

渤海湾盆地东濮凹陷文留地区现今地层水化学与油气运聚

王君¹,楼章华¹,朱蓉¹,何钰¹,朱振宏¹,王同军²,钱月红²

(1. 浙江大学海洋学院,浙江杭州 310058; 2. 中国石化中原油田分公司,河南濮阳 457000)

摘要:东濮凹陷文留地区断裂及盐岩发育,油气运聚过程及油、气、水分布关系复杂。在分析文留地区古近系现今地层水化学纵向及平面分布特征的基础上,利用地层水氘、氧同位素测试资料确定地层水来源。结合文留地区构造以及水动力特征,深入研究文留地区古近系地下水化学特征与油气富集、分布之间的关系。同时,通过解剖文 218—文 245 井典型剖面,进一步分析水化学特征与油气运移、聚集、成藏之间的耦合关系。地层水氢、氧同位素分析表明,文留地区地层水以原生沉积水为主,局部曾经受到古大气水下渗影响,反映其地层封闭性较好,有利于油气成藏、保存。纵向上,文留地区水化学可以分为(古)大气水下渗淡化带、越流泄水浓缩带、泥岩压实排水淡化带、断层越流淡化带和末端越流浓缩带等 5 个水化学垂向分带;平面上,文东滚动背斜带和文东地堑带为两侧凹陷离心流的共同指向区,地层水在越流过程中不断浓缩,矿化度、氯离子浓度增加,矿化度、氯离子浓度高值区与油气富集区有一致性。文留地区断裂连通性好,油气以垂向运移为主,侧向运移为辅。

关键词:地层水化学;油气运移;油气聚集;文留地区;东濮凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Hydrochemistry of Paleogene formation water and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in Wenliu region in Dongpu sag, Bohai Bay Basin

Wang Jun¹, Lou Zhanghua¹, Zhu Rong¹, He Yu¹, Zhu Zhenhong¹, Wang Tongjun², Qian Yuehong²

(1. College of Ocean, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

2. Zhongyuan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457000, China)

Abstract: Faults and salts are widely developed in Wenliu region in Dongpu sag, Bohai Bay Basin. And hydrocarbon migration processes and the contacts between water-, oil and gas are complex. Based on analysis of the current vertical and horizontal hydrochemical distribution of the Paleogene formation water, this paper determined the origin of formation water by using isotopes of hydrogen and oxygen. Combined with the features of regional tectonics and hydrodynamics, we also studied the relationship between the hydrochemical property and the accumulation and distribution of hydrocarbon in Wenliu region. Besides, by means of dissecting the typical profiles of Well Wen 218 to Well Wen 245, the coupling relation between hydrochemical characteristic and hydrocarbon migration and accumulation was further analyzed. The analysis of isotopes of hydrogen and oxygen show that the formation water of this region is primarily composed of the connate water, with paleo-meteoric water permeating only in some local areas. This indicates that the sealing conditions area good in the Wenliu region, favorable for hydrocarbon accumulation and preservation. Moreover, the hydrochemistry of this region can be divided into five zones in vertical, namely diluting zones due to permeating of (paleo-) meteoric water, released water of mudstone compaction and fault communication, concentration zones due to cross-formational flow and end over flow. In the plane, the Wendong rolling anticline belt and graben belt are the common areas for the gathering of released water from mudstone compaction and meteoric water. The concentrations of salinity and chloridion gradually increase as a result of the condensation process of cross-formational flow of formation water. The areas with high concentration of salinity and chloridion correlate well to hydrocarbon enrichment areas. In addition, the Wenliu region displays good connectivity of faults, resulting in the vertical hydrocarbon migration being dominant while the lateral migration being subsidiary.

Key words: hydrochemistry of formation water, hydrocarbon migration, hydrocarbon accumulation, Wenliu region, Dongpu sag, Bohai Bay Basin

收稿日期:2014-03-03;修订日期:2014-06-25。

第一作者简介:王君(1988—),女,博士研究生,地质流体与油气运聚。E-mail: wangjun880401@gmail.com。

基金项目:油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放研究基金项目(PLC201105);国家自然科学基金项目(40839902);国家科技重大专项(2008ZX05005-003-008HZ);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2005CB422107)。

油田水是指在油气储层中与油气伴生的地下水,是烃类运移、聚集、形成油气藏的动力和载体,它和油气之间存在着经常性的物质成分和能量交换,其化学成分往往反映出油气藏与原油、天然气的某些特征^[1-3],蕴含了许多与油气藏形成和保存相关的信息^[4-6]。东濮凹陷文留地区地质条件复杂,地层水化学性质不仅在垂向差异分布,在不同构造单元也有所不同,油水关系十分复杂。文中根据文留地区地层水化学性质垂向和平面分布特征,结合研究区断层及盐岩发育情况,深入分析油田地层水与油气运聚及分布的关系,总结不同构造单元油气富集的主控因素,为研究区的油气勘探决策提供技术支撑。

1 地质背景

文留地区位于东濮凹陷中央隆起带中部,北面与卫城、濮城油田相接,南面与桥口油田相接,东面是烃源岩丰富的前梨园洼陷,西面是柳屯-海通集生油洼陷,南北长约36 km,东西宽约18 km,面积约650 km²,由文中、文西、文东等次级油气田组成,是东濮凹陷油气最为富集地区之一。新生代以来,东濮凹陷中央隆

起带基底地层的逐渐抬高和东西两洼陷的不断下沉,使得文留地区在东营组沉积末期就形成了东西分带、南北分块的基本构造格局。区内发育文西、文东、徐楼三大近北北东向断裂系,将文留地区由东向西划分为文东滚动背斜-反向屋脊带、文东地堑带、文中地垒带和文西断阶带等4个次级构造带(图1)。

文留地区新生代构造演化可以细分为初始凹陷阶段、强烈断陷阶段、萎缩阶段、稳定下沉阶段、收缩阶段和拗陷阶段。

文留地区自下而上发育4套盐岩,分别为沙河街组下亚段(沙三下亚段)内文23盐、沙三中亚段下部的盐岩、沙三中亚段上部的文9盐、沙一段内盐岩。这4套盐岩在平面上具有不同的分布范围,其中沙三中亚段下部盐岩仅在文北发育,而其他3套盐岩则在整个文留地区分布广泛^[7]。

2 文留地区水化学特征

地下水化学特征与油气运聚成藏、保存存在密切的关系^[8],影响含油气盆地油田水化学场的因素较多,它们对油田水化学性质的影响,在剖面上具有明显的

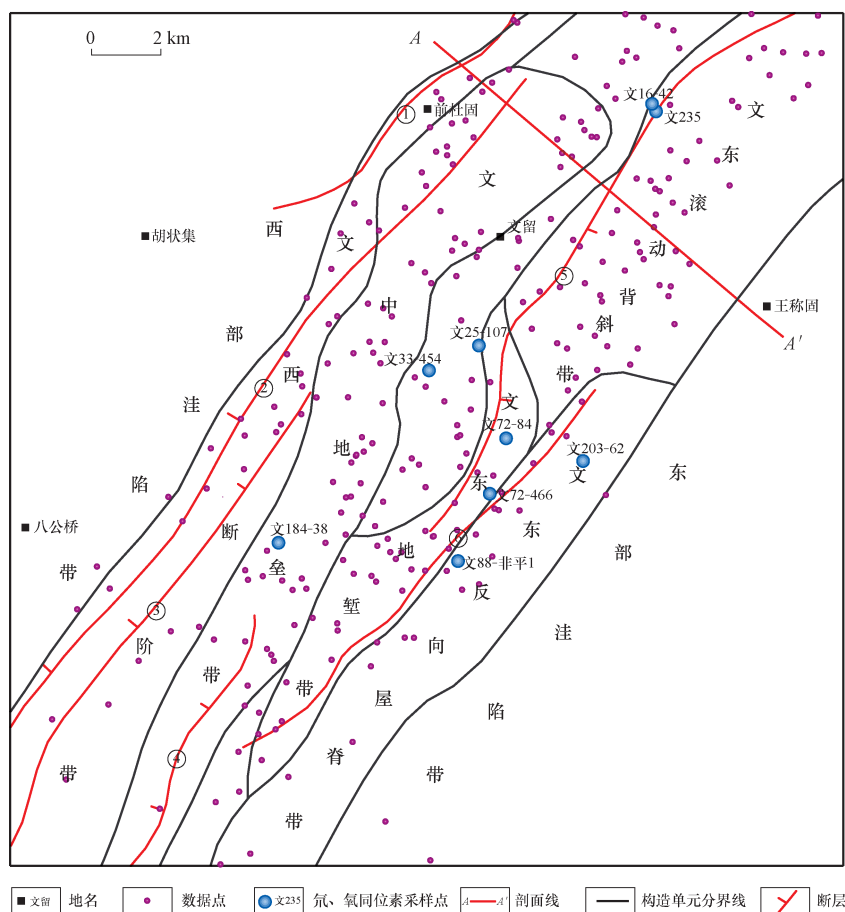


图1 文留地区构造划分

Fig. 1 Structure division of Wenliu region

①文西1号断层;②文西2号断层;③文西3号断层;④黄河断层;⑤文东断层;⑥徐楼断层

阶段性;在平面上具有明显的选择性。前者导致油田水化学的垂直分带性;后者导致油田水化学的平面分区性^[9]。

2.1 垂向水化学特征

Collins(1984)曾指出随着埋深的增加地层水矿化度并非简单的增加或者减少,楼章华等认为由于影响地层水化学性质的主要因素及其影响能力在剖面上具有明显的阶段性,导致地层水化学特征从浅到深,通常可以划分为大气水下渗淡化带、近地表蒸发浓缩带、越流过程中的压滤浓缩带、泥岩压实排水淡化带(包括粘土矿物脱水淡化作用)和深部渗滤浓缩带5种典型的水化学剖面单元类型^[10-12]。

本文以沙河街组为研究对象,分析地层水的特征。研究区沙河街组埋深在1.8~4.4 km,由浅到深依次分为Es¹, Es², Es³和Es⁴4个层段,其中Es³又可细分为上、中、下3个亚段。垂向上,文留地区矿化度高值主要集中在沙三段,与盐岩在深度上的分布有一致性,说明盐岩的存在对地层水化学有一定的影响。

通常情况下,根据地层水化学性质,从浅到深可以将地层水分为(古)大气水下渗淡化带(A)、越流泄水浓缩带(B)、和泥岩排水淡化带(C)3个水化学带。地层深部粘土矿物脱出水基本为淡水;泥岩压实排出的水,很少受蒸发作用的影响,几乎保持了原始湖盆水系的水化学性质,矿化度、氯离子浓度低,碳酸氢根离子浓度高,因此在深部形成地层水淡化带,该带水动力处于离心流范围,油气伴随离心流向外运移;地层水在向上的越流过程中不断压滤浓缩,矿化度、氯离子浓度逐渐增加,碳酸氢根离子浓度降低,形成越流泄水浓缩带,在该带油气富集程度高,可形成较大规模油气藏;浅层由于地层抬升剥蚀或断层开启,受(古)大气水下渗淋滤作用影响相对较大,地层水矿化度、氯离子浓度低,碳酸氢根离子浓度高,形成大气水下渗淡化带,该带油气保存条件通常较差,不利于油气聚集。由于断层沟通作用,越流泄水浓缩带的高矿化度地层水沿着断层直接上涌,在浅部地层中出现局部矿化度高值区(>250 g/L),划

分为末端越流浓缩带(E);此外,由于深部泥岩压实排水淡化带中的低矿化度地层水沿着断层直接上涌,在越流浓缩带出现了部分低矿化度、低氯离子浓度值,划分为断层越流淡化带(D)(表1,图2)。

2.2 平面分布特征

文留地区断裂发育,断块破碎,地层垂向连通性较好。平面上,沙河街组水化学参数具有继承性,各层段地层水矿化度高值区在平面上分布范围相吻合。地层水高矿化度、高氯离子浓度集中在文东滚动背斜带的和文东地堑带(矿化度>200 g/L,氯离子浓度>130 g/L),文中地垒带与文西断阶带地层水矿化度、氯离子浓度相对较低,文东反向屋脊带地层水矿化度、氯离子浓度为文留地区最低值。

文东滚动背斜带和文东地堑带,位于前梨园及海通集两个生烃洼陷之间的构造高部位,是两侧离心流的叠合越流泄水区。该区域断裂发育,流体具有良好的输导条件,凹陷中心泥岩压实排出水在流动过程中不断浓缩,尤其东部前梨园洼陷离心流有多个流体充注点。文留地区沙三段发育了两套巨厚的盐岩,上盐为文9盐,下盐为文23盐,两套盐层都是自北向南逐渐加深,盐岩的溶滤作用导致地层水矿化度急剧增加^[13-14]。该区块紧邻生烃中心,油源充足,供油范围广,加之构造形态完整,构造活动与油气生成运移期配合好,圈闭条件好,断块圈闭多,油气输导条件优越,油气伴随离心流沿输导体系向该区块运移,并聚集成藏,地层水矿化度高值区与油气富集区有很好的一致性。文留沙三段文东滚动背斜带和文东地堑带也是异常高压分布区(压力系数>1.4),这种现象表明沙三段异常高的地层水矿化度形成于相对封闭的系统之中,文东地区地层水处于相对封闭的滞留状态^[15-16]。在渗滤浓缩带,氯离子和钠离子浓度均增大,但氯离子既不能形成溶解度低的盐类,也不易被吸附在粘土或其他矿物的表面;而在矿化度高时钠离子会发生交替吸附,存在一定量的消耗,钠离子浓度相对于氯离子浓度呈降低趋势,因此矿化度高值区往往钠氯系数(r_{Na^+}/r_{Cl^-})较小。钠氯系

表1 文留地区地层水化学特征统计

Table 1 Hydrochemical feature statistics of formation water in Wenliu region

层位	矿化度/(g·L ⁻¹)				氯离子含量/(g·L ⁻¹)				碳酸氢根含量/(g·L ⁻¹)			
	样品数/个	最大值	最小值	平均值	样品数/个	最大值	最小值	平均值	样品数/个	最大值	最小值	平均值
Es ¹	21	325.29	49.50	209.33	22	197.91	16.65	120.59	13	120.82	21.31	105.43
Es ²	209	478.30	18.74	227.89	218	300.34	10.39	130.44	171	113.05	5.07	76.13
Es ³ (上)	108	350.05	21.17	226.00	121	222.60	10.80	126.22	101	121.70	3.10	71.13
Es ³ (中)	193	431.31	15.08	253.43	199	284.02	9.29	150.51	168	168.00	3.10	74.80
Es ³ (下)	42	352.50	115.15	255.25	42	235.08	13.40	150.31	35	136.00	20.40	75.27
Es ⁴	60	375.14	143.71	256.16	64	235.08	15.26	148.32	46	110.14	35.22	78.71

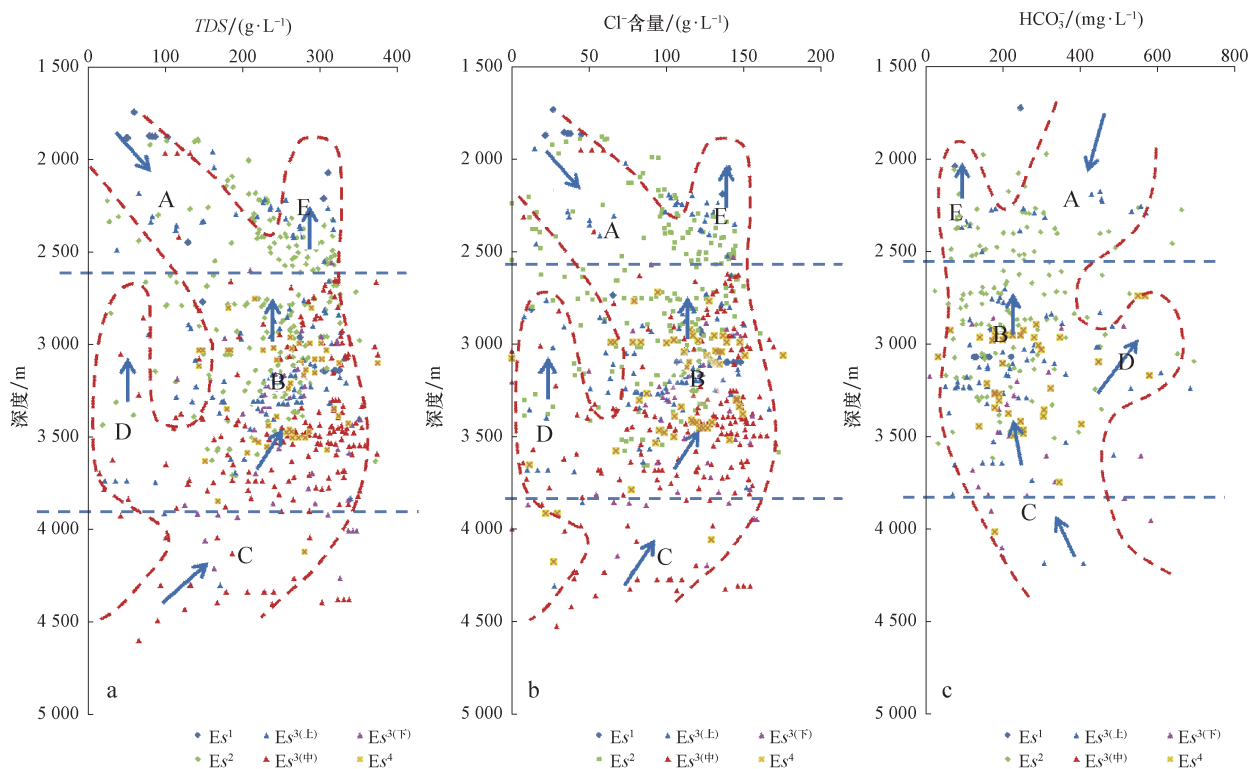


图2 文留地区水化学垂向分布特征

Fig. 2 Vertical distribution of formation water chemical properties in Wenliu region

a. 矿化度(TDS); b. 氯离子(Cl^-)含量; c. 碳酸氢根(HCO_3^-)含量

数是地层水变质程度和活动性的重要指标,系数越小反映地层水的封闭性越好^[17],文东滚动背斜带和文东地堑带钠氯系数普遍较小(大部分 <0.85),反映地层整体保存条件相对较好(图3)。

文东反向屋脊带处于文留构造的东南部,平面构造呈半背斜构造形态。由于邻近深凹,凹陷内湖相泥岩发育,砂泥比低,泥质沉积物在上覆地层压力作用下阶段性排出大量孔隙水、吸附水、层间水和结构水,地层水明显受泥岩压实排水(包括粘土矿物脱水)淡化作用的影响,矿化度值低($<140\text{ g/L}$);钠氯系数大于文东滚动背斜带和文东地堑带(图3)。虽然紧邻前梨园生烃洼陷,但由于埋深大,储层物性相对较差,油气富集程度相对较低。

文中地垒带与文西断阶带由于断裂发育,断块破碎,地层封闭性差,地层水压滤浓缩程度低,同时受到海通集洼陷泥岩压实排水淡化及粘土矿物脱水作用的影响,矿化度普遍较小($140\sim 200\text{ g/L}$),较文东地区低。文中地垒带与文西断阶带圈闭面积、幅度相对较小,临近的海通集洼陷生烃强度较前梨园洼陷弱,加之文西断层长期持续活动,对油气保存有一定的破坏作用,油气富集程度较低。这两个构造带钠氯系数较大,地层封闭条件差(图3)。

研究区北部局部地层水矿化度较低($<140\text{ g/L}$),钠氯系数较大,原油密度较大(均超过 0.85 g/L),该

区域断裂较为发育,推测可能受大气水下渗淋滤淡化作用影响,油气保存条件相对较差,油气富集程度低。

2.3 地层水中氢、氧同位素特征与流体

地下水按其成因和生成环境可区分为大气成因溶滤水、海相或陆相成因沉积水、变质成因再生水和岩浆成因初生水等4种类型^[18]。这4种成因类型地下水由于其来源和生成环境不同,氢、氧同位素组成存在较大差异。因此,可根据不同成因类型地下水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围大致判定地下水起源和成因^[19-21]。

分析所测数据,文留地区氢同位素值分布于 $-67\text{‰}\sim -50\text{‰}$,平均值为 -56.6‰ ;氧同位素值分布于 $-7.1\text{‰}\sim 0.71\text{‰}$,平均值为 -3.35‰ (图1,氢、氧同位素采样点)。根据氢、氧同位素测试数据点与大气降水曲线的分布关系可知(图4),文留地区地层水氢、氧同位素以右偏大气降水曲线为特征,且偏离距离较远,表明文留地区地层水以原生沉积水为主,除局部断裂发育带曾经受到古大气水下渗影响,如文235区块,整体上受大气水影响作用相对较弱,地层封闭条件相对较好,有利于油气成藏、保存。文东地堑带和文东滚动背斜带地层水氢、氧同位素值较高(分别为 -57‰ 和 -2‰),说明封闭条件较好。文东反向屋脊带氢、氧同位素值最低(分别为 -64‰ 和 -6.5‰),反映此区地层相对开启,保存条件较差。

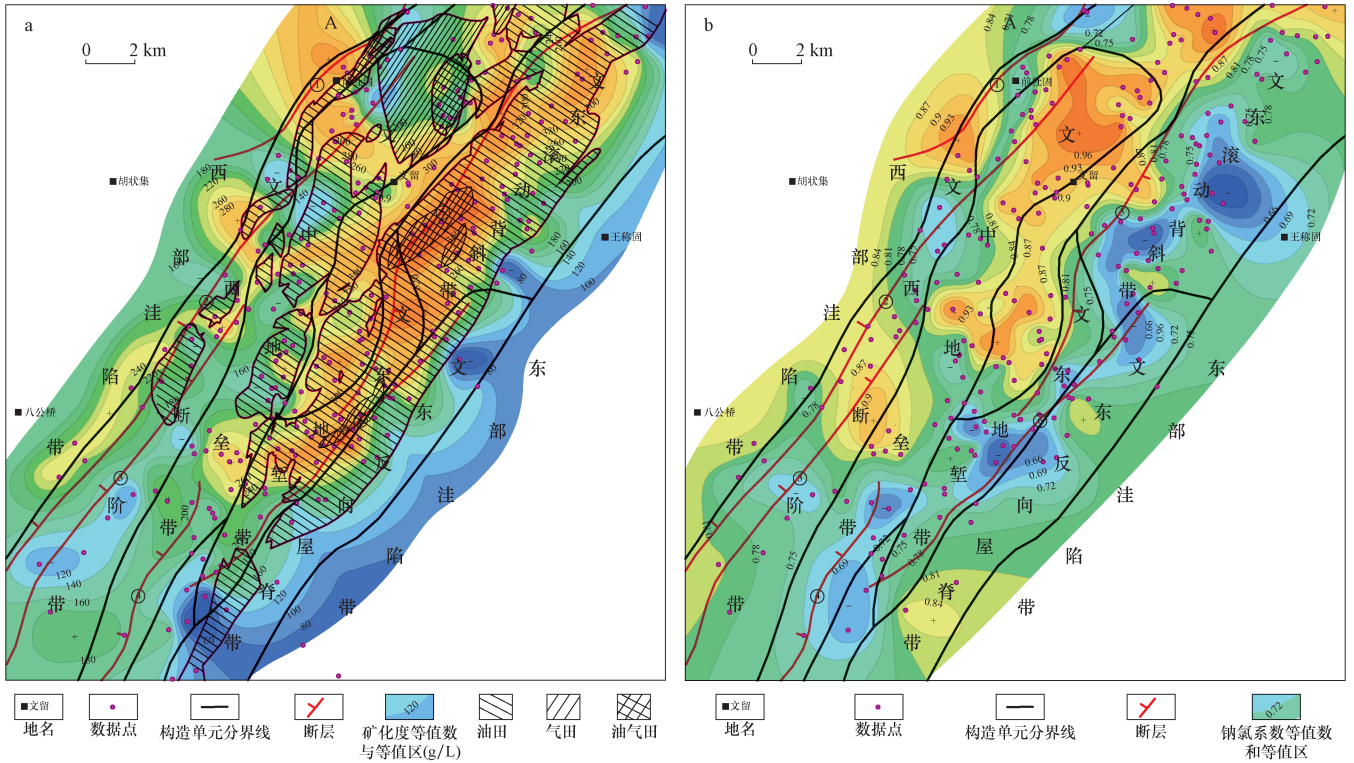


图3 文留地区水化学平面分布

Fig. 3 Ichnography of hydrochemical properties of formation water in Wenliu region

a. 文留地区沙三段 KHD; b. 文留地区沙三段钠氯系数

①文西 1 号断层;②文西 2 号断层;③文西 3 号断层;④黄河断层;⑤文东断层;⑥徐楼断层

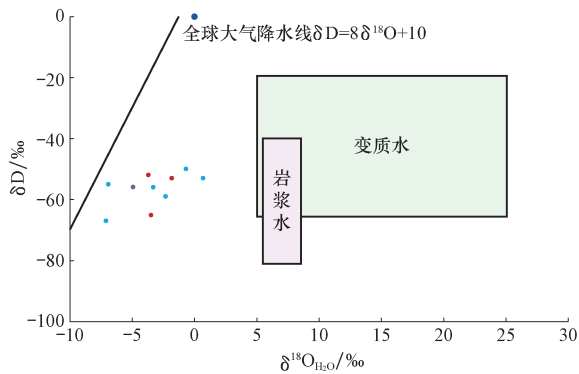
图4 文留地区地下水同位素 $\delta D - \delta^{18}O_{H_2O}$ 关系

Fig. 4 Hydrogen and oxygen isotope compositions of formation water in Wenliu region

• Es^2 ; • $Es^3(上)$; • $Es^3(中)$; — 大气降水曲线

2.4 典型剖面水化学特征与油气运聚关系

为详细分析水化学与油气运移、聚集的关系,选取文留北部文 218 - 文 245 井油气藏剖面进行详细油水关系分析(图 1 中 A - A' 剖面)。

文留北部处于柳屯洼陷和前梨园洼陷两侧离心流叠合越流泄水区,前梨园洼陷泥岩压实排出的淡水在向西侧向流动过程中不断浓缩,地层水矿化度逐渐增加(图 5)。垂向上,由于断裂发育,构造抬升期,断层活动开启,流体沿文东、文西断层垂向调整,深部受盐

岩溶滤影响的高矿化度地层水沿断层向浅部运移^[22-23]。高矿化度地层水的顶界面位置与地层能量及断裂连通性有关。油气成藏期,断层封闭,油气伴随地层水运移过程中遇盐岩及反向断层遮挡,在圈闭中聚集成藏。文中地垒带石炭系 - 二叠系煤系地层在高温高压条件下,生成的气态烃进入储层砂体,被上覆文 23 盐封盖,形成文 23 气藏。文留北部由于盐岩发育,地层保存条件整体相对较好,盐下地层水钠氯系数普遍小于盐上,尤其是沙三段盐下地层水钠氯系数均较小 (< 0.84) (图 6)。部分断裂向上断至浅部地层,断层局部开启程度相对较大,大气水沿断裂下渗,淡化地层水,导致矿化度降低 ($< 100 \text{ g/L}$),钠氯系数增加 (> 0.92),地层封闭条件差。

一般来说油气富集区都是压力低值区,然而文东滚动背斜带和文东地堑带超高压分布区是油气最为富集的区域。从文 218 - 文 245 剖面上,可以看出文留地区由于断裂发育,流体以垂向运移为主。在油气主要成藏期,大量油气伴随地层水沿断层运移充注至储层。由于烃源条件优越,大规模的油气充注作用导致了超高压的产生,同时该区域盐岩十分发育,盐岩良好的封盖性能对超高压的保存起到极其重要的作用。此外,该区域断层晚期活动性弱,有利于油气保存。因此,文东滚动背斜带和文东地堑带油气富集区同时也是压力系数高值区。

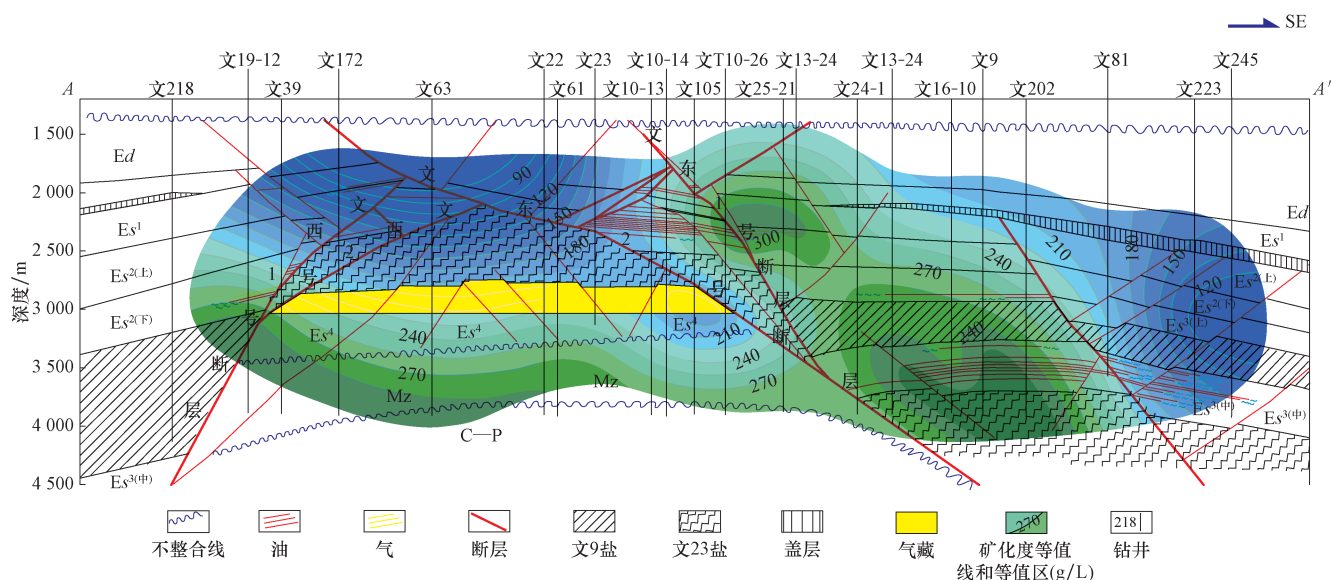


图5 文留地区北部文218—文245井地层水矿化度剖面

Fig. 5 Formation water salinity profile of Well Wen 218 – Well Wen 245 in northern Wenliu region

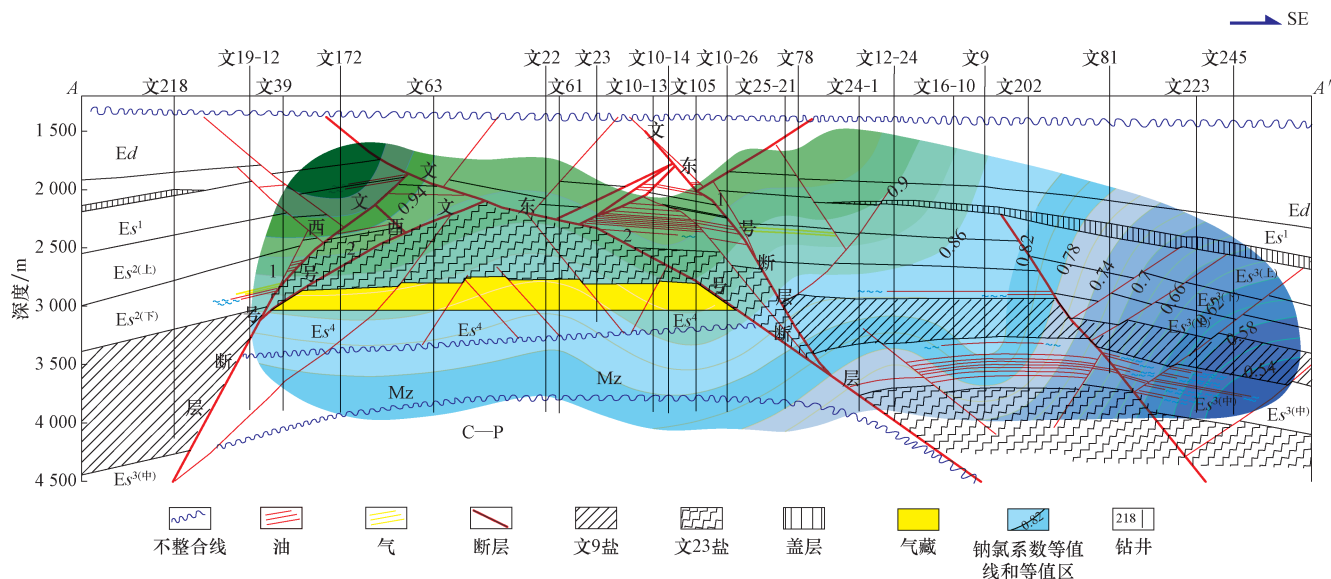


图6 文留地区北部文218—文245井地层水钠氯系数剖面

Fig. 6 r_{Na^+}/r_{Cl^-} ratio profile of Well Wen 218 – Well Wen 245 in northern Wenliu region

3 结论

1) 文留地区断裂发育,同时受盐岩溶滤作用影响,地层水矿化度纵向上变化较大,由浅至深可划分为(古)大气水下渗淡化带(A)、越流泄水浓缩带(B)、泥岩压实排水淡化带(C)。由于局部断裂的沟通作用,深部泥岩压实淡化地层水沿断裂直接上涌,越流浓缩程度较低,出现断层越流淡化带(D)。此外,部分越流带中的高矿化度地层水沿断层继续向浅部运移,在浅层形成末端越流浓缩带(E)。

2) 文留地区文东滚动背斜带和文东地堑带为两侧离心流的共同指向区,地层水矿化度、氯离子浓度较

高,油气随地层水运移过程中聚集成藏,油气富集区与地层水矿化度高值区具有很好的一致性;文东反向屋脊带虽然距前梨园生烃洼陷最近,但由于埋深大,储层物性相对较差,矿化度、氯离子浓度稍低,油气富集程度相对较低;文中地垒带和文西断阶带受断层活动性影响,矿化度氯离子浓度低,钠氯系数值大,油气富集程度较差。

3) 文留地区由于断裂发育,流体以垂向运移为主,侧向运移为辅。

参考文献

- [1] Varsanyi I, Kovacs O L. Origin, chemical and isotopic evolution of formation water in geopressured zones in the Pannonian Basin, Hungary

- [J]. Chemical Geology, 2009, 264(1-4): 187-196.
- [2] Munz I A, Johansen H, Huseby O, et al. Water flooding of the Oseberg Ost oil field, Norwegian North Sea; application of formation water chemistry and isotopic composition for production monitoring[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(4): 1-15.
- [3] 任国选, 侯读杰, 史玉玲, 等. 准噶尔盆地西北缘红山嘴油田地层水特征与油气藏聚集关系[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 179-184.
- Ren Guoxuan, Hou Dujie, Shi Yuling, et al. Relationship between formation water characteristics and hydrocarbon accumulation in Hongshanzui oilfield in the northwestern margin of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 179-184.
- [4] 林晓英, 曾澹辉, 杨海军, 等. 塔里木盆地哈得逊油田石炭系地层水化学特征及成因[J]. 现代地质, 2012, 26(2): 377-383.
- Lin Xiaoying, Zeng Jianhui, Yang Haijun, et al. Geochemical characteristics and origin of formation water from the Carboniferous in Hadson Oil Field, Tarim basin[J]. Geoscience, 2012, 26(2): 377-383.
- [5] Garven G. A hydrogeologic model for the formation of the giant oil sands deposits, of the western Canada sedimentary basin[J]. American Journal of Science, 1989, 289: 105-166.
- [6] Bethke C M, Reed J D, Oltz T F, et al. Longrange petroleum migration in the Illions basin[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(5): 925-945.
- [7] 侯艳平, 孙向阳, 任建业, 等. 东濮凹陷滑脱盐构造及其在油气勘探中的意义[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 58-61.
- Hou Yanping, Sun Xiangyang, Ren Jianye, et al. Detached deformational salt structures and the significance in petroleum exploration in Dongpu depression[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 58-61.
- [8] 李梅, 金爱民, 楼章华, 等. 准噶尔盆地地层流体特征与油气运聚成藏[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 607-615.
- Li Mei, Jin Aimin, Lou Zhanghua, et al. Formation fluid characteristics and hydrocarbon migration and accumulation in Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 607-615.
- [9] 张小莉, 查明, 赫柱柱, 等. 渤海湾盆地廊固凹陷地层水化学纵向分带性与油气聚集[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2): 190-195.
- Zhang Xiaoli, Zha Ming, He Shuanzhu, et al. Relationships between formation water vertical zoning and oil and gas enrichment in Langgu sag of the Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(2): 190-195.
- [10] 金爱民, 尚长健, 朱蓉, 等. 贵中坳陷及周缘地下水化学-动力学特征与油气保存[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(5): 758-764.
- Jin Aimin, Shang Changjian, Zhu Rong, et al. Groundwater hydrochemical & hydrodynamic characters and hydrocarbon preservation, in Guizhong depression and its margin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(5): 758-764.
- [11] 楼章华, 金爱民. 油田水化学的垂直分带性与平面分区性研究[J]. 地质科学, 2006, 41(3): 311-319.
- Lou Zhanghua, Jin Aimin. Vertical zonation and planar division of oilfield groundwater chemistry fields in the Songliao Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(3): 311-319.
- [12] 楼章华, 李梅, 金爱民, 等. 松辽盆地油田水化学的垂直分带性[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2): 195-202.
- Lou Zhanghua, Li Mei, Jin Aimin, et al. Vertical zonation of oilfield groundwater chemistry fields in the Songliao Basin, China[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 195-202.
- [13] Peter B, Bernardo M G, Carlos M, et al. Origin and evolution of formation water at the Jujo-Tecominoacan oil reservoir, Gulf of Mexico. Part 1: Chemical evolution and water-rock interaction[J]. Applied Geochemistry, 2009, 30(2): 543-554.
- [14] 聂明龙, 吴蕾, 孙林, 等. 阿姆河盆地查尔朱阶地及邻区盐相关断裂特征与油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 803-808.
- Nie Minglong, Wu Lei, Sun Lin, et al. Salt-related fault characteristics and their petroleum geological significance in Zarzhu terrace and its adjacent areas, the Amu Darya Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 803-808.
- [15] 王冰洁, 何生, 王静, 等. 东营凹陷水化学场成因及其与超压系统耦合关系[J]. 中国石油大学学报, 2012, 36(3): 54-64.
- Wang Bingjie, He Sheng, Wang Jing, et al. Hydrochemistry field origin and its coupling relationship with overpressure system, Dongying depression[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(3): 54-64.
- [16] 郝雪峰. 东营凹陷沙三—沙四段砂岩储层超压成因与演化[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 167-173.
- Hao Xuefeng. Overpressure genesis and evolution of sandstone reservoirs in the 3rd and 4th members of Shahejie Formation, the Dongying Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 167-173.
- [17] 曾澹辉, 吴琼, 杨海军, 等. 塔里木盆地塔中地区地层水化学特征及其石油地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 223-229.
- Zeng Jianhui, Wu Qiong, Yang Haijun, et al. Chemical characteristics of formation water in Tazhong area of the Tarim Basin and their petroleum geologic significance[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 223-229.
- [18] 杨绪充. 含油气区地下温压环境[M]. 山东: 石油大学出版社, 1991: 151-178.
- Yang Xuchong. Subsurface thermal and pressure condition in petroleum province[M]. Shandong: Petroleum Press, 1993: 151-178.
- [19] 陈陆望, 桂和荣, 殷晓曦, 等. 深层地下水 ^{18}O 与 D 组成特征与水流场[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(6): 854-858.
- Chen Luwang, Gui Herong, Yin Xiaoxi et al. Composing characteristic of ^{18}O and D and current field in deep groundwater[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(6): 854-858.
- [20] 李文鹏, 郝爱兵, 郑跃军, 等. 塔里木盆地区域地下水环境同位素特征及其意义[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 191-198.
- Li Wenpeng, Hao Aibing, Zheng Yuejun, et al. Regional environment isotopic features of groundwater and their hydrogeological explanation in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(1): 191-198.
- [21] 李建森, 李廷伟, 彭喜明, 等. 柴达木盆地西部第三系油田水水文地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 50-55.
- Li Jiansen, Li Tingwei, Peng Ximing, et al. Hydrogeochemical behaviors of oilfield water in the Tertiary in western Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 50-55.
- [22] 王冠民, 庞小军, 张雪芳, 等. 渤中凹陷古近系石南断层活动性及其对油气成藏条件的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 859-866.
- Wang Guanmin, Pang Xiaojun, Zhang Xuefang, et al. Activity of Shinnan fault and its control on hydrocarbon accumulation in the Paleogene in Bozhong Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 859-866.
- [23] 孙永河, 赵博, 董月霞, 等. 南堡凹陷断裂对油气运聚成藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 540-549.
- Sun Yonghe, Zhao Bo, Dong Yuexia, et al. Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in the Nanpu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 540-549.