

# 川西坳陷新场气田须二气藏地层水成因研究

## ——水化学和锶同位素证据

山俊杰<sup>1,2</sup>, 毕有益<sup>1</sup>, 邓美洲<sup>1</sup>, 严焕榕<sup>1</sup>, 周小荣<sup>1</sup>, 郑艳<sup>1,3</sup>

(1. 中国石化西南油气分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610041; 2. 中国石化西南油气分公司 博士后工作站, 四川 成都 610041; 3. 中国石化西南油气分公司 地质中心实验室, 四川 成都 610081)

**摘要:** 地层水是影响气田产能开发的重要因素之一, 气井遇水会降低储层气相渗透率, 从而导致气产量迅速下降, 严重制约单井产能的提高。目前已有的研究对须二气藏地层水的物质来源认识仍然存在一定争议。本文从主微量元素、水岩相互作用以及锶同位素组成特征方面对川西坳陷新场气田须二气藏 11 口生产井的地层水进行了系统研究, 结果显示须二气藏地层水具有低矿化度 (55 166.00~122 547.41 mg/L)、高 Br<sup>-</sup> 和 Sr<sup>2+</sup> 含量 (分别为 642.00~1 711.00 mg/L 和 670.00~1 780.00 mg/L) 及 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值 (0.715 27~0.721 77) 的特征, 表明研究区地层水 Sr 同位素来源区别于海相碳酸盐岩, 更符合砂岩风化特征。地层水中 Ca 的富集主要与砂岩储层成岩自生矿物的溶解有关, 在深部水岩相互作用下, Sr 以类质同象的方式代替 Ca 并且获得了有机质中的 Br, 同时使得 Br 更加富集。以上研究结果为今后该气藏赋水层位的预测提供了理论依据。

**关键词:** 川西坳陷; 须二气藏地层水; 水化学; 锶同位素

中图分类号: P618.13; P641.5; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)05-0735-10

## Hydrochemistry and Sr isotope constraints on the genesis of formation water in the 2nd member of Xujiahe Formation gas reservoir in Xinchang gas field, Western Sichuan Depression

SHAN Jun-jie<sup>1,2</sup>, BI You-yi<sup>1</sup>, DENG Mei-zhou<sup>1</sup>, YAN Huan-rong<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-rong<sup>1</sup> and ZHENG Yan<sup>1,3</sup>

(1. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gas Company, SINOPEC, Chengdu 610041, China; 2. Post-Doctoral Scientific Research Station, Southwest Oil & Gas Company, SINOPEC, Chengdu 610041, China; 3. Geology Experiment Center, Southwest Oil & Gas Company, SINOPEC, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** Formation water is one of the significant factors affecting the development of gas fields. The presence of water in gas wells can decrease the gas phase permeability of the reservoir, leading to a rapid decline in gas production and severely restricting the improvement of well productivity. Furthermore, there is still some controversy regarding the sources of formation water in study area. In this study, through an investigation of the formation water system in 11 production wells in the Xinchang gas field, hydrochemical and strontium isotopic analyses were conducted to examine the major and trace elements, water-rock interactions, and strontium isotope characteristics. The results indicate that the formation water in the 2nd member of the Xujiahe Formation gas reservoirs exhibits characteristics of low total dissolved solids (ranging from 55 166.00 to 122 547.41 mg/L), high bromine (Br) and strontium (Sr) contents (ranging from 642.00 to 1 711.00 mg/L and 670.00 to 1 780.00 mg/L, respectively), and <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr

收稿日期: 2023-05-16; 接受日期: 2023-08-07; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国石化科技部项目(P21040)

作者简介: 山俊杰(1990-), 男, 博士后, 主要研究方向为气藏地层水分布特征研究、地层水资源综合利用, E-mail: Junjshan@163.com;

通讯作者: 毕有益(1984-), 男, 副研究员, 从事气藏地质综合评价, E-mail: biyouyi.xnyq@sinopec.com。

ratios (ranging from 0.715 27 to 0.721 77). These characteristics suggest that the source of strontium isotope in the formation water is different from that of marine carbonate rocks and is more consistent with sandstone weathering. The enrichment of calcium (Ca) in the formation water is primarily related to the dissolution of authigenic minerals in the sandstone reservoir. During deep water-rock interactions, strontium replaces calcium in a cation-exchange manner and acquires bromine from organic matter, leading to an enrichment of bromine. These findings provide a theoretical basis for predicting the water-bearing horizons of the reservoir in the future.

**Key words:** Western Sichuan Depression; formation water in the 2nd member of Xujiahe Formation gas reservoir; hydrochemistry; strontium isotope

**Fund support:** Sinopec Science and Technology Department Project (P21040)

在沉积盆地中,地层水与油气共存于地下岩石的孔隙或裂隙中,是油气生成的参与物,特别是油气运移、聚集及成藏等有关的物理、化学过程,都是在地层水介质内发生的,其蕴含着丰富的成岩、沉积、成藏等信息 (Wells and Price 2015; 周新平等, 2021)。盆地演化过程中不管是岩石的胶结与溶蚀,还是有机质降解反应及其混合作用等,都会有地层水提供载体和动力,而这些作用过程和油气聚集都有着密不可分的联系 (康保平等, 2018)。另外,地层水是影响气田产能开发的重要因素之一,气井遇水会降低储层气相渗透率,从而导致气产量迅速下降,严重制约单井产能的提高 (史洪亮等, 2016)。因此地层水的深入研究,不仅对于厘清油气运移、聚集和保存规律具有重要的实际意义,同时可为气藏勘探开发提供重要的理论依据。

川西坳陷自 20 世纪 80 年代末陆续发现 7 个气田后,成为四川盆地主要的天然气生产基地 (段永明等, 2016)。须二气藏作为新场气田深部最重要的天然气产层,至今已有近 20 年的勘探开发历程,在地层水水化学分带 (汪珊, 2003)、地层水与岩石相互作用 (沈忠民等, 2011)、地层水矿化度分布与气藏保存 (吴浩等, 2012; 邓大平, 2015)、地层水-气横纵向变化 (李进山等, 2012)、地层凝析水地球化学 (尚长健等, 2015; 陆正元等, 2015) 等方面均有了有益的研究成果。须二气藏地层水仍存在以下几个问题: ① 储集层致密化严重 (孔隙度平均值均 <5%, 渗透率平均值 <  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 含水饱和度较高 (宫亚军等, 2010); ② 水赋存层段多, 含水系统地层水发生过多期次跨层运动, 并且长期气水同产, 产出的化学性质有较大差异 (黎华继等, 2015); ③ 埋藏深度大 (>3 500 m), 水体赋存状态与空间分布规律不清 (王翹楚, 2018)。在过去的几十年中, 学者们围绕以上问题在该气藏进行了大量的科学

研究。

随着须二气藏新井投产和不断的滚动开发, 之前的实验结果已经不能反映目前气藏地层水的实际情况, 并且之前已有的研究对须二气藏地层水的物质来源本来就存在着一定争议, 为此, 本文以川西坳陷新场气田须二气藏钻井地层水为研究对象, 在整理长期监测的钻井地层水水化学数据基础上, 利用锶同位素 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 受到温度、压力、微生物作用等发生分馏较弱的特征 (Fan *et al.*, 2018), 对须二气藏地层水进行了主微量元素和锶同位素组成特征方面的系统性分析, 深入探讨了须二气藏地层水水岩相互作用、物质来源及成因, 以期更有效地为该气藏稳水采气和赋水层位预测提供理论依据和技术支撑。

## 1 区域地质概况

四川盆地作为一个多旋回的复合沉积盆地, 是扬子板块中一个重要的次级构造单元 (邓煜霖等, 2018; 詹宏宇等, 2023; 李宸等, 2023)。川西坳陷位于四川盆地西部, 其面积约  $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 呈北东向展布。川西坳陷西邻龙门山推覆构造带, 东靠川中隆起区, 主要受这两个区带的控制和影响, 形成了一系列大致平行的构造和断裂, 其中尤其西侧龙门山推覆构造带对川西坳陷的影响最为明显 (图 1a)。自印支期至喜山期, 由于盆地经历了不同方向、多期次的应力挤压 (刘成川等, 2020), 堆积了较厚的陆源碎屑岩 (约 5 km), 使得川西坳陷成为盆地内碎屑岩气田发育的有利地区 (李忠平, 2014)。

根据构造演化特征可将川西坳陷划分为龙门山前构造带、新场北东向构造带、知新场南北向构造带、梓潼凹陷、成都凹陷和中江斜坡 (图 1a)。研究区新场气田处于川西坳陷新场构造带中部, 整体呈

NEE 向长轴复式背斜 (图 1b), 构造控制着气藏的聚集和运移, 对勘探开发有着深远的影响。

研究区内须家河组共发育 4 段, 自老到新为须二~须五段, 平均沉积厚度范围为 500~750 m (图 1c)。其中须二、四段为储层主要发育层位, 呈现出以砂岩为主的不等厚砂泥互层; 须三、五段为烃源岩

和区域性盖层发育层位, 以暗色泥岩为主。本文以须二段为研究对象, 将其自上到下分为上亚段 (Tx<sub>2</sub><sup>1</sup>~Tx<sub>2</sub><sup>3</sup> 砂组)、中亚段 (Tx<sub>2</sub><sup>4</sup>~Tx<sub>2</sub><sup>6</sup> 砂组)、下亚段 (Tx<sub>2</sub><sup>7</sup>~Tx<sub>2</sub><sup>9</sup> 砂组) 3 个亚段。须二段沉积厚度约 700 m, 其天然气主要产层为 Tx<sub>2</sub><sup>1</sup>、Tx<sub>2</sub><sup>2</sup>、Tx<sub>2</sub><sup>4</sup> 砂组, 产水层段以中、下亚段为主。

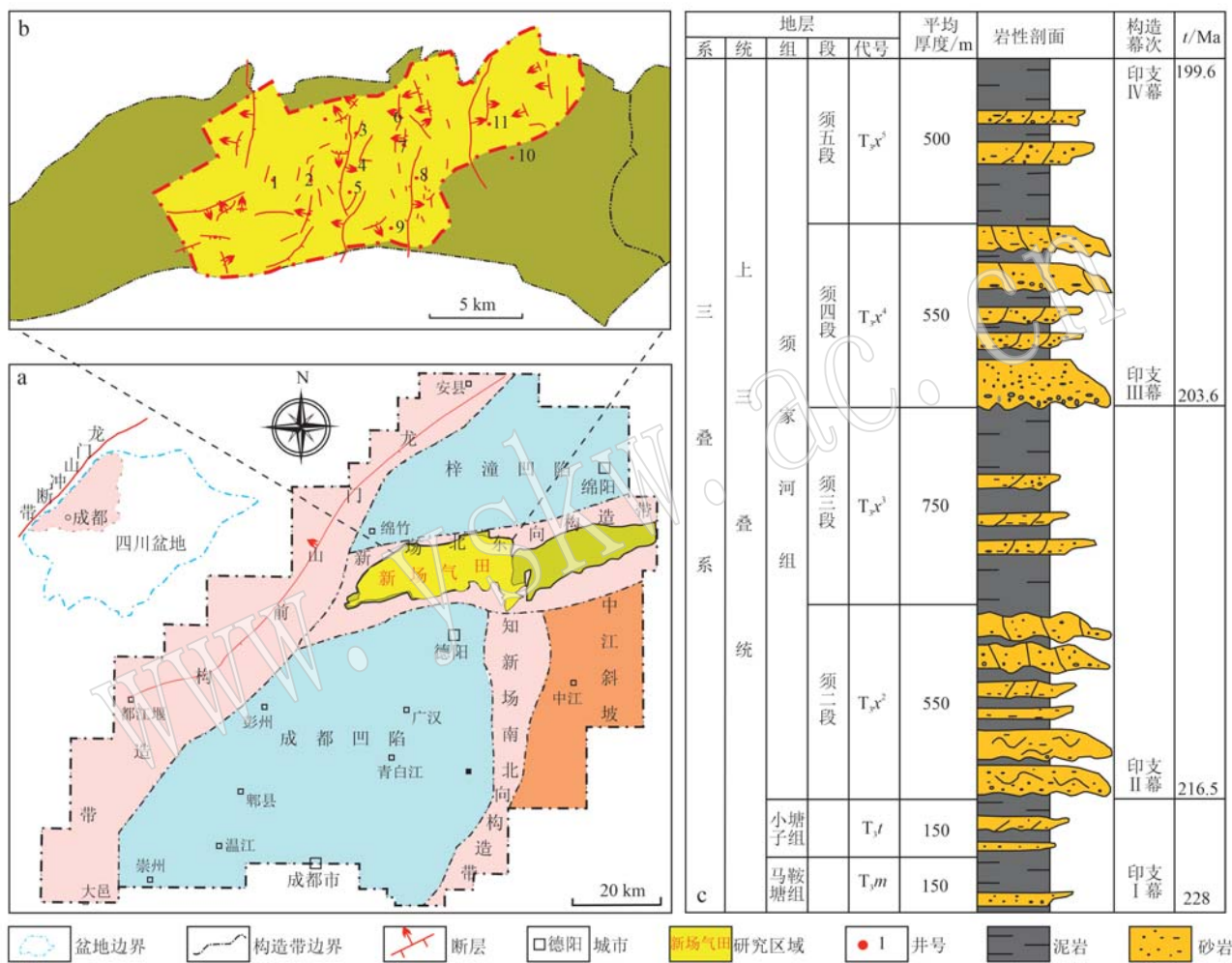


图 1 川西坳陷构造单元分布(a)、研究区示意图(b)及地层综合柱状图(c) [据陈洪德等(2021)修改]

Fig. 1 Structural map of Western Sichuan Depression (a), study area (b) and composite stratigraphic column of the Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression (modified by Chen Hongde *et al.*, 2021)

## 2 样品采集与分析

须二气藏作为新场气田深部最重要的天然气产层, 自 2000 年 10 月第一口勘探井获得高产 (测试获得 151×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d 的无阻流量) 后, 拉开了新场气田须二气藏勘探开发的序幕。在须二气藏不断的滚动评价及工艺试验和评价建产的研究基础上, 本文依

据最新生产动态特征, 剔除了凝析水、返排率低等不利因素, 整理了 11 口生产井的水化学数据。

水样的常量离子 (K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 和微量离子 (Br<sup>-</sup>、Sr<sup>2+</sup>) 分析测试工作在中国石化西南油气分公司地质中心实验室和成都理工大学完成, 测定均遵循石油天然气行业标准方法 SY/T5523-2016。另外在成都理工大学采用热电质谱仪 (TIMS) 对 9 口生产井的地层水进行了锶同位素



测试。在整个同位素分析测试过程中,通过标准物 GBW04411、NBS607 和 NBS987 分别对仪器进行质量监控。标准物 GBW04411、NBS607 和 NBS987 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定平均值分别为 $0.760\,06\pm 0.000\,02(2\sigma)$ 、 $1.200\,26\pm 0.000\,06(2\sigma)$ 和 $0.710\,18\pm 0.000\,03(2\sigma)$ ,其证书值的误差范围分别为 $0.759\,99\pm 0.000\,20(2\sigma)$ 、 $1.200\,39\pm 0.000\,20(2\sigma)$ 和 $0.710\,34\pm 0.000\,26(2\sigma)$ ,样品的测定结果与证书值在误差范围内,说明得到的样品测定数据可信。

### 3 结果

#### 3.1 水化学组成

水样的常量和微量离子分析结果见表1。总体来说,新场须二气藏地层水溶解性总固体(TDS)含

量相对较低,在 $55\,166.00\sim 122\,547.41\text{ mg/L}$ 之间,平均值 $87\,748.58\text{ mg/L}$ ,达到卤水级别;主要离子组成以 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 为主,阴阳离子含量总体呈现 $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 的特征。根据油气田水分类法中的苏林分类法,地层水均为 $\text{CaCl}_2$ 型。而作为水体演化过程极为敏感的化学指标, $\text{Br}$ 、 $\text{Sr}$ 等微量元素的离子含量分布范围分别为 $642.00\sim 1\,711.00$ 和 $670.00\sim 1\,780.00\text{ mg/L}$ ,平均值分别为 $1\,164.74$ 和 $1\,218.33\text{ mg/L}$ 。

#### 3.2 锶同位素组成

本次研究共分析了9件地层水样品的锶同位素组成(表1),它们的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布在 $0.715\,27\sim 0.721\,77$ 之间,平均为 $0.720\,07$ 。从结果来看,所测地层水锶同位素组成较为接近。

表1 研究区地层水样品的水化学、锶同位素组成特征  
Table 1 The hydrochemical compositions, Sr isotopes of formation water in the study area

井号	mg/L										$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	TDS	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Br}^-$	$\text{Sr}^{2+}$	
1	111 522.34	1 219.00	38 305.00	3 386.50	270.65	68 030.00		311.19	1 311.00	1 325.00	0.721 77
2	80 349.69	794.00	26 660.00	2 870.00	274.60	49 231.50	49.00	470.59	1 173.00	1 328.00	0.721 24
3	122 547.41	1 411.00	42 360.00	3 768.00	332.00	74 357.35		319.06	1 511.00	1 535.00	0.721 23
4	117 264.18	1 953.00	40 090.00	3 586.00	343.50	70 940.40	172.00	179.28	947.94	1 563.00	0.721 32
5	95 986.35	494.35	30 000.00	5 045.00	589.50	59 857.50			1 711.00	1 780.00	0.715 27
6	55 166.00	594.80	18 038.00	2 178.00	316.20	34 039.00			642.00	726.00	0.719 89
7	79 663.28	821.00	21 867.50	6 150.00	845.50	49 930.66	48.62		849.00	732.00	0.718 64
8	73 946.94	891.50	27 734.45	1 694.00	168.95	43 053.50		404.54			
9	87 808.70	888.00	31 350.00	2 031.50	199.20	53 340.00					
10	76 589.70	930.00	27 230.00	1 726.00	178.70	46 525.00				670.00	0.720 47
11	64 389.80	491.35	22 545.00	1 910.50	238.85	38 784.00		420.10	1 173.00	1 306.00	0.720 78

### 4 讨论

#### 4.1 水化学特征

油气田地层水中无机组分是重要的组成部分,携带着成因与演化的信息载体,能够揭示所在层的水文地质条件和水文地球化学环境。从表1可以看出,川西坳陷须家河组二段气藏地层水离子组成以 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 为主导,二者具有较好的线性关系(图2a)。 $\text{K}^+$ 平均含量 $1\,011.97\text{ mg/L}$ ,高于中浅层沙溪庙组地层水 $\text{K}^+$ 含量( $225\text{ mg/L}$ )(叶素娟等,2014)。尚长健(2013)认为须二气藏地层水中 $\text{K}^+$ 来源主要为在成岩过程中钾长石的溶解。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 平均含量分别 $29\,652.72$ 、 $3\,122.32$ 和 $341.60\text{ mg/L}$ ,相对富

$\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 而贫 $\text{Mg}^{2+}$ ,这可能与钠长石、碳酸盐岩溶解和沉淀及强烈的阳离子交替吸附作用有关。阴离子中 $\text{Cl}^-$ 平均含量达到 $53\,462.63\text{ mg/L}$ ,而 $\text{HCO}_3^-$ 含量(平均值 $350.79\text{ mg/L}$ )高于 $\text{SO}_4^{2-}$ (平均值 $89.87\text{ mg/L}$ )含量,这是由沉积盆地的封闭环境下细菌还原作用造成的,相对较高的 $\text{HCO}_3^-$ 与碳酸盐矿物溶解及有机质成熟过程中 $\text{CO}_2$ 的不断排出密不可分。

值得关注的是,须二气藏地层水微量元素 $\text{Br}$ 、 $\text{Sr}$ 具有较高的离子含量(平均含量分别为 $1\,164.74\text{ mg/L}$ 、 $1\,218.33\text{ mg/L}$ )。微量元素 $\text{Br}$ 一般不独立成矿,主要以离子形式存在,难溶于硅质岩石中(孔维刚等,2021),常随卤水蒸发浓缩富集在残留液中,另一部分 $\text{Br}$ 以类质同象形式置换矿物中的 $\text{Cl}$ ,形成具有更高 $\text{Br}$ 含量的盐类矿物,如氯化钾和水氯镁石。而

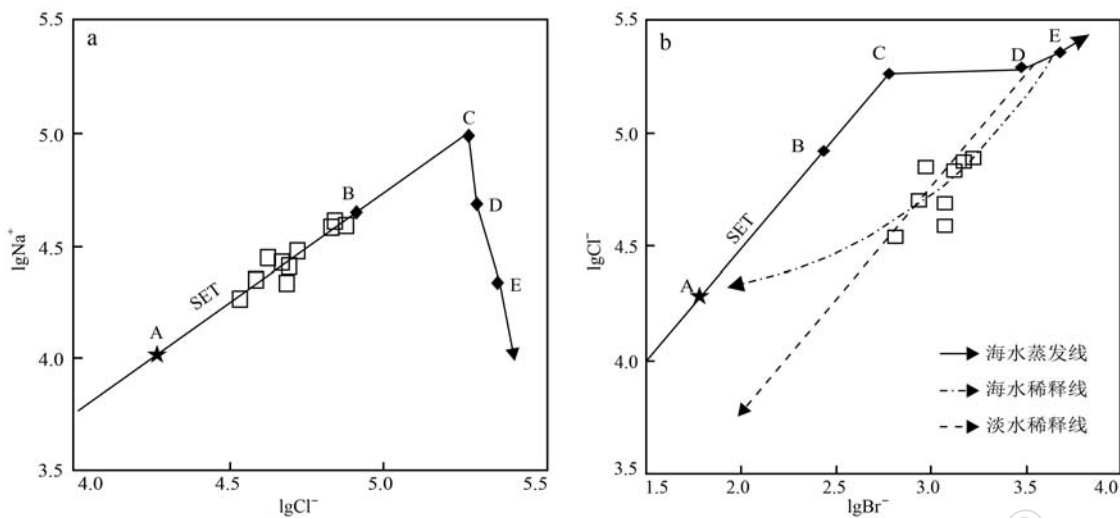


图 2 川西须二气藏地层水的 Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 含量对数分布图(a)、Cl<sup>-</sup> 和 Br<sup>-</sup> 对数分布图(b) (据 Carpenter, 1978)

Fig. 2 Logarithm distributions of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> content (a), Cl<sup>-</sup> and Br<sup>-</sup> content in formation water of Xu2 gas reservoir in Western Sichuan(after Carpenter, 1978)

A—海水; B—石膏沉淀; C—石盐析出; D—泻利盐沉淀; E—钾石盐沉淀

A—means seawater; B—means precipitation of gypsum; C—means precipitation of halite; D—means precipitation of epsomite; E—means precipitation of sylvite

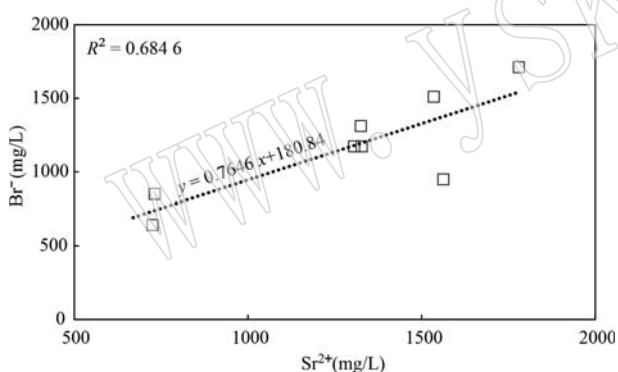


图 3 川西须二气藏地层水 Br<sup>-</sup> 和 Sr<sup>2+</sup> 含量关系图

Fig. 3 Br<sup>-</sup> and Sr<sup>2+</sup> concentrations plots of Xu2 formation water in Western Sichuan

Sr<sup>2+</sup> 由于离子半径稍大于 Ca<sup>2+</sup>, 碳酸盐、硫酸盐、长石和其他造岩矿物中的 Ca 容易被 Sr 以类质同象的方式替代。相比较于海水 (陈郁华, 1983), 不难发现须二气藏地层水 Br<sup>-</sup>、Sr<sup>2+</sup> 的含量均远远高于海水, 显然具有富 Br<sup>-</sup>、Sr<sup>2+</sup> 的特征。Sr<sup>2+</sup> 含量与 Br<sup>-</sup> 含量在研究区的分布规律高度相似 (图 3, R<sub>2</sub> = 0.68), 证明两个元素之间可能经历过类似的水岩相互作用, 指示二者具有相似的物质来源。

海水在蒸发浓缩过程中, Cl 作为溶液中稳定的组分, 受到吸附、沉淀等作用的影响较小, 因而当卤

水与淡水相混合时, 其离子间的系数比值会有规律地演化。研究区具有相对较高的 n(Na)/n(Cl) 值 (0.68 ~ 0.99) 和 100 n(Br)/n(Cl) 值 (5.93 ~ 13.42), 反映出地层较好的封闭性和地层水富溴的特征。另外, 从研究区地层水投点与海水蒸发轨迹线来看, 地层水投点均落在海水蒸发线的石膏沉积阶段之下 (图 2), 这与须二段地层岩性以砂泥岩互层为主、未见硫酸盐岩等蒸发岩的沉积特征一致 (图 1)。研究区地层水落在 Na/Cl 海水蒸发线 (SET) (图 2a) 与 Br/Cl 海水稀释线和淡水稀释线 (图 2b) 附近, 说明研究区地层水可能受到海水和淡水淡化稀释的影响。但是往往如此高含量的 Br 地层水可能不仅仅是蒸发浓缩作用的结果, 更有可能跟深部地层水与沉积物有机质或岩石长期地相互作用有着密切相关。

#### 4.2 水岩相互作用特征

Davisson 和 Criss (1996) 通过对全球沉积盆地流体的研究, 发现水岩相互作用造成流体中阳离子 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 之间的线性关系发生变化, 提出 Ca 富集和 Na 亏损的盆地流体线 (BFL, basinal fluid line):

$$Ca_{excess} = 0.967 Na_{deficit} + 140.3 (R = 0.98) \quad (1)$$

并且建立了 Ca 富集和 Na 亏损的关系式:

$$Ca_{excess} = (2/40.08) [Ca_{means} - (Ca/Cl)_{sw} Cl_{means}] \quad (2)$$

$$Na_{deficit} = (1/22.99) [(Na/Cl)_{sw} Cl_{means} - Na_{means}] \quad (3)$$

式中,  $s_w$  代表海水的离子含量 (mg/L),  $m_{\text{eans}}$  代表测得地层水的离子含量 (mg/L)。地层水的阳离子相较于海水的亏损与富集关系能预测水岩相互作用的过程。根据公式(1)可得,盆地流体线斜率接近于1,代表钠长石化过程中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^+$  发生交换。由图4可知,研究区的地层水表现出相对 Ca 富集和 Na 亏损的特征,那么 Ca 的富集可能与砂岩储层中以方解石和白云石为主胶结物的自生成岩矿物的溶解有关。另外,沈忠民等(2011)在研究区通过扫描电镜发现钠长石的存在,同时也证实了钙长石的钠长石化会造成 Na 亏损和 Ca 富集,关系式如下。

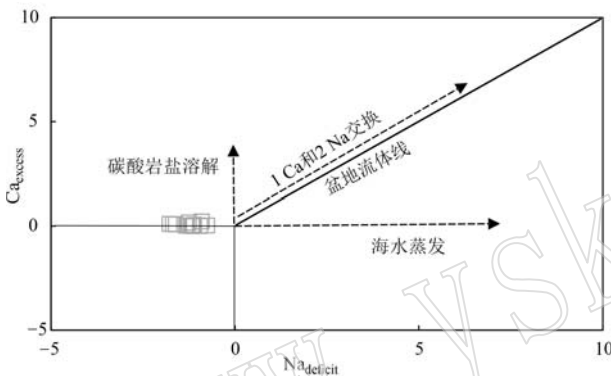
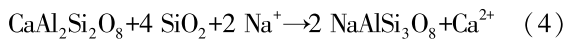


图4 川西须二气藏地层水  $\text{Ca}_{\text{excess}}$  和  $\text{Na}_{\text{deficit}}$  关系图  
(据 Davisson and Criss, 1996)

Fig. 4  $\text{Ca}_{\text{excess}}$  and  $\text{Na}_{\text{deficit}}$  plot of Xu2 formation water in Western Sichuan (modified by Davisson and Criss, 1996)

上文中已经提到研究区地层水在海水蒸发轨迹线上的投点均落在石膏沉积阶段之下,并且陈郁华(1983)的海水等温蒸发实验表明,当海水浓缩的  $\text{Br}^-$  含量达到 1 164.74 mg/L 时,对应的浓缩阶段为泻利盐开始沉积阶段(矿化度为 340.95 g/L)。显然研究区地层水较高的  $\text{Br}^-$  含量和低 TDS 不符合这一特征。根据 Edmunds(1996)研究分析,发现有机质对溴元素起到了富集的作用,并且溴会随着成岩演化阶段进入地层水。另外,沈忠民等(2010)调研得出泥岩在异常高压状态下具有半渗透膜,在其反渗透作用下会促进地层水中离子发生交换,可以进一步改变地层水的化学成分。前人研究早已发现通过深部水岩相互作用可以获得更多的 Br 含量(王春连等, 2020)。综上,沉积物有机质作用和深部水岩相互作用是导致研究区富 Br 的主要原因。

### 4.3 锶同位素特征

前人对须二气藏地层水来源开展了深入研究,形成了不同的认识,目前认为须二气藏地层水的来源主要有3个:原始地层沉积水、海相水侵入、上覆陆相水混入。陈冬霞等(2010)认为须二地层水型主要为  $\text{CaCl}_2$  型,属于高封闭环境下的原生地层水,具有串珠状残留地层水的特点。而康保平等(2018)根据氢氧同位素特征等得出须二气藏地层水来源整体为海相水的侵入。由此可见,学者们对须二地层水的来源仍存在一定争议。地层水作为孔隙流体的重要组成部分,在沉积盆地的演化过程中还主要受控于地层水与岩石的相互作用,因此,诸多的影响因素造成很难判断须二气藏地层水的来源。锶同位素受温度、压力、微生物作用、蒸发作用和化学作用的影响而发生的分馏较弱,可以用来进一步约束地层水的来源,较好地解决此类问题(Tan *et al.*, 2017; Shan *et al.*, 2020; 朱正杰等, 2021)。

通常来说,受地幔物质的影响或参与深部循环的水体  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值较低,受地壳物质的影响或与地球表面大气水溶解的水体  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值较高。数据显示上三叠统海相碳酸盐岩  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值范围为 0.707 50~0.708 30(图5),研究区地层水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值范围为 0.715 27~0.721 77(图5、表1),表明其区别于海相碳酸盐岩。由于研究区属于致密砂岩储层(平均基质孔隙度 3.4%,平均基质渗透率  $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )且埋深大于 3 500 m(商晓飞等, 2022),大气降水无法对该地区 530 m 以下的地层造成影响(沈忠民等, 2011)。周训(2013)也认为该区地层水处于深埋、致密环境下,不会参与现代水的循环。综合上述讨论,排除了地表水对研究区地层水的影响,研究区地层水 Sr 同位素来源更符合砂岩风化特征,这也与研究区实际地层岩石学特征是一致的。将地层水投影到锶同位素组成与 Sr 含量及 TDS 分布图(图6),发现地层水具有低 TDS、高 Sr 含量和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  特征。基于以上数据和认识,地层水这种低 TDS,高 Br、Sr 含量和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值的特征,说明了地层水 Ca 的富集主要与砂岩储层成岩自生矿物的溶解有关,并非由海相碳酸盐岩的溶解所致;在深部水岩相互作用下, Sr 离子以类质同象的方式代替 Ca 离子并且获取了有机质中的 Br,同时使得 Br 更加富集。

## 5 结论

本文以川西坳陷新场气田须二气藏地层水为研究对象,应用水化学、锶同位素等分析手段进行了研

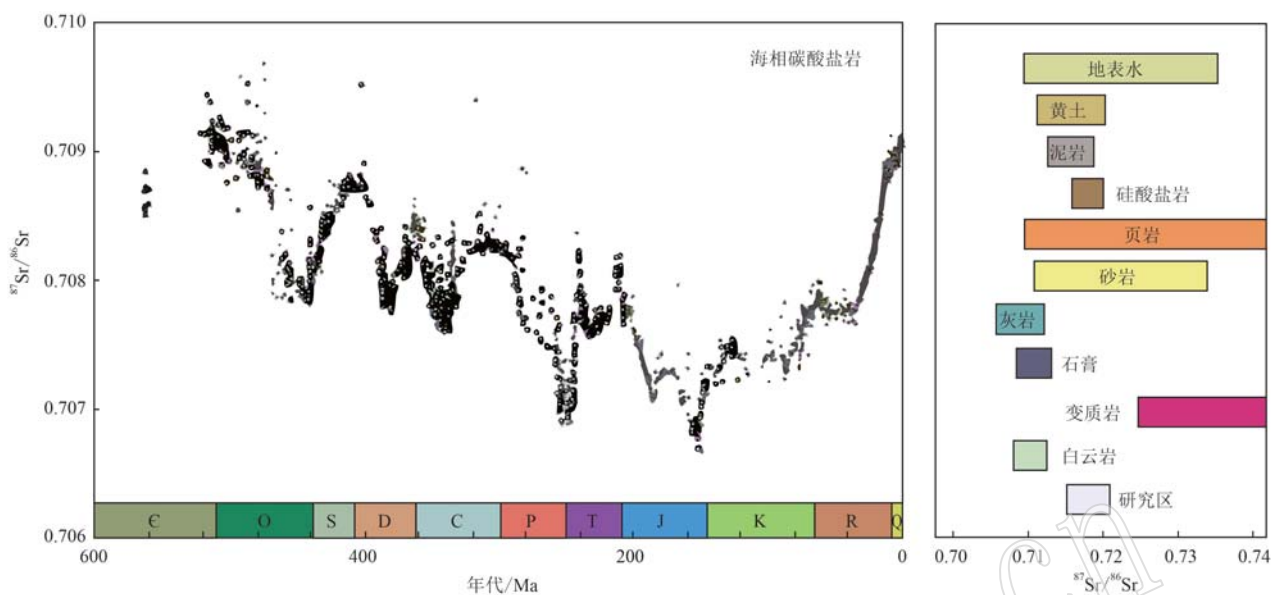


图 5 天然地质环境样品和研究区锶同位素组成(据高旭波等, 2020)

Fig. 5 Strontium isotope composition in samples from natural geological settings and study area(modified by Gao Xubo *et al.*, 2020)

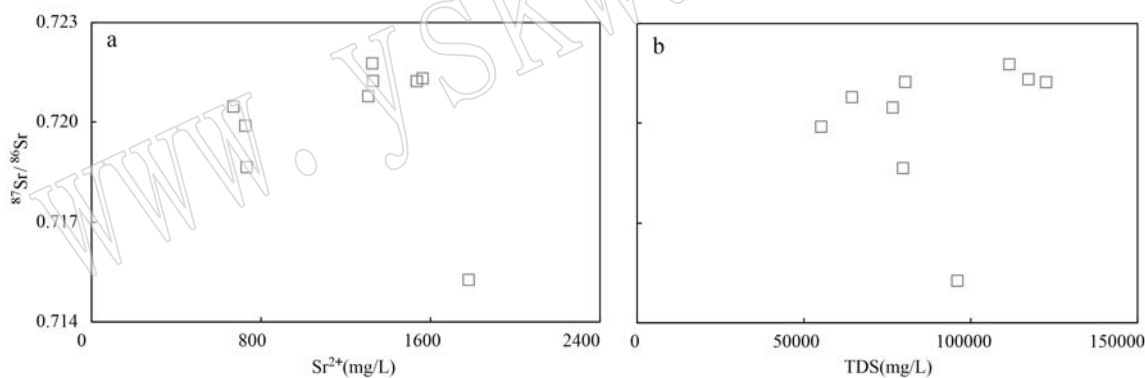


图 6 川西须二气藏地层水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\text{Sr}^{2+}$ 含量分布图(a)和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -TDS含量分布图(b)

Fig. 6 Plots of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\text{Sr}^{2+}$  (a) and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -TDS (b) of Xu2 formation water in Western Sichuan

究,获得了以下认识:

(1) 须二气藏地层水溶解性总固体(TDS)相对较低,其含量在 55 166.00~122 547.41 mg/L 之间,水型均为  $\text{CaCl}_2$  型; $\text{Br}^-$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  的含量分布范围分别为 642.00~1 711.00 mg/L 和 670.00~1 780.00 mg/L,平均值分别为 1 164.74 mg/L 和 1 218.33 mg/L。 $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{Br}^-$  含量在研究区的分布规律高度相似,证明两个元素之间可能经历过类似的水岩相互作用,指示二者具有相似的物质来源。

(2) 研究区地层水的  $\text{Na}_{\text{deficit}}$  和  $\text{Ca}_{\text{excess}}$  关系图表现出Ca富集和Na亏损的特征,可能与砂岩储层成

岩自生矿物的溶解和钙长石的钠长石化有关。沉积物有机质作用和深部水岩相互作用是导致研究区富Br的主要原因。

(3) 研究区地层水具有低TDS,高 $\text{Br}^-$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 含量和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的特征, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值范围为 0.715 27~0.721 77,表明研究区内Sr同位素非来源于海相碳酸盐岩,更符合砂岩风化特征。基于以上数据和认识,认为地层水Ca的富集主要与砂岩储层成岩自生矿物的溶解有关,而非海相碳酸盐岩的溶解所致;在深部水岩相互作用下,Sr以类质同象的方式代替Ca离子并且获得了有机质中的Br,同时使得Br更加富集。



## References

- Carpenter A B. 1978. Origin and chemical evolution of brines in sedimentary basins[J]. *Okla. Geol. Surv. Circ.*, 79: 60~77.
- Chen Dongxia, Pang Xiongqi, Li Lintao, *et al.* 2010. Gas water distribution characteristics and genetic mechanism of the second sector of the upper Triassic Xujiahe Formation in the middle of the Western Sichuan Depression[J]. *Geoscience*, 24(6): 117~125 (in Chinese with English abstract).
- Chen Hongde, Liu Lei, Lin Liangbiao, *et al.* 2021. Depositional responses of Xujiahe Formation to the uplifting of Longmenshan during the Late Triassic, Western Sichuan Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 801~815 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuhua. 1983. Sequence of salt separation and regularity of some trace elements distribution during isothermal evaporation (25°C) of the Huanghai sea water[J]. *Acta Geologica Sinica*, 57(4): 379~390 (in Chinese with English abstract).
- Davisson L M and Criss R E. 1996. Na-Ca-Cl relations in basinal fluids [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 20(4): 2743~2752.
- Deng Daping. 2015. Chemical characteristics of Triassic-Jurassic formation water and relationship of it to hydrocarbon preservation in the west of Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 20(1): 62~70 (in Chinese with English abstract).
- Deng Yulin, Lang Xinghai, Cui Zhiwei, *et al.* 2018. A study of the claystone around the Permian-Triassic boundary along the Cilinbao section at Majiaoba, Jiangyou, Sichuan Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(3): 417~433 (in Chinese with English abstract).
- Duan Yongming, Zhang Yan, Liu Chengchuan, *et al.* 2016. Practice and understanding of tight and gas reservoir development in western Sichuan, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 27(7): 1352~1359 (in Chinese with English abstract).
- Edmunds W M. 1996. Bromine geochemistry of British ground waters [J]. *Mineralogical Magazine*, 60: 275~284.
- Fan Q S, Lowenstein T K, Wei H C, *et al.* 2018. Sr isotope and major ion compositional evidence for formation of Qarhan Salt Lake, western China [J]. *Chemical Geology*, 497: 128~145.
- Gao Xubo, Xiang Xuanli, Hou Baojun, *et al.* 2020. Application of hydrochemistry coupled with stable isotopes in the study of karst water hydrogeology [J]. *Carsologica Sinica*, 39(3): 287~298 (in Chinese with English abstract).
- Gong Yajun, Shen Zhongmin, Liu Sibing, *et al.* 2010. Geochemical characteristics of formation water in the Xujiahe Formation in the Xinchang area, West Sichuan Depression [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 30(1): 72~74 (in Chinese with English abstract).
- Kang Baoping, Huang Xiaoyan, Guo Shuping, *et al.* 2018. Origin, migration, and accumulation evolution of reservoir water in the gas field with Xu 2 gas reservoir, western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 39(2): 309~317 (in Chinese with English abstract).
- Kong Weigang, Wang Denghong and Liu Xifang. 2021. Bromine—A key resource for change [J]. *Scientific and Cultural Popularization of Natural*, (2): 22~25 (in Chinese).
- Li Chen, Zhou You, Lang Xinghai, *et al.* 2023. Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of sedimentary rocks near the Early-Middle Triassic boundary on the northwest margin of the Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 42(2): 220~236 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaji, Chen Lan, Liu Ye, *et al.* 2015. Reservoir-forming mechanisms of Xujiahe 2 gas reservoir, Xinchang gas field [J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 38(4): 37~40, 11 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinshan, Ran Fei and Yuan Meixiang. 2012. Longitudinal and lateral variation characteristics of gas and formation water of Xujiahe in the Western Depression [J]. *China Petroleum and Chemical Standard & Quality*, 32(2): 160~162 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhongping. 2014. Fracture Characteristics, Identification and Evaluation of the Distribution for Deep Tight Sandstone Gas pool—An case from the Second Member of Xujiahe Formation in Xinchang Gas Field [D]. Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Liu Chengchuan, Liu Liping, Wang Qiyang, *et al.* 2020. The multiple control factors of complex gas and water distribution in the 4th member of Loukoupo Formation in western Sichuan, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 47(2): 159~168 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zhengyuan, Sun Donghua, Li Huaji, *et al.* 2015. Formation water desalination caused by condensate water of gas reservoirs: A case study of the 2th member of Xujiahe formation in the Xinchang gas field, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 35(7): 60~65 (in Chinese with English abstract).
- Shan J J, Wang J P, Shan F S, *et al.* 2020. Origin and circulation of saline springs in the Kuqa Basin of the Tarim Basin, Northwest China [J]. *Journal of Arid Land*, 12: 331~348.
- Shang Changjian. 2013. Geofluid Characteristics and Hydrocarbon Accumulation of Xujiahe Formation Reservoirs in the Middle of Western Si-



- chuan Depression [D]. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese).
- Shang Changjian, Ou Guangxi, Zhu Zhenhong, *et al.* 2015. Geochemical characteristics and its significance of condensate water in gas reservoirs of Xujiahe Formation in the middle of Westetn Sichuan Depression[J]. Uranium Geology, 31(4): 453~458 (in Chinese with English abstract).
- Shang Xiaofei, Li Meng, Liu Junlong, *et al.* 2022. Source-sink system based sand body distribution prediction and 3D geological modeling: A case study of the 2nd Member of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 42(1): 62~72 (in Chinese with English abstract).
- Shen Zhongmin, Gong Yajun, Liu Sibing, *et al.* 2010. A discussion on genesis of the upper Triassic Xujiahe Formation water in Xinchang area, Western Sichuan Depression[J]. Geological Review, 56(1): 82~88 (in Chinese with English abstract).
- Shen Zhongmin, Liu Sibing, Lü Zhengxiang, *et al.* 2011. Vertical geochemical characteristics of continental formation water and its water-rock interaction in the middle area of western Sichuan depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 29(3): 495~502 (in Chinese with English abstract).
- Shi Hongliang, Yang Keming and Wang Tong. 2016. Formation-water characteristics and the control Factor of genetic of the upper Triassic Xujiahe Formation in the Western Sichuan Depression[J]. Science Technology and Engineering, 16(29): 59~67 (in Chinese with English abstract).
- Tan H B, Liu Z H, Rao W B, *et al.* 2017. Understanding recharge in soil-groundwater systems in high loess hills on the Loess Plateau using isotopic data[J]. Cetena, 156: 18~29.
- Wang Chunlian, Liu Lihong, Li Qiang, *et al.* 2020. Petrogeochemical characteristics and genetic analysis of the source area of brine type lithium-potassium ore sources area in Jitai basin of Jiangxi Province [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 39(1): 65~84 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiaochu. 2018. Research on Microscopic Pore Structures of Tight Gas Sandstone Reservoirs and its Controlling Effect to Gas-water Distribution in the Western Sichuan Depression[D]. China University of Petroleum (Beijing) (in Chinese).
- Wang Shan. 2003. Hydrochemical field and zonation of the Upper Triassic gas field water in the West Sichuan Depression[J]. Acta Geoscientica Sinica, 24(1): 67~72 (in Chinese with English abstract).
- Wells C M and Price J S. 2015. A hydrologic assessment of a saline-spring fen in the Athabasca oil sands region, Alberta, Canada-A potential analogue for oil sands reclamation[J]. Hydrological Processes, 29(20): 4 533~4 548.
- Wu Hao, Zheng Li and Ci Jianfa. 2012. Geochemical characteristics of formation water in Xujiahe 2 member, Xinchang gas field[J]. Natural Gas Exploration & Development, 35(4): 41~44, 9 (in Chinese with English abstract).
- Ye Sujuan, Li Rong and Zhang Shihua. 2014. 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, 36(4): 487~494, 510 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Hongyu, He Qing, Zeng Fanglü, *et al.* 2023. Geochemical characteristics and geological implications of mudstones and sandstones at the top of the Upper Permian Xuanwei Formation on the weatern margin of Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 42(1): 83~103 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinping, Deng Xiuqin, Li Shixiang, *et al.* 2021. Characteristics of formation water and its geological significance of lower combination of Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 33(1): 109~120 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xun. 2013. Basic characteristics and resource classification of subsurface brines in deep-seated aquifers[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 40(5): 4~10 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhengjie, Yang Zhengzhou, Zhang Xiong, *et al.* 2021. Metallogenic conditions and target prediction of potash deposits in the Triassic Jialingjiang Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 40(1): 39~48 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈冬霞, 庞雄奇, 李林涛等. 2010. 川西坳陷中段上三叠统须二段气水分布特征及成因机理[J]. 现代地质, 24(6): 1 117~1 125.
- 陈洪德, 刘 磊, 林良彪, 等. 2021. 川西坳陷西部龙门山隆升时期上三叠统须家河组沉积响应[J]. 石油与天然气地质, 42(4): 801~815.
- 陈郁华. 1983. 黄海水 25℃ 恒温蒸发时的析盐序列及某些微量元素的分布规律[J]. 地质学报, 57(4): 379~390.
- 邓大平. 2015. 四川盆地西部三叠系-侏罗系地层水化学特征与油气保存关系[J]. 海相油气地质, 20(1): 62~70.
- 邓煜霖, 郎兴海, 崔志伟, 等. 2018. 四川江油马角坝刺林包剖面二叠-三叠系间粘土岩研究[J]. 岩石矿物学杂志, 37(3): 417~433.

- 段永明, 张岩, 刘成川, 等. 2016. 川西致密砂岩气藏开发实践与认识[J]. 天然气地球科学, 27(7): 1352~1359.
- 高旭波, 向绚丽, 侯保俊, 等. 2020. 水化学-稳定同位素技术在岩溶水文地质研究中的应用[J]. 中国岩溶, 39(5): 629~636.
- 宫亚军, 沈忠民, 刘四兵, 等. 2010. 川西坳陷新场地区须家河组地层水的地化特征研究[J]. 四川地质学报, 30(1): 72~74.
- 康保平, 黄小燕, 郭淑萍, 等. 2018. 川西坳陷须二气藏气田水成因、运移及其成藏演化[J]. 石油与天然气地质, 39(2): 309~317.
- 孔维刚, 王登红, 刘喜方. 2021. 溴-变局之关键资源[J]. 自然资源科普与文化, 27(2): 22~25.
- 李宸, 周游, 郎兴海, 等. 2023. 四川盆地西北缘早-中三叠世界线附近沉积岩地球化学特征及古环境意义[J]. 岩石矿物学杂志, 42(2): 220~236.
- 黎华继, 陈兰, 刘叶, 等. 2015. 新场气田须二气藏成藏机理深化研究[J]. 天然气勘探与开发, 38(4): 37~40, 11.
- 李进山, 冉飞, 原梅香. 2012. 川西深层须家河组气水纵向向变化特征浅析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 32(2): 160~162.
- 李忠平. 2014. 深层致密砂岩气藏裂缝特征描述、识别及分布评价[D]. 成都理工大学.
- 刘成川, 刘莉萍, 王启颖, 等. 2020. 川西地区雷口坡组第四段复杂气水分布多重控制因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 47(2): 159~168.
- 陆正元, 孙冬华, 黎华继, 等. 2015. 气藏凝析水引起的地层水矿化度淡化问题——以四川盆地新场气田须二段气藏为例[J]. 天然气工业, 35(7): 60~65.
- 尚长健. 2013. 川西坳陷中段须家河组储层流体特征与天然气成藏[D]. 杭州: 浙江大学.
- 尚长健, 欧光习, 朱振宏, 等. 2015. 川西坳陷中段须家河组天然气藏凝析水地球化学特征及其意义[J]. 铀矿地质, 31(4): 453~458.
- 商晓飞, 李蒙, 刘君龙, 等. 2022. 基于源-汇系统的砂体分布预测与三维地质建模——以四川盆地川西坳陷新场构造带须二段为例[J]. 天然气工业, 42(1): 62~72.
- 沈忠民, 宫亚军, 刘四兵, 等. 2010. 川西坳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, 56(1): 82~88.
- 沈忠民, 刘四兵, 吕正祥, 等. 2011. 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, 29(3): 495~502.
- 史洪亮, 杨克明, 王同. 2016. 川西坳陷须五段地层水特征及其产出控制因素[J]. 科学技术与工程, 16(29): 59~67.
- 王春连, 刘丽红, 李强, 等. 2020. 江西吉泰盆地卤水型锂钾矿物源区岩石地球化学特征及成因分析[J]. 岩石矿物学杂志, 39(1): 65~84.
- 王翹楚. 2018. 川西致密砂岩气藏微观孔隙结构对气水分布的控制作用[D]. 中国石油大学(北京).
- 汪珊. 2003. 论川西坳陷上三叠统气田水化学场及其分带[J]. 地球学报, 24(1): 67~72.
- 吴浩, 郑丽, 慈建发. 2012. 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, 35(4): 41~44+9.
- 叶素娟, 李嵘, 张世华. 2014. 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, 36(4): 487~494, 510.
- 詹宏宇, 何青, 曾方倡, 等. 2023. 四川盆地西缘上二叠统宣威组顶部泥岩、砂岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 42(1): 83~103.
- 周新平, 邓秀芹, 李士祥等. 2021. 鄂尔多斯盆地延长组下组合地层水特征及其油气地质意义[J]. 岩性油气藏, 33(1): 109~120.
- 周训. 2013. 深层地下卤水的基本特征与资源量分类[J]. 水文地质工程地质, 40(5): 4~10.
- 朱正杰, 杨郑州, 张雄, 等. 2021. 四川盆地东部三叠系嘉陵江组海相钾盐成矿分析及靶区预测[J]. 岩石矿物学杂志, 40(1): 39~48.