

文章编号:1000-0550(2020)05-1099-12

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.080

鄂尔多斯盆地下侏罗统地层水化学特征及成因分析

邓秀芹,程党性,周新平,时孜伟,郭懿萱

低渗透油气田勘探开发国家工程实验室/中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司,西安 710018

摘要 通过对鄂尔多斯盆地下侏罗统地层水研究发现,延安组、富县组地层水化学特征具有复杂性和规律性。复杂性表现在地层水矿化度、钠氯系数、变质系数等水化学参数,在纵向上和平面上变化显著,地层水类型多样;规律性表现在地层水化学特征的垂直分异性、东西分带性、地貌分区性。分析结果表明:1)不同水旋回地层水的混合交替作用导致了地层水化学特征的垂直分异性;2)构造特征决定了水化学特征的东西分带性。在盆地东部和西缘地区,地层埋藏浅或出露地表,渗入水补给交替强烈;靠近天环坳陷轴部地区,地层埋藏深度大,且远离补给区,处于相对滞留环境;3)富县组、延10古地貌特征、水岩反应导致地层水化学特征地貌分区性;4)阶地、斜坡、河间丘地区,在渗入水交替活跃程度、水动力、岩性组合、低幅度圈闭发育条件等方面均具有成藏优势。该研究为侏罗系古地貌油藏有利目标预测提供重要依据。

关键词 鄂尔多斯盆地;延安组;富县组;水化学特征;地层水成因;古地貌

第一作者简介 邓秀芹,女,1972年出生,博士,教授级高级工程师,石油地质,E-mail: dxq1_cq@petrochina.com.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

对含油气盆地油气资源的研究,实际就是认识盆地中的流体在各种不同的地质条件下形成、迁移和聚集的历史过程^[1]。地层水是初次运移和二次运移过程中的重要载体^[2-11],地层水特征与油气运移、聚集有着十分密切的关系。在沉积物的埋藏过程中,地层水处于埋藏内循环系统的相对封闭环境,水—岩反应等作用造成地层水的化学性质发生变化,通常矿化度、Cl⁻、Na⁺离子浓度和盐化系数增加,HCO₃⁻、SO₄²⁻离子浓度、变质系数、脱硫系的降低。前人通过不同盆地的水动力系统、水文地质旋回的划分、水动力场特征研究,探索了水动力与油气运移、聚集的关系^[12-15]。近年,水文地球化学特征及与油气聚集的关系研究^[16-19]、地层水成因和水型分布与油藏保存条件评价^[20-22],地层水与储层的水—岩作用特点^[23-24]等研究取得一定进展,在油气藏勘探开发中发挥了重要的作用。然而地层水研究仍一直是石油地质工作中相对较薄弱的环节,鄂尔多斯盆地下侏罗统地层水

研究鲜有报道,有待深入开展工作。

侏罗系延安组、富县组是鄂尔多斯盆地石油勘探的主要目的层,与中上三叠统延长组大面积、大规模、低渗透一致密油藏相比,侏罗系油藏规模小(一般油藏面积小于10 km²),但储层物性好(一般孔隙度大于12%,渗透率平均超过50×10⁻³ μm²),单井产量高,开发效果好,俗称“小而肥”的特点。经过40多年的勘探开发,地质工作者做了大量较深入细致的研究,成果主要聚焦于沉积古环境与沉积相、古地貌刻画、油藏类型与分布等方面^[25-32],较少涉及侏罗系地层水特征、影响因素及其与油气关系的研究。本次工作立足于延安组和富县组地层水的水型、水化学成分的纵向、平面的分布特征,分析了影响地层水差异的主要因素,讨论了与油藏分布与形成的关系。

1 地质背景

三叠纪末,在印支运动影响下,鄂尔多斯盆地整体、不均衡抬升,总体呈现西高东低的古地形格局,

收稿日期:2019-02-21; 收修改稿日期:2019-08-03

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05050,2017ZX05001002-008)[Foundation: National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05050, 2017ZX05001002-008]

因此造成延长组顶部不同程度地遭受风化剥蚀、河流侵蚀,形成了沟壑纵横、丘陵起伏、高地广布的前侏罗纪古地貌景观(图1)。侏罗纪早期,在前侏罗纪形成的沟壑中,水系发育。一方面水系对早期形成的地貌进一步的冲刷、侵蚀,另一方面沉积物在古河道、沟谷中逐渐沉积,发生填平补齐作用。准平原化后,发育三角洲沉积。这套碎屑岩被命名为富县组和延安组。延安组根据沉积旋回和岩性特征,延安组又可进一步划分为10个油层组,自上而下为延1—延10(图2)。

富县组和延10沉积主要受控于前侏罗纪的古地貌格局,为粗碎屑充填,局部地区延10顶部发育煤层或煤线。地层厚度或岩性变化所反映的早侏罗世地貌形态显示,盆地发育甘陕一级古河,庆西、宁

陕、蒙陕3条二级古河。几大古河切割形成姬塬高地、演武高地、子午岭高地、定边高地和靖边高地,3条二级古河汇入甘陕一级古河。一级古河河道宽15~40 km,通常与高地沉积厚度差180~260 m;二级古河宽8~15 km,与高地沉积的厚度差100~200 m(图1)^[25-26]。一级古河内发育多个河间丘,其中在宁陕、蒙陕、甘陕三条古河交汇处,发育的河间丘规模相对较大。

延9—延1期,随着河流沉积的填平补齐,大面积沼泽化,进入三角洲、湖泊发育阶段,汇水区位于盆地东部延安一带。延9—延1主要为中细砂岩夹煤层、碳质泥岩。煤层具有高声波时差、高电阻率、低密度、低自然伽马等明显的电测特征(图2),成为地层划分对比的标志层,其中延7顶部和延9顶部煤

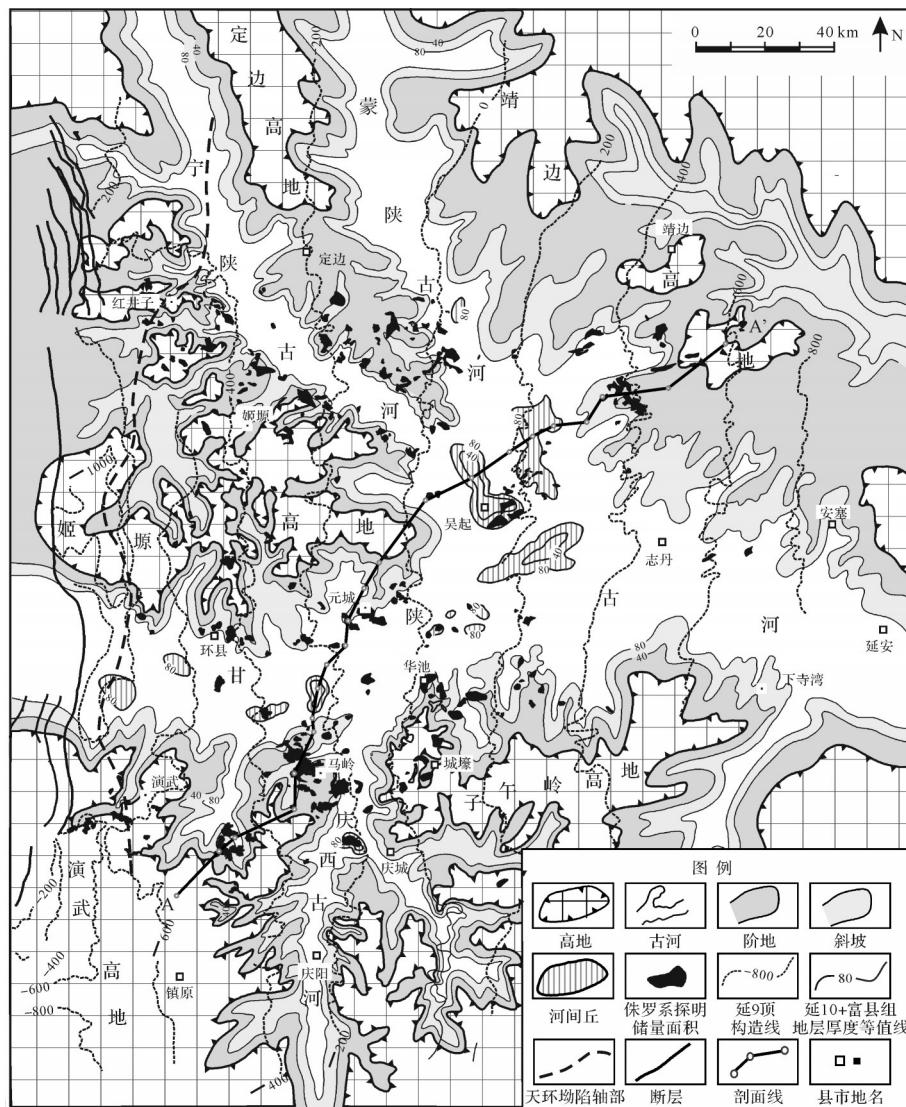


图1 鄂尔多斯盆地前侏罗纪古地貌图

Fig.1 Palaeogeomorphology of the pre-Jurassic, Ordos Basin

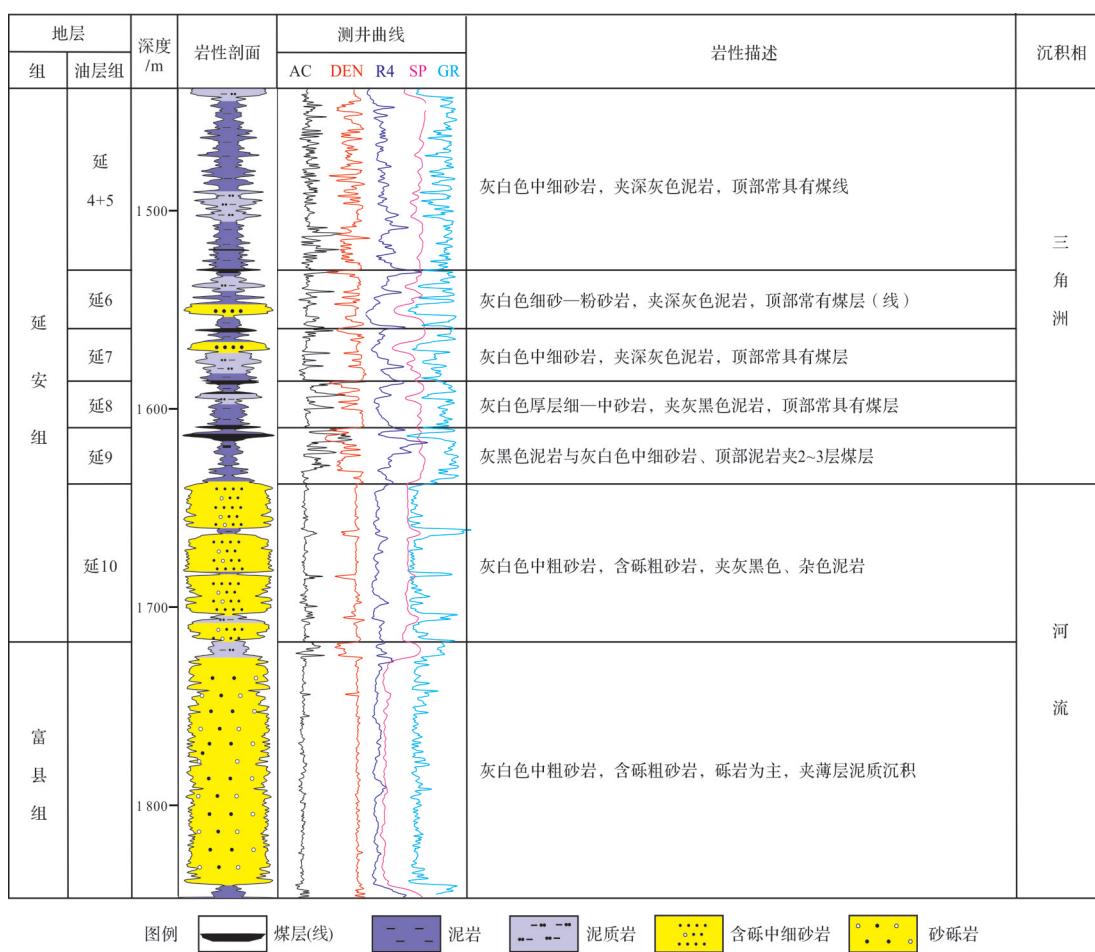


图2 鄂尔多斯盆地华池地区延安组和富县组地层综合柱状图
Fig.2 Strata of the Yan'an and Fuxian Formations in the Huachi area, Ordos Basin

层在盆地广泛分布。延4+5—延9地层分布较稳定,保存较好,延3以上地层遭受不同程度的剥蚀。

2 地层水化学特征

2.1 主要离子组成和矿化度特征

延安组、富县组地层水主要离子组成为 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} , 离子浓度由大到小的顺序为 $\text{Cl}^- > (\text{Na}^+ + \text{K}^+) > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 。阳离子组分中, K^+ 、 Na^+ 离子浓度最高, 平均11.2 g/L; Ca^{2+} 次之, 平均浓度为0.8 g/L; Mg^{2+} 含量最低。阴离子中, Cl^- 浓度最高, 平均16.0 g/L; SO_4^{2-} 次之, 平均3.5 g/L;再次为 HCO_3^- , 含极少量的 CO_3^{2-} (表1、图3)。

地层水矿化度为5~120 g/L, 平均值为33.2 g/L, 主要分布在8~100 g/L(表1、图3)。平面分布上地层水的化学性质存在较大的差异, 但同时显示出较好的规律性。西缘冲断带和东部浅埋藏区矿化度较低, 一般小于40 g/L, 其他地区地层水矿化度为20~100 g/L。

地层水的矿化度平面分布与古地貌具有较好的相关性, 一般古河地区矿化度低, 向高地方向矿化度逐渐增高。虽然不同区块矿化度存在较大的差异, 但每个区块自下而上地层水的平均矿化度都一致呈现出逐渐降低的趋势(图4、表1)。

Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 与矿化度呈现出较好的线性相关性(图5)。pH值为5.5~7.5, 平均6.4, 呈中性—弱碱性。

2.2 地层水化学参数

钠氯系数($r_{\text{Na}^+}/r_{\text{Cl}^-}$)是地层水变质程度和活动性的重要指标, 钠氯系数越低, 反映水体环境越还原, 越有利于油气的保存。 $(r_{\text{Na}^+}/r_{\text{Cl}^-}) > 1$, 指示地层水封闭条件相对较差。延安组和富县组地层水($r_{\text{Na}^+}/r_{\text{Cl}^-}$)为0.1~3.5, 平均为1.1。

脱硫系数[$100r_{\text{SO}_4^{2-}}/(r_{\text{SO}_4^{2-}} + r_{\text{Cl}^-})$]是地层水氧化还原环境的重要指标, 表征脱硫酸作用的程度, 作用完

表1 鄂尔多斯盆地侏罗系延安组、富县组地层水化学特征统计表

Table 1 Formation water chemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Fuxian Formations, Ordos Basin

井名	层位	pH	(Na ⁺ +K ⁺)/mg/L	Ca ²⁺ /mg/L	Mg ²⁺ /mg/L	Cl ⁻ /mg/L	SO ₄ ²⁻ /mg/L	HCO ₃ ⁻ /mg/L	SO ₄ ²⁻ /mg/L	矿化度/g/L	水型
C35	延2	7.0	2 356	104	56	4 758	0	235	378	9.1	NaHCO ₃
Y283	延2	6.0	4 057	189	574	3 069	0	297	6 801	15.0	Na ₂ SO ₄
L180	延3	6.5	5 756	1 145	347	6 655	0	0	6 859	21.1	Na ₂ SO ₄
Y314	延3	6.0	7 446	1 135	172	10 373	0	461	4 534	24.1	Na ₂ SO ₄
Z380	延4+5	6.0	7 956	1 026	830	7 773	438	0	11 476	29.5	Na ₂ SO ₄
H427	延4+5	6.0	16 673	2 187	1 568	19 878	0	938	18 582	59.8	Na ₂ SO ₄
Y85	延4+5	8.0	15 691	187	170	24 575	204	129	224	41.2	CaCl ₂
Z467	延6	6.0	13 604	509	988	16 383	142	0	11 224	42.9	Na ₂ SO ₄
L305	延6	7.1	5 023	819	333	5 666	828	0	5 439	18.1	Na ₂ SO ₄
Y81	延6	6.0	9 343	821	187	15 731	0	209	738	27.0	CaCl ₂
L88	延6	6.7	9 837	464	218	10 664	0	617	7 585	29.4	Na ₂ SO ₄
C84	延7	7.5	15 583	79	14	21 394	0	189	984	41.4	NaHCO ₃
G173	延7	6.3	32 564	8 729	184	66 048	0	207	0	20.2	CaCl ₂
W515	延7	7.0	10 190	596	241	12 002	0	3 953	4 288	5.5	NaHCO ₃
B417	延7	7.5	5 221	365	119	3 006	0	287	7 949	17.0	Na ₂ SO ₄
Y81	延7	7.0	3 268	204	124	3 318	780	0	2 694	10.4	Na ₂ SO ₄
X72	延7	6.5	17 412	1 291	308	24 563	0	1 387	6 297	51.3	Na ₂ SO ₄
Z164	延8	6.5	25 354	422	384	32 288	3 343	0	9 095	70.9	NaHCO ₃
W276	延8	6.0	1 908	117	70	1 994	194	0	1 571	27.4	Na ₂ SO ₄
L205	延8	6.0	8 218	741	257	14 230	0	530	254	24.2	CaCl ₂
A162	延8	6.5	6 913	305	62	9 792	866	0	1 464	19.4	Na ₂ SO ₄
Z175	延9	6.0	24 276	3 174	428	44 138	0	245	0	72.3	CaCl ₂
G190	延9	8.0	7 128	994	241	5 370	0	1 500	9 529	18.7	Na ₂ SO ₄
G285	延9	6.5	17 263	2 021	164	10 124	0	246	3 512	33.2	CaCl ₂
H184	延9	7.4	14 033	463	117	21 128	0	481	1 873	38.0	Na ₂ SO ₄
H91	延9	6.5	21 912	2 974	516	40 076	0	469	255	66.2	CaCl ₂
Z67	延10	6.0	19 631	1 157	234	29 137	0	419	4 887	55.5	Na ₂ SO ₄
Z497	延10	6.0	22 531	2 365	1 377	39 944	238	0	3 854	70.3	CaCl ₂
Z29	延10	6.0	28 215	3 623	738	50 317	0	314	2 099	85.3	CaCl ₂
H53	延10	6.6	22 856	3 164.32	608	41 477	0	223	1 344.84	70.0	CaCl ₂
Li231	延10	6.0	7 191	596	965	4 994	192	0	13 341	27.3	Na ₂ SO ₄
Li323	延10	6.0	30 259	1 988	1 005	49 920	404	0	3 970	87.6	CaCl ₂
Li345	延10	6.0	10 960	189	57	17 103	214	0	227	28.8	CaCl ₂
Li40	延10	6.0	13 932	850	258	18 562	0	1 131	6 109	40.8	Na ₂ SO ₄
Li51	延10	8.0	4 334	48	58	3 080	276	969	4 018	12.8	NaHCO ₃
L132	延10	6.0	36 671	3 893	539	64 165	0	223	955	106.5	CaCl ₂
L164	延10	6.5	26 543	2 187	879	46 815	0	401	408	77.2	CaCl ₂
Sh219	延10	8.0	6 420	362	188	5 495	0	82	6 568	20.2	Na ₂ SO ₄
Sh22	延10	6.0	4 180	613	744	8 353	445	0	1 470	15.8	MgCl ₂
X126	延10	6.0	8 169	10 278	544	32 218	0	195	1 390	51.8	CaCl ₂
X154	延10	6.5	3 514	216	175	7 619	0	120	350	12.0	MgCl ₂
X321	延10	6.5	5 591	724	251	5 598	475	0	6 444	19.1	Na ₂ SO ₄
Y57	延10	7.0	3 536	211	96	5 886	0	0	253	10.0	CaCl ₂
S1	富县组	6.0	8 614	1 270	514	12 824	0	779	5 072	29.1	Na ₂ SO ₄

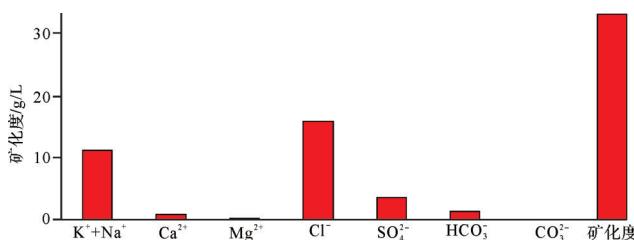


图3 鄂尔多斯盆地侏罗系地层水离子组成
Fig.3 The ionic composition of formation water in the Jurassic system, Ordos Basin

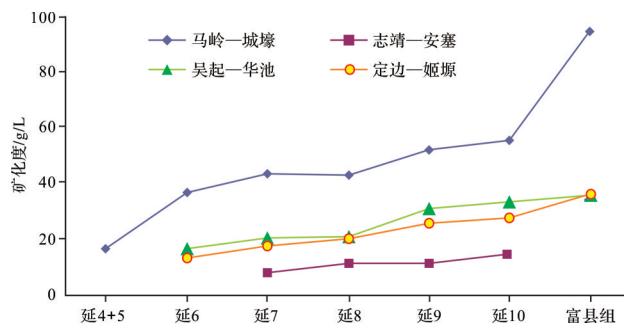


图4 侏罗系不同区、层地层水矿化度分布对比图
Fig.4 Comparison of formation water total salinity among different areas and different Jurassic system, Ordos Basin

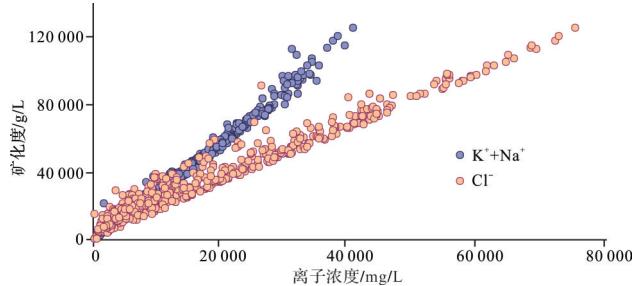


图5 鄂尔多斯盆地侏罗系地层水离子浓度与矿化度关系
Fig.5 Correlation of formation water geochemistry with total salinity of the Jurassic system, Ordos Basin

全时为0,表明封闭浓缩程度好。该值越低反映封闭性越好;当脱硫系数>10时或越高,则表明封闭条件相对较差。延安组、富县组地层水脱硫系数主要分布区间为0~60,平均值为15.9,各层系平均分布范围11.1~26.3。

变质系数($r_{\text{Cl}^--\text{Na}^+}/r_{\text{Mg}^{2+}}$)值越大,表明封闭程度越好,水岩作用强;为负值时,则表征地层水受到大气降水淋滤作用的影响。延安组、富县组地层水变质系数主要分布区间为-30~10,平均值为-10.9。

地层水的钠氯系数、脱硫系数、变质系数等参数分析表明,延安组、富县组整体上封闭、保存条件较差。

2.3 地层水水型

侏罗系地层水水型以Na₂SO₄型和NaHCO₃型为主,分别占34.2%和38.8%,CaCl₂型水占20.9%,MgCl₂型占6.1%。

纵向上,富县组地层水以CaCl₂型水为主,MgCl₂型次之;延8—延10砂岩中CaCl₂型、Na₂SO₄型和NaHCO₃型均衡发育;延4+5—延7以Na₂SO₄型水和NaHCO₃型水为主,前者含量略高。MgCl₂型地层水较少,多见于富县组和延安组下部储层,向上含量逐渐降低(图6)。总体上呈现出自下而上CaCl₂型、MgCl₂型地层水含量减少,Na₂SO₄型含量增高的趋势。

平面上,古地貌位置不同,水型也存在明显差异。以延10为例,一级、二级古河发育地区地层水的类型常常为Na₂SO₄型,部分地区为Na₂SO₄+NaHCO₃型(图7);斜坡和阶地,尤其是在西部地区,常常以CaCl₂型水为主,向东水型逐渐过渡为CaCl₂+Na₂SO₄型。

以上分析展示了侏罗系水化学特征的复杂性,各种水型均有不同程度的发育,不同层、相带差异明显,但其变化有一定的规律性。总体上侏罗系储层的封闭性、保存条件相对较差,但差中有优,其中富县组和延安组延10段的斜坡、阶地、河间丘等位置保存条件相对较好。

3 地层水分布特征及影响因素分析

3.1 纵向上混合交替作用对地层水分布的影响

前侏罗纪,在延长组顶面形成了侵蚀沟谷,这些沟谷在侏罗纪早期进一步受河流的冲刷,对下伏的延长组进一步切割。在盆地东部地区,一级古河、二级古河一般切割到长1或长2地层,在西部地区常常切

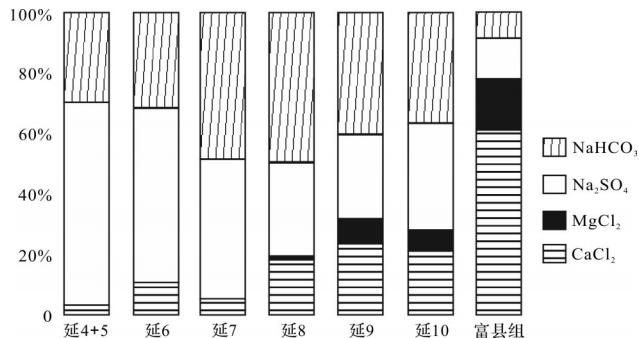


图6 侏罗系富县组、延安组不同层系地层水水型组成
Fig.6 Formation water type association in different strata of the Jurassic Fuxian and Yan'an Formations



图7 侏罗系富县组—延10水型分布及矿化度等值线图

Fig.7 The distribution feature of different formation water types and total salinity in the Jurassic Fuxian Formation and Yan10 member in the Ordos Basin

穿长3地层,甚至切穿长4+5,而与长6地层直接接触^[26]。河谷中沉积了富县组和延10粗碎屑沉积物。随着上覆地层加厚,压实作用造成侏罗系下部沉积水与延长组上部的渗入水或沉积水混合更替,因此侏罗系底部地层水具有延长组上部地层水的特征。富县组—延10地层水矿化度较高,具有相对高的Cl⁻、Ca²⁺离子浓度,低SO₄²⁻和HCO₃⁻离子浓度,CaCl₂型水占比相对较高。而延8以上地层水矿化度较低,SO₄²⁻和HCO₃⁻离子浓度相对较高,Cl⁻、Ca²⁺离子浓度相对较低,水型以Na₂SO₄型和NaHCO₃型为主,局部地区为CaCl₂型(表2)。由此可知,纵向地层水的混合交替作用,造成侏罗系不同层系地层水化学特征的差异。

3.2 构造特征对地层水分布的影响

天环坳陷于中晚侏罗世已初具雏形。中晚侏罗世以来,盆地无论是整体抬升还是沉降,红井子—环县—镇原一线基本处于坳陷的轴部,地层的埋深大,向东西两侧,埋藏深度变浅。其中天环坳陷的东翼变化平缓,向东渐变为宽缓西倾单斜,坳陷西翼受西缘逆冲推覆构造活动影响,抬升急剧,表现出强烈的不对称性。延安组沉积后,盆地经历了多次抬升,如中侏罗世末的燕山运动Ⅰ幕造成盆地整体抬升,上侏罗统和下白垩统基本不发育;早白垩世末的燕山运动Ⅱ幕,盆地再次上升,缺失上白垩统等。由此可知,延安组沉积以后,渗入水文地

表2 鄂尔多斯盆地不同油田延安组、富县组地层水特征对比

Table 2 Formation water feature of oilfields in the Jurassic Fuxian and Yan'an Formations, Ordos Basin

地区	油田	层位	地层水	
			矿化度/g/L	主要水型
西部	红井子	延4-5	44.83	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{CaCl}_2$
		延6-8	56.71	CaCl_2
		延10	90.80	CaCl_2
	演武—镇北	延6-8	39.81	$\text{CaCl}_2 \text{Na}_2\text{SO}_4$
		延10	57.55	CaCl_2
	马岭	延8及以上	40.39	Na_2SO_4
		延9	53.40	$\text{CaCl}_2 \text{Na}_2\text{SO}_4$
		延10、富县组	55.80	CaCl_2
中部	城壕	延7	25.75	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{NaHCO}_3$
		延9	45.97	$\text{CaCl}_2 \text{MgCl}_2$
	元城	延8及以上	21.16	$\text{MgCl}_2 \text{CaCl}_2$
		延9	27.36	$\text{CaCl}_2 \text{Na}_2\text{SO}_4$
		延10	23.32	$\text{CaCl}_2 \text{Na}_2\text{SO}_4$
	华池	延8及以上	26.92	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{CaCl}_2$
		延9	26.43	$\text{CaCl}_2 \text{Na}_2\text{SO}_4$
		延10	28.13	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{CaCl}_2$
东部	下寺湾	延9、10	31.56	$\text{NaHCO}_3 \text{Na}_2\text{SO}_4$
	安塞—志靖	延9	11.70	$\text{NaHCO}_3 \text{CaCl}_2$

质阶段远超过沉积水文地质阶段。盆地东部地区和西缘逆冲带,始终处于构造高部位,埋藏较浅,或出露地表,渗入水交替活跃,因此矿化度低, SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 离子浓度相对较高,水型 Na_2SO_4 型,局部为 NaHCO_3 型;而红井子—环县—镇原一线处于天环坳陷的轴部,埋藏深度大,处于相对封闭滞留环境,与渗入水的交替作用也相对较弱,矿化度高(图7)。因此,构造与沉积演化导致地层水矿化度和水化学特征的东西分带性。

3.3 古地貌发育特征对地层水分布的影响

古地貌对地层水的运动方向与分布起到重要的控制作用。河谷地带沉积物粒度粗,一般是厚层含砾粗砂岩、粗砂岩等,物性好,是渗入水补给、交替的优势通道;古河两侧的斜坡和阶地主要为中粗砂岩与泥岩互层,粒度相对较细,物性较差,为地层水相对滞留的环境,渗入水补给、交替较弱。为了说明这种变化特征,用过演武高地—甘陕古河—姬塬高地—宁陕与蒙陕古河—靖边高地的大剖面(图8a),以及剖面不同位置的富县组与延10段地层水水化学参数特征(图8b~m),展示各古地貌单元地层水变化。

(1) 水型 在河谷地带,受延长组地层水侵入影响的富县组—延10高矿化度的 CaCl_2 型水更易于被

富 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 离子的渗入水替换,使得矿化度降低,水型转化为 Na_2SO_4 型或 NaHCO_3 型。而古河两侧的斜坡、阶地,渗入水的影响较小,保留了 CaCl_2 水型。因此,由靠近高地的阶地、斜坡到河谷地带,富县组、延10地层水类型从 CaCl_2 型变为 Na_2SO_4 型,或从 CaCl_2 型过渡到 NaHCO_3 型到 Na_2SO_4 型(图7)。

(2) 矿化度 矿化度呈现出由古河向高地方向增高的趋势。在演武高地和姬塬高地附近,这种变化特征尤为显著,矿化度由斜坡、阶地的100 g/L左右,到河谷降低到20 g/L左右,河间丘的矿化度比河道略高(图8b~e)。

(3) 水化学参数 不同地貌单元,变质系数和钠氯系数也有差异。从钠氯系数分析(图8f~i),古河地区样品的钠氯系数一般大于1,河间丘近等于1,斜坡、阶地一般小于或近等于1。从变质系数来看(图8j~m),古河发育区的地层水变质系数小于0的占比较高,河间丘地区变质系数在0附近,而斜坡、阶地区的样品以变质系数大于0为主。

综上所述,古地貌单元的发育特征决定了各个沉积单元中地层水矿化度、水化学参数、水型的规律性变化。

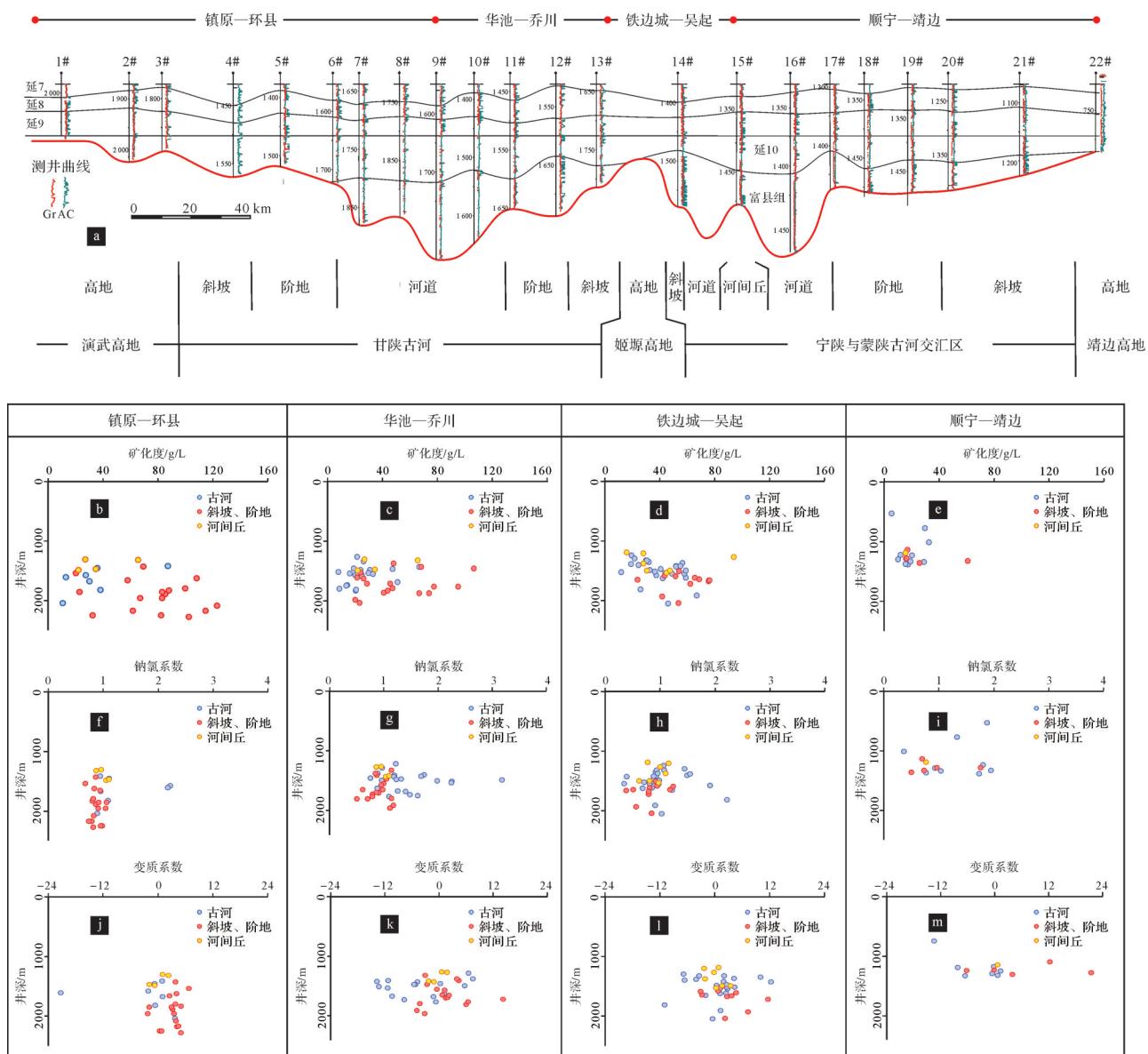


图8 不同地貌单元富县组—延10地层水矿化度及水化学参数变化特征

Fig.8 Formation water total salinity and parameters of the Fuxian Formation-Yan10 member in different geomorphology zones

3.4 成岩耗水作用对地层水分布的影响

成岩过程中的“耗水”作用也是造成河道不同位置地层水化学成分差异的原因之一。前人研究表明,碎屑岩的成岩作用中不但大部分需要水的参与,而且耗水量大,如1 000 g钾长石和1 000 g的钠长石蚀变为高岭石的过程中分别需要消耗97.1和103.1 g的水,黏土矿物的转化大部分也是耗水过程^[33]。

古河地区富县组、延10发育大套含砾中粗砂岩、中粗粒砂岩,岩石类型主要是岩屑砂岩、长石岩屑砂岩和石英砂岩,泥质沉积少;斜坡和阶地砂体厚度减小,泥质含量增大,泥质夹层增多。埋藏成岩中,长石蚀变和黏土矿物转化造成岩石格架中的水分子大

量减少,从而使得离子浓度增大、地层水矿化度增高。与河道相比,斜坡、阶地地区的成岩过程中“耗水作用”更为强烈,因而成岩作用过程中水岩反应进一步放大了由古河、阶地、斜坡、河间丘等单元离子浓度和矿化度的差异。

4 油田水文地质、水化学特征与油藏形成的关系

早白垩世为鄂尔多斯盆地生排烃高峰期,延长组发育流体过剩压力,主要集中在长4+5—长9油层组^[34-35],延安组主要为正常压力。富县组—延10古河

的粗碎屑沉积为中高渗储层,古河发育处,切割下伏的延长组地层强烈,有效缩短了与延长组长7烃源岩的垂向距离,成为泄压通道,因此生排烃高峰期在流体过剩压力与浮力的双重作用下,油气沿着古河侵蚀不整合面,由具有高过剩压力的延长组向常压的延安组运移。

古河发育区,富县组和延10储层物性好,渗入水交替强烈,以疏导作用为主,从延长组运移上来的油气很难在此保存,常随着流体继续由古河向两侧和河间高地运移。斜坡、阶地与河间丘,水体能量较弱,泥质隔层增多,储层封闭性相对较好,沿着斜坡运移的油气易于在此保存。加之,延长组顶面起伏形态与前侏罗纪古地貌具有很好的一致性,古河为幅度较大的下凹形态,斜坡、阶地和高地周边呈现出不同幅度的鼻隆、穹隆^[26],成为油气聚集、保存的有利场所。由此而知,斜坡、阶地、河间丘等地区,在渗入水交替活跃程度、水动力、岩性组合、圈闭发育条件等方面均具有成藏优势,成藏要素匹配条件好,成为石油聚集的有利地区,已经发现的油藏主要围绕高地在斜坡、阶地呈串珠状分布(图1)。

5 寻找侏罗系油藏的注意因素

侏罗系油藏规模较小,已经发现的油藏面积一般小于10 km²,甚至有的仅1 km²左右,因此油藏评价和预测难度大。侏罗系地层水发育特征说明,在寻找侏罗系油藏过程中需关注以下几个方面:

(1) 侏罗系古河两侧的斜坡、阶地、河间丘是寻找侏罗系油藏(尤其是侏罗系下部层系油藏)的有利区带。

(2) 由于侏罗系储层距离延长组长7优质烃源岩垂向距离较远,一般为400 m以上,且属于中高渗透储层,油水分异作用相对较好,因此着力开展低幅度构造的刻画、分析不同地质历史阶段圈闭构造演化特征,有利于寻找侏罗系甜点油藏。

(3) 侏罗系地层水矿化度、水型等变化复杂,通过分析侏罗系地层水化学特征在纵向变化和横向变化的规律性,有利于在实际的生产过程中甄别“低阻油层”、“高阻水层”,从而提高钻井成功率。

6 结论

综上所述,侏罗系水化学特征复杂,矿化度变化

大,地层水类型丰富,但其变化特征呈现出较好的垂直分异性、东西分带性、地貌分区性。主要可以归纳为以下几点:

(1) 受纵向地层水的混合交替作用影响,侏罗系水化学特征具有垂直分带性。从富县、延10向延9以上地层,地层水的矿化度逐渐降低,水型由CaCl₂型为主向Na₂SO₄型为主转变,钠氯系数、脱硫系数逐渐变大,变质系数减小。

(2) 受构造演化影响,水化学特征具有东西分带性。天环坳陷轴部地层埋藏深度大,且远离补给区,处于相对滞留环境,地层水矿化度高,钠氯系数、脱硫系数较小,变系数较大,向东西两侧随着构造埋深的变浅、出露,渗入水补给交替强烈,矿化度减小,钠氯系数、脱硫系数增大,变质系数减小。

(3) 受富县组—延10古地貌发育特征、成岩耗水作用影响,水化学特征显示出地貌分区性。在古河发育区,地层水矿化度低,向斜坡、阶地到高地,矿化度逐渐提高,钠氯系数、脱硫系数逐渐减小,变质系数逐渐增大。地层水的类型由Na₂SO₄型或NaHCO₃型向CaCl₂型转变。

(4) 阶地、斜坡、河间丘地区,在渗入水交替活跃程度、水动力、岩性组合、低幅度构造圈闭发育条件等方面均具有成藏优势,成藏要素匹配条件好,成为石油聚集的有利地区。

参考文献(References)

- [1] 顾家裕,范土芝,方辉,等. 塔里木盆地流体与油气藏[J]. 地质论评,2001,47(2):202-207. [Gu Jiayu, Fan Tuzhi, Fang Hui, et al. Fluid migration and oil reservoirs in the Tarim Basin [J]. Geological Review, 2001, 47(2): 202-207.]
- [2] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 2版. 北京:石油工业出版社, 1994: 2-174. [Li Mingcheng. Migration of oil and gas [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 2-174.]
- [3] Yahi N, Schaefer R G, Littke R. Petroleum generation and accumulation in the Berkine Basin, eastern Algeria [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(8): 1439-1467.
- [4] Bachu S. Synthesis and model of formation-water flow, Alberta Basin, Canada[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(8): 1159-1178.
- [5] Magara K. Geological models of petroleum entrapment [M]. Amsterdam: Elsevier, 1989: 27-44.
- [6] Bethke C M, Reed J D, Oltz D F. Long-range petroleum migration in the Illinois Basin [J]. AAPG Bulletin, 1991, 75 (5): 925-945.
- [7] Bredehoeft J D, Djevanshir R D, Belitz K R. Lateral fluid

- flow in a compacting sand-shale sequence: South Caspian Basin [J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(4): 416-424.
- [8] 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: 55-237. [Liu Fanghuai, Yan Wansun. Principles of hydrogeology of oil & gas fields[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 55-237.]
- [9] 刘崇禧. 我国中、新生代陆相盆地油田水文地球化学特征及与油气聚集的关系[J]. 石油勘探与开发, 1983(2): 39-43, 27. [Liu Chongxi. Geochemical characteristics of oilfield water and their relation with oil and gas accumulation in Mesozoic-Cenozoic basins of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 1983(2): 39-43, 27.]
- [10] 斯扬, 张文选, 罗安湘, 等. 姬塬地区长9油层组地层水化学特征及其与油藏的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 25-36. [Si Yang, Zhang Wenxuan, Luo Anxiang, et al. Hydrochemical characteristics and relationship between formation water and hydrocarbon reservoirs for Chang 9 in Jiyuan area [J]. Journal of China University of Petroleum, 2019, 43(2): 25-36.]
- [11] 周鹏, 朱文慧, 王佐涛, 等. 克拉苏构造带超深气藏地层水特征及水化学相图建立[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 16(2): 1-7. [Zhou Peng, Zhu Wenhui, Wang Zuoqiao, et al. Characteristics of formation water and water chemical phase diagram of the super-deep gas reservoirs in Kelasus Structure Belt [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2019, 16(2): 1-7.]
- [12] 杨绪充. 论含油气盆地的地下水动力环境[J]. 石油学报, 1989, 10(4): 27-34. [Yang Xuchong. On the underground hydrodynamic environment in an oil and gas basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 1989, 10(4): 27-34.]
- [13] 汪蕴璞, 林锦璇, 汪林. 论含油气盆地含水系统和水文地质期的划分: 以东海西湖凹陷为例[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(4): 393-398. [Wang Yunpu, Lin Jinxuan, Wang Lin. Division of water-bearing systems and hydrogeological periods of oil (gas)-bearing basin: With Xihu Depression in East China Sea as an example [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(4): 393-398.]
- [14] 楼章华, 高瑞祺, 蔡希源. 论松辽盆地地下水动力场演化与油气运移、聚集[J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 115-120. [Lou Zhanghua, Gao Ruiqi, Cai Xiyuan. A study on the evolution of hydrodynamics, the migration and accumulation of oil and gas in the Songliao Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(4): 115-120.]
- [15] 楼章华, 金爱民, 田炜卓, 等. 论陆相含油气沉积盆地地下水动力场与油气运移、聚集[J]. 地质科学, 2005, 40(3): 305-318. [Lou Zhanghua, Jin Aimin, Tian Weizhuo, et al. Origin and evolution of hydrodynamics and the migration, accumulation of petroleum in continental petrolierous sedimentary basins [J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(3): 305-318.]
- [16] 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 Majiataan area in the western Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(3): 253-257.]
- [17] 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.]
- [18] 史婷婷, 成建梅, 解习农, 等. 松辽盆地北部地层水同位素特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2012, 30(2): 399-404. [Shi Tingting, Cheng Jianmei, Xie Xinong, et al. Isotopic characteristics of formation waters in the north of Songliao Basin and its geological significances [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(2): 399-404.]
- [19] 李士祥, 楚美娟, 王腾飞, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长6油层组地层水特征与油藏聚集关系[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(5): 43-53. [Li Shixiang, Chu Meijuan, Wang Tengfei, et al. Features of formation water and implications for hydrocarbon accumulation in Chang 6 pay zone, Jiyuan area, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(5): 43-53.]
- [20] 刘福田, 李荣西, 左智峰, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1179-1189. [Liu Futian, Li Rongxi, Zuo Zhifeng, et al. Genesis of formation water in the 6th member of the Upper Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin and its petroleum significance [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1179-1189.]
- [21] 宫亚军. 准噶尔盆地腹部中生界地层水特征及油气地质意义[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(5): 524-529. [Gong Yajun. Mesozoic formation water characteristics and hydrocarbon geological significance in the hinterland of Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(5): 524-529.]
- [22] 崔明明, 王宗秀, 樊爱萍, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田西南部地层水特征与气水关系[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(9): 1364-1375. [Cui Mingming, Wang Zongxiu, Fan Aiping, et al. Characteristics of formation water and gas-water relation in southwest Sulige gas field, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(9): 1364-1375.]
- [23] 楼章华, 曾允孚. 扶杨油层孔隙水成因与砂岩成岩相研究[J]. 沉积学报, 1995, 13(增刊): 63-70. [Lou Zhanghua, Zeng Yunfu. The origin of pore-water and the study of sandstone diagenetic facies of Fu-Yang formations ($K_1 q^{3+4}$, northern-eastern Songliao Basin, NE China (Cretaceous)) [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(Suppl.): 63-70.]
- [24] 沈忠民, 刘四兵, 吕正祥, 等. 川西坳陷中段陆相地层水纵向

- 变化特征及水—岩相互作用初探[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 495-502. [Shen Zhongmin, Liu Sibing, Lü Zhengxiang, et al. Vertical geochemical characteristics of continental formation water and its water-rock interaction in the middle area of western Sichuan Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(3): 495-502.]
- [25] 郭正权,潘令红,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地侏罗系古地貌油田形成条件与分布规律[J]. 中国石油勘探,2001,6(4): 20-27. [Guo Zhengquan, Pan Linghong, Liu Xianyang, et al. The formation conditions and distribution of Jurassic palaeogeomorphological oil-field in Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2001, 6(4): 20-27.]
- [26] 郭正权,张立荣,楚美娟,等. 鄂尔多斯盆地南部前侏罗纪古地貌对延安组下部油藏的控制作用[J]. 古地理学报, 2008, 10(1): 63-71. [Guo Zhengquan, Zhang Lirong, Chu Meijuan, et al. Pre-Jurassic palaeogeomorphic control on the hydrocarbon accumulation in the Lower Yan'an Formation in southern Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(1): 63-71.]
- [27] 朱静,李文厚,韩永林,等. 陇东地区前侏罗纪古地貌及油藏成藏规律研究[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1229-1237. [Zhu Jing, Li Wenhui, Han Yonglin, et al. Research on palaeogeomorphic features of Pre-Jurassic and accumulation regularity of oil reservoir in the area of eastern Gansu, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1229-1237.]
- [28] 宋凯,吕剑文,凌升阶,等. 鄂尔多斯盆地定边—吴旗地区前侏罗纪古地貌与油藏[J]. 古地理学报, 2003, 5(4): 497-507. [Song Kai, Lü Jianwen, Ling Shengjie, et al. Palaeogeomorphic features of the Pre-Jurassic and oil reservoir of Dingbian-Wuqi area in Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2003, 5(4): 497-507.]
- [29] 李树同,张海峰,王多云,等. 聚油古地貌成因类型及其有利成藏条件分析:以鄂尔多斯盆地上里塬地区前侏罗纪古地貌为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 962-969. [Li Shutong, Zhang Haifeng, Wang Duoyun, et al. Genetic type of oil-gas accumulation paleogeomorphology and favorable conditions for petroleum accumulation: Taking the paleogeomorphology of Pre-Jurassic in Shangliyuan area, Ordos Basin as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(5): 962-969.]
- [30] 赵俊兴,陈洪德,杨华,等. 鄂尔多斯中南部中下侏罗统储层成因类型与油气聚集关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(3): 246-251. [Zhao Junxing, Chen Hongde, Yang Hua, et al. Genetic types and their relationship with oil-gas accumulation of the lower and middle Jurassic Reservoirs in Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2005, 32(3): 246-251.]
- [31] 赵俊兴,陈洪德. 鄂尔多斯盆地侏罗纪早中期甘陕古河的演化变迁[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 152-158. [Zhao Junxing, Chen Hongde. Evolution of Gan-Shaan paleochannel during early and middle Jurassic in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(2): 152-158.]
- [32] 雷开宇,刘池洋,张龙,等. 鄂尔多斯盆地北部侏罗系泥岩地球化学特征:物源与古沉积环境恢复[J]. 沉积学报, 2017, 35(3): 621-636. [Lei Kaiyu, Liu Chiayang, Zhang Long, et al. Element geochemical characteristics of the Jurassic mudstones in the northern Ordos Basin: Implications for tracing sediment sources and paleoenvironment restoration [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3): 621-636.]
- [33] 张善文. 成岩过程中的“耗水作用”及其石油地质意义[J]. 沉积学报, 2007, 25(5): 701-707. [Zhang Shanwen. “Water Consumption” in diagenetic stage and its petroleum geological significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(5): 701-707.]
- [34] 邓秀芹,姚泾利,胡喜锋,等. 鄂尔多斯盆地延长组超低渗透岩性油藏成藏流体动力系统特征及其意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(6): 1044-1050. [Deng Xiuqin, Yao Jingli, Hu Xifeng, et al. Characteristics and geological significance of hydrodynamic system on ultra-low permeability reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2011, 41(6): 1044-1050.]
- [35] 段毅,吴保祥,郑朝阳,等. 鄂尔多斯盆地西峰油田油气成藏动力学特征[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 29-33. [Duan Yi, Wu Baoxiang, Zheng Chaoyang, et al. Pool-forming dynamic properties of Xifeng oilfield in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(4): 29-33.]

Formation Hydrochemical Characteristics and Genesis of the Lower Jurassic, Ordos Basin

DENG XiuQin, CHENG DangXing, ZHOU XinPing, SHI ZiWei, GUO YiXuan

National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields/Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China

Abstract: The formation water characteristics are closely related to hydrocarbon migration and accumulation. The main factors affecting differences of the formation water from the Yan'an and Fuxian Formations are analyzed, based on the vertical and plane distribution characteristics of water type and hydrochemical composition of the formation water. The relationship between formation water characteristics and reservoir distribution and formation is discussed, and the factors that are important to in the process of finding Jurassic reservoirs are clarified in this paper. Study of formation water of the lower Jurassic Yan'an and Fuxian Formations in the Ordos basin reveal the complexity and regularity of the hydrochemical characteristics. The complexity lies in the diversity of formation water and the hydrochemical parameters, such as water salinity, sodium chloride coefficient, metamorphism coefficient, etc., which vary significantly vertically or laterally. The regularity is reflected in that the varying formation hydrochemistry forms zonation, vertically, east-westward, or geomorphologically. It is pointed out that: 1) The mixing and alternation of formation water in different hydrological cycles lead to the vertical differentiation of formation water chemical characteristics. From Fuxian to Y10 to Y9 strata, the salinity of the formation water gradually decreases, the proportion of Ca-Cl₂ type water gradually decreases, and the proportion of NaHCO₃ type and Na₂SO₄ type formation water gradually increases. The coefficient of sodium chloride and desulfurization gradually increase, while the coefficient of metamorphism decreases. 2) Structural evolution determines the east-west zonation of the hydrochemical characteristics. The Jurassic strata at the east or west margin of the basin are buried shallowly or exposed where infiltration water supply alternates easily with a relative lower salinity, and the strata at or close to the axis of the Tianhuan depression are buried deeply far away from the supply area, imprisoned in a relatively stagnant environment, making the salinity relatively high. 3) Regionalization of the formation hydrochemical feature changes with geomorphology of the Fuxian Formation-Yan10 member and is strengthened by the water-rock reaction during the diagenesis process. In the river developed area, formation water salinity is low. In the direction of the slope, terrace, and highland, it increases gradually, while the coefficient of the sodium chloride and desulfurization decreases, and the coefficient of metamorphism increases by degrees. Formation water type changes from Na₂SO₄ or NaHCO₃ to CaCl₂. 4) The terraces, slopes, and channel bars have the advantage of reservoir formation in terms of the infiltration water alternating extent, hydrodynamics, lithologic association, and low-amplitude structural trap development conditions, and they are the favorable targets prediction method of Jurassic Palaeogeomorphic reservoir is summarized.

Key words: Ordos Basin; Yan'an Formation; Fuxian Formation; hydrochemical characteristic; formation water genesis; geomorphology