



引文格式: 吴颖, 孙磊, 冯敏, 等. 天环坳陷南北部盒 8 段地层水地化特征差异性分析[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 244-253. DOI: 10.12401/j.nwg.2023112

Citation: WU Ying, SUN Lei, FENG Min, et al. Analysis on Geochemical Characteristics and Difference of Formation Water in He 8th Member in Northern and Southern Tianhuan Depression[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 244-253. DOI: 10.12401/j.nwg.2023112

天环坳陷南北部盒 8 段地层水地化特征差异性分析

吴颖^{1,2}, 孙磊³, 冯敏³, 李爱荣^{1,2}, 卢达^{1,2}

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018)

摘要: 通过对鄂尔多斯盆地天环坳陷中二叠统下石盒子组盒 8 段地层水样品测试结果的统计分析, 分别对区内南北部的地球化学特征进行研究, 对比其差异性, 分析天然气运聚和保存条件, 为勘探部署提供支持。研究显示, 天环坳陷中二叠统下石盒子组盒 8 段为偏酸性、氯化钙型地层水, 区内矿化度、 Cl^- 含量和浓度都显示为北高南低, 反映了北部铁克苏庙地区地层水封闭条件优于南部青石岭-李庄子区域, 更有利于气藏的聚集和保存。南北部地层水地化特征参数与气藏形成条件有较好的对应性。北部地区为 IV 型、V 型原始地层水, 地层水的钠氯系数低、脱硫系数低、钠钙系数低、变质系数高, 具有油气伴生水的特征, 地层封闭性较好, 利于气藏的聚集和保存; 而南部地区为 II 型、III 型、IV 型地层水, 显示较差的封闭条件, 地层水与外界有沟通, 不利于气藏的运聚和保存。

关键词: 地层水; 地化特征; 差异性; 盒 8 段; 天环坳陷

中图分类号: P618.130

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)02-0244-10

Analysis on Geochemical Characteristics and Difference of Formation Water in He 8th Member in Northern and Southern Tianhuan Depression

WU Ying^{1,2}, SUN Lei³, FENG Min³, LI Airong^{1,2}, LU Da^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 3. Exploration and Development Research Institute of Petrochina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the statistics and analysis of the test results of formation water samples of He 8th Member of Tianhuan depression, Ordos basin, the geochemical characteristics of the northern and southern parts of the area are studied, and the differences were compared. The results show that the formation water of He 8th member of Tianhuan Depression is acidic and $CaCl_2$ water type, and the mineralization degree, Cl^- content and concentration in the area are higher in the north than in the south. It reflects that the sealing condition of formation water in the Tiekeshumiao area in the north is better than that in Qingshimao - Lizhuangzi area in the south,

收稿日期: 2022-04-12; 修回日期: 2023-11-02; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金项目“鄂尔多斯盆地南部长 6 油层组地层水特征与油气富集规律研究”(41772140)。

作者简介: 吴颖(1984-), 女, 博士, 副教授, 从事石油天然气勘探与开发研究。E-mail: wuyingbiy@163.com。

which is more conducive to the accumulation and preservation of gas reservoirs. The Geo-chemical characteristic parameters of formation water in the north and south have good correspondence with the formation conditions of the gas reservoir. The formation water in the northern area is characterized by low sodium-chloride coefficient, low desulfurization coefficient, low sodium-calcium coefficient and high metamorphic coefficient. The formation water is of IV-type and V-type original formation water, which is favorable for the accumulation and preservation of gas reservoirs. In the southern area, the formation water of II-type, III-type and IV-type shows poor sealing conditions, and the formation water communicates with the outside world, which is not conducive to the accumulation and preservation of gas reservoirs.

Keywords: formation water; geochemical characteristics; difference; He 8th Member; Tianhuan depression

地层水是沉积盆地中流体的重要组成部分(杨振等, 2020; 张帆等, 2023), 参与了油气成藏的全过程。地层水既是油气运移的动力, 也是油气运移的载体, 其来源及运动规律与油气藏的聚集和保存环境有着密切的联系(柳广弟, 2009)。因此, 在一定程度上, 地层水的化学成分及其分布特征反映了油气形成和分布的特征(梁积伟等, 2013)。通过研究地层水性质和地球化学特征, 可以推断地层水的成因和演化, 指示地层流体的封闭性和演化过程, 分析气水分布规律及其保存条件(窦伟坦等, 2010)。高矿化度水、CaCl₂型地层水有利于天然气的保存, 能够阻止天然气的扩散, 为天然气提供暂时存储空间(杨振, 2020)。

随着鄂尔多斯盆地天然气勘探的不断深入, 勘探区域逐步向盆地西侧延伸, 其中天环坳陷(图1)显示了优越的油气地质条件和巨大的勘探潜力, 是上古生界天然气接替的重要勘探开发区域, 其主力含气层段中二叠统下石盒子组(P_{2x})盒8段试气显示具有很好的勘探开发前景。但是, 南北两侧勘探效果差异悬殊, 不同区域试气出水程度各异, 且出水量变化明显, 总体上天环坳陷区内南北部出水差异较大, 地层水化学特征分区明显, 气水关系复杂, 目前仅在北部铁克苏庙区域取得勘探开发突破。部分学者对该区含气层系下石盒子组(P_{2x})盒8段储层孔隙特征、地层水化学特征和气水控制因素做了部分分析(王怀长等, 2018), 认为该区地层水为来源于经过了强烈水-岩作用和蒸发浓缩作用的陆相沉积成因的常规地层水, 主要是弱动力成藏过程中的残余地层水, 整体水环境未与外界沟通, 地层水在平面上仍保留了原始成藏滞留水的特征, 形成具有边底水的构造-岩性气藏, 叠置拼接的分流河道砂体与良好的侧向泥岩封堵配置是有利的聚集场所(王建麾等, 2009), 勘探实践亦证实地层水地

球化学特征与天然气聚集保存具有明显关系(朱剑兵等, 2006)。而对于气水关系更为复杂的坳陷南部青石岭-李庄子区域仅有少数学者对天然气局部富集规律进行初步探讨, 对区域地层水地化特征差异性对比及与天然气运聚保存条件分析鲜有相关研究, 从而极大地制约了区内天然气勘探开发整体进程。

笔者通过对主力含气层段中二叠统下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水地球化学分析测试, 结合天环坳陷铁克苏庙-青石岭-李庄子区域试气成果, 运用统计分析、离子相关性分析等多种研究方法, 以鄂托克前旗为南北界限, 对主力层位中二叠统下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水地球化学特征和成因进行分析, 对比并揭示南北部的差异性, 分析天然气运聚保存条件, 为整个研究区的天然气勘探开发部署提供建议(雷易璇, 2018)。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西缘, 是一个发育于稳定克拉通盆地上的大型叠合盆地(郑萌等, 2023)。天环坳陷是鄂尔多斯盆地的二级构造单元, 位于盆地西部, 南北长条形展布, 其东部为陕北斜坡, 是构造平缓的西倾单斜, 西部为西缘断褶带, 发育断层。天环坳陷古生界先后经历了陆表海-内陆湖泊的沉积转化, 其中上古生界太原组和山西组为滨浅海海陆交互相含煤沉积, 中、上二叠统下石盒子组、上石盒子组和石千峰组为陆相碎屑岩沉积, 上古生界以陆相碎屑岩沉积为主, 纵向含气层位多、储层分布广, 主要含气层段中二叠统下石盒子组(P_{2x}), 自上而下依次可划分为盒5、盒6、盒7、盒8气层段, 其中盒8段是最主要产层, 盒8段发育浅水辫状河三角洲沉积, 含气水岩

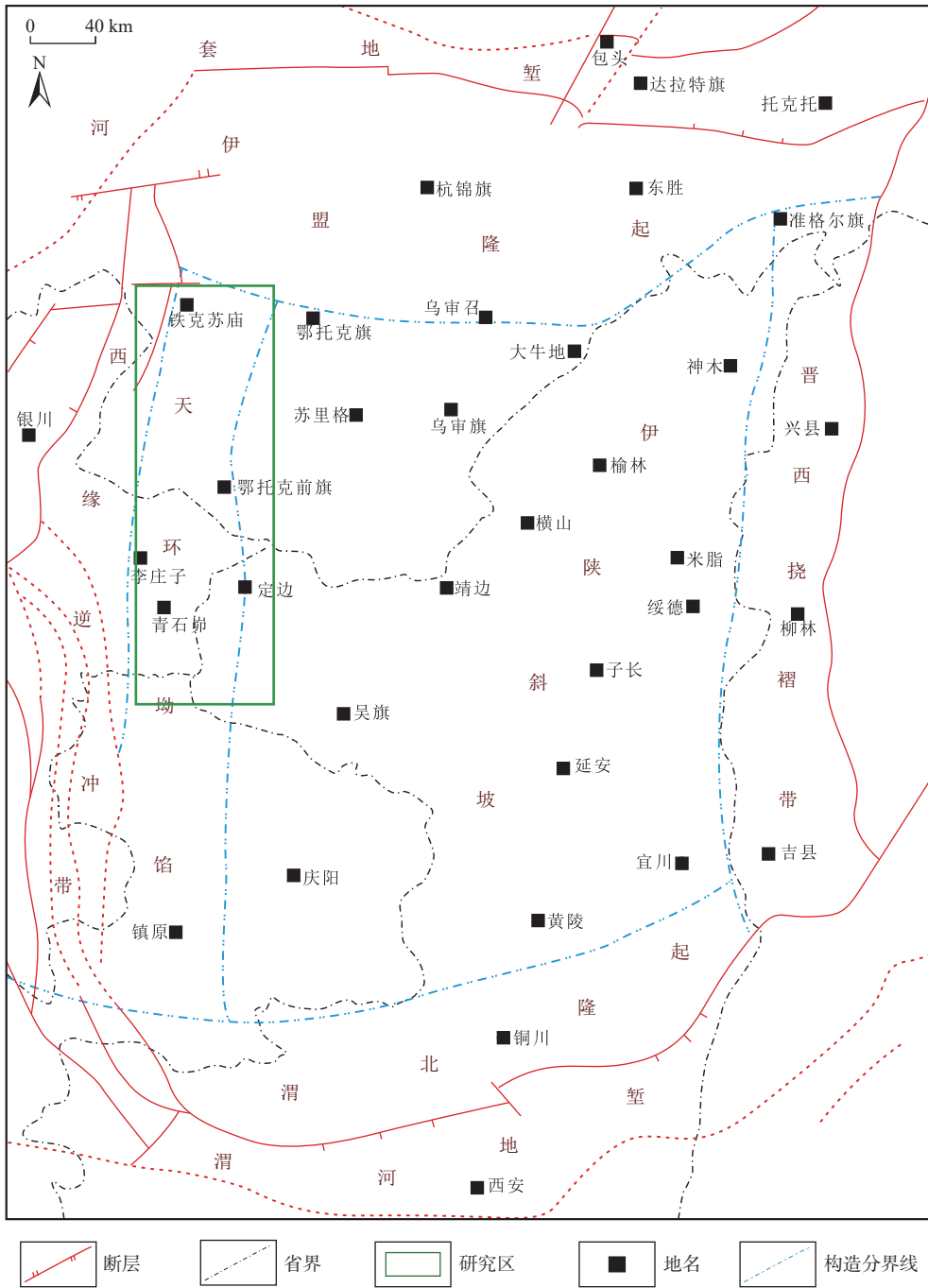


图1 研究区构造位置图

Fig. 1 Tectonic location map of the study area

性主要为中厚层岩屑砂岩、岩屑石英砂岩，储层致密且气水关系复杂，气藏主要为构造岩性气藏，气层埋藏浅，规模相对较小，具有边底水，地层水以高矿化度的常规地层水为主，多层系产水，形成“多层含气、普遍低产、气水同产”的格局(陈朝兵等, 2019)。地层水以层内水平侵入为主，但整体水环境未与外界沟通，未发生地表水补给，地层水在平面上仍保留了原始成藏滞留水的特征(张志升等, 2020)。

天环坳陷铁克苏庙-青石岭-李庄子区域主力含气层段下石盒子组(P_2x)盒8段在勘探过程中虽展现了较好的勘探潜力，部分井试气获得了较高的工业气流，但区域上产能差异较大，也出现了低产气流井、气水同出井和纯水井，气藏内无统一气水界面，气水分布十分复杂。截至2021年12月底，区内获工业气流井为完钻天然气探井的9%，51%天然气探井有不同程度的产水，探井试气出水率高达50%，其中11%为

纯出水井,产水量为3~62 m³/d不等,反映了区内复杂的气水关系。此外,出水特征也表现出明显的南北地区差异性。北部铁克苏庙砂带探井试气产水率较高,几乎每口井均有试气出水的现象,纯出水井占比大,单井产水量大(如鄂22井试气产水为72 m³/d),出水范围广、面积大。南部青石岭-李庄子砂带,试气情况相对复杂,在构造高部位试气产量较高,不出水,在构造低部位气水同出,出水量大小不一。因此,南部青石岭-李庄子区域既有局部高产气流井,也有气水同出井,纯出水井的比例相对较小。

研究区勘探现状表明,天环坳陷古生界主力含气层系石盒子组盒8段试气出水南北差异较大,气水关系复杂,控制因素不明确,严重阻碍了该区天然气勘探进展。

2 地层水地球化学特征及差异

地层水化学特征和水型的变化显示了地层沉积、埋藏与变质过程的演化,其离子组成和浓度等特征记录了油气层流体运移过程与分布特征(李贤庆等,2002),反映了油气藏封堵条件好坏及油气保存条件的优劣(钱诗友等,2009)。笔者从地层水离子特征、矿化度、化学参数特征和地层水类型等4个方面进行研究,总结研究区地层水地球化学差异性特征。

2.1 地层水 pH 值和总矿化度

天环坳陷铁克苏庙-青石岭-李庄子区域下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水29个样品统计结果显示,其pH值为6.0~7.4,以6.0最为普遍,偏酸性。这是因为油气生产过程中伴生的有机酸流体影响地层水显酸性(杨振等,2020)。

天环坳陷铁克苏庙-青石岭-李庄子区域下石盒子组(P_{2x})盒8段29口井的地层水水样数据统计表明,地层水总矿化度在平面上的分布范围为18.78~75.69 g/L,平均为41.42 g/L,纵向上整体低于下伏的马家沟组地层水矿化度(130~356 g/L),高于地表水(一般约为0.1 g/L)。对南北部数据分析发现,北部的铁克苏庙砂带地层水矿化度为38.26~75.69 g/L,平均为56.37 g/L,所有数据点均高于海水矿化度(35 g/L),南部青石岭-李庄子区域地层水矿化度为18.78~50.80 g/L,平均为31.46 g/L。平面上从北部铁克苏庙区域到南部青石岭-李庄子区域,地层水矿化度有逐渐降低的趋势,表现出明显的南北区带差异性。

由于地层水矿化度与储层封闭性有良好的对应

关系,地层水的矿化度可以反映出储层封闭条件的好坏(王运所等,2010)。封闭条件好的储层,其地层水的矿化度相对较高(楼章华等,2011)。研究区下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水矿化度基本以鄂托克前旗为界,北部铁克苏庙砂带地层水矿化度数值较高(图2),以50~70 g/L为主要分布区间,以苏359、鄂14井为中心存在两个高值区且相互贯通连片分布;矿化度高值区与盒8段砂体厚度分布趋势一致,即砂体中心部位储层厚度大,地层水的总矿化度值也越高,反映了由砂体边缘向储层中心地层水逐渐浓缩的特点。说明北部铁克苏庙砂带矿化度高值区的地层水,属于储层内部的原生地层水,气藏封闭条件好;南部青石岭-李庄子区域地层水矿化度在平面上较为分散,相互独立不连续,且矿化度较低,主值区间小于40 g/L,表明地层水可能与外界有沟通,气藏封闭条件一般。

2.2 地层水阴、阳离子组成

天环坳陷铁克苏庙-青石岭-李庄子区域下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水阴离子主要为Cl⁻、SO₄²⁻和HCO₃⁻,阳离子主要为K⁺、Na⁺、Ca²⁺和Mg²⁺。这些离子的组成和浓度,受控于地球化学成因,是盆地演化的结果。

通过统计分析研究区下石盒子组(P_{2x})盒8段20口井的水样数据,结果表明,整个研究区地层水中Cl⁻含量为9797~46300 mg/L,其含量占阴离子总量最大为95.89%(鄂50井)(表1),最小为81.97%(李18井),平均为91.34%;SO₄²⁻离子含量为513~2813 mg/L,平均为1645 mg/L,占阴离子总量的3.15%~14.40%,平均为6.86%;HCO₃⁻离子含量为136~782 mg/L,平均为363 mg/L,占阴离子总量的0.47%~6.54%,平均为1.79%。显示水体为封闭缺氧环境。阳离子中,K⁺+Na⁺离子总量在5248~10033 mg/L,平均为7538 mg/L,占阳离子总量的35.61%~78.15%,平均为55.95%;Ca²⁺离子含量在1145~16375 mg/L,平均为6889 mg/L,占阳离子总量的16.77%~59.75%,平均为41.28%;Mg²⁺离子含量偏低,平均为569 mg/L。

此外,对研究区南北部数据对比发现,南北部地层水主要化学组成及浓度存在一定的差异性。北部铁克苏庙区域下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水阴离子以Cl⁻离子为主,Cl⁻离子含量为22200~46300 mg/L,平均含量为34033 mg/L,在阴离子总量中的最大占比为95.9%,最小为87.8%,平均为93.5%,而SO₄²⁻、HCO₃⁻含量很低,SO₄²⁻离子含量平均占阴离子总量的5.7%,HCO₃⁻离子含量为189~463 mg/L,平均为277 mg/L,

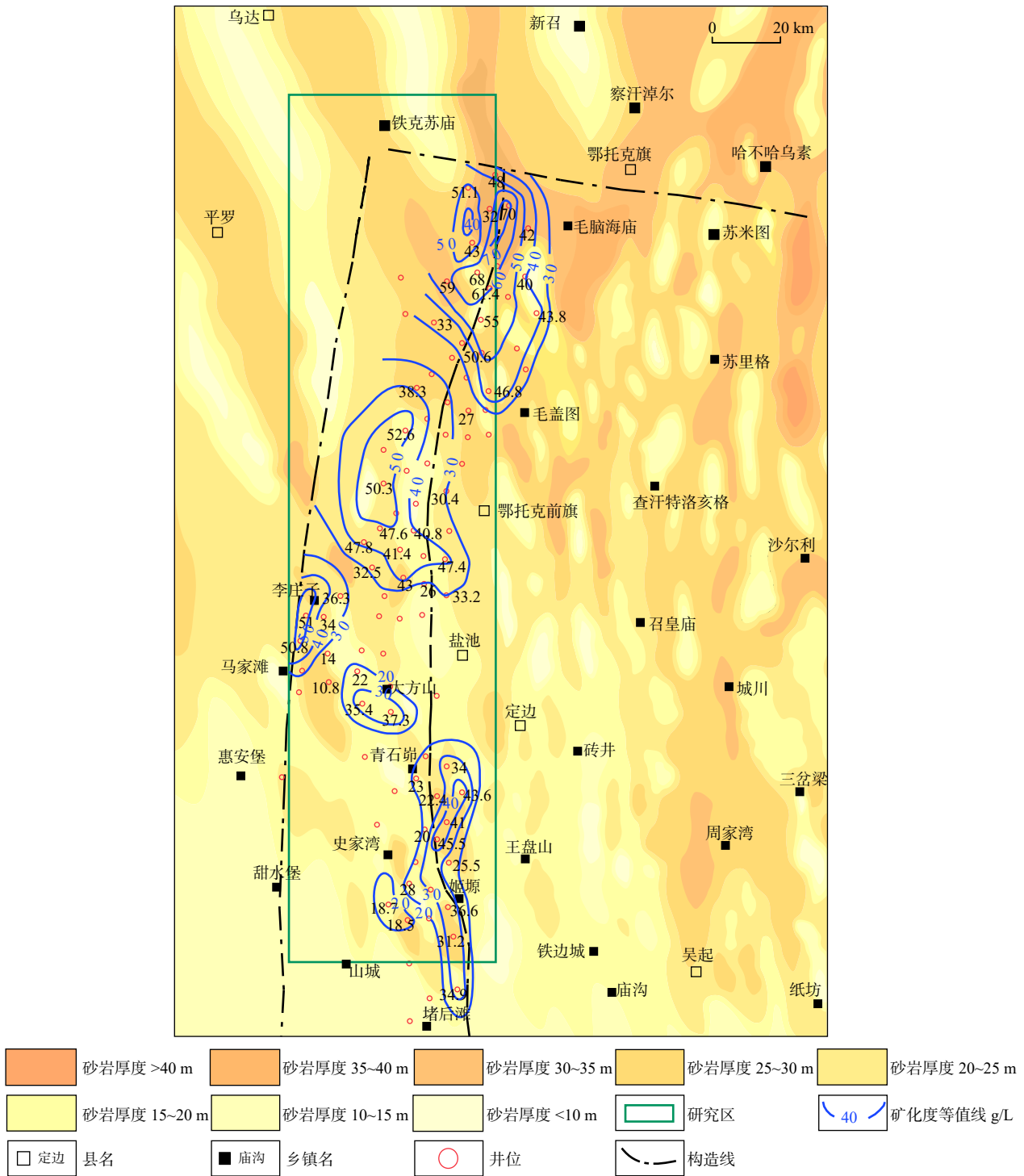


图2 研究区下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水矿化度等值线图

Fig. 2 Contour map of mineralization degree of formation water in He 8th member of Xiashihezi Formation (P_{2x}) in the study area

占阴离子总量的0.55%~1.21%(平均为0.78%);阳离子以Ca²⁺为主,平均含量为54.04%;北部地层水较高的矿化度和Cl⁻离子含量,说明地层水处于封闭、缺氧的还原环境。南部青石峁-李庄子区域盒8地层水阴离子也以Cl⁻离子为主,Cl⁻离子含量为8 116~30 435

mg/L,平均含量为17 214 mg/L,在阴离子总量中的平均占比为90.2%;SO₄²⁻离子含量在阴离子总量中平均占比为7.4%;HCO₃⁻离子平均含量为636 mg/L,占阴离子总量的2.3%;阳离子中含量最高的是K⁺+Na⁺离子,平均含量为66.90%;南部Cl⁻离子浓度和相对含量都

表1 研究区下石盒子组(P_{2x})盒8段南北部地层水主要化学离子含量Tab. 1 Content of main chemical ions in formation water in the northern and southern part in He 8th Member of Xiashihezi Formation (P_{2x}) in the study area

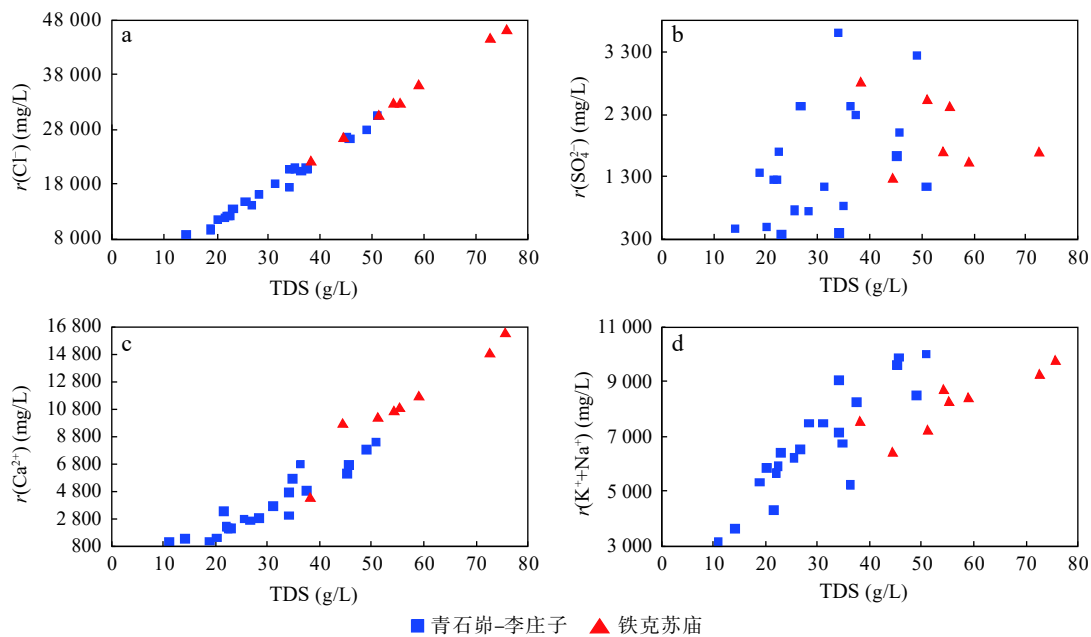
地区	主要离子含量(mg/L)						矿化度(mg/L)
	K^+Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	
铁克苏庙	6 425~9 778	4 410~16 375	182~1 926	22 200~46 300	1 268~2 813	189~463	38 263~75 694
	8 208 (8)	11 095 (8)	822 (8)	34 034 (8)	1 932 (8)	277 (8)	56 367 (8)
青石岭-李庄子	5 248~10 033	1 145~8 426	193~824	9 797~30 435	513~2 440	136~782	18 780~50 795
	7 091 (12)	4 085 (12)	401 (12)	18 008 (12)	1 454 (12)	419 (12)	31 458 (12)

注: 表中数据格式为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值} (\text{样品数})}$ 。

低于北部铁克苏庙砂带, 表明地层水较活跃, 地层水封闭条件较差。

从研究区下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水矿化度与阴阳离子浓度的关系图(图3)可以发现, Cl^- 浓度随总矿化度增大而增高, 其与总矿化度为良好的线性正相关关系(图3a), 相关系数达0.99; Ca^{2+} 离子浓度与总

矿化度为正相关关系(图3c), 相关性次之, K^+Na^+ 离子浓度与总矿化度的相关性比 Cl^- 离子的略差, 显示为随总矿化度增大而升高(图3d), 而 SO_4^{2-} 离子浓度与总矿化度则表现为明显的无相关性(图3b)。因此, 研究区下石盒子组(P_{2x})盒8段南北部地层水的总矿化度大小主要取决于 Cl^- 、 Ca^{2+} 及 K^+Na^+ 离子的含量。

图3 研究区下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水矿化度(TDS)与主要阴阳离子浓度(r)的关系图Fig. 3 Relationship between mineralization degree (TDS) and main anion and cation concentration (r) of formation water in He 8th member of Xiashihezi formation (P_{2x}) in the study area

2.3 地层水水型

水型可以指示油气运聚和保存条件的优劣。研究区地层水水型分类选用苏林的标准, 显示为氯化钙型水(表2)。氯化钙($CaCl_2$)型水分布在水动力受阻、动力条件相对弱的区域, 是深盆滞留水, 地层水浓缩作用强烈, 并有脱硫化发生, SO_4^{2-} 含量减少, Cl^- 和 Ca^{2+} 含量增加, 反映了地层水处于良好的封闭还原环境,

特别利于气藏的聚集和保存(孟旺才等, 2018)。

天环坳陷下石盒子组(P_{2x})盒8段南北部表现出不同的产水特征, 单从水型来看, 不能反映出其复杂的地层水分布特征及规律。博雅尔斯基通过对钠氯系数的大小进行研究, 将氯化钙($CaCl_2$)型地层水细分为5类(表3)(楼章华等, 2006; 王泽明等, 2010)。

结合研究区地层水离子特征, 以及地层水矿化度

表2 研究区下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水地球化学参数及分类

Tab. 2 Formation water geochemical parameters and classification of He 8th member of Xiashihezi formation in the study area

地区	钠氯系数 $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$	脱硫系数 $2 \times 100 \times r(\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^-)$	钠钙系数 $r(\text{Na}^+)/r(\text{Ca}^{2+})$	变质系数 $1/2 \times r(\text{Cl}^-) - r(\text{Na}^+)/r(\text{Mg}^{2+})$	水型
铁克苏庙	$0.32 \sim 0.52$ $0.38 (8)$	$2.43 \sim 9.37$ $4.57 (8)$	$0.52 \sim 1.49$ $0.72 (8)$	$3.51 \sim 36.43$ $15.17 (8)$	CaCl ₂
青石岭-李庄子	$0.40 \sim 0.84$ $0.65 (21)$	$1.44 \sim 15.27$ $6.27 (21)$	$0.67 \sim 4.05$ $1.99 (21)$	$1.54 \sim 13.26$ $5.77 (21)$	CaCl ₂

注：表中数据格式为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值} (\text{样品数})}$ 。

值在图2中的分布,认为北部铁克苏庙砂带下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水分布连片,地层水矿化度较高,钠氯系数较低,平均为0.38,主要为IV型、V型原始地层水,反映了地层较封闭,气藏封存条件好;南部青石岭-李庄子区域地层水分布较为分散、不集中,多呈孤

立状分布,且矿化度较北部铁克苏庙砂带低,钠氯系数为0.40~0.84,平均为0.64,主要以II型、III型、IV型地层水为主(表3),反映了地层封闭条件较差,地层水与外界有沟通,不利于气藏的运聚和保存(王晓梅等,2012)。

表3 博亚尔斯基对氯化钙型地层水的详细分类

Tab. 3 Classification of the calcium chloride type water

序号	Na/Cl	水型	石油地质意义
1	> 0.85	I	表现出水的运动速度相当大的水动力活跃的特点,这个地带保存条件差,保存油气藏的前景不大
2	0.75~0.85	II	具有沉积盆地的积极水动力带和较稳定的静水带之间过渡带的特点,一般认为是烃类保存条件较差的地区
3	0.65~0.75	III	水动力条件平缓,有利于保存油气,认为是保存烃类较好的有利环境
4	0.50~0.65	IV	具有烃类聚集与外界隔绝;并且有残余水存在的特征是烃类保存的有利地带。
5	< 0.50	V	具有古代残余海水的特征,在溶解固体的浓度和溶解组分的比率上,在原始沉积时就被高度变质。这是烃类聚集最有希望的区域。需具备的附加条件有:①碘化物>1 mg/L; ②溴化物>300 mg/L; ③Cl ⁻ /Br<350; ④SO ₄ ²⁻ ×100/Cl ⁻ <1

3 地层水化学特征参数及天然气成藏差异性

地层水的化学特征一般有钠氯系数、脱硫系数、镁钙系数和变质系数等,其形成原因与变化规律都指示着油气的运移与保存情况(徐轩等,2017;吴浩等,2019)。

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

钠氯系数是地层水变质作用发生程度的反映,其值越小表明地层水封闭环境为越好的还原环境,指示烃类保存越好(楼章华等,2006)。天环坳陷下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水的钠氯系数主要为0.32~0.84,平均为0.57。平面上由北向南钠氯系数逐渐增高,北部铁克苏庙区域钠氯系数绝大多数小于0.50,整体偏低,反映地层水浓缩性好,水体环境较封闭,有

利于烃类的保存;南部青石岭-李庄子区域钠氯系数最大值为0.84,多数值大于0.50,相对高于北部,反映其水体环境不如北部区域。

从钠氯系数与矿化度关系图(图4)也可以看出,整个研究区的钠氯系数与矿化度成反比。其中,北部铁克苏庙区域矿化度高而钠氯系数低,钠氯系数随矿化度的增加有减小的趋势。南部青石岭-李庄子区域钠氯系数与矿化度相关性则更好。

3.2 钠钙系数 $r(\text{Na}^+)/r(\text{Ca}^{2+})$

天环坳陷下石盒子组(P_{2x})盒8段地层水钠钙系数为0.52~4.05,平均为1.64,其中北部铁克苏庙区域平均为0.72,南部青石岭-李庄子区域平均为1.99。研究区盒8段地层水钠钙系数的分布继承了钠氯系数的分布规律,也表现出北低南高的差异特征。进一步说明北部铁克苏庙区域的地层水封闭性较好,更有利于气藏的聚集与保存。

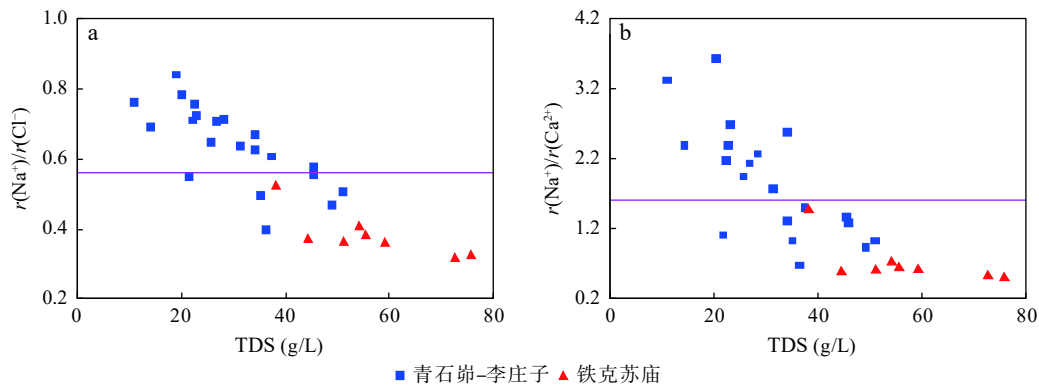


图4 研究区下石盒子组(P_2x)盒8段地层水地化参数特征与矿化度相关性

Fig. 4 Relationship between geochemical parameter characteristics and salinity formation water in He 8th member of Xiashihezi formation (P_2x) in the study area

3.3 脱硫系数 $2 \times 100 \times r(\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^-)$

脱硫系数表现了脱硫酸作用的强弱,与地层的封闭性呈负相关关系。越小的脱硫系数值反映出越强的脱硫酸作用和越封闭的地层条件,更利于气藏的运聚和保存。天环坳陷下石盒子组(P_2x)盒8段地层水的脱硫系数为1.44~15.27,平均为5.80。其中北部铁克苏庙地区平均4.57,南部青石崮-李庄子区域平均为6.27。因此,相较南部青石崮-李庄子区域,区内北部铁克苏庙的地层水有更好的封闭性,且更有利于气藏聚集与保存。

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

变质系数是指在矿物溶解、沉淀过程中阳离子交换程度的强弱。变质系数的值越大,地层水水岩作用越强,离子交换程度越大,变质程度越强,则地层封闭越好,越有利于气藏封闭和保存。天环坳陷下石盒子组(P_2x)盒8段地层水变质系数为1.54~36.43,平均为8.37。其中,北部平均为15.17,南部平均为5.77,高值区主要集中在北部铁克苏庙区域,最高值为36.43(鄂16井)。

研究区北部铁克苏庙区域相对于南部青石崮-李庄子区域具有较低钠氯系数、脱硫系数、钠钙系数和相对较高的变质系数,表明北部铁克苏庙区域地层水的水岩作用强烈,离子交换程度越强,反映出气藏封闭和保存条件明显优于南部青石崮-李庄子区域。

4 结论

(1)天环坳陷下石盒子组(P_2x)盒8段地层水类型南北存在明显差异,北部铁克苏庙区域为 CaCl_2 型地层水,细分为IV型、V型较封闭的原始地层水,反映了

地层封闭性较好,利于气藏的聚集和保存。而南部青石崮-李庄子区域地层水虽同为 CaCl_2 型地层水,但以II型、III型、IV型为主,显示地层封闭条件较差,地层水与外界有沟通,不利于气藏的运聚和保存。可见研究区内北部区域地层水封闭条件优于南部区域。

(2)天环坳陷下石盒子组(P_2x)盒8段地层水南北部阴、阳离子含量存在明显差异性。北部铁克苏庙区域 Cl^- 含量和浓度明显高于南部青石崮-李庄子区域,北部铁克苏庙区域以 Ca^{2+} 为主,南部青石崮-李庄子区域以 K^+Na^+ 为主。表明北部铁克苏庙区域地层水处于较封闭、缺氧的还原环境,而南部青石崮-李庄子区域地层水较活跃,显示地层水封闭条件较差。

(3)天环坳陷下石盒子组(P_2x)盒8段地层水化学特征参数具有明显的南北部差异性,相比较南部青石崮-李庄子区域,北部铁克苏庙区域地层水钠氯系数低、脱硫系数低、钠钙系数低、变质系数高,具有油气伴生水的特征,反映了地层封闭性较好,利于气藏的聚集和保存,气藏形成条件相对较优。而南部青石崮-李庄子区域地层水化学特征参数显示地层封闭条件较差,地层水与外界有沟通,不利于气藏的运聚和保存。

(4)天环坳陷下石盒子组(P_2x)盒8段地层水主要是弱动力成藏过程中的残余地层水,研究区地层水类型及其地球化学参数存在巨大差异,源于低生烃强度和低构造位置背景下储层强非均质性和微构造的共同作用。

参考文献(References):

陈朝兵,杨友运,邵金辉,等.鄂尔多斯东北部致密砂岩气藏地

- 层水成因及分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(2): 313-325.
- CHEN Zhaobing, YANG Youyun, SHAO Jinhui, et al. Origin and distribution of formation water in tight sandstone reservoirs in the northeastern Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2019, 40(2): 313-325.
- 窦伟坦, 刘新社, 王涛. 鄂尔多斯盆地苏里格气田地层水成因及气水分布规律[J]. *石油学报*, 2010, 31(5): 767-773.
- DOU Weitan, LIU Xinshe, WANG Tao. The origin of formation water and the regularity of gas and water distribution for the Sulige gas field, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(5): 767-773.
- 雷易璇. 关于地层水特征及其地质意义概述[J]. *化学工程与装备*, 2018, (4): 129-131+139.
- LEI Yixuan. The characteristics of formation water and its geological significance are summarized[J]. *Chemical Engineering and Equipment*, 2018, (4): 129-131+139.
- 李贤庆, 侯读杰, 柳常青, 等. 鄂尔多斯中部气田下古生界水化学特征及天然气藏富集区判识[J]. *天然气工业*, 2002, 22(4): 10-14.
- LI Xianqing, HOU Dujie, LIU Changqing, et al. Hydrochemical characteristics of Lower Paleozoic formation water and identification of natural gas enrichment area in central gas fields in Ordos[J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(4): 10-14.
- 梁积伟, 李荣西, 陈玉良, 等. 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, et al. Geochemical behaviors and genesis of formation water in 8th member of Xiashihezi formation in western Sulige gas field, Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2013, 34(5): 625-630.
- 柳广弟. *石油地质学(4版)*[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- LIU Guangdi. *Petroleum geology(4th ed.)* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- 楼章华, 尚长健, 姚根顺, 等. 桂中坳陷及周缘海相地层油气保存条件[J]. *石油学报*, 2011, 32(3): 432-441.
- LOU Zhanghua, SHANG Changjian, YAO Genshun, et al. Hydrocarbon preservation conditions in marine strata of the Guizhong depression and its margin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(3): 432-441.
- 楼章华, 朱蓉. 中国南方海相地层水文地质地球化学特征与油气保存条件[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(5): 584-593.
- LOU Zhanghua, ZHU Rong. Hydrogeological and hydrogeochemical characteristics and hydrocarbon Preservation conditions in marine strata in southern China[J]. *Oil and Gas Geology*, 2006, 27(5): 584-593.
- 孟旺才, 李云, 付国民, 等. 榆林北部气田山2段地层水化学特征与天然气聚集关系[J]. *西北地质*, 2018, 51(2): 203-208.
- MENG Wangcai, LI Yun, FU Guomin, et al. Relationship between chemical characteristics of formation water and natural gas accumulation within Shan 2 Member of Shanxi formation in North Yulin gas field[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(2): 203-208.
- 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.
- 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.
- 王怀长, 任德生, 侯云东, 等. 天环凹陷北部上古生界气水分布主控因素分析[J]. *特种油气藏*, 2018, 25(6): 32-36.
- WANG Huaichang, REN Desheng, HOU Yundong, et al. Min-controlling factor analysis of the Upper Gas-Water distribution in Northern Tianhuan depression[J]. *Special Oil Gas Reservoirs*, 2018, 25(6): 32-36.
- 王建麾, 李仲东, 过敏, 等. 杭锦旗地区上古生界地层水成因[J]. *新疆石油地质*, 2009, 30(1): 65-67.
- WANG Jianhui, LI Zhongdong, GUO Min, et al. Origin of formation water of Upper Paleozoic in Hangjinqi area in Ordos Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30(1): 65-67.
- 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 and Gas Geology*, 2012, 33(5): 802-810.
- 王运所, 许化政, 王传刚, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界地层水分布与矿化度特征[J]. *石油学报*, 2010, 31(5): 748-761.
- WANG Yunsuo, XU Huazheng, WANG Chuangang, et al. Characteristics of the salinity and distribution of the Neopaleozoic formation water in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(5): 748-761.
- 王泽明, 鲁宝菊, 段传丽, 等. 苏里格气田苏20区块气水分布规律[J]. *天然气工业*, 2010, 30(12): 37-40.
- WANG Zeming, LU Baoju, DUAN Chuanli, et al. Gas-water distribution pattern in Block 20 of the Sulige gas field[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(12): 37-40.

- 吴浩, 纪友亮, 周勇, 等. 南堡凹陷南部古近系深层优质储层成因[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(3): 553–569.
- WU Hao, JI Youliang, ZHOU Yong, et al. Origin of the Paleogene deep burial high-quality reservoirs in the southern Nanpu sag[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(3): 553–569.
- 徐轩, 胡勇, 邵龙义, 等. 低渗致密砂岩储层充注模拟实验及含气性变化规律: 以鄂尔多斯盆地苏里格气藏为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(6): 1323–1331.
- XU Xuan, HU Yong, SHAO Longyi, et al. Experimental simulation of gas accumulation mechanism in sandstone reservoir: A case study of Sulige gas field, Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(6): 1323–1331.
- 杨振, 朱世发, 贾业, 等. 鄂尔多斯盆地天环坳陷北部山1-盒8段地层水地球化学特征及成因[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(7): 2634–2642.
- YANG Zhen, ZHU Shifa, JIA Ye, et al. Geochemical characteristics and genesis of formation water in Shan 1st to He 8th member in northern Tianhuan depression, Ordos basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(7): 2634–2642.
- 杨振. 鄂尔多斯盆地天环北部山1与盒8段气水分布规律研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2020.
- YANG Zhen. Study on the distribution regulation of gas and water in the north Tianhuan depression, Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- 张帆, 王广才, 张茂省, 等. 产出水识别及受污染地下水水化学和氢氧稳定同位素特征[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 98–108.
- ZHANG Fan, WANG Guangcai, ZHANG Maosheng, et al. Identification of Produced Water and Characteristics of Hydrochemistry and Stable Hydrogen–Oxygen Isotopes of Contaminated Groundwater[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 98–108.
- 张志升, 王小军, 冯立军, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长8高阻水层成因分析与识别[J]. *西北地质*, 2020, 53(2): 245–251.
- ZHANG Zhisheng, WANG Xiaojun, FENG Lijun, et al. Genetic analysis and identification of Yanchang 8 high-resistivity water layer in Huaqing Area, Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(2): 245–251.
- 郑萌, 梁积伟, 冯振伟, 等. 鄂尔多斯盆地中部寒武纪岩相古地理研究[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 352–368.
- ZHENG Meng, LIANG Jiwei, FENG Zhenwei, et al. Lithofacies Paleogeography of the Cambrian in the Central Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 352–368.
- 朱剑兵, 陈丽华, 纪友亮, 等. 鄂尔多斯盆地西缘逆冲带上古生界孔隙发育影响因素[J]. *石油学报*, 2006, 27(3): 37–41.
- ZHU Jianbing, CHEN Lihua, JI Youliang, et al. Influence factors on the development of Upper Paleozoic pores in the thrust belt of the western margin of the Ordos Basin[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2006, 27(3): 37–41.