

鄂尔多斯盆地南部地区上三叠统延长组6段 地层水成因及其油气意义

刘福田¹,李荣西¹,左智峰²,刘雪峰³,赵帮胜¹,吴小力¹,李得路¹

(1. 长安大学 地球科学与资源学院,陕西 西安 710054; 2. 中国石油 长庆油田分公司 勘探部,陕西 西安 710021;
3. 延长油田股份有限公司 杏子川采油厂,陕西 延安 717400)

摘要:鄂尔多斯盆地南部地区延长组6段(长6段)地层水化学分析结果表明,地层水总矿化度较高,离子以 Cl^- 、 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 和 Ca^{2+} 占绝对优势,水型主要为 CaCl_2 型。总矿化度主要受 Cl^- 和 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 控制,纵向上,其随深度的增加具有递增趋势,反映深部地层水逐渐浓缩,环境封闭性增强。平面上总矿化度与砂体厚度具有较好的一致性,沉积相控制了总矿化度的分布。南部地区长6段地层水具有较小的钠氯系数、镁钙系数、脱硫系数和阳离子交换系数,较大的变质系数,表明长6段地层水整体位于交替停滞带,为封闭缺氧的还原环境,有利于油气聚集和保存。分析表明,南部地区长6段地层水为与地表水隔绝的深层封闭水,总矿化度及 Ca^{2+} 浓度均与孔隙度具有一定正相关关系,结合区域热演化史,综合表明长6段地层水成因与成岩作用和有机质的热演化等有密切联系,其是经过较强浓缩变质作用并受油气等有机流体影响的原始沉积成因水。综上所述,长6段油气伴生地层水反映的盆地南部油气藏处于稳定封闭的环境下,油气勘探前景良好。

关键词:地球化学;地层水成因;延长组;上三叠统;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE133

文献标识码:A

Genesis of formation water in the 6th member of the Upper Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin and its petroleum significance

Liu Futian¹, Li Rongxi¹, Zuo Zhifeng², Liu Xuefeng³, Zhao Bangsheng¹, Wu Xiaoli¹, Li Delu¹

(1. School of Earth Science and Land Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Division and Exploration, Changqing Oilfield Co. Ltd., PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 3. Xingzichuan Oil Production Plant, Yanchang Oil Field Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi 717400, China)

Abstract: Chemical analysis of formation water in the 6th member of Yanchang Formation (Chang 6 member) in the southern Ordos Basin reveals that the formation water is high in total salinity; Cl^- , $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ and Ca^{2+} are dominant, and thus the water is of CaCl_2 type. Vertically, the total salinity, mainly controlled by ions of Cl^- and $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$, tends to increase with increasing depth, demonstrating the ever-condensing feature of formation water with depth and the ever-growing sealing conditions subsurface. Laterally, the distribution of the total salinity is relatively consistent with the sand body thickness, and is controlled by sedimentary facies. Given that the formation water in Chang 6 member is characterized by low sodium-chloride ratio, magnesium-calcium ratio, coefficient of desulfurization and exchange coefficient of cations, and high metamorphism coefficient in chemistry, we are sure that the formation water therein is located in alternating stagnant zones, a closed anoxic and reducing environment, which is conducive for hydrocarbon accumulation and preservation. Besides, the formation water therein belongs to the enclosed deep water isolated from the surface water, and both its total salinity and Ca^{2+} concentration have a certain positive correlation with porosity of Chang 6 member. Accordingly we may conclude that the origin of formation water in the area is closely related with the diagenesis and thermal evolution of organic matters, based on the regional thermal evolution history. What's more, it is original sedimentary wa-

收稿日期:2017-10-15;修订日期:2018-08-20。

第一作者简介:刘福田(1993—),男,博士研究生,油气地质和应用地球化学。E-mail:liufutian2016@163.com。

通讯作者简介:李荣西(1966—),男,教授,油气地质与勘探。E-mail:rongxi99@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41772118);国家重点研发计划项目(2016YFC0601002);国家青年科学基金项目(41602128);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310827172101)。

ter, having undergone strong condensation and metamorphism and been affected by organic fluids such as oil and gas. All in all, the formation water associated with oil and gas in the 6th member of Yanchang Formation in the southern Ordos Basin manifests that the hydrocarbon reservoirs in the southern part of the basin is in a stable and closed environment, and the prospects for its oil-gas exploration are brighter.

Key words: geochemistry, formation water, Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin

地层水作为沉积盆地主要流体之一,与石油、天然气和成矿溶液等以不同形式共存于同一地层流体系统中,其与围岩和共存流体间长期复杂的水岩反应和能量物质交换,确定了彼此之间密切的地球化学联系^[1-4]。含油气盆地中地层水作为油气运移的动力和载体,在烃类物质热演化到油气生运聚散过程中都发挥了重要作用^[5-11]。地层水中必然保存有油气等流体成因和运聚散失的相关信息^[12-14],对其地球化学特征和成因研究,已成为评价油水分布及其保存控制条件的重要手段和有效方法。

鄂尔多斯盆地作为中国多能源矿产开发基地之一,其油气并举勘探取得了举世瞩目的成就^[15]。近年

来,鄂尔多斯盆地深湖相大套致密砂体非常规资源(致密油气等)勘探取得突破^[16-18],为盆地全区开辟了新的勘探方向。鄂尔多斯盆地伊陕斜坡南部地区延长组 6 段(长 6 段)主要为半深湖-深湖相沉积,发育了大量浊积水道^[19],具有良好的油气勘探前景(图 1)。近年来,勘探结果表明,鄂尔多斯盆地南部地区为多层系复合含油气区,长 6 段以近源优势和大片砂体相连成为主要的勘探和开发层系^[20]。但是,该区岩性油气藏分布相对集中,含水率普遍较高,严重影响了盆地南部增储上产的战略目标。而前人对该区的研究也多集中在沉积相和油气基础地质评价方面^[20-23],研究程度总体较低,不能满足新区快速勘探突破的任务需求。

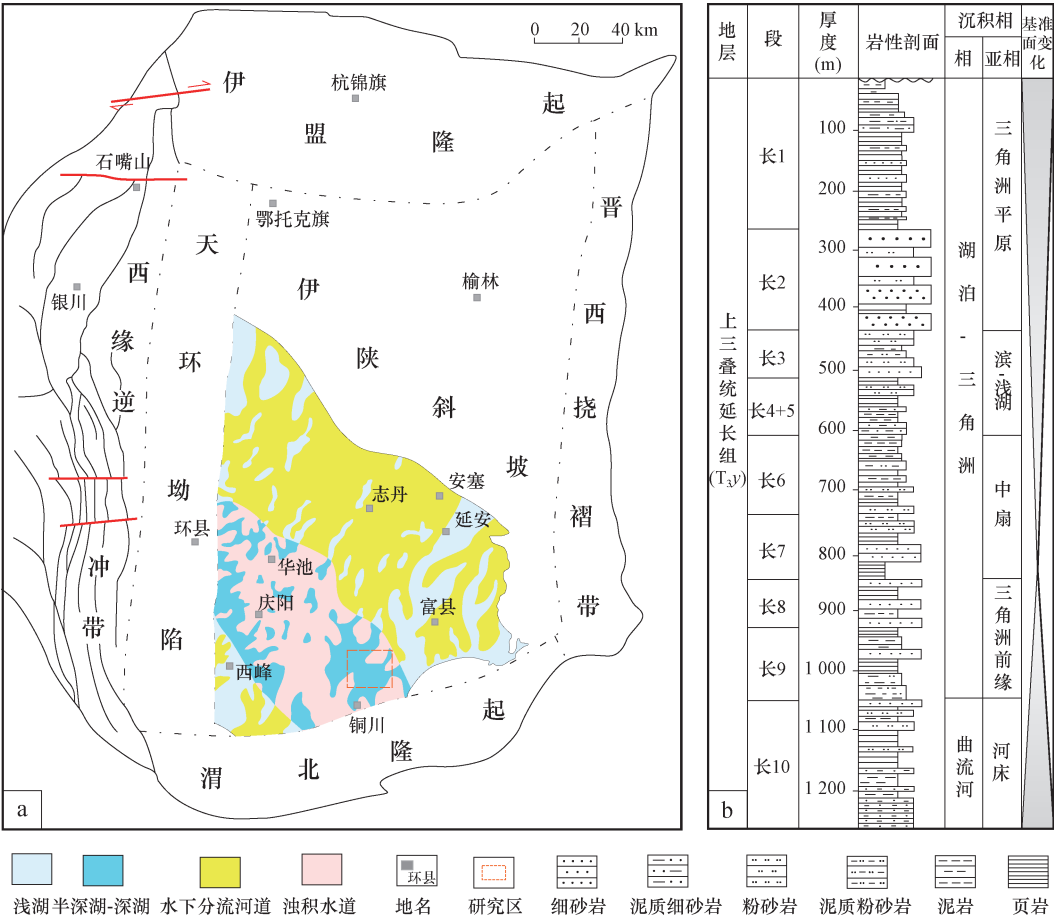


图 1 鄂尔多斯盆地南部地区位置及延长组沉积特征^[16,19,24]

Fig. 1 Location of the southern Ordos Basin and the sedimentary characteristics of the Yanchang Formation there^[16,19,24]

a. 研究区区域位置及沉积相简图; b. 研究区上三叠统延长组沉积特征

本文通过系统收集研究区长6段地层水资料,对其地球化学特征和成因进行分析研究,以期为该区区长6段油气运聚保存规律和油气勘探等提供参考。

1 区域地质概况

研究区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡南部(图1a),整体构造平缓,地层倾角小于 1° ,为一西倾的单斜,局部发育低幅度的鼻状隆起。区域探井揭示研究区中生界发育较全,其中上三叠统延长组为鄂尔多斯盆地主要的含油层,根据沉积特征自下而上可进一步分为长10—长1段,主要岩性为灰色—灰绿色细砂岩、泥质细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩和灰黑色泥岩(图1b)。

在晚三叠世延长组沉积时期,受印支运动的影响,鄂尔多斯盆地进入内陆湖盆演化阶段。长10—长7段沉积期,为湖盆形成到发展的湖进期,至长7段沉积期湖盆演化达到全盛,研究区沉积了一套半深湖—深湖相优质烃源岩和浊积砂体。至长6段沉积期湖盆逐渐萎缩,为三角洲主要建设阶段,北东向发育的曲流河三角洲携带大量陆源碎屑物质向庆阳—黄陵一带湖盆中心推进,形成大面积的浊积水道和三角洲前缘滑塌等成因的浊流沉积(图1a),并在湖盆周缘发育多个大型湖泊三角洲沉积体系。之后长4+5—长1段沉积期,湖盆经历漫滩沼泽化逐渐趋于消亡^[21-22]。

2 地层水化学成分基本特征

2.1 地层水主要化学组成

对鄂尔多斯盆地南部地区23口钻井长6段地层水资料的统计结果表明(表1),主要离子浓度为: $\text{Cl}^{-} > (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}) > \text{Ca}^{2+} > \text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > (\text{Ba}^{2+} + \text{Sr}^{2+}) > \text{Mg}^{2+}$ 。阳离子主要为 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$,浓度范围为 $3\,598.62 \sim 22\,129.25 \text{ mg/L}$,平均为 $9\,282 \text{ mg/L}$,其次为 Ca^{2+} 、 $(\text{Ba}^{2+} + \text{Sr}^{2+})$ 和 Mg^{2+} 。阴离子主要为 Cl^{-} ,浓度范围为 $6\,547.97 \sim 35\,715.80 \text{ mg/L}$,平均为 $15\,464.45 \text{ mg/L}$,其次为 HCO_3^{-} 和 SO_4^{2-} 。地层水pH值介于 $5.67 \sim 11.55$,平均为 7.60 ,总体呈弱酸—弱碱性。按苏林分类法^[25-26],研究区长6段地层水水型主要为 CaCl_2 型,部分为 NaHCO_3 和 MgCl_2 型(图2)。一般认为, CaCl_2 型地层水分布区代表了水动力停滞区,有利于油气的聚集成藏,而一般过渡性构造条件下可能出现 NaHCO_3 或 MgCl_2 型地层水^[27]。长6段地层水水型特征表明研究区为区域性的油气藏有利富集区。

2.2 地层水矿化度及分布特征

统计表明,研究区长6段地层水总矿化度为 $10\,993.86 \sim 58\,834.73 \text{ mg/L}$,平均为 $26\,279.42 \text{ mg/L}$,其明显高于地表水(100 mg/L),而小于或与海水总矿化度相近($35\,000 \text{ mg/L}$)^[27]。一般而言,地层水矿化度的高低表明了其保存环境的封闭程度和氧化还原条件^[28]。研究区长6段地层水总矿化度整体较高,反映了其处于相对封闭和缺氧的环境,有利于油气藏的保存。根据地层水主要离子浓度与总矿化度的相关性可知,其主要受 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 和 Cl^{-} 控制(图3a,b),根据现代水文地质学研究认为,高 Na^{+} 和 Cl^{-} 浓度条件一般代表渗透水交替区和停滞的环境,为油气保存的有利区^[29]。研究区长6段与油气伴生的 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 和 Cl^{-} 主要控制下的高矿化度地层水特征,反应了油气藏保存的有利环境。

平面上(图3c),长6段地层水总矿化度呈带状分布,具有3个高值区($>30\,000 \text{ mg/L}$; I, II和III),总矿化度高值区与研究区主要浊积水道砂体发育区相对应,且总矿化度从砂体中部至边缘逐渐减小,表明长6段地层水总矿化度分布与砂体厚度具有较好的一致性。同时,对研究区不同沉积微相中赋存地层水总矿化度的统计表明(图4),浊积水道中地层水矿化度明显高于浊积水道间,反映沉积相控制了地层水总矿化度的分布。

纵向上(图5),随地层深度的增加,长6段地层水总矿化度和离子 Cl^{-} 、 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 和 Ca^{2+} 具弱的递增趋势, HCO_3^{-} 和 $(\text{Ba}^{2+} + \text{Sr}^{2+})$ 具弱的递减趋势, Mg^{2+} 变化不明显,表明研究区长6段地层水随深度的增加而逐渐浓缩,矿化度逐渐升高, $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 相对富集,硫酸盐被还原成硫化物而含有少量的 SO_4^{2-} ^[30-31],其应为深部封闭环境下形成的浓缩水,代表了有利的油气保存还原环境。

3 地层水成因

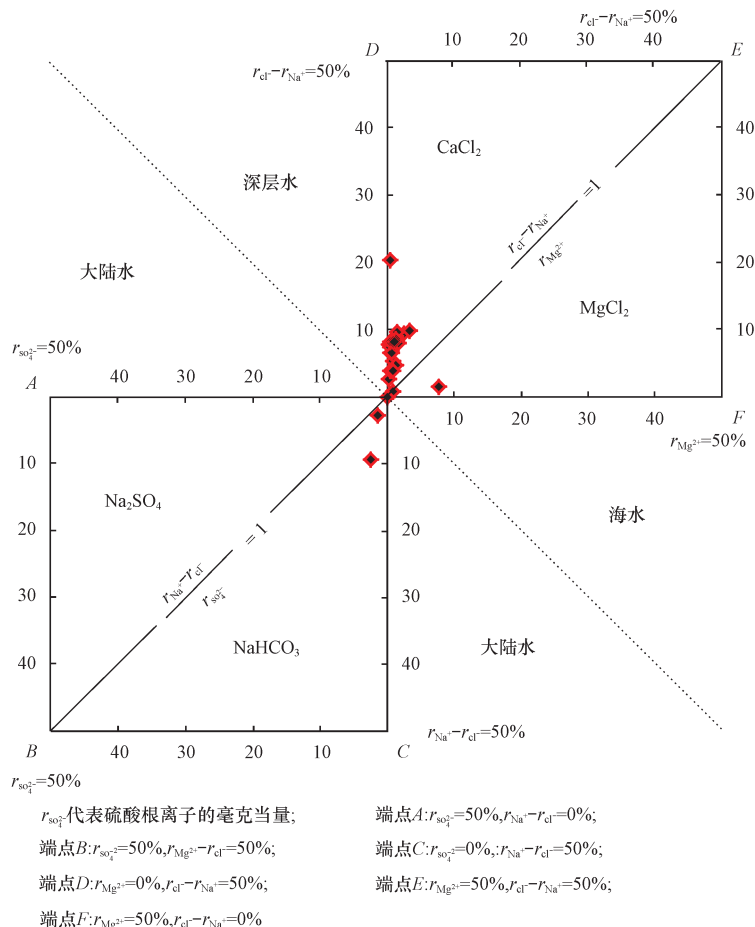
鄂尔多斯盆地南部地区长6段地层水总矿化度较高,水型主要为 CaCl_2 型(图2),按苏林天然水成因分类,应为与地表水隔绝的深层封闭水,浓缩变质作用较强。根据前人对海水蒸发规律的研究,可以通过盆地中沉积水与海水蒸发轨迹的比较来判定沉积水的来源及成岩作用的发生^[32-34]。根据地层水主要阳离子与 Cl^{-} 的关系图可知(图6),随 Cl^{-} 浓度的增加,主要阳离子浓度都呈递增趋势,且 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 与海水蒸发轨

表1 鄂尔多斯盆地南部地区长6段地层水化学特征

Table 1 Chemistry of the formation water in Chang 6 member in the southern Ordos Basin

井号	深度/ m	阳离子浓度/(mg·L ⁻¹)				阴离子浓度/(mg·L ⁻¹)				总矿化度/ (mg·L ⁻¹)	pH 值	水型	孔隙度/ %	钠氯系数 (r _{Na⁺} /r _{Cl⁻})	变质系数 $\left[\frac{1}{2}(r_{Cl^-}-r_{Na^+})/r_{Mg^{2+}}\right]$	镁钙系数 (r _{Mg²⁺} /r _{Ca²⁺})	脱硫酸系数 (100×r _{SO₄²⁻} /r _{Cl⁻})	阳离子 交换系数 (IBE)
		Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ba ²⁺ +Sr ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻										
H135	1 406.0	5 385.86	180.36	42.54	171.67	8 706.16	0	285.76	14 772.35	6.80	CaCl ₂	7.90	0.62	39.03	0.24	0.00	0.38	
H155	1 470.0	5 688.41	1553.10	30.39	68.67	11 552.10	0	156.48	19 049.15	10.85	CaCl ₂	8.77	0.49	96.47	0.02	0.00	0.51	
H156	1 270.0	11 396.37	450.90	30.39	343.35	18 494.26	0	244.93	30 960.20	6.98	CaCl ₂	8.60	0.62	116.78	0.07	0.00	0.38	
H158	1 033.5	8 250.19	300.60	30.39	171.67	12 995.97	0	721.19	22 483.39	7.48	CaCl ₂	6.17	0.63	78.08	0.10	0.00	0.37	
H159	981.0	7 856.14	350.70	151.94	343.35	12 496.12	360.22	639.55	22 385.37	7.18	MgCl ₂	4.03	0.63	15.27	0.43	2.88	0.37	
H166	1 463.0	5 753.93	470.94	18.23	171.67	7 570.60	0	0	14 761.73	11.55	NaHCO ₃	8.90	0.76	49.83	0.04	0.00	0.24	
S19	1 439.0	9 426.82	611.22	54.70	274.68	15 345.24	0	0	26 112.44	8.40	CaCl ₂	9.40	0.61	54.10	0.09	0.00	0.39	
S40	1 350.5	3 598.62	369.48	102.97	239.53	6 547.97	0	135.29	10 993.86	6.20	CaCl ₂	6.63	0.55	14.32	0.28	0.00	0.45	
H11	1 541.5	18 437.52	751.50	12.15	137.34	28 512.30	1 152.72	0	49 412.13	8.85	CaCl ₂	10.74	0.65	414.60	0.02	4.04	0.35	
H136	1 350.5	9 695.34	891.78	139.78	103.01	16 893.40	0	81.64	27 845.12	7.86	CaCl ₂	8.15	0.57	25.75	0.16	0.00	0.43	
H137	1 311.0	8 737.81	551.10	243.10	171.67	13 888.20	1 464.91	204.11	25 394.72	6.89	CaCl ₂	8.35	0.63	10.59	0.44	10.55	0.37	
H14	1 559.5	5 393.91	400.80	30.38	103.00	8 203.70	0	0	14 884.30	10.94	NaHCO ₃	9.08	0.66	46.24	0.08	0.00	0.34	
H140	1 430.0	9 432.79	601.20	91.16	137.34	15 811.10	0	231.33	26 304.92	6.72	CaCl ₂	7.81	0.60	34.98	0.15	0.00	0.40	
H141	1 581.0	8 553.43	601.20	121.55	68.67	14 238.20	312.19	136.07	24 111.60	7.36	CaCl ₂	8.93	0.60	23.38	0.20	2.19	0.40	
H142	1 637.0	22 129.25	801.60	85.08	103.00	35 715.80	0	0	58 834.73	7.55	CaCl ₂	9.59	0.62	79.85	0.11	0.00	0.38	
H26	1 403.5	8 633.43	721.44	158.01	446.35	15 232.50	0	183.76	25 375.49	6.90	CaCl ₂	10.30	0.57	20.88	0.22	0.00	0.43	
H29	1 407.0	5 618.76	410.82	54.70	103.00	9 394.04	0	360.59	15 941.91	6.62	CaCl ₂	9.03	0.60	34.51	0.13	0.00	0.40	
H38	1 295.0	8 125.58	1 202.40	60.77	171.67	14 103.90	744.46	299.61	24 788.80	5.67	CaCl ₂	8.78	0.58	49.19	0.05	5.28	0.42	
H45	1 404.0	10 759.55	1 102.20	170.17	68.67	18 874.80	0	176.90	31 232.58	6.42	CaCl ₂	9.05	0.57	23.84	0.15	0.00	0.43	
H58	1 237.0	10 231.47	951.90	139.78	412.02	17 810.60	0	193.22	29 875.04	6.52	CaCl ₂	10.75	0.57	27.11	0.15	0.00	0.43	
H60	1 523.0	8 519.40	901.80	328.12	206.01	15 534.50	0	449.05	25 938.88	7.54	CaCl ₂	14.10	0.55	10.69	0.36	0.00	0.45	
H61	1 416.5	9 970.76	1 102.20	54.70	206.01	17 182.90	288.18	91.17	29 016.36	6.92	CaCl ₂	8.73	0.58	65.92	0.05	1.68	0.42	
HC37	1 580.5	11 890.66	1 054.90	148.53	96.82	20 578.10	0	182.57	33 951.58	6.50	CaCl ₂	9.80	0.58	29.24	0.14	0.00	0.42	
平均值		9 282.00	710.18	99.98	187.79	15 464.45	187.94	207.53	26 279.42	7.60	—	8.85	0.60	59.16	0.16	1.16	0.40	
海洋水均值 ^[30]		11 094.00	420.00	1 317.00	7.93	19 342.00	2 688.00	150.00	35 000.00	7.6~8.4	—	—	0.87	3.13	3.14	10.26	0.19	

注:“—”为不存在或未测试。

图 2 鄂尔多斯盆地南部地区长 6 段地层水苏林成因分类^[25-26]Fig. 2 Surin classification for the origins of the formation water in Chang 6 member in the southern Ordos Basin^[25-26]

迹基本一致,递增趋势明显,而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 偏离海水蒸发轨迹,且都位于右下方,递增趋势较弱,演化规律较差。结合前文离子组合特征反映出的研究区地层水整体处于交替停滞区,为封闭缺氧的还原环境。综合表明长 6 段地层水在演化过程中,不仅受到了蒸发浓缩作用的控制,还受到强烈水岩作用的影响。

分析发现,长 6 段原始沉积成因地层水中 Ca^{2+} 浓度与孔隙度具弱的正相关关系(图 7a),即 Ca^{2+} 浓度随孔隙度的增大而升高。结合延长组砂岩中碳酸盐作为其主要胶结物,在晚成岩阶段油气的运移充注,一方面抑制了自生碳酸盐的沉淀,另一方面伴生的烃类有机酸流体使碳酸盐矿物溶解^[35],使孔隙度增大的同时钙离子含量升高。之后地层虽然发生构造抬升,但由于整体构造环境稳定,地层中流体处于相对封闭环境下,基本停滞不再受影响。这反映了长 6 段现存原始沉积成因地层水受到了油气等有机流体的影响,也对长 6 段原始沉积地层水中钙离子较海水的富集作了合理解释。

长 6 段孔隙度与总矿化度的相关图可知(图 7b),

随砂体孔隙度增高,总矿化度具弱的递增趋势,表明总矿化度高的地层水优先进入孔隙发育的砂体中,间接表明其并非完全原始沉积地层水,可能受到后期流体混入的影响。结合氯钠系数为 0.49 ~ 0.76,长 6 段地层水属于 CaCl_2 型地层水进一步分类中的 III-IV 型地层水,其具有水动力条件停滞,烃类聚集和残存水存在的特点^[7]。推测鄂尔多斯盆地延长组在白垩纪进入深埋藏阶段,烃源岩大量生排烃,粘土矿物大量脱水,油水等共同运移进入优势砂体储层而使原始沉积地层水受到影响,呈现非完全原始沉积地层水特点^[14]。

综上所述,鄂尔多斯盆地南部地区长 6 段地层水为经过较强浓缩变质作用并受油气等有机流体影响的原始沉积成因水^[16]。

4 油气意义

4.1 地层水化学特征与油气意义

地层水化学特征参数能在一定程度上反映地层水

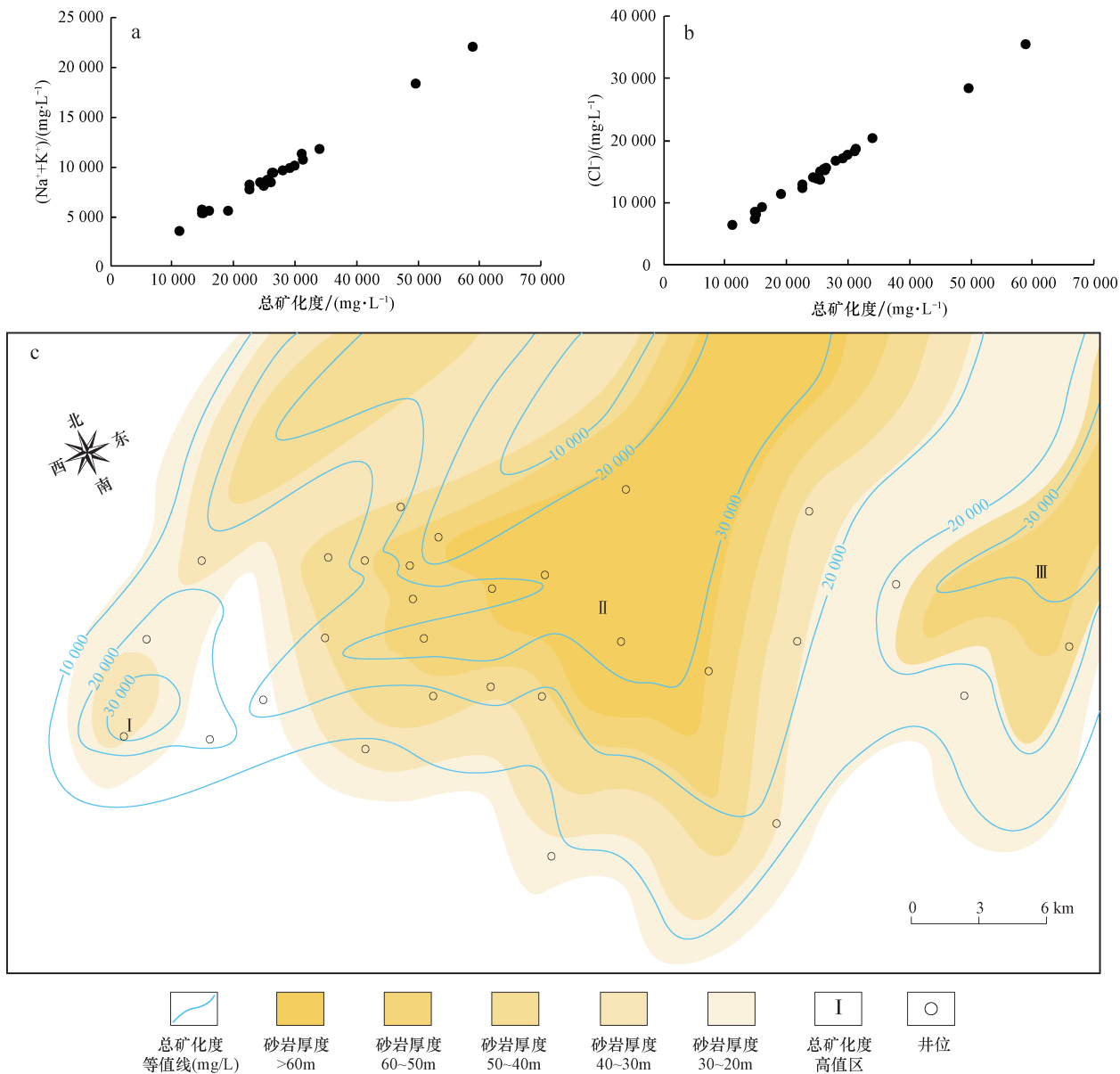


图 3 鄂尔多斯盆地南部地区长 6 段地层水化学与总矿化度关系及总矿化度平面分布
Fig. 3 Correlation of formation water geochemistry with total salinity and the plane view distribution of total salinity in Chang 6 member in the southern Ordos Basin

a. $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 与总矿化度关系; b. Cl^- 与总矿化度关系; c. 总矿化度与砂体厚度平面等值线

所处的水文地质环境及共存流体保存条件的相关信息。目前研究地层水时常用的离子组合参数有钠氯系数、变质系数、镁钙系数、脱硫系数和阳离子交换系数 (IBE)^[7,13,36-37]。

钠氯系数、变质系数和镁钙系数可用来判断地层水的性质、浓缩变质程度及水岩相互作用强度。一般认为,钠氯系数小于 0.75,镁钙系数小于 0.3 和较大的变质系数,表明地层水浓缩和变质程度较深,水岩作用强度和离子交换程度较大,地层水所处环境封闭条件较好,地层水属于原始沉积-较高度变质水,油气聚集成藏条件优越^[38-40]。研究区长 6 段地层水

钠氯系数和镁钙系数较小,变质系数较大,分别集中在 0.49~0.76,0.02~0.44 和 10.59~78.08,分布范围较窄,表明地层水处于深部封闭的环境下,为良好的油气聚集和保存环境。

脱硫系数可反映地层水脱硫酸程度和氧化还原条件。在还原条件下,地层水中硫酸盐在还原菌的作用下转变为硫化物而使 SO_4^{2-} 含量减少,脱硫系数减小。一般认为,脱硫系数 < 1,脱硫酸程度和还原程度高,指示还原环境,有利于油气的聚集和保存^[38-41]。研究区长 6 段地层水脱硫系数大多为 0,即不含有 SO_4^{2-} ,符合油田水不含或含少量硫酸盐的特性,也表明研究区长

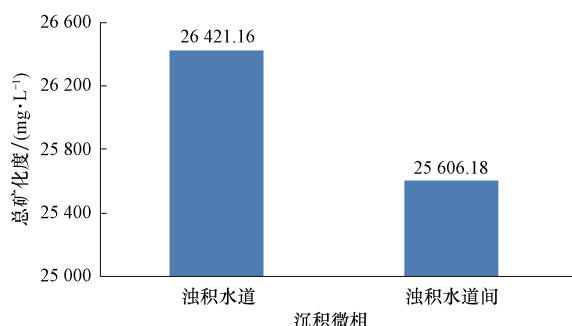


图4 鄂尔多斯盆地南部地区长6段地层水总矿化度与沉积微相关系

Fig. 4 Relationship between the total salinity of formation water with sedimentary microfacies in Chang 6 member in the southern Ordos Basin

6段地层水主体处于封闭缺氧的还原环境,有利于油气的保存和聚集。

阳离子交换系数(IBE)主要用来反映地层水来源及其中阳离子与岩石表面阳离子的交换情况,当 $\text{Cl}^- > (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 时,可用公式 $\text{IBE} = [\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)]/\text{Cl}^-$ 来计算,并认为当 $\text{IBE} > 0.129$,地层水主要为来自古沉积水的油田水,主要处于交替停滞带,当 $\text{IBE} < 0.129$ 时,认为地层水中有渗入水参与,主要处于交替活跃带^[13,30,36-37]。研究区长6段地层水阳离子交换系数整体较小,均值为0.40,全部大于0.129,表明长6段地层水为来自原始沉积水的油田水,研究区长6段地层水整体位于交替停滞带,是油气保存的有利场所。

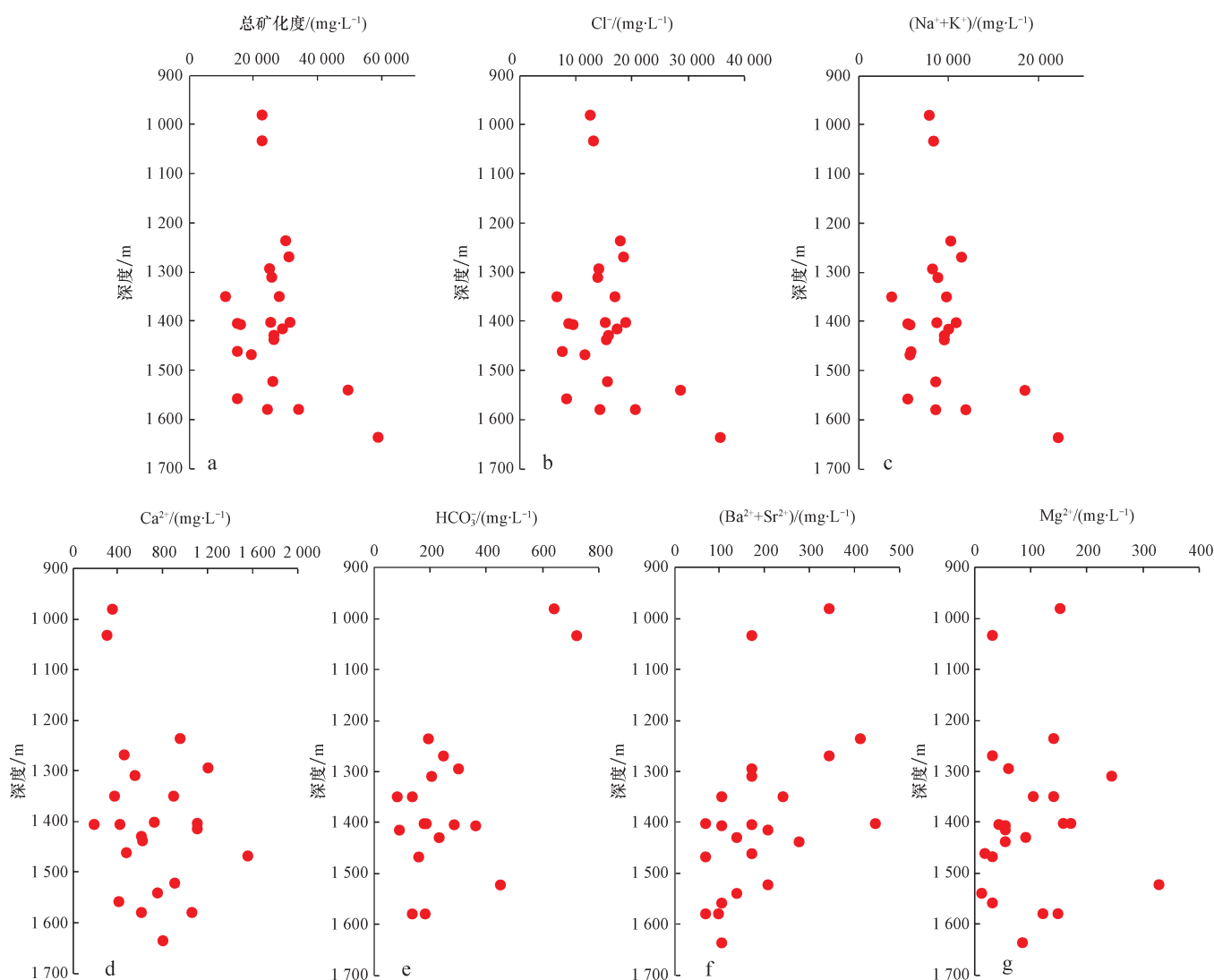


图5 鄂尔多斯盆地南部地区长6段地层水主要离子浓度随深度变化特征

Fig. 5 Concentration of major ions of formation water vs. depth in Chang 6 member in the southern Ordos Basin

a. 总矿化度; b. Cl^- 浓度; c. $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 浓度; d. Ca^{2+} 浓度; e. HCO_3^- 浓度; f. $(\text{Ba}^{2+} + \text{Sr}^{2+})$ 浓度; g. Mg^{2+} 浓度

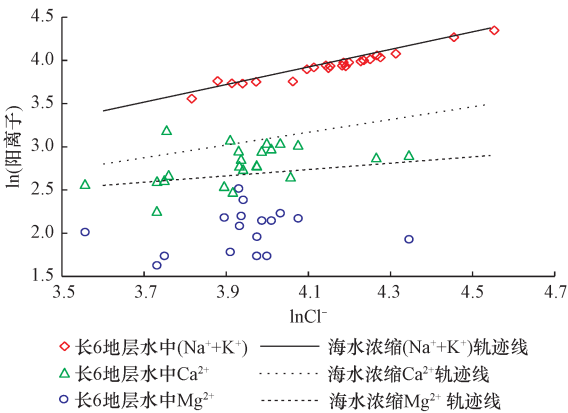


图 6 鄂尔多斯盆地南部地区长 6 段地层水主要阳离子浓度与 Cl^- 关系 (与海水蒸发轨迹相比)^[32]

Fig. 6 Correlation between main cations' concentration and Cl^- of formation water in Chang 6 member in the southern Ordos Basin (compared with seawater evaporation trajectories)^[32]

4.2 地层水演化与油气意义

研究区长 6 段地层水为常温低压较高总矿化度水,平均温度为 $57.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均压力系数为 $0.79^{[20-21]}$,主要为 CaCl_2 型水。长 6 段沉积时期,研究区位于半深湖-深湖区,以浊积水道和三角洲前缘滑塌成因的浊积砂体沉积为主。之后长 4+5 段-长 1 段沉积期湖盆逐渐萎缩,面积不断减小。晚三叠世末延长组快速沉降,封存在长 6 段地层中的陆相地层水,主要为沉积物压实作用排出的原始沉积水。之后受燕山运动的影响,盆地发生多次短暂低幅度的构造抬升^[42-43],使上侏罗统和上白垩统部分地层遭受剥蚀,该时期延长组地层水中可能有少量大气淡水的渗入。孙致学等^[45]和罗静兰等^[35]对鄂尔多斯盆地中南部延长组砂岩中碳酸盐胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分析表明,碳酸盐胶

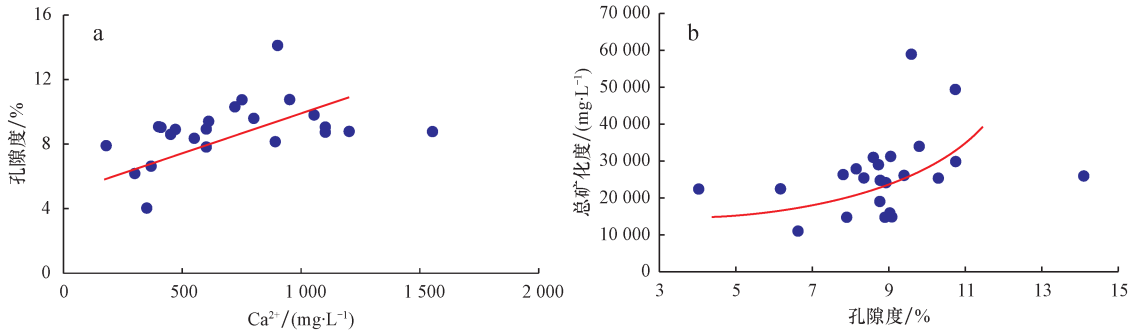


图 7 鄂尔多斯盆地南部地区长 6 段孔隙度与 Ca^{2+} 浓度(a)以及总矿化度(b)关系

Fig. 7 Porosity vs. Ca^{2+} concentration(a) and total salinity(b) of the formation water in Chang 6 member in the southern Ordos Basin

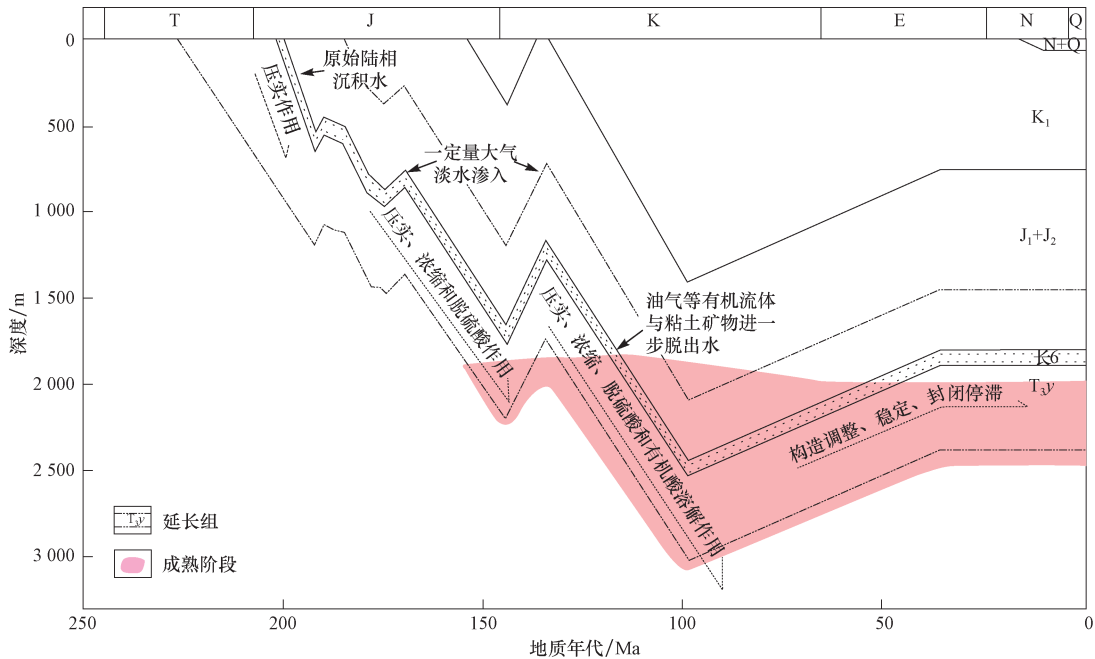


图 8 鄂尔多斯盆地南部地区中生界热演化史简图^[42-44]

Fig. 8 Diagram showing the thermal evolution history of the Mesozoic sequence in the southern Ordos Basin^[42-44]

结物的形成可能与大气淡水的参与有关。但晚三叠世—早白垩世延长组整体呈持续埋深,温度升高状态,地层达到最大埋深(超过3 000 m)^[42-43],长6段地层水演化过程中浓缩作用、脱硫酸作用和水岩作用等增强,矿化度增高。同时,长7段作为盆地的主要优质烃源岩,有机质热演化进入成熟阶段开始大量生排烃,有机质生烃作用产生的有机流体与粘土矿物在进一步成岩过程中排出的层间水一起运移至长6段优势储层砂体^[46],溶解其碳酸盐胶结物并与长6段原始沉积水混合等,进而影响了长6段孔隙结构和地层水化学特征。至早白垩世晚期,受燕山运动影响,鄂尔多斯盆地整体抬升,温度降低,延长组生排烃能力逐渐减弱或停止^[42-43],长6段中聚集和保存的油气水等流体进一步调整,但基本无破坏作用,形成现今的油气水等流体赋存格局(图8),即研究区长6段地层水一直处于封闭状态,是油气保存和聚集的良好场所。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地南部地区长6段地层水具有较高的总矿化度,水型以CaCl₂型为主,离子组成以Cl⁻、(Na⁺ + K⁺)和Ca²⁺占绝对优势。钠氯系数和镁钙系数小,分别集中在0.49~0.76和0.02~0.44,脱硫系数大多为0,变质系数较大,主要为10.59~78.08,阳离子交换系数(IBE)整体较小,均值为0.40,综合表明研究区长6段地层水整体位于交替停滞带,为封闭缺氧的还原环境,有利于油气聚集和保存。

2) 长6段地层水为与地表水隔绝的深层封闭水,主要阳离子与海水蒸发轨迹的对比,并结合长6段地层水总矿化度及Ca²⁺浓度均与孔隙度具有一定正相关关系,综合表明长6段原始沉积地层水在演化过程中,不仅受到了蒸发浓缩作用的控制,还受到强烈的水岩作用的影响,长6段地层水为经过较强浓缩变质作用并受油气等有机流体影响的原始沉积成因水。

3) 结合区域热演化史可知,长6段地层水的成因与成岩作用和有机质的热演化等有密切联系,且构造演化至今,长6段油气伴生地层水反映的盆地南部油气藏处于稳定封闭环境下,具有良好的油气勘探前景。

参 考 文 献

[1] Cheng Jianmei, McIntosh J C, Xie Xinong, et al. Hydrochemistry of formation water with implication to diagenetic reactions in Sanzhao

depression and Qijia-gulong depression of Songliao Basin, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 88(1-3): 86-90.

- [2] Worden R H, Manning D A C, Bottrell S H. Multiple generations of high salinity formation water in the Triassic Sherwood Sandstone: Wytch Farm oilfield, onshore UK[J]. Applied Geochemistry, 2006, 21(3): 455-475.
- [3] 李继宏, 李荣西, 韩天佑, 等. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区地层水与油气成藏关系研究[J]. 石油实验地质, 2009, 31(3): 253-257.
- Li Jihong, Li Rongxi, Han Tianyou, et al. Study of stratum water and gas accumulation relations of Majiatan area in the western Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2009, 31(3): 253-257.
- [4] 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. Origin of formation water and regularity of gas and water distribution from Sulige Gas Field in the Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 767-773.
- [5] Land L S, Macpherson G L. Geochemistry of formation water, Plio-Pleistocene reservoirs, offshore Louisiana[J]. AAPG Bulletin, 1989, 39: 421-430.
- [6] 周晓芬. 塔里木盆地北部油田水特征离子及意义[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 372-374.
- Zhou Xiaofen. Characteristic ions of oilfield water in northern Tarim Basin and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(4): 372-374.
- [7] 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.
- [8] Li Mei, Lou Zhanghua, Jin Aimin, et al. Origin, flow of formation water and hydrocarbon accumulation in the Zhenwu area of the north Jiangsu Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(3): 819-829.
- [9] 徐德英, 周江羽, 王华, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷东营组地层水化学特征的成藏指示意义[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 285-289.
- Xu Deying, Zhou Jiangyu, Wan Hua, et al. Chemical characteristics of formation water significant to oil reservoir in Dongying Formation, Nanpu sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2010, 32(3): 285-289.
- [10] 曾溅辉, 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(4): 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 geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4):

- 223-229.
- [11] 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 and Development, 2009, 36(4): 428-435.
- [12] Hou Dujie, Li Xianqing, Tang Youjun. New evidence for the origin of natural gas in Ordos Basin from hydrocarbons of oil water [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(10): 835-856.
- [13] 林晓英,曾澍辉,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 Hadexun oilfield, Tarim Basin [J]. Geoscience, 2012, 26(2): 377-383.
- [14] 叶素娟,李嵘,张世华.川西坳陷中段侏罗系次生气藏地层水化学特征及油气运聚关系[J].石油实验地质,2014,36(4):487-495.
Ye Sujuan, Li Rong, Zhang Shihua. Chemical characteristics of Jurassic formation water and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in middle part of western Sichuan depression [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2014, 36(4): 487-495.
- [15] 李荣西,段立志,张少妮,等.鄂尔多斯盆地低渗透油气藏形成研究现状与展望[J].地球科学与环境学报,2011,33(4):364-372.
Li Rongxi, Duan Lizhi, Zhang Shaoni, et al. Review on oil/gas accumulation with low permeability in Ordos Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 364-372.
- [16] 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.
- [17] 付金华,喻建,徐黎明,等.鄂尔多斯盆地致密油勘探开发新进展及规模富集可开发主控因素[J].中国石油勘探,2015,20(5):9-18.
Fu Jinhua, Yu Jian, Xu Liming, et al. New progress in exploration and development of tight oil in Ordos Basin and main controlling factors of large-scale enrichment and exploitable capacity [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(5): 9-18.
- [18] 杨华,梁晓伟,牛小兵,等.陆相致密油形成地质条件及富集主控因素——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段为例[J].石油勘探与开发,2017,44(1):12-20.
Yang Hua, Liang Xiaowei, Niu Xiaobing, et al. Geological conditions for continental tight oil formation and the main controlling factors for the enrichment: A case of Chang 7 Member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 12-20.
- [19] 李文厚,庞军刚,曹红霞,等.鄂尔多斯盆地晚三叠世延长长期沉积体系及岩相古地理演化[J].西北大学学报:自然科学版,2009,39(3):501-506.
Li Wenhou, Pang Jungang, Cao Hongxia, et al. Depositional system and paleogeographic evolution of the late Triassic Yanchang Stage in Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University, 2009, 39(3): 501-506.
- [20] 尚有战.上矸子区域槐61井区地质基础研究[D].西安:西北大学,2012.
Shang Youzhan. The basic geological study of Huai 61 wellblock in Shangzhenzi area [D]. Xi'an: Northwest University, 2012.
- [21] 吕敏.富黄探区槐树庄地区长6油藏描述[D].西安:西北大学,2012.
Lu Min. Description of Chang 6 reservoir in Fuhuang area of the Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2012.
- [22] 尚婷,陈刚,李文厚,等.鄂尔多斯盆地富黄探区延长组浊流沉积与油气聚集关系[J].西北大学学报:自然科学版,2013,43(1):81-88.
Shang Ting, Chen Gang, Li Wenhou, et al. Turbidity current of Yanchang deposit and its relation to the hydrocarbon accumulation formation in Fuhuang exploration area, Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2013, 43(1): 81-88.
- [23] 冯娟萍,李文厚,欧阳征健.鄂尔多斯盆地黄陵地区上三叠统延长组7、长6油层组浊积岩沉积特征及地质意义[J].古地理学报,2012,14(3):295-302.
Feng Juanping, Li Wenhou, Ouyang Zhengjian. Sedimentary characters and geological implication of turbidite of the Chang 6 and Chang 7 intervals of Upper Triassic Yanchang Formation in Huangling area, Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3): 295-302.
- [24] Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Mao Guangzhou, et al. Late Triassic tuff intervals in the Ordos basin, Central China: their epositional, petrographic, geochemical characteristics and regional implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 80: 148-160.
- [25] 蒋有录,查明.石油天然气地质与勘探[M].石油工业出版社,2006.
Jiang Youlu, Zha Ming. Petroleum geology and exploration [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [26] 苏林.天然水系中的油田水[M].王成义,译.北京:石油工业出版社,1959.
Su Lin. Oilfield water in natural water system [M]. Translated by Wang Chengyi. Beijing: Petroleum Industry Press, 1959.
- [27] 李贤庆,侯读杰,胡国艺.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, Hu Guoyi. 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.
- [28] 李贤庆,侯读杰,张爱云.油田水地球化学研究进展[J].地质科

- 技情报,2001,20(2):51-54.
- Li Xianqing, Hou Dujie, Zhang Aiyun. Advancement of the geochemical study of oilfield water[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(2):51-54.
- [29] 李明, 罗凯声. 地层水资料在油气勘探中的应用[J]. 新疆地质, 2004, 22(3):304-307.
- Li Ming, Luo Kaisheng. Application of formation water information in oil & gas exploration[J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(3):304-307.
- [30] 吴浩, 郑丽, 慈建发. 新场气田须二段地层水地球化学特征及其石油地质意义[J]. 天然气勘探与开发, 2012, 35(4):41-44.
- Wu Hao, Zheng Li, Ci Jianfa, et al. Geochemical characteristics of formation water in xujiahe 2 member, Xinjiang gasfield[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2012, 35(4):41-44.
- [31] Blumenberg M, Oppermann B I, Guyoneaud R, et al. Hopanoid production by *Desulfovibrio bastinii*, isolated from oilfield formation water[J]. Fems Microbiology Letters, 2009, 293(1):73-78.
- [32] Hanor J S. Physical and chemical controls on the composition of waters in sedimentary basins[J]. Marine and Petroleum Geology, 1994, 11(1):31-45.
- [33] 周训, 李慈君. 海水蒸发轨迹线及其应用[J]. 地球科学, 1995(4):410-414.
- Zhou Xun, Li Cijun. Seawater evaporation trajectories and their application[J]. Earth Science, 1995(4):410-414.
- [34] Birkle P, García B M, Padrón C M M. Origin and evolution of formation water at the Jujo-Tecominoacán oil reservoir, Gulf of Mexico. Part 1: Chemical evolution and water-rock interaction[J]. Applied Geochemistry, 2009, 24(4):543-554.
- [35] 罗静兰, 刘小洪, 林潼, 等. 成岩作用与油气侵位对鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层物性的影响[J]. 地质学报, 2006, 80(5):664-673.
- Luo Jinglan, Liu Xiaohong, Lin Tong, et al. Impact of diagenesis and hydrocarbon emplacement on sandstone reservoir quality of the Yanchang Formation (Upper Triassic) in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5):664-673.
- [36] 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 石油工业出版社, 1991.
- Liu Fanghuai, Yan Wansun. Principle of hydro-geology in oil and gas fields[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [37] 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.
- [38] 任国选, 侯读杰, 王玉玲, 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 Hongshangzui oilfield in the northwestern margin of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2):179-184.
- [39] 赵兴齐, 陈践发, 程锐, 等. 开鲁盆地奈曼凹陷奈1区块九佛堂组地层水地球化学特征与油气保存条件[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(3):47-56.
- Zhao Xingqi, Chen Jianfa, Cheng Rui, et al. Geochemical characteristics of formation water and hydrocarbon preservation of Jiufotang Formation in Nai 1 block of Naiman sag, Kailu Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2015, 39(3):47-56.
- [40] 朱振宏, 楼章华, 金爱民, 等. 上扬子地块黔北坳陷及周缘水文地质-地球化学特征与油气保存[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(6):862-873.
- Zhu Zhenhong, Lou Zhanghua, Jin Aimin, et al. Hydrogeological-hydrogeochemical characteristics and hydrocarbon preservation conditions of the Qianbei Depression and its periphery, Upper Yangtze Block[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6):862-873.
- [41] 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 Zhonghong. 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.
- [42] 于强, 任战利, 倪军, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区中生界热演化史探讨[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2012, 42(5):801-805.
- Yu Qiang, Ren Zhanli, Ni Jun, et al. The thermal evolution history of Mesozoic, Fuxian exploratory area of Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2012, 42(5):801-805.
- [43] 陈瑞银, 罗晓容, 陈占坤, 等. 鄂尔多斯盆地中生代地层剥蚀量估算及其地质意义[J]. 地质学报, 2006, 80(5):685-693.
- Chen Ruiyin, Luo Xiaorong, Chen Zhankun, et al. Estimation of denudation thickness of Mesozoic strata in the Ordos Basin and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5):685-693.
- [44] Morad S, Ismail H N B, Ros L F D, et al. Diagenesis and formation water chemistry of Triassic reservoir sandstones from southern Tunisia[J]. Sedimentology, 1994, 41(6):1253-1272.
- [45] 孙致学, 孙治雷, 鲁洪江, 等. 砂岩储集层中碳酸盐胶结物特征——以鄂尔多斯盆地中南部延长组为例[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5):543-551.
- Sun Zhixue, Sun Zhilei, Lu Hongjiang, et al. Characteristics of carbonate cements in sandstone reservoirs: A case from Yanchang Formation, middle and southern Ordos Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5):543-551.
- [46] Varsányi I, Kovács L Ó. 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.