

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

赵兴齐¹, 陈践发², 程 锐³, 刘武生¹, 李西得¹,
易 超¹, 张宇龙¹, 朱鹏飞¹, 郭 望⁴

(1. 核工业北京地质研究院中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029;

2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

3. 延长油田股份有限公司, 陕西延安 717600; 4. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710018)

摘要:基于实际测试资料, 统计分析奈曼凹陷奈 1 区块九佛堂组 21 口井地层水的水型、矿化度及特征系数在平面及纵向上的变化特征, 并探讨研究区地层水地球化学特征与油气的保存及分布关系。结果表明: 该区地层水是以阴阳离子分别为 HCO_3^- 和 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 为主的 NaHCO_3 型水, 地层水矿化度低; 研究区地层水矿化度主要受控于断层的分布, 靠近断层的油气井中地层水矿化度明显较远离断层的油气井中的高, 主要是由于该区深部的高矿化度地层水经断层及其他运移通道运移至浅层, 并与浅层地层水混合所致; 地层水化学组分及离子特征系数随深度的变化表现为稳定型、正相关型和负相关型 3 种变化类型; 纵向上, 地层水的 Cl^- 浓度、 $r(\text{Cl}^-)/r(\text{Mg}^{2+})$ 及 $r(\text{Ca}^{2+})/r(\text{Mg}^{2+})$ 都随埋深的增加而增大, 而 HCO_3^- 浓度及 $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ 均随埋深的增加而减小, 表明奈 1 区块九佛堂组地层水现今总体上处于封闭的流体动力环境, 有利于油气的聚集与保存; 平面上, 靠近凹陷中心的奈 1 块油气井中地层水 $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ 及 $r(\text{SO}_4^{2-}) \times 100/r(\text{Cl}^-)$ 明显较奈 3 块及其以西地区偏低, 而 $r(\text{Cl}^-)/r(\text{Mg}^{2+})$ 及 $r(\text{Ca}^{2+})/r(\text{Mg}^{2+})$ 明显偏高, 表明奈 1 块地层封闭条件好, 更有利于油气藏的形成与保存; 研究区断层有效沟通了烃源层与储集层, 为浅层次生油气藏的形成提供了必要条件; 靠近凹陷中心的奈 1 块是该区油气勘探的重要领域, 且主干断裂和浅层分支断裂发育带是浅层次生油气藏勘探的重要区域。

关键词: 地层水; 地球化学特征; 油气保存条件; 奈 1 区块; 奈曼凹陷; 开鲁盆地

中图分类号: TE 122.2 **文献标志码:** A

引用格式: 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 (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 47-56.

Geochemical characteristics of formation water and hydrocarbon preservation of Jiufotang Formation in Nai 1 block of Naiman sag, Kailu Basin

ZHAO Xingqi¹, CHEN Jianfa², CHENG Rui³, LIU Wusheng¹, LI Xide¹,
YI Chao¹, ZHANG Zilong¹, ZHU Pengfei¹, GUO Wang⁴

(1. CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Technology in Beijing Research
Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Yanchang oilfield Company Limited, Yan'an 717600, China;

4. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China)

收稿日期: 2014-02-28

基金项目: 大型盆地能源矿产资源综合调查评价项目(资[2014]03-016-044)

作者简介: 赵兴齐(1984-), 男, 博士, 研究方向为油气地球化学、石油地质学和铀矿地质学。E-mail: zhaoxingqi_77@126.com。

Abstract: On the basis of a large number of test data, the plane and vertical variations of formation water type, salinity and characteristic coefficient in 21 wells of Jiufotang Formation in Nai 1 block, Naiman sag were analyzed statistically. Meanwhile, the relationship between geochemical characteristic of formation water and conservation of oil and gas was investigated. The results show that the formation water with lower salinity belongs to NaHCO_3^- type water, which is dominated by HCO_3^- and $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$. The salinity of the formation water is mainly controlled by the distribution of faults in plane. And the salinity of the formation water near the faults is obviously higher than that of the formation water far away from the faults. This is because the formation water with higher salinity in this deep block is transported to the shallow level via faults and other channels, which is mixed with the formation water in the shallow level. The chemical composition and characteristic coefficient can be divided into three types along with the variation of depth, which are stable type, positive correlation type, and negative correlation type. Vertically, the concentration of Cl^- , the rate of $r(\text{Cl}^-)/r(\text{Mg}^{2+})$ and the rate of $r(\text{Ca}^{2+})/r(\text{Mg}^{2+})$ increase with depth increasing, whereas the concentration of HCO_3^- and the rate of $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ decrease with depth increasing. This indicates that the formation water of Jiufotang Formation in Nai 1 block has been conserved in a relatively isolated dynamic environment, which is suitable for oil and gas conservation. In plane, the levels of $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ and $r(\text{SO}_4^{2-})/r(\text{Cl}^-)$ near the Nai 1 block of the sag center are lower than those of wells in Nai 3 block and the western, while the levels of $r(\text{Cl}^-)/r(\text{Mg}^{2+})$, $r(\text{Ca}^{2+})/r(\text{Mg}^{2+})$ are higher. This infers that the seal condition of Nai 1 Block is more favorable to oil and gas accumulation. Source rock and reservoir can be connected by faults efficiently, which is suitable for the formation of shallow secondary reservoirs. Nai 1 block near the center of sag can be regarded as the perspective field of area. And principal faults and shallow subsidiary faults are also the interests of secondary reservoirs.

Keywords: formation water; geochemical characteristics; hydrocarbon preservation condition; Nai 1 block; Naiman sag; Kailu Basin

在含油气盆地中,地层水以不同的形式与油气共存于地下岩石孔隙中,是油气藏流体系统中一个不可缺少的重要组成部分,其形成和运动规律与油气的生成、运移、聚集以及油气藏的形成、保存和破坏紧密相关^[1-9]。在油气成藏过程中,地层水与围岩、油气之间存在物质和能量的交换,其中蕴含了丰富的油气藏形成和保存的信息。地层水化学组分及相应的化学指标可以直接或间接指示沉积盆地流体系统的开放性和封闭性以及不同程度地反映油气聚集、保存条件^[10-20]。奈曼油田油气勘探程度整体较低,笔者基于奈曼油田奈1区块九佛堂组21口井地层水测试资料分析该区地层水的地球化学特征及成因,探讨地层水与该区油气保存条件的关系。

1 研究区地质背景

奈曼凹陷位于内蒙古自治区通辽市奈曼旗境内双河村的西北部,是在海西期褶皱基底上发育起来的中生代凹陷,是开鲁盆地西南侧的一个次级负向构造单元。其形成主要受红山八里罕和西拉木伦河断裂控制,西北与张三园子-新庙以及陆家堡凹陷相望,东与八仙筒凹陷为邻。构造走向NNE向,构造面积800 km²,呈狭长带状分布。凹陷内断裂系统比较复杂,按断裂展布方向可划分为NNE、NE和近EW向三组断裂,各组断裂呈网状交织在一起,受边界控盆断裂(NNE向断裂)和凹陷内两条主干断裂的切割和围陷,将凹陷分为三个二级构造带,即西

部陡坡带、中央洼陷带、东部缓坡带(图1)。受周边构造特征影响,该凹陷的地质构造特征既有辽西山

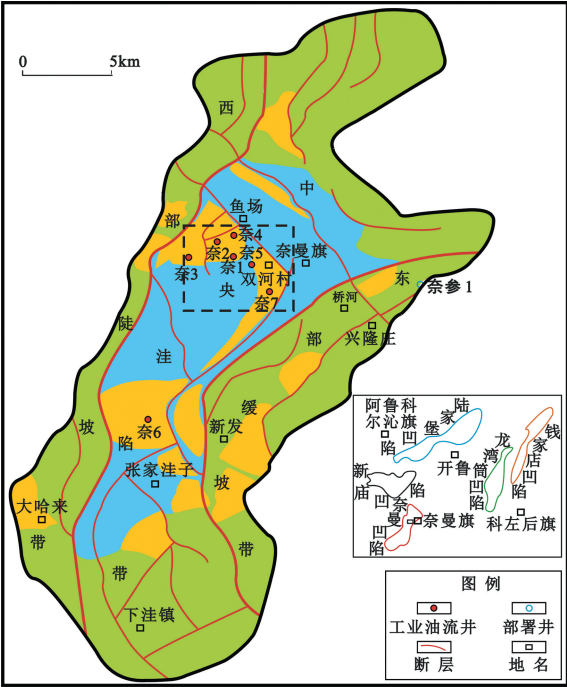


图1 奈曼凹陷区域构造图

Fig.1 Regional structural map of Naiman sag

间盆地的沉积演化特征,又具有辽北大陆裂谷盆地的特征。该区地层自下而上为:前中生界基底,中生界下三叠统哈达陶勒盖组,中侏罗统海房沟组,下白垩统九佛堂组、沙海组、阜新组,上白垩统和新生界。根据构造发育史、地层厚度变化、沉积演化特征可将

该区构造演化划分为初始断裂期、快速断陷期、稳定沉积—萎缩期和坳陷期 4 个发育阶段^[21-22]。

奈曼油田构造上处于奈曼凹陷中央洼陷带中北段的双河背斜内,奈 1 区块整体位于生油洼陷的中心,具有较好的油源条件,发育了下白垩统九佛堂组、沙海组、阜新组 3 套生油岩系^[21],源岩有机质类型好(主要为 I 和 II₁ 型)、有机质丰度高(TOC 含量为 1.03%~2.30%)、生烃潜力大(S₁+S₂ 为 4.95~14.13 mg/g)、有机质热演化程度较低,主要处于低熟—中等成熟的热演化阶段,源岩形成于强还原性且盐度较大的半深湖—深湖沉积环境,源岩有机质以低等水生生物、藻类和高等植物混源为特征^[22-23]。九佛堂组发育的大套暗色泥岩为该区主要烃源岩,九佛堂组上段岩性主要为浅灰色砂砾岩、砾状砂岩、含砾砂岩、粗砂岩、细砂岩及粉砂岩,这为该区油气成藏提供了较好的储集条件,沙海组及阜

新组广泛发育的厚层暗色泥岩为研究区油气藏提供了必要的盖层条件。根据生储盖组合特征,可将奈曼凹陷油气藏划分为自生自储与下生上储式两种组合类型,从油源及圈闭条件分析,奈 1 区块位于生油凹陷中心,具有良好的油气成藏条件。

2 地层水地球化学特征及分布

2.1 主要离子组成及矿化度特征

奈曼凹陷奈 1 区块九佛堂组 21 口井的地层水常规离子检测结果表明,研究区地层水中阳离子组成主要以(Na⁺+K⁺)为主(表 1),其质量浓度一般为 910.80~3 014.80 mg/L,其次为 Ca²⁺和 Mg²⁺;阴离子中 HCO₃⁻占明显优势,其含量为 232.50~11 846.40 mg/L,其次为 Cl⁻,SO₄²⁻含量低,分布在 4.60~140.60 mg/L,平均为 69.47 mg/L。

表 1 奈曼凹陷奈 1 区块九佛堂组地层中地层水化学特征

Table 1 Chemical characteristics of formation water in Jiufutang Formation of Nai 1 block, Naiman sag

井号	离子浓度/(mg·L ⁻¹)						TDS/ (mg· L ⁻¹)	$r(\text{Na}^+)/$ $r(\text{Cl}^-)$	$r(\text{Ca}^{2+})/$ $r(\text{Mg}^{2+})$	$r(\text{Cl}^-)/$ $r(\text{Mg}^{2+})$	$r(\text{SO}_4^{2-})\times$ 100/ $r(\text{Cl}^-)$	水型
	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻						
Nai1	4 124.5	60.9	16.3	2 416.8	55.3	2 492.3	9 437.9	1.71	3.74	148.3	2.29	NaHCO ₃
NG1	1 173.0	24.0	14.6	549.6	37.2	2 227.2	4025.6	2.13	1.64	37.64	6.77	NaHCO ₃
40-62	1 533.4	92.9	23.7	1 392.3	97.2	1 717.3	5 128.7	1.10	3.92	58.75	6.98	NaHCO ₃
42-42	2 563.8	85.6	16.3	2 272.0	140.6	2 022.9	7101.2	1.13	5.25	139.39	6.19	NaHCO ₃
46-42	2 903.3	29.3	8.9	2 819.8	11.7	2794.2	8 653.1	1.03	3.29	316.83	0.41	NaHCO ₃
48-20	2 497.8	43.2	23.8	2 282.5	28.2	2 913.8	7 789.3	1.09	1.82	95.90	1.24	NaHCO ₃
48-38	2 382.8	8.0	4.9	638.3	67.2	4 820.6	8 101.8	3.73	1.63	130.27	10.53	NaHCO ₃
48-40	2 678.6	80.7	19.3	2 237.2	128.9	2 401.3	7 717.7	1.20	4.18	115.92	5.76	NaHCO ₃
52-42	2 727.8	63.6	20.8	2 519.8	117.2	2 532.3	7 981.5	1.08	3.06	121.14	4.65	NaHCO ₃
54-40	2 699.3	15.4	9.3	2 506.3	9.2	2 249.5	7 822.4	1.08	1.66	269.49	0.37	NaHCO ₃
58-52	1 135.3	288.5	23.7	878.0	63.8	1 673.6	4 062.9	1.29	12.17	37.05	7.27	NaHCO ₃
70-42	1 702.0	26.6	28.1	425.5	144.1	3 844.3	6 171.6	4.00	1.09	16.00	33.87	NaHCO ₃
42-26	3 014.8	88.0	14.8	3 237.5	140.6	2 590.5	9 086.2	1.06	5.95	205.24	4.63	NaHCO ₃
26-44	2 588.7	14.2	5.7	546.0	56.7	5 804.7	9 076.7	4.74	2.49	95.79	10.38	NaHCO ₃
62-22	910.8	52.1	19.5	283.7	86.5	2 074.7	3 427.3	3.21	2.67	14.55	30.49	NaHCO ₃
68-32	3 597.0	30.8	29.2	555.0	92.2	8 710.5	13 560.2	6.48	1.05	19.01	16.61	NaHCO ₃
70-26	4 607.8	34.6	16.3	447.6	18.4	10 692.8	16 272.1	10.29	2.12	27.46	4.11	NaHCO ₃
70-30	2 146.4	38.5	21.0	1 696.3	59.9	232.5	4 224.9	1.27	1.83	80.77	3.53	NaHCO ₃
72-36	1 579.9	105.8	64.2	572.9	4.6	3 843.8	6 625.8	2.76	1.65	8.92	0.80	NaHCO ₃
74-34	1 151.6	42.3	23.3	854.4	27.7	246.5	2 345.8	1.35	1.82	36.67	3.24	NaHCO ₃
76-32	4 705.3	9.8	7.9	382.9	5.9	11 846.4	16 958.2	12.29	1.24	48.47	1.54	NaHCO ₃

依据苏林分类方案,该区地层水应属于 NaHCO₃ 型水,总体反应了一种介于封闭与开启之间的有一定自由交替水存在的半封闭环境^[24]。研究区地层水矿化度(TDS)含量低,集中分布在 2 345.80~8 101.80 mg/L,仅有 3 个样品大于 10 000 mg/L,属于低矿化度地层水。目前研究区发现的大部分油气藏分布在这种低矿化度地层水区,表明该区油气

藏的形成与保存有其自身的特殊性。研究区地层水的 Na⁺+K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻离子浓度明显较海水中相应离子低,而 HCO₃⁻含量远大于海水中该离子的平均含量,且与地层水矿化度有很好的正相关性(图 2)。一般情况下,地层水中 HCO₃⁻的来源主要有大气降水来源、碳酸盐矿物的溶解、有机质成熟过程中释放的 CO₂或深部无机成因 CO₂的加

入^[25]。结合研究区实际地质背景可知,奈1区块地层中发育的断层并未断穿阜新组泥岩盖层且地层中碳酸盐岩不发育,因此地层水中 HCO_3^- 不可能来源于大气降水和碳酸盐矿物的溶解。研究区九佛堂组下段烃源岩处于低熟—中等成熟的热演化阶段,有机质成熟过程中产生的 CO_2 将直接进入地层水中,从而导致该区地层水中 HCO_3^- 浓度增高;研究区深大断裂较为发育,深部高浓度的 CO_2 沿断裂进入地

层水中,也将会导致地层水中 HCO_3^- 浓度增高,关于该区地层水中高浓度 HCO_3^- 的主要来源,将在下文做详细分析。研究区地层水矿化度与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 及 Cl^- 离子浓度呈明显的正相关关系(图2),表明地层水矿化度受蒸发浓缩作用影响大,这与该区原油成油母质主要形成于强还原、盐度较大的半深湖—深湖相沉积环境相吻合^[22-23]。

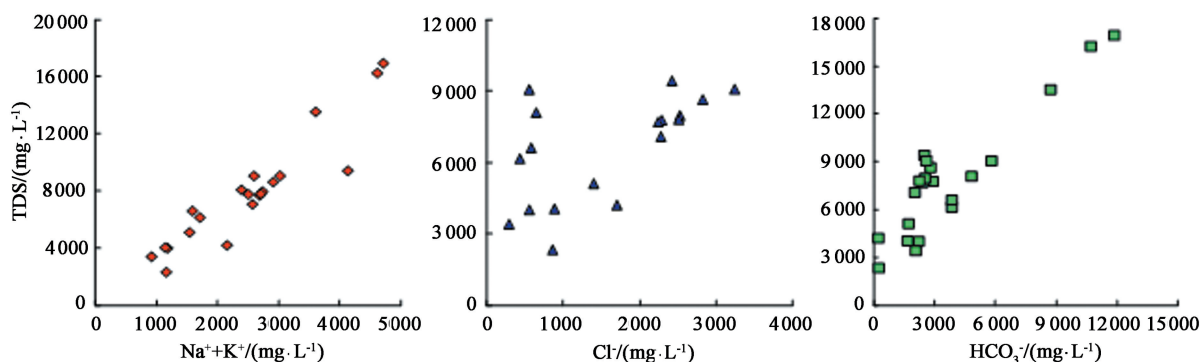


图2 奈1区块地层水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 及 HCO_3^- 含量与地层水矿化度(TDS)的关系

Fig. 2 Relationship of total dissolved solids (TDS), concentration of $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Cl^- and HCO_3^- for formation water in Nai 1 block

研究区地层水矿化度偏低,可能主要与研究区地层埋深较浅有关,该区目前还处于压实流—黏土矿物的脱水作用阶段,泥岩中被压实排除的孔隙水进入具有物性更好孔隙和水势相对低的砂体中,代替了砂岩的原始孔隙水,从而使得地层水矿化度降低;而黏土矿物的脱水进一步淡化了该区地层水的矿化度。其次可能是研究区断层开启程度小,由深部向上运移的高矿化度地层水水量不大所导致。在这种情况下,油气藏只能形成于水动力相对较弱的区域,否则强烈交替的地层水难以形成和保存油气藏。平面上,研究区地层水矿化度受断层分布影响较明显,靠近断层附近构造高部位油气井中地层水矿化度明显较远离断层的油气井高(表1、图3),其中靠近奈1-70-26断层的70-26、76-32、68-32井的地层水矿化度均大于10 000 mg/L,明显较研究区其他井中地层水矿化度高,表明地层水并未受到大气淋滤水的影响。地层水矿化度偏高可能因为是该井区距控制双河背斜形成的主干断层奈1-38-36断层更近,且次一级奈1-70-26断层与其相接,从而导致该井区地层水中可能混有沿断裂运移上来的深部较高矿化度地层水。

2.2 地层水特征系数及平面分布特征

地层水特征系数可以反映地层水所处的水文地球化学环境和水—岩相互作用强度。本文主要采用

钠氯系数($r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$)、脱硫酸系数($r(\text{SO}_4^{2-}) \times 100/r(\text{Cl}^-)$)、氯镁系数($r(\text{Cl}^-)/r(\text{Mg}^{2+})$)以及钙镁系数($r(\text{Ca}^{2+})/r(\text{Mg}^{2+})$)对研究区地层水地球化学特征进行详细分析。

2.2.1 钠氯系数

钠氯系数亦称变质系数,是表征地下水变质程度的参数,是地层封闭性、地层水浓缩变质作用程度、活动性和储层水文地球化学环境的重要指标。地层水中 Na^+ 化学稳定性相对 Cl^- 差,在地层水埋藏的过程中可能由于吸附、沉淀等化学反应导致 Na^+ 减少,而 Cl^- 变化不大,因此,在埋藏的过程中该系数趋于降低,钠氯系数变大反映受大气渗入水的影响,不利于油气的保存。一般认为,钠氯系数越小,地下水越浓缩,变质越深,水体环境趋于还原,越有利于油气保存。地层水的钠氯系数小于0.85,则油气保存条件好;若大于0.85,则表明有地下水渗入,油气保存条件差^[26]。奈1区块地层水钠氯系数主要分布在1.03~4.74(表1),表明地层水中 Na^+ 相对于 Cl^- 有过剩。所采集地层水样品埋深一般在2 500 m以内,正处于岩石的压实排水与黏土矿物脱水阶段,该阶段降低了 Cl^- 浓度,增大了 SO_4^{2-} 浓度^[27],因此导致钠氯系数及脱硫酸系数偏大。最大值均出现在靠近断层附近的油气井中,在靠近1-70

-26 断层附近的 70-26、76-32 和 68-32 井的钠氯系数在该区中最高(图 2),其值分别为 10.29、12.29 和 6.48,其次是 26-44 井的 4.74 和 70-42 井的 4.0,似乎表明该断层附近不利于油气的保存,但这 5 口井均为产正常原油的油井,反映地层封闭条件

较好,因此可以排除大气淋滤水的影响。奈 1 块地层水钠氯系数分布在 1.03~2.13,平均 1.31。从变质系数分布特征来看,奈 1 块相对较奈 3 块及以西地区地层封闭性好,更有利于油气的保存。

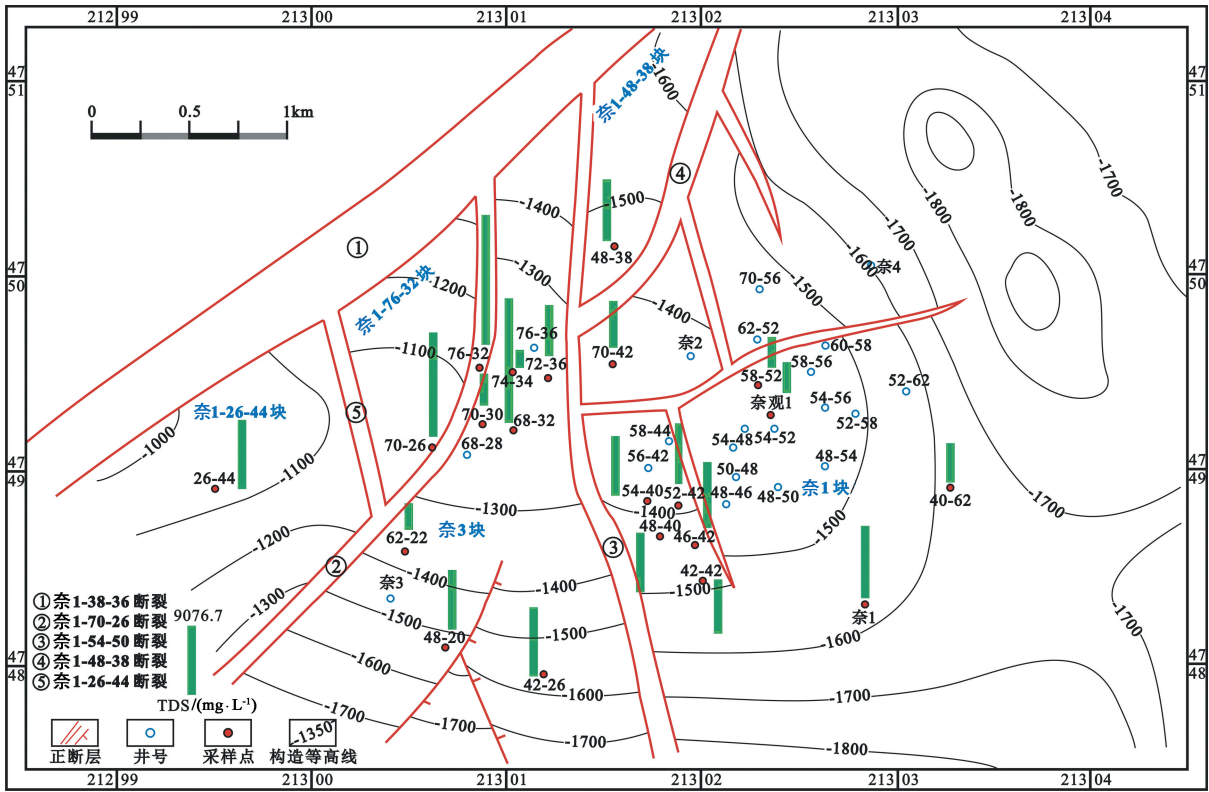


图 3 奈曼凹陷奈 1 区块井位分布图

Fig. 3 Well location of Nai 1 block, Naiman sag

2.2.2 脱硫酸系数

脱硫酸系数通过地层水中 SO_4^{2-} 的消耗程度反映地层水的氧化和还原状态。在还原环境中,当存在有机质时,脱硫酸细菌能使 SO_4^{2-} 还原成 H_2S ,使地下水中 SO_4^{2-} 减少乃至消失, HCO_3^- 增加, pH 值增大。脱硫系数越小,表明还原环境越强,地层封闭性越好,对油气的保存越有利。一般认为,地层水的脱硫酸系数小于 1,表明地层水还原较彻底,且越小保存条件越好;若大于 1,则认为还原作用不彻底,可能受到浅层氧化作用的影响^[28-29]。奈 1 区块脱硫酸系数分布在 0.37~33.87(表 1),变化范围大,反映奈 1 区块水动力条件比较复杂。研究区地层水中脱硫酸系数偏大主要与岩石的压实排水与黏土矿物脱水作用有关,并非大气淋滤水的作用。平面上,高值区同样出现在 1-70-26 断层附近的油气井中,其值平均可达 11.51;而奈 1 块油气井中地层水脱硫酸系数相对较低,平均为 4.33,表明奈 1 块更有

利于油气的保存。研究区地层水矿化度、脱硫酸系数、钠氯系数及 HCO_3^- 浓度高值区均分布在靠近奈 1-38-36 主干断裂的 1-70-26 断层附近井中,因此这些井区地层水特征受深部中侏罗统蓝旗组火山碎屑岩在压实排水与黏土矿物脱水过程中含钠矿物的溶解以及高浓度 CO_2 气体影响较大。

2.2.3 氯镁系数

氯镁系数是反映浓缩变质作用和阳离子吸附交换作用的重要水化学参数。油田水封闭越好、时间越长,浓缩变质越深,其氯镁系数越大,有利于油气的聚集与保存^[30]。奈 1 区块地层水的氯镁系数都在 8 以上,最高值为奈 1-46-42 井的 316.83。从平面上分布来看,氯镁系数高值区主要出现在奈 1 块油气井中,其氯镁系数平均值为 138.66;而奈 1 块以西地区地层水的氯镁系数平均值为 47.79,这也反映了奈 1 块地层的封闭性好,更有利于油气的保存。

2.2.4 钙镁系数

钙镁系数是表征浓缩变质作用和阳离子吸附交换作用强弱的水文地球化学重要参数之一。白云岩化作用越强、作用时间越长,油田水中 Mg^{2+} 离子含量就越小,浓缩变质程度就越大,钙镁系数就越大,油田水封闭就越好,有利于油气聚集与保存。一般来说,油田水的钙镁系数大于 3,封闭条件良好,有利于油气成藏^[31]。从该区地层水测试结果来看(表 1),奈 1 区块钙镁系数分布在 1.05 ~ 12.17,平均为 3.0,表明研究区有良好的油气保存条件。平面上,奈 1 块地层水的钙镁系数平均值为 4.14,而 1-70-26 断层附近的油气井中地层水的钙镁系数平均值为 1.76,表明奈 1 块更有利于油气保存。

2.3 地层水纵向分布特征

根据研究区地层水化学成分特征,可将奈 1 区块地层水化学成分及离子特征系数随埋深的增加划分为 3 种变化类型。

(1)稳定型。主要表现为随埋藏深度的增加,地层水化学成分变化不明显,比较稳定。例如,地层水矿化度(TDS)、 $(Na^+ + K^+)$ 浓度、 Mg^{2+} 浓度、脱硫系数等随埋深的增加变化不明显(图 4)。值得注意的是,浅层奈 3 块构造高部位的 68-32、70-26 和 76-32 井

中地层水矿化度在研究区中最高,说明该构造高部位盖层条件较好,油气及地层水进入圈闭后没有遭受到后期地表水的影响。一般说来,地层水矿化度随深度增加而增加,具体而言与古沉积环境、蒸发浓缩程度、地层水来源等有关,地层水矿化度越高,对油气藏的保存越有利^[7-8, 12, 15, 24, 26]。研究区地层水的 TDS、 $(Na^+ + K^+)$ 、 Mg^{2+} 、脱硫系数随深度的变化而主要呈稳定型分布,表明浅部储集层与深部烃源层的连通性较好,这可以通过研究区浅层油气藏中油气主要来源于下部九佛堂组下段低熟—中等成熟烃源岩来证明^[22-23]。由此可见,研究区浅层非生油岩储层中的高矿化度地层水及油气并非浅部地层中的原生流体,而是深部高矿化度地层水及烃源岩生排烃后,经断层等其他运移通道向上运移至构造高部位圈闭形成的,当这种流体进入浅层圈闭后,由于地层压力的降低,油气便从水中逐渐析出形成油气藏,而深部高矿化度地层水与浅层原生地层水混合,从而使浅层油气藏中地层水矿化度明显增高。奈 3 块浅层高部位地层水的特征表明,该断背斜高部位仍具有较好的油气保存条件。根据地层水特征分析表明,奈 1 块更有利于油气藏的形成与保存,这与该区目前发现的工业油气流井主要集中分布在奈 1 块相对应。

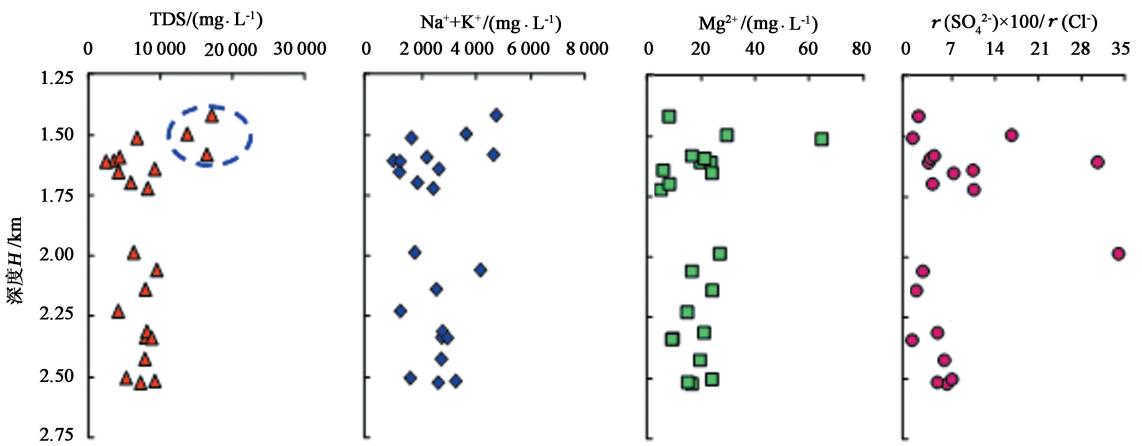


图 4 奈 1 区块地层水矿化度(TDS)、 $Na^+ + K^+$ 和 Mg^{2+} 浓度和脱硫系数随深度的变化特征

Fig. 4 Characteristics of total dissolved solids (TDS), concentration of $Na^+ + K^+$ and Mg^{2+} , desulfurization coefficient for formation water depending on depth of Nai 1 block, Naiman sag

(2)正相关型。主要表现为随着地层埋深的增加,地层水中离子含量和离子特征系数亦增大。从图 5 中可以看出,研究区地层水中 Cl^- 浓度、氯镁系数及钙镁系数都具有随埋深的增加而增大的变化趋势。地层水中 Cl^- 主要来自盐类物质的溶解及母源物质的风化溶滤作用,被认为是地层水最稳定的离子,研究区地层水中 Cl^- 浓度随深度增加不断增大可能主要与岩石的成岩作用阶段不同有关。随埋

深的增加,岩石成岩阶段由压实排水向黏土矿物脱水阶段转化,从而导致 Cl^- 浓度逐渐增加。由于 Mg^{2+} 浓度随埋深没有明显的变化,而 Cl^- 浓度逐渐增大,因此氯镁系数随深度逐渐增大。研究区碎屑长石主要由钾长石与斜长石组成,且以斜长石居多,该区地层水的水—岩相互作用主要是斜长石的钠长石化,从而导致 Ca^{2+} 的富集。随埋深增加和时间增长,斜长石的钠长石化作用逐渐增强,导致地层水中

Ca^{2+} 含量逐渐增加,因此表现出钙镁系数随埋深的增加而逐渐增大的特征。

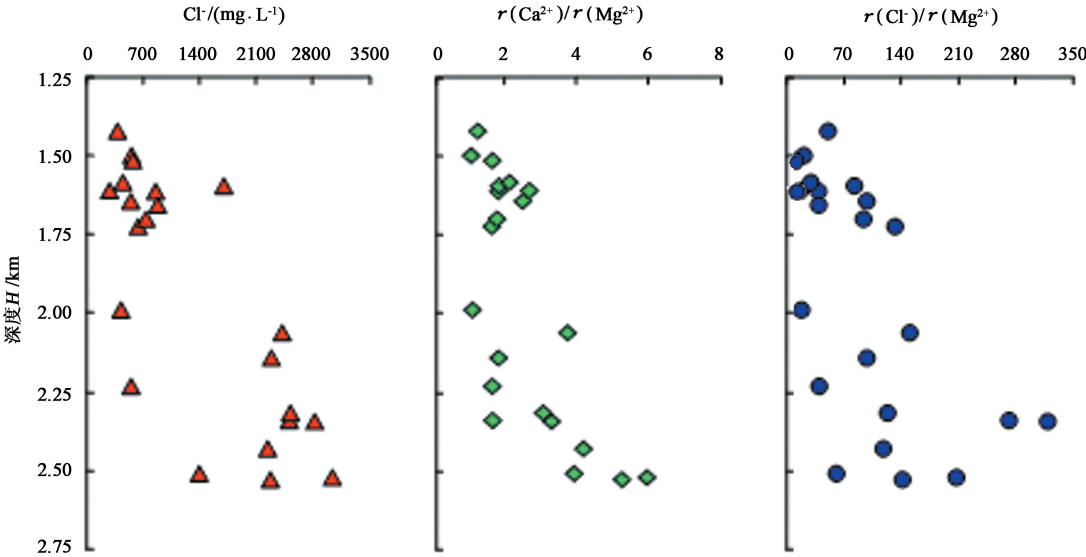


图 5 奈 1 区块地层水中 Cl^- 浓度、钙镁系数和氯镁系数随深度的变化特征

Fig.5 Characteristics of concentration of Cl^- , $r(\text{Ca}^{2+})/r(\text{Mg}^{2+})$, $r(\text{Cl}^-)/r(\text{Mg}^{2+})$ in formation water depending on depth of Nai 1 block, Naiman sag

(3)负相关型。主要表现为随着埋藏深度的增加,地层水中化学成分含量和离子特征系数反而减小。从图 6 可知,九佛堂组地层水中 HCO_3^- 浓度、钠氯系数均随埋深的增加而减小,其中靠近奈 1-38-36 主干断裂附近井中地层水的 HCO_3^- 浓度明显较

品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值大于 -8‰ ,为典型的无机幔源成因 CO_2 [32-33]。结合研究区地质背景及二氧化碳组分及碳同位素特征综合分析认为,该区地层中二氧化碳主要来源于奈曼凹陷南部隆起区广泛分布的中侏罗统蓝旗组火山岩,有机质热演化过程中产生的 CO_2 可能有一定贡献。这些幔源成因的无机 CO_2 气体沿深大断裂向上运移至九佛堂组中,从而导致主干断裂附近井中地层水的 HCO_3^- 浓度明显增大,而远离主干断裂井区 HCO_3^- 浓度变化不大,因此认为研究区地层水中 HCO_3^- 偏高主要与深度幔源成因的高浓度 CO_2 有关。钠氯系数的增大主要与岩石的压实排水及黏土矿物脱水作用过程中含钠矿物的溶解有关。

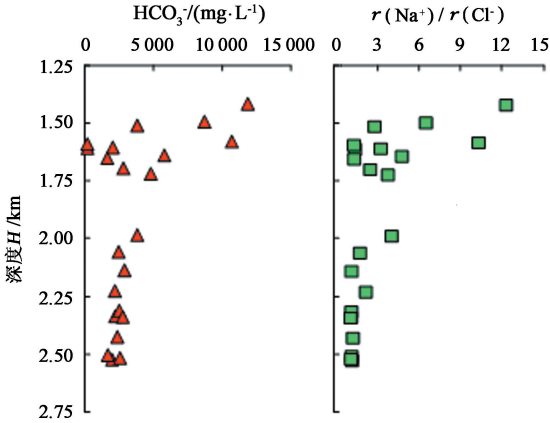


图 6 奈 1 区块地层水中 HCO_3^- 浓度和钠氯系数随深度的变化特征

Fig.6 Characteristics of concentration of HCO_3^- , $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ in formation water depending on depth of Nai 1 block, Naiman sag

远离该主干断裂井中的高。该区有机质主要处于低熟—中等成熟的热演化阶段,该阶段主要以生油为主、生气为辅,产生的 CO_2 含量不高,难以形成这一差异。研究区 20 个天然气样品的二氧化碳碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$)分布在 $-9.5\text{‰} \sim 2.9\text{‰}$,其中 18 个样

通过对研究区地层水水型、矿化度、钠氯系数、脱硫系数、氯镁系数及钙镁系数分析可知,奈曼凹陷奈 1 区块纵向上由浅至深,地层水的钠氯系数、 HCO_3^- 浓度呈减小趋势,而 Cl^- 浓度、钙镁系数氯及镁系数则逐渐增大;说明越往深层,地层水的变质程度越大,封闭条件越好,越有利于油气藏的形成和保存。平面上,奈 1 块地层水的钠氯系数、脱硫系数整体较奈 3 块及其以西地区偏低,而氯镁系数和钙镁系数整体偏高,表明奈 1 块地层的封闭性较奈 3 块及其以西地区好,更有利于油气藏的形成与保存。由于断裂有效地沟通了下伏烃源层与上覆储集层,且未断穿沙海组与阜新组泥岩盖层,因此研究区主干断裂和浅层分支断裂发育带是该区浅层次生油气

藏勘探的重要区域。

3 结 论

(1) 奈曼凹陷奈1区块九佛堂组地层中地层水矿化度较低,属于低矿化度地层水,地层水化学类型为 NaHCO_3 型。地层水矿化度在纵向上变化不明显,表明研究区九佛堂组上部地层的封闭条件较好,储层中地层水并未遭受大气降水的淋滤作用,浅部圈闭中较高矿化度地层水主要是深部流体沿断层等其他运移通道向上运移所致。奈1区块油气藏中地层水矿化度低,主要与该区地层埋深浅有关,其次可能是研究区断层开启程度小,由深部向上运移的高矿化度地层水水量不大所导致。地层水中 HCO_3^- 浓度较高主要与中侏罗统蓝旗组较高浓度的无机成因二氧化碳加入有关,而烃源岩热演化过程中产生的 CO_2 贡献有限。

(2) 研究区地层水化学组分及离子特征系数随深度的变化表现为稳定型、正相关型和负相关型3种变化类型。纵向上,研究区地层水的 Cl^- 浓度、 $r(\text{Cl}^-)/r(\text{Mg}^{2+})$ 及 $r(\text{Ca}^{2+})/r(\text{Mg}^{2+})$ 都随埋深的增加而增大, HCO_3^- 浓度及 $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ 均随埋深的增加而减小,表明奈1区块九佛堂组地层水现今总体上处于封闭的流体动力环境,有利于油气的聚集与保存。平面上,靠近凹陷中心的奈1块油气井中地层水 $r(\text{Na}^+)/r(\text{Cl}^-)$ 及 $r(\text{SO}_4^{2-}) \times 100/r(\text{Cl}^-)$ 明显较奈3块及其以西地区偏低,而 $r(\text{Cl}^-)/r(\text{Mg}^{2+})$ 及 $r(\text{Ca}^{2+})/r(\text{Mg}^{2+})$ 明显偏高,表明奈1块地层的封闭性较奈3块及其以西地区好,更有利于油气藏的形成与保存;研究区深大断裂有效沟通了烃源层与储集层,因此断裂发育的构造高部位有利于次生油气藏的形成与保存。

(3) 地层水化学特征与油气藏的形成与保存关系密切。纵向上,研究区深层的油气保存条件要优于浅层;平面上,越靠近凹陷中心,地层的封闭性越好,越有利于油气的保存。因此,靠近凹陷中心的奈1块是该区油气勘探的重要领域,且研究区主干断裂和浅层分支断裂发育带是该区浅层次生油气藏勘探的重要区域。

参考文献:

- [1] 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 29-54.
- [2] DAVISSON M L, PRESSER T S, CRISS R E. Geochemistry of tectonically expelled fluids from the northern Coast Ranges, Rumsey Hills[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 1687-1699.
- [3] 李伟, 刘济民, 陈晓红. 吐鲁番坳陷油田水地化特征及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 1994, 12(5): 12-18.
- LI Wei, LIU Jimin, CHEN Xiaohong. Characteristics of oil field water in Turpan Depression and its petroleum geological significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1994, 12(5): 12-18.
- [4] MACHEL H G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings-old and new insights[J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 140(1/2): 143-175.
- [5] MICHAEL K, BACHU S. Origin, chemistry and flow of formation waters in the Mississippian-Jurassic sedimentary succession in the west-central part of the Alberta Basin, Canada[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19: 289-306.
- [6] 钱一雄, 蔡立国, 顾忆. 塔里木盆地塔河油区油田水元素组成与形成[J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 751-757.
- QIAN Yixiong, CAI Ligu, GU Yi. The oilfield water in Tahe area, Tarim Basin—constraints from its element composition[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(6): 751-757.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 郑伦举, 何生, 秦建中, 等. 近临界特性的地层水及其对烃源岩生排烃过程的影响[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(1): 83-92.
- ZHENG Lunju, HE Sheng, QIN Jianzhong, et al. Formation water of near-critical properties and its effects on the processes of hydrocarbon generation and expulsion [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(1): 83-92.
- [10] XIE X N, FAN Z H, LIU X F, et al. Geochemistry of formation water and its implication on overpressured fluid

- flow in the Dongying Depression of the Bohaiwan Basin, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 89:432-435.
- [11] 张金川,唐玄,边瑞康,等.塔河地区奥陶系油田水分布与运动学特征研究[J].*地质学报*,2007,81(8):1135-1142.
- ZHANG Jinchuan, TANG Xuan, BIAN Ruikang, et al. Distribution and kinetic characteristics of hydrothermal fluid from Ordovician oil field in the Tahe Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007,81(8):1135-1142.
- [12] 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.
- [13] FU Yong, ZHAN Hongbin. On the origin of oil-field water in the Biyang depression of China[J]. *Environmental Geology*, 2009,58:1191-1196.
- [14] LI Wei, YANG Jinlin, 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.
- [15] 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 oil gas accumulation relations of Majitan area in the western Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009,31(3):253-257.
- [16] WANGY S, XU H Z, WANG C G, et al. Characteristics of the salinity and distribution of the Neopaleozoic formation water in Ordos Basin[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2010,31(5):748-753.
- [17] XU D Y, ZHOU J Y, WANG H, et al. Chemical characteristics of formation water significant to oil reservoir in Dongying formation, Nanpu Sag, Baohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010,32(3):285-289.
- [18] 林晓英,曾溅辉,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.
- [19] 银燕.东营凹陷古近系地层水化学特征及其演化主控因素分析[J].*海洋石油*,2011,31(1):37-42.
- YIN Yan. Analysis of hydrochemical characteristics of paleogene local water and the affecting factors in Dongying Sag[J]. *Offshore Oil*, 2011,31(1):37-42.
- [20] 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.
- [21] 许坤,李瑜.开鲁盆地晚中生代地层[J].*地层学杂志*,1995,19(2):88-95.
- XU Kun, LI Yu. Late Mesozoic strata of the Kailu Basin [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1995,19(2):88-95.
- [22] 赵兴齐,陈践发,张晨,等.开鲁盆地奈曼凹陷奈1区块原油地球化学特征及油源分析[J].*中国石油大学学报:自然科学版*,2012,36(3):44-53.
- ZHAO Xingqi, CHEN Jianfa, ZHANG Chen, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source analysis in Nai 1 block for Naiman depression, Kailu Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012,36(3):44-53.
- [23] 赵兴齐,陈践发,郭望,等.开鲁盆地奈曼凹陷奈1区块原油及烩源芳烃地球化学特征[J].*地球化学*,2013,42(3):262-273.
- ZHAO Xingqi, CHEN Jianfa, GUO Wang, et al. Geochemical characteristics of Aromatic hydrocarbon in crude oil and source from Nai 1 block of Naiman depression, Kailu Basin[J]. *Geochimica*, 2013,42(3):262-273.
- [24] 郭建华,吴东胜,刘辰生.辽河盆地大民屯凹陷油水变化规律与油气富集[J].*石油实验地质*,2006,28(5):458-462.
- GUO Jianhua, WU Dongsheng, LIU Chensheng. Variety regularity of oil as well as formation water property and hydrocarbon gathering in the Damintun Sag of the Liaohe Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006,28(5):458-462.
- [25] 谢继容,孔金祥.砂岩次生孔隙形成机制[J].*天然气勘探与开发*,2000,23(1):52-55.
- XIE Jirong, KONG Jinxiang. Mechanism of secondary pore of the sandstones [J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2000,23(1):52-55.
- [26] 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.
- [27] 楼章华, 金爱民, 朱蓉, 等. 松辽盆地油田地下水化学场的垂直分带性与平面分区性[J]. 地质科学, 2006, 41(3): 392-403.
- LOU Zhanghua, JIN Aimin, ZHU Rong, et al. Vertical zonation and planar division of oilfield groundwater chemistry fields in the Songliao Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(3): 392-403.
- [28] 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.
- [29] 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, 9(6): 49-55.
- LIU Jimin. The characteristics of underground water chemistry and its application in oilfield hydrology exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 1982, 9(6): 49-55.
- [30] 陈建平, 查明, 周瑶琪. 准噶尔盆地西北缘地层水化学特征与油气关系研究[J]. 地质地球化学, 2000, 28(3): 54-58.
- CHEN Jianping, ZHA Ming, ZHOU Yaoqi. Chemical characteristics of formation water in relation with oil and gas in the northwestern parts of Junggar Basin[J]. Geology-Geochemistry, 2000, 28(3): 54-58.
- [31] 李伟. 塔里木盆地油田水文地质与油气聚集关系研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 122-132.
- [32] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. 中国科学: B辑, 1992, 22(2): 185-193.
- DAI Jinxing. All kinds of hydrocarbon gas identification[J]. Science in China: Series B, 1992, 22(2): 185-193.
- [33] 沈平, 徐永昌, 王先彬, 等. 气源岩和天然气地球化学特征及成气机制研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991.
- (编辑 刘为清)