

文章编号:1673-5005(2012)03-0054-11

东营凹陷水化学场成因及其与超压系统耦合关系

王冰洁¹, 何生¹, 王静²

(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 环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:以研究区2000余口探井的实测地压和油田水化学资料以及149个流体包裹体古压力模拟结果等为基础,利用地层水中阴阳离子平衡关系和水-岩相互作用的特点,考察东营凹陷水化学场的成因特征及其与超压系统演化特征的耦合关系以及对原油保存条件的影响。结果表明:在垂向上,2.2 km之上常压系统(沙二段至馆陶组)地层水矿化度一般低于100 g/L,属于咸水,而2.2 km之下的超压系统(沙四和沙三段)部分地层水矿化度高于100 g/L,最高达336 g/L,属于盐水;在平面上,东营凹陷东部地层水矿化度高于西部,北带高于南部,沙三和沙二段高矿化度地层水在凹陷中心沿断裂带分布,沙四段地层水矿化度以东营北带洼陷区为中心呈环带状向外减小;在水化学场和超压系统耦合作用下,超压流体封存箱中的水-岩相互作用对凹陷中心氯化钙型高矿化度地层水的形成具有重要作用,高矿化度地层水的形成某种程度上受到沙四段蒸发岩地层中盐类溶解作用的影响;不同地区和层位的原油密度不同,在凹陷边缘常压带为开启的水文地质系统,地表水渗入作用导致地层水矿化度降低,原油的轻组分散失,密度增加,油气保存条件较差,而凹陷中心超压顶面附近和超压系统内部处于封闭性较好的水文地质系统,原油密度多小于0.9 g/cm³,油气保存条件较好。

关键词:东营凹陷; 超压系统; 矿化度特征; 离子特征; 水-岩相互作用; 原油分布与保存

中图分类号:P 641.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.009

Hydrochemistry field origin and its coupling relationship with overpressure system, Dongying depression

WANG Bing-jie¹, HE Sheng¹, WANG Jing²

(1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the measured pressure of formation, hydrochemistry data from more than 2000 wells in oilfield, and the paleo-pressure from 149 fluid inclusion thermodynamics modeling in Dongying depression, the mass balance relation of cation and anion was calculated to study the water-rock interaction. Based on these, the generation process of the formation water and its relation to the pressure evolution and oil preservation conditions were analyzed. The results show that in the vertical, the formation water salinity is lower than 100 g/L in the normal pressure system (from Es₂ to Qp) with the depth above 2.2 km, and the formation water belongs to salt water. The formation water salinity is higher than 100 g/L and the highest value is 336 g/L in the overpressure system (Es₄ and Es₃) with the depth under 2.2 km, and the formation water belongs to saline. In the plane, the formation water salinity in the east of Dongying depression is higher than that in the west, and the salinity in the north is higher than that in the south. The high salinity formation water in Es₂ and Es₃ distributes along the fault zones of depression center. The formation water salinity in Es₄ reduces from the center of north depression to the outside, exhibiting zonal distribution. For the coupling relation between hydrochemical field and overpressure system, water-rock interaction in overpressure fluid compartment has a signification impact on forming high salinity CaCl₂ formation water in the center depression. The forming of high salinity formation water was influenced by the salt dissolution of evaporite forma-

收稿日期:2012-02-12

基金项目:国家重大油气专项基金(2011ZX05006);构造与油气资源教育部重点实验室基金(TPR-2010-10)

作者简介:王冰洁(1984-),男(汉族),陕西渭南人,博士研究生,研究方向为地层流体压力预测和储层地温预测。

tion in E_{s4} . The density from different member and area is different. The depression edge normal pressure zone is an open hydro-geological system. The formation water salinity is reduced by infiltration of surface water. The oil light components are lost and oil density increases. The oil preservation conditions of the zone are poor, but the top and inside of overpressure system in the center of depression is a closed hydro-geological system. Most of oil density is lower than 0.9 g/cm^3 , and the oil and gas preservation conditions are good.

Key words: Dongying depression; overpressure system; salinity characteristics; ions characteristics; water-rock interaction; oil distribution and preservation

地层水是含油气盆地中的主要流体,其活动特征和性质直接或间接指示盆地流体系统的开放性和封闭性^[1-2],古水文地质条件与油气的生成、运移、聚集及保存有着密切的联系^[3-6]。东营凹陷异常高压通常发育在富泥段古近系沙河街组烃源岩层系中^[7-16],经过实测地压资料(DST)和地层水矿化度对比发现东营凹陷发育的超压系统和异常高矿化度的地层水在空间分布上具有一致性的特征,说明流体动力场和水化学场的形成具有紧密联系,而研究水化学场的分布特点和形成规律可以揭示流体动力场特征^[17-23],二者在一定程度上具有耦合关系。因此,对超压系统地层水的特征和成因进行分析有助于解释超压流体的运移和成藏机制。笔者通过东营凹陷2000余口探井的实测地压和油田水化学资料以及149个流体包裹体古压力模拟结果等资料,研究超压系统内地层水的分布特征和形成规律,探讨水化学场特征和超压系统之间的演化关系以及对不同压力系统内油气分布和保存条件的影响。

1 区域地质概况

东营凹陷位于山东省北部的黄河入海口附近,渤海湾裂谷盆地群的东南部,是一个中新生代断陷。凹陷北为陈家庄凸起,西为滨县凸起、青城凸起,南为鲁西隆起、广饶凸起,东为青坨子凸起。凹陷东西长约90 km,南北宽约65 km,面积约5700 km²,为北断南超的箕状断陷湖盆。凹陷内的二级构造带表现为四洼一凸的特点,包括利津洼陷、牛庄洼陷、博兴洼陷和民丰洼陷以及中央凸起断裂带(图1)。凹陷内部的断裂体系包括:沿陈家庄凸起南侧从西向东包括滨南断裂带、利津断裂带、胜北断裂带和永北断裂带,牛庄洼陷南侧发育有陈官庄-王家岗断裂带和八面河断裂带,在博兴南部缓坡带,发育博兴断裂带,北部陡坡带发育高青断裂带,牛庄洼陷和博兴洼陷通过石村断裂带相隔;凹陷内新生界地层自下而上发育有古近纪孔店组(Ek)、沙河街组(Es)和东营组(Ed),新近纪馆陶组(Ng)和明化镇组(Nm),第四纪平原组(Qp)共5套地层,其中沙河街组又可分

为沙四段(E_{s4})、沙三段(E_{s3})、沙二段(E_{s2})和沙一段(E_{s1})。

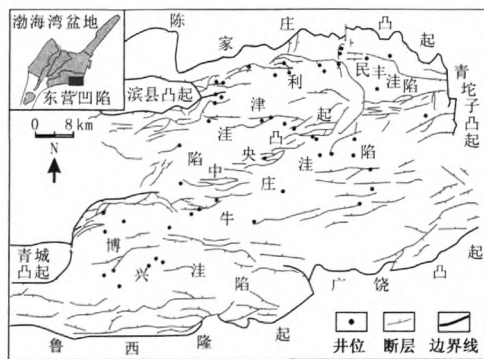


图1 东营凹陷构造特征和构造单元划分图

Fig.1 Structure character and structural division of Dongying depression

2 地层水化学场特征分析

水化学场的特征可以从一个侧面揭示水流系统演化的性质和水文地质条件的封闭性。地层水化学特征主要包括矿化度、水型、主导阴阳离子及各种离子的组合特征,它们是地下水动力场和水化学场在地史时期演化的结果^[24-25]。在判断水文环境及水化学剖面的分带性时,主要依据矿化度、氯离子、水型等参数,并结合钙离子、钠离子、镁离子、碳酸(氢)根离子、硫酸根离子等阴阳离子的变化特征和离子组合系数,在特定环境下离子组合系数相对于矿化度及水型更具有继承性,能真实地反映地层水的运移、变化及赋存状态。

2.1 地层水矿化度分布特征

共收集东营凹陷新生界沙四段至馆陶组2691个矿化度资料进行特征分析。受沉积环境和地质演化过程的影响,东营凹陷各组段地层水矿化度呈现不同的特征。在常压带沙二段至平原组(图2),矿化度小于100 g/L,属于咸水,少部分水样矿化度大于100 g/L,沙二段部分地层水矿化度可以达到150 g/L;沙三、四段地层水矿化度出现异常高的现象,沙

三段最大为 330.8 g/L, 沙四段为 336 g/L, 属于盐水。从图 2(a)、(b)和(c)可以看出, 根据地层水矿化度的分布, 在垂向上可以明显划分为 3 部分: 深度在 0~0.5 km 地层水矿化度相对较小, 不超过 10 g/L; 深度在 0.5~2.2 km 地层水矿化度有所增大, 在

沙二段最高为 65 g/L, 沙三段为 76.5 g/L, 沙四段为 133 g/L; 深度在 2 km (超压顶界面深度) 之下即在超压发育带内 (图 2(d)、(e)), 最大压力系数可达 2.0。

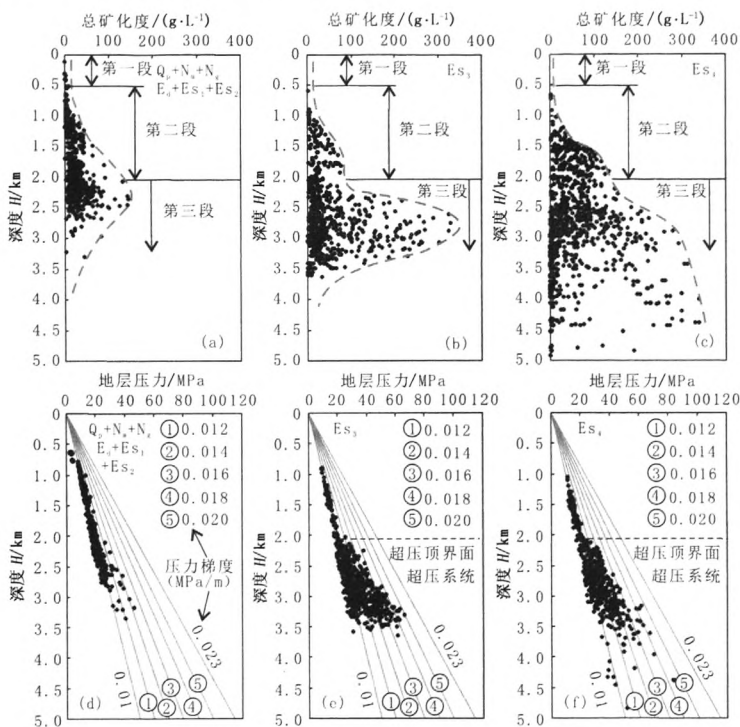


图 2 东营凹陷砂岩储层地层水矿化度和地层压力随深度变化关系

Fig. 2 Variation of TDS in formation water and pressure followed with depth changing in Dongying depression

图 3 分别为沙三和沙四段矿化度平面分布特征和压力系数平面分布特征。整体上地层水矿化度东部大于西部, 北部利津洼陷大于南部牛庄洼陷和博兴洼陷。其中, 沙三段高矿化度的地层水具有沿断裂带分布的特点, 如沙三段中央断裂带、胜北断裂带和滨南断裂带都表现出高矿化度的特点。沙四段矿化度整体上表现为高值, 形成了以利津洼陷北部为高值区的环带状分布特征。值得注意的是, 沙三、四段异常高压系统和高矿化度的平面分布特征具有一致性, 说明在相对封闭的超压系统中发育有高矿化度的地层水, 这与剖面反映的特征相一致, 这种现象表明东营凹陷沙三、四段异常高的地层水矿化度形成于相对封闭的系统之中, 其地层水各离子特征的变化受超压系统外部环境的影响较小。

按照苏林分类方法, 常见的油田水的类型为 CaCl_2 型和 NaHCO_3 型。东营凹陷地层水类型包括

高矿化度的 CaCl_2 型地层水和矿化度相对较低的 NaHCO_3 型地层水, 其中以高矿化度的 CaCl_2 型地层水为主。沙三段在利津、民丰、牛庄洼陷主要发育 CaCl_2 型地层水, NaHCO_3 型地层水主要分布在利津断裂带和博兴洼陷, 沙四段主体以 CaCl_2 型地层水为主。根据上述特征, 东营凹陷 CaCl_2 型地层水、高矿化度地层水和超压系统的发育空间范围具有一致性, 反映了高矿化度超压区封闭性较好的水文地质条件。

沉积盆地高矿化度地层水具有多种成因, 主要包括海水 (湖水—相对于陆相而言) 的蒸发作用^[26-27], 盐岩的溶解作用^[28], 泥岩隔膜过滤作用^[29], 水-岩相互作用及混合作用^[30-32] 等。东营凹陷地层水在沉积埋藏后随着地质条件如温度压力的改变必然与岩石进行水-岩相互作用, 为说明现今东营凹陷地层水特征来源, 对地层水离子特征进行

统计并计算各离子间的相互平衡关系及离子组合特征。

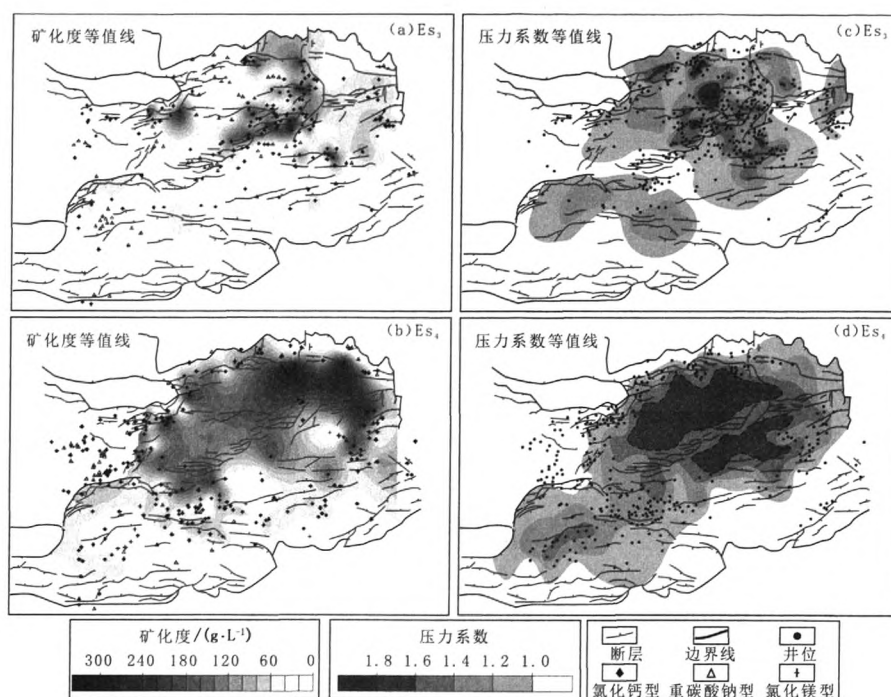


图3 沙三、四段地层水矿化度和水型分布与压力系数分布

Fig.3 Distribution of TDS and water-type, pressure coefficient in Es_3 and Es_4

2.2 地层水离子特征及成因

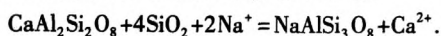
(1) 主要阴、阳离子分布特征。东营凹陷地层水阳离子主要以钠离子(Na^+)为主,其次为钙镁离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+});阴离子主要以氯离子(Cl^-)为主,其次为硫酸根和重碳酸根离子(SO_4^{2-} 、 HCO_3^-)。其主要阴、阳离子组成随深度的变化特征如图4所示。阳离子中钠离子和钙离子含量相对较高,镁离子含量相对较低,阴离子中氯离子含量较高,重碳酸根离子和硫酸根离子含量相对较低。

(2) 水-岩相互作用影响。从图3中可以看出东营凹陷存在大量高矿化度的 $CaCl_2$ 型水,因为地层岩石中极少含有 $CaCl_2$ 这种盐类矿物,所以溶解作用不适用于解释东营凹陷高矿化度 $CaCl_2$ 型水的成因,而 $CaCl_2$ 型水说明了水体封闭的沉积环境,因此,东营凹陷 $CaCl_2$ 型水高矿化度的特征是沉积埋藏水与沉积物在封闭环境下相互作用的结果,关于高矿化度 $CaCl_2$ 型水的形成主要包括水-岩作用、阳离子交替吸附作用^[33]和钠长石化作用^[34-35]。

① 盐类溶解作用。图5(a)为不同的矿化度范围内,碳酸氢根离子在地层水中的含量分布特征,随

着矿化度增加,碳酸氢根离子迅速减少;低矿化度时,碳酸氢根离子占比较大,说明地层水受地表富氧和二氧化碳的大气降水影响,主要成分以碳酸氢根离子为主,当矿化度增加时,碳酸氢根离子浓度迅速减少,而氯离子浓度则迅速增加(图5(b)),说明随着埋藏深度的增加,氯化物溶解于地层水中,而在局部也存在碳酸盐矿物的溶解作用。通过计算地层水中钠离子和氯离子浓度,得到二者关系如图5(c)所示,可以看出,矿化度越低,各层段钠离子和氯离子浓度的比值越接近于1,这是东营凹陷盐类溶解于地层水的一个重要特征。

② 钠长石化作用。从图5(c)还可以看出,当矿化度较高时,钠离子和氯离子浓度比大部分都偏离了1,向着钠离子减少的方向演化,这说明在封闭系统中,水-岩作用改变了高矿化度地层水组成特征,使得钠离子浓度减小,矿化度越高,钠离子的减小量越大,水-岩相互作用产生的这种现象可以通过钠亏损和钙富集来进行解释^[36],即钠长石化作用对钠离子和钙离子所产生的影响,其反应式为



消耗掉的钠离子浓度和生成的钙离子浓度的比值为2,图5(d)是根据图5(c)所计算的反应所消耗

的钠离子浓度和地层水中钙、镁离子浓度的比值。因此,钠长石化对阳离子的形成具有重要作用。

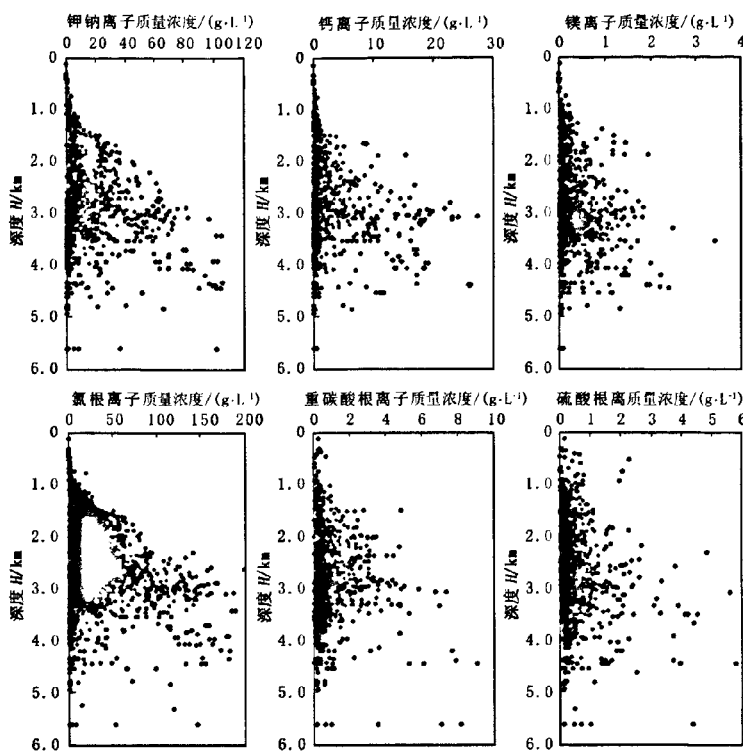


图4 阴阳离子质量浓度随深度变化特征

Fig.4 Mass concentration variation of anion and cation with depth changing

③阳离子交替吸附作用。图5(e)和(f)分别为钠离子和钙离子与氯离子的质量浓度关系图。随着氯离子质量浓度的增大,钠离子质量浓度和钙离子质量浓度都增大,而且表现出两段式的特点,图中实线为正常蒸发浓缩趋势,虚线为偏离正常趋势(盐类溶解的附加反应),正常蒸发浓缩线上钙离子质量浓度增长率小于钠离子质量浓度增长率,原因是由于碱金属钠盐的溶解度较大,浓缩作用使得碱金属钠盐不断富集,碱金属钙盐由于其溶解度小而不断沉淀;阳离子交替吸附作用对离子组成也产生影响,在低矿化度条件下,岩石中的钠离子被水中的钙离子所交换,导致钠离子质量浓度增加,钙离子质量浓度减小;在高矿化度条件下,即随着埋藏深度增加,浓缩作用增强,钙离子和钠离子质量浓度随着矿化度的增加而继续增加,但钙离子质量浓度增长率大于钠离子质量浓度增长率,因为阳离子交换吸附作用是一种可逆反应,在低矿化度下,岩石中的钠离子被水中的钙离子所交换;在较高矿化度下,水中的

钠离子可与岩石中的钙离子发生替换,使钙离子转入水中,所以增加了钙离子在地层水中的含量。

(3)离子比值系数垂向分布特征。 $(r(\text{Cl}^-)-r(\text{Na}^+))/r(\text{Mg}^{2+})$ 为变质系数,反映流体变质程度,其绝对值越大,表明流体的变质作用越强,流体-岩石的相互作用强度越大; $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ 为钠氯系数,表示油田水的浓缩变化程度,油田水封闭条件越好、变质越深则其值越小; $r(\text{Na}^+)/r(\text{Ca}^{2+})$ 为阳离子交替吸附系数,油田水越封闭、矿化度越高越浓缩,阳离子交替吸附作用则越明显,其值则越小; $r(\text{SO}_4^{2-}) \times 100 / r(\text{Cl}^-)$ 为脱硫系数,反映流体封闭程度,其值越小,封闭性越好; $r(\text{Cl}^-)/r(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 为加氯系数,反映油田水变质程度,即水-岩作用程度或封闭程度,其值越大,变质程度越强; $r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/r(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+)$ 为脱钙镁系数,反映油田水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的减少程度,图6为计算的以上6种离子组合系数随深度的变化关系,根据这些组合系数的特点,可以在垂向上对水文地质条件

进行划分。

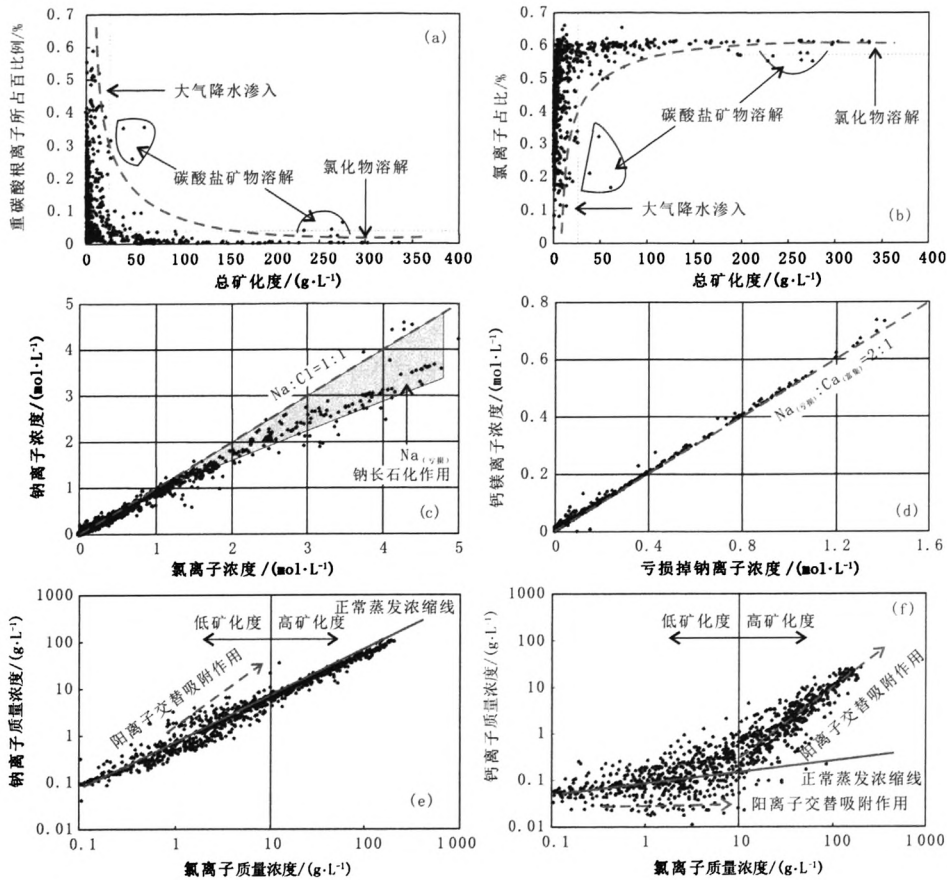


图 5 不同离子间相互关系
Fig.5 Relation of different anion and cation

①油田水强交替区。深度 0~0.5 km,地层埋藏较浅,为明化镇组合馆陶组地层,地层水矿化度较低,变质系数出现异常低值,阳离子交替吸附系数、钠氯系数、脱硫系数和脱钙镁系数都表现出异常高值特征,说明封闭性较差的水文地质条件,地层水受大气降水影响程度较高,加氯系数未出现增大特征是本区 Cl^- 含量稳定, SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 相对含量较高所致,这也说明了开放性的水文地质条件。

②油田水弱交替区。由渗入水与沉积水混合而成,深度 0.5~2.2 km,地层水矿化度增加,该段内变质系数相对于强交替区增加,阳离子交替吸附系数、钠氯系数和脱硫系数都相对减小,说明地层封闭性变好,受大气降水的影响减小,加氯系数的增大是由于随着埋深增加氯化物的溶解作用使得 Cl^- 含量增加所导致,而脱钙镁系数的增加则是由于在本区内随着矿化度的增大,离子交替吸附作用增强,导致

钙镁离子浓度增加所致。

③油田水交替阻滞区。深度 2.2 km 以下,为一封闭的超压系统,从各离子比值系数特征来看,整体上反映了该区封闭的水文条件,但也有部分地层水与系统外界进行过交替作用,使各离子组合系数都出现了异常高值的特征。

3 水化学场与超压系统演化耦合关系

正常情况下,超压系统环境封闭,外界流体很难影响系统内部的水化学场特征,而上述现象的出现主要是由于水化学场和流体压力场耦合作用的结果。

3.1 超压演化特征

成岩矿物中的流体包裹体带有包裹体形成时期地层流体丰富的物理化学信息,目前主要利用同期烃类包裹体和盐水包裹体均一温度来定量恢复储

层古压力及其演化规律^[37-40]。

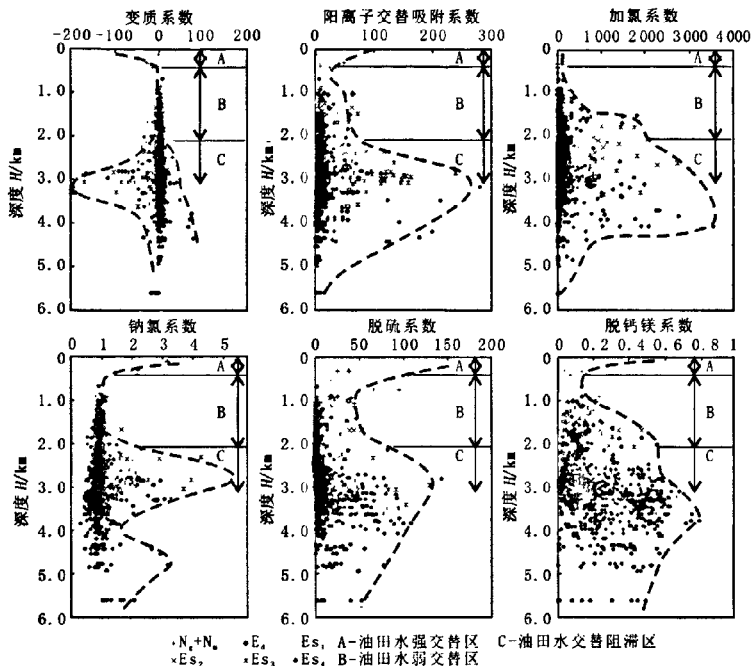


图6 离子组合特征

Fig.6 Combination characteristics of ion

根据同期油包裹体和盐水包裹体组成的“数据对”,计算了沙三、四段64块砂岩样品(位置见图1)的149个古压力数据,压力恢复结果如图7所示。

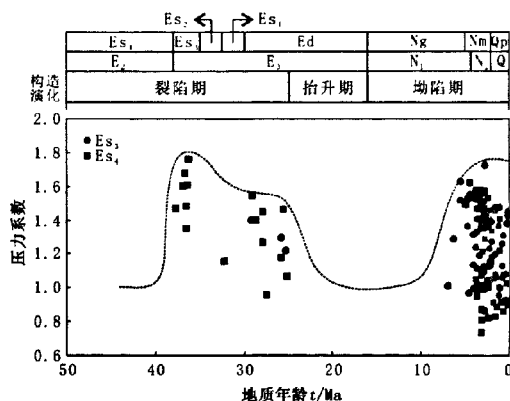


图7 东营凹陷沙三、四段超压演化

Fig.7 Overpressure evaluation of Es_3 and Es_4 in Dongying Depression

可以看出,沙三、四段储层具有两期原油充注,形成储层超压,其超压演化可以划分为3个阶段:第一阶段为第一期超压发育期至东营组沉积末期,地层抬升之前,沙三、四段储层接受第一期原油充注,沙四段压力系数可达1.8,沙三段为1.4;第二阶段为储

层超压卸载期,从东营组末期至馆陶组沉积开始,整个东营凹陷处于构造抬升期,降温泄压作用使得储层流体压力降低甚至到常压;第三阶段为第二期超压发育期,从馆陶组沉积末期开始,储层接受第二期原油充注,压力再次增大形成超压并保存至今,此阶段内沙三段压力系数最大为1.8,沙四段为1.7。

3.2 沙四段沉积期

东营凹陷沙四段沉积环境为半封闭的盐湖相沉积,沙四段岩性剖面在利津洼陷、民丰洼陷和牛庄洼陷垂向上存在三套盐岩层,平面上呈环带状分布,其累积厚度由湖盆中心向边缘逐渐减薄,与高矿化度地层水的分布特征一致,因此在沉积初期,湖水蒸发作用是沙四段同生沉积地层水高矿化度的一个重要原因;在沉积后期,随着地层埋深增加,温度升高,孔隙水溶解地层中的盐类,导致地层水矿化度进一步增大;在沙四段沉积时期,超压系统尚未发育,因此水化学场为开放系统;沙四段沉积末期与上覆地层形成沉积间断,受此次构造运动的影响,大气降水和地表水渗入沙四段地层中,导致部分地层水的离子组合系数出现异常值,图6中各离子组合系数和图4中的重碳酸根离子在4 km之下的地层中均出现异常高值,都说明了外界流体侵入的影响。

3.3 沙三段沉积期

沙三段沉积期,水体加深,蒸发作用有所减弱,同沉积地层水矿化度较沙四段有所降低,从上述储层超压演化特征来看,此阶段内沙四段储层发育第一期超压,沙三段仍为常压,因此在沙四段发育超压封闭系统,为一封闭的水文地质系统,而沙三段为开放的水文地质系统,大气降水和地表渗入水会影响沙三段水化学场的特征,而对沙四段超压封闭系统内部的水化学场不产生作用,导致沙三段部分地层水离子组合特征产生异常值;同时,沙四段高矿化度地层水在超压作用下沿断裂系统周期性的开启在垂向上运移并与沙三段地层水混合,使沙三段地层水矿化度增大,所以导致沙三段高值区在平面分布上主要集中在盆地中心沿史南-现河庄断裂带和盆缘滨南、胜北和辛镇断裂带分布(图3(a))。

3.4 沙二段至东营组沉积末期

此阶段水体进一步加深,蒸发作用持续减弱,同沉积期地层水矿化度降低程度较大,在此阶段内,沙三段地层开始发育超压系统,形成一个封闭的水文地质环境,值得注意的是此阶段内沙四段最大压力系数从沙三段沉积期的1.8降低到约1.6,进一步说明沙四段地层水在超压作用下沿断裂运移至上覆地层而导致地层流体压力降低;从压力演化特征可以看出,东营组沉积末期,沙三、四段已经形成一个整体的超压系统,其内部为封闭的水文地质环境,在超压作用下,沙三、四段地层水会继续沿断裂带以幕式排放的方式周期性地向上覆地层中运移。

3.5 东营组末期构造抬升作用

东营组末期发生东营构造运动,整个凹陷抬升遭受剥蚀,在这段时期内,地层压力降低甚至常压,因此系统外界流体会与由超压系统转变为常压系统中的部分地层水或在超压系统内部一直保持常压的地层水发生交替作用,从图2(e)、(f)中可以看出,在沙三、四段超压地层中仍发育有大量常压地层流体,这说明沙三、四段超压系统由于受封闭条件和断裂启闭性的影响,其在空间的分布特征具有复杂性。

3.6 馆陶组至平原组沉积期

此阶段内,沙三、四段储层发育第二期超压系统,再次形成封闭的水文地质环境,外界流体已经不能够影响超压系统,主要为系统内部的水-岩相互作用,矿物的溶解、钠长石化、阳离子交替吸附作用都影响着水化学场的形成过程,在凹陷中心封闭性相对较好的环境中形成了高矿化度的 CaCl_2 型水。随着断裂的周期性的开启封闭作用,下部沙四段高

矿化度的地层水在超压作用下会持续沿断裂带向上运移。使上覆地层的矿化度也产生不同程度的增大。在凹陷边缘常压系统内,由于东营组沉积末期东营凹陷整体抬升使得南坡沙河街组地层出露地表,富氧和二氧化碳的大气水沿断层和渗透性地层下渗,对地层水产生淡化作用,因此凹陷边缘矿化度相对较低。由图2中看出,从地表至5 km的范围内地层水都表现出不同程度的低矿化度特征,除了地层水被淡化的作用外,还有深部泥岩的渗析作用的影响,随着上覆沉积物的增加,泥岩层中的地层水在压实作用下向外排出,但由于渗析作用较强,排出地层水矿化度非常低,进入砂岩储层后降低了地层水的矿化度;根据上述水化学场和压力场耦合作用的分析结果,东营凹陷地层水特征形成模式如图8所示。

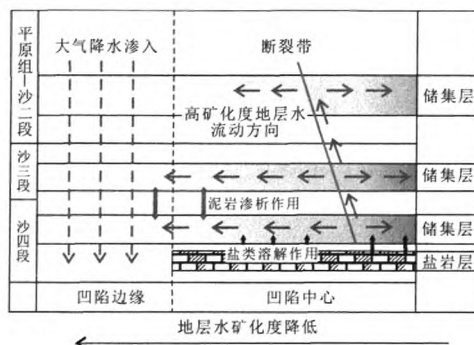


图8 流体动力场及地层水分布相互关系模式图

Fig.8 Diagram of fluid dynamic field and distribution character of formation water

4 水化学环境垂直分带性与油气分布和保存条件

由东营凹陷水文地质演化特征可知,整体上约2 km以上的常压系统为与地表沟通良好的大气降水渗入活跃的重力流系统,2 km以下的超压系统属封闭性很好的缺乏流体补给的水交替停滞系统。东营凹陷主要原油探明储量分布在常压系统沙二段和超压系统沙三、四段,其中沙二段的原油探明储量主要分布在1.9~2.2 km的压力过渡带,远大于沙三、四段的储量。由水文地质特征分析结果可知,纵向上2 km之上的常压系统并不利于油气的保存,原油已遭受不同程度的水洗、氧化和生物降解以及轻组分逸散,原油密度的分布特征已证实(图9所示),在2 km之上常压系统中沙二段原油密度分布在 $0.9 \sim 1 \text{ g/cm}^3$,沙三段的原油密度分布在 $0.9 \sim$

1.05 g/cm³, 沙四段原油密度分布在 0.85 ~ 1 g/cm³, 基本上为重质原油; 2 km 之下超压系统中沙二段原油密度分布在 0.83 ~ 0.97 g/cm³, 沙三段的原油密度分布在 0.82 ~ 0.95 g/cm³, 沙四段原油密度分布在 0.82 ~ 0.9 g/cm³, 属油质较好的正常原油。在平面分布上, 东营凹陷边缘油气保存条件较差, 这和现今沙二段原油探明地质储量中主要沿中央断裂带分布, 而在凹陷边缘则储量很小的实际情况相吻合。

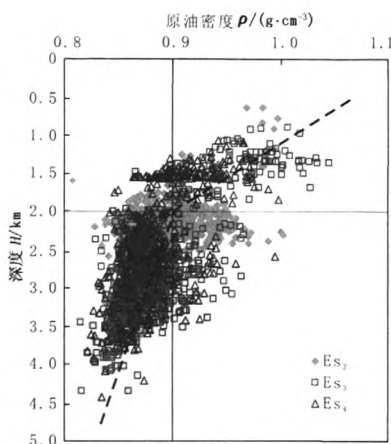


图9 东营凹陷沙二、三、四段原油密度随深度变化关系

Fig. 9 Oil density of Es₂, Es₃ and Es₄ following depth in Dongying depression

5 结论

(1) 东营凹陷地层水矿化度存在异常高值, 在垂向上呈现出三段式的特点; 平面上沙四段普遍较高, 沙三段高矿化度的地层水沿着断裂带分布; 地层水的水型特征表明高矿化度的地层水对应 CaCl₂ 型水, 指示封闭的水文地质环境。矿化度分布特征和超压发育特征紧密联系, 具有一定的耦合关系。

(2) 东营凹陷高矿化度的地层水形成受早期同沉积地层水和后期盐类溶解的影响, 在封闭的超压系统中, 钠长石化作用和阳离子交替吸附作用特征明显, 形成了东营凹陷高矿化度的 CaCl₂ 型水。

(3) 东营凹陷水化学场在垂向上具有十分明显的分带性, 以 2.2 km (超压顶界面) 为界, 可以分为上部常压系统和下部的超压系统, 上部常压系统与油田水强交替区和弱交替区相对应, 下部超压系统和油田水阻滞区相对应。在常压系统内地表水渗入活跃, 不利于油气保存, 但在超压系统内部, 水文地

质封闭性较好, 对地史时期的油气聚集具有良好的保存条件。

(4) 东营凹陷水化学场和超压场的耦合关系可以解释水化学场的形成过程: 矿化度在垂向上表现为“三段式”的特点, 第一段是砂岩储层地层水正常演化趋势的结果; 第二段高矿化度地层水埋藏较浅, 层位上分布在沙四段, 平面上则处于凹陷边缘, 是由于盆地中心超压盐沿输导层和断层向盆地边缘侧向运移, 同时由于大气降水的渗入作用和地层渗析作用导致矿化度较低; 第三段高矿化度地层水在沙四段主要是受沉积环境和埋藏期盐岩层溶解的影响, 在沙二、三段则是与沿断裂系统垂向运移的沙四段超压流体混合作用的结果。

参考文献:

- [1] LAWRENCE S R, CORNFORD C. Basin geofluids[J]. Basin Research, 1995, 7(1): 1-7.
- [2] 孙向阳, 解习农. 东营凹陷地层水化学特征与油气聚集关系[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 291-296.
SUN Xiang-yang, XIE Xi-nong. Relationship between the chemical characteristics of formation water and hydrocarbon accumulation in Dongying sag[J]. Experimental Petroleum Geology, 2001, 23(3): 291-296.
- [3] 何生, 唐仲华. 松南十屋断陷低压系统的油气水文地质特征[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1995, 20(1): 79-84.
HE Sheng, TANG Zhong-hua. Hydrogeological characteristics of underpressure system, distribution of oil and gas in Shiwu fault subsidence, southern Songliao Basin[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 1995, 20(1): 79-84.
- [4] EADINGTON P J, HAMILTON P J, BAI G P. Fluid history analysis: a new concept for prospect evaluation[J]. The APEA Journal, 1991, 31(1): 282-294.
- [5] 蔡春芳, 王国安, 何宏. 库车前陆盆地流体化学、成因与流动[J]. 地质地球化学, 2000, 28(1): 58-63.
CAI Chun-fang, WANG Guo-an, HE hong. Fluid chemistry, origin and flow in Kuqa foreland Basin[J]. Geology-Geochemistry, 2000, 28(1): 58-63.
- [6] 李思田, 路凤香, 林畅松. 中国东部及邻区中生代盆地演化及地球动力学背景[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994: 1-10.
- [7] 杜栩, 郑洪印, 焦秀琼. 异常压力与油气分布[J]. 地学前缘, 1995, 2(4): 137-148.
DU Xu, ZHENG Hong-yin, JIAO Xiu-qiong. Abnormal pressure and hydrocarbon accumulation [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(4): 137-148.

- [8] 陈荷立, 汤锡元. 山东东营凹陷泥岩压实作用及油气初次运移问题探讨[J]. 石油学报, 1983, 4(2): 9-16.
CHEN He-li, TANG Xi-yuan. A discussion on the compaction of argillaceous rocks and primary migration of oil and gas in Dongying sag of Shandong Province[J]. Acta Petrolei Sinica, 1983, 4(2): 9-16.
- [9] 彭大均, 李仲东, 刘兴才, 等. 济阳盆地沉积型异常高压带及深部油气资源的研究[J]. 石油学报, 1988, 9(3): 13-19.
PENG Da-jun, LI Zhong-dong, LIU Xing-cai, et al. A study of depositional type abnormally high pressure zone and deep oil-gas resource in Jiyang Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1988, 9(3): 13-19.
- [10] 何新贞. 东营凹陷压力系统特征分析[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(4): 21-23.
HE Xin-zhen. Analysis on the features of pressure system in Dongying sag[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2002, 9(4): 21-23.
- [11] 肖焕钦, 刘震, 赵阳, 等. 济阳拗陷地温-地压场特征及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 68-70.
XIAO Huan-qin, LIU Zhen, ZHAO Yang, et al. Characteristics of geotemperature and geopressure fields in the Jiyang depression and their significance of petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 68-70.
- [12] 邱桂强, 凌云, 樊洪海. 东营凹陷古近系烃源岩超压特征及分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 71-75.
QIU Gui-qiang, LING Yun, FAN Hong-hai. The characteristics and distribution of abnormal pressure in the Paleogene source rocks of Dongying sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 71-75.
- [13] 隋风贵. 东营凹陷盆地地层流体超压系统与油气运聚成藏[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(3): 17-21.
SUI Feng-gui. Effect of formation superpressure system on hydrocarbon migration and accumulation in Dongying fault Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(3): 17-21.
- [14] 郑和荣, 黄永玲, 冯有良. 东营凹陷下第三系地层异常高压体系及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 67-70.
ZHENG He-rong, HUANG Yong-ling, FENG You-liang. Anomalous overpressure system of early Tertiary in Dongying depression and its petroleum geology significance[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(4): 67-70.
- [15] 刘晓峰, 解习农. 东营凹陷流体压力系统研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2003, 28(1): 78-86.
LIU Xiao-feng, XIE Xi-nong. Study on fluid pressure system in Dongying depression[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(1): 78-86.
- [16] 陈中红, 查明. 东营凹陷流体超压封存箱与油气运聚[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 607-615.
CHEN Zhong-hong, ZHA Ming. Over-pressured fluid compartment and hydrocarbon migration and accumulation in Dongying depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 607-615.
- [17] 杨绪充. 东营凹陷水文地质条件探讨[J]. 华东石油学院院报, 1985(3): 1-8.
YANG Xu-chong. An approach to the paleo-hydrogeological condition of Dongying depression[J]. Journal of East China Petroleum Institute, 1985(3): 1-8.
- [18] 杨绪充. 东营凹陷水文地质条件与油气[J]. 华东石油学院院报, 1985(4): 8-15.
YANG Xu-chong. The hydrogeological conditions and its relation with oil and gas in Dongying depression[J]. Journal of East China Petroleum Institute, 1985(4): 8-15.
- [19] 孙向阳, 刘方槐. 沉积盆地中地层水化学特征及其地质意义[J]. 天然气勘探与开发, 2001, 24(4): 47-53.
SUN Xiang-yang, LIU Fang-huai. The characteristic and geological significance of formation water in sedimentary basin[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2001, 24(4): 47-53.
- [20] 曾澍辉. 东营凹陷第三系流体物理化学场及其演化特征[J]. 地质论评, 2000, 46(2): 212-219.
ZENG Jian-hui. Fluid physicochemical field and its evolution in tertiary system, Dongying sag[J]. Geological Review, 2000, 46(2): 212-219.
- [21] 查明, 陈中红. 山东东营凹陷前古近系水化学场、水动力场与油气成藏[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 567-575.
ZHA Ming, CHEN Zhong-hong. Formation water chemical and hydrodynamic fields and their relations to the hydrocarbon accumulation in the pre-tertiary of Dongying depression, Shandong[J]. Geoscience, 2008, 22(4): 567-575.
- [22] 王伟, 纪友亮, 张善文. 胜利油区古近系地层水性对储层物性的影响[J]. 高校地质学报, 2007, 13(4): 714-721.

- WANG Wei, JI You-liang, ZHANG Shan-wen. Effects of paleogene formation water on physical properties of reservoirs in Shengli oil zone[J]. Geological Journal of China Universities, 2007,13(4):714-721.
- [23] XIE Xi-nong, FAN Zhong-hai, LIU Xiao-feng, et al. Geochemistry of formation water and its implication on overpressured fluid flow in the Dongying depression of the Bohaiwan Basin, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006,89:432-435.
- [24] 查明. 断陷盆地油气二次运移与聚集[M]. 北京:地质出版社,1997:27-35.
- [25] 渠永宏, 孙镇城, 冯晓杰. 冀中坳陷北部潜山地层水水文地质特征及对油气勘探的意义[J]. 大庆石油学院学报, 1999,23(3):8-11.
- QU Yong-hong, SUN Zhen-cheng, FENG Xiao-jie. Middle upper proterozoic buried hill groundwater geo-hydrologic character and significance for exploration in northern Jizhong depression basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999,23(3):8-11.
- [26] RITTENHOUSE G. Bromine in oil-field waters and its use in determining possibilities of origin of these waters[J]. AAPG Bulletin, 1967,51:2430-2440.
- [27] CARPENTER A B. Origin and chemical evolution of brines in sedimentary basins[J]. Oklahoma Geological Survey Circular, 1978,79:78-88.
- [28] LAND L S, PREZBINDOWSKI D R. The origin and evolution of saline formation water, lower cretaceous carbonates, south-central Texas, USA[J]. Developments in Water Science, 1982,16:51-74.
- [29] GRAF D L. Chemical osmosis, reverse chemical osmosis, and the origin of subsurface brines[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982,46(8):1431-1448.
- [30] HANOR J S. Kilometer-scale thermohaline overturn of pore-waters in the Louisiana Gulf-coast[J]. Nature, 1987,327:501-503.
- [31] 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.
- [32] KHARAKA Y K, HANOR J S. Deep fluids in the continents(I): sedimentary basins[J]. Treatise on Geochemistry, 2003,5:499-540.
- [33] SHENG H Middleton, ZHONGHUA T. Characteristics and origin of underpressure system in the Shiwu fault depression, south-east Songliao Basin, China[J]. Basin Research, 2000,12:147-158.
- [34] CHENG J M, MCINTOSH J C, XIE X N, et al. Hydrochemistry of formationwater with implication to diagenetic reactions in Sanzhao depression and Qijia—gulong depression of Songliao Basin, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006,88:86-90.
- [35] DU Xue-bin, XIE Xi-nong, LU Yong-chao, 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, 2010,106:77-83.
- [36] DAVISSON M Lee, ROBBERT E Criss. Na-Ca-Cl relation in basinal fluids[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996,60(15):2743-2752.
- [37] XIE X, BETHKE C M, LI S, et al. Overpressure and petroleum generation and accumulation in the Dongying depression of the Bohaiwan Basin, China [J]. Geofluid, 2001,1:257-271.
- [38] 陈红汉, 董伟良, 张树林, 等. 流体包裹体在古压力模拟研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2002,23(3):207-211.
- CHEN Hong-han, DONG Wei-liang, ZHANG Shu-lin, et al. Application of fluid inclusion in palaeo-pressure modelling research[J]. Oil and Gas Geology, 2002,23(3):207-211.
- [39] 刘福宁. 异常高压区的古沉积厚度和古地层压力恢复方法探讨[J]. 石油与天然气地质, 1994,15(2):180-185.
- LIU Fu-ning. An approach to reconstruction of paleo-sedimentary thickness and paleo-formation pressure in abnormal high pressure region[J]. Oil and Gas Geology, 1994,15(2):180-185.
- [40] 张立宽, 王震亮, 孙明亮, 等. 库车坳陷克拉2气田异常流体压力演化史[J]. 地质科学, 2007,42(3):430-443.
- ZHANG Li-kuan, WANG Zhen-liang, SUN Ming-liang, et al. Evolution of abnormal fluid pressure in the kela 2 gas-field, Kuqa depression [J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2007,42(3):430-443.

(编辑 刘为清)