

川中地区侏罗系沙溪庙组二段富钙地层水成因 及其对天然气运聚的指示意义

杨跃明¹,王茂云^{2,3},吴长江¹,曾斌辉^{2,3},潘珂¹,张欢乐⁴,王小娟¹,陈冬霞^{2,3},崔虎旺^{2,3}

[1. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院,四川成都610041;2. 油气资源与工程全国重点实验室 中国石油大学(北京),北京102249;3. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京102249;4. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院,新疆克拉玛依834000]

摘要:基于34口井的地层水地球化学数据、含气饱和度数据和岩矿资料,分析了川中地区侏罗系沙溪庙组二段(沙二段)富钙地层水成因,探讨了地层水对源-储分离型致密砂岩气运聚的指示意义。研究表明:川中地区沙二段地层水较中国其他致密砂岩气藏具有明显的“钙富集和钠亏损”的特征。地层水矿化度为3.3~45.6 g/L,为CaCl₂型,Ca²⁺当量比[$\gamma(\text{Ca}^{2+})$]为24.7%~69.5%。根据 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 将研究区沙二段地层水划分为高钙地层水[$\gamma(\text{Ca}^{2+})\geq 60\%$]、中钙地层水[$40\%\leq \gamma(\text{Ca}^{2+})<60\%$]和低钙地层水[$\gamma(\text{Ca}^{2+})<40\%$]3种类型。3类地层水的化学特征和分布存在明显的差异:高钙地层水主要分布在距角①断裂相对较近且与角①断裂连通的河道砂组,矿化度平均值为34.1 g/L,相对较高,阳离子以Ca²⁺为主,钠氯系数、脱硫酸系数和碳酸盐平衡系数最小;低钙地层水主要分布在距角①断裂较远或不与角①断裂直接连通的河道砂组,矿化度平均值为3.9 g/L,阳离子以Na⁺为主,钠氯系数、脱硫酸系数和碳酸盐平衡系数最大;中钙地层水矿化度平均值为17.7 g/L,Na⁺与Ca²⁺含量相差不大,钠氯系数、脱硫酸系数和碳酸盐平衡系数介于前两者之间。Ca²⁺含量较高的须家河组地层水的混入是沙二段地层水富钙的主要原因,后续的水-岩相互作用,尤其是斜长石的钠长石化导致钙进一步富集,而钠减少。川中地区沙二段地层水碳酸盐平衡系数、矿化度以及 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 沿着天然气侧向运移路径逐渐减少,表明富钙地层水化学指标对源-储分离型致密砂岩气藏具有较好的示踪能力。沙二段地层水中的钙越富集,储层的含气性越好,说明富钙地层水对天然气的富集具有指示意义。

关键词:水-岩相互作用;源-储分离型气藏;富钙地层水;天然气运聚;沙溪庙组;川中地区

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Origin of calcium-rich formation water and its implications for natural gas migration and accumulation in the 2nd member of the Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

YANG Yueming¹, WANG Maoyun^{2,3}, WU Changjiang¹, ZENG Jianhui^{2,3}, PAN Ke¹, ZHANG Huanle⁴,
WANG Xiaojuan¹, CHEN Dongxia^{2,3}, CUI Huwang^{2,3}

[1. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China]

Abstract: Using data of the geochemistry, gas saturation, and rock and mineral compositions of formation water extracted from 34 wells, we discuss the origin of calcium-rich formation water in the 2nd member of the Jurassic Shaximiao Formation (hereafter referred to as the Sha 2 Member) in the central Sichuan Basin, and accordingly explore the implications of the formation water for natural gas migration and accumulation of tight-sand gas reservoirs with source-reservoir separated. The results indicate that the formation water in the Sha 2 Member exhibits pronounced calcium

收稿日期:2024-09-09;修回日期:2024-12-06。

第一作者简介:杨跃明(1963—),男,博士、正高级工程师,油气勘探开发生产管理及研究。E-mail: yangym@petrochina.com.cn。

通信作者简介:王茂云(1995—),男,博士研究生,油气成藏机理。E-mail: wmy950904@163.com。

基金项目:中国石油西南油气田公司科研项目(JS2022-003)。

enrichment and sodium depletion compared to that in other tight-sand gas reservoirs in China. The formation water in the member displays total dissolved solids (TDS) ranging from 3.3 to 45.6 g/L (CaCl_2 type) and equivalent concentration proportions of Ca^{2+} [$\gamma(\text{Ca}^{2+})$] ranging from 24.7 % to 69.5 %, based on which the formation water can be categorized into three types: high-calcium [$\gamma(\text{Ca}^{2+}) \geq 60\%$], medium-calcium [$40\% \leq \gamma(\text{Ca}^{2+}) < 60\%$], and low-calcium [$\gamma(\text{Ca}^{2+}) < 40\%$] formation water. These three types of formation water differ greatly in chemical characteristics and distribution. Specifically, the high-calcium formation water is concentrated in channel sand bodies that are near and connected to Jiao ① fault. This type of formation water, among others, exhibits a high average TDS of 34.1 g/L, cations dominated by Ca^{2+} , and the lowest Na^+/Cl^- ratio, desulfurization coefficient, and carbonate equilibrium coefficient. The low-calcium formation water principally occurs in channel sand bodies that are distant from or not directly connected to the Jiao ① fault. This type of formation water manifests an average TDS of 3.9 g/L, cations dominated by Na^+ , and the highest Na^+/Cl^- ratio, desulfurization coefficient, and carbonate equilibrium coefficient. The medium-calcium formation water exhibits an average TDS of 17.7 g/L and slightly different Na^+ and Ca^{2+} concentrations, with Na^+/Cl^- ratios, desulfurization coefficients, and carbonate equilibrium coefficients falling between those of the high- and low-calcium formation water. The calcium enrichment in formation water of the Sha 2 Member is primarily attributed to the mixing of formation water with a high Ca^{2+} concentration from the Xujiahe Formation. Additionally, subsequent water-rock interactions, especially the albitization of plagioclase, further contribute to the calcium enrichment and sodium depletion in the formation water of Sha 2 Member. The carbonate equilibrium coefficients, TDS, and $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ of formation water in the Sha 2 Member decrease gradually along the lateral migration pathway of natural gas. This indicates that the chemical indices of calcium-rich formation water can serve as reliable tracers for tight-sand gas reservoirs of separated source-reservoir type. For the Sha 2 Member, higher calcium enrichment in formation water is associated with more favorable gas-bearing properties of reservoirs, suggesting that the calcium-rich formation water is indicative of natural gas accumulation.

Key words: water-rock interaction, gas reservoir of separated source-reservoir type, calcium-rich formation water, natural gas migration and accumulation, Shaximiao Formation, central Sichuan Basin

引用格式: 杨跃明, 王茂云, 吴长江, 等. 川中地区侏罗系沙溪庙组二段富钙地层水成因及其对天然气运聚的指示意义[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 178–191. DOI: 10.11743/ogg20250113.

YANG Yueming, WANG Maoyun, WU Changjiang, et al. Origin of calcium-rich formation water and its implications for natural gas migration and accumulation in the 2nd member of the Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 178–191. DOI: 10.11743/ogg20250113.

地层水是天然气运移的驱动力和载体, 研究天然气藏中地层水的特征和成因是了解天然气运移、聚集和保存条件的一种重要手段, 对天然气勘探开发具有重要意义^[1–3]。中国致密砂岩油气藏中的地层水以 CaCl_2 型地层水为主, 矿化度较高(50 ~ 300 g/L), 钠氯系数和脱硫酸系数较小, 指示地层封闭性良好, 有利于天然气的保存^[4], 如四川盆地川西坳陷须家河组、柴达木盆地西部古近系、东海盆地西湖凹陷天台反转带花港组、渤海湾盆地惠民凹陷沙河街组和鄂尔多斯盆地神木气田上古生界等^[5–9]。上述致密砂岩油气藏的地层水阳离子中, Na^+ 含量占据绝对优势, 其中, Na^+ 当量比 $[\gamma(\text{Na}^+)]$ 超60 %, 而 Ca^{2+} 当量比 $[\gamma(\text{Ca}^{2+})]$ 一般小于30 %。一般情况下, 矿化度较低的地层水中 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 通常远小于 $\gamma(\text{Na}^+)$, 只有矿化度大于200 g/L的地层水中 Ca^{2+} 当量浓度较高并大于 Na^+ 当量浓

度^[10]。目前川中地区沙溪庙组二段(沙二段)致密砂岩气勘探开发实践发现, 其地层水矿化度较低, 普遍小于50 g/L, 但地层水中的 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 为24.7 % ~ 69.5 %, 且具有“钙富集、钠亏损”的特征, 明显异于其他致密砂岩气藏的地层水。

川中地区沙二段气藏属于“下生上储”的源-储分离型致密砂岩气藏, 来自深部须家河组烃源岩的天然气先经通源断裂运移至浅层的沙二段, 后沿河道砂组侧向运聚成藏^[11–12]。天然气从烃源岩排出并沿通源断裂向储层二次运移的过程中, 深部地层水和天然气呈混相涌流^[3, 13], 二者具有相似的运移过程。伴随天然气运移至浅层后, 深部地层水与浅层原始地层水混合, 存在长期的物质交换。因此, 可以通过解译现今地层水中蕴含的深部地层水信息来揭示天然气的运聚规律。本文通过水化学和岩矿资料系统分析了川中地区

沙二段较为特别的富钙地层水成因;通过分析富钙地层水矿化度、离子含量和离子系数分布规律,结合研究区天然气运移和气藏含气饱和度特征,揭示了沙二段富钙地层水与天然气运聚的关系,为“下生上储”型致密砂岩气的示踪和勘探提供理论依据。

1 地质背景

研究区位于四川盆地的川中隆起带和川北坳陷带的结合部,整体为NW向倾斜的宽缓单斜构造,局部发

育低幅构造^[14](图1a,b)。研究区内发育一条断至须家河组的角①断裂,此外,沙溪庙组内部发育众多断距小且断面陡的断裂(图1c)。研究区主要陆相地层自下而上依次为上三叠统须家河组以及侏罗系自流井组、凉高山组、沙溪庙组、遂宁组 and 蓬莱镇组^[15](图1d)。其中,须家河组的煤系烃源岩层是沙溪庙组致密砂岩气藏的主要气源岩^[11-12]。沙溪庙组以“叶肢介”页岩为界划分为沙溪庙组一段(沙一段)和沙二段^[12]。目的层沙二段为河流-浅湖相沉积,岩性以厚层紫红色泥岩为主,夹灰色砂岩和粉砂岩^[15](图1d),

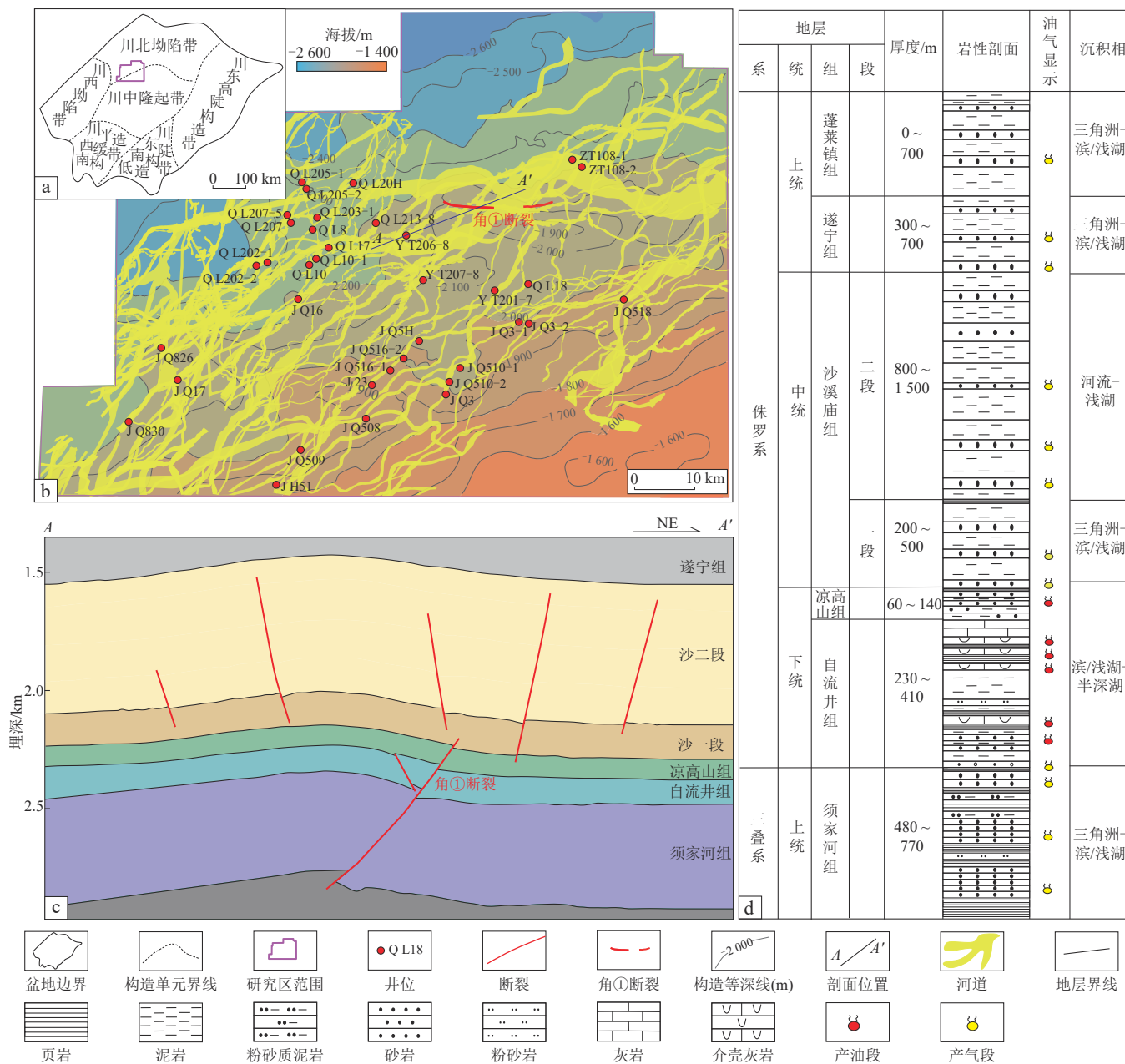


图1 川中地区构造分布与地层特征

Fig. 1 Structural distribution and stratigraphic characteristics of the central Sichuan Basin

a. 四川盆地构造单元及研究区位置; b. 研究区沙二段顶面构造及河道砂组展布; c. A—A'地层剖面; d. 研究区地层综合柱状图

垂向上发育多期呈 NE-SW 向展布的河道砂组,部分河道砂组与角①断裂相交(图 1c),可为来自下伏气源岩的地层流体提供良好的侧向运移通道。研究区气藏类型为受河道砂体分布控制的岩性气藏,整体富气,地层水不活跃,且无明显的气、水构造分异,因此无边/底水。

2 川中地区沙二段地层水化学特征

2.1 矿化度和成分特征

根据苏林地层水分类方案,地层水分为 Na_2SO_4 型、

CaCl_2 型、 NaHCO_3 型和 MgCl_2 型 4 种类型。中国致密砂岩气藏的地层水以 CaCl_2 型为主,指示水体交替停滞、气藏封闭性良好,且 Na^+ 一般为主要的阳离子,其当量比超 60%,而 Ca^{2+} 当量浓度通常远低于 $\text{Na}^{+[5-10]}$ 。统计 34 口气井的地层水资料,结果显示,川中地区沙二段地层水类型均为 CaCl_2 型,矿化度为 3.3~45.6 g/L,平均值为 19.7 g/L(表 1),属于咸水-盐水。阴离子以 Cl^- 为主,其离子当量比普遍大于 90%(图 2a)。阳离子中, Na^+ 质量浓度为 908~6 421 mg/L,平均值为 2 700 mg/L, Ca^{2+} 质量浓度为 328~12 403 mg/L,平均值为 3 322 mg/L(表 1); $\gamma(\text{Na}^+)$ 为 30.1%~74.6%,平均值为 51.1%, $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 为 24.7%~69.5%,平均值为 48.1%; Mg^{2+} 当

表 1 川中地区沙二段地层水离子质量浓度与离子系数

Table 1 Mass concentrations and ionic coefficients of formation water ions in the Sha 2 Member, central Sichuan Basin

地层水类型	井号	离子平均质量浓度/(mg/L)							苏林地层水分类	矿化度/(g/L)	钠氯系数	脱硫酸系数	碳酸盐平衡系数	Schoeller 碱交换系数
		Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Ba^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-						
低钙地层水	J23	1 146	663	4	0	2 750	30	247	CaCl_2 型	4.8	0.42	2.65	0.373	5.8
	QL205-1	1 393	439	9	0	2 376	45	223	CaCl_2 型	4.5	0.59	3.26	0.559	3.7
	QL205-2	1 314	384	10	0	2 166	38	224	CaCl_2 型	4.2	0.60	3.10	0.521	3.2
	QL20H	1 868	563	30	0	3 018	0	289	CaCl_2 型	5.9	0.62	0	0.513	4.0
	JQ17	1 761	973	16	0	4 060	46	123	CaCl_2 型	7.0	0.43	2.61	0.126	13.6
	JH51	908	372	5	0	1 540	82	0	CaCl_2 型	3.3	0.59	9.03	0	7.7
	JQ830	1 084	509	7	0	1 810	37	493	CaCl_2 型	3.9	0.60	3.40	0.973	1.4
	JQ826	1 138	328	6	0	2 035	110	123	CaCl_2 型	3.7	0.56	9.62	0.375	3.9
	JQ508	1 615	816	11	0	3 660	91	62	CaCl_2 型	6.4	0.44	5.64	0.075	13.4
	JQ509	1 133	380	5	0	2 370	29	62	CaCl_2 型	4.0	0.48	2.57	0.162	13.6
中钙地层水	JQ518	1 049	455	9	0	1 975	100	123	CaCl_2 型	3.7	0.53	9.56	0.270	4.1
	QL8	3 834	4 190	34	43	11 765	0	161	CaCl_2 型	20.2	0.33	0	0.057	72.5
	QL202-2	4 708	4 853	50	70	13 632	0	69	CaCl_2 型	23.6	0.35	0	0.011	128.5
	QL203-1	3 037	2 587	32	48	7 600	0	238	CaCl_2 型	13.7	0.41	0	0.131	24.2
	QL207-5	997	572	11	0	1 813	27	207	CaCl_2 型	3.7	0.55	2.71	0.362	3.5
	JQ16	3 679	4 160	17	0	12 000	14	123	CaCl_2 型	20.0	0.31	0.37	0.030	60.9
	JQ3	1 719	1 480	8	0	4 410	47	123	CaCl_2 型	7.8	0.39	2.75	0.083	15.8
	JQ5H	1 718	1 440	7	0	4 260	68	937	CaCl_2 型	8.4	0.40	3.94	0.651	2.5
	QL207	1 867	1 620	7	0	5 770	30	92	CaCl_2 型	9.4	0.32	1.61	0.057	31.9
	XQ3-2	1 933	1 755	16	0	5 035	1	123	CaCl_2 型	5.2	0.38	0.03	0.070	25.1
	XQ3-1	1 359	1 120	13	0	3 310	9	123	CaCl_2 型	3.5	0.41	0.65	0.110	14.8
	JQ516-2	2 516	2 405	14	0	6 865	33	123	CaCl_2 型	12.0	0.37	1.32	0.051	27.9
	JQ516-1	1 781	1 370	12	0	4 610	97	123	CaCl_2 型	8.0	0.39	5.44	0.090	12.9
	JQ510-2	1 791	1 410	12	0	4 270	79	123	CaCl_2 型	7.7	0.42	4.42	0.087	12.3
	JQ510-1	1 811	1 530	10	0	4 400	66	123	CaCl_2 型	8.0	0.41	3.64	0.080	13.7
高钙地层水	QL18	2 864	4 084	26	88	9 670	0	161	CaCl_2 型	17.1	0.34	0	0.043	42.3
	QL10	6 421	12 403	102	191	25 729	0	76	CaCl_2 型	45.6	0.25	0	0.006	253.0
	QL10	5 400	10 526	102	122	23 246	0	86	CaCl_2 型	40.0	0.23	0	0.009	206.9
	QL202-1	5 117	9 091	94	135	19 192	0	512	CaCl_2 型	34.3	0.27	0	0.060	27.5
	QL213-8	4 690	8 289	84	88	19 020	0	20	CaCl_2 型	32.9	0.25	0	0.002	716.5
	YT206-8	5 795	11 194	145	186	24 265	0	60	CaCl_2 型	42.1	0.24	0	0.007	306.1
	QL17	5 335	10 700	36	0	27 100	22	123	CaCl_2 型	43.3	0.20	0.42	0.011	149.9
	YT207-8	4 194	5 372	62	74	14 586	0	31	CaCl_2 型	24.6	0.29	0	0.005	340.7
	YT201-7	4 812	4 925	44	120	16 717	0	123	CaCl_2 型	26.9	0.29	0	0.025	96.8

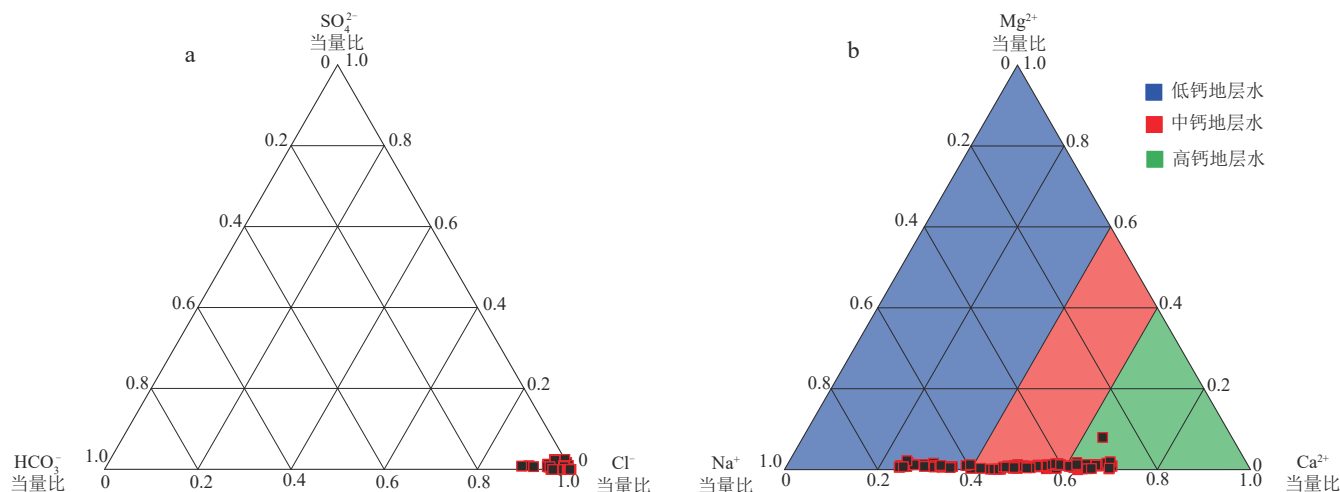


图2 川中地区沙二段地层水离子当量比三角图

Fig. 2 Ternary diagrams showing the ionic equivalent concentrations of formation water in the Sha 2 Member, central Sichuan Basin

a. 阴离子; b. 阳离子

量比 $[\gamma(\text{Mg}^{2+})]$ 较小,平均值仅为0.8%(图2b)。

较之其他致密砂岩油气藏^[5-9],川中地区地层水表现出富钙的特征,地层水中的 Ca^{2+} 含量较高且分布范围较广。为了精细研究川中地区沙二段富钙地层水特征及成因,本文根据 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 将研究区沙二段地层水划分为3种类型:高钙地层水 $[\gamma(\text{Ca}^{2+}) \geq 60\%]$ 、中钙地层水 $[40\% \leq \gamma(\text{Ca}^{2+}) < 60\%]$ 和低钙地层水 $[\gamma(\text{Ca}^{2+}) < 40\%]$ (图2b)。

不同钙含量地层水的矿化度以及离子类型和含量均存在较大的差异。高钙地层水矿化度最高,主要介于20.0~50.0 g/L,平均值为34.1 g/L(图3),其阳离子以 Ca^{2+} 为主,平均含量为8.5 g/L,而 Na^+ 平均含量为5.0 g/L(表1);中钙地层水矿化度主要分布在10.0~30.0 g/L,平均值为17.7 g/L(图3),其 Na^+ 与 Ca^{2+} 含量相差不大,平均值分别为3.5 g/L与3.6 g/L(表1);低钙地层水矿化度均低于10.0 g/L(图3),平均值为3.9 g/L,其阳离子以 Na^+ 为主,平均含量为1.1 g/L。此外,高钙地层水中 Ba^{2+} 含量较高,平均值为130 mg/L,中钙地层水 Ba^{2+} 含量较低,平均值为50 mg/L,而低钙地层水不含 Ba^{2+} ;中钙和低钙地层水中还含有少量的 SO_4^{2-} (表1)。

通过对比研究区沙二段地层水各组分含量和现今海水蒸发线^[16]与青海湖湖水蒸发线^[17]发现, Ca^{2+} 整体分布有序,在海水和湖水蒸发线之上,表现出 Ca^{2+} 富集的特点(图4a);低钙地层水 Na^+ 整体上沿着湖水蒸发线分布,而中钙和高钙地层水 Na^+ 分布于湖水和海水蒸发线以下,表现出 Na^+ 亏损的特点(图4b); Mg^{2+} (图4c)和 SO_4^{2-} (图4d)整体在蒸发线之下且靠近坐标轴分布,表现出贫乏的特点。

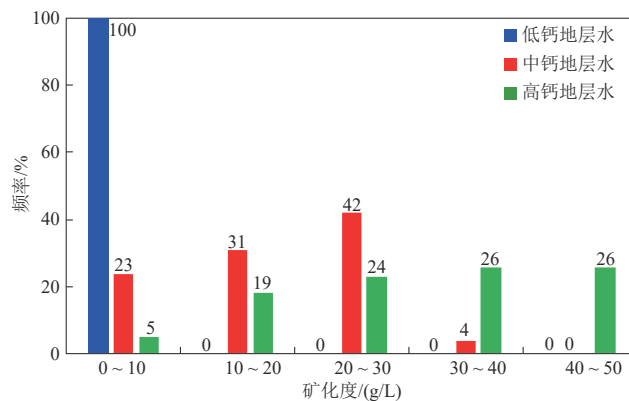


图3 川中地区沙二段不同钙含量地层水矿化度频率分布直方图

Fig. 3 Frequency histogram of TDS of formation water with varying $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ values in the Sha 2 Member, central Sichuan Basin

2.2 离子系数特征

在致密砂岩油气藏中,地层水离子系数可以反映地层水所处的水文地球化学环境、水-岩作用强度以及油气运移的关系^[18-21]。其中,钠氯系数 $[\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Cl}^-)]$, ρ 表示质量浓度]可以用来表征地下水变质程度和活性^[22],其值越低,地层封闭性越好,越有利于地层水浓缩及离子交换作用的发生^[23]。脱硫酸系数 $[\rho(\text{SO}_4^{2-}) \cdot 100/\rho(\text{Na}^+)]$ 通常被作为地层还原条件判别的重要指标^[20],其值越小,地层水还原越彻底,保存条件越好^[24-25]。碳酸盐平衡系数 $[(\rho(\text{HCO}_3^-) + \rho(\text{CO}_3^{2-}))]/\rho(\text{Ca}^{2+})]$ 是反映油气性质和运移方向的重要指标,在地层封闭的条件下,油气运聚区(靠近通源断裂)地层水的碳酸平衡系数较小^[21]。Schoeller 碱交换系数

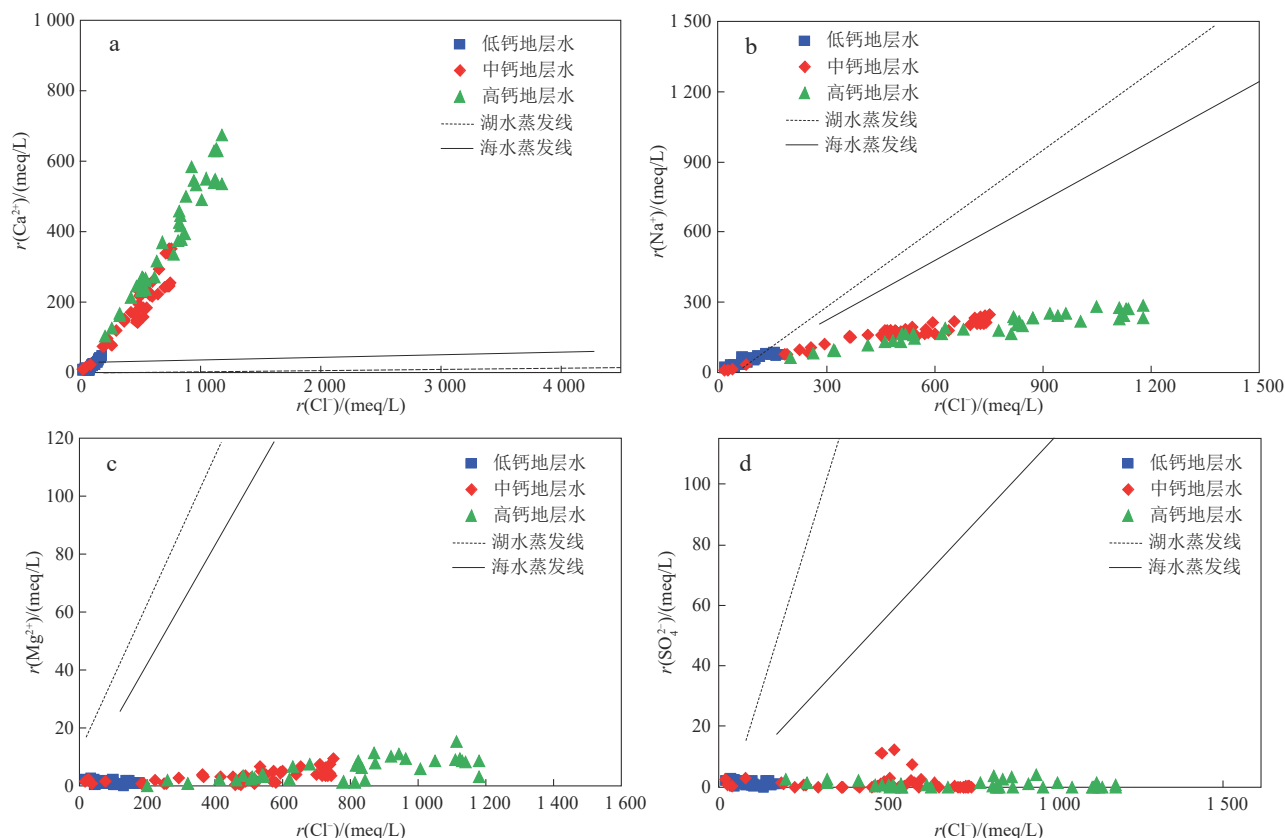


图4 川中地区沙二段 Cl^- 与 Ca^{2+} (a), Na^+ (b), Mg^{2+} (c)和 SO_4^{2-} (d)当量浓度交会图

Fig. 4 Cross plots of Cl^- equivalent concentration vs. the equivalent concentrations of Ca^{2+} (a), Na^+ (b), Mg^{2+} (c), and SO_4^{2-} (d) for the Sha 2 Member, central Sichuan Basin

$r(\text{Cl}^-)$. Cl^- 当量浓度; $r(\text{Ca}^{2+})$. Ca^{2+} 当量浓度; $r(\text{Na}^+)$. Na^+ 当量浓度; $r(\text{Mg}^{2+})$. Mg^{2+} 当量浓度; $r(\text{SO}_4^{2-})$. SO_4^{2-} 当量浓度

$[\text{IBE}, \text{IBE} = (\rho(\text{Cl}^-) - \rho(\text{Na}^+)) / (\rho(\text{SO}_4^{2-}) + \rho(\text{HCO}_3^-) + \rho(\text{CO}_3^{2-}))]$ 可以指示地层水是否有陆表水的渗入,前人认为海水的 IBE 为0.129,当 $\text{IBE} > 0.129$ 时,认为地层水均为古沉积水,而当 $\text{IBE} < 0.129$ 时,反映地层水中含有陆表渗入水^[10]。

川中地区沙二段不同 Ca^{2+} 当量浓度的地层水离子系数差异明显(图5)。高钙地层水的钠氯系数、脱硫酸系数和碳酸盐平衡系数最小,平均值分别为0.26, 0.05和0.02;中钙地层水的钠氯系数、脱硫酸系数和碳酸盐平衡系数较大,平均值分别为0.39, 1.91和0.13;低钙地层水的钠氯系数、脱硫酸系数和碳酸盐平衡系数最大,平均值分别为0.53, 4.67和0.35。各类地层水的 $\text{IBE} > 0.129$,因此地层水均为古沉积水,无陆表水的渗入。由上述分析可知,川中地区沙二段地层封闭性较好,油气藏具有较好的保存条件,较之中钙和低钙地层水,高钙地层水具有较低的钠氯系数、脱硫酸系数和碳酸盐平衡系数,反映具备高钙地层水的油气藏具有更好的保存条件,且离通源断裂更近。

3 川中地区沙二段富钙地层水成因

3.1 须家河组地层水对沙二段地层水钙富集的影响

在源-储分离型致密砂岩气成藏过程中,随着断裂的活动,在源-储压差的作用下,地层流体一般呈混相涌流^[26],即地层水会伴随天然气上涌。前人的研究结果表明,研究区须家河组烃源岩生烃强度大,对川中地区天然气富集起主要贡献作用,其自生煤型气通过角①断裂垂向运移至沙二段,后沿着河道侧向运聚成藏^[11,15]。因此,充足的源-储压差可为须家河组地层水涌入上覆沙二段提供动力条件,角①断裂、沙溪庙组内部断裂以及多期河道砂组可为地层流体提供垂向和侧向运移通道。

川中地区须家河组地层水均为 CaCl_2 型,且具有较高的矿化度,平均值为166.3 g/L。阴离子以 Cl^- 为主,含有少量的 HCO_3^- ,不含 SO_4^{2-} 。阳离子中, Na^+ 含量最高,平均质量浓度约45.7 g/L,平均当量比为69%; Ca^{2+} 平均质量浓度约为14.4 g/L,平均当量比为26%;此外

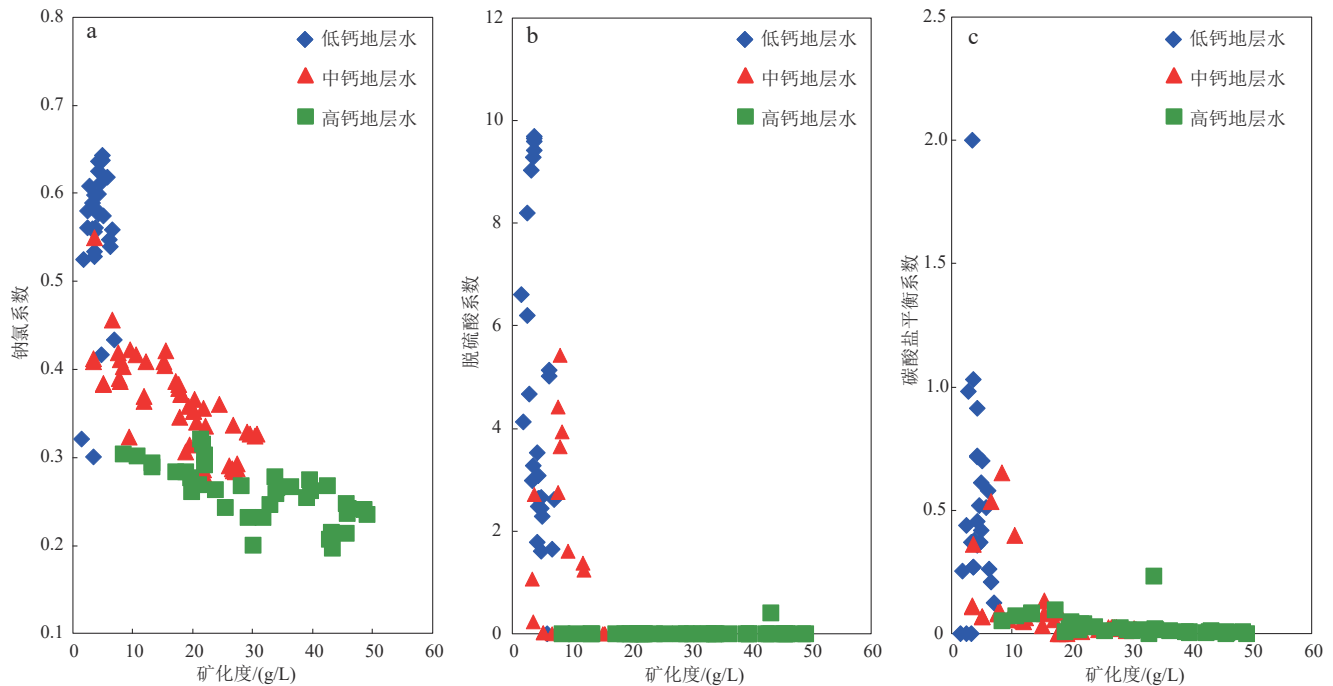


图5 川中地区沙二段地层水矿化度与钠氯系数(a)、脱硫酸系数(b)和碳酸盐平衡系数(c)交汇图

Fig. 5 Cross plots of TDS vs. Na^+/Cl^- ratio (a), desulfurization coefficient (b), and carbonate equilibrium coefficient (c) for formation water in the Sha 2 Member, central Sichuan Basin

还含有一定量 Mg^{2+} 和 Ba^{2+} (表2)。

通过对比川中地区沙二段(表1)和须家河组(表2)地层水的矿化度和组分特征发现,沙二段高钙地层水中的 Ca^{2+} 含量和川中地区须家河组地层水的 Ca^{2+} 含量相仿,且沙二段地层水 Ca^{2+} 含量随着与通源断裂距离的增加而呈减小的趋势(图6a);沙二段地层水矿化度和其余各离子含量均小于须家河组地层水;沙二段地层水 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 大于须家河组地层水,而 $\gamma(\text{Na}^+)$ 小于须家河组地层水;此外,须家河组地层水展现出高 Ba^{2+} 含量和无 SO_4^{2-} 的特点,在沙二段地层水中,高钙地层水也表现出类似特点,相比之下低钙地层水中 Ba^{2+} 含量极低而 SO_4^{2-} 含量较高,与须家河组地层水差异最大,且沙二段 Ba^{2+} 含量随着与通源断裂距离的增加而呈减小的趋势(图6b)。

由上述分析可知,较之高钙地层水,远离断层的低钙地层水受到须家河组地层水的影响较小,更能反映原始沙二段地层水的特征。因此,原始低矿化度且富 Na^+ 、贫 Ca^{2+} 、贫 Ba^{2+} 和含 SO_4^{2-} 的沙二段地层水在天然气成藏过程中与须家河组上涌的高矿化度且富 Na^+ 、富 Ca^{2+} 、富 Ba^{2+} 和贫 SO_4^{2-} 的地层水混合,导致沙二段通源断裂附近的原始地层水矿化度增加, Ca^{2+} 和 Ba^{2+} 含量增加, SO_4^{2-} 含量减少,高钙地层水发育。随着地层水扩散和迁移的距离的增加,须家河组地层水对沙二段地层水的混入作用减弱,使得 Ca^{2+} 和 Ba^{2+} 含量逐渐降低,故远离通源断裂的气藏发育低钙地层水。

3.2 水-岩相互作用对沙二段地层水钙富集的影响

地层中 Ca^{2+} 的生成主要有3种途径:斜长石和碳酸

表2 川中地区须家河组地层水特征(部分数据来自文献[26])

Table 2 Formation water properties of the Xujiahe Formation, central Sichuan Basin (part of data from reference [26])

井号/资料来源	离子质量浓度/(mg/L)							矿化度/(g/L)	苏林地层水分类
	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Ba^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-		
ZT108-1	22 735	6 063	637	2 531	42 564	0	673	75.4	CaCl_2 型
ZT108-2	23 762	12 181	1 133	770	53 963	0	273	93.5	CaCl_2 型
文献[26]	44 608	13 249	1 683	274	102 024	0	44	168.1	CaCl_2 型
文献[26]	75 253	22 420	3 013	7 548	163 145	0	153	272.5	CaCl_2 型
文献[26]	62 018	18 238	2 318	2 390	136 742	0	89	222.0	CaCl_2 型

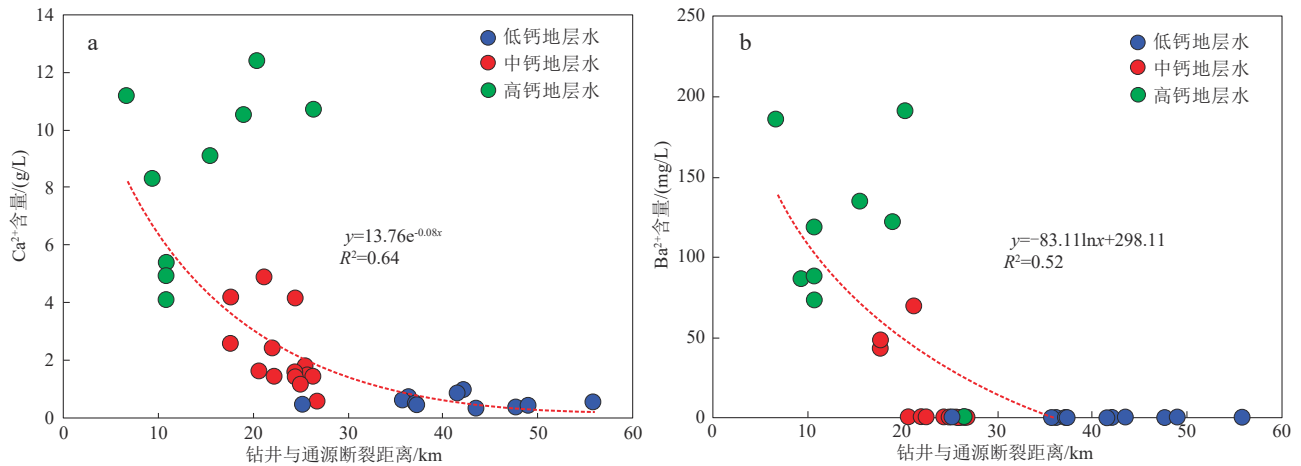
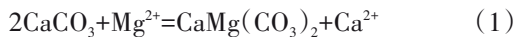


图6 川中地区沙二段地层水 Ca^{2+} (a) 和 Ba^{2+} (b) 含量与距通源断裂距离的关系

Fig. 6 Relationships of Ca^{2+} (a) and Ba^{2+} (b) concentrations with the distance from the source-rooted faults for formation water in the Sha 2 Member, central Sichuan Basin

盐矿物的溶蚀^[5]、方解石的白云石化^[6]以及斜长石的钠长石化^[7-8,24]。

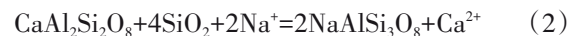
根据研究区沙二段薄片观察结果,局部发育早期呈连晶胶结的方解石(图7a),而方解石却鲜有溶蚀现象,仅局部发育斜长石溶蚀(图7b)。因此认为该区 Ca^{2+} 富集无方解石溶解的贡献,反而是方解石的胶结必然会消耗一部分的 Ca^{2+} ;此外,斜长石的溶蚀一定程度上促进了 Ca^{2+} 的富集。方解石在白云石化的过程中, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 会进行 1:1 的置换^[27],其反应式为:



研究区沙二段地层水数据点几乎靠近坐标轴分布,与“白云石化”轨迹线没有相关关系(图8a),结合镜下观察结果,发现研究区沙二段储层不发育白云石。因此,方解石的白云石化对 Ca^{2+} 富集并没有贡献。

$\text{Na}_{\text{deficit}} - \text{Ca}_{\text{excess}}$ (Na^+ 相对海水亏损程度 - Ca^{2+} 相对海

水富集程度)图解常用来反映水-岩相互作用,其中盆地流体线表示 2 个 Na^+ 置换出 1 个 Ca^{2+} 的水-岩作用,即斜长石的钠长石化^[28-30],其反应式为:



在川中地区沙二段地层水的 $\text{Na}_{\text{deficit}} - \text{Ca}_{\text{excess}}$ 图解中(图8b),3类地层水数据点与盆地流体线近乎平行,说明斜长石的钠长石化普遍存在。由于斜长石($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$)和浊沸石($\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)都属于架状硅酸盐,两者具有相似的成分和结构,所以在斜长石钠长石化的过程中常伴有浊沸石生成,并交代斜长石^[31-34]。通过薄片观察发现,研究区普遍发育浊沸石胶结,且部分浊沸石交代斜长石(图7c),前人的研究也证实,川中地区沙溪庙组普遍发育浊沸石胶结^[34]。综上所述,川中地区沙二段大规模发育斜长石的钠长石化,该过程不仅会生成 Ca^{2+} 而促进 Ca^{2+} 富集,也会消耗 Na^+ 从而主导沙二段地层

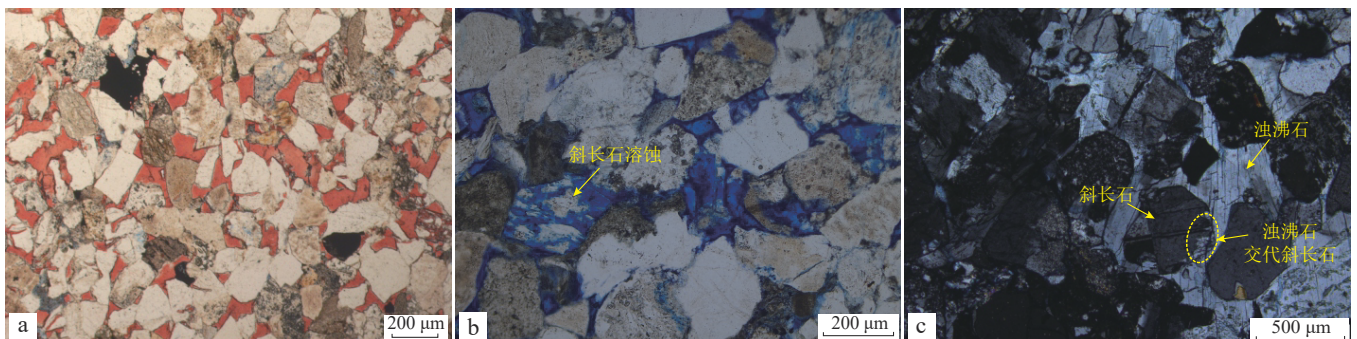


图7 川中地区沙二段岩石铸体薄片显微照片

Fig. 7 Images of casting thin sections of rocks from the Sha 2 Member, central Sichuan Basin

a. 早期呈连晶胶结的方解石(红色),无明显溶蚀现象,埋深 2 260.10 m, QL202 井,单偏光;b. 斜长石溶蚀现象,埋深 2 174.40 m, QL18 井,蓝色铸体,单偏光;c. 浊沸石连晶胶结,局部浊沸石交代斜长石,埋深 2 164.36 m, QL17 井,正交偏光

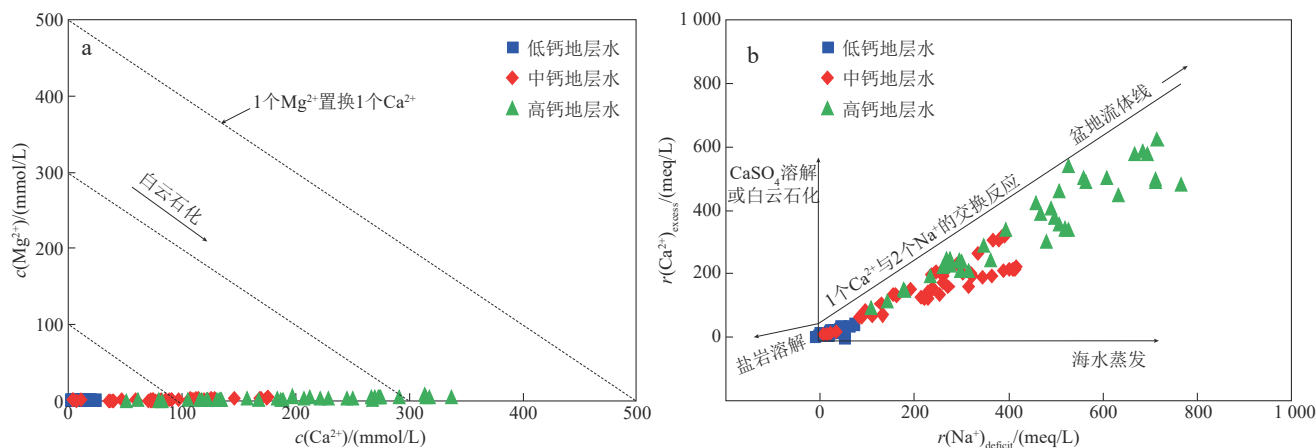


图8 川中地区沙二段地层水白云石化判别图版(a)与 $\text{Na}_{\text{deficit}}-\text{Ca}_{\text{excess}}$ 图解(b)(部分数据来自文献[28])

Fig. 8 Discriminant diagram of dolomitization (a) and $\text{Na}_{\text{deficit}}-\text{Ca}_{\text{excess}}$ diagram (b) for formation water in the Sha 2 Member, central Sichuan Basin (some data from references [28])

$c(\text{Ca}^{2+})$, Ca^{2+} 的摩尔浓度; $c(\text{Mg}^{2+})$, Mg^{2+} 的摩尔浓度; $r(\text{Na}^{+})_{\text{deficit}}$, Na^{+} 相对海水亏损的当量浓度^[28]; $r(\text{Ca}^{2+})_{\text{excess}}$, Ca^{2+} 相对海水富集的当量浓度^[28]

水的 Na^{+} 亏损。

4 川中地区沙二段富钙地层水对天然气运聚的指示意义

在“下生上储”的源-储分离型致密砂岩气成藏过程中,源岩中的地层水是天然气运移载体和上涌动力(浮力)的重要来源^[3]。伴随天然气运移至浅部储层后,深部高矿化度的地层水与浅层原始地层水混合,二者存在长期的物质交换。因此,可以通过解译现今地层水中蕴含的深部地层水信息来揭示“下生上储”的源-储分离型致密砂岩气的运聚特征。对于此类油气藏的研究,前人已证实地层水碳酸盐平衡系数^[21]和矿化度^[3]的差异分布可以反映天然气的运聚规律。

4.1 富钙地层水对天然气运移方向的指示

川中地区沙二段致密砂岩气主要受到下伏须家河组煤系烃源层的气源供给^[11-12]。在晚白垩世—早古新世,须家河组烃源岩生烃增压^[12],喜马拉雅期构造抬升^[3]导致压力释放,天然气沿与须家河组连通的角①断裂垂向运移至沙二段。现今沙二段储层含气饱和度以角①断裂为中心向四周逐渐减小(图9a)。前人结合天然气同位素地球化学证据证实^[11-12],沙二段天然气以角①断裂为中心沿着河道砂组向四周侧向运移(图9a)。研究区沙二段碳酸盐平衡系数平面分布表现出,越靠近角①断裂,碳酸盐平衡系数值越小的特征(图9b),其示踪结果显示天然气和地层水运移路径与前人研究成果契合。此外,研究区地层水矿化度和 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 均显示出,沿着天然气和地层水侧向运移方向

逐渐减小的趋势(图9c,d)。因此,地层水矿化度和 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 的差异性分布对研究区沙二段天然气的运移具有较强的示踪能力。

此外,由于中钙地层水是沙二段原始地层水受到了须家河组地层水少量混入的结果,因此,中钙地层水的分布可以反映须家河组地层水在沙二段河道砂组中的侧向运移距离。研究表明,须家河组地层水侧向运移距离最远约30 km(图6),相较于地层水,天然气受到的运移阻力更小,从而能运移更远的距离,反映出研究区沙二段天然气侧向运移的充注动力强大。

4.2 富钙地层水对天然气富集程度的指示

高钙地层水主要分布在距离通源断裂相对较近且与通源断裂连通的河道砂组,其含气饱和度较大;低钙地层水主要分布在距离通源断裂较远或不与通源断裂直接连通的河道,其含气饱和度一般较小;中钙地层水处于二者的过渡带(图9a)。储层含气饱和度的统计结果显示,发育高钙地层水的储层含气饱和度普遍大于60.0%,平均值为67.9%;发育中钙地层水的储层含气饱和度次之,平均值为56.9%;发育低钙地层水的储层含气饱和度平均值为42.4%(图10)。因此,研究区沙二段地层水的富钙程度对天然气的富集程度具有一定的指示意义,即地层水中的钙越富集,储层的含气性越好。

需要注意的是,地层水样品所处井位与角①断裂的距离普遍大于10 km(图6),其地层水钠氯系数、脱硫酸系数和Schoeller碱交换系数证实地层封闭性好、气藏保存条件好(表1)。而在源-储分离型气藏的勘探实践中,由于通源断裂对其附近储层的破坏,导致距

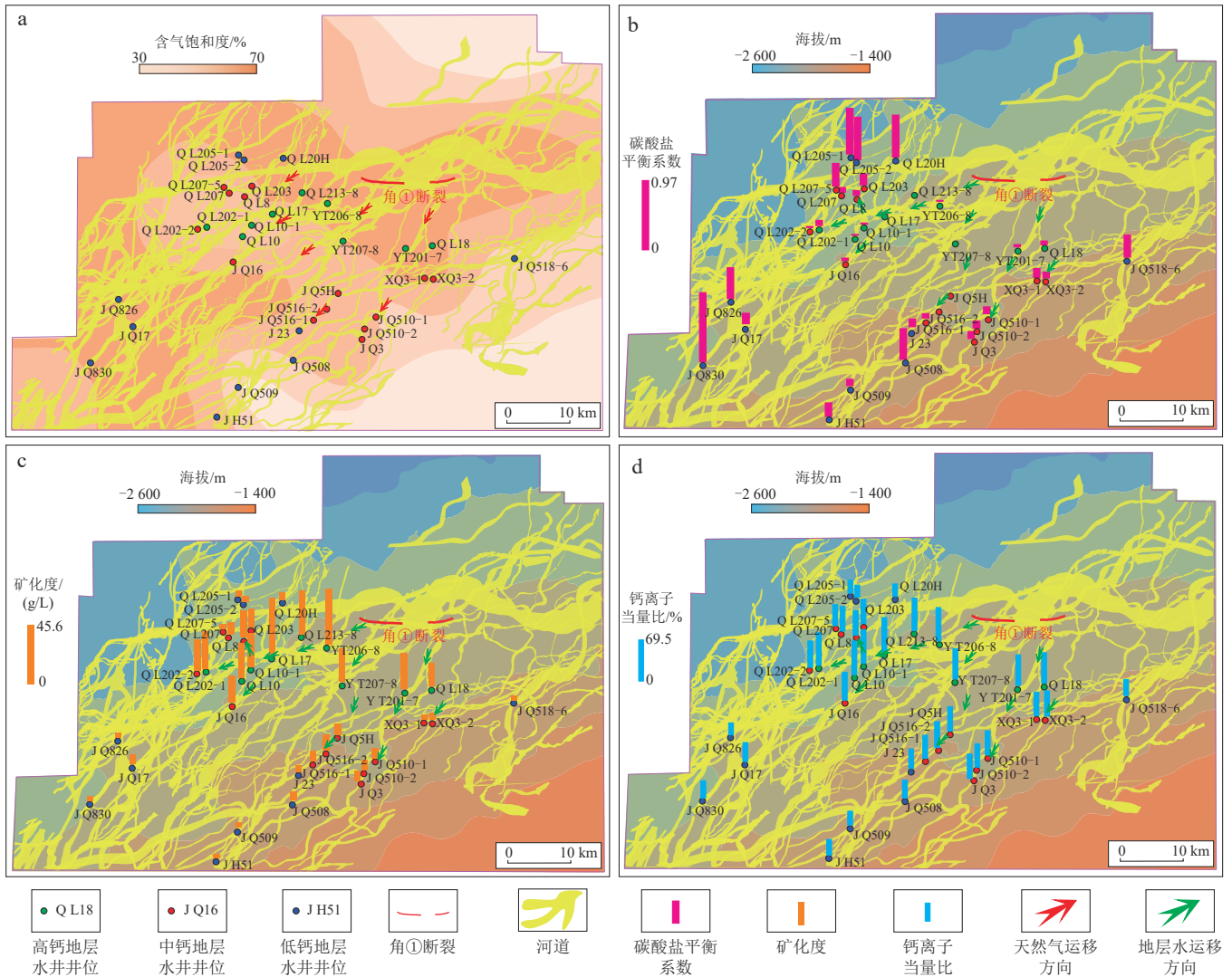


图9 川中地区沙二段含气饱和度(a)、碳酸盐平衡系数(b)、矿化度(c)和钙离子当量比(d)分布及地层流体侧向运移特征

Fig. 9 Correlations of the distributions of gas saturation (a), carbonate equilibrium coefficients (b), TDS (c), and $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ (d) with lateral migration characteristics of formation fluids for the Sha 2 Member, central Sichuan Basin

断层2~5 km范围内的钻井产水量较大,勘探效果并不理想^[3,11,35-40]。因此,在距断层10 km内的天然气藏,高钙地层水与天然气富集的关系需要做另外探讨。

4.3 富钙地层水对天然气运聚的指示模式

综合研究区沙二段富钙地层水成因以及天然气运移和富集规律,建立了川中地区沙二段富钙地层水对天然气运聚的指示模式(图11)。研究区通源的角①断裂和沙二段广泛分布的河道砂组为天然气和地层水的运移提供了输导条件,烃源岩内部的异常高压为下伏地层水的上涌提供了充注的动力条件。在这种背景下,须家河组地层水和天然气以混相涌流的方式沿着通源断裂上涌进入沙二段,以通源断裂为中心沿河道侧向运移。强大的充注动力能驱替原始地层水远离通

源断裂^[11,41-42],导致断裂附近的储层内含气性好。随着运移距离的增加,后续充注动力下降,富钙地层水和天然气发生气水分离^[3]。其中,含钙量高的地层水滞留于距角①断裂相对较近的储层中,加之后续一系列促进钙富集的水-岩相互作用,导致高钙地层水发育在含气饱和度较高的气藏;而天然气继续向更远的距离运移,随着运移距离的增加,充注动力进一步减弱,储层含气饱和度逐渐降低,须家河组地层水对沙二段原始沉积水的混入作用逐渐减弱,导致沙二段低钙地层水发育在含气饱和度较差的气藏。

5 结论

1) 川中地区沙二段地层水类型为 CaCl_2 型,较之

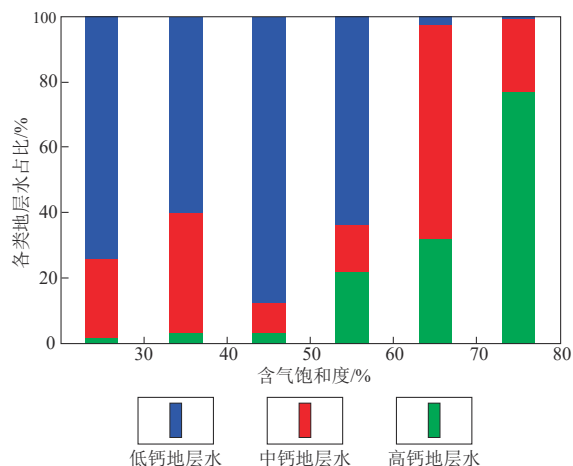


图10 川中地区沙二段不同地层水类型含气饱和度分布条形图

Fig. 10 Bar chart showing the gas saturation of various types of formation water in the Sha 2 Member, central Sichuan Basin

其他致密砂岩油气藏表现出“钙富集、钠亏损”的特征。按照 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 将研究区沙二段地层水划分为高钙地层水 $[\gamma(\text{Ca}^{2+}) \geq 60\%]$ 、中钙地层水 $[40\% \leq \gamma(\text{Ca}^{2+}) < 60\%]$ 和低钙地层水 $[\gamma(\text{Ca}^{2+}) < 40\%]$ 。高钙、中钙和低钙地层水的矿化度、成分和离子系数均有明显差异。高钙

地层水具有相对较高的矿化度,平均值为34.1 g/L,阳离子以 Ca^{2+} 为主,其钠氯系数、脱硫酸系数和碳酸盐平衡系数较小,平均值分别为0.26,0.05和0.02;中钙地层水矿化度平均值为17.7 g/L,其 Na^+ 与 Ca^{2+} 含量相差不大,其钠氯系数、脱硫酸系数和碳酸盐平衡系数较大,平均值分别为0.39,1.91和0.13;低钙地层水矿化度平均值为3.9 g/L,其阳离子以 Na^+ 为主,其的钠氯系数、脱硫酸系数和碳酸盐平衡系数最大,平均值分别为0.53,4.67和0.35。

2) 须家河组高钙含量地层水的混入是沙二段地层水富钙的关键。须家河组富 Ca^{2+} 的地层水和天然气以混相涌流的形式,垂向运移至沙二段,后沿河道侧向运移,与沙二段原始富 Na^+ 地层水混合,形成了 Ca^{2+} 含量较高的地层水。后续的水-岩相互作用,尤其是斜长石的钠长石化,加剧了 Ca^{2+} 富集并主导了 Na^+ 亏损,导致高钙地层水主要分布在离角①断裂相对较近且与角①断裂连通的河道砂组,低钙地层水距角①断裂较远或分布在不与角①断裂直接连通的河道砂组,而中钙地层水处于二者的过渡带。

3) 川中地区沙二段富钙地层水的碳酸盐平衡系

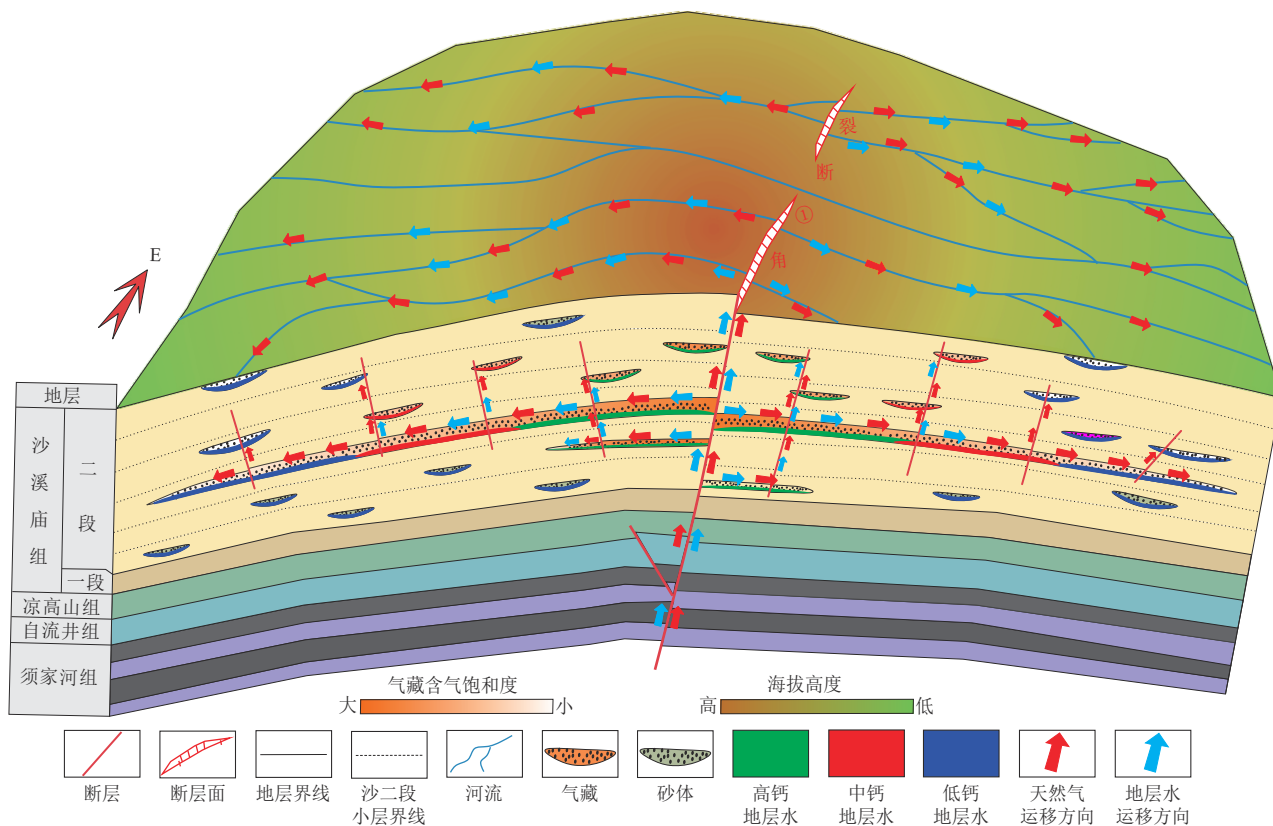


图11 川中地区沙二段富钙地层水对天然气运聚的指示模式

Fig. 11 Diagram showing the implications of calcium-rich formation water for natural gas migration and accumulation in the Sha 2 Member, central Sichuan Basin

数、矿化度以及 $\gamma(\text{Ca}^{2+})$ 指示了天然气的运移方向。须家河组地层水和天然气以混相涌流的方式沿着通源的角①断裂上涌进入沙二段,并以通源断裂为中心沿河道侧向运移。沙二段地层水的富钙程度对天然气的富集程度具有一定的指示意义,地层水中的钙越富集,储层的含气性越好,其中高钙地层水储层含气饱和度普遍大于60.0%,平均值为67.9%;发育中钙地层水的储层含气饱和度次之,平均值为56.9%;发育低钙地层水的储层含气饱和度平均值为42.4%。据此建立了川中地区沙二段富钙地层水对天然气运聚的指示模式。

参 考 文 献

- [1] 张海祖,徐同,谢亚妮,等. 库车坳陷东部阿合组地层水化学特征及其油气响应[J]. 中国地质, 2024, 51(6): 2017–2027.
ZHANG Haizu, XU Tong, XIE Yani, et al. Hydrochemical characteristics and hydrocarbon response of stratum water of Ahe Formation in eastern Kuqa Depression [J]. *Geology in China*, 2024, 51(6): 2017–2027.
- [2] 朱传庆,徐同,邱楠生,等. 塔里木盆地克拉苏构造带巴什基奇克组地层水化学特征及流体成因[J]. 地质学报, 2023, 97(1): 250–261.
ZHU Chuanqing, XU Tong, QIU Nansheng, et al. Chemical characteristics and fluid origin of formation water of Bashijiqike Formation in Kelasu structure belt, Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(1): 250–261.
- [3] 周孝鑫,楼章华,朱蓉,等. 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, 2015, 50(1): 330–339.
ZHOU Xiaoxin, LOU Zhanghua, ZHU Rong, et al. Hydrogeology geochemical characteristics of continental formation water in Xinchang Gas Field, western Sichuan Depression and gas migration and accumulation[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(1): 330–339.
- [4] 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 and Development*, 2012, 35(4): 41–44.
- [5] 程付启,金强,姜桂凤,等. 地层水在天然气保存中的积极作用[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(5): 626–628.
CHENG Fuqi, JIN Qiang, JIANG Guifeng, et al. Positive effect of formation water on conservation of natural gas [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(5): 626–628.
- [6] 徐波. 东海盆地西湖凹陷天台反转带花港组地层水地球化学特征及其成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(3): 62–71.
XU Bo. Geochemistry and genesis of the formation water in Huagang Formation of the Tiantai Inversion Zone, the Xihu Depression of the East China Sea Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(3): 62–71.
- [7] 张汪明,曾溅辉,李飞,等. 柴西地区古近系和新近系地层水化学特征及其成因[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(4): 558–568.
ZHANG Wangming, ZENG Jianhui, LI Fei, et al. Hydrochemistry characteristics and origin of formation water of Paleogene and Neogene in the western Qaidam Basin [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2016, 38(4): 558–568.
- [8] 刘元晴,曾溅辉,周乐,等. 惠民凹陷沙河街组地层水化学特征及其成因[J]. 现代地质, 2013, 27(5): 1110–1119.
LIU Yuanqing, ZENG Jianhui, ZHOU Le, et al. Geochemical characteristics and origin of Shahejie Formation water in Huimin Sag [J]. *Geoscience*, 2013, 27(5): 1110–1119.
- [9] 唐大海,谭秀成,涂罗乐,等. 川中-川西过渡带沙溪庙组第二段致密砂岩储层物性控制因素及孔隙演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(4): 460–471.
TANG Dahai, TAN Xiucheng, TU Luole, et al. Control factors and pore evolution of tight sandstone reservoir of the second member of Shaximiao Formation in the transition zone between central and western Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2020, 47(4): 460–471.
- [10] 曾溅辉. 沉积盆地流体地质学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2017: 55.
ZENG Jianhui. *Geofluids in sedimentary basins* [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2017: 55.
- [11] 王茂云,曾溅辉,王小娟,等. 源-储分离型致密砂岩气藏中气水分布控制因素——以四川盆地中部地区沙溪庙组致密砂岩气为例[J]. 石油学报, 2024, 45(8): 1187–1201, 1218.
WANG Maoyun, ZENG Jianhui, WANG Xiaojuan, et al. Controlling factors of gas-water distribution in source-reservoir separated tight sandstone gas reservoirs: A case study of Shaximiao Formation tight sandstone gas in central Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(8): 1187–1201, 1218.
- [12] 张本健,徐唱,徐亮,等. 四川盆地东北部三叠系飞三段沉积特征及油气地质意义[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(3): 154–163.
ZHANG Benjian, XU Chang, XU Liang, et al. Sedimentary characteristics and petroleum geological significance of the third member of Triassic Feixianguan Formation in northeastern Sichuan Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(3): 154–163.
- [13] 柳广弟. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018: 289–290.
LIU Guangdi. *Petroleum geology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018: 289–290.
- [14] 张葳. 川中东北部早中侏罗世古湖泊演化与致密油储层形成[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
ZHANG Wei. The evolution of the ancient lake and tight oil reservoirs formation of the early and middle Jurassic in the NE part of Central Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of

- Technology, 2013.
- [15] 张本健, 潘珂, 吴长江, 等. 四川盆地金秋气田侏罗系沙溪庙组多期砂组天然气复合成藏机理及模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 51-61.
- ZHANG Benjian, PAN Ke, WU Changjiang, et al. Compound gas accumulation mechanism and model of Jurassic Shaximiao Formation multi-stage sandstone formations in Jinqu Gas Field of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 51-61.
- [16] MCCAFFREY M A, LAZAR B, HOLLAND H D. The evaporation path of seawater and the coprecipitation of Br^- and K^+ with halite[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1987, 57(5): 928-937.
- [17] 孙大鹏, 李秉孝, 马育华, 等. 青海湖湖水的蒸发实验研究[J]. 盐湖研究, 1995, 3(2): 10-19.
- SUN Dapeng, LI Bingxiao, MA Yuhua, et al. An investigation on evaporating experiments for Qinghai-Lake water, China [J]. Journal of Salt Lake Research, 1995, 3(2): 10-19.
- [18] 朱玉双, 王震亮, 高红, 等. 油气水物化性质与油气运移及保存[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2000, 30(5): 415-418.
- ZHU Yushuang, WANG Zhenliang, GAO Hong, et al. The relations between the fluid features in reservoir and the migration and preservation of oil and gas[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2000, 30(5): 415-418.
- [19] 李建森, 李廷伟, 马海州, 等. 柴达木盆地西部新近系和古近系油田卤水水化学特征及其地质意义[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 28-36.
- LI Jiansen, LI Tingwei, MA Haizhou, et al. Investigation of the chemical characteristics and its geological significance of the Tertiary oilfield brine in the western Qaidam Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 28-36.
- [20] 李廷伟, 谭红兵, 樊启顺. 柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及成因分析[J]. 盐湖研究, 2006, 14(4): 26-32.
- LI Tingwei, TAN Hongbing, FAN Qishun. Hydrochemical characteristics and origin analysis of the underground brines in west Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2006, 14(4): 26-32.
- [21] 李伟, 李小地. 应用油田水地球化学及流体势追踪油气运聚途径[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(6): 34-37, 95.
- LI Wei, LI Xiaode. Application of oilfield water geochemistry and fluid potential in tracing the pathway of hydrocarbon migration and accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(6): 34-37, 95.
- [22] 于翠玲, 曾溅辉, 林承焰, 等. 断裂带流体活动证据的确定——以东营凹陷胜北断裂带为例[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 34-38.
- YU Cuiling, ZENG Jianhui, LIN Chengyan, et al. Evidences of fluid flow along fault zones in Shengbei Fault Zone of Dongying Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(4): 34-38.
- [23] 刘济民. 油田水文地质勘探中水化学及其特性指标的综合应用[J]. 石油勘探与开发, 1982, 9(6): 49-55.
- LIU Jimin. The characteristics of underground water chemistry and its application in oilfield hydrology exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 1982, 9(6): 49-55.
- [24] 查明, 陈中红. 山东东营凹陷前古近系水化学场、水动力场与油气成藏[J]. 现代地质, 2008, 22(4): 567-575.
- ZHA Ming, CHEN Zhonghong. Formation water chemical and hydrodynamic fields and their relations to the hydrocarbon accumulation in the pre-Tertiary of Dongying Depression, Shandong[J]. Geoscience, 2008, 22(4): 567-575.
- [25] 蔡立国, 钱一雄, 刘光祥, 等. 塔河油田及邻区地层水成因探讨[J]. 石油实验地质, 2002, 24(1): 57-60.
- CAI Liguang, QIAN Yixiong, LIU Guangxiang, et al. Origin of formation water in Tahe Oilfield and adjacents [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(1): 57-60.
- [26] 苏敏, 吴康军, 李志军, 等. 川中北部磨溪—高石梯地区地层水特征及其油气地质意义[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(3): 54-62.
- SU Min, WU Kangjun, LI Zhijun, et al. Characteristics of formation water and its geological significance in Moxi-Gaoshiti area, north-central Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(3): 54-62.
- [27] BIRKLE P, GARCÍA B M, MILLAND PADRÓN C M. Origin and evolution of formation water at the Jujo-Tecminoacán oil reservoir, Gulf of Mexico. Part 1: Chemical evolution and water-rock interaction [J]. Applied Geochemistry, 2009, 24(4): 543-554.
- [28] LEE DAVISSON M, CRISS R E. Na-Ca-Cl relations in basinal fluids [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(15): 2743-2752.
- [29] 曹家鑫, 何方方, 朱蓉, 等. 梨树断陷营城组砂岩方解石胶结物碳、氧同位素特征[J]. 地质科技情报, 2018, 37(3): 75-80.
- CAO Jiaxin, HE Fangfang, ZHU Rong, et al. Features of carbon-oxygen isotopes in calcite cement from Yingcheng Formation sandstone in Sujiatun-Pijia area of Lishu fault depression [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2018, 37(3): 75-80.
- [30] 曾溅辉, 吴琼, 杨海军, 等. 塔里木盆地塔中地区地层水化学特征及其石油地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 223-229.
- ZENG Jianhui, WU Qiong, YANG Haijun, et al. Chemical characteristics of formation water in Tazhong area of the Tarim Basin and their petroleum geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 223-229.
- [31] 杨晓萍, 裴怪楠. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组浊沸石的形成机理、分布规律与油气关系[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 628-632.
- YANG Xiaoping, QIU Yinan. Formation process and distribution of laumontite in Yanchang Formation (Upper Triassic) of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 628-632.
- [32] 朱国华. 陕北浊沸石次生孔隙砂体的形成与油气关系[J]. 石油学报, 1985, 6(1): 1-8.

- ZHU Guohua. Formation of lomonitic sand bodies with secondary porosity and their relationship with hydrocarbons [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1985, 6(1): 1-8.
- [33] 雷海艳,樊顺,鲜本忠,等. 玛湖凹陷二叠系下乌尔禾组沸石成因及溶蚀机制[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(5): 102-112.
- LEI Haiyan, FAN Shun, XIAN Benzhong, et al. Genesis and corrosion mechanism of zeolite of Lower Urhe Formation of Permian in Mahu Depression[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(5): 102-112.
- [34] 陈少云,杨勇强,邱隆伟,等. 川中地区侏罗系沙溪庙组储层特征及控制因素[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(10): 1597-1610.
- CHEN Shaoyun, YANG Yongqiang, QIU Longwei, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(10): 1597-1610.
- [35] 邹辰,吴永辉,梁兴,等. 渝西地区走滑断裂活动背景下地层水对页岩气富集的控制作用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2023, 42(3): 11-19.
- ZOU Chen, WU Yonghui, LIANG Xing, et al. Control effect of formation water on shale gas enrichment in the background of strike-slip fault activity in western Chongqing[J]. 2023, 42(3): 11-19.
- [36] 熊亮,衡勇. 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)*, 2022, 44(3): 47-58.
- XIONG Liang, HENG Yong. Gas and water distribution and main controlling factors of tight sandstone gas reservoir in Shaximiao Formation, Zhongjiang [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2022, 44(3): 47-58.
- [37] 唐友军,徐文畅,王小娟,等. 川中简阳须家河组地层水化学特征和成因——来自水化学和锶同位素的证据[J]. *断块油气田*, 2024, 31(3): 444-452.
- TANG Youjun, XU Wenchang, WANG Xiaojuan, et al. Hydrochemical characteristics and genesis of Xujiahe Formation formation water in Jianyang, central Sichuan: evidence from hydrochemistry and strontium isotope[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2024, 31(3): 444-452.
- [38] 赵俊威,陈恭洋,赵星,等. 川西新场地区须二段致密砂岩气藏气水分布特征及主控因素[J]. *断块油气田*, 2024, 31(3): 379-386.
- ZHAO Junwei, CHEN Gongyang, ZHAO Xing, et al. Gas-water distribution characteristics and main controlling factors of tight sandstone gas reservoir in the second Member of Xujiahe Formation in Xinchang area, western Sichuan[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2024, 31(3): 379-386.
- [39] 李倩文. 渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组页岩储层润湿性及其主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 1142-1154.
- LI Qianwen. Wettability and its major determinants of shale reservoirs in the Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*[J]. 2024, 45(4): 1142-1154.
- [40] 黄道军,周国晓,杨兆彪,等. 鄂尔多斯盆地深部煤岩气井产出气-水地球化学特征及其地质响应[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(6): 1617-1627.
- HUANG Daojun, ZHOU Guoxiao, YANG Zhaobiao, et al. Geochemical characterization of gas-water output from deep coalrock methane wells in the Ordos Basin and its geological responses. *Oil & Gas Geology*[J]. 2024, 45(6): 1617-1627.
- [41] 曾澌辉,张亚雄,张在振,等. 致密砂岩气藏复杂气-水关系形成和分布主控因素及分布模式[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1067-1083.
- ZENG Jianhui, ZHANG Yaxiong, ZHANG Zaizhen, et al. Complex gas-water contacts in tight sandstone gas reservoirs: Distribution pattern and dominant factors controlling their formation and distribution[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1067-1083.
- [42] 赵力彬,张同辉,杨学君,等. 塔里木盆地库车坳陷克深区块深层致密砂岩气藏气水分布特征与成因机理[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(4): 500-509.
- ZHAO Libin, ZHANG Tonghui, YANG Xuejun, et al. Gas-water distribution characteristics and formation mechanics in deep tight sandstone gas reservoirs of Keshen block, Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(4): 500-509.

(编辑 许 诺)