

文章编号: 0253-2697(2013)06-1049-11 DOI:10.7623/syxb201306003

# 莺歌海盆地东方区块地层超压对成岩作用的影响

段 威<sup>1,2</sup> 陈金定<sup>3</sup> 罗程飞<sup>3</sup> 田金强<sup>1,2</sup> 郭 龙<sup>3</sup> 林俊峰<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学资源学院 湖北武汉 430074;  
3. 中海油能源发展股份有限公司钻采院湛江实验中心 广东湛江 524057)

**摘要:**莺歌海盆地东方区块莺歌海组下部和黄流组发育地层超压体系,超压顶界面深度从盆地中心向边缘逐渐变深。在综合前人研究基础上,笔者应用热解分析、生物标志化合物研究及岩石显微镜和扫描电镜等技术,并与邻区的常压环境下的相关特征进行对比,深入分析了地层超压对成岩作用的影响。结果表明:①超压对反映有机质热演化特征的指标(镜质体反射率、热解峰温、生产指数等)未产生可识别的影响,但对黏土矿物转化和烃类结构演化这类产物浓度变化速率高、体积膨胀效应强的反应有明显的抑制作用;②超压可降低砂岩的机械压实速率,使孔隙度得以有效保存;③超压可以通过抑制黏土矿物的转化来减少胶结物生成的物质来源,同时通过增大碳酸盐在流体介质中的溶解度抑制碳酸盐胶结物的生成;④研究区储层普遍高含CO<sub>2</sub>,在超压环境下CO<sub>2</sub>在流体中溶解度增大,会大量生成H<sup>+</sup>,促进溶蚀作用的产生;⑤超压环境促进了烃源岩生烃作用生成的酸性流体的排出,增强了相邻砂岩储层的溶蚀作用,有利于次生孔隙生成,从而发育了异常高孔带。

**关键词:**莺歌海盆地;东方区块;地层超压;流体;成岩作用

中图分类号:TE112.2 文献标识码:A

## Effects of formation overpressure on diagenesis in the Dongfang block of Yinggehai Basin

DUAN Wei<sup>1,2</sup> CHEN Jinding<sup>3</sup> LUO Chengfei<sup>3</sup> TIAN Jinqiang<sup>1,2</sup> GUO Long<sup>3</sup> LIN Junfeng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Tectonics & Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Zhanjiang Central Laboratory, Research Institute of Energy Technology & Services-Oilfield Engineering, CNOOC, Zhanjiang 524057, China)

**Abstract:** An obvious overpressure system was found within shallow strata in the Dongfang block of Yinggehai Basin and the burial depth of its top interface increases gradually from the center of the basin to the edge. Based on pyrolysis analyses, biomarkers, petrographic microscopic identification and scanning electron microscopy, the impact of formation overpressure on diagenesis was deeply discussed. The result showed that the overpressure does not bring on a recognizable effect on geochemical indicators which reflect the thermal evolution stage of organic matter (vitrinite reflectance, pyrolysis peak temperature, production index), but obviously restricts the transformation of clay minerals and the evolution of hydrocarbon structures because these products vary greatly in concentrations and have a strong effect of cubical expansion. Formation overpressure can delay the mechanical compaction of sandstones, thus effectively save the porosity. Formation overpressure can also decrease the formation of cements by suppressing the transformation of clay minerals, and meanwhile restrain the formation of cements mainly by increasing the solubility of carbonates in a fluid medium. Moreover, reservoirs in the research region generally contain high CO<sub>2</sub>, and the solubility of CO<sub>2</sub> in geological fluids will increase in an overpressure environment so as to promote corrosion by producing more H<sup>+</sup>. Besides, the mudstone overpressure can accelerate the discharge of acidic fluids through hydrocarbon generation, which may promote the dissolution of adjacent sandstones in reservoirs and favor the generation of secondary porosity, thus an anomalously high porosity zone develops to form a favorable reservoir.

**Key words:** Yinggehai Basin; Dongfang block; stratum overpressure; fluid; diagenesis

盆地的异常地层压力现象被发现以来,沉积盆地中异常地层流体压力的研究得到各国学者的广泛重视<sup>[1-5]</sup>,它的现象、成因及其油气成藏效应成为研究的焦点<sup>[6-8]</sup>。10余年来,沉积盆地成岩作用研究逐渐向“成岩过程及动力机制研究”发展<sup>[9-12]</sup>,人们开始认识

到地质流体活动对成岩作用的影响以及流-岩相互作用的成藏(矿)效应<sup>[13-15]</sup>。尽管前人在超压对储层物性的影响等方面取得了一些成果<sup>[16-18]</sup>,但有关异常地层压力环境下的流体活动特征、成岩作用特征及其在储层形成与改造过程中的作用等问题尚需深入探索。

**基金项目:**国家重大科技专项“中国近海大中型油气田成藏机制”(2011ZX05023-006-007)和中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金(SKJ2012178)资助。

**第一作者及通信作者:**段 威,男,1986年3月生,2010年毕业于中国地质大学(武汉)石油系,现为中國地质大学(武汉)石油系博士研究生,主要从事石油地质学方面的研究工作。Email:376033374@qq.com

莺歌海盆地因其热流体活动强烈及高温超压的特点<sup>[3]</sup>而闻名世界,同时也为研究超压环境下流体-岩石相互作用提供了天然实验室。莺歌海盆地油气勘探始于20世纪60年代,东方1-1、东方13-1及东方13-2三个大气田的发现,展示了该盆地油气资源富集的广阔前景。自20世纪70年代该盆地进行系统勘探以来,国内外众多学者对其油气成藏机理进行了系统研究,尤其在超压流体流动的油气成藏效应方面取得了突出成果<sup>[19-24]</sup>,但是莺歌海盆地异常地层压力条件下的流-岩相互作用以及超压对成岩作用影响方面的研究尚需深入探索。以莺歌海盆地西北部东方区块梅山组及其以上地层为研究对象,在综合前人研究基础上,笔者应用热解分析、生物标志化合物研究及岩石显微镜和扫描电镜等技术,并与邻区的正常地层压力环境下的相关特征对比,深入探讨了超压对地质流体活动及成岩作用的影响。

### 1 区域地质背景

莺歌海盆地位于南海西北部,是受岩石圈拉伸和红河断裂走滑双重机制控制的伸展-转换型新生代含油气盆地<sup>[25]</sup>,面积约  $11 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地包括莺东斜坡、莺西斜坡和中央坳陷3个一级构造单元,中央坳陷又由临高凸起、底辟构造带2个正向构造单元组成<sup>[23]</sup>。其中,底辟构造带发育了大量由泥和热流体幕式上侵活动而形成的“泥-流体底辟构造”,该盆地90%以上的油气储量和100%的产量来自这些异常高压聚集的底辟构造,而东方区块正位于莺歌海盆地中央泥底辟构造带北部(图1)<sup>[26]</sup>。新生界自下而上依次

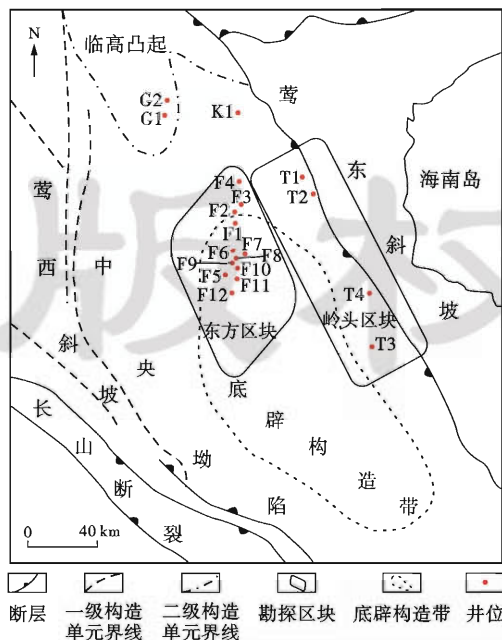


图1 莺歌海盆地构造单元<sup>[26]</sup>  
Fig.1 Structural units of Yinggehai Basin<sup>[26]</sup>

发育渐新统崖城组和陵水组,中新统三亚组、梅山组和黄流组,上新统莺歌海组以及第四系乐东组(图2),总厚度达17 km<sup>[25]</sup>。其中,三亚组—梅山组下部深灰色浅海相泥岩是底辟带气藏的主力源岩<sup>[23]</sup>。

三亚组—梅山组主要为滨浅海相—半深海相灰色泥岩沉积,盆地边缘发育斜坡扇、低水位河道充填和高水位三角洲沉积。黄流组主要为浅海相沉积,发育多个较大规模的低水位三角洲。莺歌海组下部主要为半深海相泥岩沉积,但盆地北部有滨浅海和三角洲沉积,砂岩较发育<sup>[25]</sup>。莺歌海组上部至第四系下部为一系不断由东向西快速推进的陆架—陆坡—盆地相沉积体系,广泛发育陆架席状砂、陆坡扇和盆底扇等<sup>[25]</sup>。第四系中上部主要为浅海相沉积<sup>[23]</sup>。其中,黄流组和莺歌海组是莺歌海盆地的主要含气层系,也是研究重点。

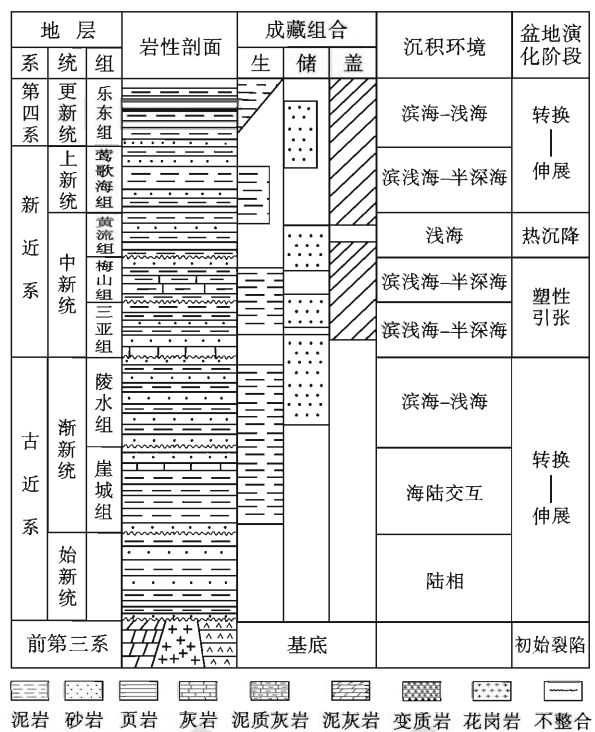


图2 莺歌海盆地地层综合柱状图  
Fig.2 Comprehensive stratigraphic column in Yinggehai Basin

### 2 现今压力状态

对莺歌海盆地高温超压的研究始于20世纪80年代,国内外众多学者报道和论述了盆地内异常地层压力的分布状况、产生机理及其油气成藏效应<sup>[23-27]</sup>。笔者选取盆地中央泥底辟构造带及其附近60余口井建立了声波时差与深度的关系,研究区欠压实的顶界深度为2100~2200 m,新近系分布莺歌海组下部和黄流组2套欠压实泥岩,意味着这2套泥岩发育地层超压(图3)。实测地层压力数据表明,黄流组

超压最大,为强超压,而莺歌海组为超压、弱超压和常压并存(图 4)。东方区块内,莺歌海组的超压顶界面大致在 2 200 m,而黄流组整体处于超压顶界面以下。而相邻的岭头区块内,超压顶界面约为 3 200 m

(表 1)。统计发现,超压体系在不同的构造位置,顶界面的深度变化很大,从盆地中心向边缘逐渐变深,直至异常高压消失(表 1);但研究区范围内变化较小,大致在 2 200 m。

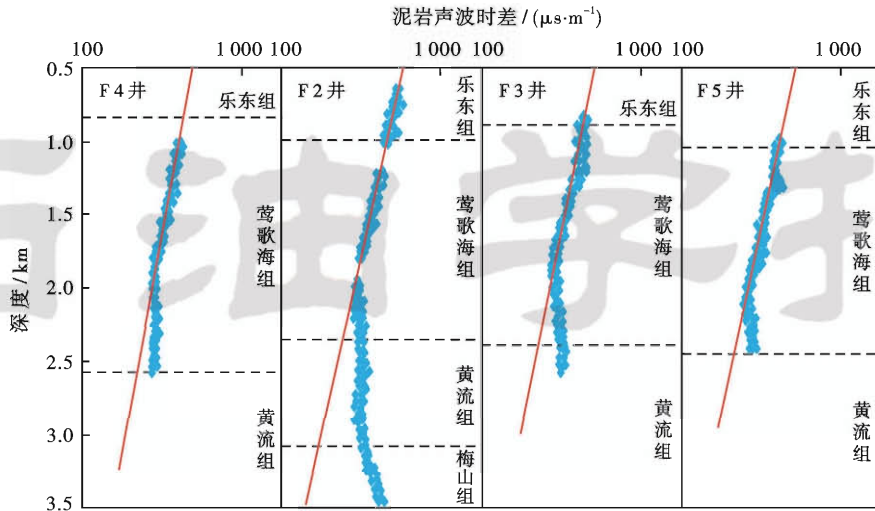


图 3 莺歌海盆地东方区块单井声波时差随深度变化

Fig. 3 Correlation between AC and depth for wells in the Dongfang block of Yinggehai Basin

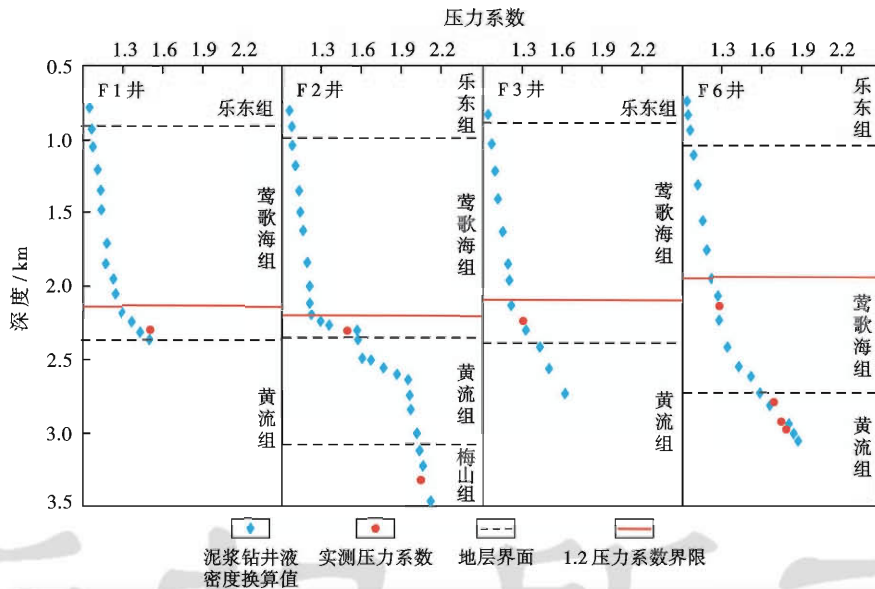


图 4 莺歌海盆地东方区块超压顶界面深度连井对比剖面

Fig. 4 Contrasting profile of overpressure limitation in the Dongfang block of Yinggehai Basin

表 1 莺歌海盆地部分单井超压顶界面深度

Table 1 Overpressure limitation of some wells in Yinggehai Basin

井名	超压顶界面深度/m	井名	超压顶界面深度/m
F1	2 160	G1	3 400
F2	2 200	G2	3 460
F3	2 100	K1	3 230
F6	2 000	T1	3 150
F7	2 200	T2	3 080
F8	2 080	T3	3 200
F12	2 230	T4	3 250

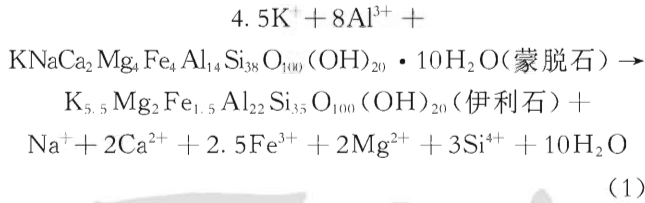
### 3 超压对泥岩成岩作用的影响

泥岩的成岩作用主要由黏土矿物转化和有机质热演化两部分组成<sup>[13]</sup>,较砂岩简单,但它对整个成岩体系的酸碱度、砂岩的胶结作用和溶蚀作用等都有很大的影响。

#### 3.1 超压对黏土矿物转化的抑制作用

在研究区内,黏土矿物主要由蒙脱石、伊/蒙混层、伊利石、高岭石及绿泥石组成(图 5),其中,蒙脱石仅在

浅层出现。与其他黏土矿物相比,蒙脱石对温压条件变化最为敏感。随着埋深和地温的增大,蒙脱石会不断从介质中吸收  $K^+$  等阳离子,经伊/蒙混层转化为伊利石:



从而使得蒙脱石层在伊/蒙混层中所占的比例越来越小;同样,高岭石也会随埋深的增大逐步转化为伊利石和绿泥石。但莺歌海盆地异常超压发育,热流体活动剧烈,黏土矿物转化规律比较复杂。

研究区内,蒙脱石主要在浅层出现,在深度约 1 400 m 以下逐渐减小,1 600 m 以下逐渐消失[图 5(a)]。从

700 m 开始,随埋深和地温的增大,高岭石和伊/蒙混层中蒙脱石的含量逐渐降低,而伊利石和绿泥石含量逐渐增加[图 5(c)—5(f)]。但超压顶界面附近及往下时,伊/蒙混层和伊/蒙混层中的蒙脱石层的含量几乎不再减少(图 5),而相邻岭头区块常压环境下该含量依然逐渐减少(图 6),说明超压对其演化产生了影响。根据式(1),蒙脱石向伊利石转化时排出的层间水进入相邻的孔隙内,体积膨胀促使流体压力增大,从而使蒙脱石无法继续脱水,从而间接抑制蒙脱石的转化<sup>[18]</sup>。此外,式(1)中蒙脱石、高岭石向伊利石转化时,需要从附近介质中吸取  $K^+$  等金属阳离子,而这些金属阳离子主要来源于有机酸对碳酸盐矿物、铝硅酸盐和植物碎屑的溶解<sup>[28]</sup>,但超压能抑制有机酸的生成<sup>[29]</sup>,这导致环境介质中的  $K^+$  浓度减小,不利于黏土矿物的转化。

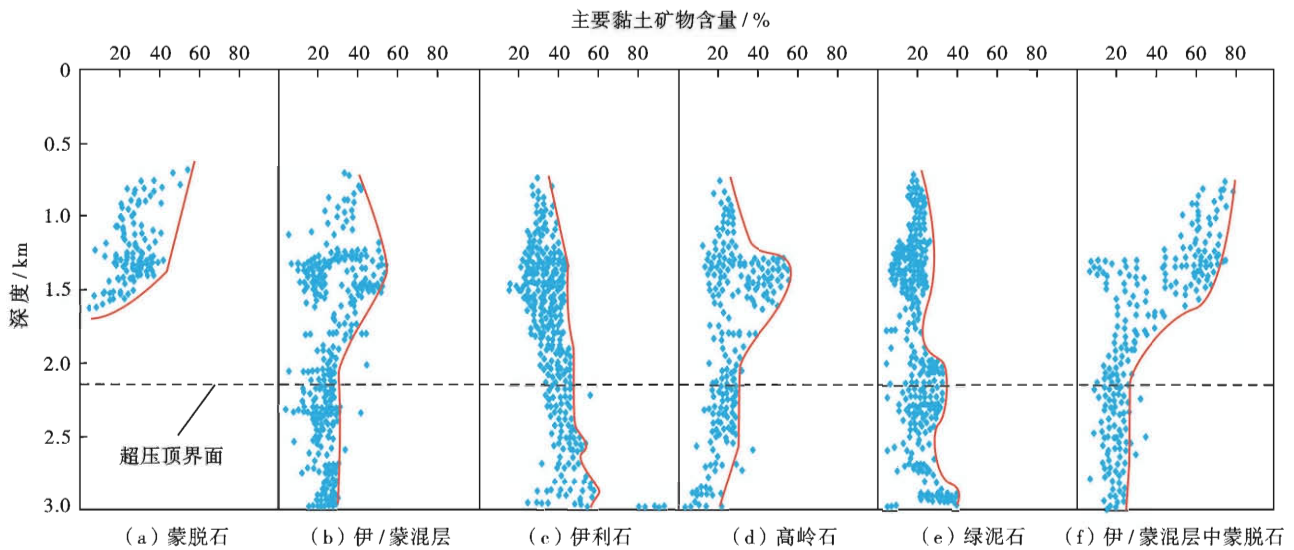


图 5 研究区泥岩黏土矿物含量随深度变化  
Fig. 5 Correlation between main clay mineral content and depth in study area

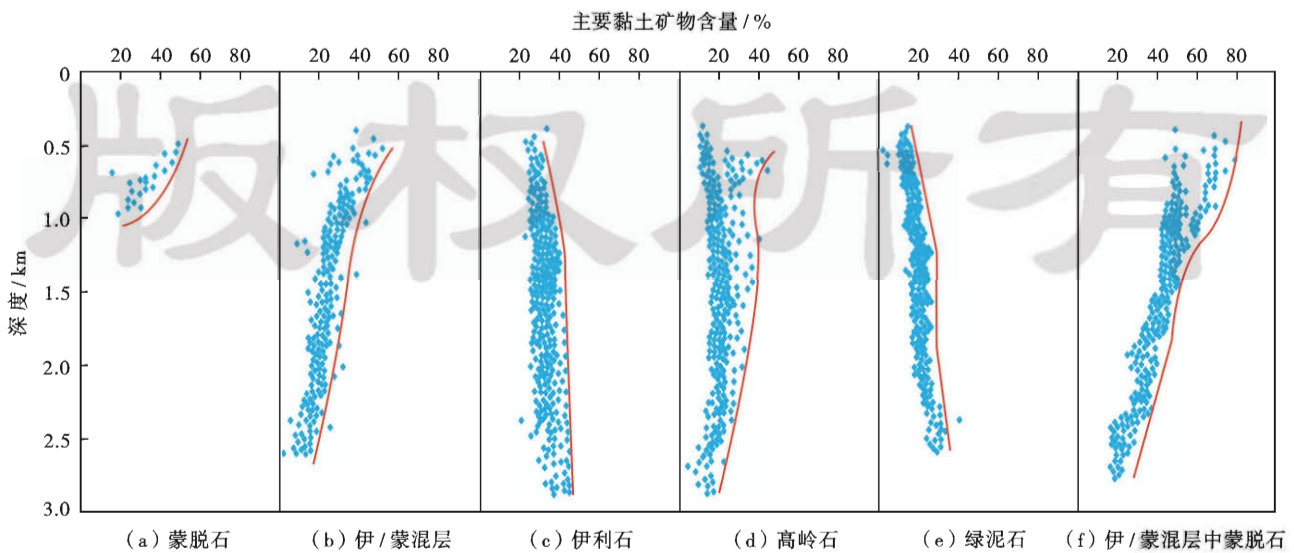


图 6 岭头区块泥岩黏土矿物含量随深度变化  
Fig. 6 Correlation between main clay mineral content and depth in Lingtou block

### 3.2 超压对有机质热演化的影响

国内外学者关于异常地层压力对有机质热演化的影响持不同观点,有些学者认为异常地层压力对有机质热演化没有明显的影响。国内有些学者对此进行研究后发现,超压对有机质热演化的抑制具有层次性<sup>[37]</sup>。

F2 井烃类的热解分析数据显示,超压对反映有机质热演化特征的镜质体反射率( $R_o$ )、热解峰温( $T_{max}$ )、生产指数( $I_p$ )等指标未产生可识别的影响(图 7),而对  $Pr/nC_{17}$  和  $Ph/nC_{18}$  等反映烃类结构演化特征的地

球化学指标具有非常明显的抑制作用(图 7),说明异常地层压力对产物浓度变化速率高、体积膨胀效应强的反应影响最显著。在深度为 1 500~2 100 m,随着埋深的增加, $Pr$ (姥鲛烷)/ $nC_{17}$  和  $Ph$ (植烷)/ $nC_{18}$  的比值变化很小或几乎不变,这符合有机质热演化的一般趋势。但在深度 2 200 m 以下, $Pr/nC_{17}$  和  $Ph/nC_{18}$  的比值呈现快速变大趋势(图 7),这与正常演化趋势相反。而 2 200 m 正是该井超压顶界面的深度(图 7),反映超压对  $Pr/nC_{17}$  和  $Ph/nC_{18}$  比值产生了显著的影响。

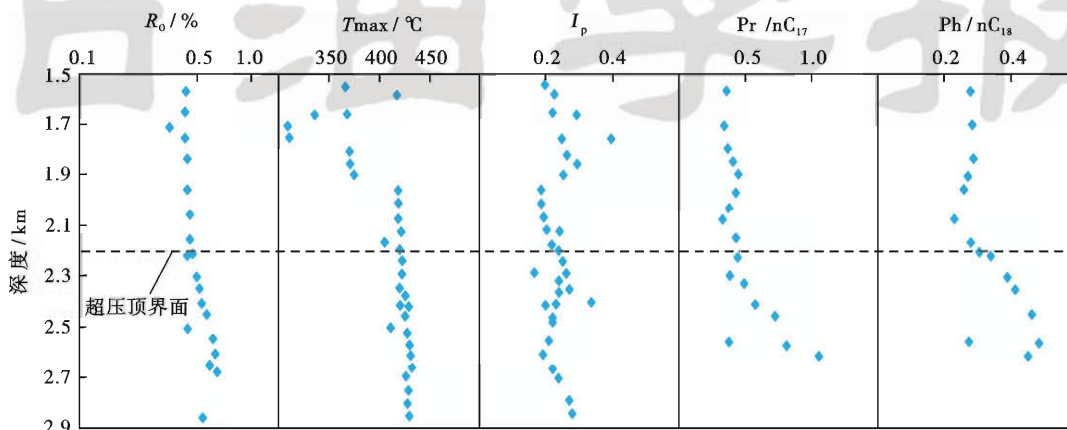


图 7 F2 井超压对烃类结构的影响

Fig. 7 Effect of overpressures on organic matter maturation for Well F2

$Pr/nC_{17}$  和  $Ph/nC_{18}$  的变化还受有机质来源和沉积-成岩环境的影响<sup>[3]</sup>。然而,干酪根有机显微组分分析(表 2)均表明,F2 井各地层单元均以陆源和浮游植物来源为主的Ⅲ型干酪根占绝对优势,因此排除了有机质来源和/或沉积环境变化引起  $Pr/nC_{17}$  和  $Ph/nC_{18}$  变化的可能性。

表 2 F2 井干酪根有机显微组分组成

Table 2 Maceral composition of kerogens from Well F2

深度/m	镜质组/%	惰质组/%	壳质组/%	腐泥组/%
1 490	48	20	1	31
1 572	51	30	1	18
1 650	9	7	微量	84
1 710	62	30	2	6
1 840	56	37	1	6
1 960	53	37	1	9
2 070	68	27	1	4
2 220	51	33	1	15
2 308	50	42	3	5
2 450	59	32	2	7
2 550	57	34	1	8
2 608	56	41	微量	3

正构烷烃和异戊间二烯烷烃的热稳定性存在较明显的差异,无环类异戊间二烯烷烃的热稳定性低于相邻的正构烷烃<sup>[3]</sup>。因此,随温度或成熟度增高, $Pr/nC_{17}$

和  $Ph/nC_{18}$  逐渐降低<sup>[3]</sup>。根据传统模式认为已进入准变质作用阶段的高温地层中仍存在较丰富的异戊间二烯烷烃,且  $Pr/nC_{17}$  和  $Ph/nC_{18}$  接近甚至大于 1,证明在强超压条件下,即使热稳定性较低的异戊间二烯烷烃亦能在通常认为的液态石油“死亡线”之下稳定存在<sup>[19]</sup>。更重要的是,F2 井各地层单元有机质来源和类型相同,证明深度 2 200 m 以下  $Pr/nC_{17}$  和  $Ph/nC_{18}$  的异常变化与超压环境下的有机质热演化密切相关,超压使热稳定性较低的组分在高温条件下得到保存。

### 4 超压对砂岩成岩作用的影响

和泥岩相比,砂岩的成岩作用相对复杂,它受温度、压力、沉积环境和构造条件等众多因素的控制<sup>[30]</sup>,超压主要对砂岩储层所经历的压实、胶结及溶蚀作用产生影响。

通过统计研究区及附近区块(岭头区块超压顶界面在 3 100 m 以上)70 余口井的 764 个岩石薄片鉴定结果(表 3),表明研究区碎屑岩储层以石英砂岩、岩屑石英砂岩为主,粒度主要为细、极细和粗粉砂,分选中一好。充填物主要是泥质、碳酸盐胶结物和少量石英胶结物,其含量分别为 6.4%、6.2%和 1.0%。

表 3 东方区块和岭头区块砂岩岩石学特征主要参数对比

Table 3 Contrast of sandstone petrology characteristics between Dongfang block and Lingtou block

区块	岩石定名	石英/ (长石 + 岩屑)	填隙物成分含量/%		结构	
			杂基	胶结物	粒度	分选
东方	石英砂岩和岩屑 石英砂岩为主	10.38	6.4(几乎都 为泥质)	6.2(主要为菱铁矿、 白云石、铁白云石)	细、极细砂 和粗粉砂	中—好
岭头	岩屑长石砂岩和 长石岩屑砂岩为主	4.47	5.3(几乎 都为泥质)	10.1(主要为方解石、 铁方解石、白云石)	中—粗砂	差—中

据前人研究表明<sup>[31]</sup>,平均埋深在 2 200~4 900 m 的深度范围内,  $R_o$  为 0.5%~1.3%, 孢粉颜色为桔黄色, 有机质处于低成熟—成熟阶段。研究区进入中成岩阶段 A 期, 地层开始出现超压<sup>[31]</sup>。同时由于高温热流体的活动活跃, 且流体中高含  $CO_2$ , 从而引起研究区长石蚀变、生物和碳酸盐矿物溶解等, 在研究区和附近岭头区块局部形成大量菱铁矿、铁白云石或铁方解石等含铁碳酸盐胶结物。其中, 研究区内多见其充填于由于受中成岩 A 期底辟热流体影响形成的粒间溶孔、

长石溶孔及铸模孔<sup>[31]</sup>, 判断含铁碳酸盐胶结物可能于中成岩阶段 A 期之后形成。由于超压的存在, 导致研究区砂岩成岩作用中压实作用、胶结作用和溶蚀作用与附近东方区块存在明显的差异性。

4.1 超压对压实作用的抑制

在收集前人研究资料的基础上<sup>[31]</sup>, 统计了研究区及附近岭头区块岩石铸体薄片和相应的物性数据, 建立了孔隙度随深度的变化关系(图 8)。超压顶界面上、下砂岩的孔隙类型以原生孔隙为主(表 4), 砂岩的

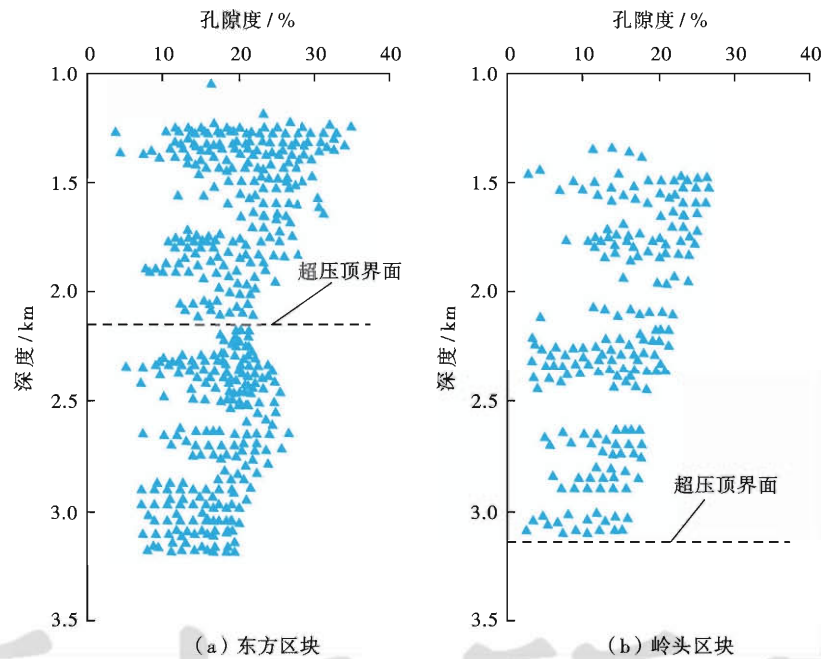


图 8 研究区及邻区砂岩孔隙度和深度的关系

Fig. 8 Correlation between porosity of sandstone and depth in study area and its nearby

表 4 东方区块和岭头区块砂岩层段孔隙类型定量分析对比

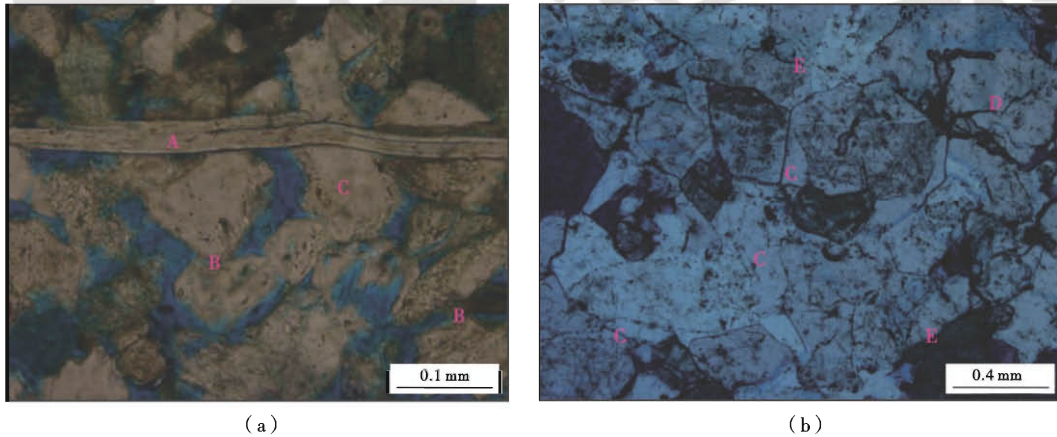
Table 4 Contrast of sandstone pore types quantitative analysis between Dongfang block and Lingtou block

区块	层位	原生孔/%			原生孔 比例/%	次生孔/%				次生孔 比例/%	面孔 率/%
		原生晶 间孔	生物体 腔孔	杂基 微孔		长石 溶孔	粒间溶 蚀孔	铸模孔 + 超大孔	其他溶 蚀孔		
东方	莺歌海组	54.5	3.5	6.5	64.5	5.0	14.0	11.0	5.5	35.5	16.7
	黄流组	59.5	0	3.0	62.5	20.0	14.5	3.0	0	37.5	19.3
	梅山组	36.0	0	3.0	39.0	18.0	31.0	2.5	9.5	61.0	13.2
岭头	莺歌海组	78.0	0	7.0	85.0	3.0	9.0	1.0	2.0	15.0	21.1
	黄流组	66.0	0	4.0	70.0	17.5	7.5	2.0	3.0	30.0	14.1
	梅山组	68.0	0	6.0	74.0	15.5	6.5	1.0	3.0	26.0	8.5

组分和结构也基本相似。从图8中可以看出,研究区压实作用在沉积物埋藏的早期阶段表现得比较明显,随着深度增加,孔隙度由1250 m时的34%降低到约2000 m的23%,砂岩的压实率约为64%。而在超压顶界面(2200 m)以下,研究区欠压实作用增强,流体超压承担了部分上覆地层压力,降低了机械压实作用,使得超压顶界面以下砂岩的压实率明显减小,约为33%,并使相同深度下超压区(即东方区)的砂岩孔隙度远大于附近常压区(即岭头区块),形成了一个异常

高孔带。

砂岩中矿物颗粒的接触类型也可以反映砂岩的压实强度,从点接触到凹凸接触,反映砂岩的压实作用增强。笔者选取研究区与区块的两口井F10井和T3井的铸体薄片进行镜下观察发现,常压环境下砂岩的压实强度明显强于超压环境,常压环境中颗粒接触关系为凹凸一线接触,部分石英等刚性颗粒甚至被压裂、压断,而超压环境中砂岩的颗粒接触关系普遍为点接触或点一线接触(图9)。



(a) 强超压环境,压实作用较弱,长条状云母(A)保存较好,颗粒接触关系为线一点接触(B),偶见石英加大现象(C),溶蚀作用强,孔隙较好,F10井3213.5 m;(b)常压环境,压实作用强烈,刚性颗粒部分见压裂现象(D),颗粒接触关系为凹凸一线接触(E),石英加大现象普遍(C),溶蚀作用弱,孔隙差,T3井3186.0 m。

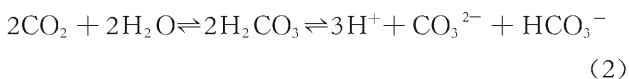
图9 研究区与岭头区块相近深度砂岩压实作用镜下对比

Fig. 9 Contrast of sandstone compaction in similar depth between the study area and Lingtou Block under microscope

#### 4.2 超压对胶结作用的抑制

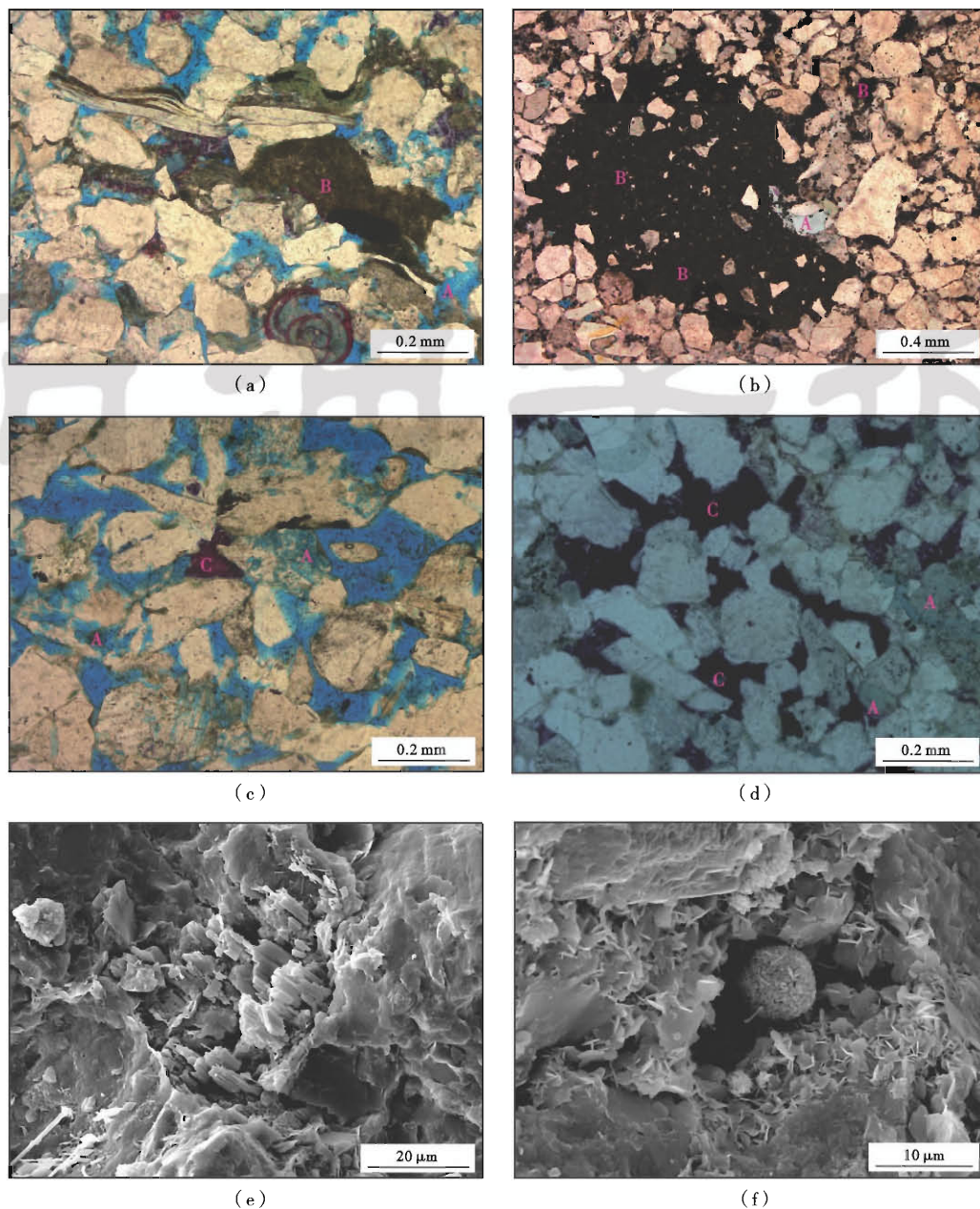
胶结作用和压实作用一样,是岩石孔、渗性变差的破坏性成岩作用,而胶结物的生成会受到超压的影响<sup>[13]</sup>。岩石显微镜下的观察发现,东方区块内胶结物主要包括菱铁矿、(铁)白云石、铁方解石和少量的石英胶结物,岭头区块内胶结物主要包括(铁)方解石、(铁)白云石和少量的石英胶结物(图10)。

碳酸盐胶结物普遍存在于研究区各层位,但含量差异很大。在1200~2000 m的常压深度范围内,碳酸盐胶结物含量可高达39.5%,但在超压顶界面2200 m以下深度范围内,胶结物含量随深度增大逐渐降低(图11)。与附近岭头区块碳酸盐胶结物分布特征对比,发现研究区超压环境下碳酸盐胶结物含量远低于附近岭头区块相同深度常压环境下碳酸盐胶结物含量(图10)。其原因在于碳酸盐在水中的溶解度受压力的影响,压力越高,溶解度越大<sup>[32]</sup>。其次,研究区储层普遍高含CO<sub>2</sub>,而根据:



当压力升高时,式(2)的反应将向右侧进行,又进一步促进碳酸盐胶结物溶解<sup>[33-34]</sup>。通过碳酸盐胶结物含量与压力系数之间的关系图也发现,超压越强烈,即压力系数越大,碳酸盐胶结物含量越少,呈明显的负相关关系[图11(b)]。另外,泥岩黏土矿物蒙脱石转化过程中,释放出的Ca<sup>2+</sup>可以形成方解石等碳酸盐胶结物,而如前所述,超压可以抑制黏土矿物转化,间接减少了碳酸盐胶结物形成的物质来源。因此,超压通过流体介质间接抑制了碳酸盐胶结物生成。

石英胶结物广泛分布于莺歌海盆地各地层砂岩中,主要以石英次生加大边的形式出现。由于研究区主要为碱性成岩环境,所以石英含量较低,一般不超过3%,并随着深度增大,逐渐增多,但在深度为2100 m时,含量突然减小[图12(a)],而岭头区块相同深度常压环境下无此特征[图12(c)]。通过建立石英胶结物含量与压力系数之间的关系图发现,压力系数越大,即超压越强烈,含量越少,呈明显的负相关关系[图12(b)]。



(a) 强超压环境, 长石(A) 溶蚀形成粒内溶孔、铸模孔, 后被泥晶菱铁矿集合体(B) 和少量铁方解石胶结交代, 孔隙较好, F8 井 2977 m; (b) 常压环境, 大量泥晶菱铁矿(B) 胶结交代颗粒, 少量长石(A) 发生弱溶蚀, 孔隙差, T4 井 2998.5 m; (c) 强超压环境, 长石溶蚀形成粒内溶孔、铸模孔(A), 后被少量铁方解石(C) 胶结交代, 孔隙好, F9 井 3108 m; (d) 常压环境, 长石溶蚀程度较轻(A), 后被大量细晶状铁方解石(C) 胶结交代, 孔隙差, K1 井 3136 m; (e) 超压环境, 长石石英极细砂岩, 长石颗粒被溶蚀成蜂窝状, F3 井 2707.26 m, 扫描电镜; (f) 超压环境, 泥质极细砂质粉砂岩, 溶孔中充填霉球状黄铁矿、针叶状绿泥石, F3 井 2709.91 m, 扫描电镜。

图 10 研究区及邻区砂岩主要胶结物镜下特征

Fig. 10 Main typical cements of sandstones in study area and its nearby

以凹凸接触和缝合线接触为主的石英压溶作用(化学压实)是石英胶结物的主要物质来源<sup>[35]</sup>。如前所述,研究层位主要发生机械压实作用,减少了石英胶结物的主要物质来源。

纵向上,石英胶结物含量与黏土矿物转化具有明显的相关性,如前所述,在超压顶界面 2 200 m 以下,

伊/蒙混层和伊/蒙混层中的蒙脱石层的含量几乎停止变化,而石英胶结物从 2 100 m 开始,含量突然减少。主要是由于在蒙脱石转化过程中,释放出的  $\text{Si}^{4+}$  可促使浅层砂岩中石英碎屑产生自生加大。因此,超压通过抑制压溶作用和黏土矿物转化,减少了  $\text{SiO}_2$  的供应量,进而间接抑制了石英胶结物的形成。



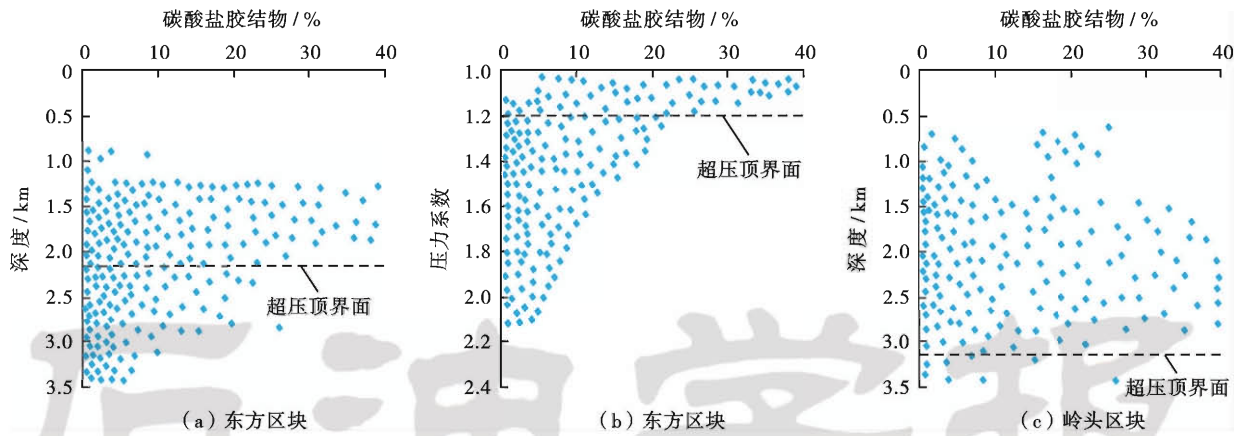


图 11 研究区及邻区砂岩碳酸盐胶结物含量与深度、压力系数之间的关系

Fig. 11 Correlation between carbonate cement content of sandstone and depth, pressure coefficient in study area and its nearby

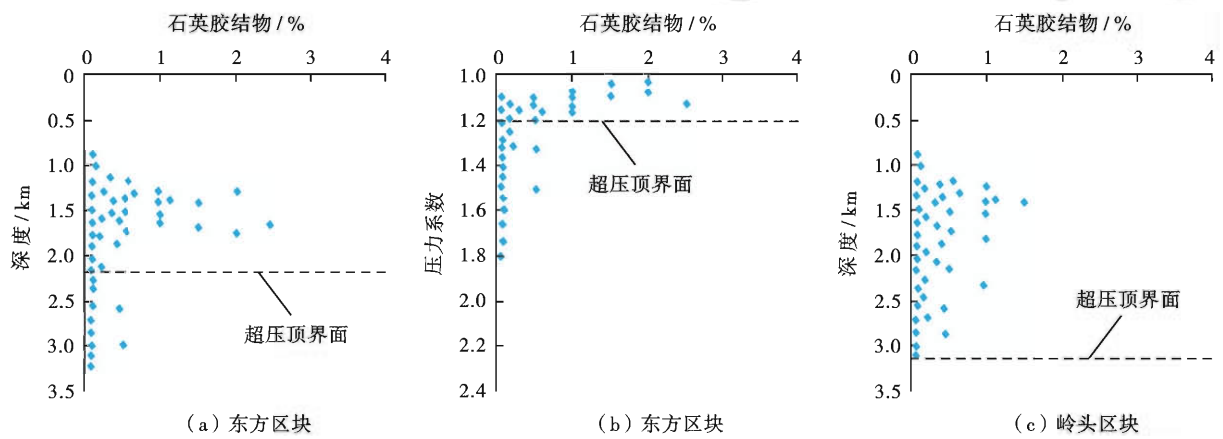


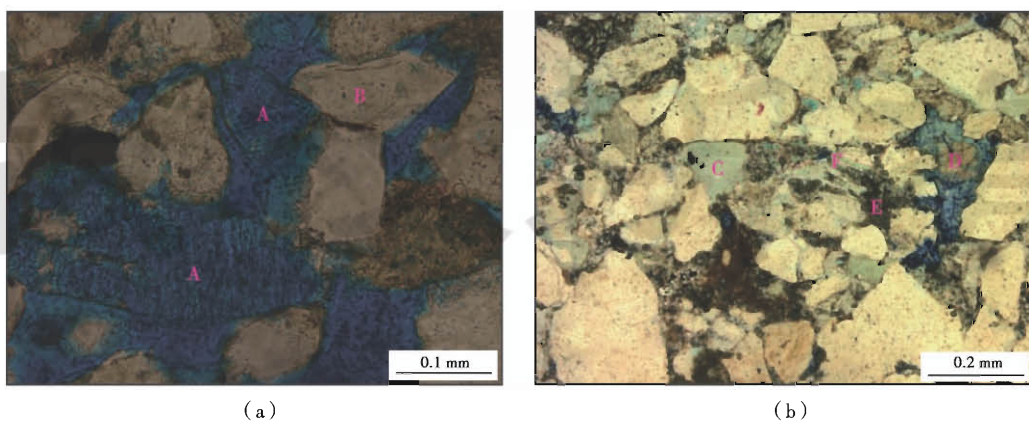
图 12 研究区及邻区砂岩石英胶结物含量与深度、压力系数之间的关系

Fig. 12 Correlation between quartz cement content of sandstone and depth, pressure coefficient in study area and its nearby

### 4.3 超压对溶蚀作用的影响

超压并没有直接控制溶蚀作用,而是通过地质流体间接对其产生影响。如前所述,地质流体中的  $CO_2$  除了能抑制碳酸盐胶结物的生成,同时能提供大量  $H^+$ ,起到溶蚀作用。笔者选取紧邻研究区超压顶界面

在 3 200 m 左右的两口弱超压井(K1 井和 T4 井)的薄片镜下观察进行对比,发现相同深度超压环境下溶蚀强度明显强于常压环境。例如,深度约为 3 000 m 时,研究区超压环境下长石大量溶蚀形成粒内溶孔、铸模孔,而附近常压环境下长石仅发生微弱溶蚀(图 13)。主



(a) 强超压环境,溶蚀程度严重,长石溶蚀形成大量铸模孔(A),偶见石英加大现象(B),孔隙发育,F11 井 3 133.0 m; (b)常压环境,溶蚀作用弱,长石(C)发生轻微溶蚀,见铁白云石(D)胶结交代早期的粉晶菱铁矿(E),压实作用强,见少量云母细小碎屑(F),孔隙欠发育,T4 井 2 980.5 m。

图 13 研究区及邻区砂岩主要成岩作用类型

Fig. 13 Main diagenetic types of sandstones in study area and its nearby

要是研究区储层普遍高含  $\text{CO}_2$ , 而根据式(2), 在超压环境下会大量生成  $\text{H}^+$ , 促进溶蚀作用的产生。另外, 梅山组泥岩是研究区中浅层的主力烃源岩, 源岩有机质热演化生烃过程中, 产生大量的有机酸和排出的  $\text{CO}_2$  水解所形成的无机酸, 同时生烃作用使得泥岩超压, 当压力大于静岩压力时, 其内部大量酸性流体将排到相邻的砂岩储层中, 溶解其中的长石和碳酸盐胶结物等不稳定的矿物, 从而产生大量粒内溶孔、铸模孔等次生孔隙(表4), 增加了黄流组等砂岩储层的孔隙度, 可以形成有利储层。

## 5 结论

(1) 莺歌海盆地存在 1 个超压体系, 其超压顶界面深度从盆地中心向边缘逐渐变深, 而位于盆地中央坳陷东方区块的超压顶界面深度约为 2 200 m。

(2) 研究区地层超压对碎屑岩成岩作用的影响是显著的, 且是多方面的。具体表现在: ①对泥岩中膨胀效应强的黏土矿物转化和有机质热演化中烃类结构的演化产生了抑制作用; ②对砂岩的压实和胶结起到抑制作用, 使原生孔隙得以有效保存; 对溶蚀则有促进作用, 促进了次生孔隙的生成, 从而地层超压利于有利储层的形成。

## 参考文献

- [1] 刘宝珺, 张锦泉. 沉积成岩作用[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 15.  
Liu Baojun, Zhang Jinquan. Sedimentary diagenesis[M]. Beijing: Science Press, 1992: 15.
- [2] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1-12.
- [3] 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.  
Hao Fang. Kinetics of hydrocarbon generation and mechanisms of petroleum accumulation in overpressure basin[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [4] 解习农, 李思田, 刘晓峰. 异常压力盆地流体动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006.  
Xie Xinong, Li Sitian, Liu Xiaofeng. Basin fluids dynamics in abnormally pressured environments[M]. Wuhan: The China University of Geosciences Press, 2006.
- [5] Garven G. Continental-scale groundwater flow and geologic processes[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1995, 23(1): 89-117.
- [6] Person M, Raffensperger J, Ge S, et al. Basin-scale hydrogeologic modeling[J]. Reviews of Geophysics, 1996, 34(1): 61-87.
- [7] Bachu S. Flow systems in the Alberta basin: patterns, types and driving mechanisms[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1999, 47(4): 455-474.
- [8] Stover S C, Ge S, Weimer P, et al. The effects of salt evolution, structural development, and fault propagation on Late Mesozoic-Cenozoic oil migration: a two-dimensional fluid-flow study along a megaregional profile in the northern Gulf of Mexico Basin[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(11): 1945-1966.
- [9] Wolf K H, Chilingarian G V. Diagenesis, III (Developments in sedimentology) (V. 3) [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992: 1-15.
- [10] Chilingarian G V, Wolf K H. Diagenesis, I (Developments in sedimentology) (V. 1) [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1998: 10-55.
- [11] Middleton G V. Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks [M]. London: Kluwer Academic Publisher, 2003: 626-635.
- [12] 解习农, 成建梅, 孟元林. 沉积盆地流体活动及其成岩响应[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 863-871.  
Xie Xinong, Cheng Jianmei, Meng Yuanlin. Basin fluid flow and associated diagenetic processes[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 863-871.
- [13] 李忠, 陈景山, 关平. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2113-2122.  
Li Zhong, Chen Jingshan, Guan Ping. Scientific problems and frontiers of sedimentary diagenesis research in oil-gas-bearing basins[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2113-2122.
- [14] 卢焕章. 成矿流体[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 210.  
Lu Huanzhang. Ore forming fluid[M]. Beijing: Science Press, 1997: 210.
- [15] 解习农, 焦超超, 熊海河. 松辽盆地十屋断陷异常低压体系及其成因机制[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2003, 28(1): 61-66.  
Xie Xinong, Jiao Jiujiu, Xiong Haihe. Underpressure system and forming mechanism in the Shiwu depression of Songliao basin [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(1): 61-66.
- [16] Wilson A M, Fenstemaker T, Sharp Jr. J M. Abnormally pressured beds as barriers to diffusive solute transport in sedimentary basins[J]. Geofluids, 2003, 3(3): 203-212.
- [17] 解习农, 刘晓峰, 赵士宝, 等. 异常压力环境下流体活动及其油气运移主通道分析[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(5): 589-595.  
Xie Xinong, Liu Xiaofeng, Zhao Shibao, et al. Fluid flow and hydrocarbon migration pathways in abnormally pressured environments[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(5): 589-595.
- [18] 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, 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.
- [19] Hao Fang, Li Sitian, Dong Weiliang, et al. Abnormal organic-matter maturation in the Yinggehai Basin, South China Sea: implications for hydrocarbon expulsion and fluid migration from overpressured systems[J]. Journal of Petroleum Geology, 1998, 21(4):

- 427-444.
- [20] Hao Fang, Li Sitian, Gong Zaisheng, et al. Thermal regime, inter-reservoir compositional heterogeneities, and reservoir-filling history of the Dongfang Gas Field, Yinggehai Basin, South China Sea; evidence for episodic fluid injections in overpressured basins? [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(5): 607-626.
- [21] Hao Fang, Li Sitian, Sun Yongchuan, et al. Organic-matter maturation and petroleum generation model in the Yinggehai and Qiongdongnan Basin [J]. *Sciences in the China; Series D*, 1996, 39(6): 650-658.
- [22] Hao Fang, Li Sitian, Sun Yongchuan, et al. Overpressure retardation of organic-matter maturation and hydrocarbon generation: A case study from the Yinggehai and Qiongdongnan basins, offshore South China Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(4): 551-562.
- [23] 谢玉洪, 张迎朝, 李绪深, 等. 莺歌海盆地高温超压气藏控藏要素与成藏模式 [J]. *石油学报*, 2012, 33(4): 601-609.  
Xie Yuhong, Zhang Yingzhao, Li Xushen, et al. Main controlling factors and formation models of natural gas reservoirs with high-temperature and overpressure in Yinggehai Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(4): 601-609.
- [24] 裴健翔, 于俊峰, 王立锋, 等. 莺歌海盆地中深层天然气勘探的关键问题及对策 [J]. *石油学报*, 2011, 32(4): 573-579.  
Pei Jianxiang, Yu Junfeng, Wang Lifeng, et al. Key challenges and strategies for the success of natural gas exploration in mid-deep strata of the Yinggehai Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(4): 573-579.
- [25] 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 507.  
Gong Zaisheng, Li Sitian. The oil and gas accumulation and the margin basin in South Sea of China [M]. Beijing: Science Press, 1997: 507.
- [26] 孟凡晋, 肖丽华, 谢玉洪, 等. 莺歌海盆地黏土矿物异常转化及其地质意义 [J]. *沉积学报*, 2012, 30(3): 469-476.  
Meng Fanjin, Xiao Lihua, Xie Yuhong, et al. Abnormal transformation of the clay minerals in Yinggehai basin and its significances [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(3): 469-476.
- [27] Zhang Qiming, Zhang Quanxing. A distinctive hydrocarbon basin-Yinggehai basin, South China Sea [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1991, 6(2): 69-74.
- [28] 徐同台, 王行信, 张有瑜, 等. 中国含油气盆地粘土矿物 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 80-150.  
Xu Tongtai, Wang Xingxin, Zhang Youyu, et al. Clay mineral of Chinese petroliferous basins [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 80-150.
- [29] 孟元林, 李斌, 王志国, 等. 黄骅坳陷中区超压对有机酸生成和溶解作用的抑制 [J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(1): 40-43.  
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.
- [30] Morad S, Ketzer J M, De Ros L F. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks; implications for mass transfer in sedimentary basins [J]. *Sedimentology*, 2000, 47 (Suppl. 1): 95-120.
- [31] 吕明. 莺-琼盆地含气区储层特征 [J]. *天然气工业*, 1999, 19(1): 20-24.  
Lü Ming. Reservoir characteristics of the gas-bearing area in Ying-Qiong basin [J]. *Natural Gas Industry*, 1999, 19(1): 20-24.
- [32] 王行信, 新国强, 吴河勇, 等. 松辽盆地粘土矿物研究 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1990: 65.  
Wang Xingxin, Xin Guoqiang, Wu Heyong, et al. The research of clay mineral in Songliao basin [M]. Haerbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1990: 65.
- [33] 何家雄, 张伟, 陈刚. 莺歌海盆地 CO<sub>2</sub> 成因及运聚特征的初步研究 [J]. *石油勘探与开发*, 1995, 22(6): 8-15.  
He Jiaxiong, Zhang Wei, Chen Gang. A preliminary study on the genesis of CO<sub>2</sub> gas and characteristics in its migration and accumulation in the Yinggehai Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1995, 22(6): 8-15.
- [34] 于志超, 杨思玉, 刘立, 等. 饱和 CO<sub>2</sub> 地层水驱过程中的水-岩相互作用实验 [J]. *石油学报*, 2012, 33(6): 1032-1042.  
Yu Zhichao, Yang Siyu, Liu Li, et al. An experimental study on water-rock interaction during water flooding in formations saturated with CO<sub>2</sub> [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(6): 1032-1042.
- [35] Bjorkum P A, Walderhaug O, Aase N E. A model for the effect of illitization on porosity and quartz cementation of sandstones [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1993, 63(6): 1089-1091.

(收稿日期 2013-04-26 改回日期 2013-08-02 责任编辑 熊英)