

doi:10.3799/dqkx.2012.092

松辽盆地齐家古龙—三肇凹陷超压对成岩作用的影响

雷振宇^{1,2}, 解习农^{1,2}, 孟元林³, 黄卫^{1,2}, 杜学斌^{1,2}, 肖丽华³, 孟凡晋³, 焦金鹤³, 刘文慧³

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. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318

摘要: 松辽盆地齐家古龙—三肇凹陷青山口组以上地层发育3套明显的压力体系, 其中作为勘探重点的青山口组和嫩江组泥岩超压不仅控制烃类的生成, 还对相邻储层具有深远影响. 在前人研究基础上, 应用热解分析、X射线衍射、镜下鉴定、扫描电镜、铸体薄片鉴定等资料, 研究了超压对地质流体活动及成岩作用的影响. 结果表明, 超压不仅抑制了粘土矿物转化, 还抑制了烃类结构的演化. 另外, 成岩作用中的压实作用、胶结作用对于超压的抑制有明显的响应. 超压并不能直接影响溶解作用, 而是通过地质流体间接对其产生影响, 主要表现为由次生孔隙产生造成的孔隙度增加.

关键词: 松辽盆地; 超压; 流体; 成岩作用; 地层.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2012)04-0833-10

收稿日期: 2012-02-28

Effecting of Overpressures on Diagenesis in the Qijiagulong-Sanzhao Depression of Songliao Basin

LEI Zhen-yu^{1,2}, XIE Xi-nong^{1,2}, MENG Yuan-lin³, HUANG Wei^{1,2}, DU Xue-bin^{1,2},
XIAO Li-hua³, MENG Fan-jin³, JIAO Jin-he³, LIU Wen-hui³

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Faculty of Earth Science, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China

Abstract: There are 3 sets of obvious overpressure systems in the strata above the Qingshankou Formation in Qijiagulong-Sanzhao depression, Songliao basin. The overpressure in the Qingshankou (K_2qn) and Nenjiang (K_2n) Formation mud rock which is the key zone of exploration which not only controls the formation of hydrocarbon, but also impacts the adjacent reservoir property deeply. Based on the previous studies, this paper utilizes abundant materials, including thermal decomposition, X-ray diffraction, microscope analysis, SEM and blue epoxy resin-impregnated thin sections, to study the effect of overpressure on diagenesis. The results indicate: (1) the overpressure constrained the transformation of clay minerals, and also depressed the evolution of hydrocarbon structure. (2) The compaction and cementation during diagenesis responded apparently to the overpressure depression. The overpressure didn't affects dissolution directly, but via the geo-fluids indirectly, causing the increase of porosity by induced pore.

Key words: Songliao basin; overpressure; fluid flow; diagenesis; stratigraphy.

沉积盆地演化各个阶段的变化几乎都是在地质流体的参与下发生的, 纯粹的固相对固相的反应是可以忽略的(刘宝珺和张锦泉, 1992). 地质流体的压力系统是盆地流体活动的核心问题, 因此异常流体压力

的形成机理及流体活动规律成为了人们关心和研究的热点(Hunt, 1990; 马启富, 2000; Flemings and Lupa, 2004; 郝芳, 2005; 解习农等, 2006). 自发现盆地的异常压力现象以来, 国内外许多学者为沉积盆地异常

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40872076); 中国博士后科学基金第三批特别资助(No. 201003654); 中央高校基本科研业务费专项资金(No. CUGL100252).

作者简介: 雷振宇(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事地层异常压力、地质流体及成岩作用的研究. E-mail: leizhenyu0912@gmail.com

地层流体压力的研究付出了不懈努力 (Osborne and Swarbrick, 1997; Chiligar *et al.*, 2002; Xie *et al.*, 2003; Luo *et al.*, 2007), 他们将研究焦点锁定在现象、成因、与油气成藏的关系以及在盆地沉积演化中所参与的地质过程. 沉积盆地成岩作用研究一直是当今沉积学及盆地分析研究活跃的领域之一 (Wolf and Chilingarian, 1992; Chilingarian and Wolf, 1998; Middleton, 2003), 旨在对地下相对高温高压条件下沉积岩石物理特性变化和水-岩相互作用进行研究 (解习农等, 2009). 20 世纪 90 年代以来, 地质流体研究取得了突破性进展, 标志着成岩作用研究从“定量化和多学科研究”向“成岩过程及动力机制研究”发展 (李忠等, 2006), 人们逐渐认识到地质流体活动对成岩作用的影响以及水-岩相互作用在成藏成矿过程中所扮演的重要角色 (卢焕章, 1997; 解习农等, 2003b). 尽管前人在异常流体压力系统中的成岩作用及其对储层物性影响等方面取得了一些成果 (Wilson *et al.*, 2003; 解习农等, 2004; 孟元林等, 2006), 但仍然存在一些问题. 例如对不同压力环境条件下压力系统内部流体的幕式排出机制及活动规律, 异常压力对压力系统内部和外部地层成岩作用的影响及其在储层形成与改造过程中的作用等问题尚不清楚.

自 1955 年松辽盆地投入勘探以来, 许多学者对其油气成藏条件和机理进行了系统研究, 尤其在地质流体和成岩作用对成藏条件的影响方面取得了突出的成果 (高瑞祺和蔡希源, 1997; 黄福堂和冯子辉, 1999; 楼章华等, 2002; 孟元林等, 2010a). 但是松辽盆地异常压力条件下的水-岩相互作用以及超压对成岩作用影响方面的研究不够深入. 本文以松辽盆地北部中央凹陷带青山口组及其以上地层为研究对象, 试图探讨超压对流体活动及成岩作用的影响.

1 区域地质背景

松辽盆地位于中国东北部, 是中国最大的中生代非海相含油气盆地. 从侏罗系开始一直到新生界均有不同程度的沉积, 但以白垩系沉积为主, 总厚度达 5 000 m 以上. 其中上白垩统 (图 1) 从下至上依次发育青山口组 (K_2qn)、姚家组 (K_2y)、嫩江组 (K_2n)、四方台组 (K_2s) 和明水组 (K_2m).

青山口组为一套黑色、灰绿色泥岩和砂岩, 岩相变化大, 其中青一段沉积时期为盆地第一次海侵时期, 沉积了大面积的黑色页岩和油页岩, 为生油密集段. 随后水体变浅、沉积物粒度变粗, 形成青二、三段

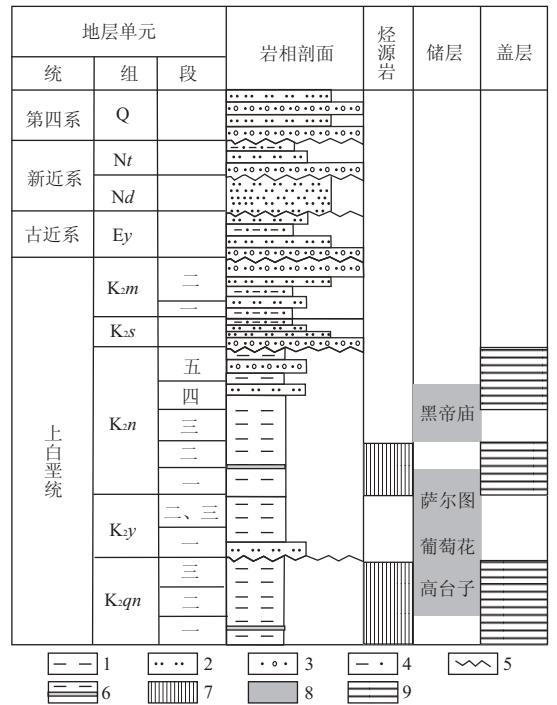


图 1 松辽盆地地层综合柱状图

Fig. 1 Comprehensive stratigraphic column in Songliao basin
1. 泥岩; 2. 砂岩; 3. 砂砾岩; 4. 砂质泥岩; 5. 不整合; 6. 暗色泥岩; 7. 烃源岩; 8. 储层; 9. 盖层

灰黑色泥岩夹粉砂岩. 青山口组沉积末期, 盆地周围开始抬升, 盆地开始沉降并接受沉积, 发育了深湖一半深湖相的泥岩, 其中姚一段为灰绿、紫红色泥岩与灰白、灰绿色砂岩互层, 姚二、三段为灰黑色泥岩、薄层油页岩夹灰绿色泥岩和粉砂岩, 湖相沉积范围小, 以河流相沉积为主. 姚家组末期, 海湖沟通, 盆地发生了大规模湖泛, 到嫩江组一段沉积末期达到最高峰, 并发生第二次海侵事件. 嫩一、二段以灰黑、深灰色泥岩为主, 夹薄层油页岩、灰绿色粉砂质泥岩. 嫩三、四、五段以河流-三角洲和滨浅湖相沉积为主, 灰绿、深灰色泥岩、粉砂岩、细砂岩互层. 青山口组和嫩江组泥岩的形成时期, 分别对应了两次大型湖侵事件, 沉积厚度大 (侯启军等, 2009), 形成了两套优质的烃源岩与盖层, 是松辽盆地中浅层地层主要含油层系, 也是本次研究的重点层位.

2 研究区现今压力状态

对松辽盆地异常压力的研究始于 20 世纪 90 年代. 国内许多学者报道和论述了盆地内超压 (向才富等, 2006) 和低压 (解习农等, 2003b) 分布状况、产生机理及其与油气的关系. 笔者对盆地北部中央拗陷

带齐家古龙—三肇凹陷的千余口井通过建立声波时差与深度的关系发现,研究区上白垩统分布两套明显的欠压实泥岩,即嫩江组一、二段和青山口组,意味着这两套泥岩发育超压。结合实测数据和声波时差计算地层压力发现,青一段超压最大、分布最广,主要分布在研究区西南部及东部。地层由老到新,超压逐渐降低,分布范围逐渐减小。而姚家组则出现弱超压、常压和低压并存的情况。两套超压体系在不同的构造带内,超压顶界面深度不同,嫩江组超压顶界面在齐家古龙凹陷、大庆长垣、三肇凹陷的深度分别约为1 400 m、800 m 和 1 000 m,而青山口组超压顶界面在 3 个构造单元内的深度分别约为 2 200 m、1 400 m 和 1 900 m。

综上所述,研究区范围内存在 2 个超压体系、夹 1 个多压力并存体系。尽管不同的构造区带内超压顶界面深度不同,但嫩江组超压顶界面大致在 1 200 m 附近,而青山口组泥岩超压顶界面大致在 1 800 m 附近。

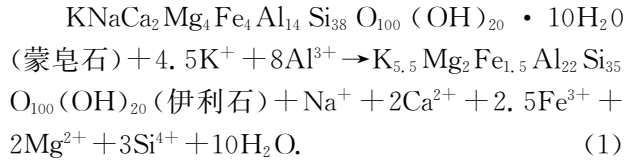
3 超压对泥岩成岩作用的影响

和砂岩相比,泥岩的成岩作用相对简单,却对整个成岩体系的酸碱度、砂岩的胶结作用、溶蚀作用和交代作用具有极其重要的控制作用。

3.1 超压对粘土矿物转化的抑制

数据显示,研究区粘土矿物主要包括伊利石、绿泥石、高岭石、伊/蒙混层、蒙皂石。其中,蒙皂石对温

压条件反应最为敏感,因此,许多学者利用这一特性来研究蒙皂石与高地温梯度和超压的关系(Buryakovsky *et al.*, 1995)。研究区蒙皂石主要在浅层出现,在深度约 1 200 m 以下逐渐减小(图 2),1 750 m 以下逐渐消失,这是蒙皂石向伊利石转化的结果:



Burst(1969)指出当埋藏深度为 1 000 m、温度约 70 °C 时,蒙皂石即可向伊利石转化,并伴随脱水作用,这个阶段是脱水速度最快的阶段。但是从研究区蒙皂石的分布情况来看,在 1 000 m 以下,粘土矿物中仍发育大量的蒙皂石,直到 1 200 m 左右蒙皂石含量开始减少,这一深度刚好和研究区超压顶界面吻合,表明超压对于粘土矿物转化具有明显的抑制作用。由式(1)可以看出,蒙皂石向伊利石转化时,需要从流体中吸取 K^+ 、 Al^{3+} 等金属阳离子,这些阳离子主要来源于有机酸对铝硅酸盐、碳酸盐矿物的溶解作用(徐同等,2003)。超压对有机酸的生成具有抑制作用(孟元林等,2008),导致流体中的 K^+ 、 Al^{3+} 浓度减小。另外,超压系统作为一个相对封闭的系统,其内部流体几乎处于静止状态,不利于水—岩相互反应,从而抑制了粘土矿物转化。

3.2 超压对烃类结构演化的抑制

泥岩中的有机质热演化是一种特殊的有机成岩

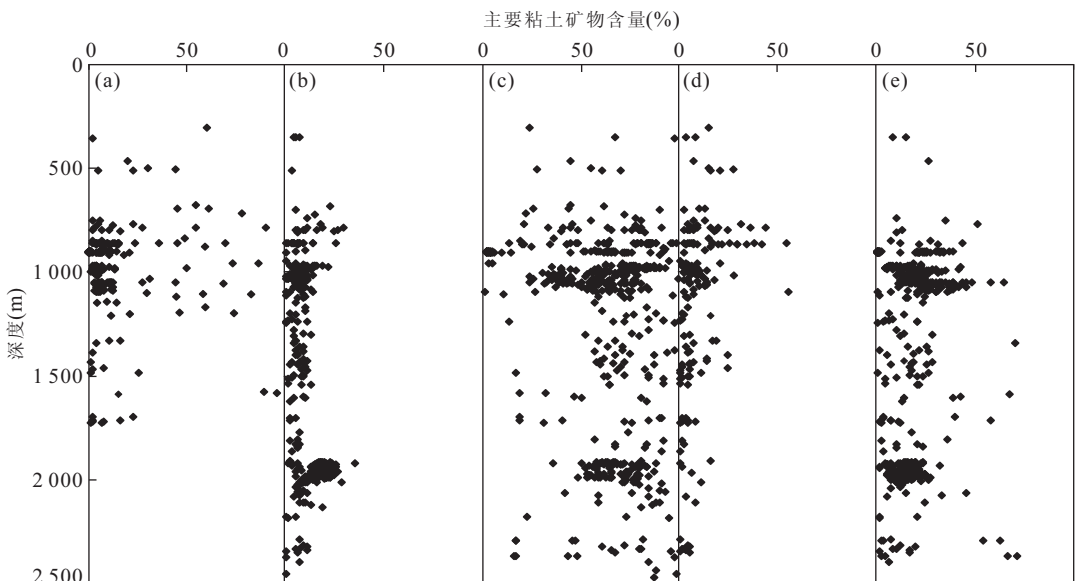


图 2 研究区主要粘土矿物随深度变化对比剖面

Fig. 2 Relationship between main clay mineral content and depth

a. 蒙皂石; b. 伊蒙混层; c. 伊利石; d. 高岭石; e. 绿泥石

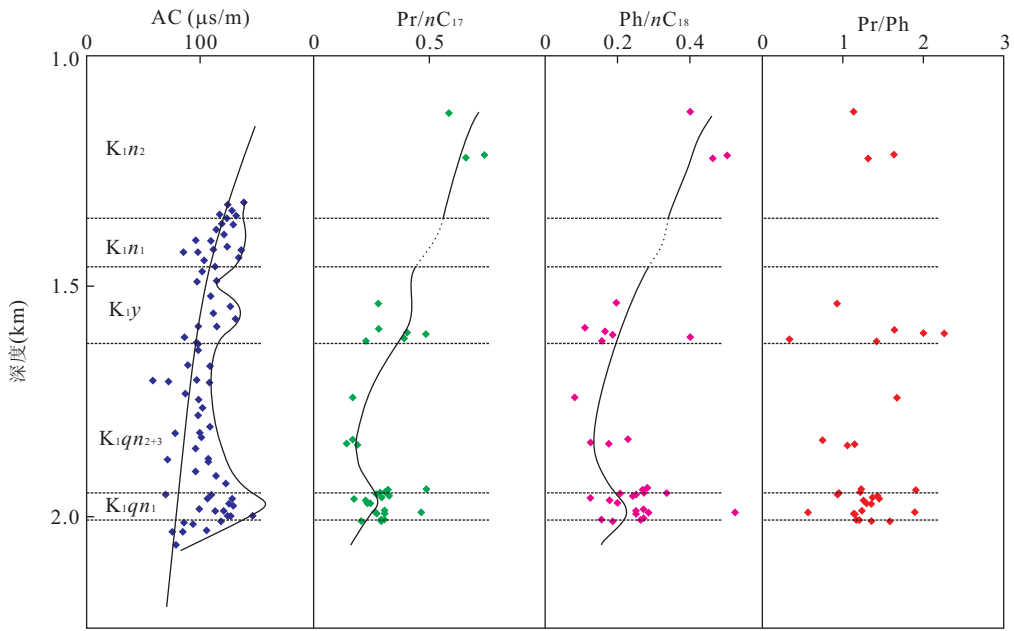


图 3 徐 11 井超压对烃类结构的抑制

Fig. 3 Overpressure retardation on organic matter maturation

作用. 国内外研究表明,超压对有机质热演化具有抑制作用 (Carr, 1999; 查明等, 2002). Hao *et al.* (2007) 进一步研究表明,超压对有机质热演化的抑制具有层次性.

烃类的热解分析数据显示,研究区超压对镜质组反射率(R_o)、热解峰温(T_{max})、生产指数(PI)等反映有机质热演化特征的地化指标没有抑制作用(内部资料),而对烃类结构演化具有较明显的抑制作用(图 3),属层次二,即超压仅对产物浓度变化速率高、体积膨胀效应强的有机反应产生抑制作用,而贫氢组分的热演化包括镜质体的成熟作用未受到可识别的影响. 随着埋深的增加,Pr(姥鲛烷)/ nC_{17} 和Ph(植烷)/ nC_{18} 逐渐降低,这符合有机质热演化的一般趋势. 但 1 900 m 以下,泥岩声波时差出现异常增大,超压发育,Pr/ nC_{17} 和 Ph/ nC_{18} 减小趋势改变,逐渐出现增大趋势,这与有机质正常演化趋势相反. 这一深度与研究区青一段超压顶界面的深度大致吻合. 需要注意的是,徐 11 井在嫩一段的有机地化数据较少,预测其具有增大的变化趋势(图 3 中虚线).

4 超压对砂岩成岩作用的影响

砂岩成岩作用受一系列复杂的因素控制,包括地层压力、温度、沉积和构造环境等 (Morad *et al.*, 2000). 研究区砂岩储层主要经历了压实作用、胶结

作用、溶蚀作用、交代和重结晶作用等,但超压主要对压实、胶结及溶蚀作用产生影响,其中压实和胶结作用属于破坏性成岩作用,使储层物性变差,而溶蚀作用则刚好相反.

通过收集前人研究资料及对百余口井的岩石薄片鉴定结果统计,研究区碎屑岩储层以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主(图 4). 充填物包括粘土杂基和胶结物,胶结物主要为泥质、碳酸盐胶结物和石英胶结物.

4.1 超压对压实作用的影响

压实作用是指在上覆沉积物压力和流体静压力或构造变形压力的作用下,沉积物孔隙空间和总体

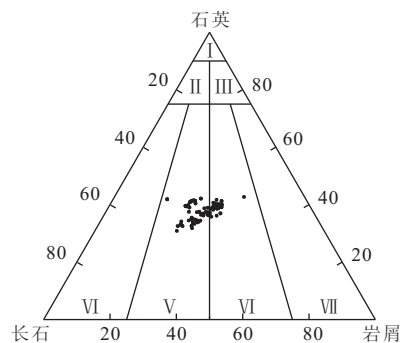


图 4 砂岩类型三角图(单位:%)

Fig. 4 Sandstone components triangular diagram

I. 石英砂岩; II. 长石石英砂岩; III. 岩屑石英砂岩; IV. 长石砂岩; V. 岩屑长石砂岩; VI. 长石岩屑砂岩; VII. 岩屑砂岩

积减少,从而沉积物变致密的这一过程. 压实作用分为机械压实和化学压实(压溶),属于破坏性成岩作用,随着深度增加,机械压实加强,孔隙度减小. 而超压使得流体承担了部分上覆地层压力,在一定程度上保护了孔隙度. 因此,松辽盆地超压层位均发育异常高孔隙度(孟元林等,2011).

本次研究在数据统计的基础上,综合考虑研究层位铸体薄片资料,建立了孔隙度与深度变化关系(图 5). 从图中明显可以看出,研究区纵向上分为 3 个高孔带. 孔隙度由 100 m 左右的 38% 减至 400 m 左右的 34%. 在 400 m 以下,随着深度增加,欠压实作用增强,流体超压承担了上覆地层的重力,使得孔隙度得到保存,形成第 I、II 高孔带. 另外,由于第 I 高孔带埋深较浅,此时大气水的淋滤作用对储层孔隙度也有较强的改造作用.

不仅如此,根据颗粒接触类型,可以判断颗粒接触紧密的程度,从而由定性一半定量确定压实强度. 通常将颗粒接触类型分为:(1)点接触,反映弱压实强度;(2)线接触,反映中等压实强度;(3)凹凸接触,反映较强压实强度;(4)缝合线接触,反映强压实强度. 据邢顺涩和姜洪启(1993)得到如下公式:

$$I_c = \frac{1a + 2b + 3c + 4d}{a + b + c + d},$$

式中: I_c 为压实强度;1、2、3、4 为对应的接触关系; a 、 b 、 c 、 d 为颗粒接触类型的颗粒数.

对镜下鉴定结果统计发现,矿物颗粒之间的接触关系主要为点接触或点一线接触,最高级别可以达到线接触,没有发现缝合接触. 这说明研究区砂岩主要发生机械压实作用,并没有进入压溶阶段. 笔者选取同一构造单元内沉积环境相同的一口常压井古 140 井(压力系数 1.13)和一口超压井古 204 井(压力系数 1.27)进行对比(表 1),发现超压环境下压实强度弱于常压环境. 镜下观察发现,超压井中云母多被压弯,而常压井中普遍存在云母压断现象(图 6a, 6b)也从侧面佐证了这一观点.

4.2 超压对胶结作用的影响

研究区胶结物主要包括碳酸盐胶结物和石英胶结物(图 6c, 6d). 碳酸盐胶结物主要呈粒间胶结物、交代物或次生孔隙内填充物出现. 方解石胶结物主要形成于结构成熟度和成分成熟度都较高的地层,地层中的泥质含量往往较低,且与方解石含量呈负相关关系.

纵向看,碳酸盐胶结物普遍存在于研究层位,但含量都比较低(均低于 10%). 其中青一段下伏泉四

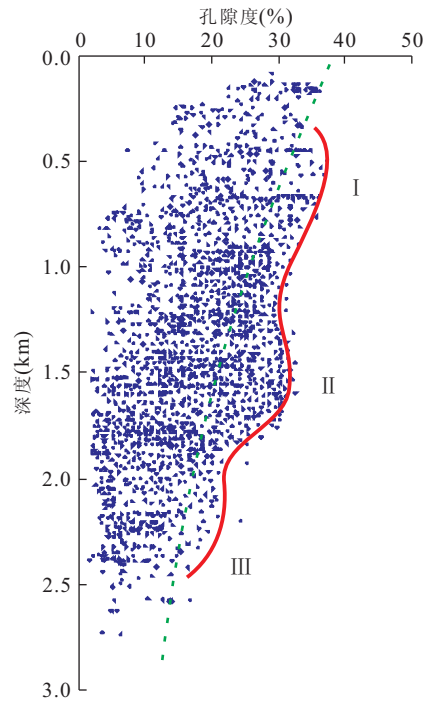


图 5 研究区孔隙度和深度的关系(I、II、III 指示高孔带)

Fig. 5 Relationship between porosity and depth

表 1 齐家古龙凹陷青一段压实作用对比

Table 1 Compaction comparison in different wells

井号	压力系数	I_c	压实程度
古 140	1.13	(2.4—3.2)/2.8	较强
古 204	1.27	(1.1—2.7)/1.8	较弱

段和上覆青二、三段碳酸盐胶结物含量最高,分别为 8.74% 和 6.35%, 而泉三段含量最低 4.17% (图 7). 王行信等(1990)指出由于碳酸盐在水中的溶解度与压力有很大的关系,压力越高,溶解度越大. 青一段作为研究区比较明显的超压层段,当富含碳酸盐的流体从泥岩进入与之接触的砂岩层时,孔隙流体压力突然降低,使原有的饱和或者不饱和溶液变成过饱和状态,同时,松辽盆地广泛分布的介形虫包壳(图 6d)的溶解能提供丰富的钙离子,因此会在泥岩附近砂岩层的顶、底富集,形成“钙顶”和“钙底”(孟元林等,2010b).

石英胶结物在松辽盆地砂岩中广泛分布,通常以石英次生加大边和自形石英晶体的形式出现(图 6d). 但在本次较浅的研究层位中含量较少,一般不超过 6% (图 8a),并随着深度增大,石英胶结物增多,在 1 200~1 300 m 范围内,含量突然减小. 通过将石英胶结物含量与压力系数对比,发现明显的负相关关系,即压力系数越大,超压越强烈,石英胶结

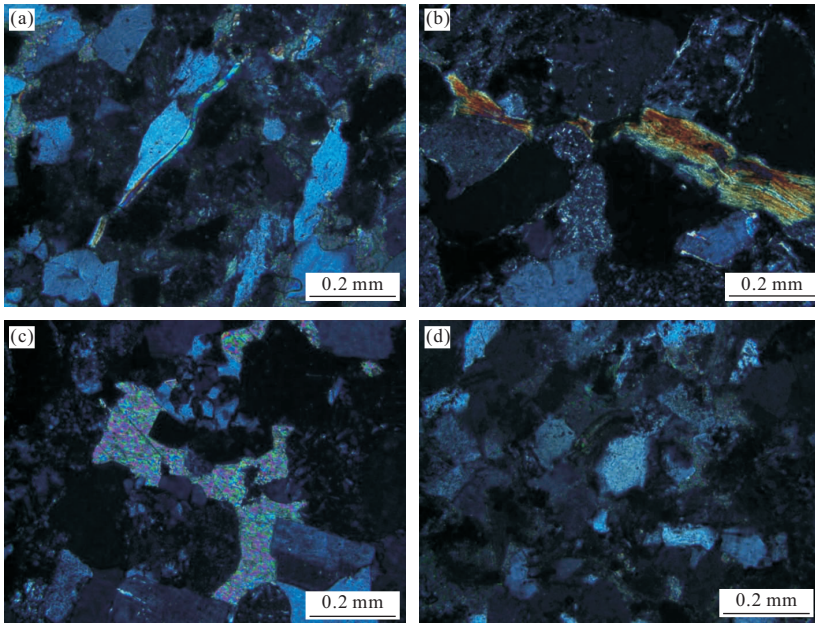


图 6 研究区云母变形及胶结物类型

Fig. 6 Mica deformation and typical cement in study area

a. 古 204 井, 2 085.87 m, 正 \times 20, 云母压弯; b. 古 140 井, 1 685.99 m, 正 \times 20, 云母压断; c. 古 140 井, 1 826.39 m, 正 \times 20, 方解石胶结; d. 古 204 井, 2 084.14 m, 正 \times 20, 石英先加大, 方解石后胶结, 钙质介壳

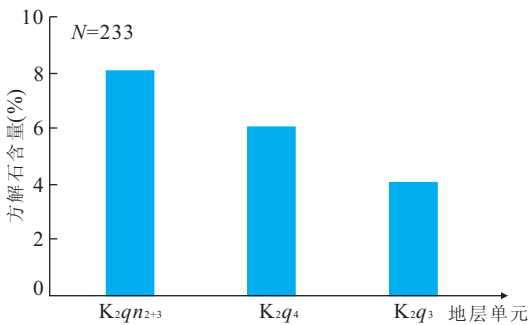
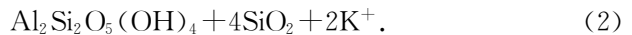
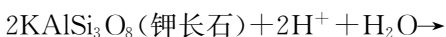


图 7 不同层位方解石含量对比(N为样品个数)

Fig. 7 Calcite content comparison in different formations

物含量越少(图 8b)。

Bjorkum *et al.* (1993) 提出石英胶结物的主要来源为以缝合作用为主的石英压溶作用, 属于化学压实。如前所述, 研究层位并没有出现压溶作用。薄片观察表明, 长石、岩屑的溶解常与石英次生加大伴生(图 9a), 同一薄片中能同时观察到长石溶解和石英次生加大(图 6d, 9a, 9b)。这是因为在铝硅酸盐矿物溶解的过程中产生了 SiO_2 , 为石英的次生加大提供了物质基础(孟元林等, 2005)。不仅如此, 根据式(2)钾长石的溶解产生 K^+ , 为蒙皂石向伊利石转化提供了物质来源, 而粘土矿物转化产生大量的 Si^{4+} 进一步促使自生加大形成:



因此, 研究区的粘土矿物转化和石英胶结物含量在纵向上具有良好的对应关系, 在超压发育地层尤为明显, 例如蒙皂石从 1 200 m 开始, 含量逐渐减少, 而石英胶结物从 1 200 m 开始, 含量逐渐增加, 且这一深度与嫩江组超压发育深度大致相同。

4.3 超压对溶蚀作用的影响

超压无法对溶蚀作用产生直接的影响, 它只能间接的通过影响地质流体来控制溶蚀作用。主要表现为由次生孔隙产生而造成异常高孔隙度。如图 5 中第 III 高孔带所处深度大致对应研究区青山口组泥岩及泉头组三、四段砂岩储层。2 000 m 以下机械压实作用对孔隙度的影响较弱, 溶解作用和胶结作用增强。青山口组是研究区重要的烃源岩, 生烃作用使得泥岩超压, 当压力大于静岩压力时, 其内部流体(包括大量有机酸)将排到相邻的砂岩中, 溶解储层中不稳定的矿物, 如长石、岩屑和碳酸盐胶结物等(图 9c~9f), 从而产生次生孔隙, 使得孔隙度不仅没有减小, 反而增加。

5 结论

通过对研究区超压条件下流体活动和成岩作用的总体分析, 主要得出以下结论:

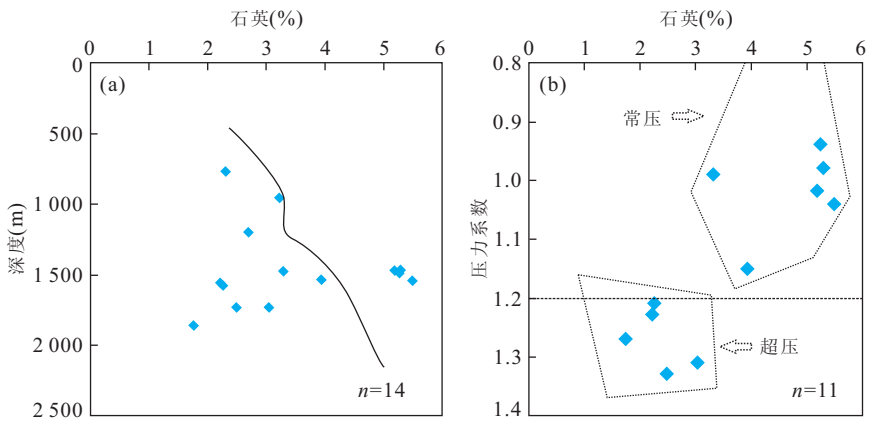


图 8 石英含量与深度之间的关系(a)以及石英胶结物含量与压力系数之间的关系(b)

Fig. 8 Relationship between quartz content and depth (a) and relationship between pressure coefficient and quartz cement content (b)

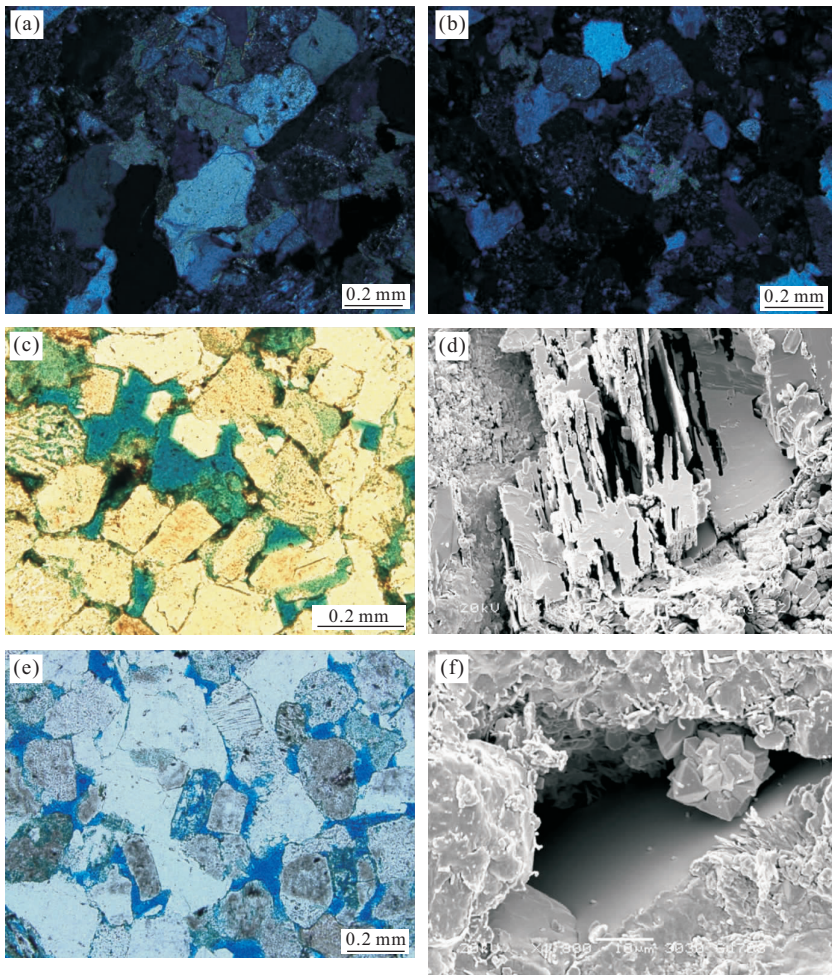


图 9 研究区主要成岩作用类型

Fig. 9 Main diagenetic types in study area

a. 古 204 井, 2 424. 13 m, 正×10, 先石英加大, 后方解石胶结, 交代长石; b. 古 140 井, 1 826. 39 m, 正×10, 先长石溶蚀, 后方解石胶结交代; c. 古 140 井, 1 830. 10 m, 正×20, 溶蚀扩大孔; d. 英 272 井, 1 284. 79 m, 长石颗粒被溶蚀成蜂窝状, 棕灰色油斑细砂岩, 扫描电镜×1 300; e. 古 141 井, 2 002. 64 m, 单×10, 长石粒内溶孔; f. 古 708 井, 1 997. 27 m, 孔隙中充填黄铁矿, 粉砂岩, 扫描电镜×1 800

(1) 研究区范围内存在 2 个超压体系、夹 1 个多压力并存体系,呈“汉堡状”分布。尽管不同的构造区带内超压顶界面深度不同,但嫩江组超压顶界面大致在 1 200 m 附近,而青山口组泥岩超压顶界面大致在 1 800 m 附近。

(2) 超压不仅抑制了粘土矿物的转化,还抑制了烃类结构的演化。主要成岩矿物蒙皂石含量从 1 200 m 开始明显减少,Pr/nC₁₇ 和 Ph/nC₁₈ 减小趋势在 1 900 m 发生变化,均与超压有关,深度范围也与超压界面近似一致。

(3) 成岩作用中的压实作用、胶结作用对于超压的抑制有明显的响应。超压并不能直接影响溶解作用,而是通过地质流体间接对其产生影响,主要表现为次生孔隙的产生造成孔隙度增加。

References

- Buryakovskiy, L. A., Djevanshir, R. D., Chilingar, G. V., 1995. Abnormally-high formation pressures in Azerbaijan and the South Caspian basin (as related to smectite→illite transformations during diagenesis and catagenesis). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 13(3-4): 203-218. doi:10.1016/0920-4105(95)00008-6
- Burst, J. F., 1969. Diagenesis of Gulf Coast clayey sediments and its possible relation to petroleum migration. *AAPG Bulletin*, 53(1): 73-93.
- Bjorkum, P. A., Walderhaug, O., Aase, N. E., 1993. A model for the effect of illitisation on porosity and quartz cementation of sandstones. *Journal of Sedimentary Research*, 63(6): 1089-1091.
- Carr, A. D., 1999. A vitrinite reflectance kinetic model incorporating overpressure retardation. *Marine and Petroleum Geology*, 16(4): 355-377. doi:10.1016/S0264-8172(98)00075-0
- Chilingar, G. V., Serebryakov, V. A., Robertson, J. O., 2002. Origin and prediction of abnormal formation pressures. Elsevier Science B. V., Amsterdam, 1-20.
- Chilingarian, G. V., Wolf, K. H., 1998. Diagenesis, I (developments in sedimentology). Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 10-55.
- Flemings, P. B., Lupa, J. A., 2004. Pressure prediction in the Bullwinkle basin through petrophysics and flow modeling (Green Canyon 65, Gulf of Mexico). *Marine and Petroleum Geology*, 21(10): 1311-1322. doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.09.005
- Gao, R. Q., Cai, X. Y., 1997. Formation conditions and distribution rules of oil fields in Songliao basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Hao, F., 2005. Kinetics of hydrocarbon generation and mechanisms of petroleum accumulation in overpressure basins. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Hao, F., Zou, H. Y., Gong, Z. S., et al., 2007. Hierarchies of overpressure retardation of organic matter maturation: case studies from petroleum basins in China. *AAPG Bulletin*, 91(10): 1467-1498.
- Hou, Q. J., Feng, Z. Q., Feng, Z. H., et al., 2009. Terrestrial petroleum geology of Songliao basin. Petroleum Industry Press, Beijing, 73 (in Chinese).
- Huang, F. T., Feng, Z. H., 1999. Forming condition and prediction of secondary pores in Mesozoic sandstone of Songliao basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 18(1): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Hunt, J. M., 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. *AAPG Bulletin*, 74(1): 1-12.
- Li, Z., Chen, J. S., Guan, P., 2006. Scientific problems and frontiers of sedimentary diagenesis research in oil-gas-bearing basins. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8): 2113-2122 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. J., Zhang, J. Q., 1992. Sedimentary diagenesis. Science Press, Beijing, 15 (in Chinese).
- Lou, Z. H., Yao, Y. M., Jin, A. M., et al., 2002. Geochemical properties of underground fluids in Songliao basin, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(4): 343-349 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Z., 1997. Ore forming fluid. Science and Technology Press, Beijing, 210 (in Chinese).
- Luo, X. R., Wang, Z. M., Zhang, L. Q., et al., 2007. Overpressure generation and evolution in a compressional tectonic setting, the southern margin of Junggar basin, Northwestern China. *AAPG Bulletin*, 91(8): 1123-1139.
- Ma, Q. F., 2000. Overpressured basins and hydrocarbon distribution. Geology Press, Beijing, 254 (in Chinese).
- Meng, Y. L., Huang, W. B., Wang, Y. C., et al., 2006. A kinetic model of clay mineral transformation in overpressure setting and its applications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 461-467 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Y. L., Li, B., Wang, Z. G., et al., 2008. Overpressure retardation of organic acid generation and clastic reservoirs dissolution in central Huanghua depression. *Petroleum Exploration and Development*, 35(1): 40-43 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Y. L., Liu, D. L., He, R., et al., 2005. Diagenetic field

- analysis and porosity prediction of the shear member (E_{s2}) in overpressure setting in the Qibei depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3): 389—396 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Y. L., Liu, W. H., Meng, F. J., et al., 2011. Distribution and origin of anomalously high porosity zones of the Xujiaweizi fault depression in Songliao basin. *Journal of Palaeogeography*, 13(1): 75—84 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Y. L., Pan, X. M., Wu, H. Y., et al., 2010a. Porosity and oil saturation correlation and diagenetic retardation of sandstone by hydrocarbon emplacement in the Shallow-Middle strata of the northern Songliao basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 29(1): 11—16 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Y. L., Wang, J. W., Wu, H. Y., et al., 2010b. The diagenesis and its effects on reservoir quality of Middle-Shallow reservoirs in the Northern Songliao basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 29(3): 217—226 (in Chinese with English abstract).
- Middleton, G. V., 2003. Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks. Kluwer Academic Publishers, London, 626—635.
- Morad, S., Ketzer, J. M., De Ros, L. F., 2000. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. *Sedimentology*, 47(Suppl. 1): 95—120. doi:10.1046/j.1365-3091.2000.00007.x
- Osborne, M. J., Swarbrick, R. E., 1997. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins; a reevaluation. *AAPG Bulletin*, 81(6): 1023—1041.
- Wang, X. X., Xin, G. Q., Feng, Y. C., et al., 1990. The research of clay mineral in Songliao basin. Heilongjiang Science and Technology Press, Haerbin, 65 (in Chinese).
- Wilson, A. M., Fenstemaker, T., Sharp Jr, J. M., 2003. Abnormally pressured beds as barriers to diffusive solute transport in sedimentary basins. *Geofluids*, 3(3): 203—212. doi:10.1046/j.1468-8123.2003.00060.x
- Wolf, K. H., Chilingarian, G. V., 1992. Diagenesis, III. Elsevier science Publishers, Amsterdam, 1—15.
- Xiang, C. F., Feng, Z. Q., Wu, H. Y., et al., 2006. Three abnormal pressure systems developed in the Songliao basin, Northeast China and their genesis. *Acta Geological Sinica*, 80(11): 1752—1759 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Li, S. T., Liu, X. F., 2006. Basin fluids dynamics in abnormally pressured environments. The China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Xie, X. N., Cheng, J. M., Meng, Y. L., 2009. Basin fluid flow and associated diagenetic processes. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 863—871 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Jiao, J. J., Tang, Z. H., et al., 2003a. Evolution of abnormally low pressure and its implications for the hydrocarbon system in the southeast uplift zone of Songliao basin, China. *AAPG Bulletin*, 87(1): 99—119.
- Xie, X. N., Jiao, J. J., Xiong, H. H., 2003b. Underpressure system and forming mechanism in the Shiwu depression of Songliao basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(1): 61—66 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Liu, X. F., Zhao, S. B., et al., 2004. Fluid flow and hydrocarbon migration pathways in abnormally pressured environments. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 589—595 (in Chinese with English abstract).
- Xing, S. S., Jiang, H. Q., 1993. Characteristics and diagenesis of continental sandstone reservoir of Songliao basin. Science Technology Press, Haerbin, 62 (in Chinese).
- Xu, T. T., Wang, X. X., Zhang, Y. Y., et al., 2003. Clay mineral of Chinese petroliferous basins. Petroleum Industry Press, Beijing, 80—150 (in Chinese).
- Zha, M., Qu, J. X., Zhang, W. H., 2002. The relationship between overpressure and reservoir forming mechanism. *Petroleum Exploration and Development*, 29(1): 19—23 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 高瑞祺, 蔡希源, 1997. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律. 北京: 石油工业出版社.
- 郝芳, 2005. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理. 北京: 科学出版社.
- 侯启军, 冯志强, 冯子辉, 等, 2009. 松辽盆地陆相石油地质学. 北京: 石油工业出版社, 73.
- 黄福堂, 冯子辉, 1999. 松辽盆地中生界砂岩次生孔隙形成条件及预测. 大庆石油地质与开发, 18(1): 1—5.
- 李忠, 陈景山, 关平, 2006. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿. 岩石学报, 22(8): 2113—2122.
- 刘宝瑞, 张锦泉, 1992. 沉积成岩作用. 北京: 科学出版社, 15.
- 楼章华, 姚炎明, 金爱民, 等, 2002. 松辽盆地地下流体地球化学特征研究. 矿物学报, 22(4): 343—349.
- 卢焕章, 1997. 成矿流体. 北京: 北京科学技术出版社, 210.
- 马启富, 2000. 超压盆地与油气分布. 北京: 地质出版社, 254.
- 孟元林, 黄文彪, 王粤川, 等, 2006. 超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型及应用. 沉积学报, 24(4):

- 461—467.
- 孟元林,李斌,王志国,等,2008.黄骅坳陷中区超压对有机酸生成和溶解作用的抑制.石油勘探与开发,35(1):40—43.
- 孟元林,刘德来,贺如,等,2005.歧北凹陷沙二段超压背景下的成岩场分析与储层孔隙度预测.沉积学报,23(3):389—396.
- 孟元林,刘文慧,孟凡晋,等,2011.松辽盆地徐家围子断陷深层异常高孔带分布特征与成因分析.古地理学报,13(1):75—84.
- 孟元林,潘雪梅,吴河勇,等,2010a.松辽盆地北部中浅层含油饱和度和孔隙度的关系与油气侵位对成岩作用的抑制.矿物岩石地球化学通报,29(1):11—16.
- 孟元林,王建伟,吴河勇,等,2010b.松辽盆地北部中浅层成岩作用及其对储层质量的影响.矿物岩石地球化学通报,29(3):217—226.
- 王行信,新国强,冯永才,等,1990.松辽盆地粘土矿物研究.哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,65.
- 向才富,冯志强,吴河勇,等,2006.松辽盆地异常压力系统及其形成原因探讨.地质学报,80(11):1752—1759.
- 解习农,李思田,刘晓峰,2006.异常压力盆地流体动力学.武汉:中国地质大学出版社.
- 解习农,成建梅,孟元林,2009.沉积盆地流体活动及其成岩响应.沉积学报,27(5):863—871.
- 解习农,焦赳赳,熊海河,2003b.松辽盆地十屋断陷异常低压体系及其成因机制.地球科学——中国地质大学学报,28(1):61—66.
- 解习农,刘晓峰,赵士宝,等,2004.异常压力环境下流体活动及其油气运移主通道分析.地球科学——中国地质大学学报,29(5):589—595.
- 邢顺涩,姜洪启,1993.松辽盆地陆相砂岩储集层性质与成岩作用.哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,62.
- 徐同台,王行信,张有瑜,等,2003.中国含油气盆地粘土矿物.北京:石油工业出版社,80—150.
- 查明,曲江秀,张卫海,2002.异常高压与油气成藏机理.石油勘探与开发,29(1):19—23.