

松辽盆地北部中央坳陷带异常压力条件下 地层水化学特征及其成岩响应

雷振宇¹, 解习农¹, 孟元林², 黄卫¹, 杜学斌¹,
肖丽华², 孟凡晋², 焦金鹤², 魏巍²

(1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074;

2. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318)

摘要:在对松辽盆地中央坳陷带压力系统进行系统分析的基础上,结合研究区大量地层水资料,通过对比,研究地层水离子组合特征及其对异常压力条件下成岩作用的响应。研究表明,异常压力环境对地质流体及成岩作用有明显影响。超压和低压均能使地层水矿化度升高,但是影响机制不同。不同压力体系水型不一样,主要发生的成岩作用也不同。超压和常压体系主要为NaHCO₃型和NaCl型水,成岩作用以矿物的溶解作用为主。而低压体系主要为CaCl₂型水,成岩作用以钙长石的钠长石化为主。

关键词:异常压力;地层水;成岩作用;中央坳陷带;松辽盆地

中图分类号:TE133.2

文献标识码:A

Chemical features and diagenesis reactions of formation water under abnormal pressure in central depression of northern Songliao Basin

Lei Zhenyu¹, Xie Xinong¹, Meng Yuanlin², Huang Wei¹,
Du Xuebin¹, Xiao Lihua², Meng Fanjin², Jiao Jinhe², Wei Wei²

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

Abstract: The pressure system in the central depression of the Songliao Basin was analyzed systematically. A large amount of data about formation water was studied and compared, based on which the ions pattern as well as the diagenesis reaction of formation water were discussed. It has been concluded that abnormal pressure obviously influences geofluid and diagenesis. Both overpressure and underpressure can increase TDS; however, their influencing mechanisms are different. Water type varies in different pressure systems, leading to different diagenesis effects. In overpressure and normal pressure systems, NaHCO₃ and NaCl type water is dominant, and the dissolution of minerals works as the main diagenesis effect. As to underpressure system, CaCl₂ type water is dominant, and the main diagenesis effect is the albitization of feldspar.

Key words: abnormal pressure; formation water; diagenesis effect; central depression; Songliao Basin

沉积盆地超压体系在油气勘探与开发中一直是一个不容忽视的问题,它不仅影响了地质流体的运移和聚集,更会为勘探过程带来安全隐患。地层水是沉积盆地的重要组成部分,并参与了盆地整个形成演化过程,因此地层水的化学特征受到盆地演化中一系列化学作用和水动力系统的影响^[1]。前人研究表明,地层水可能有多种形成机理,比如盐岩或硅酸盐的溶解、非海相流体或海水的蒸发、大

气水淋滤、滤膜作用和水岩相互作用^[2-4]。但是对异常压力条件下地层水地球化学特征的研究仍显得不足。松辽盆地地层广泛发育异常压力,其中青山口组和嫩江组一、二段泥岩主要发育超压,姚家组地层属于常压、超压和低压并存的多压力体系。近半个世纪以来,地质学家们对于该区的地质流体(特别是油气)的生成、运移和聚集进行了大量研究^[5-11]。Cheng等^[12]在整个盆地尺度下研究了松辽盆地深部

收稿日期:2012-03-07;修订日期:2012-11-28。

作者简介:雷振宇(1983—),男,博士生,从事地层异常压力、地质流体及成岩作用研究。E-mail: leizhenyu0912@gmail.com。

基金项目:国家自然科学基金(40872076)、中国博士后科学基金第三批特别资助(201003654)和中央高校基本科研业务费专项资金(CUGL100252)联合资助。

含油气系统(姚家组以下)地层水来源以及不同压力条件下的水动力系统 and 成岩作用。但是对松辽盆地中央拗陷带(即齐家古龙—三肇凹陷)上白垩统地层地质流体动力条件和异常压力的关系研究仍不够深入。笔者在前人研究的基础上,收集大量研究资料,针对松辽盆地发育明显异常压力的2个富油凹陷——齐家古龙—三肇凹陷进行研究,试图探讨该区上白垩统地层中不同压力体系地层水化

学组合变化对成岩作用的响应。

1 区域地质背景

松辽盆地位于中国东北部,是我国最大的中生代非海相含油气盆地,面积约为 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$, 基底为古生代和前寒武纪的变质岩系及火成岩系,自下而上依次发育白垩系、古近系、新近系和第四系地层(图1)。其中上白垩统包括青山口组(K_2qn)、

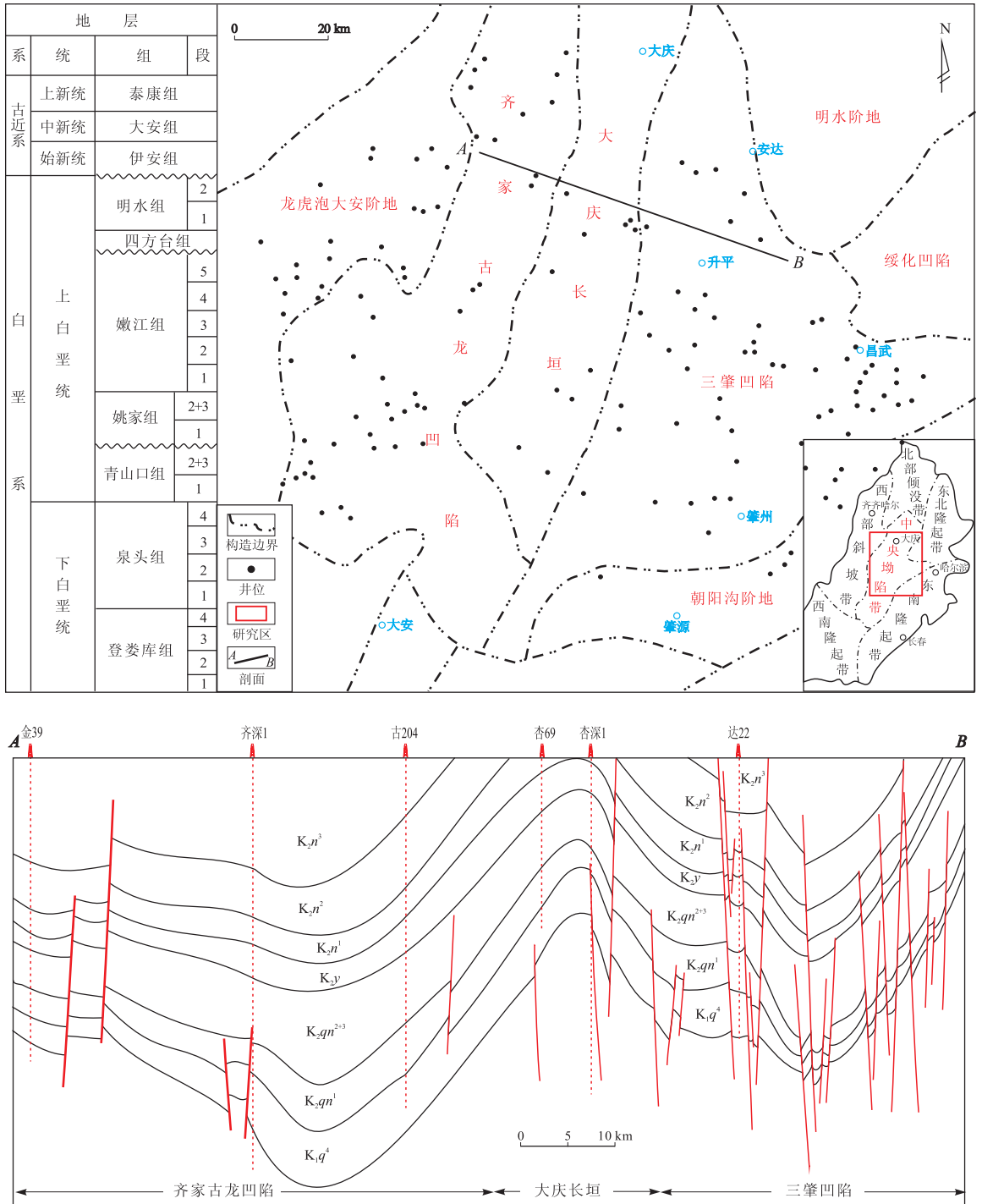


图1 松辽盆地齐家古龙凹陷—三肇凹陷地理位置及地层剖面
Fig. 1 Location and profile of Qijiagulong-Sanzhao Sag, Songliao Basin

姚家组(K_2y)、嫩江组(K_2n)、四方台组和明水组。研究区齐家古龙—三肇凹陷位于松辽盆地中央坳陷带,是主要富生烃凹陷,面积约为 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。多年的勘探和地质研究证实,白垩系泉头组二段以上的青山口组、姚家组和嫩江组是松辽盆地主要勘探目的层^[13],也是本次研究的重点。

晚白垩世时期,松辽盆地沉积环境主要为湖相,形成深湖—半深湖相泥岩,三角洲相砂泥岩与泥岩互层。青山口组和嫩江组一、二段为2套区域性发育的深湖—半深湖相泥岩,这2套泥岩形成时期分别对应了2次大型湖侵事件,沉积厚度大,是该区的优质烃源岩与盖层,而姚家组二、三段以及嫩江组三、四、五段沉积的河流相砂体则为油气提供了良好的储存空间。

松辽盆地存在异常高压和异常低压并存的情况^[14]。笔者对盆地中央坳陷带(齐家古龙凹陷—三肇凹陷)千余口井建立了声波时差与深度的关系,通过等效深度法计算发现,研究区上白垩统存在明显超压,主要分布在青山口组和嫩江组一、二段。根据实测数据进一步研究发现,姚家组出现弱超压、常压和低压并存的情况,这说明姚家组既发育独立的超压和低压体系,又存在压力过渡带的特征。总体上来看,压力体系呈现出“两超夹一混”的汉堡式形态。位于不同构造带内的超压顶界面深度不同。总的来说,在齐家古龙和三肇凹陷中央,超压顶界面较深,而在大庆长垣地区,超压顶界面较浅。嫩江组超压顶界面位于1 300 m左右,而青山口组超压顶界面位于2 000 m左右。

2 地层水化学特征

本次研究共收集到3 000余个分析数据,主要分布在地下3 000 m以内的范围。根据前人提出的筛选原则,剔除了明显非地层水样品、试采结论为“干层”的水样品、试采结论为“未产水”的水样品以及压裂液返排率较低的水样品分析数据,最终获得化学性质较稳定的900余份分析数据,并进行统计分析。研究发现,该区水型主要为 NaHCO_3 型水,部分层位(姚家组)含有少量 CaCl_2 和 Na_2SO_4 型水,极少发现 MgCl_2 型水,根据苏林分类法,可以判断研究区地层水以大陆成因水为主。总矿化度(TDS)从0.1~21.68 g/L均有分布(图2),大部分值低于10 g/L,属于中氯水范围^[15],高氯水(亦称盐水, $\text{TDS} > 10 \text{ g/L}$)主要出现在1 300 m深度以下,最高可达21.68 g/L。研究区嫩江组地层水总矿化度介于0.1~13 g/L,普遍低于10 g/L,且矿化度随

深度增加逐渐增大。姚家组地层水总矿化度为0.1~21 g/L,凹陷中央低压带出现 CaCl_2 型高盐度水。青山口组地层水总矿化度为0.1~19 g/L,普遍大于5 g/L,三肇凹陷中央的样品显示该层矿化度甚至高于18 g/L,达到18.92 g/L。整体上看,矿化度在纵向上呈现出“低—高—低”的分布特征,高氯水发育深度与异常压力分布深度近似相同。通过对比发现,矿化度在纵向上的变化规律与有机酸分布基本一致(图3)。有机酸生成、 R_0 、地层压力以及矿化度之间具有良好的相关性。

总的来说,地层水矿化度的变化与诸多因素有关,例如岩性、压实作用、地层封闭性以及地层压力^[16]。当地层埋深较浅时,封闭性较差,地层水容易受大气淋滤的影响,被大气水“稀释”,因此,浅埋藏地层水矿化度较低,一般低于10 g/L。随着深度增加,有机质成熟,生烃同时产生超压与大量有机酸,在超压的驱动下有有机酸幕式排出,与地层水混合后形成酸性流体,溶蚀岩石中的铝硅酸盐矿物和碳酸盐胶结物,使得矿化度逐渐增加到20 g/L。同时,埋深增加使得地层具有更好的封闭性,与外界的水交换减弱也是造成矿化度升高的原因之一。

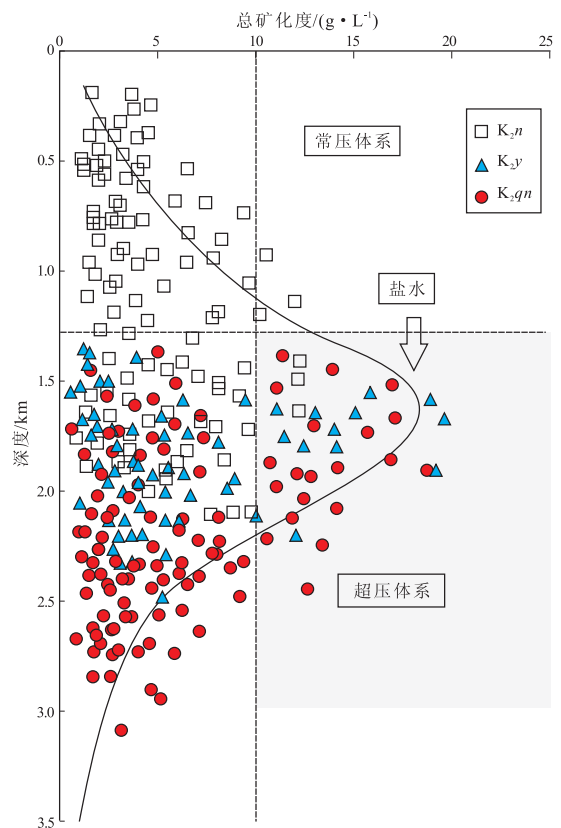


图2 松辽盆地齐家古龙—三肇凹陷总矿化度随深度变化

Fig. 2 Variation of total dissolved solids versus depth of Qijiagulong-Sanzhao Sag, Songliao Basin

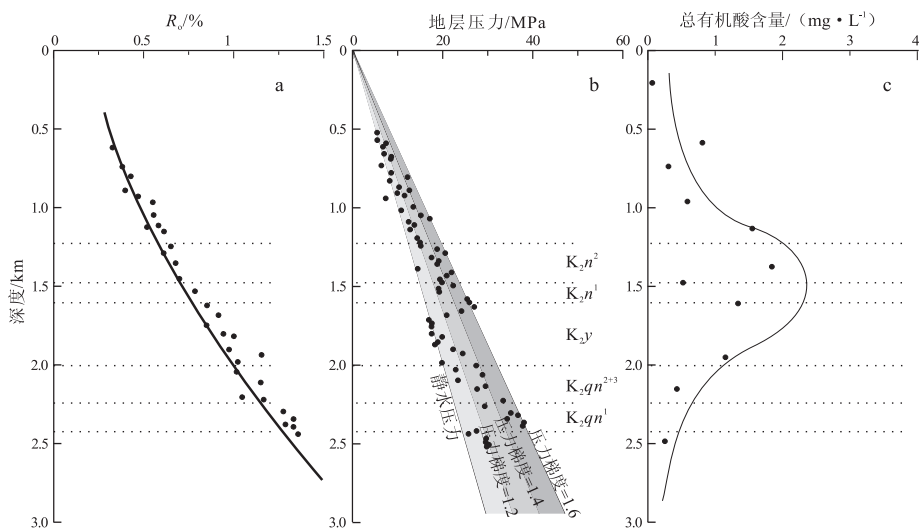


图3 松辽盆地齐家古龙凹陷古204井镜质组反射率、压力和总有机酸含量对比

Fig. 3 Profile of vitrinite reflectance, pressure and total organic acid content of well Gu 204, Qijiagulong Sag, Songliao Basin

当深度进一步加深时,有机质进入高成熟阶段,有机酸生成量减少,溶蚀作用减弱,胶结作用增强,此时沉淀出的碳酸盐及石英胶结物使得地层水矿化度降低。

在超压作用下,有机酸的排出不仅改变了成岩环境,同时也溶解了大量铝硅酸盐矿物和碳酸盐胶结物,产生大量的阴阳离子并促进了一系列的成岩反应,例如蒙皂石的伊利石化、石英次生加大等^[17-18]。因此超压通过对有机酸的控制,间接影响了研究区水岩相互作用。

本次研究收集的水样中含量较多的离子是 Na^+ 、 Cl^- 、 HCO_3^- ,其次是 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 。对主要阴阳离子含量进行统计分析,发现阳离子中最多的是 Na^+ (图4),含量一般在0.1~3.5 g/L; Ca^{2+} 分布面积大,但是含量普遍较低,一般低于0.15 g/L,只有在低压发育的姚家组含量升高,接近1.0 g/L。阴离子中分布最广、最多的是 Cl^- ,含量随深度增加有较为明显的增加趋势,其次是 HCO_3^- 。

3 地层水来源

笔者总结了前人对于地层水的研究,将地层水的来源归纳为岩盐溶解^[19]、海水蒸发和水岩相互作用改造^[20]等。松辽盆地为非海相含油气盆地,接受陆源碎屑沉积,因此该区不存在岩盐溶解和海水蒸发。该区矿化度和盐度较高的地层水主要是由于地层水的蒸发和水岩相互作用的改造,后者在异常压力地区尤其明显。

3.1 地层水蒸发

研究区地层水矿化度普遍小于10 g/L,而海水

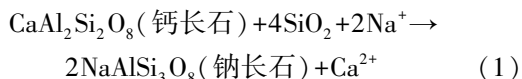
的矿化度一般大于30 g/L^[21], Na^+/Cl^- 比也明显低于标准海水^[22-23]。因此,该区较高矿化度和盐度的地层水是由地表地层水蒸发造成的。

3.2 水岩相互作用

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可以忽略^[24]。水岩相互作用参与了盆地演化的各个阶段,因此地层水的化学组分能在一定程度上指示水岩相互作用。利用物质平衡原理(mass balance),对研究区阴阳离子组合进行对比分析,结果如下(图5):

(1)图5a为 $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 含量对比。直线 $\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 1:1$ 表示的是单纯由于岩盐溶解产生的 Na^+ 和 Cl^- 的关系,如果投点偏离该直线,则表示存在其他的成岩作用。我们可以看到图中有2种类型的偏离,分别表示 Na^+ 富余和 Na^+ 亏损。超压层位嫩江组(K_2n)和青山口组(K_2qn)样品表现为 Na^+ 富余,而超压、常压和低压并存的姚家组(K_2y)则同时出现 Na^+ 富余和 Na^+ 亏损的情况。

(2)假设 Na^+ 亏损是由于离子交换引起的^[25],产生离子交换的原因为钙长石的钠长石化:



式(1)显示,当钙长石发生钠长石化时,由于离子守恒,溶液中2个 Na^+ 替换了1个 Ca^{2+} ,因此 Na^+ 亏损和 Ca^{2+} 含量比应该为2:1。图5b中水样数据也证明这一观点。表明钙长石的钠长石化是造成 Na^+ 亏损和 Ca^{2+} 增加的主要原因。

(3)假设 Na^+ 富余是由钠长石溶解引起的^[25],

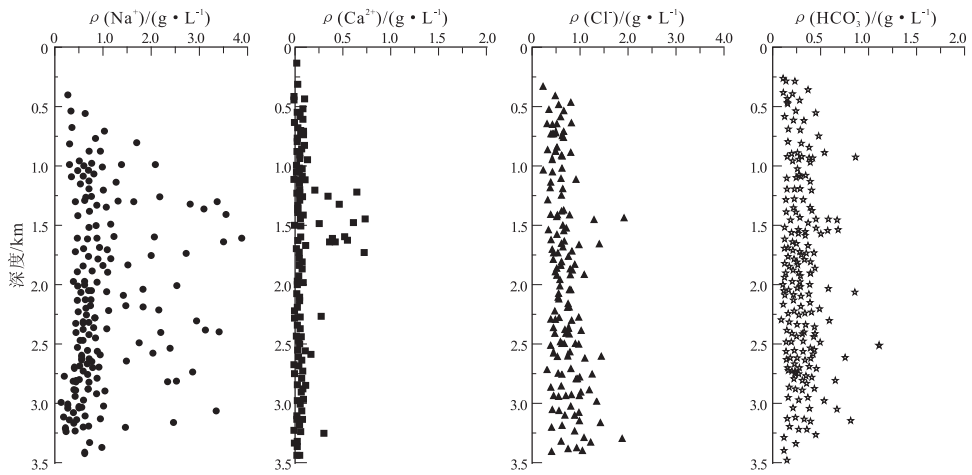


图 4 松辽盆地齐家古龙—三肇凹陷主要阴阳离子含量随深度变化

Fig. 4 Variation of main ions content versus depth of Qijiagulong-Sanzhao Sag, Songliao Basin

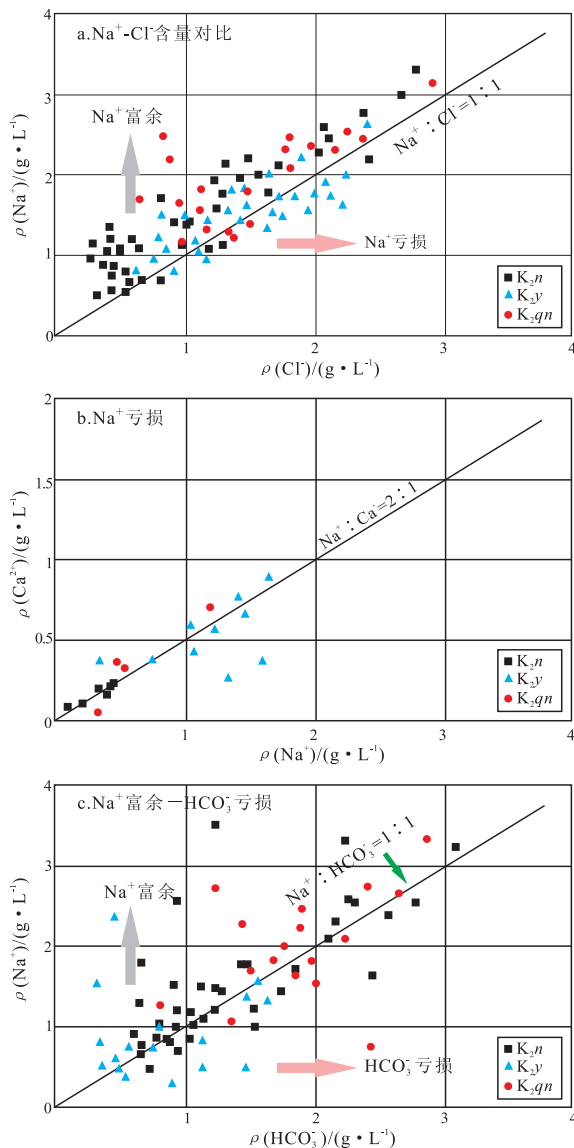
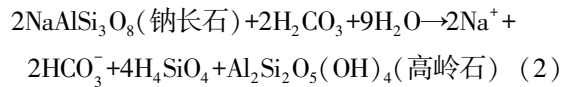


图 5 松辽盆地齐家古龙—三肇凹陷阴阳离子组合对比

Fig. 5 Comparison of main ions of Qijiagulong-Sanzhao Sag, Songliao Basin

我们得到如下关系式:



式(2)显示,当钠长石溶解时,生成了等量的 Na^+ 和 HCO_3^- ,从图 5c 可以看出,大量数据符合这种变化规律。

4 讨论

松辽盆地中央拗陷带上白垩统地层发育明显异常压力,其中嫩江组和青山口组为明显超压,姚家组则超压、低压和常压共同发育。研究表明,异常压力以地质流体为媒介影响成岩作用。超压条件下 (K_2n , K_2qn),如果该超压是油气生成而形成的,由于超压促进了有机酸的排出,促进了围岩的溶解作用,产生大量离子,地层水矿化度升高,此时成岩作用以钠长石的溶解作用为主, Na^+ 含量增加,富余的 Na^+ 与 HCO_3^- 以 1 : 1 的趋势增加,主要水型为 NaHCO_3 和 NaCl 型。对于异常低压系统 (K_2y)而言,低压的保存较超压更加苛刻,必须存在良好的封闭系统。良好的封闭性使得低压系统内部与外界几乎没有沟通,从而导致内部地层水矿化度增加,通常低压越显著,矿化度越高^[26]。同时,低压系统内部成岩作用以钙长石的钠长石化为主, Na^+ 含量降低, Ca^{2+} 含量升高,由于物质平衡, Na^+ 的亏损与 Ca^{2+} 的增加以 2 : 1 的趋势发生变化,地层水为 CaCl_2 型。

5 结论

异常地层压力对地质流体和成岩作用产生不可忽视的影响。通过以上分析,本次研究得到如下

结论:

1) 异常压力影响地层水演化。超压和低压都会使地层水总矿化度升高, 压力越显著, 矿化度越高。但是超压和低压对矿化度控制的机理不同。

2) 不同压力条件下地层水水型不同。超压体系和常压体系一样, 主要为 NaHCO₃ 和 NaCl 型水, 低压体系主要发育 CaCl₂ 型水。

3) 异常压力体系影响了成岩作用。从地层水离子变化情况来看, 超压促进了矿物溶解, 而低压体系中主要成岩作用为钙长石的钠长石化。

参考文献:

[1] Garven G. Continental-scale groundwater-flow and geological processes[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1995, 23: 8-117.

[2] Hanor J S. Kilometer-scale thermohaline overturn of pore waters in the Louisiana Gulf-Coast[J]. Nature, 1987, 327: 501-503.

[3] Moldovanyi E P, Walter L M. Regional trends in water chemistry, Smackover Formation, Southwest Arkansas: geochemical and physical controls[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(6): 864-894.

[4] Kharaka Y K, Hanor J S. Deep fluids in the continents: I. Sedimentary basins[G]//Holland H D, Turekian K K, eds. Treatise on Geochemistry 5. [s. n.]: Elsevier Science Ltd, 2003: 499-540.

[5] 杨万里. 松辽陆相盆地石油地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985.

[6] 高瑞祺, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

[7] 侯启军, 冯志强, 冯子辉, 等. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.

[8] 邢顺淦. 松辽盆地北部扶、杨油层砂岩的成岩作用与储层性质研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1990(4): 13-24.

[9] 黄福堂. 松辽盆地北部扶杨地层水地球化学特征研究[J]. 西南石油学院学报, 1995, 17(4): 6-13.

[10] 解习农, 焦赳赳, 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): 25-56.

[11] 孟元林, 王建伟, 吴河勇, 等. 松辽盆地北部中浅层成岩作用及其对储层质量的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(3): 217-226.

[12] Cheng J M, McIntosh J C, Xie X N, et al. Hydrochemistry of formation water with implication to diagenetic reactions in Sanzhao depression and Qijia-gulong depression of Songliao Basin, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 88(1-3): 86-90.

[13] 赵健. 松辽盆地西斜坡泥岩地层压实规律[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 486-492.

[14] Xie X N, Jiao J J, Tang Z H, et al. Evolution of abnormally low pressure and its implications for the hydrocarbon system in the southeast uplift zone of Songliao basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(1): 99-119.

[15] 黄福堂. 松辽盆地油气水地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.

[16] Du X B, Xie X N, Lu Y C, et al. Hydrogeochemistry of formation water in relation to overpressures and fluid flow in the Qikou Depression of the Bohai bay basin, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2010, 106(1-3): 77-83.

[17] Surdam R C. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23.

[18] Thyne G B, Boundreau P, Ramm M. Simulation of potassium feldspar dissolution and illitization in the Staffjord Formation, North Sea[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(4): 621-635.

[19] Hanor J S. Reactive transport involving rock-buffered fluids of varying salinity [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(21): 3721-3732.

[20] Land L S. Na-Ca-Cl saline formation waters, Frio Formation (Oligocene), South Texas, USA: products of diagenesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(11): 2163-2174.

[21] 黄福堂, 谭伟, 冯子辉. 松辽盆地北部地层水的物理化学性质和特征[J]. 大庆石油地质与开发, 1997(3): 22-25.

[22] He S, Middleton M, Tang Z H. Characteristics and origin of underpressure system in the Shiwu Fault Depression, south-east Songliao Basin, China[J]. Basin Research, 2000, 12(2): 147-158.

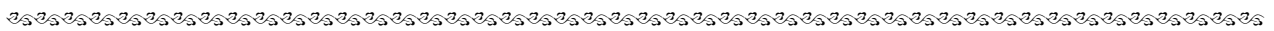
[23] 李伟, 赵克斌, 刘崇禧. 含油气盆地水文地质研究[M]. 北京: 地质出版社, 2008.

[24] 刘宝珺, 张锦泉. 沉积成岩作用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

[25] Davissou M L, Criss R E. Na-Ca-Cl relations in basinal fluids[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(15): 2743-2752.

[26] Xie Xinong, Jiao Jiujiu, Cheng Jianmei. Regional variation of formation water chemistry and diagenesis reaction in underpressured system: example from Shiwu depression of Songliao basin, NE China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78-79: 585-590.

(编辑 韩 彧)



(上接第 80 页)

[8] Wilkiins R W T, Wilmsburst J R, Russell N J, et al. Fluorescence alteration and the suppression of vitrinite reflectance[J]. Organic Geochemistry, 1992, 18: 629-640.

[9] Wilkiins R W T, Wilmsburst J R, Hladky G, et al. Should fluorescence alteration replace vitrinite reflectance as a major tool for thermal maturity determination in oil exploration? [J]. Organic Geochemistry, 1995, 22: 191-209.

[10] 李志明, 秦建中, 廖宗廷, 等. FAMM 技术及其应用进展[J]. 石油实验地质, 2005, 27(3): 307-311.

[11] 李志明, 施伟军, Sherwood N, 等. 激光拉曼光谱法分析多种

显微组分荧光变化及其应用[J]. 岩矿测试, 2008, 27(5): 341-345.

[12] 肖贤明, 刘祖发, 申家贵, 等. 确定含油气盆地古地温梯度的一种新方法: 镜质体反射率梯度法[J]. 科学通报, 1998, 43(21): 2340-2343.

[13] Suggate R P. 埋深、镜质体反射率及地温梯度之间的相互关系[J]. 李军, 译. 石油地质与实验, 2002(总 61 期): 40-53.

[14] 李志明, 徐二社, 秦建中, 等. 烃源岩评价中的若干问题[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2010, 25(6): 8-12.

(编辑 徐文明)