加到某一压力值。

成岩作用对超压的影响是多方面的。一方面大量转化的黏土矿物改变了泥页岩的物理性质(如脆性、延展性等),增强了泥页岩的封堵性,进而导致压力无法排出<sup>[1,7,10,48]</sup>,这也是导致准噶尔盆地腹部侏罗系超压形成的因素之一。另一方面,黏土矿物转化会产生新的孔隙及裂缝,不但可以为油气提供储集空间,也会为油气及深层压力向上传导提供通道<sup>[49-50]</sup>。

除此之外,黏土矿物转化可以影响超压,超压也可以反过来影响黏土矿物的转化,例如:超压可以提高蒙脱石伊利石化反应的活化能,使其反应速度减缓甚至停滞,当压力得到释放后,反应又会继续进行,导致伊/蒙混层中的蒙脱石占比总是随深度变化而成阶梯式的变;超压还可以抵抗压实作用,强化溶蚀作用;高岭石的伊利石化对温度的敏感性更高,但压力的增加可以促进钾长石的溶蚀,进而产生大量 $K^+$ ,对反应起到促进作用<sup>[24-25,51-53]</sup>。

## 5 结论

(1)以黏土矿物转化为标志,定量计算黏土矿物转化量,并结合温度、测井曲线、孔隙度等数据综合划分准噶尔盆地腹部莫索湾凸起地区泥页岩的机械压实段(0~2 400 m)、机械压实—化学压实过渡段(2 400~4 200 m)、化学压实段(4 200 m以下)。

(2)黏土矿物转化、测井曲线、密度测井计算孔隙度与声波测井计算孔隙度、声波时差与密度交会图及测井AC与密度拟合AC都有与泥页岩压实阶段所相符的三段性特征。机械压实段、机械压实—化学压实过渡段、化学压实段所表现出的特征不同,证明了上述阶段的划分的合理性。

(3)准噶尔盆地腹部超压成因为化学压实及其他非欠压实成因复合成因。蒙脱石的伊利石化及绿泥石化,长石的高岭石化及绿泥石化,高岭石的伊利石化,都对超压的形成有重要贡献。

## 参 考 文 献

- [1] 赵建华, 金之钧. 泥岩成岩作用研究进展与展望[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 58-72.  
Zhao Jianhua, Jin Zhijun. Research progress and prospect of mudstone diagenesis[J]. Journal of Sedimentology, 2021, 39(1): 58-72.
- [2] 应凤祥, 罗平, 何东博. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.  
Ying Fengxiang, Luo Ping, He Dongbo. Diagenesis and diagenetic numerical simulation of clastic reservoirs in petroliferous basins in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [3] Taylor T R, Giles M R, Hathon L A, et al. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: models, myths and reality [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1093-1132.
- [4] 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.
- [5] English J M, Laubach S E. Opening-mode fracture systems: insights from recent fluid inclusion microthermometry studies of crack-seal fracture cements[J]. Geological Society, 2017, 458(1): 257-272.
- [6] 邱振, 邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29.  
Qiu Zhen, Zou Caineng. Unconventional oil and gas sedimentology: connotation and prospect [J]. Deposition Journal, 2020, 38(1): 1-29.
- [7] 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 Jingzhou, Li Jun, Xu Zeyang. Research progress on the genesis of overpressure in sedimentary basins [J]. Petroleum Journal, 2017, 38(9): 973-998.
- [8] 吴涛, 李军, 闫文琦, 等. 准噶尔盆地腹部地区超压低饱和度油气成因机制与勘探意义[J]. 石油学报, 2024, 45(12): 1728-1742.  
Wu Tao, Li Jun, Yan Wenqi, et al. The genetic mechanism and exploration significance of overpressure and low saturation oil and gas in the hinterland of Junggar Basin [J]. Petroleum Journal, 2024, 45(12): 1728-1742.
- [9] 田兵, 郑有伟, 赵俊梅, 等. 深层碎屑岩储层异常高孔研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(22): 9456-9465.  
Tian Bing, Zheng Youwei, Zhao Junmei, et al. Research progress of abnormal high porosity in deep clastic reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(22): 9456-9465.
- [10] 吾尔妮萨罕·麦提敏, 李军, 赵靖舟, 等. 准噶尔盆地莫索湾凸起侏罗系超压成因研究[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(9): 1590-1600.  
Wuernisahan Maimai Timin, Li Jun, Zhao Jingzhou, et al. Study on the genesis of Jurassic overpressure in Mosuowan Uplift, Junggar Basin [J]. Gas Geoscience, 2024, 35(9): 1590-1600.
- [11] 贺文君. 准噶尔盆地腹部深层异常压力成因及演化[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.  
He Wenjun. Causes and evolution of deep abnormal pressure in the hinterland of Junggar Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [12] Bjorlykke K. Relationships between depositional environments,

- burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins [J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 301: 1-14.
- [13] Goultly N R, Sargent C, Andras P, et al. Compaction of diagenetically altered mudstones Part 1: mechanical and chemical contributions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 709-713.
- [14] 刘阳, 刘彦成, 林利明, 等. 鄂尔多斯盆地临兴-神府地区上古生界致密砂岩成岩作用与成储关系研究[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(4): 1378-1391.
- Liu Yang, Liu Yancheng, Lin Liming, et al. Upper paleozoic tight sandstone diagenesis and its relationship with reservoir formation in Linxing-Shenfu area of Ordos Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(4): 1378-1391.
- [15] 王飞腾, 郭少斌, 毛文静, 等. 基于热模拟实验的泥页岩黏土矿物演化及成岩阶段划分[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(12): 174-179.
- Wang Feiteng, Guo Shaobin, Mao Wenjing, et al. Clay mineral evolution and diagenetic stage division of shale based on thermal simulation experiments[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(12): 174-179.
- [16] 王伟刚, 魏钦廉, 杨磊磊, 等. 准噶尔盆地腹部下侏罗统曲流河地震沉积学解析[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(26): 11092-11101.
- Wang Weigang, Wei Qinlian, Yang Leilei, et al. Seismic sedimentology analysis of meandering river in lower Jurassic in the hinterland of Junggar Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(26): 11092-11101.
- [17] 杨智, 邹才能, 何生, 等. 准噶尔盆地腹部超压顶面附近油气成藏机理[C]//第五届油气成藏机理与油气资源评价国际学术研讨会论文集. 北京: 世界石油大会中国国家委员会, 2009: 478-489.
- Yang Zhi, Zou Caineng, He Sheng, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism near the overpressure top surface in the hinterland of Junggar Basin [C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Oil and Gas Resource Evaluation. Beijing: China National Committee of the World Petroleum Congress, 2009: 478-489.
- [18] 胡海燕, 王国建. 准噶尔盆地中部超压形成机理及其成藏意义[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(1): 6-10, 389.
- Hu Haiyan, Wang Guojian. Formation mechanism of overpressure in central Junggar Basin and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. *Journal of Petroleum and Natural Gas*, 2009, 31(1): 6-10, 389.
- [19] 何惠生, 叶加仁, 陈景阳. 准噶尔盆地腹部超压演化及成因[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(1): 87-91, 392.
- He Huisheng, Ye Jiaren, Chen Jingyang. Evolution and genesis of overpressure in the hinterland of Junggar Basin[J]. *Journal of Petroleum and Natural Gas*, 2009, 31(1): 87-91, 392.
- [20] 况军, 唐勇, 朱国华, 等. 准噶尔盆地侏罗系储集层的基本特征及其主控因素分析[J]. *石油勘探与开发*, 2002(1): 52-55, 60.
- Kuang Jun, Tang Yong, Zhu Guohua, et al. Basic characteristics and main controlling factors of Jurassic reservoirs in Junggar Basin [J]. *Petroleum exploration and development*, 2002(1): 52-55, 60.
- [21] 张善文. 准噶尔盆地盆缘地层不整合油气成藏特征及勘探展望[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(3): 231-237, 248.
- Zhang Shanwen. Characteristics and exploration prospects of unconformity hydrocarbon accumulation in the basin margin of Junggar Basin[J]. *Petroleum Experimental Geology*, 2013, 35(3): 231-237, 248.
- [22] Zhao Z, Zhao J, Zhao H, et al. A genetic mechanism for chemical compaction in mudstones: case study from the Xihu Depression, east China Sea shelf basin [J]. *Minerals*, 2024, 14(4): 413-439.
- [23] 单祥, 徐洋, 唐勇, 等. 莫北-莫索湾地区八道湾组储集层成岩作用及其对储集层物性的影响[J]. *新疆石油地质*, 2015, 36(4): 401-408.
- Shan Xiang, Xu Yang, Tang Yong, et al. Diagenesis of Badaowan Formation reservoir in Mobei-Mosuowan area and its influence on reservoir physical properties[J]. *Petroleum Geology of Xinjiang*, 2015, 36(4): 401-408.
- [24] 蕙克来, 操应长, 金杰华, 等. 冀中拗陷霸县凹陷古近系中深层古地层压力演化及对储层成岩作用的影响[J]. *石油学报*, 2014, 35(5): 867-878.
- Xi Kelai, Cao Yingchang, Jin Jiehua, et al. The evolution of paleo-formation pressure and its influence on reservoir diagenesis in the middle and deep layers of Paleogene in Baxian Sag, Jizhong Depression[J]. *Petroleum Journal*, 2014, 35(5): 867-878.
- [25] 田建锋, 喻建, 张志国. 砂岩中碱性溶蚀研究进展[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(5): 83-93, 100.
- Tian Jianfeng, Yu Jian, Zhang Zhiguo. Research progress on alkaline dissolution in sandstone [J]. *Geological Science and Technology Bulletin*, 2022, 41(5): 83-93, 100.
- [26] Boles J R. Active albitization of plagioclase, Gulf Coast Tertiary [J]. *American Journal of Science*, 1982, 282: 165-180.
- [27] Hvelmann J, Putnis A, Geisler T, et al. The replacement of plagioclase feldspars by albite: observations from hydrothermal experiments[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2010, 159(1): 43-59.
- [28] 陈鑫, 钟建华, 袁静, 等. 渤南洼陷深层碎屑岩储集层中的黏土矿物特征及油气意义[J]. *石油学报*, 2009, 30(2): 201-207.
- Chen Xin, Zhong Jianhua, Yuan Jing, et al. Characteristics of clay minerals in deep clastic reservoirs in Bonan Subsag and their petroleum significance [J]. *Petroleum Journal*, 2009, 30(2): 201-207.
- [29] 余腾飞, 韩涛, 林鹏, 等. 基于岩石矿物学特征分析的断层识别及案例研究[J/OL]. *应用基础与工程科学学报*, 1-22 [2025-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.TB.20230811.1311.004.html>.
- Yu Tengfei, Han Tao, Lin Peng, et al. Fault identification and case study based on rock mineralogical characteristics [J/OL]. *Journal of Applied Basic and Engineering Sciences*, 1-22 [2025-03-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.TB.20230811.1311.004.html>.
- [30] 田建锋, 喻建, 张庆洲. 孔隙衬里绿泥石的成因及对储层性能的影响[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(3): 741-748.
- Tian Jianfeng, Yu Jian, Zhang Qingzhou. The genesis of chlorite in pore lining and its influence on reservoir performance[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(3): 741-748.
- [31] Bjølykke 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.
- [32] 刘菲, 杜佳宗, 蔡进功, 等. 泥岩成岩矿物演化特征与成岩体系划分: 以东营凹陷古近系为例[J]. *高校地质学报*, 2019, 25(4): 583-597.  
Liu Fei, Du Jiazong, Cai Jingong, et al. The evolution characteristics of diagenetic minerals and the division of diagenetic systems in mudstone: a case study of Paleogene in Dongying Sag[J]. *University Journal of Geology*, 2019, 25(4): 583-597.
- [33] 姜林, 宋岩, 查明, 等. 准噶尔盆地莫索湾地区超压与油气成藏[J]. *大庆石油学院学报*, 2008, 32(6): 24-28, 123.  
Jiang Lin, Song Yan, Zha Ming, et al. Overpressure and hydrocarbon accumulation in Mosuowan area, Junggar Basin[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2008, 32(6): 24-28, 123.
- [34] Gouly N R, Sargent C, Andras P, et al. Compaction of diagenetically altered mudstones Part 1: mechanical and chemical contributions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 709-713.
- [35] 李超, 罗晓容, 张立宽. 泥岩化学压实作用的超压响应与孔隙压力预测[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(5): 951-973.  
Li Chao, Luo Xiaorong, Zhang Likuan. Overpressure response and pore pressure prediction of mudstone chemical compaction[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2020, 49(5): 951-973.
- [36] Dutta N C. Effect of chemical diagenesis on pore pressure in argillaceous sediment[J]. *The Leading Edge*, 2016, 35(6): 523-527.
- [37] Dutta N C, Khazanehdari J. Estimation of formation fluid pressure using high-resolution velocity from inversion of seismic data and a rock physics model based on compaction and burial diagenesis of shales[J]. *The Leading Edge*, 2006, 25(12): 1528-1539.
- [38] Oluwadebi A G, Taylor K G, Dowe P J. Diamagnetic controls on the reservoir quality of the tight gas Collyhurst sandstone formation, lower Permian, east Irish Sea basin, United Kingdom[J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 371: 55-74.
- [39] 万玉金, 韩永新, 周兆华, 等. 美国致密砂岩气藏地质特征与开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.  
Wan Yujin, Han Yongxin, Zhou Zhaohua, etc. Geological characteristics and development technology of tight sandstone gas reservoirs in the United States [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [40] 张武. 西湖凹陷古近系始新统平湖组低渗-致密背景下优质储层特征及分布预测[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(2): 162-171.  
Zhang Wu. High-quality reservoir characteristics and distribution prediction in the low-permeability and tight background of the Paleogene Pinghu Formation in the Xihu Sag[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 50(2): 162-171.
- [41] Okunuwadje S E, MacDonald D, Bowden S. Diagenetic and reservoir quality variation of miocene sandstone reservoir analogues from three basins of southern California, USA [J]. *Journal of Earth Science*, 2020, 31(5): 930-949.
- [42] 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.
- [43] Ajesh J. Pore-pressure prediction challenges in chemical compaction regimes: an alternative VP/VS-based approach[J]. *Interpretation*, 2016, 4(4): 7451-7462.
- [44] 吴海生, 郑孟林, 何文军, 等. 准噶尔盆地腹部地区地层压力异常特征与控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1135-1146.  
Wu Haisheng, Zheng Menglin, He Wenjun, et al. Characteristics and controlling factors of abnormal formation pressure in the hinterland of Junggar Basin[J]. *Petroleum and Natural Gas Geology*, 2017, 38(6): 1135-1146.
- [45] Dutta N C. Deepwater geohazard prediction using prestack inversion of large offset P-wave data and rock model[J]. *Lead*, 2002, 21: 193-198.
- [46] Teige G M G, Hermanrud C, Wensaas L, et al. The lack of relationship between overpressure and porosity in North Sea and Håltensbanken shales[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1999, 16(4): 321-335.
- [47] 邱隆伟, 赵伟, 刘魁元. 碱性成岩作用及其在济阳拗陷的应用展望[J]. *油气地质与采收率*, 2007(2): 10-15, 111.  
Qiu Longwei, Zhao Wei, Liu Kuiyuan. Alkaline diagenesis and its application prospect in Jiyang Depression[J]. *Oil and Gas Geology and Recovery*, 2007(2): 10-15, 111.
- [48] Yang G X, Guo B S. Porosity model and pore evolution of transitional shales: an example from the Southern North China Basin [J]. *Petroleum Science*, 2020, 17(6): 1-15.
- [49] Johnson J R, Hansen J A, Rahman J. Mapping the maturity of organic-rich shale with combined geochemical and geophysical data, Draupne Formation, Norwegian Continental Shelf[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 138: 105525.
- [50] 刘冬冬, 郭靖, 潘占昆, 等. 页岩气藏超压演化过程: 来自四川盆地南部五峰组——龙马溪组裂缝流体包裹体的证据[J]. *天然气工业*, 2021, 41(9): 12-22.  
Liu Dongdong, Guo Jing, Pan Zhankun, et al. Overpressure evolution of shale gas reservoirs: evidence from fluid inclusions in fractures of the Wufeng-Longmaxi Formations in the southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(9): 12-22.
- [51] 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. *地球化学*, 2009, 38(5): 498-506.  
Huang Sijing, Huang Keke, Feng Wenli, et al. Material exchange and secondary porosity formation among feldspar, kaolinite and illite during diagenesis: a study from the Upper Paleozoic in Ordos Basin and Triassic Xujiahe Formation in western Sichuan Depression[J]. *Geochemistry*, 2009, 38(5): 498-506.
- [52] 孟元林, 黄文彪, 王粤川, 等. 超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型及应用[J]. *沉积学报*, 2006(4): 461-467.  
Meng Yuanlin, Huang Wenbiao, Wang Yuechuan, et al. Chemical kinetics model of clay mineral transformation under overpressure and its application[J]. *Deposition*, 2006(4): 461-467.
- [53] 蔡来星, 杨田, 田景春, 等. 致密砂岩储层中粘土矿物发育特征及其生长机理研究进展[J]. *沉积学报*, 2023, 41(6): 1859-1889.  
Cai Laixing, Yang Tian, Tian Jingchun, et al. Research progress on the development characteristics and growth mechanism of clay minerals in tight sandstone reservoirs[J]. *Sedimentary Journal*, 2023, 41(6): 1859-1889.