

# 东营凹陷沙四段地层水化学特征及其指示意义

陈勇, 王淼, 王鑫涛, 王成军, 韩云

(中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580)

**摘要:**在统计分析东营凹陷沙河街组主要预探井和评价井地层水和岩心物性资料的基础上,考察沙四段地层水化学性质及其指示意义,分析其与储层物性演化之间的关系。结果表明:沙四段地层水以氯化钙型为主,整体封闭程度好,处于还原的水体环境,总体矿化度高且具有垂向递增性和侧向不均一性;pH值是影响储层物性的主要因素,pH越小地层水矿化度越大,酸性地层水对储集物性的改善贡献相对较大;沙四段地层水仍以弱酸性为主,但地层中石英和碳酸盐矿物含量的变化、地层水中 $\text{HCO}_3^-$ 含量的变化和黏土矿物之间的相互转化表明沙四段整体上处于酸性向碱性过渡的时期并以碱性成岩环境为主;沙四段地层储集物性较上覆地层有所降低,且随着埋深的增加,碱性成岩环境越占优势,储集物性变差;横向上北部陡坡带地层储集物性要好于中央隆起带和南部缓坡带;地层水矿化度可以作为判断相似地层储集物性发展趋势的重要指标,即地层水矿化度升高说明溶蚀作用强度大于胶结作用,储集物性变好;碳酸盐矿物的沉淀或溶解是影响沙四段储层孔隙度的主控因素(相关系数 $R \approx 0.81$ ),沙四段碳酸盐矿物更趋向于沉淀析出形成胶结物,而溶蚀作用强度远小于上覆地层,储集物性相对较差。

**关键词:**东营凹陷;沙四段;地层水地球化学特征;储层物性;成岩环境;矿化度

**中图分类号:**P 592      **文献标志码:**A

**引用格式:**陈勇,王淼,王鑫涛,等. 东营凹陷沙四段地层水化学特征及其指示意义[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(4):42-52.

CHEN Yong, WANG Miao, WANG Xintao, et al. Chemical characteristics and implications of formation water of the Es<sub>4</sub> formation in Dongying sag[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015,39(4):42-52.

## Chemical characteristics and implications of formation water of the Es<sub>4</sub> Member in Dongying sag

CHEN Yong, WANG Miao, WANG Xintao, WANG Chengjun, HAN Yun

(School of Geosciences in China University of petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** On the basis of statistical analysis of the formation water and core physical properties in preliminary prospecting wells of the Es<sub>4</sub> Member in Dongying sag, the chemical properties of formation water and its indication were investigated. And the relationship between the chemical properties of formation water and the evolution of the reservoir physical properties was analyzed as well. The results show that the formation water type of the Es<sub>4</sub> is mainly CaCl<sub>2</sub>, which indicates that the reservoirs are good closure and reductive environment. The total salinity of formation water is high, which increases steadily in vertical and is uneven in lateral. The pH value of the formation water is the main factor of affecting the physical properties of reservoirs. Low pH corresponds to the high salinity, and the acidic formation water has great contribution to the improvement of reservoir physical properties relatively. Although the formation water of the Es<sub>4</sub> is dominated by acid, the variation of the quartz and carbonate minerals content, the variation of the  $\text{HCO}_3^-$  content in the formation water and the transformation of clay minerals indicate the Es<sub>4</sub> is in the stage of transition from acid to alkaline on the whole. The diagenetic environment is dominated by the alkaline, and the reservoir physical properties of the Es<sub>4</sub> are deteriorated compared to the overlying strata. With

收稿日期:2015-03-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41172111);山东省优秀中青年科学家奖励基金项目(BS2012NJ014);中央高校基本科研业务费专项(SD2013211151)

作者简介:陈勇(1976-),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为含油气盆地流体和油气成藏机制等。E-mail:yongchenzy@upc.edu.cn。

the increasing depth of burial the physical properties will be worse. The reservoir physical properties of the north steep slope belt are better than those of the central rise belt and the south gentle slope belt in lateral. The salinity of formation water can be used as an important indicator to determine the trend of physical properties of the reservoirs, that is to say, the increase of the salinity indicates that the dissolution strength is greater than the cementation strength and the physical properties of reservoirs will be better. It is also found that the dissolution and precipitation of the carbonate minerals is the dominated factor in terms of the porosity ( $R \approx 0.81$ ), and the carbonate minerals of the  $Es_4$  tend to precipitate while the dissolution is far less than the overlying strata, resulting in the relatively deteriorated physical properties of the reservoir.

**Keywords:** Dongying sag; the  $Es_4$  Member; chemical properties of formation water; physical properties of reservoirs; diagenetic environment; salinity

沉积盆地的形成与演化主要是在水介质参与条件下完成的,不同性质的地层流体必将导致不同的储层成岩演化过程。对地层水的研究主要集中在利用微量元素和稳定同位素分析地层水来源及其地球化学演化趋势,以及应用地层水地化指标推断储层的水-岩作用类型<sup>[1-3]</sup>。对东营凹陷地层水的地化特征与油气关系(包括利用地层水相关性质确定与油气运移、聚集的关系等)的研究取得了较为丰硕的成果<sup>[4-8]</sup>。流体与岩石之间的相互作用是盆地储层研究的核心问题,地层水化学特征是储层与流体相互作用的结果,记录了储层矿物与地层流体之间和储层成岩演化历史的信息。笔者通过对东营凹陷沙四段( $Es_4$ )主要预探井、评价井地层水和取心物性资料的统计分析,在查明地层水化学性质的基础上,结合沙四段储层物性和储层矿物溶解性关系,寻找地层水地化性质与储层物性演化之间的关系,以考察次生孔隙的形成机制,预测有利储层和评价油气藏保存条件。本次研究地层水样品均按照 SY/T 5523-2006《油田水分析标准》采集和分析。

## 1 区域地质概况

东营凹陷为渤海湾盆地济阳拗陷的一个次级构造单元,位于济阳拗陷的南部,面积约 5 700 km<sup>2</sup>,总体走向为北东向(图 1),是在古生界基岩古地形背景上经构造运动发育起来的断陷-拗陷湖盆<sup>[9]</sup>。目前东营凹陷深层油气勘探的目标主要是指埋藏深度大于 3 500 m 的古近系孔店组和沙河街组四段。沙河街组为东营凹陷重要的含油气层系,厚度为 300 ~ 3 700 m,本文中的研究层位是沙河街组四段。沙四下亚段以扇三角洲相为主,围绕盆地边缘呈带状分布,其中北部陡坡带下部岩性为深灰色黏土岩、砂砾岩,上部为盐膏岩、黏土岩;洼陷带岩性则以深灰色黏土岩和膏盐岩的发育为主;中央隆起带主要发育有黏土岩和灰色、灰白色盐膏岩。沙四上亚段北带扇三角洲相、湖底扇相沿盆地边缘分布,岩性以深灰色黏土岩、油泥岩,少量白云岩和细砂岩为主;南

斜坡及东部砂体厚度薄,延伸远。

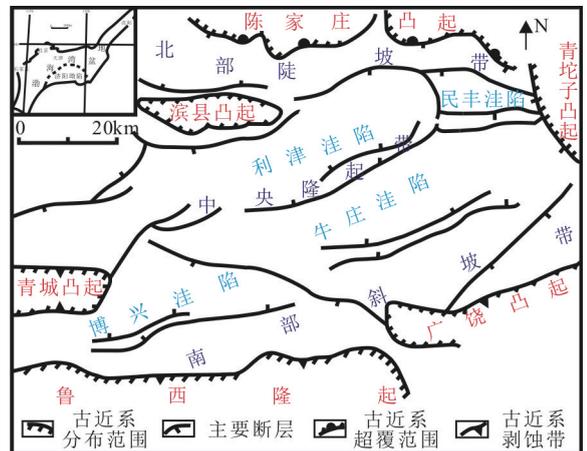


图 1 东营凹陷区域构造单元(据王艳忠,2007,略有修改)

Fig. 1 Regional tectonic map of Dongying sag

## 2 东营凹陷沙四段地层水化学特征

### 2.1 地层水离子类型和含量

东营凹陷沙四段地层水主要阳离子有  $Na^+ + K^+$ 、 $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$ , 其中  $Na^+ + K^+$  含量最高,  $Ca^{2+}$  次之,  $Mg^{2+}$  含量最低,且 3 种阳离子含量相差甚大,具有明显向某一端元集中的趋势,即地层水中  $Na^+$  和溶解度高的钠盐趋于富集,而溶解度较低的钙盐和镁盐沉淀析出;主要阴离子中易形成强电解质的  $Cl^-$  含量最高,  $HCO_3^-$  次之,  $SO_4^{2-}$  最低(表 1)。

### 2.2 地层水水型分析

按照苏林地层水分类方法<sup>[10]</sup>可知,北部陡坡带、中央隆起带和南部缓坡带沙四段地层水水型分布差异不大,都以  $CaCl_2$  型为主,而  $NaHCO_3$  型、 $MgCl_2$  型和  $Na_2SO_4$  型地层水通常以过渡型的形式分布在油田垂向剖面上(图 2),这说明沙四段具有较好的封闭性,有利于油藏的后期保存。其中  $CaCl_2$  型地层水以弱酸性为主(平均 pH = 6.44),  $NaHCO_3$  型地层水主要为弱碱性(平均 pH = 7.70),而  $MgCl_2$  和  $Na_2SO_4$  水型区则近于中性。就矿化度而言,  $CaCl_2$  型地层水平均矿化度最高为 62.96 g/

L, NaHCO<sub>3</sub> 型地层水矿化度有大幅度下降,平均仅为 16.32 g/L, MgCl<sub>2</sub> 型地层水平均矿化度为 10.90 g/L, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 地层水矿化度只有 3.71 g/L, 即随着矿

化度的增高, CaCl<sub>2</sub> 型地层水逐渐取代其他类型地层水, 说明 CaCl<sub>2</sub> 型地层水是在经历了长时间的、强烈的流体-岩石相互作用后形成的。

表 1 东营凹陷沙河街组地层水离子类型和含量

Table 1 Types and contents of ion in Shahejie Formation water in Dongying sag g/L

	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	矿化度
沙一段	$\frac{1.15 \sim 31.22}{5.58}$ (47)	$\frac{0.02 \sim 2.45}{0.45}$ (47)	$\frac{0.00 \sim 1.18}{0.16}$ (44)	$\frac{0.53 \sim 55.90}{10.66}$ (219)	$\frac{0.00 \sim 1.09}{0.18}$ (65)	$\frac{0.05 \sim 2.92}{0.54}$ (46)	$\frac{1.59 \sim 90.93}{18.56}$ (215)
沙二段	$\frac{0.14 \sim 75.57}{9.61}$ (84)	$\frac{0.01 \sim 15.63}{1.06}$ (84)	$\frac{0.01 \sim 1.30}{0.16}$ (79)	$\frac{0.20 \sim 162.98}{19.71}$ (477)	$\frac{0.00 \sim 2.34}{0.24}$ (82)	$\frac{0.13 \sim 4.42}{0.94}$ (76)	$\frac{0.19 \sim 261.77}{33.56}$ (472)
沙三段	$\frac{0.09 \sim 107.19}{11.68}$ (469)	$\frac{0.00 \sim 60.06}{1.74}$ (469)	$\frac{0.00 \sim 14.74}{0.31}$ (450)	$\frac{0.10 \sim 207.95}{25.78}$ (973)	$\frac{0.00 \sim 9.30}{0.47}$ (400)	$\frac{0.00 \sim 7.33}{1.00}$ (456)	$\frac{0.49 \sim 339.36}{44.23}$ (977)
沙四段	$\frac{0.94 \sim 105.40}{13.82}$ (1060)	$\frac{0.00 \sim 27.36}{2.14}$ (1058)	$\frac{0.00 \sim 26.33}{0.41}$ (1018)	$\frac{0.10 \sim 205.58}{27.44}$ (1601)	$\frac{0.42 \sim 98.34}{0.66}$ (971)	$\frac{0.00 \sim 21.65}{0.74}$ (1033)	$\frac{0.35 \sim 336.53}{46.86}$ (1522)

注:横线之上的数据为最小值和最大值,横线之下的数据为平均值,括号中数值为样品数。

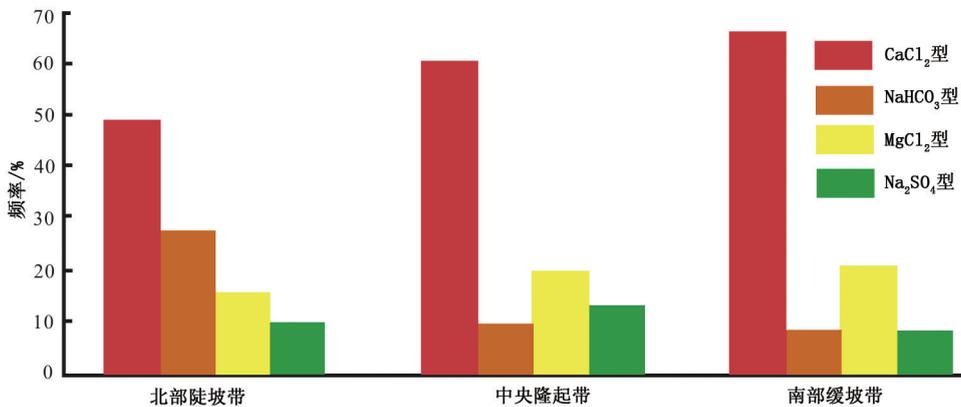


图 2 东营凹陷沙四段水型频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of the type of Es<sub>4</sub> formation water in Dongying sag

### 2.3 地层水特征参数分析

地层水化学特征参数分析相对地层水类型分析能够更好地反映地层水所处的地球化学环境和流体-岩石相互作用强度, 同时与油气的运移和聚集有一定的关系, 可用于预测油气藏和判断油气性质。根据常用的油田水化学特征参数<sup>[11]</sup>对东营凹陷沙四段地层水进行分析。

#### 2.3.1 钠氯系数 $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$

钠氯系数可以反映地层水的变质浓缩程度和地层水地球化学环境。一般认为钠氯系数小, 为较还原水体环境的反映, 有利于油气的保存。盐岩层溶滤形成的地下水钠氯系数大约为 1.0; 一般地下水的钠氯系数大于 1.0<sup>[7]</sup>。东营凹陷沙四段地层水钠氯系数垂向分析如图 3 所示, 可以看出沙四段北部陡坡带地层水钠氯系数分布在 0.05 ~ 1.99, 平均值为 0.69; 中央隆起带地层水钠氯系数分布在 0.06 ~ 1.85, 平均值为 0.58; 南部缓坡带地层水钠氯系数分布在 0.26 ~ 1.49, 平均值为 0.58。说明东营凹

陷沙四段地层水总体为较还原的水体环境, 封闭较好, 浓缩变质程度较深, 有利于油气的保存; 横向上中央隆起带和南部缓坡带油田水封闭最好浓缩变质程度最深, 北部陡坡带次之。

#### 2.3.2 变质系数 $r(\text{Cl}^- - \text{Na}^+)/r(\text{Mg}^{2+})$

变质系数反映地层水的变质浓缩程度, 如果该数值较小(一般小于 0), 说明地层水的封闭保存条件被破坏; 相反, 该参数越大表明封闭程度越好, 水-岩作用越强<sup>[12]</sup>。东营凹陷沙四段大多数样品变质系数大于 0(图 4), 其中北部陡坡带地层水变质系数平均值为 30.43, 小于 0 的样品数占总样品数的 8.91%; 中央隆起带地层水变质系数平均值为 50.07, 小于 0 的样品数占总样品数的 1.64%; 南部缓坡带地层水变质系数平均值为 38.29, 小于 0 的样品数占总样品数的 2.33%。表明沙四段地层水总体封闭程度好, 所经历的变质作用时间长, 水-岩作用程度强; 横向上中央隆起带封闭条件最好, 南部缓坡带次之, 北部陡坡带相对最低。

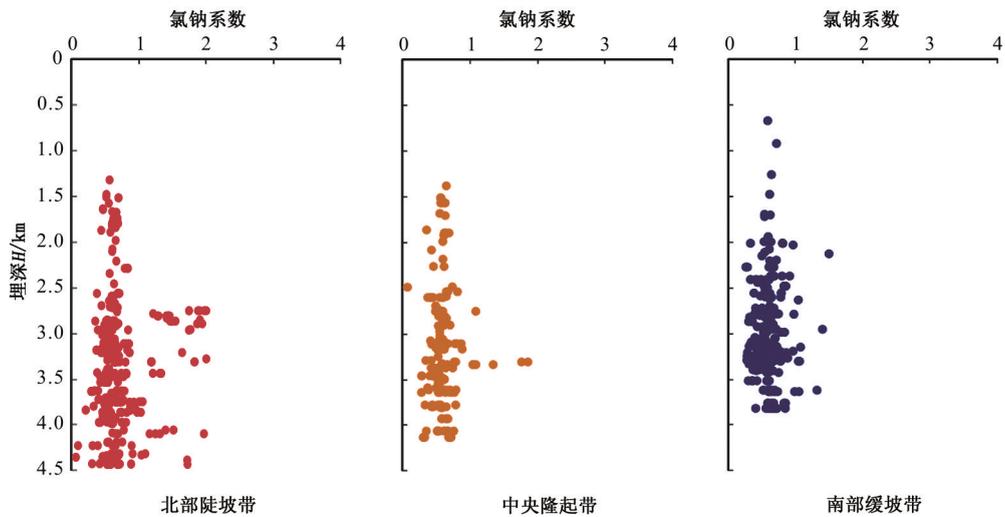


图 3 东营凹陷沙四段地层水钠氯系数垂向变化

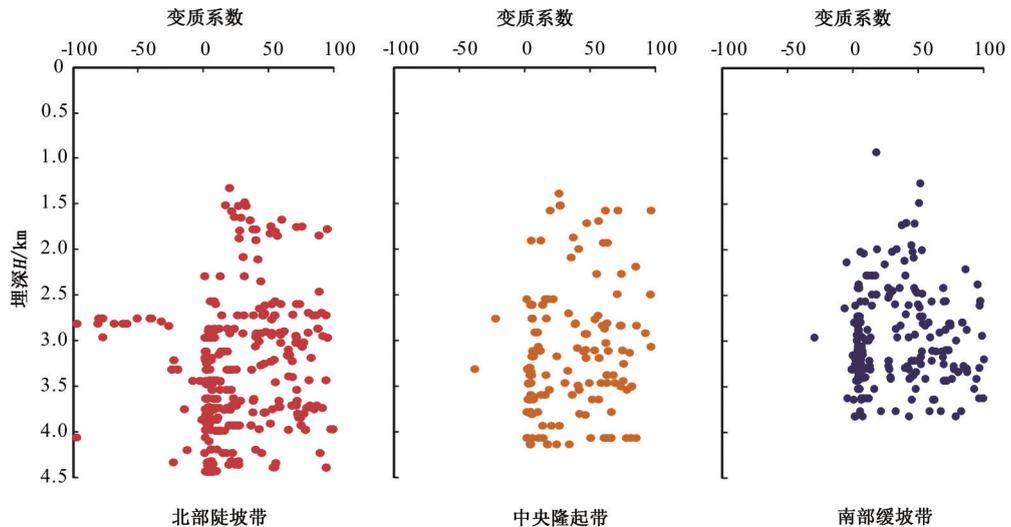
Fig. 3 Vertical variation of  $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$  of  $\text{Es}_4$  formation water in Dongying sag

图 4 东营凹陷沙四段地层水变质系数垂向变化

Fig. 4 Vertical variation of  $r(\text{Cl}^- - \text{Na}^+)/r(\text{Mg}^{2+})$  of  $\text{Es}_4$  formation water in Dongying sag

### 2.3.3 脱硫系数 $r(\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$

脱硫系数表征地层水的脱硫酸作用程度,它可作为判断油气保存条件好坏的环境指标,也可以作为判断还原条件优良的标准,此参数为 0 表示封闭程度好,脱硫系数小于 1 的地层水,通常说明地层水埋藏于封闭较好地区且经历了较为彻底的还原作用<sup>[7,12]</sup>。分析得知东营凹陷沙四段北部陡坡带地层水脱硫系数为 0~0.68,平均值为 0.08;中央隆起带地层水脱硫系数介于 0~0.56,平均值为 0.07;南部缓坡带地层水脱硫系数介于 0~0.59,平均值为 0.08,说明沙四段整体封闭程度较好且地层水还原彻底,有利于油气的保存(图 5)。

总之,沙四段具有良好的封闭性,是典型的地层

水交替停滞带,流体-岩石相互作用程度强且还原彻底。地层流体中不同离子类型及其含量对流体-岩石相互作用和矿物溶解度有很大的影响,例如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  等碱金属离子能够促使石英的溶解速率增大数十倍乃至百倍<sup>[13]</sup>;碱性地层水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  富集时,高岭石可以转化成蒙脱石或绿泥石;若  $\text{K}^+$  富集,则向伊利石转化<sup>[14]</sup>;介质中离子强度效应(盐效应)和离子对效应均能使矿物的溶解度增大,而同离子效应会使矿物的溶解度减小<sup>[15]</sup>。这些作用的发生均会对地层的储集物性产生影响,因此,现阶段水介质中不同离子含量变化也能够体现成岩作用强弱的信息,有助于大致判断储层储集性能的好坏。

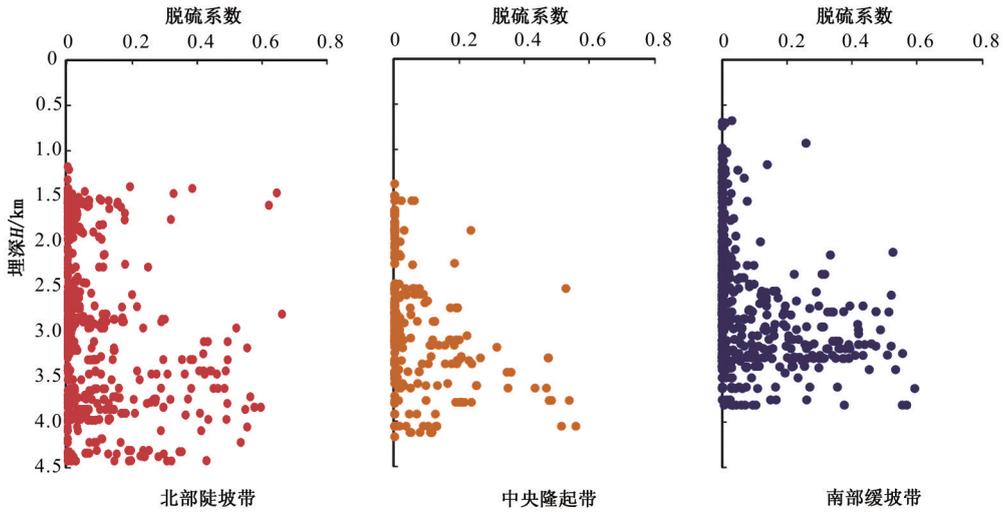


图5 东营凹陷沙四段地层水脱硫系数垂向变化

Fig. 5 Vertical variation of  $r(\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$  of  $\text{Es}_4$  formation water in Dongying sag

### 2.4 地层水矿化度特征

地层水矿化度表示地层水中所溶解的各种离子、分子与化合物的总量,对于多数的沉积盆地,矿化度(TDS)在一定深度为一较宽的范围。该值变化不仅能够说明地层水中所溶解物质的来源,同时也能反映地层水所经历的复杂物理过程如扩散、运移

等<sup>[5]</sup>。通过对东营凹陷沙四段地层水矿化度垂向变化分析(图6)可以看出:东营凹陷沙河街组地层水 TDS 值总体较高,分布具有垂向递增性,即 TDS 值随着埋深的增加而增大,其中沙四段地层水 TDS 值最高,沙三段地层水 TDS 值较沙四段有所降低,沙二段、沙一段矿化度最低。

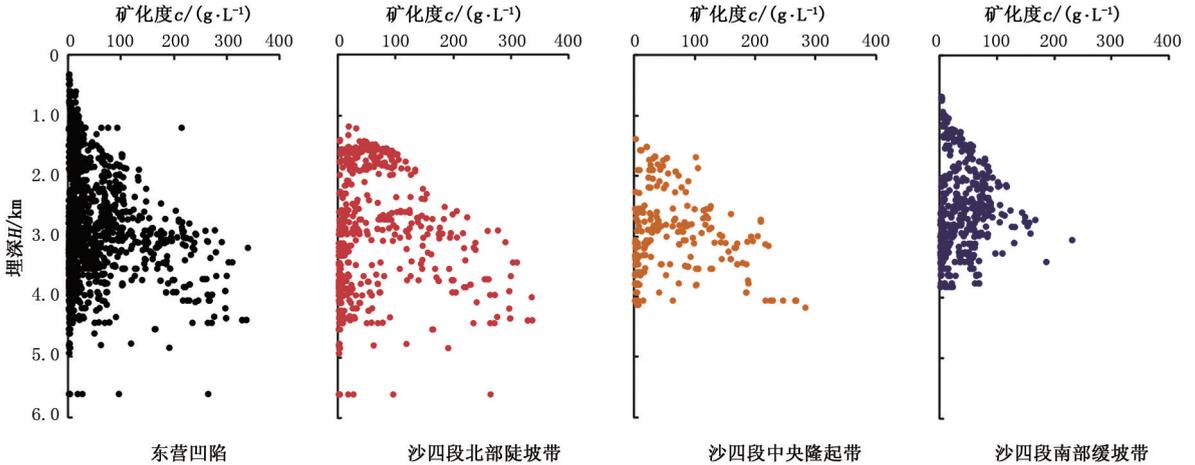


图6 地层水矿化度垂向变化

Fig. 6 Vertical variation of TDS of  $\text{Es}_4$  formation water in Dongying sag

侧向上北部陡坡带沙四段平均 TDS 值为 56.04 g/L,最高 TDS 值可达 336.53 g/L;中央隆起带平均 TDS 值最高,为 56.77 g/L,最高达 282.26 g/L;南部缓坡带平均 TDS 值为 32.84 g/L,最高可达 230.50 g/L。这表明东营凹陷沙四段地层水矿化度分布具有侧向不均一性,即从盆地中央向两侧斜坡带 TDS 值逐渐降低,且南部缓坡带 TDS 值最低。通过岩性与 TDS 值对比发现,沙四下亚段蒸发岩层的发育是造成 TDS 值侧向不均一性的主控因素<sup>[5]</sup>,盐岩层在中央隆起带以及北部陡坡带集中发育且规模较大,

因此其溶解特别是地下岩盐的溶解使中央隆起带和北部陡坡带 TDS 值偏大,而南部缓坡带则因为大气淡水渗入淡化作用整体上 TDS 值较小<sup>[16]</sup>。

### 2.5 地层水 pH 值分布特征

沙四段地层水数据表明,沙四段北部陡坡带地层水 pH 值介于 4.72 ~ 13,平均 pH 值为 6.78 (452 个数据);中央隆起带地层水 pH 值介于 5 ~ 13,平均 pH 值约为 6.75 (190 个数据);南部缓坡带地层水 pH 值介于 3.86 ~ 11.48,平均 pH 值为 6.81 (353 个数据)。从 pH 值频率分布直方图(图7)上可以看

出北部、中部和南部地层水 pH 值分布相差不大,多数样品的 pH 值均介于 5~7 呈酸性,但也有大量样

品 pH 值介于 7~9 呈碱性。

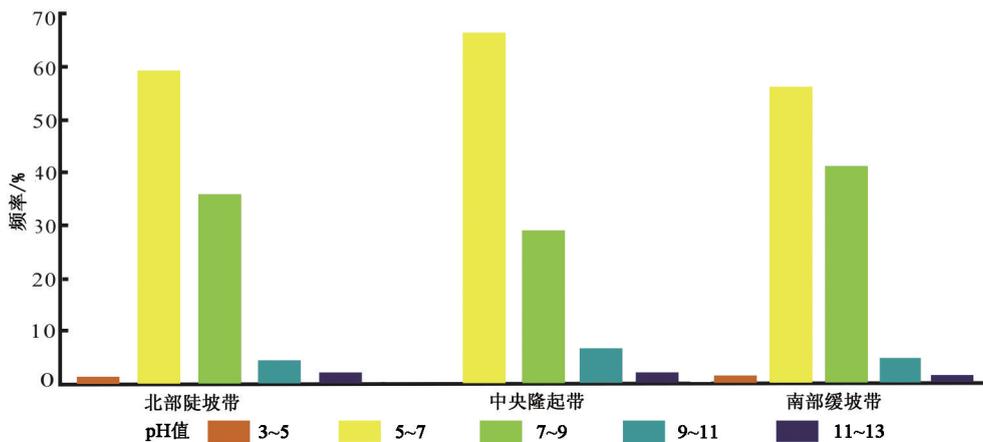


图7 东营凹陷沙四段地层水 pH 值频率分布

Fig. 7 Frequency distribution of pH value of Es<sub>4</sub> formation water in Dongying sag

从沙四段地层水矿化度和 pH 值关系分析,二者呈负相关,即酸性条件下的地层水矿化度相对较高,说明酸性介质下地层水对岩石(矿物)的溶解能力相对强一些,对储集物性的改善贡献相对较大,拟合曲线及方程如图 8 所示。

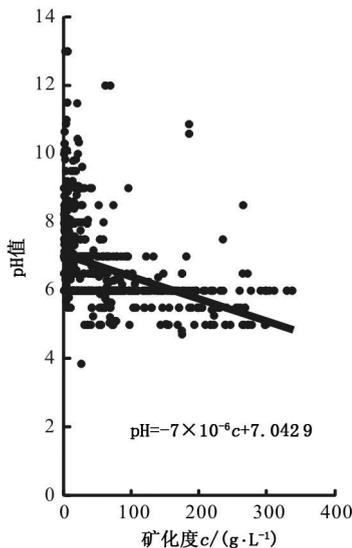


图8 东营凹陷沙四段地层水 pH 值与矿化度关系

Fig. 8 Relationship between pH value and TDS of Es<sub>4</sub> formation water in Dongying sag

### 3 地层水化学参数与储层物性的关系

#### 3.1 地层水矿化度与储层物性的关系

沙四段碎屑岩储层中矿物的溶蚀以碳酸盐矿物为主,铝硅酸盐矿物次之,石英的溶蚀现象较为少见<sup>[17]</sup>。矿物的溶解度增大势必会导致地层水矿化度的增加,因此地层水矿化度可作为判断储层主要成岩作用和孔隙类型划分的重要依据。以北部陡坡

带为例,本区被溶蚀的碳酸盐包括成岩早期形成的方解石以及成岩晚期的铁方解石、铁白云石<sup>[18]</sup>。通过对东营凹陷储层物性、碳酸盐含量和矿化度垂向对比分析(图 9)发现,三者存在如下对应关系:

(1)埋深位于 1 500~3 000 m 时,地层中的碳酸盐含量相对较低,储集物性相对较好且矿化度随着埋深的增加不断增大,说明储层中既存在溶蚀作用又存在胶结作用,孔隙类型以次生孔隙为主。1 500 m 处矿化度的突增(由 50 g/L 增加到 100 g/L)代表溶蚀作用开始成为影响储集物性的重要成岩作用方式,在位于 1 500~2 450 m 地层水矿化度增加幅度较小且储层物性变化不大,表明此范围内溶蚀作用强度略大于胶结作用强度;2 450 m 处为矿化度第二个突变带(矿化度由 150 g/L 增加到 200 g/L),当埋深位于 2 450~3 100 m 时地层水矿化度明显升高,地层中碳酸盐含量降低且储层物性逐渐变好,说明在此范围内溶蚀作用强度随着埋深的增加逐渐变大,从而能够改善地层的储集物性。

(2)埋深位于 3 100 m 以下时,地层中的碳酸盐含量随着埋深逐渐增加而储层物性逐渐降低,这说明本带成岩作用中胶结作用对储层物性的影响大于溶蚀作用对储层物性的影响,孔隙类型仍以次生孔隙为主但部分孔隙被碳酸盐胶结物所充填。地层水矿化度由于盐岩层的溶解而不断升高。沙四段位于 3 500 m 以下,地层水虽然整体仍呈弱酸性,但碱性地层水与酸性地层水的含量已相差不多,沙四段碳酸盐矿物更趋向于沉淀析出形成胶结物,溶蚀作用强度弱且远小于上覆地层,因此储集物性相对较差。

总的来说,碳酸盐含量低的地层储层物性相对较好,储层物性差则对应碳酸盐含量高的地层,因此

推测碳酸盐矿物的沉淀和溶解是影响沙四段储层孔隙度的主控因素(二者之间相关系数  $R \approx 0.81$ )。因此对于东营凹陷北部陡坡带而言在没有其他因素的干扰下,地层水矿化度可以作为判断地层储集物性

发展趋势的重要指标,即地层水矿化度升高说明溶蚀作用强度大于胶结作用,储集物性变好;而地层水矿化度降低则说明胶结作用强度大于溶蚀作用,储集物性变差。

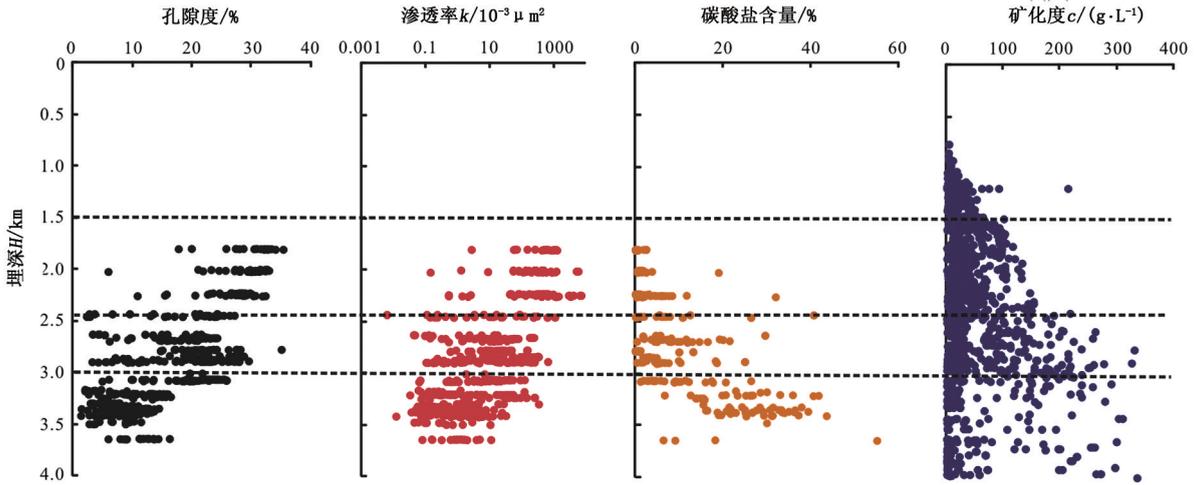


图9 东营凹陷北部陡坡带储层物性、碳酸盐含量和矿化度垂向对比

Fig. 9 Vertical comparison of physical properties of reservoirs, carbonate contents and TDS of north steep slope belt in Dongying sag

### 3.2 储层矿物溶解习性与地层水化学特征的关系

酸性成岩环境和碱性成岩环境通常出现在成岩过程的不同阶段<sup>[19]</sup>。不同的成岩环境必将导致不同的矿物溶解沉淀特征,从而对地层储集物性也会产生不同的影响。酸性地层水介质中石英处于稳定状态,碳酸盐、长石等矿物则处于不稳定状态发生溶蚀;在碱性介质下碳酸盐、长石等矿物会沉淀析出,当地层水 pH 值大于 8.5 时,石英出现溶蚀且溶解度随着 pH 值的增大快速增加。东营凹陷沙四段沉积过程中古气候环境属于干旱气候,其原始沉积环境为盐湖相沉积<sup>[20]</sup>,碱性介质有利于早期碳酸盐矿物和铝硅酸盐矿物形成,并为后期的酸性溶蚀提供物质基础。随着埋藏成岩作用的不断进行,有机质在向烃类转化的过程中会生成大量的有机酸并释放  $\text{CO}_2$ ;干酪根降解产生的气态烃和硫酸盐热化学氧化还原反应(TSR 反应)产生的  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  会使地层水逐渐由碱性过渡为酸性,形成酸性成岩环境<sup>[21-24]</sup>,并出现碳酸盐胶结物、长石以及部分岩屑的溶解,形成次生孔隙。部分地区随着介质中  $\text{H}^+$  不断被消耗,加之地层深部卤水上涌,使介质 pH 值不断升高从而导致晚期碳酸盐岩沉淀析出。由于沙四段地层水整体封闭程度好且水体还原彻底,在这种条件下,  $\text{Fe}^{2+}$  可以进入  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{MgCO}_3$  矿物晶格中形成晚期铁方解石和铁白云石。所以东营凹陷沙四段储层受酸性、碱性和酸碱交替多重成岩环境的影响。通过石英、方解石和白云石的平

均含量变化(表 2)可以看出:沙一段和沙二段主要为酸性成岩环境,石英含量大量增加同时方解石和白云石大量减少;对于沙四段而言,石英含量较沙三段明显降低,而方解石和白云石含量增加,说明本带中对矿物形成与溶解影响较大的为碱性成岩环境,沙四段虽然仍以弱酸性地层水为主,但随着埋藏深度的增加,地层水逐渐由酸性向碱性过渡,且碱性介质对储层物性的影响大于酸性介质对储层物性的影响。

东营凹陷沙四段碎屑岩储层中矿物的溶蚀以碳酸盐矿物和铝硅酸盐矿物为主,石英的溶蚀现象较为少见,长石的溶蚀以斜长石为主,钾长石和长石质岩屑次之<sup>[9,17]</sup>。

#### 3.2.1 碳酸盐矿物

碳酸盐矿物的沉淀与溶解从机制上取决于地层水中同时存在各碳酸组分( $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_2$ )之间的平衡关系,三者之间的比例只受介质 pH 值的影响,即 pH 值是通过改变地层水中  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_2$  的相对含量控制整个反应的进行,从而决定碳酸盐矿物的溶解习性。从表 1 可以看出,在沙四段地层水总矿化度整体增加的前提下,  $\text{HCO}_3^-$  含量从沙三段的 1.00 g/L 下降到 0.74 g/L,这说明此过程中溶液平均 pH 值逐渐向碱性过渡<sup>[15,25]</sup>。此时碳酸盐矿物的溶解反应方程为

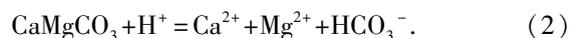
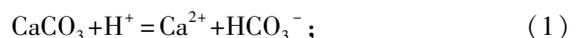


表2 东营凹陷沙河街组各矿物含量

Table 2 Minerals contents of Shahejie Formation in Dongying sag

地层	黏土矿物	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石
沙一段	1~62 10.89 (209)	1~78 36.66 (170)	1~29 10.89 (151)	1~51 16.06 (157)	1~95 25.47 (109)	1~95 17.66 (65)
沙二段	2~53 10.26 (151)	2~77 56.77 (145)	4~20 10.15 (142)	4~25 15.86 (144)	1~49 9.27 (54)	1~93 8.29 (58)
沙三段	1~86 12.15 (982)	1~99 54.29 (878)	1~31 9.04 (856)	2~40 16.9 (863)	1~72 8.83 (381)	1~85 10.29 (494)
沙四段	1~59 10.49 (733)	1~83 39.04 (698)	1~92 7.83 (589)	1~52 16.53 (639)	1~98 13.90 (543)	1~97 18.78 (611)

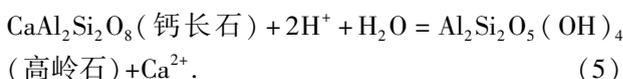
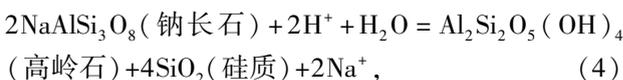
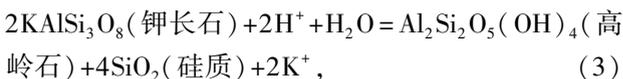
沙四段既发育有碳酸盐胶结也有碳酸盐的溶解,地层水中 pH 值增大, H<sup>+</sup> 含量的降低会促使方程(1)和(2)向左进行即向生成碳酸盐矿物的方向进行,因此碳酸盐胶结作用强于碳酸盐溶解作用。研究表明晚期形成的碳酸盐主要为铁方解石和铁白云石<sup>[6]</sup>,含量变化较大且随着埋深的增加而增多,导致储集空间被重新充填。垂向上北部陡坡带沙四段地层水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量较沙三段基本没有变化,且高于中央隆起带和南部缓坡带(表3),因此北部陡坡带沙四段地层碳酸盐胶结作用程度随深度变化相对较弱,储集物性相对较好。

表3 东营凹陷不同区块地层水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量垂向变化Table 3 Vertical variation of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> contents of different block in Dongying sag

地层	北部陡坡带	中央隆起带	南部缓坡带
沙二段	0.22~2.93 1.29 (25)	0.13~2.09 0.71 (469)	0.15~4.42 0.78 (36)
沙三段	0.05~7.33 0.98 (174)	0.00~5.85 0.73 (147)	0.02~5.00 1.35 (126)
沙四段	0.01~21.65 0.97 (449)	0.02~9.65 0.54 (181)	0.02~4.76 0.55 (348)

### 3.2.2 铝硅酸盐矿物和黏土矿物

铝硅酸盐矿物的溶解实质上是一个铝活动性的问题,无论是钾长石亚族还是斜长石亚族,都能在酸性(CO<sub>2</sub>和有机酸)介质条件下发生溶解,主要产物是高岭石和 SiO<sub>2</sub><sup>[26]</sup>。钾长石、钠长石和钙长石的溶解方程式分别如下:



在长石高岭石化过程中,阳离子和二氧化硅被移去,体积发生缩小<sup>[14]</sup>,储集物性得到改善。对于沙四段而言,埋深 1 300~1 700 m 高岭石含量迅速

增高,说明长石在酸性介质中开始大量溶解;埋深 1 700~3 000 m 是自生高岭石的主要分布区,大约在黏土矿物中占 60%~80%,最高约为 90%,表明本带有大量的长石与酸性介质作用生成高岭石使储集物性变好,这与前人研究结果<sup>[6,18]</sup>基本一致;埋深 3 000 m 以下高岭石含量又开始逐渐降低,说明高岭石逐渐向伊利石转化,如图 10 所示。

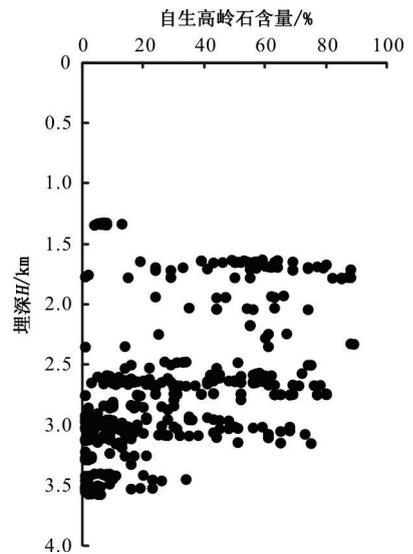


图 10 沙四段自生高岭石垂向变化

Fig. 10 Vertical variation of kaolinite contents of Es<sub>4</sub>

不同黏土矿物的结晶及稳定存在要求一定的介质条件,例如酸性地层水是高岭石稳定存在的必要条件,而伊利石和绿泥石存在则分别需要富含 K<sup>+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>的碱性介质,因此黏土矿物的相对含量变化可以用于指示水介质的酸碱程度变化。另外高岭石含量高的砂岩储层其储集物性要明显好于伊利石、蒙脱石和绿泥石含量高的储层<sup>[27]</sup>。沙四段高岭石平均占总黏土矿物的 25.26%,较沙三段(43.29%)和沙二段(50.34%)有较大幅度的下降,而伊利石平均百分比则有大幅度的增长(表4),因此随着埋深增加大量高岭石转化为伊利石,地层水逐渐由酸性向碱性过渡,储集物性降低。

长石的溶解和各类黏土矿物之间的相互转化存在着一系列的化学平衡且二者之间相互制衡。例如钾长石的溶解不仅受到介质 pH 值等条件的控制,还受高岭石伊利石化的动力学驱动,该转化通过消

耗地层水中的  $K^+$  而使钾长石溶解正向进行:  
 $3Al_2Si_2O_5(OH)_4$  (高岭石) +  $2K^+ = 2KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$  (伊利石) +  $2H^+ + 3H_2O$ . (6)

表 4 东营凹陷沙河街组黏土矿物含量

Table 4 Clay minerals contents of Shahejie Formation in Dongying sag

	伊/蒙间层		高岭石		伊利石		绿泥石	
沙一段	2~98 72.59	(226)	1~87 10.80	(215)	1~64 14.45	(219)	1~35 4.89	(166)
沙二段	1~99 32.35	(156)	1~96 50.66	(155)	1~43 8.01	(145)	1~51 10.53	(146)
沙三段	1~95 31.38	(1 037)	1~94 43.29	(1 025)	1~93 15.31	(1 036)	1~63 10.98	(1 012)
沙四段	1~100 31.17	(717)	1~90 25.26	(670)	1~100 41.25	(759)	1~73 7.54	(641)

以北部陡坡带为例,沙二段相比于沙一段,高岭石含量突增而钾长石含量却未发生明显变化,说明此时导致高岭石含量增加的原因为斜长石的溶解;随着埋藏深度增加(温度和压力增加)以及沙四段地层水碱性作用的增强,高岭石开始大量转化为伊利石,整个过程不断消耗地层水中的  $K^+$ ,从而诱发钾长石的溶解(表 5)。所以成岩作用的早期阶段被溶长石主要是斜长石,而钾长石则保存到相对晚期的成岩阶段,这与前人通过对长石溶解有关热力学计算所得出的结论一致<sup>[28]</sup>。对于北部陡坡带沙四段而言,高岭石和伊利石普遍发育,两者呈现出明显的此消彼长现象,因此随着埋深的增加、高岭石含量的降低和伊利石含量的升高,储层孔隙度逐渐降低(图 11)。

表 5 东营凹陷北部陡坡带沙河街组钾长石、高岭石、伊利石含量变化

Table 5 Contents variation of orthoclase, kaolinite and illite in Shahejie Formation of north steep slope belt in Dongying sag

地层	钾长石		高岭石		伊利石	
沙一段	1~29 10.89	(151)	1~86 8.48	(121)	1~64 14.12	(121)
沙二段	4~20 11.44	(77)	2~96 55.19	(79)	1~43 8.05	(79)
沙三段	1~31 12.17	(367)	1~94 41.32	(394)	1~93 13.76	(394)
沙四段	1~92 8.32	(458)	1~89 28.29	(409)	1~96 36.81	(409)

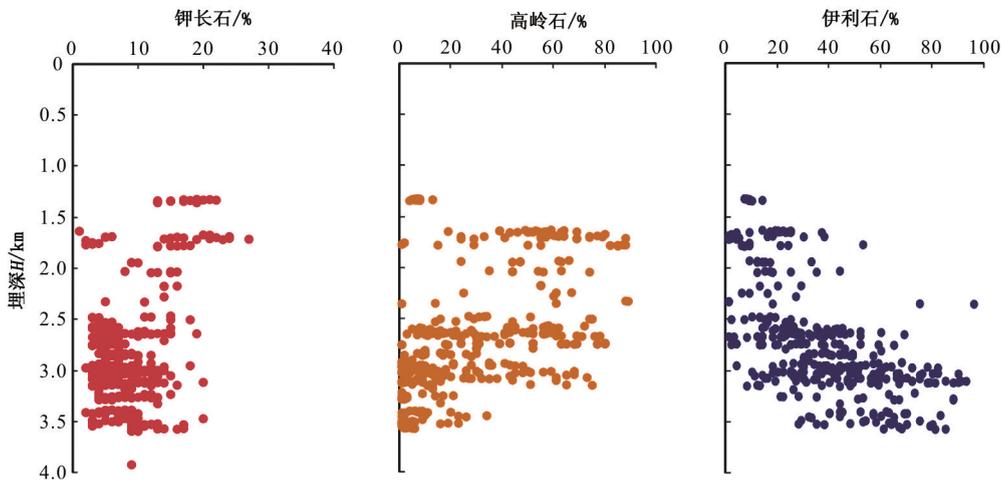


图 11 东营凹陷北部陡坡带沙四段钾长石、高岭石和伊利石垂向变化

Fig. 11 Vertical variation of orthoclase, kaolinite and illite of  $Es_4$  of north steep slope belt in Dongying sag

无论是地层中石英和碳酸盐矿物含量的变化、地层水中  $HCO_3^-$  含量的变化,还是黏土矿物之间的相互转化都显示随着埋藏深度的增加,东营凹陷深

部地层水逐渐由酸性向碱性过渡,沙四段虽然仍以酸性地层水为主,但碱性地层水对储层物性的影响已经大于酸性地层水的影响,导致地层储集物性较

上覆地层有所降低,且埋深越大,碱性地层水所占比重越高,地层的储集物性相对越差。

## 4 结 论

(1) 东营凹陷沙四段地层水阳离子中  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  含量最高,  $\text{Ca}^{2+}$  次之,  $\text{Mg}^{2+}$  含量最小; 阴离子中  $\text{Cl}^-$  含量最高,  $\text{HCO}_3^-$  次之,  $\text{SO}_4^{2-}$  最小; 水型以氯化钙型为主, 整体封闭程度好, 处于还原的水体环境, 横向上中央隆起带封闭条件最好, 南部缓坡带次之, 北部陡坡带相对最低; 总体矿化度高且具有垂向递增性和侧向不均一性; pH 值均介于 5~7, 以酸性地层水为主, 但也有不少样品 pH 值介于 7~9 呈碱性。

(2) 碳酸盐矿物的沉淀和溶解是影响东营凹陷沙四段储层物性的主控因素。对于北部陡坡带而言在没有其他因素的干扰下, 地层水矿化度可以作为判断地层储集物性发展趋势的重要指标, 即地层水矿化度升高指示溶蚀作用强度大于胶结作用, 储集物性变好; 矿化度降低则说明胶结作用强度大于溶蚀作用, 储层物性变差。沙四段成岩作用以胶结作用为主, 碳酸盐矿物更趋向于沉淀析出形成胶结物, 而溶蚀作用强度弱且远小于上覆地层, 因此储集物性相对较差。

(3) 对于东营凹陷沙四段而言, 酸性地层水对岩石(矿物)的溶解能力相对较强, 对储集物性的改善贡献相对较大。根据地层中石英和碳酸盐矿物含量的变化、地层水中  $\text{HCO}_3^-$  含量的变化和黏土矿物之间的相互转化, 并结合地层水 pH 值分布可以得知沙四段地层水处于酸性向碱性过渡的时期, 且碱性地层水对储集物性的影响大于酸性地层水的影响, 从而造成沙四段地层储集物性较上覆地层变差, 且横向上北部斜坡带储集物性相对较好。

## 参考文献:

- [1] KHARAKA Y K, COLE D R, THORSEN J J, et al. Gas-water-rock interactions in sedimentary basins:  $\text{CO}_2$  sequestration in the Frio Formation, Texas, USA [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 89: 183-186.
- [2] ELHAM A M, MOHAMMAD H A. Application of geochemical data as evidence of water-rock interaction in the Sarvak Formation, Izeh Zone, Zagros, Iran [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013(7): 31-35.
- [3] BIEKLE P, JENDEN P D, AL-DUBAIS I J M. Origin of formation water from the Unayzah and Khuff petroleum reservoirs, Saudi Arabia [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2013(7): 77-80.
- [4] 张枝焕, 胡文瑄, 曾溅辉, 等. 东营凹陷下第三系流体-岩石相互作用研究 [J]. *沉积学报*, 2000, 18(4): 560-565.
- [5] ZHANG Zhihuan, HU Wenxuan, ZENG Jianhui, et al. Study of rock-fluid interactions in Eocene Formation in Dongying Depression, Bohai Gulf Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(4): 560-565.
- [5] 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.
- [6] SUN Xiangyang, XIE Xinong. Relationship between the chemical characteristics of formation water and hydrocarbon accumulation in the Dongying sag [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2001, 23(3): 291-296.
- [6] 曾溅辉. 东营凹陷第三系水-盐作用对储层孔隙发育的影响 [J]. *石油学报*, 2001, 22(4): 39-43.
- [7] ZENG Jianhui. Effect of fluid-water interactions on porosity of reservoir rocks in tertiary system, Dongying sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(4): 39-43.
- [7] 钱诗友, 曾溅辉. 东营凹陷沙河街组地层水化学特征及其石油地质意义 [J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(4): 603-609.
- [8] QIAN Shiyu, ZENG Jianhui. Chemical characteristics of Shahejie Formation formation water and their petroleum geological significance, Dongying sag [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(4): 603-609.
- [8] 李晓燕. 东营凹陷地层水成因类型及其与油气运移方向的关系 [J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(3): 18-21.
- [9] LI Xiaoyan. Genesis of formation water and oil migration in Dongying Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(3): 18-21.
- [9] 王艳忠. 东营凹陷古近系深部有效储层评价研究 [D]. 青岛: 中国石油大学地球科学与技术学院, 2007.
- [10] WANG Yanzhong. Evaluation of deep effective reservoirs of Palaeogene in Dongying Depression [D]. Qingdao: School of Geosciences in China University of Petroleum, 2007.
- [10] 林腊梅, 王伟峰. 油气田水文地质学 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2010: 64-65.
- [11] 刘济民. 油田水文地质勘探中水化学及其特性指标的综合应用 [J]. *石油勘探与开发*, 1982, 6: 49-55.
- [12] LIU Jimin. The characteristics of underground water chemistry and its application in oilfield hydrology exploration [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1982, 6: 49-55.
- [12] 薛会, 张金川, 王毅, 等. 塔里木盆地塔中低凸起地层水与油气关系 [J]. *石油实验地质*, 2007, 29(6): 593-597.
- [13] XUE Hui, ZHANG Jinchuan, WANG Yi, et al. Relationship of formation fluid and hydrocarbon in Tazhong

- low uplift of the Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2007, 29(6):593-597.
- [13] LINNEVERS C, SMEEKENS S P, BROMME D, et al. Quantum chemical studies of the effects on silicate mineral dissolution rates by adsorption of alkali metals [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61(13):2577-2587.
- [14] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 2003: 162-163.
- [15] 刘再华, DREYBRODT W, 韩军, 等.  $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  岩溶系统的平衡化学及其分析[J]. *中国岩溶*, 2005, 24(1):1-14.  
LIU Zaihua, DREYBRODT W, HAN Jun, et al. Equilibrium chemistry of the  $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  system and discussions [J]. *Carsologica Sinica*, 2005, 24(1):1-14.
- [16] 楼章华, 朱蓉, 金爱民, 等. 东营凹陷地下水动力场的形成与演化[J]. *地质科学*, 2003, 38(1):85-96.  
LOU Zhanghua, ZHU Rong, JIN Aimin, et al. Formation and evolution of hydrodynamic field in the Dongying Depression [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(1):85-96.
- [17] 袁静. 东营凹陷下第三系深层成岩作用及次生孔隙发育特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2003, 31(3):20-22.  
YUAN Jing. Diagenesis and secondary pore development in Paleogene deep formation in Dongying sag [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2003, 31(3):20-22.
- [18] 张琴, 钟大康, 朱筱敏, 等. 东营凹陷下第三系碎屑岩储层孔隙演化与次生孔隙成因[J]. *石油与天然气地质*, 2003, 24(3):281-284.  
ZHANG Qin, ZHONG Dakang, ZHU Xiaomin, et al. Pore evolution and genesis of secondary pores in Paleogene clastic reservoirs in Dongying sag [J]. *Oil and Gas Geology*, 2003, 24(3):281-284.
- [19] 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, 14(2):10-15.  
QIU Longwei, ZHAO Wei, LIU Kuiyuan. Alkali diagenesis and its application in Jiyang Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(2):10-15.
- [20] 宋明水. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 2005, 25(1):67-73.  
SONG Mingshui. Sedimentary environment geochemistry in the Shasi Section of Southern Ramp, Dongying Depression [J]. *J Mineral Petrol*, 2005, 25(1):67-73.
- [21] SCHMIDT V, MCDONALD D A. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis [J]. *SEPM Special Publication* 26, 1979:175-208.
- [22] SURDAM R C, CROSSEY L J, HAGEN E S, et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. *AAPG*, 1989, 73(1):1-23.
- [23] 袁静, 赵澄林. 水介质的化学性质和流动方式对深部碎屑岩储层成岩作用的影响[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 2000, 24(1):60-63.  
YUAN Jing, ZHAO Chenglin. Influence of chemistry of fluid and circulated convection current on diagenesis of petroclastic rock in deep formation [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2000, 24(1):60-63.
- [24] 丁康乐, 李术元, 岳长涛, 等. 硫酸盐热化学还原反应的研究进展[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 2005, 25(1):150-155.  
DING Kangle, LI Shuyuan, YUE Changtao, et al. Review of thermochemical sulfate reduction [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2005, 25(1):150-155.
- [25] 于炳松, 赖兴运. 成岩作用中的地下水碳酸体系与方解石的溶解度[J]. *沉积学报*, 2006, 24(5):627-635.  
YU Bingsong, LAI Xingyun. Carbonic acid system of groundwater and the solubility of Calcite during diagenesis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(5):627-635.
- [26] 张萌. 鄂尔多斯盆地上古生界碎屑岩次生孔隙形成机制的热力学计算和溶解实验模拟研究[D]. 成都:成都理工大学沉积地质研究院, 2007.  
ZHANG Meng. For the characteristic of the dissolution of primary minerals related to clastic diagenesis thermodynamics model and dissolution experiment modeling effort for secondary porosity forming mechanism of Upper-Palaeozoic, Ordos Basin [D]. Chengdu: Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, 2007.
- [27] 伏万军. 黏土矿物成因及对砂岩储集性能的影响[J]. *古地理学报*, 2000, 2(3):59-68.  
FU Wanjun. Influence of clay minerals on sandstone reservoir properties [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2000, 2(3):59-68.
- [28] 黄可可, 黄思静, 佟宏鹏, 等. 长石溶解过程的热力学计算及其在碎屑岩储层研究中的意义[J]. *地质通报*, 2009, 28(4):474-482.  
HUANG Keke, HUANG Sijing, TONG Hongpeng, et al. Thermodynamic calculation of feldspar dissolution and its significance on research of clastic reservoir [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(4):474-482.

(编辑 刘为清)