

黄骅拗陷乌马营潜山二叠系地层水化学特征及其油气地质意义

汪森¹, 楼达², 朱蓉¹, 陈雪刚¹, 胡威¹, 王辉², 赵勇刚², 雒蓉², 龚守捍²

1 浙江大学海洋学院; 2 中国石油大港油田公司勘探开发研究院

摘要 黄骅拗陷乌马营潜山属于持续深埋型潜山,地层水矿化度整体较高,地层封闭条件较好,而二叠系下石盒子组地层水具有异常低的矿化度特征。通过测试现今地层水的氡氧同位素值,分析流体包裹体岩相、均一温度与古盐度特征,揭示二叠系地层水淡化成因及其油气地质意义。结果表明:乌马营潜山现今地层水的氡氧同位素分布远离大气降水曲线,表明受现今大气降水影响较弱;烃类包裹体均一温度峰值主要分布在130~150℃范围内,以晚期成藏为主;部分包裹体地层水古盐度初始值小于5%,成藏期有明显降低现象,表明地层水经历了淡化过程。在晚白垩世末期,地层水淡化主要受下渗大气水淋滤作用影响。之后由于地层持续深埋,大气水下渗影响逐渐减弱。在沙河街组至明化镇组沉积时期,石炭系—二叠系煤系地层压实排水,排出的低矿化度地层水进入相邻的二叠系砂岩储层,导致储层地层水进一步淡化。地层水淡化促进次生孔隙的生成,改善储层物性,同时在局部形成碳酸盐胶结物,增强了储层非均质性。地层水淡化过程与油气运移充注同步进行,地层水流动方向指示了油气的运聚方向。

关键词 地层水; 水化学特征; 泥岩压实水; 地层水淡化; 二叠系; 乌马营潜山; 黄骅拗陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

0 前言

渤海湾盆地黄骅拗陷潜山带类型多样,发育乌马营、千米桥、孔店等含油气潜山^[1]。以往潜山勘探多围绕北部歧口富油气凹陷,以寻找新生古储型潜山油气藏为主,近年来针对古生界石炭系—二叠系煤系烃源岩探索古生古储型原油油气藏的勘探潜力,发现了乌马营潜山古生界凝析气藏^[2]。乌马营潜山为持续深埋型潜山,二叠系下石盒子组河流相砂体是主力含油气层系,发育上下2套砂层组,试油产量高。2018年在乌马营潜山YG1井二叠系砂岩中获高产油气流(油30.2 m³/d,气8.01×10⁴ m³/d)^[3]。YG1井在下石盒子组下砂组试油过程中获得高产且不含水,但上砂组第2层在试油过程中,日产气1×10⁴ m³以上的同时,日产水达46 m³,矿化度仅为5~7 g/L。YG1井的试油情况呈现出与以往潜山油气成藏模式认知不同的特点:一是层状油气藏上水下气的气

水倒置分布;二是持续深埋型潜山地层水矿化度通常与深度呈正相关,而该井在4 789~4 874 m试油层段产出水的矿化度仅为几克每升,明显低于正常地层水矿化度。这种气水倒置分布及异常地层水矿化度的成因有待深入分析。

地下水作为含油气盆地中一种常见的地质流体^[4],与油气及围岩发生长期的物理、化学反应,彼此存在物质与能量的交换。水文地质特征及地下水地球化学性质能够反映油气藏形成过程中的相关信息,对油气运移、成藏和保存具有指示意义^[5-6]。本文通过对乌马营潜山二叠系地层水现今水化学及古流体化学特征开展研究,揭示乌马营潜山二叠系低矿化度地层水成因以及其与油气成藏的关系。

1 地质概况

乌马营潜山位于黄骅拗陷南部,为北东走向的

收稿日期:2022-06-24; 改回日期:2022-11-21

本文受中国石油天然气股份有限公司项目“东部油区地热成因机制与开发潜力研究”(编号:2021DJ5501)、中国石油大港油田公司项目“大港探区重点潜山带地层水及硫化氢综合研究”(编号:D60)资助

第一作者: 汪森,硕士,主要从事油田水文地质方面的研究工作。通信地址:316021 浙江省舟山市定海区浙大路1号 浙江大学海洋学院;E-mail: W17863929559@163.com

通信作者: 楼达,硕士,高级工程师,主要从事油气勘探研究工作。通信地址:300280 天津市滨海新区海滨街大港油田勘探开发研究院新院;E-mail: louda@petrochina.com.cn

宽缓背斜形态(图1a),形成于印支期,喜马拉雅期挠曲定型并深埋^[7-9],勘探面积达350 km²。该潜山是目前已发现的原始结构保存较完整的“低位”潜山构造^[9],二叠系下石盒子组发育层状的砂岩凝析

气藏。潜山周缘分布有主体呈NE走向的徐黑凸起带、东光斜坡带、南皮洼陷及王官屯构造带(图1a);断裂体系主要呈NE、NNE走向,其中潜山主体部位发育较大规模的断层。

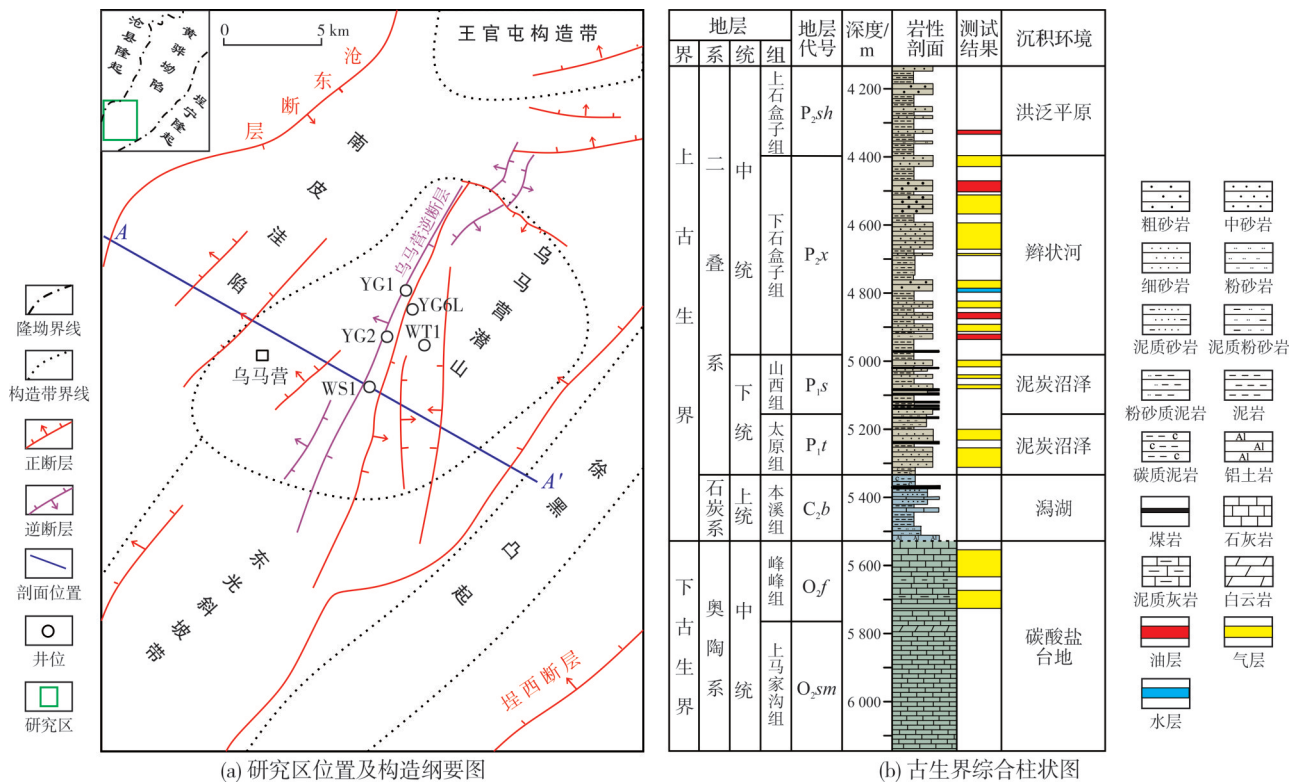


图1 乌马营潜山构造纲要及古生界地层柱状图(据文献[7-9])

Fig. 1 Structural outline and Paleozoic stratigraphic column of Wumaying buried hill (cited from references [7-9])

研究区发育石炭系一二叠系煤系烃源岩,主要包括煤、碳质泥岩、暗色泥岩3类(图1b),烃源岩厚度大、分布稳定,有机质丰度高、生烃强度大。乌马营潜山在喜马拉雅期持续深埋,煤系地层埋深普遍在4 800 m以下,烃源岩现今热演化程度较高, R_o 在1.7%左右,处于二次生烃高峰期。下石盒子组发育厚层砂岩储层(图1b),孔隙度平均值为7%~9%,渗透率平均值在 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下,为低孔低渗储层^[10],岩心见大量溶蚀次生孔隙发育。古近纪一新近纪潜山持续深埋,而且后期发育的伸展断层未对古构造圈闭造成破坏而有利于天然气的充注、保存与规模聚集^[11-12]。

2 地层水化学特征与成因

目前,乌马营潜山共有WS1井、YG1井、YG2井、WT1井、YG6L井共5口井钻至古生界,均在二叠

系发现良好油气层。本次研究共收集古生界地层水样83个,其中奥陶系峰峰组水样3个,二叠系下石盒子组水样80个。结合井史以及采样情况对数据进行了筛选,剔除工程措施等干扰因素,保证了数据的可靠性。

2.1 现今地层水化学特征

乌马营潜山地层水矿化度整体较高(表1),而且随埋深增加整体呈现增大的趋势(图2),表明研究区地层封闭程度及地层水浓缩程度较高。奥陶系峰峰组地层水矿化度平均值为56.2 g/L,地层水类型为 CaCl_2 型;阳离子中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 占主导,其次为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,阴离子以 Cl^- 为主,其次为 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 。二叠系下石盒子组地层水类型为 NaHCO_3 型;离子中含量最多的是 Cl^- ,其次是 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 HCO_3^- ,阳离子含量呈 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$,阴离子

表1 乌马营潜山地层水化学参数统计
Table 1 Chemical parameters of formation water in Wumaying buried hill

地层	井名	深度/m	矿化度/(g/L)	Cl ⁻ 含量/(g/L)	HCO ₃ ⁻ 含量/(g/L)	钠氯系数 ^①	脱硫系数 ^②	盐化系数 ^③	变质系数 ^④
新近系	W15	1 386.5	6.1	2.4	1.1	1.3	13.5	3.7	-5.1
	W2	2 878.5	30.7	18.1	0.3	0.9	1.7	120.3	9.9
	W3	2 821.0	35.5	20.4	0.5	0.9	3.5	65.6	5.9
	W4	2 907.0	32.2	18.8	0.2	0.9	3.3	163.1	3.2
	W5	2 437.5	34.1	20.0	0.7	0.9	0.9	49.0	4.6
	W13	2 917.5	27.5	15.5	1.4	1.0	0.3	19.4	0.9
	W18	3 197.0	12.6	5.3	1.4	1.3	17.4	6.3	-15.2
古近系	WC1	3 223.0	34.2	20.1	0.3	1.0	2.1	107.7	3.5
	WT1	2 961.8	34.5	18.4	2.2	0.9	3.9	14.4	0.3
	Y102L	4 842.0	6.7	3.5	0.6	1.0	0.5	9.1	-0.1
		5 144.5	32.2	18.8	1.1	0.9	0.9	29.8	0.5
	Y107X1	3 785.4	6.8	3.5	0.6	1.0	4.6	10.2	-0.3
	Y110H	4 987.4	7.3	3.6	1.0	1.1	1.0	6.0	-0.5
	YG2	3 730.5	13.8	7.9	0.4	0.9	1.1	26.9	14.4
中生界	WT1	4 582.4	61.1	26.2	1.3	0.5	40.6	35.2	0.8
		4 582.4	41.0	22.0	1.3	0.4	12.1	30.2	0.7
		4 977.7	15.7	6.9	3.2	1.1	0.0	3.7	-0.9
二叠系	WT1	4 977.7	5.2	1.7	1.5	1.4	13.2	2.0	-2.9
		4 977.7	4.8	1.6	1.5	1.5	8.0	1.8	-6.1
		4 749.0	4.6	1.6	1.6	1.3	0.0	1.8	-14.1
二叠系	YG1	4 831.5	6.2	2.1	1.6	1.4	15.0	2.3	-3.2
		4 831.5	7.3	2.7	1.5	1.3	16.0	3.0	-4.7
		4 831.5	5.6	1.8	1.4	1.4	22.0	2.2	-4.3
		4 831.5	5.8	2.1	1.3	1.3	13.4	2.7	-2.1
		4 550.7	5.9	2.3	1.1	1.2	10.6	3.6	-0.6
二叠系	YG6L	4 550.7	8.1	3.9	0.9	1.1	5.0	7.1	-0.4
		4 550.7	7.6	3.5	0.7	1.0	12.5	8.9	-0.1
		4 550.7	7.5	3.6	0.9	1.0	3.7	6.6	-0.2
		5 478.0	82.6	49.6	0.7	0.6	2.1	116.5	10.2
奥陶系	WS1	5 627.5	55.1	47.9	0.3	0.1	2.2	244.9	34.2
		5 722.9	30.9	14.2	0.3	1.0	29.1	79.9	0.1

注：①钠氯系数= $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ ；②脱硫系数= $\gamma(\text{SO}_4^{2-})\times 100/\gamma(\text{Cl}^-)$ ；③盐化系数= $\gamma(\text{Cl}^-)/[\gamma(\text{HCO}_3^-)+\gamma(\text{CO}_3^{2-})]$ ；④变质系数= $(\gamma(\text{Cl}^-)-\gamma(\text{Na}^+))/\gamma(\text{Mg}^{2+})$ 。

含量呈 $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ 。

但是二叠系地层水矿化度出现异常低值(表1,图2),这些低矿化度数据均来自下石盒子组。下石盒子组地层水矿化度普遍低于10 g/L,Cl⁻浓度集中在1.6~3.5 g/L,HCO₃⁻浓度集中在0.9~1.6 g/L,具有低矿化度、低Cl⁻浓度、高HCO₃⁻浓度的特征。

2.2 古流体化学特征

流体包裹体保存了地质流体大量的地球化学信息,因此它是研究古流体最直接、最可靠的手段之一^[13]。本次研究采集了YG1、YG2、WS1等3口井的下石盒子组砂岩储层样品共22件。对流体包裹体

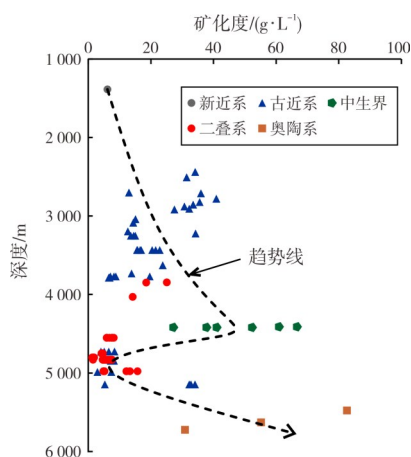
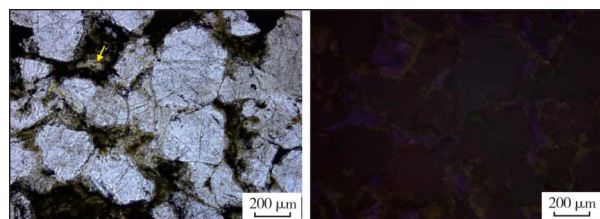


图2 乌马营潜山地层水矿化度纵向分布图

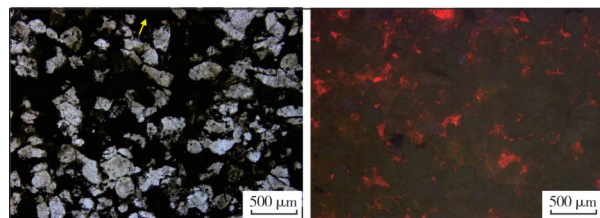
Fig. 2 Vertical distribution of salinity of formation water in Wumaying buried hill

进行岩相学观察、均一温度与冰点温度测试,分析乌马营潜山二叠系古流体地球化学特征。

下石盒子组储层多是以石英等碎屑颗粒为主的中细砂岩,部分石英颗粒具典型的自生加大特征,或充填碳酸盐胶结物及黏土矿物。在阴极光下石英碎屑颗粒发暗紫色光,石英颗粒加大边不发光,部分碎屑颗粒间发育白云石胶结物,发红色光(图3),说明下石盒子组砂岩在成岩早—中期阶段成岩作用较强。



(a) 石英颗粒发暗紫色光。4 772.4 m



(b) 部分碎屑颗粒间白云石胶结物发红色光。4 871 m

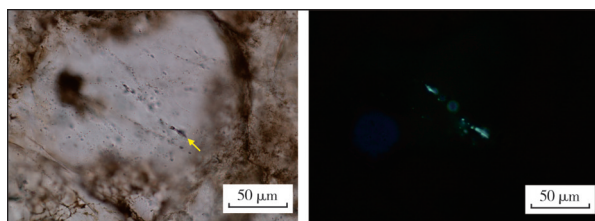
图3 YG1井二叠系砂岩镜下微观照片

(左:单偏光;右:阴极发光)

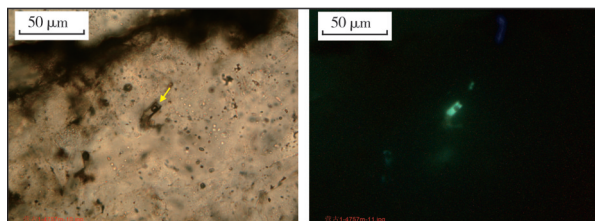
Fig. 3 Microscopic images of Permian sandstone in Well YG1 (left: monopolarized light, right: cathodoluminescence)

本次研究对YG1井下石盒子组4 651.8~4 885.0 m井段的15件砂岩储层样品进行流体包裹体观测。按照样品流体包裹体中烃类的物理相态,可将油气包裹体分为气液烃包裹体、液烃包裹体和气态烃包

裹体3类。储层样品中各种烃类包裹体均有发育,其中气液烃包裹体数量最多,约占85%;纯液态烃包裹体约占10%;纯气态烃包裹体数量相对较少,约占5%。在紫外光照射下,液态烃主要发浅蓝绿色、浅蓝色、浅黄绿色荧光(以显示浅蓝绿色、浅蓝色荧光为主);气态烃呈灰色,无荧光显示。此次观察到的烃类包裹体主要表现为沿切穿石英颗粒及其加大边的微裂隙(面)呈线状或带状分布,或成群分布于长石颗粒中(溶蚀成因,图4),发育丰度极高。对包裹体中的气相成分以及部分液相成分进行激光拉曼分析,结果显示YG1井、YG2井、WS1井气相成分均以甲烷为主,偶有 N_2 、 CO_2 等成分出现。



(a) 包裹体沿切穿石英颗粒的微裂隙成带状分布。4 652 m



(b) 包裹体于长石颗粒中成群分布,溶蚀成因。4 757 m

图4 YG1井二叠系气液烃包裹体镜下微观照片

(左:单偏光;右:荧光)

Fig. 4 Microscopic images of Permian gas-liquid hydrocarbon inclusions in Well YG1 (left: monopolarized light, right: fluorescence)

油气运移、充注、成藏阶段,矿物在生长过程中会形成大量烃类包裹体及共生的盐水包裹体^[14-15]。图5显示,YG1井烃类包裹体伴生的盐水包裹体均一温度峰值主要在130~150℃范围内,在4 651.80 m处的包裹体均一温度集中分布在110~130℃,在更深部位(4 790.00 m、4 885.00 m)均一温度集中在130~150℃。YG2井和WS1井包裹体均一温度峰值同样主要分布在130~150℃范围内。结合研究区沉积埋藏史分析(图6),YG1井包裹体均一温度对应的成藏时间约为34~10 Ma,即古近系沙河街组至新近系明化镇组沉积时期,是研究区的主要成藏期。YG2井成藏时间约为14~6 Ma,即明化镇组沉积时期,稍晚于YG1井。在镜下还可观察到部分碳质沥青,结合构造演化史,推测在中生代可能存在一次早期成藏。

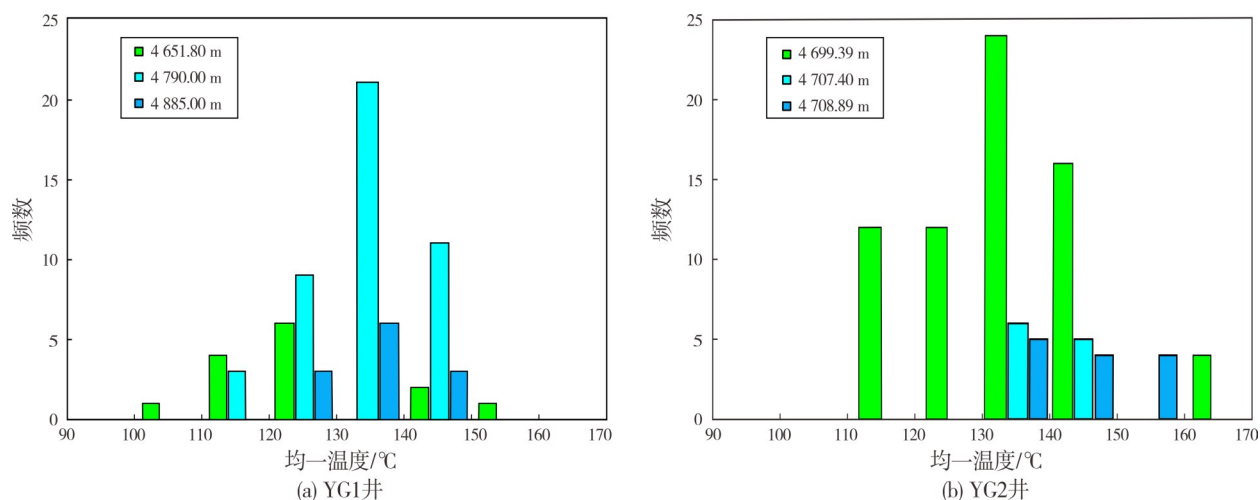
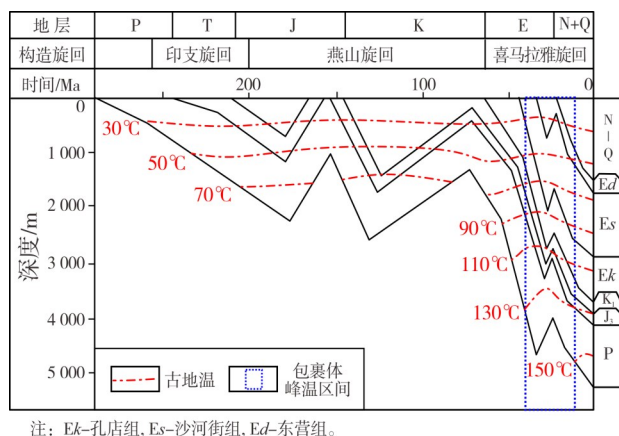


图5 YG1、YG2井二叠系包裹体均一温度直方图

Fig. 5 Histograms of homogenization temperature of Permian inclusions in Well YG1 and Well YG2

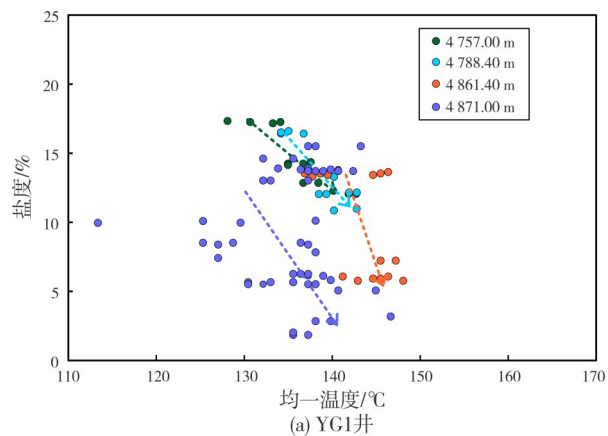


注: Ek-孔店组, Es-沙河街组, Ed-东营组。

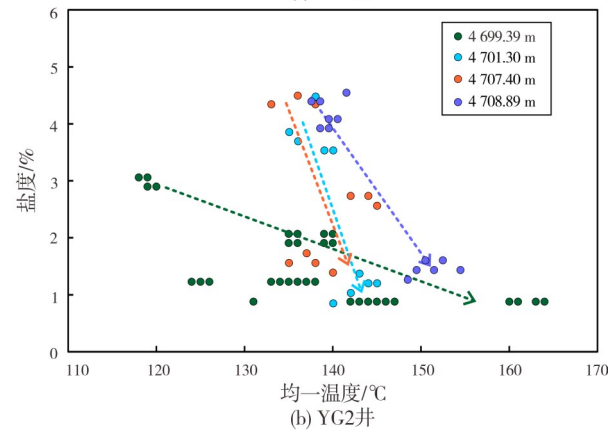
图6 YG1井埋藏史与热史模拟

Fig. 6 Modeling of burial history and thermal history of Well YG1

包裹体的盐度是反映古流体性质的重要参数。通过测试发现, YG1井多数样品包裹体古盐度初始值较高(大于10%), 而且在4757.0 m、4788.4 m、4861.4 m、4871.0 m等多个深度的样品中都观测到了古盐度随均一温度增加而降低的现象(图7a)。主要下降阶段的均一温度范围在130℃~150℃, 对应的地质年代在34~10 Ma, 即沙河街组至明化镇组沉积时期。结合样品的沉积环境、包裹体和现今地层水特征分析, 认为YG1井下石盒子组的地层水经历了淡化的过程。此外, YG1井部分包裹体地层水古盐度初始值较低, 小于5%: 4652.0 m深度的包裹体古盐度均值仅为1.33%; 4685.0 m深度的包裹体古盐度均值为2.2%。YG2井包裹体地层水古盐度相对较低, 普遍低于5%, 盐度随均一温度增加同样发生了一定程度的降低(图7b)。



(a) YG1井



(b) YG2井

注: 虚线为趋势线。

图7 YG1井、YG2井二叠系古盐度与均一温度关系图

Fig. 7 Relationships between paleosalinity and homogenization temperature of Permian in Well YG1 and Well YG2

2.3 地层水成因

通常随着地层埋深增加, 地层水矿化度会逐渐增大。乌马营潜山深部奥陶系形成于海相沉积环

境,现今地层水矿化度大于30.0 g/L,钠氯系数小于1.0,变质系数和盐化系数高,水化学参数表明奥陶系地层封闭性良好,地层水浓缩变质程度高,为原始沉积的海相地层水。二叠系之上的中生界及古近系地层水矿化度同样相对较高,普遍在20.0 g/L以上,反映地层封闭性较好。石炭系一二叠系形成于泥炭沼泽等陆相沉积环境,下石盒子组异常低的地层水矿化度及包裹体古盐度均表明地层水具有异于上覆及下伏地层的成因,需要进一步深入研究。

在分析二叠系地层水成因之前,首先需要排除由于固井质量等工程工艺原因导致上覆地层水沿井壁下渗到下石盒子组的可能。通过上覆地层固井、测产液剖面可知,YG1井整体固井质量好,流温恒定,无跳点,说明上覆明化镇组、馆陶组发生水窜下渗至二叠系的可能性较小。

沉积盆地地层水在多数情况下由于与岩石发生相互作用,在不同地质条件下,地层水矿化度会浓缩或淡化^[16]。如前所述,YG1井二叠系古流体在成藏期经历了淡化的过程。淡化作用可能发生在有深大断裂沟通的层位,淡化原因为大气降水下渗;也可能发生在没有断层沟通的层位,需要结合具体情况分析低矿化度水来源或原生地层水发生淡化的原因。

地层水氘氧同位素组成(δD)是判断地下水成因的重要依据。根据氘氧同位素测试数据在大气降水线上的落点位置,可以判断地层水成因^[17]。本次研究采集了YG1井、WT1井不同深度的地层水样品(表2),利用中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室液态水同位素仪(型号:IWA-35-EP)进行氘氧同位素测试,测试结果 δD 误差为 $\pm 0.6\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 误差为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

乌马营潜山地层水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值分布范围分别为 $-84.3\text{‰} \sim -67.5\text{‰}$ 、 $-3.7\text{‰} \sim 0.7\text{‰}$,平均值分别为 -72.1‰ 、 -1.5‰ (表2)。将研究区地层水 δD 、 $\delta^{18}O$ 值绘制在地层水 δD - $\delta^{18}O$ 关系图上,通过与大气降水曲线进行对比可知,乌马营潜山地层水氘氧同位素组成以明显右偏大气降水曲线为特征(图8),这表明乌马营潜山地层水整体受现今大气降水的影响较弱。同时,根据图8也可排除岩浆水和变质水成因。乌马营潜山断层在喜马拉雅期活动减弱,新近纪断层停止活动^[3]。从地震剖面看,YG1井附近没有大断层沟通地表,加之晚期断层不活动,现今大气降水无法通过断层下渗至4 500 m深度以下的

下石盒子组。因此,可以排除现今大气降水沿断层下渗导致的地下水淡化。

表2 乌马营潜山地层水氘氧同位素组成

Table 2 Deuterium and oxygen isotope composition of formation water in Wumaying buried hill

样品编号	样品名称	井名	深度范围值/m	地层	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$
YG1	地层水	YG1	4 789.00~4 874.00	下石盒子组	-84.3	-3.7
WT1-1	地层水	WT1	4 577.87~4 586.87	中生界	-68.0	0.2
WT1-2	地层水	WT1	4 577.87~4 586.87	中生界	-67.5	-3.1
WT1-3	地层水	WT1	2 959.50~2 964.00	孔店组	-68.4	0.7

注: δD 、 $\delta^{18}O$ 基于SMOW标准样品。

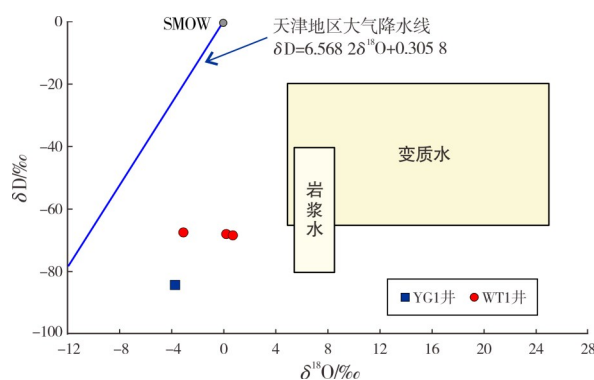


图8 乌马营潜山 δD - $\delta^{18}O$ 地层水成因判别图

(识别图版据文献[17])

Fig. 8 Origin identification diagram based on δD - $\delta^{18}O$ relationship of formation water in Wumaying buried hill (template is cited from reference [17])

楼章华等^[17]认为深部泥岩压实作用排出的孔隙水、黏土矿物脱水产生的孔隙水以及石膏转化为硬石膏的释出水基本上为淡水,可导致深部地层水淡化。黄骅坳陷石炭系一二叠系煤系烃源岩厚度表现为以王官屯向南至乌马营潜山为中心的发散式分布特征^[18],煤岩单层厚度为2~5 m,累计厚度为20~45 m,暗色泥岩厚度为150~350 m,碳质泥岩厚度为40~110 m。乌马营潜山形成于中生代,新生代时地层持续深埋,石炭系一二叠系保存良好,岩性主要包括煤层、泥岩以及稳定展布的下石盒子组砂岩^[8,19-20]。YG1井下石盒子组砂岩储层与石炭系一二叠系煤系地层直接接触,与古近系泥岩没有地层对接关系。稳定展布的下石盒子组砂岩储层能够为石炭系一二叠系煤系烃源岩生成的油气以及地层水提供良好的储集空间。

YG1井下石盒子组原油主要为低凝点(0°C)、低

蜡(8.9%)的轻质原油,与古近系高凝点(21~27℃)、高蜡(16%~34%)的凝析油不同;天然气 $\delta^3\text{C}_1$ 偏重,介于-37‰~-33‰,干燥系数大于0.8,与石炭系一二叠系煤系烃源岩生成的天然气相近。油气源对比表明, YG1井油气来自石炭系一二叠系煤系烃源岩^[3]。

石炭系一二叠系煤系地层厚度大,孔隙水含量高,沙河街组沉积时期地层开始发生持续深埋,上覆地层压力加大,在地层压力作用下泥质沉积物以及黏土矿物快速脱出大量孔隙水。石炭系一二叠系形成于泥炭沼泽陆相沉积环境,排出的孔隙水矿化度、 Cl^- 浓度相对较低, HCO_3^- 浓度则较高,与下石盒子组现今地层水化学特征相似。YG1井下石盒子组砂岩储层孔渗性相对较好,同时,结合乌马营潜山构造演化与流体运移(图9)分析,印支—燕山期发育的断层向下断至奥陶系、向上延伸至沙河街组,沟通了石炭系一二叠系泥岩地层与砂岩地层,构成了流体运移的良好通道。泥岩压实及黏土矿物脱水产生的孔隙水,伴随烃源岩生成的油气沿断层就近进入到孔渗相对高、流体势相对低的同地层组的砂体中,导致地层水 Cl^- 浓度、矿化度降低。YG1井储层中发育大量气液两相流体包裹体,且多为含烃盐水包裹体,即液相成分包括盐水和液态烃两种,流体应均来自石炭系一二叠系煤系地层。

YG1井、YG2井部分包裹体的地层水古盐度初始值较低,甚至低于现今地层水矿化度。结合沉积环境及构造演化,推测是由于晚白垩世末期乌马营北部构造抬升、地层剥蚀,导致古大气水淋滤,淡化了地层水。镜下观察到YG1井下石盒子组胶结作用强烈,高岭石胶结、方解石胶结、硅质胶结发育。结合乌马营潜山带成岩—成藏系统演化史研究,认为成岩时期早于淋滤期,加之晚期地层快速深埋,有助于受古大气水淋滤淡化影响的低矿化度地层水局部被封存。因此,下石盒子组低矿化度地层水存在古大气水封存成因。结合乌马营潜山沉积埋藏史分析认为:在晚白垩世末期,研究区局部的地层水淡化主要受下渗大气水淋滤作用影响;之后由于地层持续深埋,大气水下渗影响逐渐减弱;在沙河街组至明化镇组沉积时期,石炭系一二叠系煤系地层压实排水,排出的低矿化度地层水进入相邻的下石盒子组砂岩储层,导致储层地层水进一步淡化(图9)。

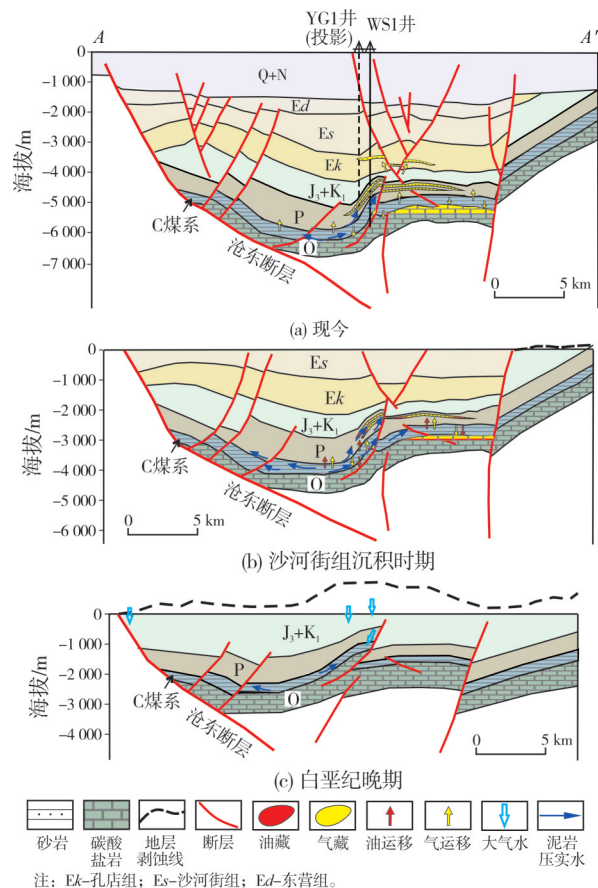


图9 乌马营潜山构造演化与流体运移模式(据文献[9])

Fig. 9 Pattern of structural evolution and fluid migration in Wumaying buried hill (cited from reference [9])

3 地层水与油气成藏、保存

乌马营潜山在中—新生代先后经历了印支、燕山及喜马拉雅等构造运动^[21]。印支中晚期乌马营潜山受大气水下渗淋滤作用相对较弱。侏罗纪中期的燕山运动一幕导致乌马营地区整体抬升,三叠系一中下侏罗统几乎全部被剥蚀(图9c)。侏罗纪晚期受到区域挤压作用形成逆冲构造。白垩纪早期地层沉降,烃源岩达到生烃门限,研究区开始早期成藏;由于烃源岩热演化程度较低,早期的油气充注成藏规模相对较小。白垩纪晚期的燕山运动二幕造成上侏罗统和下白垩统抬升、剥蚀、残留^[22],生烃也随之中止。古大气水下渗淋滤导致早期聚集的油气发生氧化作用,生成残留的碳质沥青。由于成岩时期早于淋滤期,加之晚期地层快速深埋,部分淋滤成因的低矿化度地层水被封存。喜马拉雅期,黄骅拗陷开始进入断陷演化阶段,厚度较大的古近系孔店组与沙河街组沉积在中生代潜山之上(图9b)。乌马营潜山进入持续沉降阶段,石炭

系一二叠系煤系烃源岩埋深增大,开始二次生烃^[9]。

乌马营潜山二叠系包裹体均一温度峰值主要分布在130~150℃范围内,表明油气以晚期成藏为主。含蓝白色轻质油的包裹体在全区广泛发育,标志着晚期油气有较大规模充注。图5和图7的对比显示,烃类流体充注时间与地层水淡化时间相吻合,均发生在沙河街组至明化镇组沉积时期,表明地层水淡化与油气运移、充注同步进行。地层水作为含油气盆地常见的地质流体,与围岩及油气存在物质交换,其演化可以为储层发育及油气成藏过程提供证据。

地层水淡化可以改善储集空间。乌马营潜山石炭系泥岩中的流体为相邻砂岩成岩反应提供物质来源,与砂岩中的碳酸盐的溶解-沉淀作用具有密切联系^[23]。在油气成藏过程中,泥岩受压实作用以及黏土矿物转化会排出低矿化度地层水,地层水为砂岩提供胶结物和自生矿物的物质来源,同时作为运移载体将有机酸、CO₂和烃类带入砂岩储层^[24]。有机酸和CO₂的加入导致砂岩孔隙流体pH值降低,碳酸盐颗粒和胶结物溶解,形成的次生孔隙为油气运移和充注提供了储集空间和运移通道。储层物性数据统计表明:在埋深5 000 m处,YG1井的孔隙度达10%,YG2井的孔隙度可达14%,仍然具备良好的储集性能。溶蚀产生的钙离子和碳酸根离子随着流体发生运移,在运移过程中由于pH值等条件的改变,再次发生沉淀。随着CO₂分压降低,泥岩孔隙流体中饱和碳酸盐组分在进入砂岩孔隙时会形成以CaCO₃为主的碳酸盐沉淀。因此,砂岩中的碳酸盐胶结物一般在砂体的上下边缘与泥质的界面附近,以及砂体内部的油-水界面优先沉积^[24]。地层水淡化的最终结果是在一定范围内形成优质储层,同时在砂体边缘等局部区域形成碳酸盐胶结物,增强了储层的非均质性。

此外,地层水是油气运移、成藏的动力和载体,地层水流动方向能够指示油气运移方向。前文已证实乌马营潜山泥岩压实及黏土矿物脱水产生的孔隙水,沿断层进入到孔渗相对高、流体势相对低的下石盒子组砂岩储层。研究区煤系烃源岩自沙河街组沉积期开始大量生排烃,生成的油气伴随泥岩压实水离心流,通过优势运移通道由凹陷中心向周缘及构造高部位运移,在下石盒子组有利圈闭优先聚集形成油气藏;部分油气沿活动断层调整至古近系储层,在古近系圈闭中聚集成藏(图9a)。

整体上,乌马营潜山为持续沉降型潜山,地层封

闭性好,地层水矿化度相对较高,而且随着埋深增加而增大。地层水离子比例系数也显示潜山在持续深埋的地质背景下形成了有利于油气成藏的保存条件。纵向上,深部地层的封闭性优于浅部地层。

4 结 论

(1)黄骅坳陷乌马营潜山属于持续深埋型潜山,地层水矿化度整体相对较高,地层封闭性较好,油气保存条件良好。二叠系下石盒子组地层水为NaHCO₃型,具有低矿化度、低Cl⁻浓度、高HCO₃⁻浓度的特征,水化学特征与下伏奥陶系、上覆中新生界地层水具有明显差异。

(2)二叠系储层发育大量气液两相包裹体,气相成分均以甲烷为主,偶有N₂、CO₂等成分出现。包裹体均一温度峰值主要分布在130~150℃范围内,油气以晚期成藏为主。

(3)氧同位素数据表明,乌马营潜山地层水受现今大气降水影响较弱。成藏期包裹体古盐度有明显降低,表明地层水经历了淡化的过程。在晚白垩世末期,下石盒子组局部的地层水淡化主要受下渗大气水淋滤作用影响。之后由于地层持续深埋,大气水下渗影响逐渐减弱。在沙河街组至明化镇组沉积时期,石炭系一二叠系煤系地层压实排水,排出的低矿化度地层水进入相邻的二叠系砂岩储层,导致储层地层水进一步淡化。

(4)沙河街组至明化镇组沉积时期,乌马营潜山地层水淡化促进了次生孔隙的生成,改善储层物性,同时在局部形成碳酸盐胶结物,增强了储层非均质性。地层水淡化过程与油气运移充注同步进行,地层水流动方向指示了油气的运聚方向。

参 考 文 献

- [1] 张津宁,付立新,周建生,等.渤海湾盆地黄骅坳陷古潜山的宏观展布特征与演化过程[J].地质学报,2019,93(3): 585-596.
ZHANG Jinning, FU Lixin, ZHOU Jiansheng, et al. Macroscopic distribution characteristics and evolution process of buried hill in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. Acta geologica sinica, 2019, 93(3): 585-596.
- [2] 赵贤正,蒲秀刚,姜文亚,等.黄骅坳陷古生界含油气系统勘探突破及其意义[J].石油勘探与开发,2019,46(4): 621-632.
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, JIANG Wenya, et al. An exploration breakthrough in Paleozoic petroleum system of Huanghua Depression in Dagang Oilfield and its significance [J]. Petroleum exploration and development, 2019, 46(4): 621-632.
- [3] 徐进军,李宁,金强,等.黄骅坳陷石炭一二叠系凝析油气

- 地球化学特征及来源分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 644-652.
- XU Jinjun, LI Ning, JIN Qiang, et al. Geochemical characteristics and source analysis of Carboniferous-Permian condensate oil and gas in Huanghua Depression[J]. Journal of Jilin University (earth science edition), 2020, 50(2): 644-652.
- [4] 楼章华, 李梅, 金爱民, 等. 中国海相地层水文地质地球化学与油气保存条件研究[J]. 地质学报, 2008, 82(3): 387-396.
- LOU Zhanghua, LI Mei, JIN Aimin, et al. Hydrogeological and hydrogeochemical characteristics and hydrocarbon preservation conditions for marine strata in China[J]. Acta geologica sinica, 2008, 82(3): 387-396.
- [5] 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 and gas accumulation relations of Majiatan area in the western Ordos Basin[J]. Petroleum geology & experiment, 2009, 31(3): 253-257.
- [6] 杨水胜, 王汇智, 闫骁龙, 等. 鄂尔多斯盆地中南部侏罗系直罗组流体包裹体特征[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(6): 39-47.
- YANG Shuisheng, WANG Huizhi, YAN Xiaolong, et al. Characteristics and indication of fluid inclusions of Jurassic Zhiluo Formation in south-central Ordos Basin[J]. Lithologic reservoirs, 2021, 33(6): 39-47.
- [7] 张志攀, 罗波. 渤海湾盆地黄骅坳陷南部乌马营地区构造特征及其油气地质意义[J]. 天然气勘探与开发, 2017, 40(3): 31-37.
- ZHANG Zhipan, LUO Bo. Structural characteristics of Wumaying area in southern Huanghua Depression, the Bohai Bay Basin and their petroleum geology significance[J]. Natural gas exploration and development, 2017, 40(3): 31-37.
- [8] 周立宏, 王鑫, 付立新, 等. 黄骅坳陷乌马营潜山二叠系砂岩凝析气藏的发现及其地质意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 431-438.
- ZHOU Lihong, WANG Xin, FU Lixin, et al. Discovery and geological significance of the Permian sandstone condensate gas reservoir in Wumaying buried hill, Huanghua Depression[J]. China petroleum exploration, 2019, 24(4): 431-438.
- [9] 金凤鸣, 王鑫, 李宏军, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷乌马营潜山内幕原生油气藏形成特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 521-529.
- JIN Fengming, WANG Xin, LI Hongjun, et al. Formation of the primary petroleum reservoir in Wumaying inner buried-hill of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum exploration and development, 2019, 46(3): 521-529.
- [10] 朱炎铭, 秦勇, 王猛, 等. 黄骅坳陷石炭—二叠纪煤成烃演化的构造控制[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 283-287.
- ZHU Yanming, QIN Yong, WANG Meng, et al. Tectonic control on the hydrocarbon-generation evolution of Permian-Carboniferous coal in Huanghua Depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(3): 283-287.
- [11] 杨池银, 于学敏, 刘岩, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷中南部煤系发育区煤成气形成条件及勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 23-32.
- YANG Chiyin, YU Xuemin, LIU Yan, et al. Geological conditions of coal-derived gas accumulation and exploitation prospect in the Carboniferous-Permian covered area from south central of Huanghua Depression in Bohai Bay Basin[J]. Natural gas geoscience, 2014, 25(1): 23-32.
- [12] 刘静江, 刘慧荣, 谭琳, 等. 塔里木盆地轮南奥陶系古潜山油气成藏与分布[J]. 地质科学, 2004, 39(4): 532-542.
- LIU Jingjiang, LIU Huirong, TAN Lin, et al. Reservoir characteristics and distributions of the Ordovician buried hill reservoir in Lunan, Tarim Basin[J]. Chinese journal of geology, 2004, 39(4): 532-542.
- [13] 卢焕章, 郭迪江. 流体包裹体研究的进展和方向[J]. 地质论评, 2000, 46(4): 385-392.
- LU Huanzhang, GUO Dijiang. Progress and trends of researches on fluid inclusions[J]. Geological review, 2000, 46(4): 385-392.
- [14] 米敬奎, 肖贤明, 刘德汉, 等. 利用包裹体信息研究鄂尔多斯盆地上古生界深盆气的运移规律[J]. 石油学报, 2003, 24(5): 46-51.
- MI Jingkui, XIAO Xianming, LIU Dehan, et al. Study on Upper-Paleozoic deep basin gas migration in Ordos using inclusion information[J]. Acta petrolei sinica, 2003, 24(5): 46-51.
- [15] 肖贤明, 刘祖发, 刘德汉, 等. 应用储层流体包裹体信息研究天然气气藏的成藏时间[J]. 科学通报, 2002(12): 957-960.
- XIAO Xianming, LIU Zufa, LIU Dehan, et al. Study on the reservoir forming time of natural gas reservoir using reservoir fluid inclusion information[J]. Chinese science bulletin, 2002(12): 957-960.
- [16] 楼章华, 马永生, 郭彤楼, 等. 中国南方海相地层油气保存条件评价[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 8-11.
- LOU Zhanghua, MA Yongsheng, GUO Tonglou, et al. Evaluation of oil and gas preservation conditions in marine formation in South China[J]. Natural gas industry, 2006, 26(8): 8-11.
- [17] 楼章华, 蔡希源, 高瑞祺. 松辽盆地流体历史与油气藏形成分析[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1998.
- LOU Zhanghua, CAI Xiyuan, GAO Ruiqi. Fluid history and oil and gas reservoir analysis in Songliao Basin[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House, 1998.
- [18] 周立宏, 滑双君, 孙超因, 等. 大港油田上古生界煤系烃源岩地球化学特征与二次成烃[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1043-1051.
- ZHOU Lihong, HUA Shuangjun, SUN Chaonan, et al. Geochemical characteristics and secondary hydrocarbon generation of coal-measure source rocks in Upper Paleozoic of Dagang Oilfield[J]. Oil & gas geology, 2017, 38(6): 1043-1051.
- [19] YUAN Guanghui, CAO Yingchang, SUN Peipei, et al. Genetic mechanisms of Permian Upper Shihezi sandstone reservoirs with multi-stage subsidence and uplift in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin, East China[J]. Marine and petroleum geology, 2020, 124: 104784.
- [20] 韩国猛, 吴雪松, 崔宇, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷二叠系致密砂岩储层特征、主控因素及发育模式[J]. 中国石油勘

- 探, 2019, 24(4): 509–519.
- HAN Guomeng, WU Xuesong, CUI Yu, et al. Characteristics, control factors and development models of Permian tight sandstone reservoirs in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *China petroleum exploration*, 2019, 24(4): 509–519.
- [21] 付立新, 楼达, 李宏军, 等. 印支—燕山运动对大港探区古潜山形成的控制作用[J]. *石油学报*, 2016, 37(增刊2): 19–30.
- FU Lixin, LOU Da, LI Hongjun, et al. Control effect of Indosinian–Yanshan movement on the formation of buried hill in Dagang exploration area[J]. *Acta petrolei sinica*, 2016, 37(S2): 19–30.
- [22] 吴永平, 付立新, 杨池银, 等. 黄骅坳陷中生代构造演化对潜山油气成藏的影响[J]. *石油学报*, 2002, 23(2): 16–21.
- WU Yongping, FU Lixin, YANG Chiyin, et al. Effect of Mesozoic tectonic evolution on hydrocarbon accumulation in buried hills in Huanghua Depression[J]. *Acta petrolei sinica*, 2002, 23(2): 16–21.
- [23] 曾溅辉, 彭继林, 邱楠生, 等. 砂–泥岩界面碳酸盐溶解–沉淀反应及其石油地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2006, 17(6): 760–764.
- ZENG Jianhui, PENG Jilin, QIU Nansheng, et al. Carbonate dissolution–precipitation in sandstone–shale contact and its petroleum geological meanings[J]. *Natural gas geoscience*, 2006, 17(6): 760–764.
- [24] THYBERG B, JAHREN J, WINJE T, et al. Quartz cementation in Late Cretaceous mudstones, northern North Sea: changes in rock properties due to dissolution of smectite and precipitation of micro-quartz crystals[J]. *Marine and petroleum geology*, 2010, 27(8): 1752–1764.

编辑:董庸

Chemical characteristics and petroleum geological significance of the Permian formation water in Wumaying buried hill, Huanghua Depression

WANG Miao, LOU Da, ZHU Rong, CHEN Xuegang, HU Wei, WANG Hui,
ZHAO Yonggang, LUO Rong, GONG Shouhan

Abstract: The formation water salinity of Wumaying buried hill, a continuous deep buried hill in the southern part of Huanghua Depression, is generally high, indicating that the formation is well sealed. It is worth noting that the formation water of the Permian Lower Shihezi Formation is of NaHCO_3 water type, with the characteristics of low salinity ($< 8.0 \text{ g/L}$), low Cl^- concentration, and high HCO_3^- concentration, which are obvious different with Well WG1 in nearby Wangguantun buried hill. By testing the hydrogen and oxygen compositions of the present formation water, analyzing the lithofacies, homogeneous temperature and paleo-salinity of fluid inclusions, the origin of Permian formation water and its petroleum geological significance are revealed. The results show that: (1) The distribution of hydrogen and oxygen isotope compositions is far from the curve of atmospheric precipitation, indicating that it is weakly influenced by the present atmospheric precipitation. (2) The peak value of homogenization temperature of hydrocarbon inclusions is mainly distributed in the range of $130\text{--}150^\circ\text{C}$, indicating that it is mainly formed in the late stage of reservoir formation. (3) The initial values of paleo-salinity of formation water in some inclusions are less than 5%, and there is a significant decrease in the accumulation period, indicating that the formation water has undergone a desalination process. (4) At the end of the Late Cretaceous, formation water desalination was mainly influenced by infiltration of atmospheric water. After that, the impact of atmospheric water infiltration gradually weakened due to the continuous deep burying of strata. During the sedimentary period from Shahejie Formation to Minghuazhen Formation, the Carboniferous–Permian coal measures strata were compacted and drained, and the drained low salinity formation water entered the adjacent Permian sandstone reservoir, which led to further desalination of the reservoir formation water. (5) Formation water desalination promotes the formation of secondary pores, improves the physical properties of the reservoir, and forms carbonate cement locally, which enhances reservoir heterogeneity. The desalination process of formation water is synchronized with the migration and filling of oil and gas, and the flow direction of formation water indicates the direction of migration and accumulation of oil and gas.

Key words: formation water; hydrochemical characteristics; mudstone compaction water; formation water desalination; Permian; Wumaying buried hill; Huanghua Depression

WANG Miao, First author: Master's degree in progress, mainly engaged in the research of oilfield hydrogeology. Add: Ocean College of Zhejiang University, No. 1 Zhejiang University Road, Zhoushan, Zhejiang 316021, China

LOU Da, Corresponding author: MSc, Senior Geologist, mainly engaged in oil and gas exploration research. Add: New Institute of Exploration and Development Research Institute of PetroChina Dagang Oilfield Company, Haibin Road, Binhai New Area, Tianjin 300280, China