

松辽盆地扶新隆起带扶杨油层地层水化学特征 及其与油气运聚关系

梅啸寒¹, 张琴^{2,3}, 王雅芸⁴, 吴欣松^{2,3}, 刘景彦¹, 赵家宏⁵, 王武学⁵

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京, 100083; 2. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
3. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 4. 中国石油 青海油田分公司采油三厂, 青海 茫崖 816400;
5. 中国石油 吉林油田分公司 勘探开发研究院, 吉林 松原 138000]

摘要:扶新隆起带扶杨油层经历了近60年的勘探开发依然是松辽盆地南部最主要的油气富集区之一。然而,扶新隆起带构造条件复杂,断层密集,油、气、水分布极其复杂,油气运聚过程及油气富集规律尚不明确,极大制约了进一步油气勘探开发效果。在分析扶新隆起带北坡扶杨油层地层水来源以及纵向上和平面上分布规律基础上,解剖重点区典型的油藏剖面,结合地层压力及烃源岩条件,深入探讨扶新隆起带扶杨油层地层水特征,与油气运聚和富集的耦合关系。垂向上,扶新隆起带水化学可划分为大气水下渗淡化带、压实水淡化带、溶蚀浓缩带、粘土矿物脱水淡化带以及越流浓缩带5个区带;平面上,扶新隆起带新北鼻状构造带和新立鼻状构造带为是两大离心流发生集中越流泄水的区域,形成了高矿化度、高钠氯系数区域与油气富集区高度的一致性。源内成藏区、源边成藏区油源条件较好,地层受扰动深度较深,成藏条件良好。而在源外成藏区部烃源岩成熟度低,含油气流体影响深度较浅,油源条件较差。

关键词:地层水化学;油气运移;油气聚集;扶新隆起带;松辽盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Hydrochemical characteristics of formation water and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in Fuyang oil layer in Fuxin Uplift, Songliao Basin

Mei Xiaohan¹, Zhang Qin^{2,3}, Wang Yayun⁴, Wu Xinsong^{2,3}, Liu Jingyan¹, Zhao Jiahong⁵, Wang Wuxue⁵

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
4. No. 3 Oil Production Plant, Qinghai Oil Field Branch Company Ltd., PetroChina, Mangya, Qinghai 816400, China;
5. Research Institute of Exploration and Development of Jilin Oilfield Branch Company Ltd., PetroChina, Songyuan, Jilin 138000, China]

Abstract: After nearly 60 years of exploration and development, Fuyang oil layer in Fuxin Uplift still remains one of the most important hydrocarbon accumulation zones in Southern Songliao Basin. However, the structural setting of Fuxin Uplift is complex; faults are densely developed, the contacts between oil, gas and water layers are extremely complex, and the process of hydrocarbon migration and accumulation and the hydrocarbon enrichment pattern stay to be identified. These factors greatly restrict further efforts made for hydrocarbon exploration and development. Following the analysis of the origin and the vertical and horizontal distribution patterns of formation water in Fuyang oil layer on the northern slope of Fuxin Uplift, we dissected the typical reservoir profiles in key areas, and made an in-depth discussion on the coupling relations between formation water characteristics and hydrocarbon migration, accumulation and enrichment in Fuyang oil layer in Fuxin Uplift in combination with analysis of formation pressure and source rocks. Vertically, five hydrochemical

收稿日期:2019-09-12;修订日期:2020-01-12。

第一作者简介:梅啸寒(1989—),男,博士研究生,油气成藏及石油地质。E-mail:mxh198987@126.com。

通讯作者简介:张琴(1973—),女,博士,副教授,沉积学、储层地质学。E-mail:zhangqin@cup.edu.cn。

zones can be identified in Fuxin Uplift; diluted zones from meteoric water percolation, diluted zone from compaction, concentrated zone from dissolution, diluted zone from clay mineral dehydration, as well as concentrated zone from over flow. In the plane, the Xinbei and Xinli nose-like structural zones in the study area are the areas where two major centrifugal flows converge and result in cross-formational flow, leading to the high consistency between zones of high salinity and high sodium chloride coefficient and zones of hydrocarbon enrichment. The oil source conditions are relatively better in the intra-source and near-source hydrocarbon accumulation zones, and the depth of hydrocarbon-bearing fluid disturbance is deeper, favorable for hydrocarbon accumulation. However, the source rocks in out-of-source hydrocarbon accumulation zones are low in maturity, and the depth of hydrocarbon-bearing fluid disturbance is shallow, unfavorable for hydrocarbon accumulation.

Key words: hydrochemistry of formation water, hydrocarbon migration, hydrocarbon accumulation, Fuxin Uplift, Songliao Basin

在含油气盆地中,地层水既是地下流体的主要成分也是油气运移的重要载体,其活动与循环样式与油气的生成、运移及聚集息息相关。地层水化学特征受古沉积环境、蒸发浓缩、水-岩相互作用及流体混合等多重因素影响,因此其化学特征可以间接反映地层的封闭性、成藏条件及油气运移方向等多种地质信息^[1-4]。

松辽盆地是以白垩系为主的克拉通内部中-新生代陆相含油气盆地,含有多个油层(黑帝庙、萨尔图、葡萄花、高台子、扶余、杨大城子和农安),各油层之间被多套局部隔层分割,形成了多套含水系统(上部含水系统、中部含水系统、下部含水系统和深部含水系统),前人研究认为全盆地稳定展布地青山口组一段油页岩对地层水循环具有很强的阻挡作用^[5],将扶杨油层所在的下部含水系统与上部含水系统分隔。松辽盆地南部扶新隆起带扶杨油层具有近60年的勘探开发历史,但由于区域构造条件极其复杂,砂体被大量断层分隔严重^[6],地层水化学性质的差异分带性不仅体现在垂向上,也体现在不同构造单元上,非均质性严重,因此油气运聚过程及油气富集规律尚不明确。本文以松辽盆地南部扶新隆起带扶杨油层为研究对象,通过地层水离子特征分析地层水来源,结合烃源岩成熟度分析油田地层水矿化度、离子浓度在平面上和垂向上的变化规律与油气运聚及分布的关系,总结平面上不同构造单元,纵向上不同层位油气富集规律,为老油田的油气勘探提供新的理论和依据。

1 地质背景

扶新隆起带位于松辽盆地中央凹陷区东南部,为正向二级构造单元,是一个在前白垩系基岩之上发育的继承性古隆起,被多个生烃中心(西南部的长岭凹陷、西部的大安凹陷和西北部的三肇凹陷)所环绕形成

了三面临凹的构造格局^[6]。研究区位于扶新隆起带北坡,包含新民油田、新庙油田、新北油田、新立油田、扶余油田及木头油田北部(图1),区内构造总体南高北低,东高西低,新立断鼻构造-木头构造-扶余古隆起构成了研究区的构造轴线。泉三段 K_1q^3 (杨大城子油层) 泉四段 K_1q^4 (扶余油层) 沉积时期松辽盆地进入早期拗陷期阶段,受西南部和东南部两大物源的控制,研究区广泛发育以河流-三角洲相为主体的砂岩储层,上覆青山口组一段沉积时期,盆地进入稳定拗陷期,盆地范围内被广泛的湖泊所覆盖^[7],并发生湖海沟通^[8],水体盐度升高,沉积了3组深湖半深湖劣质油页岩-泥岩组合,是松辽盆地最主要的烃源岩^[9],构成了扶杨油层“上生下储,新生古储”的特殊成藏模式。前人研究表明青山口组一段内部普遍发育的超压引起的势能差是含油气流体通过断层和砂体由凹陷区向隆起区形成压榨水离心流的重要动力^[10-11]。充足的油源条件、继承性隆起构造带相互配置,使研究区成为油气运聚的长期有利指向区。

2 地层水化学组成特征

2.1 主要离子组成及水型特征

本次研究中,搜集到研究区扶杨油层地层水样品共399个(表1),依据苏林(1946)的分类方案^[3],以 $NaHCO_3$ 型水为主,占总样本数的74.0%,其次为 $CaCl_2$ 型占14.5%, Na_2SO_4 型占10.5%,氯化镁型仅占1.0%。研究区扶杨油层地层水总矿化度变化范围在2~38 g/L,属于微咸水-咸水级别,其中2~10 g/L数据占90.5%,大于10 g/L样品数占9.5%。样品各离子特征表现为:阳离子 $\rho(Na^+) + \rho(K^+) > \rho(Ca^{2+}) > \rho(Mg^{2+})$,主要阴离子 $\rho(Cl^-) > \rho(HCO_3^-) > \rho(SO_4^{2-})$ 。总体上,扶余油层(泉四段)无论是总矿化度(TDS)还是各种主要离子

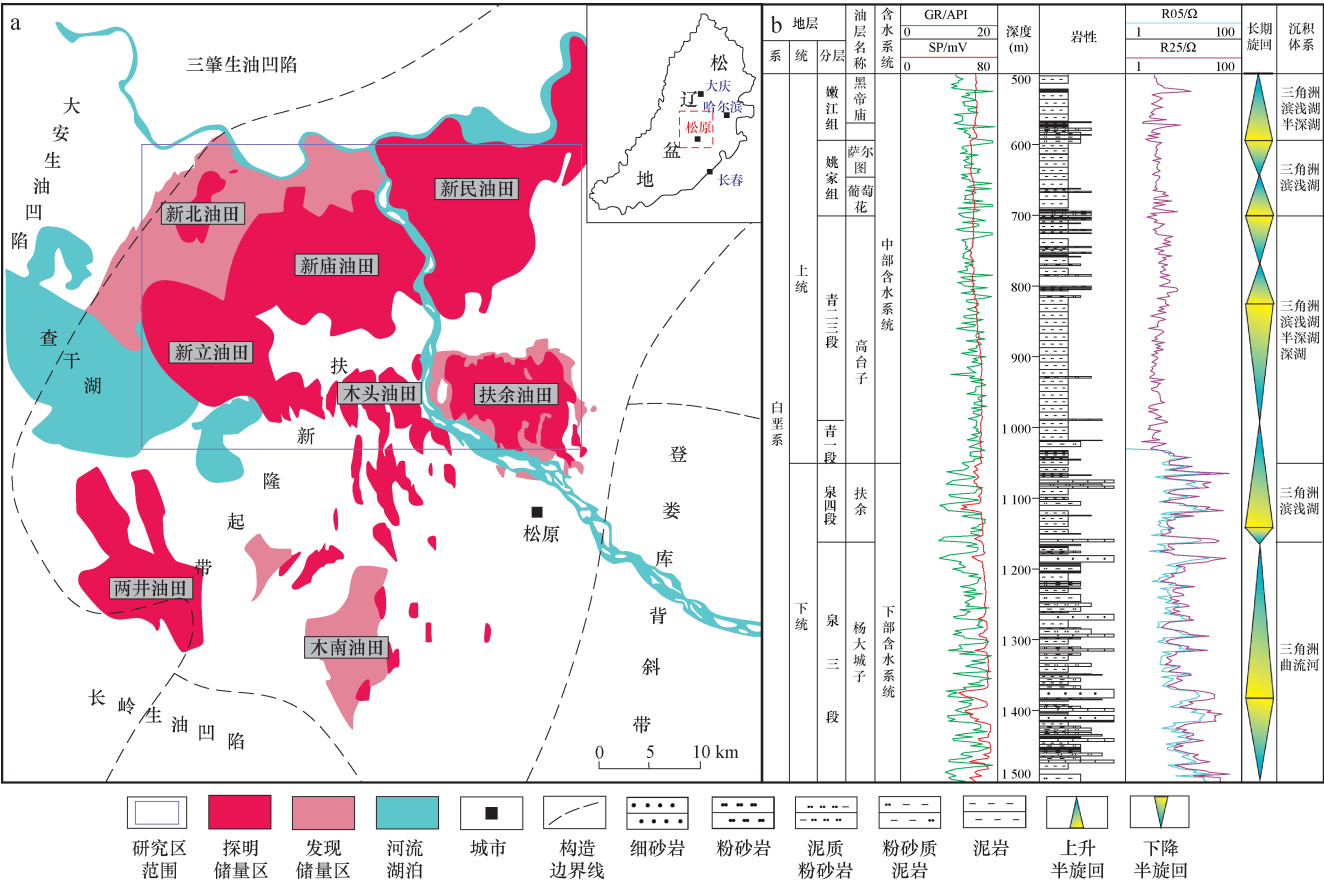


图 1 松辽盆地南部扶新隆起带地理位置和地层发育特征^[6]

Fig.1 Geographical location and development characteristics of stratum in Fuxin Uplift,Southern Songliao Basin^[6]

a. 研究区地理位置;b. 研究区地层发育特征(新深 1 井)

表 1 扶新隆起带扶杨油层部分地层水样品分析测试结果

Table 1 Testing results of some formation water samples from Fuyang oil layer in Fuxin Uplift

井号	深度/(m)	层位	离子浓度							TDS/ (mg·L ⁻¹)	$r(\text{Ca}^{+})/$ $r(\text{Cl}^{-})$		$r(\text{Ca}^{2+})/$ $r(\text{Mg}^{2+})$		$r(\text{Cl}^{-})/$ $r(\text{Mg}^{2+})$		$r(\text{SO}_4^{2-}) \times$ 100/ $r(\text{Mg}^{2+})$	水型	油气 显示
			Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻											
庙108	1 320 ~ 1 326	K ₁ q ⁴	1 677.4	149.7	32.2	2 278.0	46.1	1 089.8	5 273.2	1.046	2.79	23.91	1.562	NaHCO ₃	油迹				
庙116	1 400 ~ 1 407	K ₁ q ⁴	2 510.0	244.9	11.4	3 841.0	38.4	805.5	7 450.9	0.928	12.89	113.90	0.772	NaHCO ₃	油斑				
庙130	1 318 ~ 1 331	K ₁ q ³	1 869.3	212.0	22.0	2 819.0	98.9	739.6	5 760.8	0.942	5.78	43.31	2.758	Na ₂ SO ₄	油斑				
民45	930 ~ 933	K ₁ q ⁴	2 077.1	82.8	9.4	2 268.8	74.4	1 812.3	6 324.8	1.300	5.29	81.59	2.531	NaHCO ₃	油斑				
民51	917 ~ 925	K ₁ q ⁴	2 256.7	69.9	18.1	3 216.0	167.6	544.9	6 273.2	0.996	2.32	60.06	4.022	NaHCO ₃	油斑				
民66	1 083 ~ 1 089	K ₁ q ³	2 156.7	332.9	11.4	2 831.7	1 171.9	455.8	6 969.4	1.086	17.52	83.96	31.941	Na ₂ SO ₄	荧光				
新104	1 176 ~ 1 180	K ₁ q ⁴	6 199.9	15.2	7.2	2 756.3	49.8	10 852.0	20 312.0	3.194	1.27	130.30	1.393	NaHCO ₃	油迹				
新213	1 308 ~ 1 311	K ₁ q ⁴	2 899.3	311.8	3.2	4 402.5	342.9	646.8	8 606.5	0.935	58.46	465.11	6.011	NaHCO ₃	油浸				
新215	1 474 ~ 1 478	K ₁ q ³	2 244.1	206.0	2.8	3 546.8	171.9	247.0	6 445.6	0.898	44.14	428.23	3.741	CaCl ₂	无				
新330	1 629 ~ 1 646	K ₁ q ⁴	2 343.4	227.1	18.4	2 481.5	1 251.2	1 142.3	7 463.9	1.341	7.41	45.59	38.913	NaHCO ₃	油斑				
新342	1 788 ~ 1 796	K ₁ q ³	1 770.5	186.8	3.0	1 456.6	1 464.4	915.3	5 796.6	1.726	37.36	164.14	77.592	NaHCO ₃	荧光				
木16	1 241 ~ 1 245	K ₁ q ⁴	2 318.4	168.3	3.1	3 772.8	49.4	124.5	6 436.4	0.873	33.01	416.81	1.011	CaCl ₂	荧光				
木254	843 ~ 848	K ₁ q ⁴	2 499.9	126.1	14.0	3 550.7	62.9	897.6	7 151.2	0.999	5.40	85.73	1.266	NaHCO ₃	油斑				
扶126	257 ~ 265	K ₁ q ⁴	1 572.1	20.0	18.2	1 482.9	96.1	1 039.2	4 529.2	1.505	0.67	27.54	5.001	NaHCO ₃	含油				
扶深4	462 ~ 467	K ₁ q ³	1 692.3	30.9	6.2	1 885.9	12.5	1 354.6	4 982.4	1.274	2.99	102.82	0.512	NaHCO ₃	油斑				

注:r 为离子的当量浓度。

(Na^+ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+})浓度都普遍高于杨大城子油层(泉三段)。造成这一现象的主要原因是扶余油层与青山口组泥岩紧邻,而当青山口组沉积时原始沉积水转为微咸水-半咸水,因此相比于杨大城子油层扶余油层更多地受较高矿化度压实水的影响。

2.2 主要离子比值系数特征

地层水离子比值系数可以反应多种地质信息,如油藏化学环境、水岩相互作用的种类和进行程度、油源条件等。常用的比值系数有钠氯系数、变质系数、脱硫系数、碳酸岩平衡系数、氯镁系数等^[12-15]。在封闭环境中, Na^+ 由于钠长石化作用^[16-17],含量逐步降低,而 Mg^{2+} 发生沉淀导致含量逐步降低,因此钠氯系数越低、变质系数和氯镁系数越高说明是地层封闭程度越高。根据离子比值系数统计及与其他油气田对比结果(表2),研究区钠氯系数偏高、变质系数和氯镁系数偏低,总体上地层处于开放状态,变质时间短,杨大城子油层就封闭性而言比扶余油层略好。由于烃类物质与 SO_4^{2-} 发生反应,因此脱硫系数越小越有利于油气的保存,总体上研究区脱硫系数平均值较其他油气田略高但仍有利于油气的保存。

3 地层水来源

扶新隆起带扶杨油层地层水特征复杂,以低矿化度地层水为主,具有淡水型地层水的基本特征,与泉三段、泉四段沉积时期河流-浅水三角洲环境相符合,但局部地区也存在着高矿化度的地层水。张汪明等(2016)认为原始沉积淡水即使经历了浓缩作用矿化度也很难超过 10 g/L ^[19],因此研究区扶杨油层可能受

到了外来高矿化度地层水的影响。

3.1 高矿化度地层水与储层孔隙度的关系

通过研究区扶杨油层地层水矿化度与实测孔隙度、渗透率的关系分析显示(图2),当孔隙度小于15%时,地层水矿化度随孔隙度增高而缓慢上升,当孔隙度超过15%时,地层水矿化度随孔隙度增高而快速增高;当渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,地层水矿化度随渗透率的变化幅度不大,当渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,地层水矿化度随渗透率增高而快速升高,显示出高矿化度地层水($>10\text{ g/L}$)多聚集在孔隙较大、渗透性较好的地层中^[20]。当孔隙度较小、渗透率较低时毛细管力大,高矿化度地层水较难进入孔隙,对孔隙中原始沉积水的影响较小,矿化度上升不明显;而当孔隙度较大、渗透率较高时,高矿化度地层水会快速占据这些渗透性储集体,并以为之通道继续运移,进一步说明了高矿化度地层水的外来性。

3.2 高矿化度地层水与离子组成的关系

史婷婷等(2012)通过氢、氧同位素分析表明,松辽盆地中央凹陷区泉头组地层水为大气水与原始沉积水的混合^[21],未受到深部卤水的影响,因此研究区高矿化度地层水的成因与深部浓缩卤水上涌无关。通过地层水总矿化度与各离子含量关系可知,当地层水矿化度小于 10 g/L 时,不管是扶杨油层地层水 Ca^{2+} 含量、 Cl^- 含量还是 Br^- 含量都与地层水矿化度具有良好的线性关系(图3a,c,e);而当地层水矿化度大于 10 g/L 时,各离子含量与扶杨油层地层水矿化度的对应关系变差,将地层水矿化度高于 10 g/L 的数据点与研究区青一段数据交会发现,这些数据的变化规律与青

表2 扶新隆起带扶杨油层离子比值系数、地质意义及与其他油气田的对比^[13,18]

Table 2 Ion ratio coefficients and geological significance of the Fuyang oil layer in Fuxin Uplift, and the comparison of the the Fuyang oil layer with other oil and gas fields^[13,18]

系数	计算公式	影响因素	地质意义	扶余油层 (泉四段)	杨大城子油层 (泉三段)	塔里木油田塔 中地区志留系	鄂尔多斯呼图壁 气田古近系
钠氯系数	$r(\text{Na}^+)/r(\text{CT})$	浓缩变质	地层封闭性越高, 钠氯系数越小	$0.84 \sim 6.0$ $1.51(258)$	$0.85 \sim 3.29$ $1.27(136)$	$0.33 \sim 1.38$ $1.87(48)$	$0.16 \sim 1.24$ 0.84
变质系数	$[r(\text{Cl}^-) - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)] / r(\text{Mg}^{2+})$	变质作用 阳离子交换	地层封闭时间越长, 变质时间越长, 变质系数越大	$-3390 \sim 614.9$ $-22.63(243)$	$-536.4 \sim 955.85$ $79.9(117)$	$-129.99 \sim 61.95$ $5.54(50)$	
脱硫系数	$r(\text{SO}_4^{2-}) \times 100 / r(\text{Cl}^-)$	脱硫酸作用	SO_4^{2-} 与烃类反应, 脱硫系数越小, 越有利于油气保存	$0.05 \sim 87.08$ $11.54(257)$	$0.17 \sim 157.86$ $17.95(136)$	$0 \sim 101.77$ $7.38(50)$	$1.15 \sim 114.92$
氯镁系数	$r(\text{Cl}^-) / r(\text{Mg}^{2+})$	阳离子交换	地层封闭性越高, 钠氯系数越大	$13.04 \sim 780.8$ $126.67(243)$	$8.67 \sim 893.87$ $171.89(118)$		$42.94 \sim 375.61$ 167.83

注: r 为离子的当量浓度;表中数据为最小值~最大值
平均值(样品数)。

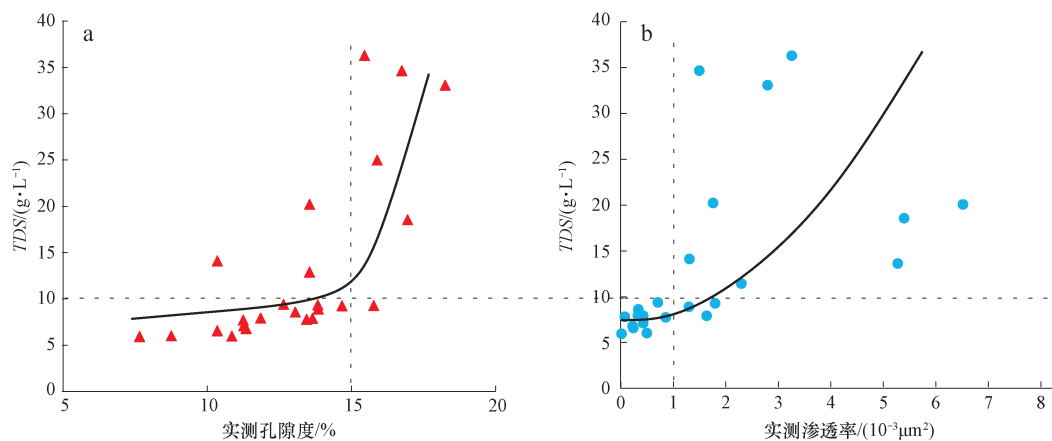


图2 扶新隆起带扶杨油层砂岩实测孔隙度、渗透率与地层水矿化度关系

Fig. 2 Relations between the measured porosity, permeability and the formation water salinity of the Fuyang oil layer, Fuxin Uplift

a. 实测孔隙度与地层水矿化度关系; b. 渗透率与地层水矿化度关系

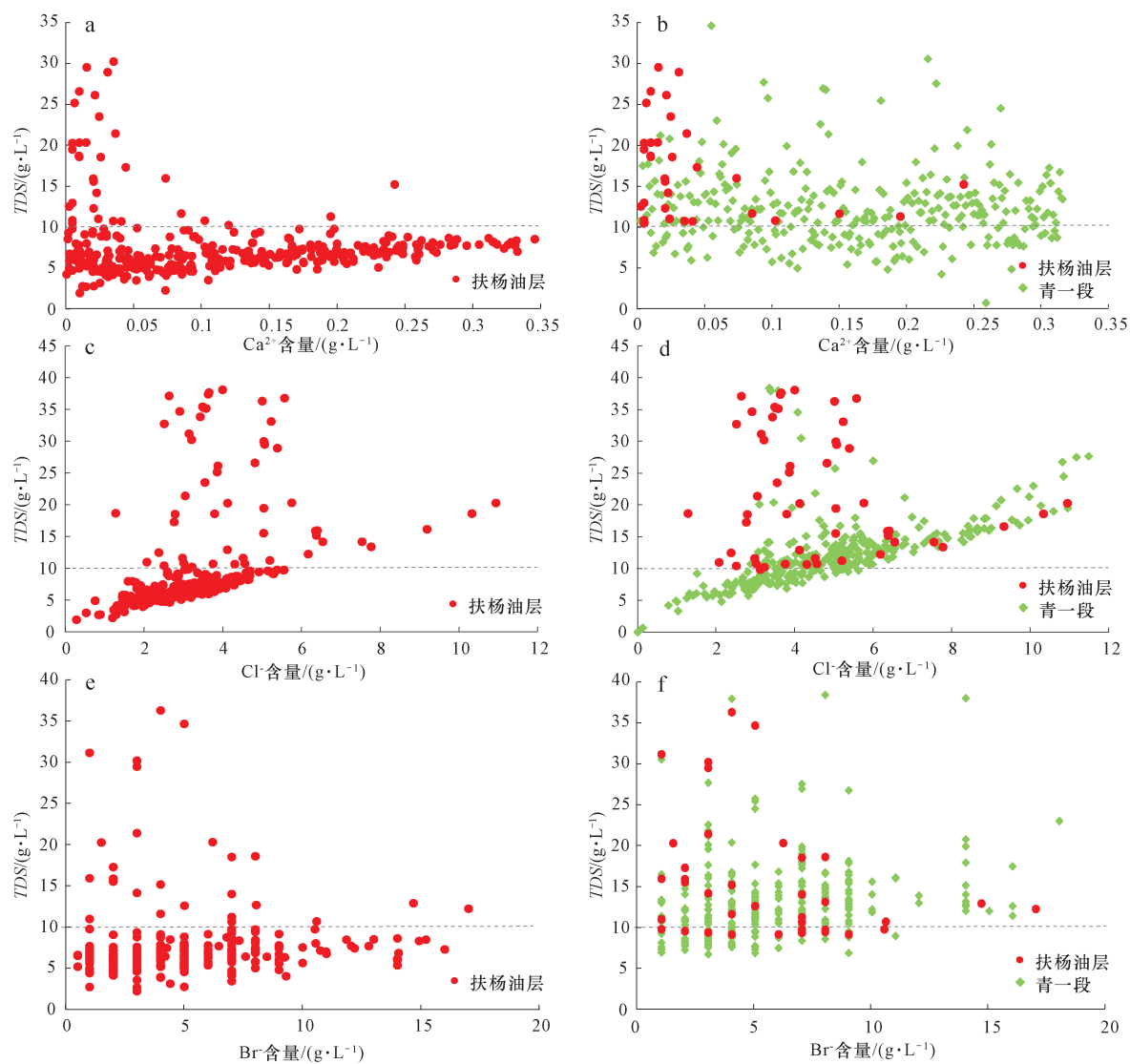


图3 扶新隆起带扶杨油层、青一段各离子含量与地层水矿化度关系

Fig. 3 Relations between ion content and formation water salinity in Fuyang oil layer and Qing-1 member of Fuxin Uplift

a. 扶杨油层钙离子与矿化度关系; b. 扶杨油层高矿化度地层水钙离子、青一段钙离子与矿化度关系; c. 扶杨油层氯离子与矿化度关系; d. 扶杨油层高矿化度地层水氯离子、青一段氯离子与矿化度关系; e. 扶杨油层溴离子与矿化度关系; f. 扶杨油层高矿化度地层水溴离子、青一段溴离子与矿化度关系

一段各离子有相似的变化规律(图3b,d,f),尤其以溴元素最为典型。一般而言,溴元素多富集于海水中,在陆相环境中溴元素多来源于陆生植物堆积,其变化多受浓缩作用和沉积环境控制,其他因素的影响较小^[22-23]。从 Br^- 含量随地层水矿化度变化图(图3e,f)中可以看出,扶杨油层和青一段地层水中 Br^- 含量均小于 20 mg/L 展现了典型的陆相特征,但扶杨油层高矿化度地层水(大于 10 g/L)中 Br^- 含量的浓缩趋势与青一段 Br^- 浓缩趋势更为一致。青一段泥岩沉积时期水体较高的盐度^[8],且由于欠压实和生烃作用广泛发育超压,大量高矿化度地层水裹挟油气沿“ T_2 ”断层组合和砂体排入扶杨油层^[5],造成扶杨油层矿化度的升高。因此综合研究区高矿化度地层水离子变化特征,认为研究区高矿化度地层水(大于 10 g/L)来源于上覆青山口组泥岩。

4 地层水分布特征及成藏区域的划分

4.1 地层水垂向分布特征

地层水及其性质的垂向和平面上并非简单的变化,其受到大气水淋滤、地层水浓缩、水岩相互作用、烃源岩排烃等多种作用的影响^[12,15,24],具有时间上的阶

段性和空间上的分区带性。楼章华等(2009)在研究松辽盆地北部地层水性质时将水化学剖面划分为若干典型单元^[25],而在研究区石油地质条件的差异造成了水化学剖面的特殊性。

本文收集到的扶杨油层地层水数据点分布于 $200\sim 2\,600\text{ m}$ 深度,未揭示深部地层水(大于 $3\,000\text{ m}$)变化特征^[25]。根据总矿化度及各离子垂向变化特征,扶杨油层水化学剖面可划分为大气水下渗淡化带(A)、压实水淡化带(B)、溶蚀浓缩带(C)、粘土脱水淡化带(D)以及越流浓缩带(E)5个区带(图4)。大气水下渗淡化带(A)主要位于 800 m 以浅(数据主要来自扶余油田)。该带中随着埋藏深度的变浅,地层水矿化度和氯离子浓度快速减小,碳酸氢根离子浓度增加,指示该带受大气淡水渗入影响较大。随着深度增加,河流-三角洲相泥岩脱出大量孔隙水,使地层水淡化,化学剖面进入压实水淡化带(B),由于扶杨油层原始沉积时为淡水环境,因此该带中淡化作用明显,表现出地层水矿化度、氯离子浓度和碳酸氢根离子降低的趋势。当埋深进一步增加时,地层温度和压力增加,离子的交换能力增加,有机酸溶蚀作用增强,泥岩脱水作用减弱,水化学剖面进入溶蚀浓缩带(C),表现为地层水矿化度、氯离子浓度和碳酸氢根离子随深度增大缓慢增加的趋势。当埋深超过 $2\,000\text{ m}$ 时,地层水进入粘土

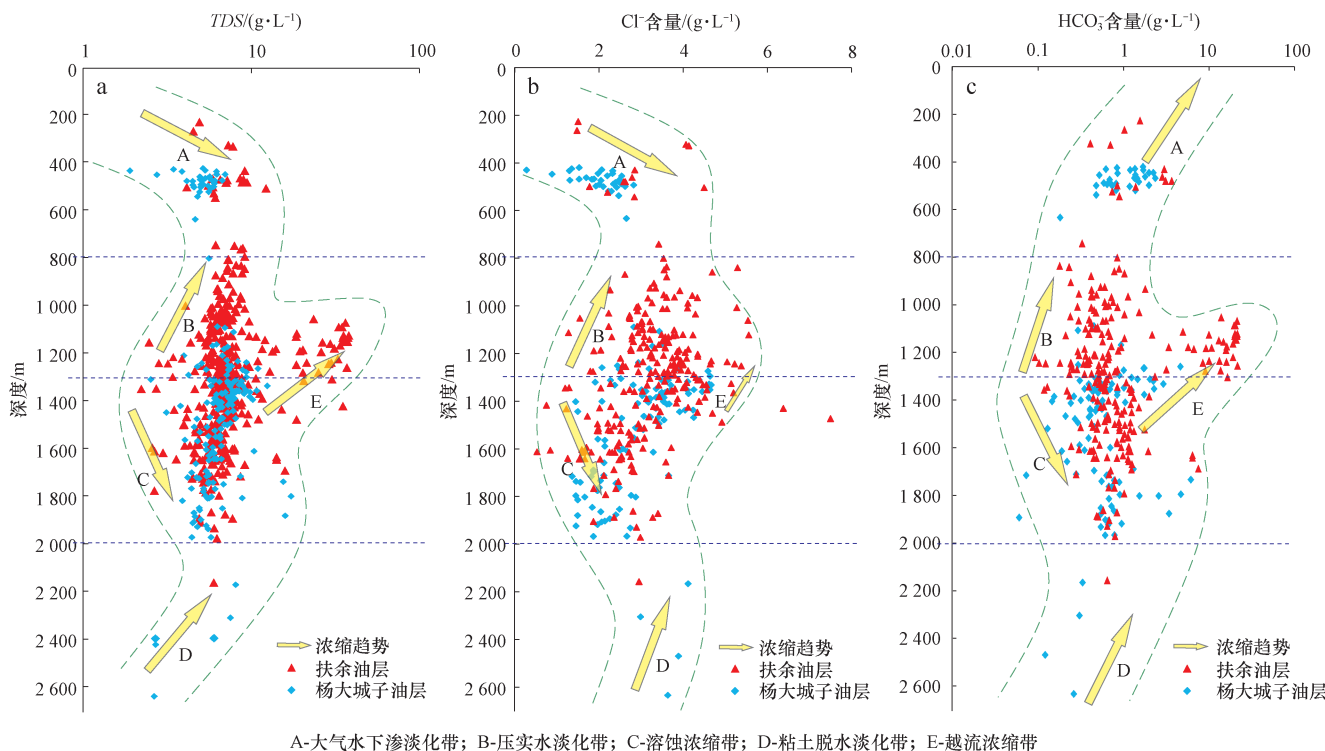


图4 扶新隆起带扶杨油层水化学垂向分布特征

Fig. 4 Vertical distribution of formation water chemical properties in Fuyang oil layer in Fuxin Uplift

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

脱水淡化带(D),由于埋深较大,排烃产生的油气和有机酸很难影响该带,地层中粘土矿物发生伊利石化作用使蒙脱石脱去大量的层间水,导致地层水矿化度的快速降低。在1 100~1 300 m的深度范围内出现了局部矿化度的高值带(>10 g/L),即越流浓缩带(E),表现为矿化度、碳酸氢根离子浓度随深度减小快速增加,而氯离子增加幅度较缓,造成这一现象的主要原因是,青一段烃源岩达到生烃和排烃门限后,向扶杨油层输送大量富含有机酸和 CO_2 的高矿化度的地层水,并在向上越流过程中使得储层不断发生溶蚀^[26],从而使矿化度和碳酸氢根离子浓度不断的升高。

4.2 地层水平面分布特征

研究区目的层顶面正断层十分发育,走向以北西-北北东走向为主,前人研究表明,这些断层多断穿扶杨油层,而向上没于青山口组泥岩,向下终于泉头组

二段泥岩^[6],因此扶杨油层连通性较好,地层水化学参数具有一定的继承性(图5),而又与中部含油气系统和深部含水系统具有较强的分割作用。研究区扶杨油层高地层水矿化度(大于10 g/L)、高钠氯系数的区域集中在新北鼻状构造带,新北鼻状构造带及木头构造西部(图5),与本地烃源岩成熟度 R_o 高于0.7的区域大致相当,本地烃源岩排烃能力较强。此外该区域北邻三肇生油凹陷、西毗的大安生油凹陷,是两大离心流发生集中泄水的区域,大量高矿化度、高钠氯系数地层水裹挟油气,沿断层和砂体上涌,因此该区域就有原地和异地双重油源,地层受扰动程度高,造成了高矿化度、高钠氯系数区域与油气富集区高度的一致性。

新庙斜坡带和新民斜坡区地层水整体矿化度、钠氯系数相对较低,仅在局部存在高值区,该区域构造格局整体上为南北向倾斜的斜坡,埋深较浅,本地烃源岩成熟度低(R_o 小于0.7%),排烃能力差,且距凹陷区

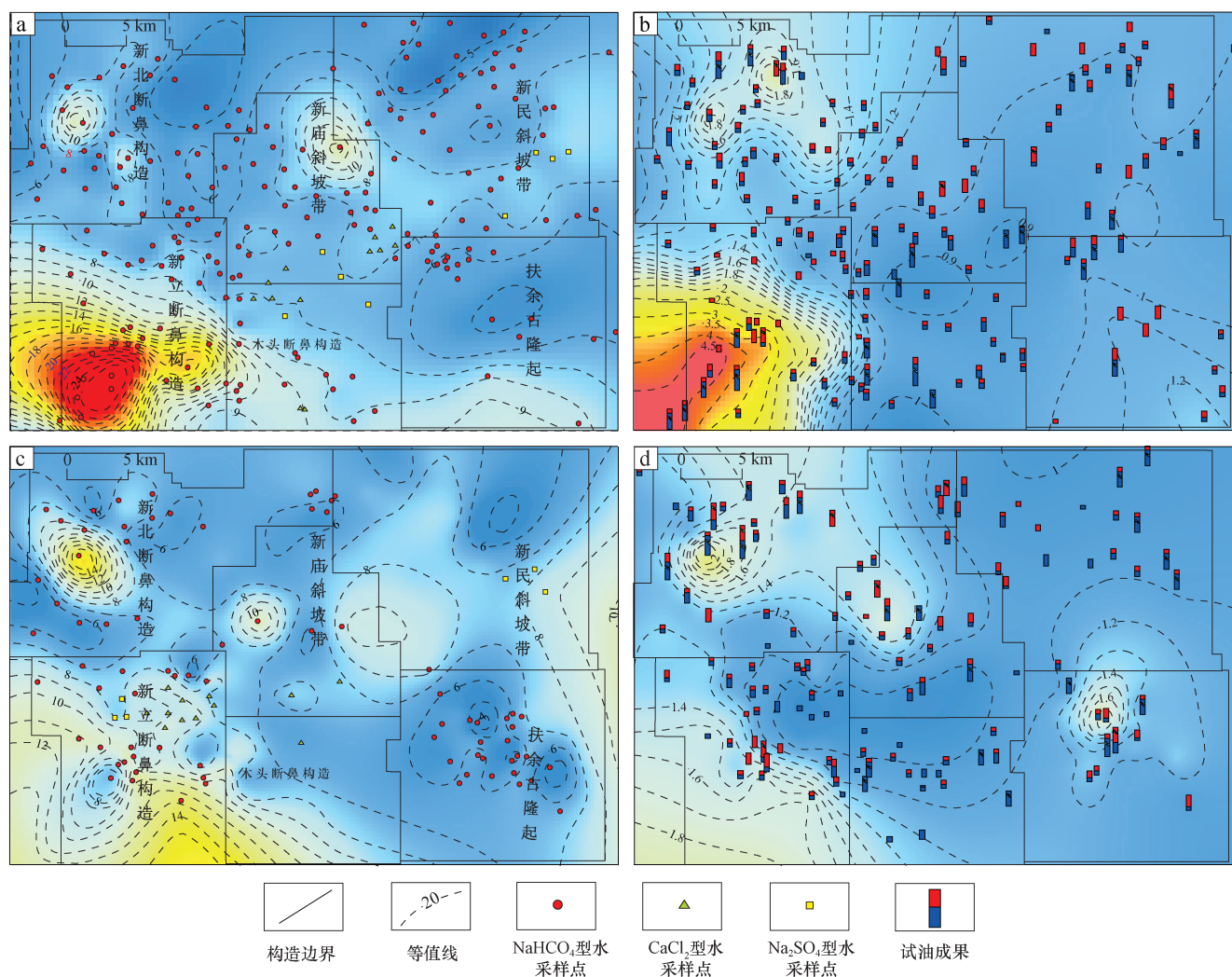


图5 扶新隆起带扶杨油层地层水矿化度、钠氯系数平面分布

Fig. 5 Planar distributions of formation water salinity and sodium-chloride coefficients in Fuyang oil layer in Fuxin Uplift

a. 扶余油层地层水矿化度(g/L); b. 扶余油层地层水钠氯系数; c. 杨大城子油层地层水矿化度(g/L); d. 杨大城子油层地层水钠氯系数

个地层水动力场单元:压榨水离心流区,越流泄水区,大气水向心流区。总体上新北油田和新立油田扶杨油层现今压力系数大于1.02,属于地层压力高值区,依据楼章华等(2003)对松辽盆地扶杨油层水动力单元的划分^[10],新北油田和新立油田位于压榨水离心流区内。新北油田和新立油田紧邻三肇、大安生油凹陷,凹陷中青一段烃源岩埋深大,排烃强度大,产生的异常压力高。泥岩压实水裹挟油气在异常高压差的驱动下,通过断层和砂体由凹陷中心向边缘产生压榨水离心流^[10-11](图6,AA'),在新北油田和新立油田有利的构造背景下,大规模成藏,造成了高矿化度、高钠氯系数区域与油气富集区高度的一致性。根据地层水垂向及平面分布特征(图4,图5),扶余油田受大气淡水淋滤作用明显,位于大气水向心流区内,而扶余油田地层压力系数在1.01~0.97,属于正常压力-弱低压区,造成这一现象的原因与扶余油田断裂发育,地层连通性好,大气水下渗淡化作用增强有关。而木头油田、新庙油田及新民油田位于离心流及向心流交汇的越流泄水区内,导致了地下水的向浅部的越流泄水作用,致使该区域上地层封闭性增高,地层水水质发生了转变。

4.4 成藏区域的划分

根据地层水动力场和烃源岩排烃能力将研究区分

为3个成藏区域:源内成藏区、源边成藏区和源外成藏区。研究区中部和东部包括新北构造东侧、木头油田东北、扶余油田、新民油田及新庙地区青一段埋深不超过1 100 m,有机质成熟度 R_o 小于0.7%,烃源岩处于低熟或未熟状态^[5-6],排烃能力有限,而区域内离心流逐渐消亡,油气主要依靠浮力长距离侧向运移,为源外成藏区,对应于越流泄水区 and 大气水向心流区。而新北油田西部、木头油田西南部和新立油田青一段埋深增大,源岩热演化程度高, R_o 普遍大于0.7%,本地烃源岩开始进入成熟阶段。该区域内来自凹陷的离心流作用强烈,而本地烃源岩排烃对离心流起到了一定的补给作用,因此扶杨油层受本地烃源岩及凹陷离心流双重控制,青一段烃源岩 R_o 大于0.7%的区域与压榨水离心流区大致相当,对应于源边成藏区。源内成藏区位于研究区最西部临近大安凹陷和三肇凹陷的区域,主要包含新北构造西侧和新立构造西侧,该区域内青一段埋深超过1 300 m, R_o 超过0.9%,烃源岩进入排烃高峰^[9],产烃率可达680 mg/g TOC,该区域烃源岩排烃能力最强,地层超压高,油气影响深度大。

5 地层水化学特征与油气运聚关系

研究区各成藏区域内差异性很大的地层水水质反

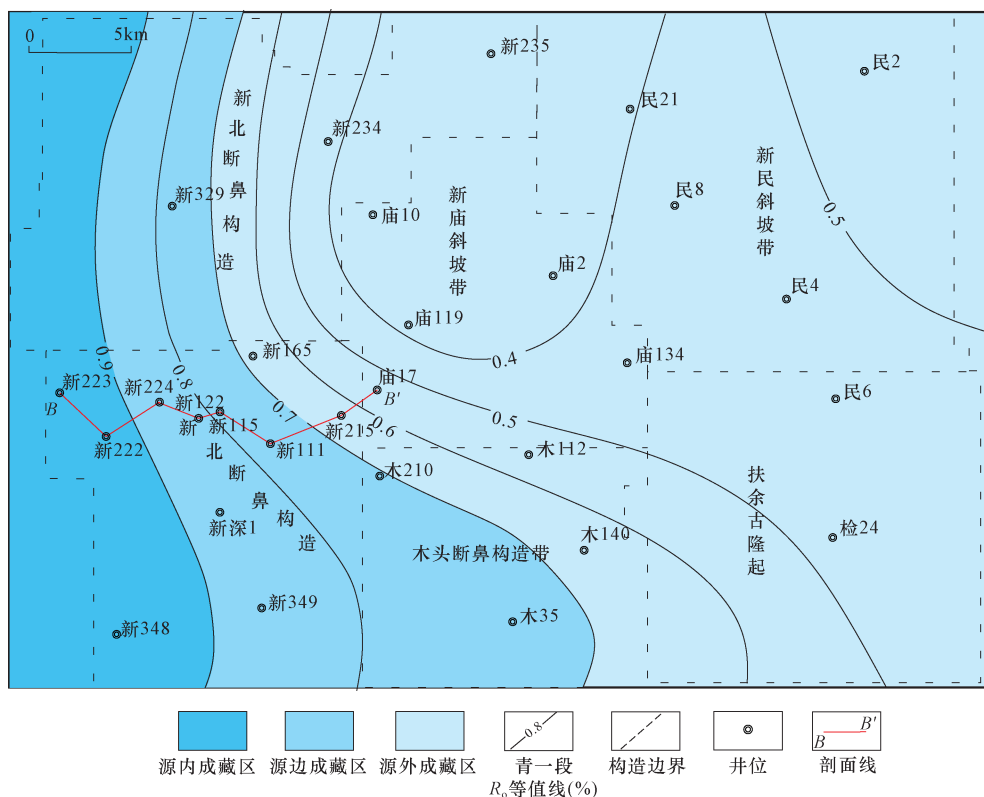


图7 扶新隆起带扶杨油层成藏区域的划分

Fig. 7 The division of hydrocarbon accumulation zone in Fuyang oil layer in Fuxin Uplift

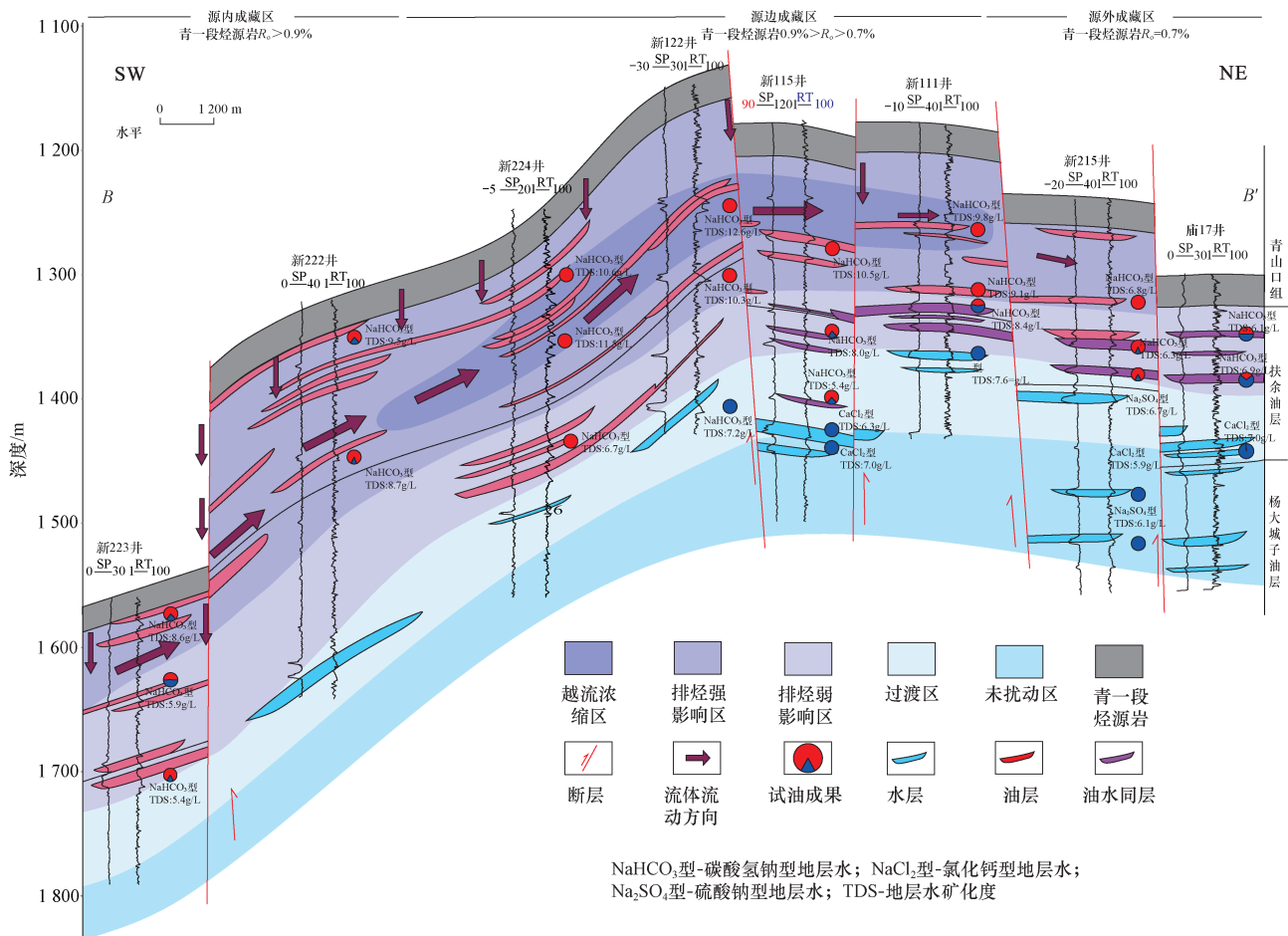


图8 扶新隆起带新立油田北部新223—庙17井(BB')油藏剖面

Fig. 8 The reservoir cross section across Well Xin 223 – Miao 17 (BB') in northern Xinli oilfield in Fuxin Uplift

应了油气经历了不同的运移和成藏过程。为进一步研究扶杨油层水化学与油气运聚关系,以新立油田北部新223—庙17井(BB')(图7)油气藏剖面为例进行详细油水关系分析。新立油田构造形态总体上表现为近东西向且被大量断层复杂化的断鼻构造,西侧紧临大安凹陷,青一段埋藏深度大($>1300\text{ m}$),成熟度高($R_o>0.9\%$),属于源内成藏区(图7)。源内成藏区具有双重油源,一方面本地青一段源岩在超压的作用下,克服浮力和毛细管力,由断层和砂体对接向下直排倒灌和侧灌向扶杨油层中输送了大量含油气高矿化度的酸性流体,另一方面来着凹陷区的压榨水离心流也向研究区输送了大量的油气,这些流体富含有机酸和 CO_2 不断的扰动扶杨油层原始沉积地层水,并发生水岩作用使矿化度和钠氯系数不断升高,地层水类型多为 NaHCO_3 型。当含烃流体下排到一定深度时,超压作用开始减弱,浮力成为地层水运移的主要动力,含烃流体开始沿砂体和断层上涌,不断浓缩并溶蚀储层,地层水矿化度进一步增加(图8),对应于水化学剖面上的越流浓缩带。在源边成藏区,本地烃源岩成熟度变低,

排烃能力较源内成藏区弱,影响层位开始变浅,扶杨油层内部形成了浅部 NaHCO_3 型水,而深部未受扰动区域和过渡区域以 Na_2SO_4 型和 CaCl_2 型地层水特征。源边成藏区储层长时间与富含油气流体接触并接受改造形成了大量高含油饱和度的油气藏。扶杨油层砂体以低孔低渗为主要特征,毛细管力大,因此在远离油源的源外成藏区离心流作用强度明显减弱,油气运载能力降低,受地层压实水和原始沉积淡水的影响,地层水矿化度逐步降低,形成的油气藏含油饱和度减低(如庙17井),此外受越流泄水作用影响,深部地层封闭性增强,含油气流体影响深度很浅,扶余油层内部已出现未受扰动区(CaCl_2 型水区域),总体上成藏条件相对较差。

6 结论

- 1) 扶新隆起带扶杨油层地层水以低矿化度地层水为主,具有淡水型地层水的基本特征,局部地区也存在着来自于上覆青一段的高矿化度的地层水。
- 2) 扶新隆起带水化学剖面可划分为大气水下渗

淡化带(A)、压实水淡化带(B)、溶蚀浓缩带(C)、粘土脱水淡化带(D)以及高矿化度酸性流体上涌形成的越流浓缩带(E)。平面上,扶新隆起带新北鼻状构造带和新北鼻状构造带受两大离心流影响,原始地层水受含油气流体扰动程度大,形成了高矿化度、高钠氯系数区域与油气富集区高度的一致性;新庙斜坡带和新民斜坡区,扶杨油层地层水受泥岩压实排水作用明显,地层水矿化度较低;新庙斜坡部和木头构造北部是 Na_2SO_4 型地层水和 CaCl_2 型地层水集中发育区,地层受扰动程度低,成藏条件较差;扶余古隆起受大气淡水淋滤作用明显,但由于是长期的构造高点,仍是研究区油气富集区之一。

3) 根据地层水动力场和烃源岩排烃能力将研究区分为3个成藏区域。源内成藏区、源边成藏区油源条件较好,油气下排深度大,地层受扰动深度较深,地层水矿化度、钠氯系数较高,成藏条件良好。而在源外成藏区部烃源岩成熟度低,含油气流体影响深度较浅,地层相对封闭,钠氯系数较低,油源条件较差,受压实作用影响,矿化度总体较低。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 康保平,黄小燕,郭淑萍,等. 川西坳陷须二气藏气田水成因、运移及其成藏演化[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 309-317.
Kang Baoping, Huang Xiaoyan, Guo Shuping, et al. Origin, migration, and accumulation evolution of reservoir water in the gas field with Xu 2 gas reservoir, western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 309-317.
- [3] 张宗峰,查明,高长海. 大港油田埕北断阶区地层水化学特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 268-274.
Zhang Zongfeng, Zha Ming, Gao Changhai. Hydrochemical characteristics and hydrocarbon accumulation in the Chengbei fault terrace zone of Dagang oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 268-274.
- [4] Uliasz-Misiak B, Winid B. The origin and evolution of waters in the Jurassic formations of the Marginal Trough area (Poland) [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2017, 50(4): 426-437.
- [5] 卢双舫,黄文彪,李文浩,等. 松辽盆地南部致密油源岩下限与分级评价标准[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 473-480.
Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Li Wenhao, et al. Lower limits and grading evaluation criteria of tight oil source rocks of southern Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 473-480.
- [6] 唐振兴,白连德,桂盼,等. 松辽盆地南部扶新隆起老油区勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2009, 14(4): 17-20.
Tang Zhenxing, Bai Liande, Gui Pan, et al. Exploration practice in old oil regions of Fuxin Uplift in southern Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(4): 17-20.
- [7] 吴欣松,郭娟娟,黄永建,等. 松辽盆地晚白垩世古气候变化的测井替代指标[J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 103-110.
Wu Xinsong, Guo Juanjuan, Huang Yongjian, et al. Well logging proxy of the Late Cretaceous palaeoclimate change in Songliao Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(1): 103-110.
- [8] 万晓樵,吴怀春,席党鹏,等. 中国东北地区白垩纪温室时期陆相生物群与气候环境演化[J]. 地学前缘, 2017, 24(1): 18-31.
Wan Xiaqiao, Wu Huaichun, Xi Dangpeng, et al. Terrestrial biota and climate during Cretaceous in NE China[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(1): 18-31.
- [9] 陈瑞银,王汇彤,陈建平,等. 实验方法评价松辽盆地烃源岩的生排烃效率[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(5): 915-921.
Chen Ruiyin, Wang Huitong, Chen Jianping, et al. An experimental method to evaluate the hydrocarbon generation and expulsion efficiency in the Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 915-921.
- [10] 楼章华,金爱民,孙毛明,等. 松辽盆地北部东区扶杨油层地下水动力场演化与油气藏形成[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 6-9.
Lou Zhanghua, Jin Aimin, Sun Maoming, et al. Evolution of groundwater dynamic field and oil and gas reservoir formation in Fuyang reservoir in the east part of north Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(2): 6-9.
- [11] 楼章华,程军蕊,金爱民. 沉积盆地地下水动力场特征研究——以松辽盆地为例[J]. 沉积学报, 2006, 24(2): 193-201.
Lou Zhanghua, Cheng Junrui, Jin Aimin, et al. Origin and evolution of the hydrodynamics in sedimentary basins—A case study of the Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(2): 193-201.
- [12] 王君,楼章华,朱蓉,等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 449-455.
Wang Jun, Lou Zhanghua, Zhu Rong, et al. Hydrochemistry of Paleogene formation water and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in Wenliu Region in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 449-455.
- [13] 曾澍辉,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.
- [14] 梁积伟,李荣西,陈玉良. 鄂尔多斯盆地苏里格气田西部盒8段地层水地球化学特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 625-630.
Liang Jiwei, Li Rongxi, Chen Yuliang. Geochemical behaviors and genesis of formation water in 8th Member of Xiashihezi Formation in western Sulige gas field, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 625-630.

(下转第358页)

- Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(6): 1034–1040.
- [46] 任冠龙, 孟文波, 张崇, 等. 深水气井测试中天然气水合物的抑制和调控方法[J]. 断块油气田, 2018, 25(1): 107–110.
Ren Guanlong, Meng Wenbo, Zhang Chong, et al. Hydrate inhibition and control method for deep water gas well testing[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(1): 107–110.
- [47] 程青松, 龚建明, 张敏, 等. 祁连山冻土区木里三叠系烃源岩地球化学特征[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, 32(4): 84–89.
Cheng Qingsong, Gong Jianming, Zhang Min, et al. Geochemical characteristics of Triassic source rocks from the Muli Qilian Mountain permafrost[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2015, 32(4): 84–89.
- [48] 邵龙义, 吕景高, 张文龙, 等. 青海哆嗦公马矿区中侏罗统沉积环境及聚煤规律[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 180–188.
Shao Longyi, Lv Jinggao, Zhang Wenlong, et al. Sedimentary environments and coal accumulation law of middle Jurassic in Duosugongma mining area of Qinghai[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 180–188.
- [49] 邵龙义, 文怀军, 李永红, 等. 青海省天峻县木里煤田煤层气有利区块的多层次模糊数学评判[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1896–1903.
Shao Longyi, Wen Huaijun, Li Yonghong, et al. Assessment of favorable areas for coalbed methane resources exploration in the Muli coalfield of Qinghai province based on multi-layered fuzzy mathematics[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1896–1903.
- [50] 龚文强, 张永生, 宋天锐, 等. 南祁连盆地木里坳陷侏罗系烃源岩生烃潜力评价[J]. 石油天然气学报, 2013(3X): 177–179.
Gong Wenqiang, Zhang Yongsheng, Song Tianrui, et al. Evaluation of hydrocarbon generation potential of Jurassic source rocks in Muli Depression, South Qilian Basin[J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2013(3X): 177–179.

(编辑 董立)

(上接第338页)

- [15] 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.
- [16] 赵志平, 官大勇, 韦阿娟, 等. 渤海海域新生界地层水化学特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(9): 1396–1405.
Zhao Zhiping, Guan Dayong, Wei Ajuan, et al. Chemical characteristics of Neogene Formation water and the research of their key controlling factors in Bohai sea area[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(9): 1396–1405.
- [17] Li Qingguang, Ju Yiwen, Lu Weiqi, et al. Water-rock interaction and methanogenesis in formation water in the southeast Huaibei coalfield, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 77: 435–447.
- [18] 胡绪龙, 李瑾, 张敏, 等. 地层水化学特征参数判断气藏保存条件——以呼图壁、霍尔果斯油气田为例[J]. 天然气勘探与开发, 2008, 31(4): 23–26.
Hu Xulong, Li Jin, Zhang Min, et al. Judge gas reservoir preservation by chemical characteristic parameters of formation water examples from Hutubi and Huo'gruosi oil-gasfields[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2008, 31(4): 23–26.
- [19] 张汪明, 曾澍辉, 李飞, 等. 柴西地区古近系和新近系地层水化学特征及其成因[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(4): 558–568.
Zhang Wangming, Zeng Jianhui, Li Fei, et al. Hydrochemistry characteristics and origin of formation water of Paleogene and Neogene in the western Qaidam Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(4): 558–568.
- [20] 李伟, 杨金利, 姜均伟, 等. 四川盆地中部上三叠统地层水成因与天然气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(4): 428–435.
Li Wei, Yang Jinli, Jiang Junwei, et al. Origin of Upper Triassic formation water in middle Sichuan Basin and its natural gas significance[J]. Petroleum Exploration & Development, 2009, 36(4): 428–435.
- [21] 史婷婷, 成建梅, 解习农, 等. 松辽盆地北部地层水同位素特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2012, 30(2): 399–404.
Shi Tingting, Cheng Jianmei, Xie Xinong, et al. Isotopic characteristics of formation waters in the north of Songliao Basin and its geological significances[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(2): 399–404.
- [22] 李伟, 秦胜飞. 四川盆地须家河组地层水微量元素与氢氧同位素特征[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 55–63.
Li Wei, Qin Shengfei. Characteristics of trace elements and hydrogen and formation water of the Xujiahe Formation oxygen isotopes in the Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 55–63.
- [23] 王晓梅, 赵靖舟, 刘新社, 等. 苏里格气田西区致密砂岩储层地层水分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 802–810.
Wang Xiaomei, Zhao Jingzhou, Liu Xinshe, et al. Distribution of formation water in tight sandstone reservoirs of western Sulige gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 802–810.
- [24] Bozau E, Sattler C, Van B W. Hydrogeochemical classification of deep formation waters[J]. Applied Geochemistry, 2015, 52: 23–30.
- [25] 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.
- [26] 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.

(编辑 张亚雄)