

· 战略性非金属矿产 ·

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2024.0105

致密砂岩气藏地层水水化学特征及其地质意义

——以川西坳陷新场气田为例

山俊杰^{1,2}, 黄仕林¹, 毕有益¹, 邓美洲¹, 严焕榕¹, 衡勇¹, 郑艳³

(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: 四川盆地侏罗系沙溪庙组及三叠系须家河组作为陆上致密气资源增储上产重点的接替区, 保有很大的难动用储量, 具有较大的勘探开发潜力。然而随着深入的滚动勘探开发, 中浅层沙溪庙组气藏和深层须家河组气藏气井产水已严重制约了气井产能, 部分气井甚至因水淹而停产。本文对研究区不同层位 34 口气井的地层水进行了主量、微量元素和气藏成藏演化特征分析, 结果显示沙溪庙组气藏和须家河组气藏经历了先成藏后致密再改造的成藏演化过程, 断层的沟通导致深层须家河组地层水的大量上涌, 使断层附近高渗的砂体被充注, 在水动力等驱动作用下, 天然气以游离相或水溶相沿断裂带进行垂向高效运移。垂向上大部分离子含量都随着埋深逐渐增大, 深层须家河组地层水气藏具有较好的油气保存条件, 并且经历了更为复杂的水岩相互作用, 不同程度地使 K、Ba、Sr、Li、Rb 等元素更加富集。

关键词: 新场气田; 致密砂岩; 沙溪庙组; 须家河组; 地层水; 水化学

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)01-0063-11

Hydrochemical characteristics of formation water in tight sandstone gas reservoirs and their geological significance: A case study of the Xinchang Gas Field in Western Sichuan Depression

SHAN Jun-jie^{1,2}, HUANG Shi-lin¹, BI You-yi¹, DENG Mei-zhou¹, YAN Huan-rong¹, HENG Yong¹ and ZHENG Yan³

(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: The Jurassic Shaximiao Formation and Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan Basin serve as key replacement areas for increased storage and production of onshore tight gas resources. They possess substantial reserves that are challenging to exploit and hold significant exploration and development potential. However, extensive and ongoing exploratory drilling and development have led to significant water production from wells in both the shallow Shaximiao Formation and the deeper Xujiahe Formation gas reservoirs. This water production has severely constrained the gas production capacity of these wells, with some wells even ceasing production due to water flooding.

收稿日期: 2023-08-21; 接受日期: 2023-11-27; 编辑: 尹淑苹

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, 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: Junshan@163.com;

通讯作者: 黄仕林(1985-), 男, 高级工程师, 从事油气藏开发, E-mail: huangshilin_xnyq@sinopec.com。

网络首发时间: 2023-12-11; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20231207.1620.002.html>

This study conducted an analysis of the formation water from 34 gas wells at various stratigraphic levels in the study area, focusing on major and trace elements, as well as the evolutionary characteristics of the reservoirs. The results indicate that both the Shaximiao Formation and the Xujiahe Formation gas reservoirs underwent an evolutionary process of initial formation, subsequent compaction, and subsequent modification. Fault connectivity resulted in significant upwelling of formation water from the deep Xujiahe Formation, leading to substantial infiltration into highly permeable sand bodies adjacent to faults. Under the influence of hydrodynamics and other driving forces, natural gas efficiently migrated vertically along fault zones in either a free or dissolved phase. Vertically, the majority of ion concentrations increased progressively with depth. The deep Xujiahe Formation gas reservoirs exhibit favorable conditions for oil and gas preservation and have undergone more complex water-rock interactions, causing varying degrees of enrichment in elements such as K, Ba, Sr, Li, and Rb.

Key words: Xinchang Gas Field; tight sandstone; Shaximiao Formation; Xujiahe Formation; formation water; hydrochemistry

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

致密砂岩气作为目前天然气开发规模最大的非常规天然气资源之一,不仅在保证能源供给中扮演着越来越重要的角色,也促使更多国家揭开了致密气勘探开发的序幕。目前国内外关于致密砂岩气藏的定义没有形成统一的分类评价标准,美国在 1978 年将平均气相渗透率 ≤ 0.1 mD 的含气储层定义为致密气藏,以此用于获得政府税收抵免;我国最新的《致密砂岩气地质评价方法,GB/T30501-2014》国家标准将覆压基质渗透率 ≤ 0.1 mD 的砂岩储层划归为致密气藏,因此该类型气藏通常需要通过大规模地层压裂或者储层改造等技术措施下获得工业天然气产量(张杰, 2021)。

全球致密气资源量丰富且广泛分布,目前已发现致密气盆地大约有 70 个,资源量约 210×10^{12} m³ (Holditch, 2006; 邹才能等, 2015)。我国的致密气分布极不均衡,主要分布在鄂尔多斯、四川、塔里木、松辽等多个沉积盆地。据统计,我国陆上致密气总资源量为 21.85×10^{12} m³,其中仅鄂尔多斯盆地上古生界资源量占总资源量的 60% 以上(贾爱林等, 2022)。四川盆地(中国石化探区)侏罗系沙溪庙组及三叠系须家河组作为陆上致密气资源增储上产重点的接替区,保有大量的难动用储量,具有较大的勘探开发潜力(郑和荣等, 2021; 郭旭升等, 2021),但该探区由于富集高产规律不清、气水关系复杂,仅实现了中浅层侏罗系沙溪庙组气藏效益开发。而属于深层特低孔致密砂岩的须家河组气藏,在国内外暂无可借鉴的成熟技术,面临着难动用储量规模效益开发的巨大挑战。

前人持续深化了研究区致密气富集高产规律

(段永明等, 2019; 郭彤楼等, 2023)、裂缝体精细刻画(李王鹏等, 2021; 刘志远等, 2021; 刘君龙等, 2023)、气水分布主控因素(熊亮等, 2022; 衡勇等, 2022)等认识,打开了难动用储量效益开发的新局面。然而随着深入的滚动勘探开发,中浅层沙溪庙组气藏和深层须家河组气藏气井产水已严重制约了气井产能,研究区高低部均有气井产地层水,且气井到达中后期阶段普遍产水,部分井甚至因水淹而停产,已严重制约了该类气藏的效益开发。基于致密砂岩储层中地层水研究的重要性,本文整理了新场气田沙溪庙组气藏和须家河组气藏部分钻井地层水水化学数据,系统分析了研究区中浅层地层水与深层地层水之间的演化关系、地层水与油气保存特征、地层水与气藏成藏演化特征,旨在为川西坳陷致密砂岩气资源效益开发及长期稳产提供更多实证数据。

1 气藏地质概况

四川盆地是在上扬子克拉通基础上发展起来的多旋回叠合盆地(邓煜霖等, 2018; 詹宏宇等, 2023; 李宸等, 2023),油气资源较为丰富,作为我国陆上重要的含油气盆地之一,有着 6 亿年的漫长地质历史,总面积约为 18×10^4 km² (张道伟, 2021)。川西坳陷位于盆地西部(图 1a),是晚三叠世以来形成的前陆盆地(周孝鑫等, 2015),先后经历了印支运动、燕山运动、喜马拉雅运动多期构造运动而形成现在的基本构造形态(张国印, 2019)。新场气田位于新场北东向构造带上,主要受到了晚侏罗世构造运动和喜马拉雅晚期运动两个阶段的改造而形成的

构造-岩性气藏(楼章华等, 2021)。

川西坳陷紧邻龙门山前缘,晚三叠世至始新世陆相碎屑岩沉积厚度巨大,主要以河流、冲积扇、三角洲沉积为主。研究区内的地层主要为上三叠统马鞍塘组、小塘子组、须家河组,下侏罗统白田坝组,中侏罗统千佛崖组、上沙溪庙组和下沙溪庙组,以及上侏罗统遂宁组和蓬莱镇组等(图1b)。生烃能力强且烃源岩较为发育的层段为马鞍塘组、小塘子组、须家河组三段和须家河组五段,但其他层段内少量薄

煤层或炭质泥岩也可贡献部分烃源。须家河组二段、须家河组四段和上沙溪庙组以砂岩储集层为主。须家河组作为盆地内陆相地层天然气产量最为丰富的储层,具有埋深大(平均埋深大于4 900 m)、特低孔、特低渗(平均孔隙度3.7%,平均渗透率0.07 mD)的特征,为典型致密储层;而沙溪庙组气藏具有埋深中等(平均埋深2 450 m)、低孔、低渗(平均孔隙度9.7%,平均渗透率0.16 mD)的特征,为致密储层(刘成川, 2007; 段永明等, 2016)。

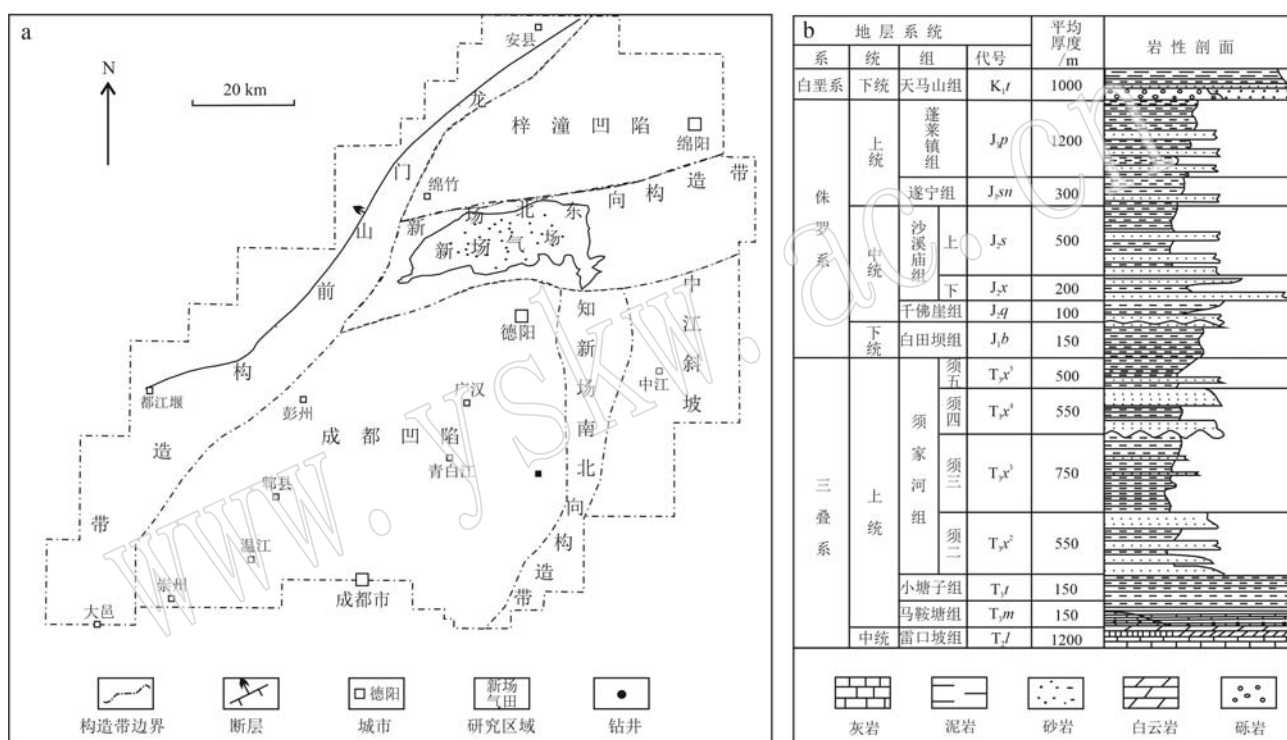


图1 川西坳陷构造单元分布及研究区示意图(a)和地层综合柱状图(b)(据陈洪德等, 2021 修改)

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

2 样品采集与测试

研究对象为川西坳陷新场气田中浅层沙溪庙组气藏和深层须家河组气藏,本文收集并整理了新场气田气井返排率较高的34口气井189组地层水水化学数据,其中沙溪庙组气藏23口气井,须家河组气藏11口气井(表1)。

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水样的常量元素离子(K^+ 、 Na^+ 、

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-)和微量元素离子(Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Li^+ 、 Rb^+)的测试。 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用ICP7400电感耦合等离子发射光谱进行测定(误差<2%); Cl^- 、 SO_4^{2-} 采用ICS2000离子色谱仪进行测定(误差0.2%~0.3%); HCO_3^- 采用容量法(盐酸滴定)(误差0.2%~0.3%); Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Li^+ 、 Rb^+ 采用Agilent 7900 ICP-MS电感耦合等离子体质谱仪进行测定(误差<2%);常量离子和微量元素分析测定均遵循石油天然气行业标准的方法(SY/T5523-2016)。

表 1 研究区地层水样品的水化学组成特征

Table 1 The hydrochemical compositions of formation water in the study area

地层(井数)		离子含量/mg · L ⁻¹											
		TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ba ²⁺	Sr ²⁺	Li ⁺	Rb ⁺
沙溪庙组 (n=23)	最小值	15 332.53	21.00	3 750.00	515.00	25.00	9 506.79	10.00	10.00	42.60	79.04	-	-
	最大值	41 632.50	1 065.80	13 386.00	3 422.00	258.20	24 858.50	1 001.20	627.25	161.50	138.63	-	-
	平均值	19 095.71	199.60	6 006.65	928.15	79.50	11 489.76	209.54	422.53	104.37	72.56	-	-
须家河组 (n=11)	最小值	53 015.80	491.35	18 038.00	1 516.00	178.70	31 582.20	10.00	10.00	245.51	231.00	13.59	1.23
	最大值	152 718.60	1 276.00	47 925.00	7 930.00	995.50	94 534.10	172.00	470.59	1 479.69	1 563.00	40.12	4.98
	平均值	76 834.25	953.45	28 736.63	3 023.18	297.65	51 276.48	23.69	195.59	883.75	961.29	24.06	2.71

注:“-”代表未测得。

3 水化学组成结果

3.1 沙溪庙组气藏

剔除凝析水(矿化度小于 15 000 mg/L)、受酸液影响(pH<6.5)、返排率较低(<100%)等地层水数据,选取沙溪庙组气藏 23 口气井 101 组地层水水化学数据。数据显示沙溪庙组气藏地层水矿化度分布在 15 332.53~41 632.50 mg/L 之间,平均值 19 095.71 mg/L,大多数地层水属于咸水级别。阴阳离子以 Cl⁻ 和 Na⁺ 为主,含量分别为 9 506.79~24 858.50 mg/L 和 3 750.00~13 386.00 mg/L,平均值分别为 6 006.65 mg/L 和 11 489.76 mg/L,按苏林分类法,水型以 CaCl₂ 为主。微量元素 Ba²⁺、Sr²⁺ 离子含量分布范围分别为 42.60~161.50 mg/L 和 79.04~138.63 mg/L,平均值分别为 104.37 mg/L 和 72.56 mg/L(表 1)。

3.2 须家河组气藏

须家河组气藏 11 口气井 88 组地层水的矿化度为 53 015.80~152 718.60 mg/L,平均值 76 834.25 mg/L,达到卤水级别,以 CaCl₂ 水型为主,阴阳离子呈现出 Cl⁻>HCO₃⁻>SO₄²⁻ 和 Na⁺>Ca²⁺>K⁺>Mg²⁺ 的特征。Ba²⁺、Sr²⁺、Li⁺、Rb⁺ 含量分别为 245.51~1 479.69 mg/L、231.00~1 563.00 mg/L、13.59~40.12 mg/L 和 1.23~4.98 mg/L,平均值分别为 883.75、961.29、24.06 和 2.71 mg/L,具有 Sr²⁺>Ba²⁺>Li⁺>Rb⁺ 的特征(表 1)。

4 讨论

4.1 地层水离子含量特征

离子含量可以反映地层的水文地球化学环境,是判断地层水演化和成因的重要信息载体。由表 1

来看,整体上研究区地层水具有富 Na⁺、Ca²⁺ 和贫 Mg²⁺ 的特征,为 CaCl₂ 型地层水。鉴于须家河组和沙溪庙组是以砂岩储集层为主(图 1),结合已有的报道表明,明显较高的 Na⁺、Ca²⁺ 含量主要与钠长石的溶解和钙长石的钠长石化有关,而较少的 Mg²⁺ 含量与绿泥石化过程中被大量消耗有关(沈忠民等, 2011)。垂向特征上显示,常量元素离子含量除 HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 外,沙溪庙组气藏地层水矿化度和 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻ 离子含量均低于须家河组气藏地层水,符合研究区地层水随着埋深增大离子含量逐渐增大的特征(楼章华等, 2021),体现出了地层水演化方面的差异性,造成该现象的主要原因与成岩过程中须家河组气藏地层水更加强烈的水岩相互作用、钾长石和碳酸盐岩的溶解、阳离子交替吸附作用密切相关(尚长健, 2013; 山俊杰等, 2023)。

微量元素 Ba、Sr 同为碱土金属,具有较为相似的化学性质。垂向特征来看,沙溪庙组气藏地层水 Ba²⁺、Sr²⁺ 含量平均值(分别为 104.37 mg/L 和 72.59 mg/L)远远小于须家河组气藏地层水 Ba²⁺、Sr²⁺ 含量平均值(分别为 883.75 mg/L 和 961.29 mg/L)。而原始水体中 Ba²⁺、Sr²⁺ 含量都非常低,例如青海湖湖水 Ba²⁺、Sr²⁺ 含量分别为 0.02 mg/L 和 0.04 mg/L、海水 Ba²⁺、Sr²⁺ 含量分别为 0.006 mg/L 和 8 mg/L(孙大鹏等, 1995)。虽然蒸发浓缩可以使水体中 Ba、Sr 元素逐渐富集(陈郁华, 1983),但是须家河组气藏地层水如此高的 Ba²⁺、Sr²⁺ 含量更有可能是深部水岩相互作用和蒸发浓缩共同作用的结果(李延飞, 2015)。

值得注意的是,须家河组气藏地层水含有 Li、Rb 等战略性关键矿产资源元素,含量分别为 24.06 mg/L 和 2.71 mg/L,达到综合利用的开采工业指标(樊馥等, 2012),具有潜在的资源开采意义。尽管须家河气藏地层水的 Li⁺ 和 Rb⁺ 含量均低于国内已知的大型沉积盆地,例如湖北江汉盆地(Li⁺ 和 Rb⁺ 含量平均

值分别为 52.0 mg/L 和 60.0 mg/L) (余小灿等, 2022)、江西吉泰盆地 (Li^+ 和 Rb^+ 含量平均值分别为 95.0 mg/L 和 4.5 mg/L) (王春连等, 2020)、柴达木盆地南翼山 (Li^+ 和 Rb^+ 含量平均值分别为 128.0 mg/L 和 29.2 mg/L) (李建森等, 2022), 但其矿化度仅相当于海水浓缩的碳酸盐岩沉积阶段, Li^+ 和 Rb^+ 含量却远超碳酸盐岩沉积阶段的数倍甚至几

十倍(陈郁华, 1983)。从 Li^+ 与 Rb^+ 和 Cl^- 含量的关系图来看(图 2), Li^+ 和 Rb^+ 之间较好的正相关关系表明它们具有同源性, 而 Li^+ 和 Cl^- 含量未呈现较好的正相关关系, 指示须家河组地层水的 Li^+ 和 Rb^+ 含量的富集不完全受控于水体的蒸发浓缩。前人研究中也得出, Li 、 Rb 等资源的富集更多的与深部物质来源有关(王春连等, 2018)。

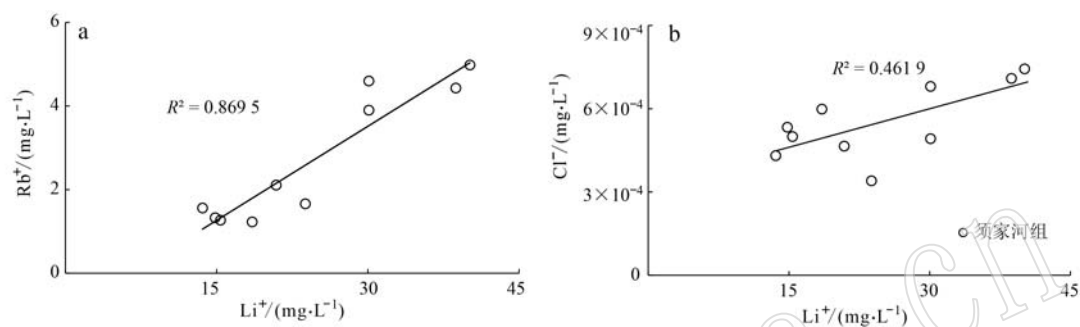


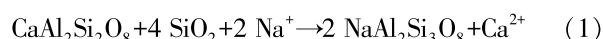
图 2 研究区地层水 Rb^+ - Li^+ 含量(a)和 Cl^- - Li^+ 含量(b)关系图

Fig. 2 Rb^+ - Li^+ plots (a) and Cl^- - Li^+ plots (b) of formation water in study area

4.2 地层水离子系数组合特征

海水蒸发过程中的离子系数呈规律性变化, 因此海水蒸发曲线被广泛应用于研究水的成因和水岩相互作用 (Carpenter, 1978)。通过钾氯系数在黄海海水蒸发曲线上的投点可发现, 须家河组气藏地层水和少部分沙溪庙组气藏地层水明显高于黄海海水蒸发曲线图(3a), 由于未在研究区地层中发现含钾的盐类矿物, 说明这部分地层水 K^+ 的来源主要为储层自生成岩矿物的溶解; 钠氯系数在黄海海水蒸发曲线上的投点显示(图 3b), 部分位于蒸发曲线上的沙溪庙组气藏地层水和须家河组气藏地层水代表地层水 Na^+ 含量相对较为富集, 造成这一现象的主要原

因与储层中钠长石的溶解有关; 反之位于蒸发曲线下的沙溪庙组气藏地层水和须家河组气藏地层水则代表 Na^+ 含量较为贫化, 这与钙长石的钠长石化有关, 导致大量的 Na^+ 被消耗, 如关系式(1)。这些对比也说明, 部分沙溪庙组气藏地层水和须家河组气藏地层水水化学特征具有一定的相似性。



离子系数对油气的分布与聚集起着一定的指示作用, 脱硫系数 [$n(100\text{SO}_4^{2-})/n(\text{Cl}^-)$]、变质系数 [$n(\text{Cl}^- - \text{Na}^+)/n(\text{Mg}^{2+})$] 是评价油气保存的两个主要指标 (邓太平, 2015)。脱硫系数可以较好地反映地层氧化还原环境, 图4a显示整体上研究区地层水

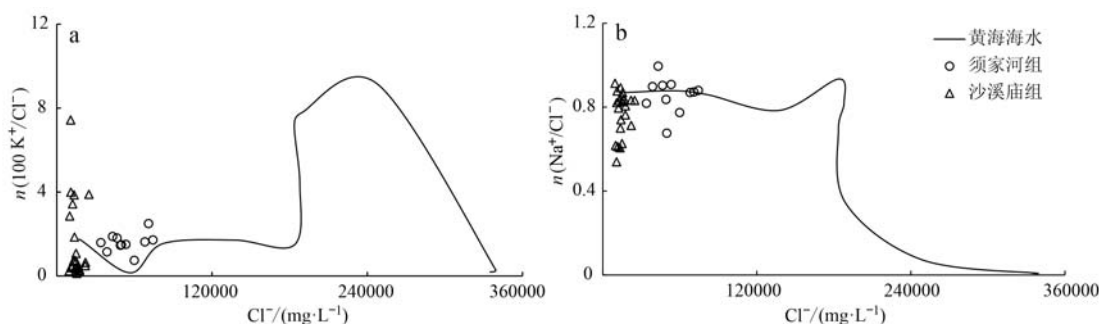


图 3 研究区地层水钾氯系数(a)和钠氯系数(b)与黄海海水蒸发曲线对比图

Fig. 3 The comparisons of $n(100\text{K}^+/\text{Cl}^-)$ - Cl^- (a) and $n(\text{Na}^+/\text{Cl}^-)$ - Cl^- (b) of formation water with the evaporated Huanghai seawater

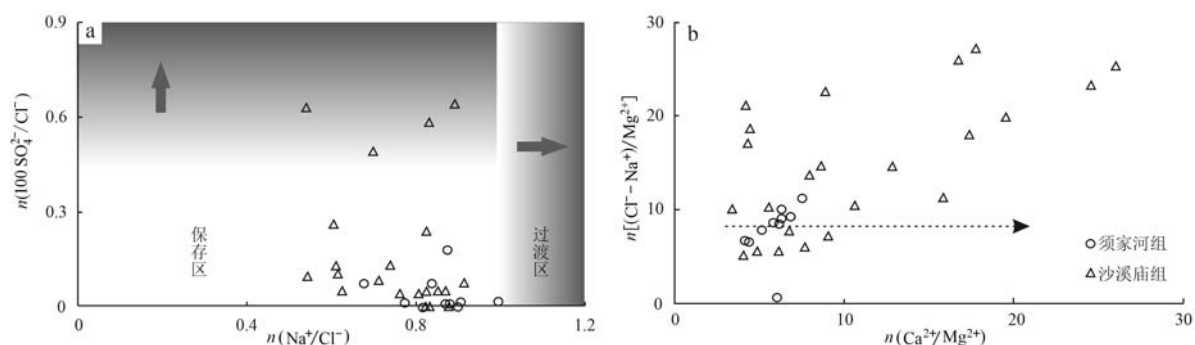


图4 研究区地层水脱硫系数/钠氯系数(a)和变质系数/钙镁系数(b)组合比值关系图

Fig. 4 The comparisons of $n(100 \text{ SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-) - n(\text{Na}^+/\text{Cl}^-)$ ratios (a) and $n[(\text{Cl}^- - \text{Na}^+)/\text{Mg}^{2+}] - n(\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+})$ ratios (b) of formation water in study area

脱硫系数和钠氯系数均 <1 ,且都落在保存区内,说明地层环境还原性较强,利于油气保存。而变质系数可以说明离子交替和水岩相互作用的强度,水岩相互作用时间越长, Ca^{2+} 与 Na^+ 交替越彻底。钙镁系数 >3 和变质系数 >0 的特征总体反映了研究区地层水变质程度较高。须家河组气藏具有更低的脱硫系数(<0.2),说明油气保存条件优于沙溪庙组气藏;另外,须家河组一口单井出现变质系数较低的现象,表明深层较高矿化度的地层水可能会出现较弱的水岩相互作用(张林等, 2021)(图4b)。

4.3 地层水与气藏成藏演化特征

新场气田陆相地层经历过多期构造运动,最具影响力的包括喜马拉雅期、燕山期和印支末期构造运动(李王鹏等, 2021),直接导致层系间流体混合作用强烈及天然气成藏地质背景复杂。进而致使学者们对于储层致密化与气藏成藏关系也存在着较大分歧,主流观点根据储层的致密化时间和有机烃的充注时间划分为:①先成藏后致密型,气水关系一直为顺置状态,伴随着储层致密气藏逐渐开始贫化,直至干层的形成(图5a)(曹烈等, 2005);②先致密

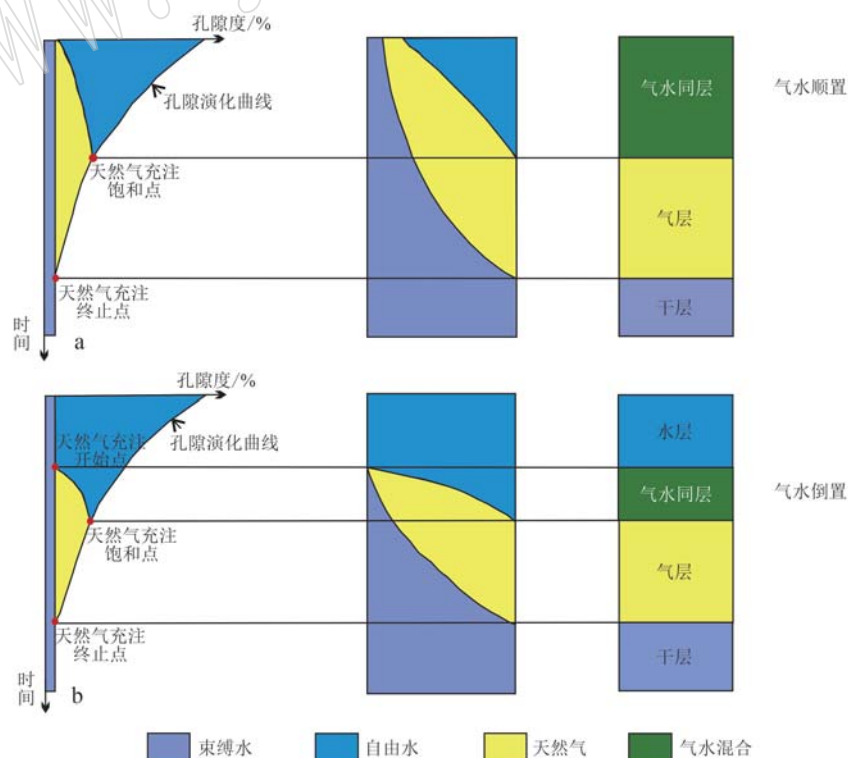


图5 孔隙演化过程中孔隙流体组成示意图(据尚长健, 2013 修改)

Fig. 5 Sketch map of the pore fluid composition in pore evolution process (modified after Shang Changjian, 2013)

后成藏型：前期缺少天然气充注，储层为水层。进一步储层致密化后，气藏驱替部分储层中的水，形成气水同层。随着天然气持续充注，储层中孔隙主要为束缚水和天然气共存，当孔隙接近为零，天然气无法充注，形成干层（图 5b）（张金川等，2008）。

结合前人对新场气田气藏成藏演化史的研究成果（陈冬霞等，2016；康保平等，2018），认为须家河组气藏印支晚期开始生烃，直至燕山中期，生烃达到高峰（图 6），由于多期压实作用和胶结作用的共同影响，储层在燕山中期变为致密；而中浅层沙溪庙组是典型的深源浅聚的次生致密砂岩气藏，气源来自于须家河组（叶素娟等，2014；张庄，2016），生烃高峰在燕山晚期—喜马拉雅期，储层致密化时间在燕山晚期；进入喜马拉雅期，规模较大、延伸距离较长的南北走向断层对须家河组气藏和沙溪庙组气藏

进行了沟通和改造（冯英等，2021），形成了先成藏后致密再改造的气藏成藏演化特征（图 6）。断层的沟通也导致深层须家河组气藏地层水的大量上涌，使断层附近高渗的砂体被充注，在水动力等驱动作用下，天然气以游离相或水溶相沿断裂带进行垂向高效运移（周孝鑫等，2015；郭彤楼等，2023）。因此，上述数据显示了新场气田气藏成藏演化过程中断层对地层水的沟通和输导发挥了关键的作用，致使部分沙溪庙组气藏地层水与须家河组气藏地层水具有相似的水化学特征，沙溪庙组气藏较高矿化度的地层水应该是与深层须家河组气藏地层水的混合所致。随着埋深逐渐增大，储层致密化加剧，深层须家河组气藏得到更好的油气保存条件，并且经历了更为复杂的水岩相互作用，不同程度地使得 K、Ba、Sr、Li、Rb 等元素更加富集。

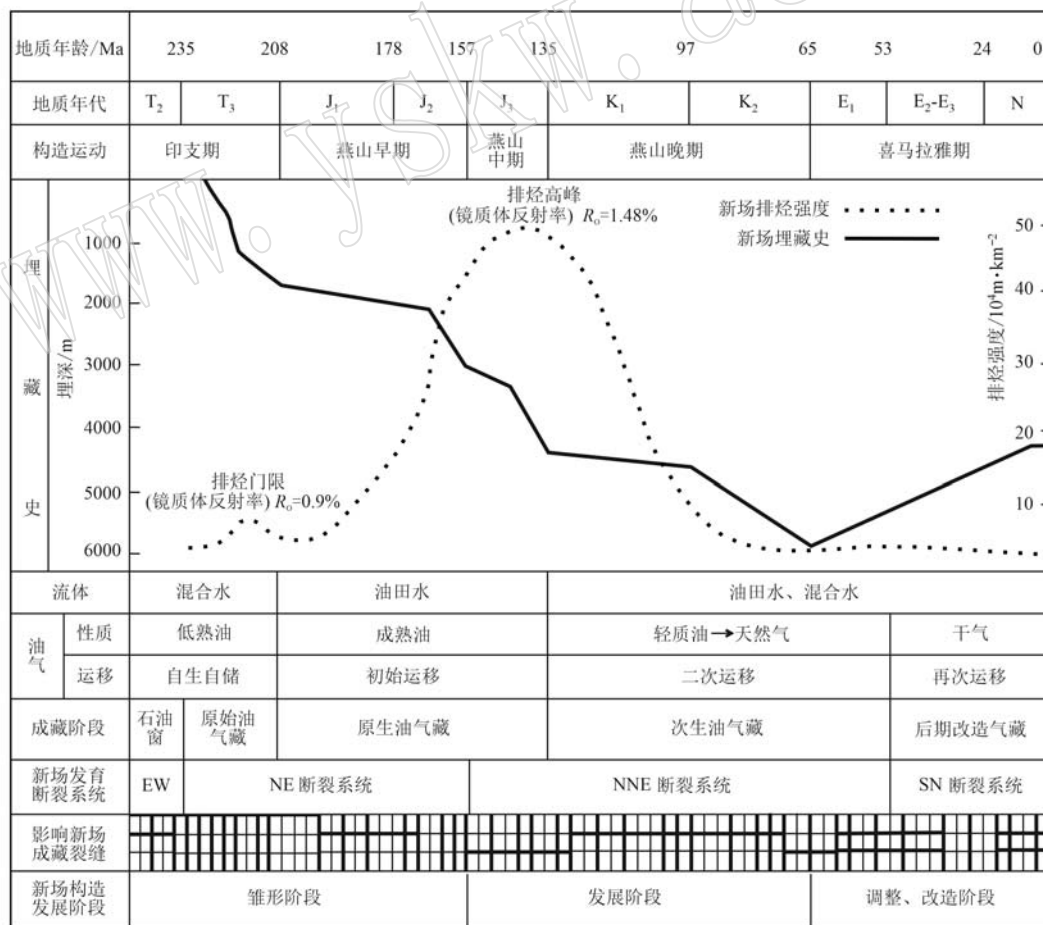


图 6 川西坳陷新场气田气藏成藏演化图(据康保平等, 2018 修改)

Fig. 6 Reservoir formation and evolution of Xinchang gas field in Western Sichuan Depression (modified after Kang Baoping et al., 2018)

5 结论

(1) 新场气田沙溪庙组气藏地层水矿化度为 15.33~41.63 g/L, 平均 19.10 g/L, 大多数地层水属于咸水级别。须家河组气藏地层水矿化度为 53.02~152.72 g/L, 平均 76.83 g/L, 达到卤水级别。垂向特征上显示几乎所有元素离子含量符合地层水随着埋深增大离子含量逐渐增大的特征。须家河组气藏地层水 Li^+ 、 Rb^+ 元素含量平均值分别为 24.06 mg/L 和 2.71 mg/L, 达到综合利用的开采工业指标, 具有潜在的资源开采意义。

(2) 研究区较高钾氯系数的地层水说明 K^+ 的来源主要为储层自生成岩矿物的溶解; 而较高钠氯系数的地层水指示 Na^+ 含量相对较为富集主要与储层中钠长石的溶解有关; 反之较低钠氯系数的地层水则代表 Na^+ 含量较为贫化, 这与钙长石的钠长石化有关, 导致大量的 Na^+ 被消耗。离子系数组合特征显示相比较于沙溪庙组气藏, 须家河组气藏具有较好的油气保存条件。

(3) 新场气田气藏成藏演化过程中断层对地层水的沟通和输导发挥了关键作用, 致使部分沙溪庙组气藏地层水与须家河组气藏地层水具有相似的水化学特征。随着埋深逐渐增大, 储层致密化加剧, 深层须家河组气藏经历了更为复杂的水岩相互作用, 不同程度地使得 K、Ba、Sr、Li、Rb 等元素更加富集。

References

- Cao Lie, An Fengshan and Wang Xin. 2005. Relationship between palaeostructure and gas reservoirs in Xujiahe Formation in western Sichuan depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 26(2): 224~229 (in Chinese with English abstract).
- 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, Yang Keming, *et al.* 2016. Genetic mechanism and formation of superimposed continuous tight sandstone Reservoir in Deep Xujiahe Formation in Western Sichuan Depression[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(6): 1 611~1 623(in Chinese with English abstract).
- Chen Hongde, Liu Lei, Lin Liangbiao, *et al.* 2021. Depositional responses of Xujiahe Formation to the uplifting of Longmengshan 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).
- 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, Liu Chengchuan and Wang Yongfei. 2019. The key technologies for achieving high and stable production in the continental gas fields in the western Sichuan Region[J]. *Natural Gas Industry*, 39(S1): 162~167 (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): 1 352~1 359(in Chinese with English abstract).
- Fan Fu, Zheng Mianping, Zhang Yongsheng, *et al.* 2012. Discovery of oil field water with high Content of Br^- , I^- , Li^+ , K^+ as the indication of finding potash in Jingbian Gas Field[J]. *Journal of Jilin University*, 42(S2): 141~147.
- Feng Ying, Deng Meizhou, Li Yajing, *et al.* 2021. Control effect of faults on hydrocarbon accumulation: A case study of gas reservoir of the second member of Xujiahe Formation, Dongpo area, western Sichuan Basin[J]. *Fault-block Oil Gas Field*, 28(5): 586~591(in Chinese with English abstract).
- Guo Tonglou, Xiong Liang, Ye Sujuan, *et al.* 2023. Theory and practice of unconventional gas exploration in carrier beds: Insight from the breakthrough of new type of shale gas and tight gas in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 50(1): 24~37(in Chinese with English abstract).
- Guo Xusheng, Cai Xunyu, Liu Jinlian, *et al.* 2021. Natural gas exploration progress of Sinopec during the 13th Five-Year Plan and prospect forecast during the 14th Five-Year Plan[J]. *Natural Gas Industry*, 41(8): 12~22(in Chinese with English abstract).
- Heng Yong, Duan Xinguo, Wang Yongfei, *et al.* 2022. Internal structure of distributary channels and body and its effect on gas-water distribu-

- tion in shallow-water delta: A case study of Shaximiao Formation in Zhongjiang Gas Field, Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 49(1): 1~11(in Chinese with English abstract).
- Holditch S A. 2006. Tight gas sands[J]. Journal of Petroleum Technology, 58(6): 86~93.
- Jia Ailin, Wei Yunsheng, Guo Zhi, *et al.* 2022. Development status and prospect of tight sandstone gas in China [J]. Natural Gas Industry, 42(1): 83~92(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 Xu2 gas reservoir, western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 39(2): 309~317(in Chinese with English abstract).
- 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 Jiansen, Li Tingwei, Ma Yunqi, *et al.* 2022. Distribution and origin of brine-type Li-Rb mineralization in the Qaidam Basin, NW-China[J]. Science China Earth Sciences, 65(3): 477~489 (in Chinese with English abstract).
- Li Wangpeng, Liu Zhongqun, Hu Zongquan, *et al.* 2021. Characteristics of and main factors controlling the tight sandstone reservoir fracture in the 2nd member of Xujiahe Formation in Xinjiang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 42(4): 884~897, 1 010(in Chinese with English abstract).
- Li Yanfei. 2015. The Geochemical Characteristics of Formation Water and Preservation Condition of Oil and Gas in Middle Area, Western Sichuan Depression[D]. Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Liu Chengchuan. 2007. Research on Development Adjustment Plan for the Shaximiao Tight Gas Reservoir with Multi-layers in Xinjiang Gas Field[D]. Chengdu University of Technology(in Chinese).
- Liu Junlong, Liu Zhongqun, Liu Zhenfeng, *et al.* 2023. Geological characteristics and models of fault-fold-fracture body in deep tight sandstone of the second member of Upper Triassic Xujiahe formation in Xinjiang structural belt of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration & Development, 50(3): 530~540(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhiyuan, Li Hao, Wu Qingzhao, *et al.* 2021. Characteristics and application effect of logging-based fracture identification in tight sandstones: A case study of the Upper Triassic Xu2 Member in Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 42(4): 981~991(in Chinese with English abstract).
- Lou Zhanghua, Su Yizhe, Zhu Rong, *et al.* 2021. Dynamic chemical characteristics and origin of formation water in the second member of Xujiahe formation, Xinjiang structural belt, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 42(4): 841~851 (in Chinese with English abstract).
- Shan Junjie, Bi Youyi, Deng Meizhou, *et al.* 2023. Hydrochemistry and Sr isotope constraints on the genesis of formation water in the 2th member of Xujiahe formation gas reservoirs in Xinjiang gas field, Western Sichuan Depression, China[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 42(5): 735~744(in Chinese with English abstract).
- Shang Changjian. 2013. Geofluid Characteristics and Hydrocarbon Accumulation of Xujiahe Formation Reservoirs in the Middle of Western Sichuan Depression[D]. Zhejiang University (in Chinese).
- 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).
- Sun Dapeng, Li Bingxiao, Ma Yuhua, *et al.* 1995. An investigation on evaporating experiments for Qinghai Lake water, China [J]. Acta Geologica Sinica, 3(2): 10~19(in Chinese with English abstract).
- Wang Chunlian, Huang Hua, Wang Jiuyi, *et al.* 2018. Geological features and metallogenic model of K and Li-rich Brine ore field in the Jiangling Depression[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 39(1): 65~84(in Chinese with English abstract).
- 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 Geologica Sinica, 92(8): 1 630~1 646(in Chinese with English abstract).
- Xiong Liang and Heng Yong. 2022. Gas and water distribution and main controlling factors of tight sandstone gas reservoir in Shaximiao formation, Zhongjiang[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 44(3): 47~58(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 (in Chinese).

nese with English abstract).

- Yu Xiaocan, Liu Chenglin, Wang Chunlian, *et al.* 2022. Genesis of lithium brine deposits in the Jiangnan Basin and progress in resource exploration: A review [J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 107~123 (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 western margin of Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 42(1): 83~103(in Chinese with English abstract).
- Zhang Daowei. 2021. Development prospect of natural gas industry in the Sichuan Basin in the next decade[J]. *Natural Gas Industry*, 41(8): 34~45(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guoyin. 2019. Recognition and Prediction Methods of High-quality Reservoirs of Tight Sandstones in Shaximiao Formation in Chuanxi Depression[D]. China University of Petroleum(in Chinese).
- Zhang Jie. 2021. Research on Production Mechanism and Main Controlling Factors of Pore Water in Tight Sandstone Gas Reservoir [D]. University of Chinese Academy of Sciences(in Chinese).
- Zhang Jinchuan, Liu Lifang, Tang Xuan, *et al.* 2008. Abnormal pressure in the source-contacting gas reservoir in western Sichuan basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(2): 147~155 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lin, Xu Tonghao, Yang Zhikai, *et al.* 2021. Analysis on hydrochemical characteristics of formation water in Sudong Block[J]. *Unconventional Oil Gas*, 8(5): 27~33(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhuang. 2016. Natural Gas Accumulation and Enrichment Regularity of the Jurassic in West Sichuan Depression[D]. Chengdu University of Technology(in Chinese).
- Zheng Herong, Liu Zhongqun, Xu Shilin, *et al.* 2021. Progress and key research directions of tight gas exploration and development in Xujiache Formation, Sinopec exploration areas, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 42(4): 765~783(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaoxin, Lou Zhanghua, Zhu Rong, *et al.* 2015. Hydrogeology geochemical characteristics of continental formation water in Xinchang gas field, western Sichuan depression and gas migration and accumulation [J]. *Chinese Journal of Geology*, 50(1): 330~339(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Yang Zhi, Zhu Rukai, *et al.* 2015. Progress in China's Unconventional Oil & Gas exploration and development and theoretical technologies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 979~1 007(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹烈, 安凤山, 王信. 2005. 川西坳陷须家河组气藏与古构造关系[J]. *石油与天然气地质*, 26(2): 224~229.
- 陈冬霞, 庞雄奇, 杨克明, 等. 2016. 川西坳陷深层叠复连续型致密砂岩气藏成因及形成过程[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46(6): 1 611~1 623.
- 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, 刘成川, 王勇飞. 2019. 川西地区陆相气田高产、稳产关键技术[J]. *天然气工业*, 39(S1): 162~167.
- 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): 1 352~1 359.
- 樊馥, 郑绵平, 张永生, 等. 2012. 靖边气田富 Br⁻、I⁻、Li⁺、K⁺ 油田水的发现及对找钾的启示[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(S2): 141~147.
- 冯英, 邓美洲, 李亚晶, 等. 2021. 断层在油气成藏中的控制作用——以川西东坡地区须二段气藏为例[J]. *断块油气田*, 28(5): 586~591.
- 郭彤楼, 熊亮, 叶素娟, 等. 2023. 输导层(体)非常规天然气勘探理论与实践——四川盆地新类型页岩气与致密砂岩气突破的启示[J]. *石油勘探与开发*, 50(1): 24~37.
- 郭旭升, 蔡勋育, 刘金连, 等. 2021. 中国石化“十三五”天然气勘探进展与前景展望[J]. *天然气工业*, 41(8): 12~22.
- 衡勇, 段新国, 王勇飞, 等. 2022. 浅水三角洲分流河道砂体内部结构及其对气水分布的影响——以四川盆地中江气田沙溪庙组为例[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 49(1): 1~11.
- 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.
- 贾爱林, 位云生, 郭智, 等. 2022. 中国致密砂岩气开发现状与前景展望[J]. *天然气工业*, 42(1): 83~92.
- 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.
- 李建森, 李廷伟, 马云麒, 等. 2022. 柴达木盆地卤水型 Li、Rb 关键金属矿产元素分布特征及富集机制[J]. 中国科学: 地球科学, 52(3): 474~485.
- 李王鹏, 刘忠群, 胡宗全, 等. 2021. 四川盆地川西坳陷新场须家河组二段致密砂岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 42(4): 884~897, 1 010.
- 李延飞. 2015. 川西坳陷中段地层水地球化学特征及油气保存条件[D]. 成都: 成都理工大学.
- 刘成川. 2007. 新场气田沙溪庙组多层致密气藏开发调整方案研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 刘君龙, 刘忠群, 刘振峰, 等. 2023. 四川盆地新场构造带深层须二段致密砂岩断褶裂缝体特征和地质模式[J]. 石油勘探与开发, 50(3): 530~540.
- 刘志远, 李 浩, 武清钊, 等. 2021. 致密砂岩裂缝测井识别特色技术及其应用效果——以四川盆地川西坳陷新场气田上三叠统须家河组二段为例[J]. 石油与天然气地质, 42(4): 981~991.
- 楼章华, 苏一哲, 朱 蓉, 等. 2021. 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, 42(4): 841~851.
- 山俊杰, 毕有益, 邓美洲, 等. 2023. 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[J]. 岩石矿物学杂志, 42(5): 735~744.
- 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.
- 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.
- 孙大鹏, 李秉孝, 马育华, 等. 1995. 青海湖湖水的蒸发实验研究[J]. 盐湖研究, 3(2): 10~19.
- 王春连, 黄 华, 王九一, 等. 2018. 江陵凹陷富钾锂卤水矿田地质特征及成藏模式研究[J]. 地质学报, 92(8): 1 630~1 646.
- 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.
- 熊 亮, 衡 勇. 2022. 中江沙溪庙组致密砂岩气藏气水分布及主控因素[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 44(3): 47~58.
- 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.
- 余小灿, 刘成林, 王春连, 等. 2022. 江汉盆地大型富锂卤水矿床成因与资源勘查进展: 综述[J]. 地学前缘, 29(1): 107~123.
- 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.
- 张道伟. 2021. 四川盆地未来十年天然气工业发展展望[J]. 天然气工业, 41(8): 34~45.
- 张 杰. 2021. 致密砂岩气藏孔隙水产出机理与主控因素研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院渗流流体力学研究所).
- 张国印. 2019. 川西坳陷沙溪庙组致密砂岩优质储层识别及预测方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京).
- 张金川, 刘丽芳, 唐 玄, 等. 2008. 川西坳陷根缘气藏异常地层压力[J]. 地学前缘, 15(2): 147~155.
- 张 林, 徐铜浩, 杨智凯, 等. 2021. 苏东区块地层水水化学特征分析[J]. 非常规油气, 8(5): 27~33.
- 张 庄. 2016. 川西坳陷侏罗系天然气成藏富集规律研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 郑和荣, 刘忠群, 徐士林, 等. 2021. 四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 42(4): 765~783.
- 邹才能, 杨 智, 朱如凯, 等. 2015. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 89(6): 979~1 007.
- 周孝鑫, 楼章华, 朱 蓉, 等. 2015. 川西坳陷新场气田水文地质地球化学特征及天然气运聚[J]. 地质科学, 50(1): 330~339.