

鄂尔多斯盆地杭锦旗地区 二叠系地层水地球化学特征和来源

赵永强^{1,2}, 倪春华^{1,2}, 吴小奇^{1,2}, 朱建辉^{1,2}, 刘光祥³,
王付斌⁴, 贾会冲⁵, 张威⁵, 齐荣⁵, 安川⁵

1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;

3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206;

4. 中国石化华北油气分公司 油气勘探管理部, 郑州 450006;

5. 中国石化华北油气分公司 勘探开发研究院, 郑州 450006

摘要: 杭锦旗地区二叠系是近年来鄂尔多斯盆地重要的天然气增储上产领域之一, 其气水关系复杂, 目前对该区地层水成因和来源的研究较为薄弱。通过对杭锦旗地区二叠系地层水样品开展常量组分、微量元素和氢、氧同位素分析, 揭示地球化学特征对地层水来源的指示意义。杭锦旗地区二叠系地层水主体为CaCl₂型, 泊尔江海子断裂以北和以南地区地层水矿化度平均分别为52.1 g/L和41.9 g/L; 不同类型水化学特征参数均指示了地层封闭性较好, 地层水在埋藏过程中经历了较强的浓缩变质作用, 天然气保存条件较好; 地层水主体为蒸发浓缩后的陆相地层水, 地层中发生了斜长石的钠长石化作用和胶结物的白云岩化作用; 地层水氢、氧同位素值主体分别介于-81‰~-75‰和-12.1‰~-8.8‰, 水岩相互作用整体明显弱于苏里格气田。受晚白垩世以来区域性抬升过程中凝析水混入、地表水沿断裂渗入等因素影响, 少数地层水样品具有偏低的氢同位素值。

关键词: 矿化度; 微量元素; 氢氧同位素; 地层水; 二叠系; 杭锦旗地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE133

文献标识码: A

Geochemical characteristics and source of Permian formation water in Hangjinqi area, Ordos Basin

ZHAO Yongqiang^{1,2}, NI Chunhua^{1,2}, WU Xiaoqi^{1,2}, ZHU Jianhui^{1,2}, LIU Guangxiang³,

WANG Fubin⁴, JIA Huichong⁵, ZHANG Wei⁵, QI Rong⁵, AN Chuan⁵

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. SINOPEC Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China;

4. Department of Oil and Gas Exploration Management, SINOPEC North China Branch, Zhengzhou, Henan 450006, China;

5. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC North China Branch, Zhengzhou, Henan 450006, China

Abstract: The Permian stratum in Hangjinqi area is one of the important fields to increase gas reserves and outputs in the Ordos Basin in recent years. The studies of the origin and source of formation water are still insufficient due to the complexity of relationship between gas and formation water. Based on the analysis of major components, trace elements, as well as hydrogen and oxygen isotopes, the indication of geochemical characteristics for the source of formation water is then revealed. The Permian formation water in Hangjinqi area is mainly of CaCl₂ type, and the average total dissolved solids (TDS) of formation water to the north and south of the Borjiangaizi fault are 52.1 and 41.9 g/L, respectively. Different water chemical parameters indicate favorable formation sealing conditions, and the formation water has experienced strong concentrated metamorphism with beneficial preservation conditions for natural gas. The formation water is mainly terrigenous one after evaporation and concentration, and the stratum has experienced albitization of plagioclase and dolomitization of cements. The

收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2022-02-20。

作者简介: 赵永强 (1973—), 男, 博士, 高级工程师, 从事油气成藏研究。E-mail: zhaoyq.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42172149, 41872122) 和国家科技重大专项 (2016ZX05002-006) 联合资助。

δD and $\delta^{18}O$ values of the formation water are mainly in the ranges of -81‰ to -75‰ and -12.1‰ to -8.8‰ , respectively, suggesting weaker water-rock interaction than that in the Sulige gas field. Due to the mixing of condensate water in regional uplift since the Late Cretaceous or the seepage of surface water along faults, a small number of formation water samples display more negative δD values.

Key words: total dissolved solids; trace elements; hydrogen and oxygen isotopes; formation water; Permian; Hangjinqi area; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是我国陆地上重要的含油气盆地之一,也是我国目前天然气产量最高的盆地,现已发现包括苏里格、大牛地等在内的探明储量超过 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大气田 9 个^[1-4]。鄂尔多斯盆地天然气勘探领域主要包括上古生界石炭系—二叠系致密砂岩和下古生界奥陶系马家沟组碳酸盐岩^[5-14],其中上古生界气藏中气水共存现象普遍存在^[15-17]。近年来,勘探范围从盆地腹部逐渐向盆地边缘拓展,在盆地北缘杭锦旗地区上古生界发现了东胜大气田,截至 2021 年底,其天然气探明储量达 $1\,926.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[5],该区成为鄂尔多斯盆地天然气勘探开发的热点地区之一。

杭锦旗地区上古生界天然气主要富集于二叠系下石盒子组砂岩储层中。烃源岩和天然气地球化学特征的系统研究表明,该区泊尔江海子断裂以南十里加汗和独贵加汗地区烃源岩明显优于断裂以北什股壕地区烃源岩^[18-19],什股壕地区天然气主要由断裂南侧十里加汗和独贵加汗地区运移而来^[9,20]。杭锦旗地区二叠系气水关系较为复杂^[17],多口钻井气水同产,未发生明显的气水分异^[21]。地层水地化特征和成因研究在揭示油气藏保存条件、储层水岩相互作用、油气成藏机理等方面发挥了独特的作用^[22-31]。初步研究表明,泊尔江海子断裂南、北两侧地层水特征表现出一定的差异^[32-33],但对该区地层水地球化学特征和成因的

研究整体较为薄弱,制约了对天然气成藏过程和富集机理的认识。因此,本文通过对杭锦旗地区不同区带二叠系地层水常量组分、微量元素和氢、氧同位素的分析,并与苏里格气田地层水特征的对比,探讨地层水的成因和来源,以期揭示该区天然气成藏机理提供科学依据。

1 地质背景

杭锦旗地区位于鄂尔多斯盆地北缘,处于伊盟隆起、伊陕斜坡与天环坳陷这 3 个盆地一级构造单元的结合部位(图 1a),总面积为 $9\,825 \text{ km}^2$ ^[17,21]。该区古生代构造沉积演化受自东向西发育的 3 条主干断裂控制(图 1b),其中泊尔江海子断裂为断面北倾的逆断层,而乌兰吉林庙和三眼井断裂则为断面南倾的正断层^[9,19]。根据断裂分布等特征可以将该区划分为什股壕、独贵加汗、十里加汗、阿镇、公卡汗、新召西、新召东等 7 个勘探区带^[5]。杭锦旗地区在地形特征上是鄂尔多斯盆地北部长期继承性的古隆起,也是油气运移的有利指向区^[34]。目前发现的探明储量主要位于独贵加汗、新召东、什股壕这 3 个区带^[5](图 1b)。

杭锦旗地区天然气主要储集于下石盒子组(P_1x)致密砂岩中,在山西组(P_1s)、太原组(C_3t)等层系也有局部发现,储集层总体上以低孔、低渗为特征^[35]。天然气成因鉴别和气源对比表明,天然

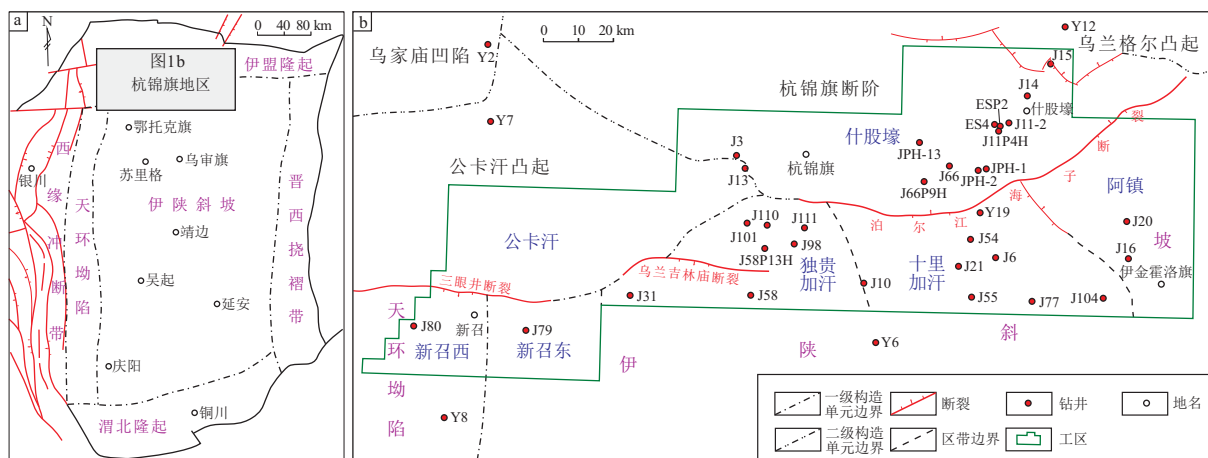


图 1 鄂尔多斯盆北部杭锦旗地区构造位置(a)和井位分布(b)

Fig.1 Tectonic location (a) and distribution of gas wells (b) in Hangjinqi area, northern Ordos Basin

气主体为煤成气,来自太原组和山西组煤系烃源岩^[9,20]。这套烃源岩为倾气型源岩,有机质类型主要为Ⅲ型,成熟度自北向南逐渐增大,镜质体反射率 R_o 主体介于 0.8%~1.4%^[18-19]。煤系烃源岩生气强度在泊尔江海子断裂以南主体介于 $(15\sim 30)\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$,而在该断裂以北则普遍小于 $10\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[19,36]。上石盒子组(P_2sh)和石千峰组(P_2s)在杭锦旗地区分布较为稳定,其中泥岩厚度 130~160 m,是下伏下石盒子组和山西组致密气藏的有效区域盖层^[36]。与鄂尔多斯盆地腹部上古生界气藏相比,杭锦旗地区已发现的天然气储量丰度和单井产量较低,气水分布复杂^[36]。

2 样品和分析方法

本文采集了杭锦旗地区二叠系下石盒子组和山西组水样共 12 个,其中泊尔江海子断裂以北什股壕地区 8 个,断裂以南独贵加汗地区 3 个、十里加汗地区 1 个。地层水地球化学分析测试均在中国石化油气成藏重点实验室进行,水化学组成分析参考行业标准《油田水分析方法:SY/T 5523-2016》^[37],其中微量元素含量分析采用 Vista-MPX 电感耦合等离子体发射光谱仪进行,氢、氧同位素组成分析采用 Delta V Advantage 稳定同位素质谱仪进行。地层水矿化度、微量元素含量和氢、氧同位素组成测试结果详见表 1。此外,笔者还收集了杭锦旗地区不同钻井^[21,33]及苏里格气田^[15]地层水数据用于对比分析。

3 地层水化学组成

3.1 水型和矿化度

统计表明,除 Y19 井^[33]等个别井 pH 值偏低

外,杭锦旗地区地层水 pH 值主体介于 6.0~7.3 之间,平均为 6.8,主体表现出一定的弱酸性,且泊尔江海子断裂以北什股壕地区(简称断裂以北)与该断裂以南独贵加汗和十里加汗地区(简称断裂以南)地层水 pH 值未表现出明显的差异。地层水呈弱酸性特征可能缘自地层中溶蚀作用尚未达到平衡而残余少量有机酸^[21]。在常量离子组成方面,杭锦旗地区二叠系地层水中阳离子主要为 Na^+ 和 Ca^{2+} , K^+ 和 Mg^{2+} 含量明显偏低;阴离子中 Cl^- 占主导,含少量的 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- ,除个别井外均不含 CO_3^{2-} 。根据苏林分类,杭锦旗地区二叠系地层水除个别井为 MgCl_2 型^[33]外,主体为 CaCl_2 型,表明该区下石盒子组和山西组具有较好的封闭条件。

杭锦旗地区泊尔江海子断裂南、北两侧地层水具有一定的差异。断裂以北二叠系地层水矿化度(TDS)介于 3.6~89.2 g/L,主体介于 40~80 g/L,平均为 52.1 g/L;断裂以南二叠系地层水 TDS 介于 15.3~80.1 g/L,主体介于 20~60 g/L,平均为 41.9 g/L,整体略低于断裂以北(图 2a)。山西组地层水特征与所在地区下石盒子组地层水矿化度分布范围一致(图 2a),未表现出垂向分带特征。少数样品矿化度偏低,甚至 TDS 不足 5 g/L,可能是受凝析水混入的影响。大牛地气田下石盒子组地层水矿化度明显偏低,盒 2、3 段矿化度平均分别仅为 15 g/L 和 14 g/L,这可能主要由于含气饱和度和凝析水较多造成的^[16]。苏里格气田二叠系地层水矿化度介于 29.1~68.3 g/L,平均为 48.3 g/L^[15],与杭锦旗地区地层水具有一定的相似性。

泊尔江海子断裂两侧二叠系地层水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 浓度与 TDS 具有一定的正相关性(图 2a),而 Cl^- 则

表 1 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区地层水矿化度、微量元素含量和氢、氧同位素组成
Table 1 Total dissolved solids (TDS), trace element concentrations, and hydrogen and oxygen isotopic compositions of formation water from Hangjinqi area, Ordos Basin

区带	井号	地层	矿化度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH	水型	微量元素含量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)				$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
						Sr	Ba	Mn	B		
什股壕	JPH-13	P_1x	61.6	5.9	CaCl_2	871	300	29.44	8.18	-77	-9.2
	J66	P_1x	61.4	5.9	CaCl_2	866	141	19.75	13.41	-80	-4.0
	J11P4H	P_1x	54.6	6.4	CaCl_2	716	260	9.13	5.80	-81	-9.8
	ESP2	P_1x	45.7	6.5	CaCl_2	568	176	10.84	8.74	-81	-9.5
	JPH-1	P_1x	51.8	6.9	CaCl_2	826	237	19.88	9.99	-77	-9.5
	JPH-2	P_1x	52.9	6.1	CaCl_2	870	301	18.96	8.26	-76	-8.8
	J11-2	P_1x	45.2	6.3	CaCl_2	561	175	10.35	8.92	-81	-9.7
	ES4	P_1x	16.8	7.2	CaCl_2	212	66	3.49	3.92	-103	-9.3
独贵加汗	J110	P_1x	46.0	6.9	CaCl_2	724	77	23.45	33.56	-129	-12.1
	J111	P_1x	44.4	5.9	CaCl_2	749	37	8.73	10.77	-76	-9.3
	J58P13H	P_1x	32.5	6.6	CaCl_2	479	71	13.13	22.77	-75	-9.8
十里加汗	J104	P_1s	28.1	7.8	CaCl_2	478	569	1.99	17.52	-76	-10.2

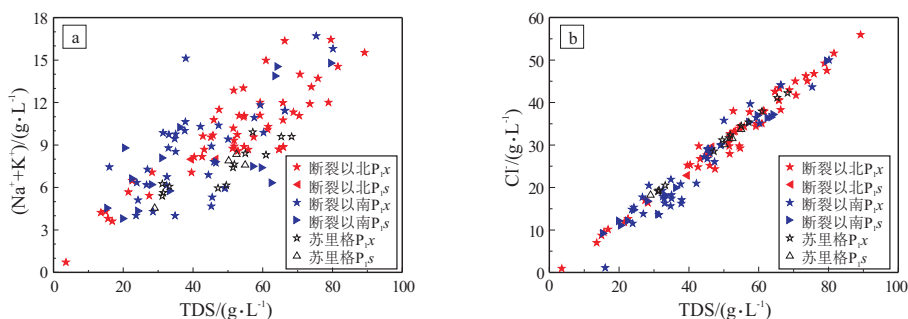


图 2 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系地层水 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (a) 和 Cl^- 含量 (b) 与 TDS 相关图
苏里格气田数据据窦伟坦等^[15]。

Fig.2 Correlation diagrams of $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ contents (a) and Cl^- contents (b) versus TDS of Permian formation water from Hangjinqi area, Ordos Basin

与 TDS 呈明显的正相关 (图 2b), 这可能主要缘自地层水常量离子中 Cl^- 占主导。断裂以北和以南地层水中 Cl^- 含量分别介于 $0.9 \sim 55.9 \text{ g/L}$ 和 $1.1 \sim 50 \text{ g/L}$ (图 2b), 平均分别为 31.8 g/L 和 24.4 g/L , 在平均 TDS 中占比分别为 61.0% 和 58.2% 。

3.2 水化学特征参数

杭锦旗地区二叠系地层水钠氯系数 ($r\text{Na}^+ / r\text{Cl}^-$) 介于 $0.23 \sim 1.05$ (图 3a), 平均为 0.50 , 主体小于现代海水的值 0.87 。较低的钠氯系数表明地层水发生了浓缩变质作用, 油气聚集和保存条件好^[38]。脱硫系数 ($100 \times r\text{SO}_4^{2-} / r\text{Cl}^-$) 常用于指示地层水的氧化还原环境, 系数越低表明地层水封闭性越好^[39]。杭锦旗地区二叠系地层水脱硫系数介于 $0 \sim 86.7$, 多数小于 10 (图 3a), 反映了地层封闭性整体较好。不管是钠氯系数还是脱硫系数, 断裂南、北两侧地层水整体均较为一致, 表现出较好的地层封闭性; 断裂以南少数井和断裂以北个别井钠氯系数超过 0.8 且脱硫系数高于 10 , 反映这些井地层水封闭性相对欠佳。

变质系数 [$(r\text{Cl}^- - r\text{Na}^+) / r\text{Mg}^{2+}$] 可以反映水岩

作用的强度和离子交换的程度, 变质系数越大表明油气藏封闭性越好, 越有利于油气保存^[40]。杭锦旗地区二叠系地层水变质系数整体高于 0 , 泊尔江海子断裂以北和以南地层水变质系数平均分别为 20.2 和 33.6 (图 3b)。苏里格气田二叠系地层水变质系数介于 $7.8 \sim 180.0$, 平均为 55.1 ^[15], 表明其水岩作用强度超过杭锦旗地区, 油气藏封闭性更好。

此外, 地层水盐化系数 [$r\text{Cl}^- / (r\text{CO}_3^{2-} + r\text{HCO}_3^-)$] 常用于指示埋藏浓缩作用的强弱, 如川西新场地区中上侏罗统地层水盐化系数明显低于下伏上三叠统须家河组地层水的值, 表明其可能受到了大气水下渗影响^[25]。杭锦旗地区二叠系地层水盐化系数整体偏高, 普遍大于 100 , 与苏里格气田二叠系地层水较为一致 (图 3b), 反映其受到了埋藏浓缩作用的明显影响。

因此, 杭锦旗地区二叠系地层水的不同类型水化学特征参数均表明, 该区二叠系具有较好的地层封闭性, 地层水在埋藏过程中经历了较强的浓缩变质作用, 反映了天然气保存条件较好。截至 2021 年底, 该区东胜气田二叠系天然气探明储量共

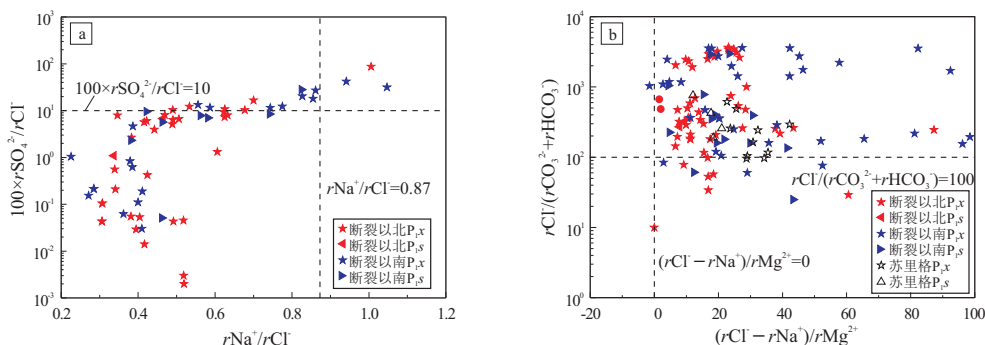


图 3 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系地层水脱硫系数与钠氯系数 (a) 和盐化系数与变质系数 (b) 相关图
苏里格气田数据据窦伟坦等^[15]。

Fig.3 Correlation diagrams of desulfurization coefficient versus sodium-chloride coefficient (a) and salinization coefficient versus metamorphic coefficient (b) of Permian formation water from Hangjinqi area, Ordos Basin

$1\ 926.74 \times 10^8\ \text{m}^3$, 其中泊尔江海子断裂以南的独贵加汗区带为 $1\ 529.09 \times 10^8\ \text{m}^3$, 断裂以北什股壕区带为 $162.87 \times 10^8\ \text{m}^3$; 在控制储量和预测储量中, 泊尔江海子断裂南北两侧的独贵加汗、十里加汗和什股壕这3个区带合计占比分别超过85%和60%^[5]。这反映了东胜气田天然气三级储量主体位于泊尔江海子断裂南、北两侧, 较好的保存条件是该区形成规模性天然气聚集的重要基础。

3.3 离子间关系特征

海水蒸发曲线和海水—河水混合线在判断各种离子的相对富集或亏损、指示水岩相互作用与地层水演化特征等方面发挥着重要作用^[16,25,41-42]。由于 Cl^- 化学性质相对稳定, 在海水蒸发曲线上只有在达到 $100\ \text{g/L}$ 之后才会发生沉淀, 因此通过其他离子含量相对 Cl^- 含量的变化, 能够判断地层水中各种离子的相对富集或亏损^[16]。杭锦旗地区泊尔江海子断裂以北和以南地区地层水中 Cl^- 含量分别介于 $0.9 \sim 55.9\ \text{g/L}$ 和 $1.1 \sim 50\ \text{g/L}$, 远小于 $100\ \text{g/L}$ (图2b), 且二叠系未发现盐层, 这表明地层水在演化过程中未发生 Cl^- 的沉淀, 其含量变化源自地层水的蒸发浓缩作用。

在 Cl^- 和 Na^+ 相关图上, 杭锦旗地区二叠系地层水除个别样品位于海水—河水混合线上外, 主体

与海水特征较为接近(图4a)。与海水—河水混合线和海水蒸发线相比, 在 Cl^- 浓度相近的条件下, 杭锦旗地区地层水 Na^+ 浓度表现出轻度亏损的特征(图4a), 这表明地层水的化学演化并非只经历了简单的蒸发浓缩。地层水中 Na^+ 的相对富集主要缘自含钠矿物的溶解, 而斜长石的钠长石化作用则会导致地层水中相对亏损 Na^+ 而富集 Ca^{2+} ^[43]。与海水蒸发曲线相比, 杭锦旗地区二叠系地层水除了表现出轻度的 Na^+ 亏损外, 还表现出明显的 Ca^{2+} 相对富集特征(图4b), 表明地层中发生了斜长石的钠长石化作用。值得注意的是, 杭锦旗地区地层水中 Na^+ 仅为轻度亏损, 而同为阳离子的 Ca^{2+} 却是显著富集, 即斜长石发生钠长石化导致的 Na^+ 的亏损并不足以平衡 Ca^{2+} 的富集。

杭锦旗地区地层水中 Mg^{2+} 含量均低于海水的值, 相对海水蒸发曲线表现出明显的亏损特征, 这一方面表明地层水为陆相地层水浓缩变质而来, 并非直接来自海相地层; 另一方面也与 Ca^{2+} 的显著富集相对应(图4c)。对四川盆地川西新场地区须家河组地层水研究表明, Ca^{2+} 的富集和 Mg^{2+} 的亏损往往指示了成岩过程中发生了白云岩化作用^[25,42]。大牛地气田上古生界地层水中 Mg^{2+} 的相对亏损也被认为与白云石胶结物和绿泥石等发育有关^[16]。

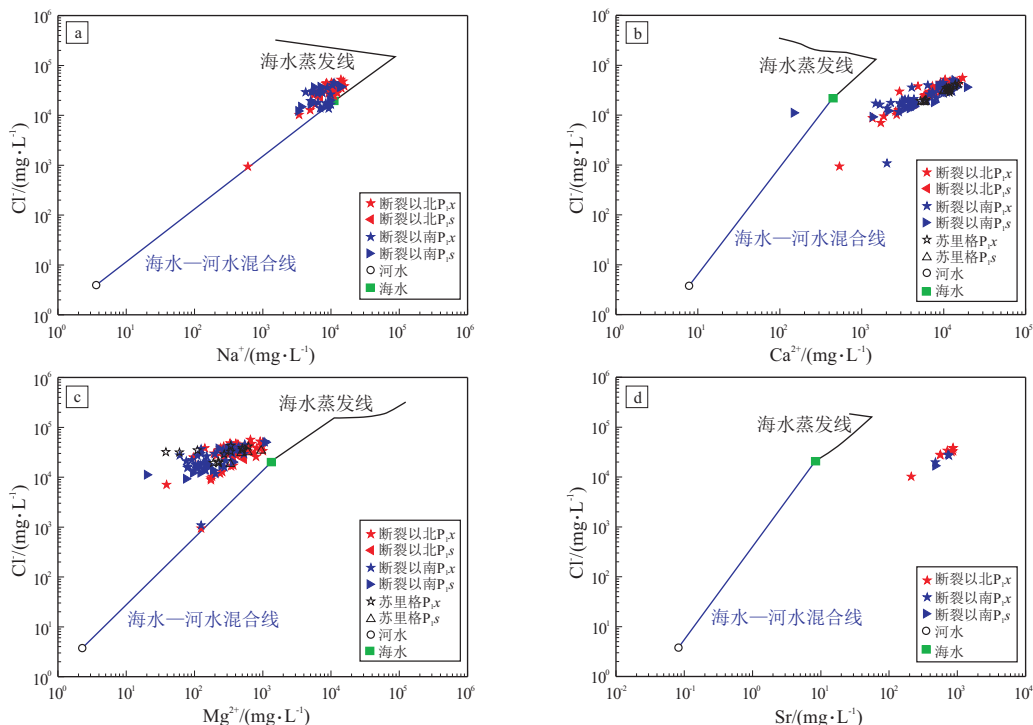


图4 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系地层水 Cl^- 与 Na^+ (a)、 Ca^{2+} (b)、 Mg^{2+} (c)、 Sr (d) 含量相关图
底图据覃伟等^[16]; 苏里格气田数据据窦伟坦等^[15]。

Fig.4 Correlation diagrams of Cl^- versus Na^+ (a), Ca^{2+} (b), Mg^{2+} (c), and Sr (d) concentrations in Permian formation water from Hangjinqi area, Ordos Basin

因此,杭锦旗地区地层水中 Mg^{2+} 的亏损可能主要缘自胶结物的白云岩化作用,这也与 Ca^{2+} 的富集相平衡。

3.4 微量元素特征

异常高含量的 Sr 往往发育于高浓缩的海相地层水或膏盐岩地层中,如川中地区须家河组地层水中 Sr 含量普遍超过 1 000 mg/L,可能与下伏高浓缩的海相地层水有关;而川西须家河组典型陆相地层水中 Sr 含量则明显较低,主体介于 200~800 mg/L^[25,44]。地层水中 Ca^{2+} 和 Sr 的同步富集可以指示二者为水岩相互作用过程中由含钙矿物溶蚀释放而来^[16]。杭锦旗地区二叠系地层水中 Sr 含量介于 212~871 mg/L,平均为 660 mg/L,且未表现出明显的区域性差异(表 1)。与海水蒸发曲线相比,杭锦旗地区地层水中明显富集 Sr(图 4d),与 Ca^{2+} 表现出一定的相似性(图 4b)。这表明该区地层水中的 Sr 主要来自钙长石或胶结物方解石等含钙矿物的溶蚀,并非来自海相地层水的浓缩。

微量元素 Ba、Sr 组合反映海相与陆相水文地质环境,油田水中 Ba 含量较高表明存在良好的还原环境^[22]。如川中地区须家河组地层水多数具有很高的 Ba、Sr 含量,二者分别普遍超过 1 200 mg/L 和 1 000 mg/L,表明其可能与高浓缩的海相地层水有关^[44]。杭锦旗地区泊尔江海子断裂以北下石盒子组地层水中 Ba 含量介于 66~301 mg/L,平均为 207 mg/L;断裂以南地区下石盒子组则整体偏低(37~77 mg/L),而该区山西组一个地层水样品表现出明显较高的 Ba 含量(569 mg/L)(表 1)。杭锦旗地区二叠系地层水样品中的 Ba 含量尽管超过现今海水中的 Ba 含量^[44],表明其为还原环境的产物,但明显低于四川盆地须家河组地层水。因此,杭锦旗地区下石盒子组地层水主体为蒸发浓缩后的陆相地层水,山西组地层水样品可能受到了下伏太原组海陆过渡相沉积的影响而具有相对较高的 Ba 含量。

海相地层水中 B 含量普遍大于 100 mg/L,如四川盆地威远气田震旦系地层水中 B 含量为 386~428 mg/L,而陆相地层水则普遍小于 100 mg/L^[22]。泊尔江海子断裂以北和以南地区地层水中 B 含量分别介于 3.92~13.41 mg/L 和 10.77~33.56 mg/L(表 1),平均分别为 8.40 mg/L 和 21.16 mg/L,均表现出陆相地层水的典型特征。此外,杭锦旗地区二叠系地层水中 Mn 含量介于 1.99~29.44 mg/L,平均 14.10 mg/L,多数小于 20 mg/L(表 1)。

4 氢、氧同位素组成

氢、氧同位素组成在揭示大气降水影响和水岩相互作用方面发挥着不可替代的作用。全球大气降水的氢、氧同位素组成具有明显的纬度效应,随着纬度升高,地层水的 δD 与 $\delta^{18}O$ 值逐渐降低,且二者表现出明显的线性正相关($\delta D = 8\delta^{18}O + 10$)^[45]。水岩相互作用会使得地层水 $\delta^{18}O$ 值增大,进而在 δD 与 $\delta^{18}O$ 值相关图上表现出氧同位素漂移的特征^[46]。因此,氢、氧同位素组成在地层水研究中得到了广泛有效的应用^[15,22,25,44,47]。

杭锦旗地区二叠系地层水 δD 值介于 -129‰ ~ -75‰ 之间,平均为 -84‰ ,主体集中分布于 -81‰ ~ -75‰ ; $\delta^{18}O$ 值主体介于 -12.1‰ ~ -8.8‰ ,仅一个样品 $\delta^{18}O$ 值较高(-4.0‰)(表 1)。苏里格气田二叠系地层水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别介于 -82.7‰ ~ -60.5‰ 和 -6.3‰ ~ -3.4‰ ,平均分别为 -73.8‰ 和 -4.7‰ ,为典型浓缩成因的古沉积水^[15]。杭锦旗地区地层水 $\delta^{18}O$ 值主体低于苏里格气田的值,仅个别样品 $\delta^{18}O$ 值与苏里格气田地层水的值一致(图 5)。在 δD 和 $\delta^{18}O$ 值相关图上,杭锦旗地区地层水主体更靠近全球大气降水线分布,表明该区地层水经历的水岩相互作用整体明显弱于苏里格气田;个别样品经受了较强的水岩相互作用而具有相对较高的 $\delta^{18}O$ 值,与苏里格气田地层水样品特征较为一致(图 5)。这也与变质系数反映出的水岩相互作用强度差异(图 3b)相一致。

泊尔江海子断裂以北 ES4 井下石盒子组地层水样品 δD 值仅为 -103‰ ,其 TDS 仅为 16.8 g/L(表 1)。多口钻井的单井埋藏史研究表明,杭锦旗

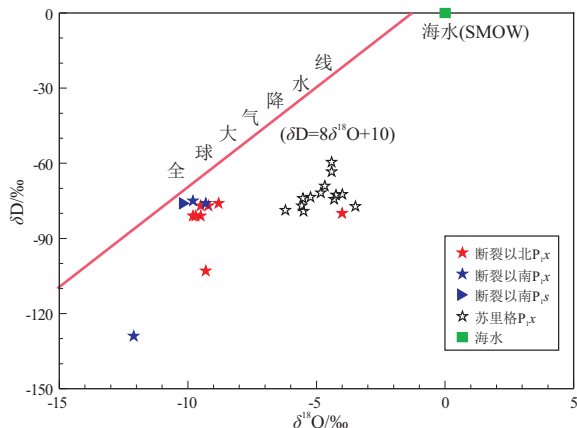


图 5 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系地层水氢、氧同位素值相关图

苏里格气田数据据婁伟坦等^[15];全球大气降水线据 CRAIG^[45]。

Fig.5 Correlation diagrams of δD versus $\delta^{18}O$ values of Permian formation water from Hangjinqi area, Ordos Basin

地区晚白垩世以来经历了大规模的区域性抬升^[36]。在构造隆升背景下,气藏冷却产生的凝析水往往具有较轻的氢同位素组成和很低的矿化度,因而气藏中存在少量凝析水会使得地层水 δD 和TDS值均降低^[25,44]。因此,ES4井下石盒子组地层水样品具有较低的 δD 和TDS值,主要是因为晚白垩世以来区域性抬升过程中凝析水的混入。

断裂以南地区J110井尽管 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别仅为 -129‰ 和 -12.1‰ ,但其TDS为 46.0 g/L (表1),表明其并未受到凝析水的显著影响。由于该井紧邻泊尔江海子断裂(图1),推测其地层水氢、氧同位素组成偏轻,可能主要受部分地表水沿断裂渗入的影响。过敏等^[33]研究表明,沿泊尔江海子断裂带有部分井的地层水经历了不同来源水的混合以及地表水的渗入。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系地层水pH值平均为6.8,水型主体为 CaCl_2 型。泊尔江海子断裂以北的什股壕地区地层水矿化度平均为 52.1 g/L ,而断裂以南独贵加汗和十里加汗地区地层水矿化度略低,平均为 41.9 g/L 。地层水主体具有钠氯系数小于0.87、脱硫系数小于10、变质系数高于0、盐化系数大于100等特征,指示了地层封闭性较好,地层水在埋藏过程中经历了较强的浓缩变质作用,天然气保存条件较好。

(2)不同离子与 Cl^- 相关性分析表明,与海水蒸发曲线相比,杭锦旗地区二叠系地层水表现出轻度的 Na^+ 亏损、明显的 Ca^{2+} 富集和 Mg^{2+} 亏损等特征,表明地层中发生了斜长石的钠长石化作用和胶结物的白云岩化作用。微量元素特征分析表明,杭锦旗地区二叠系地层水中Sr主要来自含钙矿物的溶蚀,Ba、B等含量反映了地层水主体为蒸发浓缩后的陆相地层水。

(3)杭锦旗地区二叠系地层水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值主体分别介于 $-81\text{‰} \sim -75\text{‰}$ 和 $-12.1\text{‰} \sim -8.8\text{‰}$,该区地层水经历的水岩相互作用整体明显弱于苏里格气田。少数样品具有偏低的 δD 值,主要是因为晚白垩世以来区域性抬升过程中凝析水的混入,或者受到了地表水沿断裂渗入的影响。

致谢:样品的采集和资料收集得到了中国石化华北油气分公司的大力协助,地球化学分析测试得到了中国石化油气成藏重点实验室的有力支持,审稿专家对初稿提出了宝贵修改意见,在此一并深表谢意!

参考文献:

- [1] 戴金星,秦胜飞,胡国艺,等.新中国天然气勘探开发70年来的重大进展[J].石油勘探与开发,2019,46(6):1037-1046.
DAI Jinxing, QIN Shengfei, HU Guoyi, et al. Major progress in the natural gas exploration and development in the past seven decades in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1037-1046.
- [2] 张才利,刘新社,杨亚娟,等.鄂尔多斯盆地长庆油田油气勘探历程与启示[J].新疆石油地质,2021,42(3):253-263.
ZHANG Caili, LIU Xinshe, YANG Yajuan, et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Changqing Oilfield in Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 253-263.
- [3] 胡春桥,任来义,贺永红,等.鄂尔多斯盆地延长探区油气勘探历程与启示[J].新疆石油地质,2021,42(3):312-318.
HU Chunqiao, REN Laiyi, HE Yonghong, et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Yanchang exploration area in Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 312-318.
- [4] 刘池洋,王建强,张东东,等.鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存—成藏特点[J].石油与天然气地质,2021,42(5):1011-1029.
LIU Chiyang, WANG Jianqiang, ZHANG Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1011-1029.
- [5] 何发岐,王付斌,王杰,等.鄂尔多斯盆地东胜气田氦气分布规律及特大型富氦气田的发现[J].石油实验地质,2022,44(1):1-10.
HE Faqi, WANG Fubin, WANG Jie, et al. Helium distribution of Dongsheng gas field in Ordos Basin and discovery of a super large helium-rich gas field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 1-10.
- [6] DAI Jinxing, LI Jian, LUO Xia, et al. Stable carbon isotope compositions and source rock geochemistry of the giant gas accumulations in the Ordos Basin, China[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(12): 1617-1635.
- [7] 刘全有,金之钧,王毅,等.鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩层系天然气成藏研究[J].岩石学报,2012,28(3):847-858.
LIU Quanyou, JIN Zhijun, WANG Yi, et al. Gas filling pattern in Paleozoic marine carbonate reservoir of Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 847-858.
- [8] WU Xiaoqi, ZHU Jianhui, NI Chunhua, et al. Genetic types and sources of Lower Paleozoic natural gas in the Daniudi gas field, Ordos Basin, China[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2017, 35(2): 218-236.
- [9] WU Xiaoqi, NI Chunhua, LIU Quanyou, et al. Genetic types and source of the Upper Paleozoic tight gas in the Hangjinqi area, northern Ordos Basin, China[J]. Geofluids, 2017, 2017: 4596273.
- [10] WU Xiaoqi, LIU Quanyou, ZHU Jianhui, et al. Geochemical characteristics of tight gas and gas-source correlation in the Daniudi gas field, the Ordos Basin, China[J]. Marine and Petroleum

- Geology, 2017, 79: 412-425.
- [11] LIU Quanyou, JIN Zhijun, MENG Qingqiang, et al. Genetic types of natural gas and filling patterns in Daniudi gas field, Ordos Basin, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 107: 1-11.
- [12] 张威, 丁晓琪, 李春堂, 等. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗马家沟组四段碳酸盐岩储层分布规律 [J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 615-626.
- ZHANG Wei, DING Xiaoqi, LI Chuntang, et al. Distribution of paleo-karst reservoirs in Ma 4 Member, Hangjinqi area, northern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 615-626.
- [13] 刘畅, 张道旻, 李超, 等. 鄂尔多斯盆地临兴区块上古生界致密砂岩气藏成藏条件及主控因素 [J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1146-1158.
- LIU Chang, ZHANG Daomin, LI Chao, et al. Upper Paleozoic tight gas sandstone reservoirs and main controls, Linxing block, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1146-1158.
- [14] 任海蛟, 吴伟涛, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马四段天然气成藏主控因素 [J]. 特种油气藏, 2021, 28(2): 27-33.
- REN Haijiao, WU Weitao, ZHAO Jingzhou, et al. Key controlling factors of natural gas accumulation in the Ordovician Ma Member 4 in the central Ordos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(2): 27-33.
- [15] 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.
- [16] 覃伟, 李仲东, 郑振恒, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田地层水特征及成因分析 [J]. 岩性油气藏, 2011, 23(5): 115-120.
- QIN Wei, LI Zhongdong, ZHENG Zhenheng, et al. Characteristics and genesis of formation water in Daniudi Gas Field, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(5): 115-120.
- [17] 何发岐, 王付斌, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地北缘勘探思路转变与天然气领域重大突破 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(6): 39-49.
- HE Faqi, WANG Fubin, ZHANG Wei, et al. Transformation of exploration ideas and major breakthrough in natural gas discovery in the northern margin of the Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6): 39-49.
- [18] 纪文明, 李莲蓬, 刘震, 等. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区上古生界气源岩分析 [J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 905-914.
- JI Wenming, LI Weilian, LIU Zhen, et al. Research on the Upper Paleozoic gas source of the Hangjinqi block in the northern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 905-914.
- [19] 倪春华, 朱建辉, 刘光祥, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界煤系烃源岩生烃潜力再评价 [J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 826-834.
- NI Chunhua, ZHU Jianhui, LIU Guangxiang, et al. Re-evaluation of hydrocarbon generation potential of the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Hangjinqi area of Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(5): 826-834.
- [20] 倪春华, 刘光祥, 朱建辉, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界天然气成因及来源 [J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 193-199.
- NI Chunhua, LIU Guangxiang, ZHU Jianhui, et al. Origin and source of natural gas in the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 193-199.
- [21] 段治有, 李贤庆, 陈纯芳, 等. 杭锦旗地区 J58 井区下石盒子组气水分布及其控制因素 [J]. 岩性油气藏, 2019, 31(3): 45-54.
- DUAN Zhiyou, LI Xianqing, CHEN Chunfang, et al. Gas and water distribution and its controlling factors of Xiashihezi Formation in J58 well area, Hangjinqi area [J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(3): 45-54.
- [22] 李伟, 赵克斌, 刘崇禧. 含油气盆地水文地质研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2008: 179-183.
- LI Wei, ZHAO Kebin, LIU Chongxi. Hydrogeology study of petroliferous basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 179-183.
- [23] 刘光祥, 沃玉进, 潘文蕾, 等. 中上扬子区海相层系流体特征与油气保存条件 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 17-21.
- LIU Guangxiang, WO Yujin, PAN Wenlei, et al. Fluid characteristics and hydrocarbon preservation conditions in marine facies strata of middle-upper Yangtze region [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 17-21.
- [24] 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与油气运聚关系 [J]. 石油实验地质, 2014, 36(4): 487-494.
- 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 & Experiment, 2014, 36(4): 487-494.
- [25] 吴小奇, 王萍, 潘文蕾, 等. 川西坳陷新场构造须五段地层水地球化学特征及其成因 [J]. 天然气工业, 2016, 36(3): 22-29.
- WU Xiaoqi, WANG Ping, PAN Wenlei, et al. Geochemical characteristics and origin of formation water in the 5th member of the Upper Triassic Xujiahe Fm in Xinchang structure, West Sichuan Depression [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(3): 22-29.
- [26] 吴小奇, 罗开平, 王萍, 等. 川西坳陷新场气田须家河组五段流体赋存状态 [J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1068-1078.
- WU Xiaoqi, LUO Kaiping, WANG Ping, et al. Fluid state in the 5th member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Xinchang gas field, Western Sichuan Depression in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1068-1078.
- [27] SALLER A H, STUEBER A M. Evolution of formation waters in the Permian Basin, United States: Late Permian evaporated seawater to Neogene meteoric water [J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(3): 401-428.
- [28] 俞凌杰, 刘可禹, 范明, 等. 页岩孔隙中气—水赋存特征研究: 以川东南地区下志留统龙马溪组为例 [J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 1089-1096.
- YU Lingjie, LIU Keyu, FAN Ming, et al. Co-occurring characteristics of pore gas and water in shales: a case study of the Lower Silurian Longmaxi Formation in the southeastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(6): 1089-1096.

- [29] 李天宇, 靳军, 田英, 等. 准噶尔盆地西北缘地层水化学特征及与油气保存关系[J]. 石油实验地质, 2020, 42(6): 972-980.
LI Tianyu, JIN Jun, TIAN Ying, et al. Chemical characteristics of formation water and the relationship with oil and gas preservation on northwestern margin of Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(6): 972-980.
- [30] 张光荣, 聂海宽, 唐玄, 等. 基于地层水指标的页岩气保存条件评价: 以渝东南地区五峰组—龙马溪组页岩气藏为例[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(1): 47-55.
ZHANG Guangrong, NIE Haikuan, TANG Xuan, et al. Evaluation of shale gas preservation conditions based on formation water index: a case study of Wufeng - Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 47-55.
- [31] 楼章华, 苏一哲, 朱蓉, 等. 四川盆地新场构造带上三叠统须家河组二段地层水化学动态特征及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 841-851.
LOU Zhanghua, SU Yizhe, ZHU Rong, et al. Dynamic chemical characteristics and origin of formation water in the second member of Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 841-851.
- [32] 王建摩, 李仲东, 过敏, 等. 杭锦旗地区上古生界地层水成因[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(1): 65-67.
WANG Jianhui, LI Zhongdong, GUO Min, et al. Origin of formation water of Upper Paleozoic in Hangjinqi area in Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(1): 65-67.
- [33] 过敏, 李仲东, 杜少林, 等. 杭锦旗地区上古生界地层水成因及其与油气的关系[J]. 矿物岩石, 2009, 29(1): 99-105.
GUO Min, LI Zhongdong, DU Shaolin, et al. The genesis of formation water and its relation to oil-gas accumulation in Upper Paleozoic of Hangjinqi area [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(1): 99-105.
- [34] 薛会, 王毅, 徐波. 鄂尔多斯盆地杭锦旗探区上古生界天然气成藏机理[J]. 石油实验地质, 2009, 31(6): 551-556.
XUE Hui, WANG Yi, XU Bo. Accumulation mechanism of natural gas in Upper Paleozoic, Hangjinqi block, north Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(6): 551-556.
- [35] 王明健, 何登发, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起上古生界天然气成藏条件[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 30-39.
WANG Mingjian, HE Dengfa, BAO Hongping, et al. Upper Palaeozoic gas accumulations of the Yimeng uplift, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(1): 30-39.
- [36] 郝蜀民, 李良, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地北缘石炭系—二叠系大型气田形成条件[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 149-154.
HAO Shumin, LI Liang, ZHANG Wei, et al. Forming conditions of large-scale gas fields in Permo-Carboniferous in the northern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 149-154.
- [37] 国家能源局. 油田水分析方法: SY/T 5523-2016[S]. 北京: 石油工业出版社, 2016: 1-41.
National Energy Administration. Method for analysis of oilfield water: SY/T 5523-2016[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016: 1-41.
- [38] 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. Geochemical characteristics of formation water in Xujiahe 2 Member, Xinchang Gasfield [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2012, 35(4): 41-44.
- [39] 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 & Gas Geology, 2012, 33(5): 802-810.
- [40] 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.
- [41] 周训, 李慈君. 海水蒸发轨迹线及其应用[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 1995, 20(4): 410-414.
ZHOU Xun, LI Cijun. Seawater evaporation trajectories and their application [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 1995, 20(4): 410-414.
- [42] 沈忠民, 宫亚军, 刘四兵, 等. 川西拗陷新场地区上三叠统须家河组地层水成因探讨[J]. 地质论评, 2010, 56(1): 82-88.
SHEN Zhongmin, GONG Yajun, LIU Sibing, et al. A discussion on genesis of the Upper Triassic Xujiahe Formation water in Xinchang area, Western Sichuan Depression [J]. Geological Review, 2010, 56(1): 82-88.
- [43] 向才富, 夏斌, 解习农. 松辽盆地十屋断陷流体—岩石相互作用[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 51-55.
XIANG Caifu, XIA Bin, XIE Xi' nong. Water-rock interaction in the Shiwu Depression, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(6): 51-55.
- [44] 李伟, 秦胜飞. 四川盆地须家河组地层水微量元素与氢氧同位素特征[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 55-63.
LI Wei, QIN Shengfei. Characteristics of trace elements and hydrogen and oxygen isotopes in the formation water of the Xujiahe Formation, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 55-63.
- [45] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [46] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
ZHENG Yongfei, CHEN Jiangfeng. Stable isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [47] 陶成, 刘文汇, 杨华敏, 等. 油气田水中氢氧同位素分析新技术及应用[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 199-201.
TAO Cheng, LIU Wenhui, YANG Huamin, et al. A new method for analysis of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in oil-and-gas field water and its application [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 199-201.