

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

楼章华¹, 苏一哲¹, 朱蓉¹, 刘一锋¹, 徐士林², 李王鹏²

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:四川盆地新场构造带须家河组二段(须二段)地层水化学特征复杂,矿化度分布范围广,部分井在生产过程中地层水化学特征发生动态变化。因此,利用矿化度、氯镁系数、变质系数和诺瓦克相图等分析了须家河组各层段地层水化学特征,探讨了地层水的动态运移。结果显示:须二段地层水矿化度主要集中在70~110 g/L,氯镁系数大于50,变质系数大于10;须四段地层水矿化度主要集中在50~90 g/L,氯镁系数小于50,变质系数小于10;两者诺瓦克相图也具有明显差异。上述特征可作为地层水分布层系判别指标。须二段大部分井在生产过程中水化学特征较为稳定,表明地层水来源较为一致,以同层水为主;部分井如新856井、新2井、新10-1H井和新5井在生产过程中地层水化学特征发生了显著变化,根据判别指标,其地层水来源发生了变化。新2井和新856井在汶川地震后均有高矿化度、高溴离子浓度雷口坡组海相地层水混入;新10-1H井和新5井在生产过程中有须四段地层水进入,断层可能为地层水的跨层运移提供了通道。

关键词:氯镁系数;变质系数;矿化度;诺瓦克相图;地层水动态变化;须家河组;四川盆地

中图分类号:TE133

文献标识码:A

Dynamic chemical characteristics and origin of formation water in the second member of Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, Sichuan Basin

Lou Zhanghua¹, Su Yizhe¹, Zhu Rong¹, Liu Yifeng¹, Xu Shilin², Li Wangpeng²

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316021, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Formation water from the second member of Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, Sichuan Basin, is chemically complicated and highly variable in salinity, with some wells recording dynamic changes of chemical characteristics of produced waters. This paper discusses the migration of formation water based on a thorough analysis of the chemical characteristics of formation water from each interval of the Xujiahe Formation by using salinity data, chlorine/magnesium ionic ratios, metamorphism coefficients, Novak's phase diagrams and etc. The results show that the formation water of the second member has salinity values ranging between 70 and 110 g/L, chlorine/magnesium ionic ratios greater than 50 and metamorphic coefficients greater than 10; and that of the fourth member has salinity values ranging between 50 and 90 g/L, chlorine/magnesium ionic ratios less than 50 and metamorphism coefficients less than 10. Their Novak's phase diagrams also have obvious differences. These characteristics can be used to determine the stratigraphic origins of formation waters. The produced water from most wells in the second member show relatively stable chemical characteristics, indicating that the waters are sourced from the same stratigraphic interval. However, the produced water from some wells, such as Xin 856, Xin 2, Xin 10-1H and Xin 5, show significant variation of chemical characteristics. Judging by the graphs, the waters are multi-sourced. Alien waters of high salinity and high bromide ion concentration from marine Leikoupo Formation had been detected in wells Xin 2 and Xin 856 after Wenchuan Earthquake. Waters from the fourth member were also observed in wells Xin 10-1H and Xin 5. It is suggested that faults

收稿日期:2020-10-14;修订日期:2021-06-20。

第一作者简介:楼章华(1963—),男,教授,博士生导师,地质流体与油气成藏、保存研究。E-mail:iwr@zju.edu.cn。

通讯作者简介:朱蓉(1974—),女,副研究员,油田水文地质学研究。E-mail:zhurong@zju.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41572110)。

are the most likely pathways for this cross-layer migration of formation water.

Key words: chlorine/magnesium ratio, metamorphism coefficient, salinity, Novák's phase diagram, formation water dynamic change, Xujiahe Formation, Sichuan Basin

四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组气藏是中国天然气勘探开发的重点对象^[1-4],川西坳陷须家河组气藏产气层位埋藏深度普遍较大($>3\ 500\text{ m}$),平均孔隙度小于5%,平均渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,属于典型的深层致密砂岩气藏^[5-10]。须家河组气藏现今气、水分布非常复杂,几乎所有须家河组钻井产气的同时都或多或少有地层水产出,且气、水分布不均。

前人对须家河组地层水研究多侧重于地层水化学特征、成因及与油气的关系等^[11-14]。如宫亚军等通过分析地层水常量离子组成及离子参数,研究了川西须家河组地层水的垂向分布特征^[11];陈冬霞等分析了须家河组二段(须二段)地层水化学资料,认为须二段地层水属于高封闭环境下的地层水^[12]。林耀庭、熊亮等通过诺瓦克相图法分别研究了川中地区和大邑地区须家河组地层水的分布层系^[15-16]。

新场构造带是川西须二段致密砂岩气主要分布区,新场须二段地层水化学呈现出复杂的变化特征,矿化度从 0.05 g/L 到 165 g/L ,变化幅度大。同一口井在不同时间采集的水样,水化学特征也有明显差异,反

映其地层水来源可能发生变化。本文在收集、整理川西新场须家河组共39口井水化学数据的基础上,总结了各层系典型的水化学特征,建立了地层水分布层系判别指标;结合气藏开发生态,分析典型井在开发过程中地层水化学特征的动态变化,判断地层水可能的来源。研究成果对揭示致密砂岩储层地层水成因及其来源具有重要的意义。

1 地质背景

新场构造带位于川西坳陷孝泉背斜向北东东方向延伸的鼻状构造上,西北翼较缓,东南翼略陡,为孝泉一新场复式背斜的局部圈闭(图1)。新场气田是经历了晚侏罗世发展、喜马拉雅运动晚期改造两个阶段而形成的构造-岩性气藏^[17]。研究区分布广泛的高有机质丰度、高品质、厚度大的烃源岩为本区气藏的形成提供了充足的气源^[18]。新场构造带主要产气层段自下而上依次为须二段、须四段、上沙溪庙组和蓬莱镇组等。新场须二段作为须下盆的主要储层,其天然气产

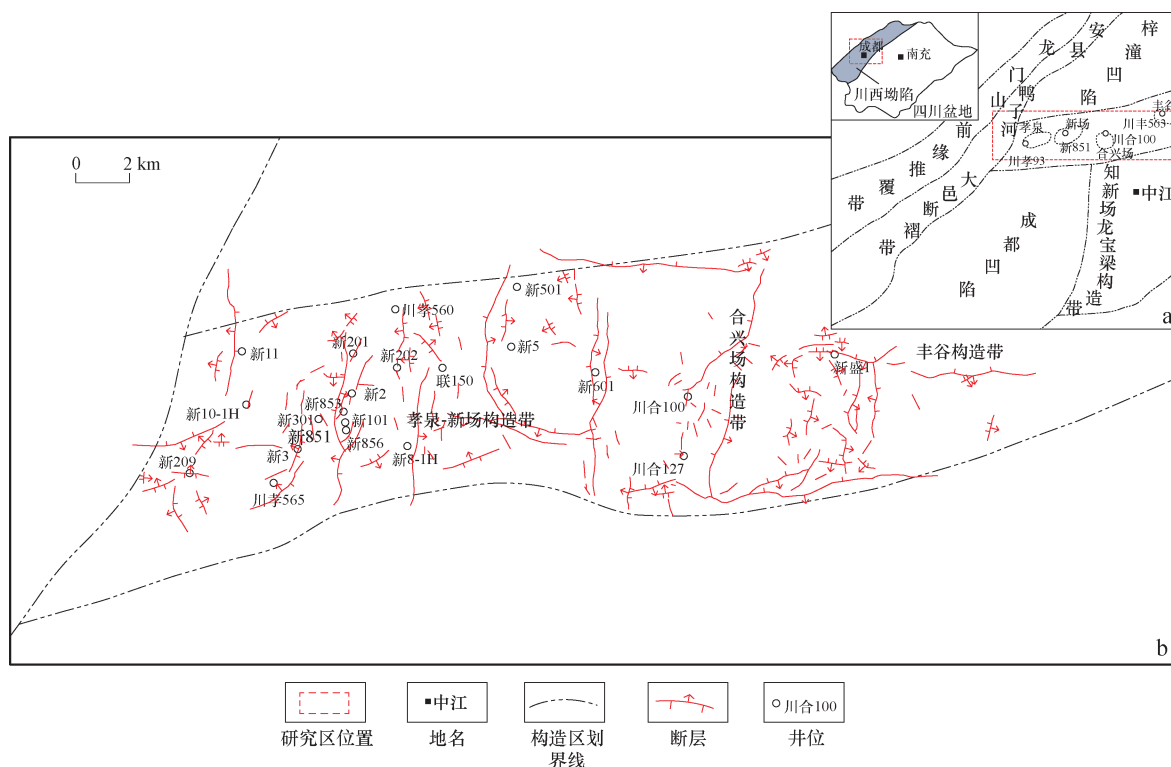


图1 川西坳陷新场构造带位置(a)及井位分布(b)

Fig. 1 Map showing the locations of Xinchang structural belt(a) and distribution of wells(b), Western Sichuan Depression

量在须家河组储层中最为丰富,其主力产层为一砂组($Tx^{2(1)}$)、二砂组($Tx^{2(2)}$)和四砂组($Tx^{2(4)}$),烃源岩主要来自下部马鞍塘组和小塘子组。须家河组下伏地层为雷口坡组海相地层,川西地区雷口坡组除了顶部雷四段部分地层被剥蚀外,整体上发育完全^[19-21]。

新场须二段气-水关系复杂,气井在生产过程中或多或少都会伴随有地层水产出,从测井解释资料来看,须家河组储层内部水层、含气水层、气层等基本不连通,没有形成统一的气-水界面。学者们对须家河组现今气-水关系主要有以下两种解释:第一种观点认为,须家河组早期形成的是气在上、水在下的常规气藏,后来经历了多次构造运动,部分地区由构造高部位变为构造低部位,从而导致原有的气-水界面被破坏,形成现在的复杂状态^[22];第二种观点认为,新场气田是边水气藏,储层成岩作用的不均匀影响形成了一些分布杂乱无章的“残留地层水”,使得现今气-水关系复杂^[23]。须四上亚段气、水分异不彻底,导致储层内部普遍含水,下亚段含气性好于上亚段^[24]。

2 须二段地层水化学特征

新场须二段致密气藏是川西致密气开发的主战场,自2000年10月以来已有33口完钻井。新场地区须二段地层水分布广泛,气水关系复杂。须二段气井产出水矿化度变化大,新851井产出水矿化度仅有0.12~0.46 g/L,联150井产出水矿化度为1.39~7.82 g/L,新856井开采初期矿化度也只有0.09~0.58 g/L。这些矿化度极低的产出水均为 $NaHCO_3$ 型水,据前人研究认为属于凝析水^[25-27]。凝析水是气田开发中的常见现象,是指在地层高温高压条件下,以气

态或雾状液滴方式与天然气共存^[28-29],当采至井筒或地面后由于压力和温度降低才凝聚为液态的水。凝析水矿化度一般小于10 g/L,大部分小于1 g/L^[30]。凝析水并不是真正意义上的地层水,此外除联150井一直产凝析水外,其他产凝析水的井通常只在开采初期短暂出凝析水,之后以产地层水为主。因此,分析地层水化学特征时应将凝析水数据剔除。本文收集并整理了新场须二段、须四段共计39口井水化学数据,排除了凝析水、受泥浆水或压裂液污染等不能真实反映地层水的数据,选取了617个水化学数据,其中须二段22口井448个数据,须四段17口井169个数据。

新场须二段地层水矿化度变化范围较大,最低24.92 g/L(新5井),最高可达165 g/L(新2井),普遍在80~120 g/L,钠氯系数(r_{Na+}/r_{Cl-})为0.74~0.97,脱硫系数 $[r_{SO_4^{2-}}/(r_{SO_4^{2-}} + r_{Cl-})]$ 为0.001~0.97,盐化系数 $[r_{Cl-}/(r_{HCO_3^-} + r_{CO_3^{2-}})]$ 为22.50~577.74,反映地层封闭性整体较好。

大部分井在生产过程中地层水矿化度都稳定在70~110 g/L,但部分井在某个时间段内矿化度会远远低于或者高于这个范围,比较明显的有新856井、新2井、新10-1H井和新5井(图2)。这4口井在生产过程中地层水矿化度都发生了比较明显的变化,导致地层水矿化度变化的原因较多,如注水或酸化压裂等生产工艺因素及水-岩反应、地层水来源发生变化等等^[31-35]。经过井史分析,排除了生产工艺方面的原因;气井生产持续时间相对于水岩反应而言较短,水岩反应对矿化度的影响基本可以忽略,着重考虑生产过程中地层水来源发生变化从而导致矿化度变化,这些“异常”值揭示了须二段地层水可能存在不同来源。对于须二段地层水,可能的来源主要有3个:一是须二段本身;二是

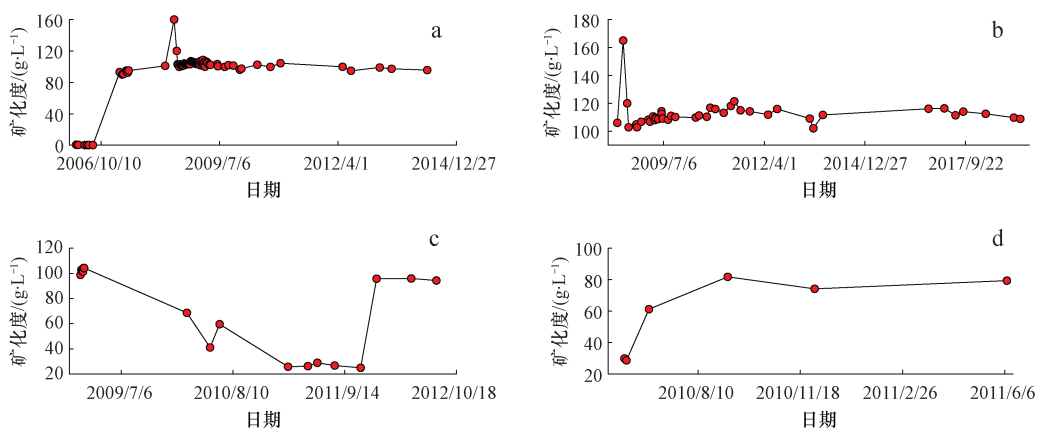


图2 川西坳陷新场构造带上三叠统须二段地层水矿化度随时间变化

Fig. 2 Salinity vs. time, formation water from the second member of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xuchang structural belt,

Western Sichuan Depression

a. 新856井; b. 新2井; c. 新5井; d. 新10-1H井

来自下部地层,如雷口坡组;三是来自上部地层,如须四段。要搞清楚矿化度异常的水到底来自哪个层位,首先要确定每个层位地层水的水化学特征。

3 地层水分层系判定

本文通过对地层水各离子浓度、比例系数等进行分析,发现各层位地层水矿化度、氯镁系数($r_{\text{Cl}^-}/r_{\text{Mg}^{2+}}$)和变质系数 $[(r_{\text{Cl}^-} - r_{\text{Na}^+})/r_{\text{Mg}^{2+}}]$ 差异较大,可以选择这3个参数作为地层水分层系判别指标。然而,氯镁系数和变质系数只涉及到氯离子、钠离子、镁离子这3种离子,但地层水中一般有7种离子(4种阳离子 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 3种阴离子(HCO_3^- , SO_4^{2-} 和 Cl^-),因此本文又引入了诺瓦克系数判定法。

3.1 矿化度、氯镁系数、变质系数判别指标

本文选取须二段新209、川合100、川合127等12口井和须四段新882、川丰563、新203等11口典型井进行对比分析。储层岩性均以中粒岩屑石英砂岩、中粒岩屑砂岩为主,少量细粒岩屑砂岩,局部夹黑色页岩、粉砂质页岩,沉积相以河流点砂坝为主。选井原则一是单井的水化学数据尽可能多,且时间跨度尽可能长;二是每口井在生产过程中水化学特征都较为稳定,这可以说明生产过程中地层水来源没有发生变化。

各井水化学数据如表1,可以看出,须二段地层水矿化度、氯镁系数、变质系数均高于须四段。须二段地层水矿化度平均值在67.19~116.78 g/L,氯镁系数平均值在71.41~204.05,变质系数平均值在9.70~20.80;须四段地层水矿化度平均值在50.22~91.76 g/L,氯镁系数平均值在24.96~36.23,变质系数平均值在3.66~8.36。

通过对研究区大量水化学数据进行对比分析,发现须四段地层水矿化度主要集中在50~90 g/L,氯镁系数通常小于50,变质系数通常小于10;须二段地层水矿化度主要集中在70~110 g/L,氯镁系数大于50,变质系数大于10。

3.2 诺瓦克系数相图判别指标

1996年美国水文地质学家诺瓦克首次提出了诺瓦克系数判定法来判定地层水的来源^[3]。该方法利用地层水中常见阳离子的离子当量关系组成了6组判别系数: Na/Ca , Na/Mg , Mg/K , Ca/Mg , $(\text{Na} + \text{K})/(\text{Ca} + \text{Mg})$ 和 Na/K ,通过对比其所呈相图的形状来判断地层水的来源,具有较强的科学性和实践性^[15]。

诺瓦克使用该方法对美国克林通砂岩气田产出水

来源进行判定,结果成功区分了气田地层水和工业污水^[36]。中国学者也利用诺瓦克系数法进行地层水研究并取得了一些成果,林耀庭通过诺瓦克相图法成功判别了川中地区须家河组地层水的分布层系^[15]。熊亮通过诺瓦克相图法成功判别了大邑地区须家河组地层水的分布层系^[16]。

本次研究分析了39口井共计617个水化学数据。文中选取须二段新3井、新853井和须四段新场22井、新21-1H井进行对比分析。四口典型井经过整理后共计92组水化学数据,分别做诺瓦克相图(图3),由于篇幅原因,每口井只选取6张诺瓦克相图。

从图中可以看出,新3井、新853井代表的须二段地层水和新场22、新21-1H代表的须四段地层水诺瓦克相图差异比较明显,可分别作为须二段和须四段地层水标准诺瓦克相图,并据此标准相图判断地层水来源。此外,深部雷口坡为海相地层,其地层水化学特征与须家河组差异较为明显。雷口坡组地层水矿化度较高且一般会检测出高浓度的溴离子、碘离子等,表现出较典型的海相地层水特征。

4 须二段地层水化学动态变化及其成因

依据前述地层水判别指标,对新场须二段水化学数据进行分析。研究发现,新场须二段地层水化学特征在生产过程中基本保持稳定,其诺瓦克相图相似度高,表明新场须二段地层水来源较为一致,以须二段同层水为主。有部分井在生产过程中地层水化学特征发生变化,诺瓦克相图也出现明显差异(图4),如新856井、新2井、新10-1H井、新5井等。通过分析地层水化学动态变化特征,可以判断开发过程中产出水的成因及其来源,从而针对不同出水来源采取相应的稳气控水措施。此外,依据地层水来源的变化还可以判断断层的连通性。

4.1 须二段地层水化学动态变化及成因

新856井是位于新场构造五朗泉高点的一口评价井,为构造圈闭控制的异常高压、孔隙-裂缝型底水干气气藏。该井地层水矿化度在2008年5月12日之前在90.03~101.02 g/L,汶川地震后地层水矿化度急剧增加,2008年6月17日达到160 g/L(图2),且检测出 Br^- ,浓度高达1445.00 mg/L;2008年7月9日地层水矿化度依然达到120 mg/L, Br^- 浓度1422.20 mg/L;之后地层水矿化度逐渐下降,恢复到地震之前的范围区间, Br^- 浓度也降为0(表2)。地震后两个月内地层水

表 1 川西坳陷新场构造带上三叠统须二段和须四段地层水矿化度、氯镁系数、变质系数对比

Table 1 Statistics of salinity, chlorine – magnesium ratio and metamorphic coefficient of formation waters from the second and fourth members of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, Western Sichuan Depression

地层	井名	水样数量/个	矿化度/(g · L ⁻¹)			氯镁系数			变质系数		
			最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
T ₂ x ²	新 209	2	64.94	69.43	67.19	103.49	111.33	107.42	13.05	14.45	13.76
	川合 100	13	72.27	96.07	86.41	121.70	339.89	204.05	9.23	27.45	17.30
	川合 127	9	71.60	114.60	88.47	50.72	105.52	88.58	9.00	41.24	20.80
	新 11	2	83.17	105.05	94.11	95.86	114.48	105.16	5.23	12.57	8.90
	新 501	4	84.01	111.00	95.58	79.48	123.10	92.59	12.20	26.13	17.10
	新 202	14	94.84	103.04	99.06	45.43	107.14	74.26	6.92	18.22	9.70
	新 853	17	100.30	112.17	104.23	27.66	127.48	73.64	2.58	19.99	9.99
	新 101	1	104.37	104.37	104.37	70.17	70.17	70.17	12.73	12.73	12.73
	新 301	24	100.66	113.89	107.05	62.80	95.78	80.83	5.68	15.25	10.96
	新 3	20	83.60	116.35	107.66	33.33	88.18	58.39	6.03	19.65	10.73
	新 201	20	109.11	121.19	116.78	64.98	78.61	71.41	7.56	12.97	10.06
	川孝 560	4	114.73	120.03	117.33	43.05	51.96	47.24	9.37	12.22	10.80
T ₂ x ⁴	新 882	26	48.04	51.77	50.22	23.46	35.31	29.03	6.96	9.54	8.36
	川丰 563	4	45.17	58.57	53.82	11.39	41.48	24.69	2.28	6.07	3.66
	川孝 560	4	58.59	60.11	59.36	26.90	35.61	31.26	6.24	7.93	7.14
	新 203	2	59.79	66.38	63.09	35.02	37.42	36.23	7.70	8.37	8.04
	新 11	2	50.96	81.41	66.19	35.02	37.42	36.23	6.85	8.73	7.80
	联 116	2	66.88	70.06	68.47	24.65	30.32	27.48	6.37	6.79	6.59
	新场 22	13	60.11	76.13	69.77	27.44	39.44	35.39	3.84	9.15	7.49
	新 22	5	74.86	76.56	75.72	35.81	35.87	35.84	7.29	7.61	7.45
	新 21 – 1H	15	70.79	80.00	77.93	28.11	35.18	32.37	4.41	8.51	6.85
	新 884	9	85.84	89.91	87.77	28.36	31.19	29.92	7.26	8.98	7.92
	新 21 – 4HC1	3	88.87	94.63	91.76	25.07	25.28	25.18	4.39	4.40	4.40

诺瓦克相图也较地震前有明显不同。此外,新 856 井在汶川地震前 2 周内平均每天产水 82.72 m³,汶川地震后两周内平均每天产水 109.70 m³,表明在汶川地震后地层水来源发生了变化,不再是单一的须二段地层水。

新 2 井为新场构造五郎泉高点北翼的一口定向预探井,为构造圈闭控制的异常高压、孔隙-裂缝型底水干气气藏。该井和新 856 井类似,地层水化学特征及诺瓦克相图均在汶川地震前后发生了较为明显的变化(图 4),反映地层水来源发生了变化。新 2 井在汶川地震前 2 周内平均每天产水 63.63 m³,汶川地震后两周内平均每天产水 72.81 m³,产水量也有明显上升。根据地层水化学特征的差异变化,结合诺瓦克相图,推测新 856 和新 2 井在汶川地震后有深部雷口坡组海相地层水混入。

新 5 井是孝泉 – 丰谷构造带罗江高点的一口预探井,为高压、裂缝 – 孔隙型低产含水气层,该井地层水矿化度在 2009 年 2 月 10—23 日普遍在 98.80 ~ 104.28 g/L(图 2),氯镁系数 50.56 ~ 71.66,变质系数 9.82 ~ 12.09;2010 年 2 月 26 日矿化度降至 68.67 g/L

(图 2),一直到 2011 年 11 月 10 日矿化度都较低,介于 24.91 ~ 68.67 g/L(图 2),氯镁系数 11.69 ~ 33.91,变质系数 5.36 ~ 8.56,地层水化学特征接近须四段地层水;之后地层水矿化度上升,达到 94.36 ~ 95.98 g/L(图 2),氯镁系数 69.19 ~ 97.97,变质系数 7.68 ~ 11.29(图 5)。此外,2010 年 2 月 26 日—2011 年 11 月 10 日期间地层水诺瓦克相图也发生明显变化(图 4),和须四段地层水诺瓦克相图非常相似。根据地层水化学特征的变化,结合诺瓦克相图,推测新 5 井在该时间段内有浅部须四段地层水混入。

新 10 – 1H 井是孝泉 – 丰谷构造带七郎庙高点西南翼的一口预探井,为低产气层。该井地层水在 2010 年 5 月 30 日矿化度为 29.82 g/L(图 2)、氯镁系数 24.34、变质系数 2.96,2010 年 6 月 1 日矿化度为 28.58 g/L(图 2)、氯镁系数 23.86、变质系数 3.66,地层水化学特征接近须四段地层水,这两个水样的诺瓦克相图也和后期水样有明显差异(图 4);2010 年 6 月 23 日—2011 年 6 月 8 日地层水矿化度为 61.20 ~ 79.38 g/L,氯镁系数为 101.26 ~ 123.96,变质系数为 13.19 ~

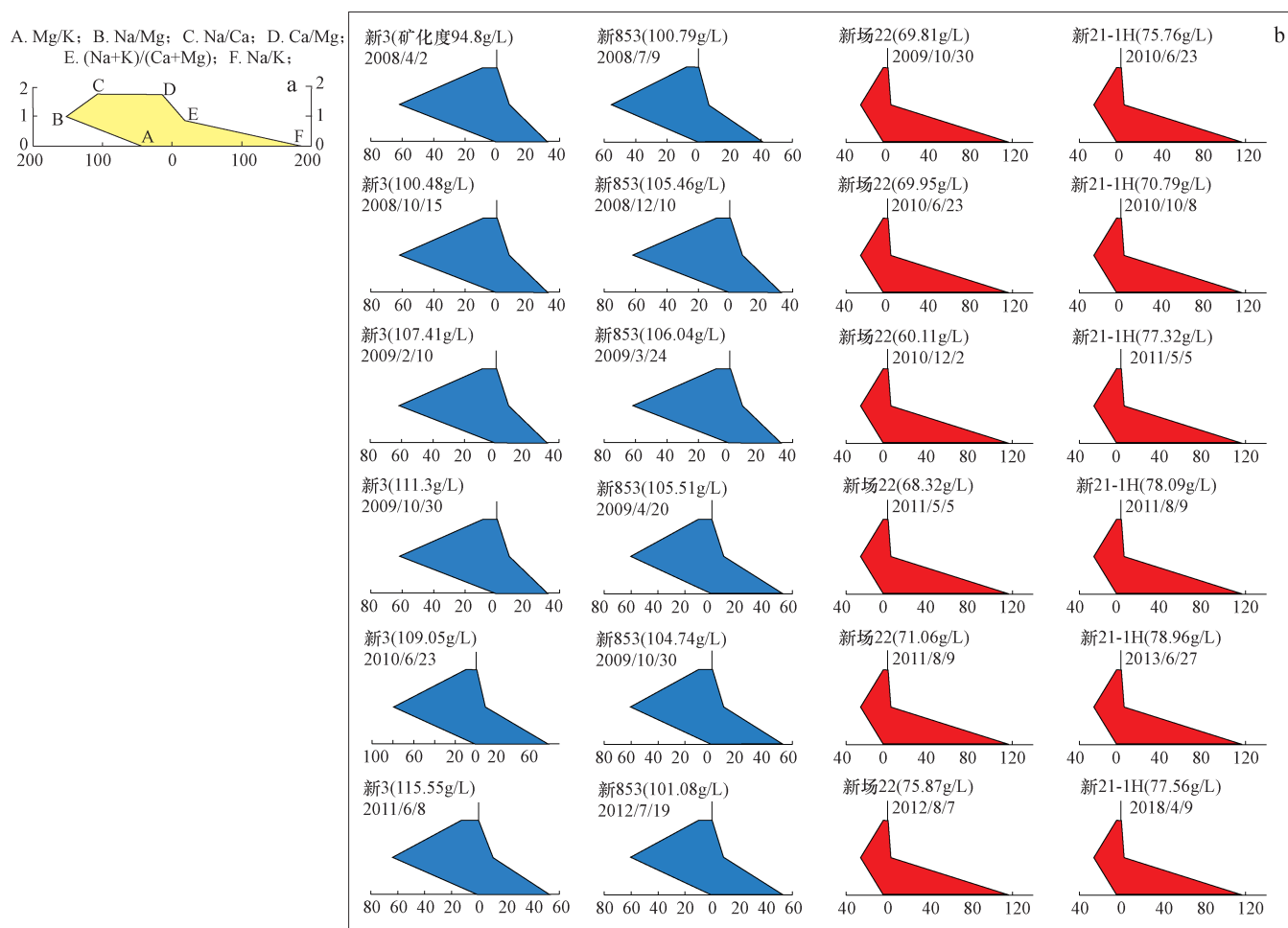


图3 川西坳陷新场构造带典型井上三叠统须二段和须四段地层水诺瓦克相图对比

Fig.3 Novák graphs of formation waters from wells producing from the second and fourth members of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, Western Sichuan Depression

a. 诺瓦克示意图; b. 新3井、新853井、新场22井、新21-1H井诺瓦克相图

19.80(图5)。根据地层水化学特征的变化,结合诺瓦克相图,推测新10-1H井在2010年5月30日—6月1日期间有浅部须四段地层水混入。

4.2 地层水运移通道

从新856井产能曲线(图6)可以看出,汶川地震使得该井原有的稳定生产状态被打破,地层能量下降导致油压、套压显著降低,日产气从 $22.49 \times 10^4 \text{ m}^3$ 降至 $11 \times 10^4 \text{ m}^3$,产水量则在一个月由地震前的 $79.2 \text{ m}^3/\text{d}$ 急剧上升到 $140 \text{ m}^3/\text{d}$,水气比大幅升高。结合水化学动态变化特征,明显揭示有新的来源地层水进入产层。川西新场须二段属于致密砂岩储层,具有“低孔-低渗”的特征。晚三叠世以来经历了多期构造运动,在须二段顶部共计形成20余条大断层,印支运动晚期主要形成EW向断裂,燕山中、晚期主要形成NE-SW向断裂,喜马拉雅期多形成SN向断裂^[1,37]。

断裂及其周缘的裂缝可能是地层水垂向跨层运移的主要通道。根据地震资料解释,新856井附近分布有3条断层(图6):西侧一条SN向喜马拉雅期大断层F1,长度5737m,断裂面向东倾斜, $\text{Tx}^{(2)}$ 距离断层396m、 $\text{Tx}^{(4)}$ 距离断层345m,断深向上至须4段底、向下至雷口坡组;东侧一条SN向喜马拉雅期小断层F2,断深向上至须2顶、向下至须2段中-下亚段,未断至雷口坡组;东侧还发育一条SN向喜马拉雅期大断层F3,长度3450m,断裂面向西倾斜, $\text{Tx}^{(2)}$ 距离断层582m、 $\text{Tx}^{(4)}$ 距离断层486m,断深向上至须三段、向下至雷口坡组。推测由于汶川地震的影响,导致断至雷口坡组的断层重新活动,地层能量下降,深部雷口坡组海相地层水沿着断层上涌进入须二段,使得须二段地层水矿化度急剧升高且检测出高浓度溴离子,产水量及水气比大幅上升;之后地震影响逐渐减弱,断层通道再次关闭,须二段地层水化学特征逐渐恢复到震前的水平,

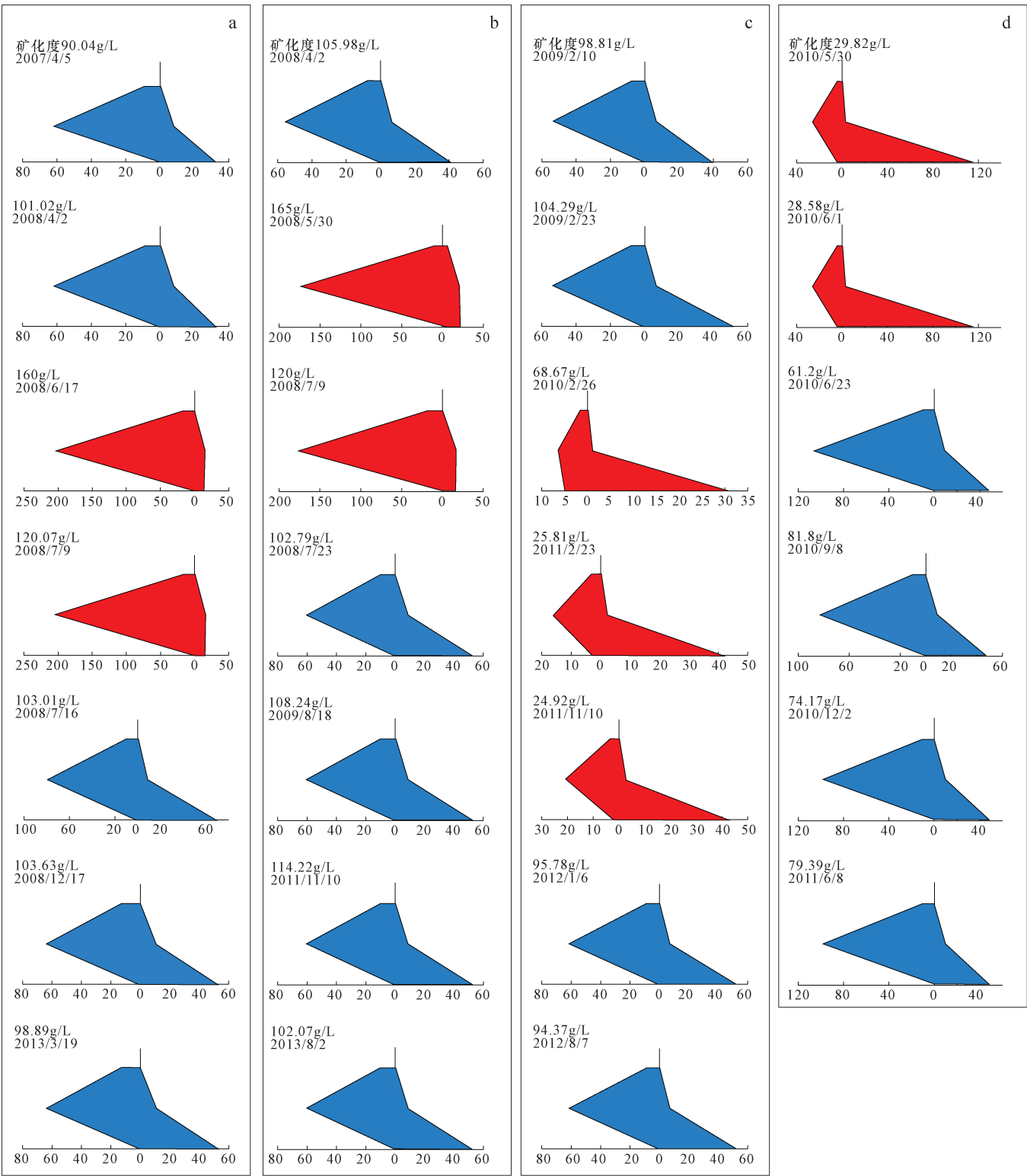


图 4 川西坳陷新场构造带典型井上三叠统须家河组二段地层水诺瓦克相图(红色为发生变化的诺瓦克相图)

Fig. 4 Novák's phase diagrams of waters from typical wells in the second member of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, Western Sichuan Depression (red graphs indicating changes occurred in water chemistry)

a. 新 856 井; b. 新 2 井; c. 新 5 井; d. 新 10-1H 井

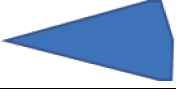
钻井生产状态也逐渐稳定。

新 2 井西侧发育一条形成于喜马拉雅期、长 5 737 m 的 SN 向大断层,断裂面向东倾斜,新 2 井 2

砂组距离该断层 386 m, 3 砂组距离该断层 372 m, 断层断深向上至须四段下部、向下至雷口坡组。新 2 井在汶川地震前后,其生产状态及地层水化学特征均发

表 2 川西坳陷新场构造带新 856 和新 2 井上三叠统须二段地层水化学特征

Table 2 Chemical characteristics of formation waters from Xin 856 and Xin 2 wells from the second member of Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, Western Sichuan Basin Depression

井号	采样时间	水样数量/个	矿化度/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	F^- 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Br^- 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	诺瓦克相图
新 856	2007/3/15— 2008/4/2	10	90.03 ~ 101.02	0	0	
新 856	2008/6/17	1	160.00	11.10	1 445.00	
新 856	2008/7/9	1	120.06	22.20	1 422.20	
新 856	2008/7/16— 2014/4/24	55	94.77 ~ 108.52	0	0	
新 2	2008/4/2	1	105.98	0	0	
新 2	2008/5/30	1	165.00	11.90	1 370.00	
新 2	2008/7/9	1	120.00	11.80	1 125.00	
新 2	2008/7/23— 2019/3/20	39	102.83 ~ 114.31	0	0	

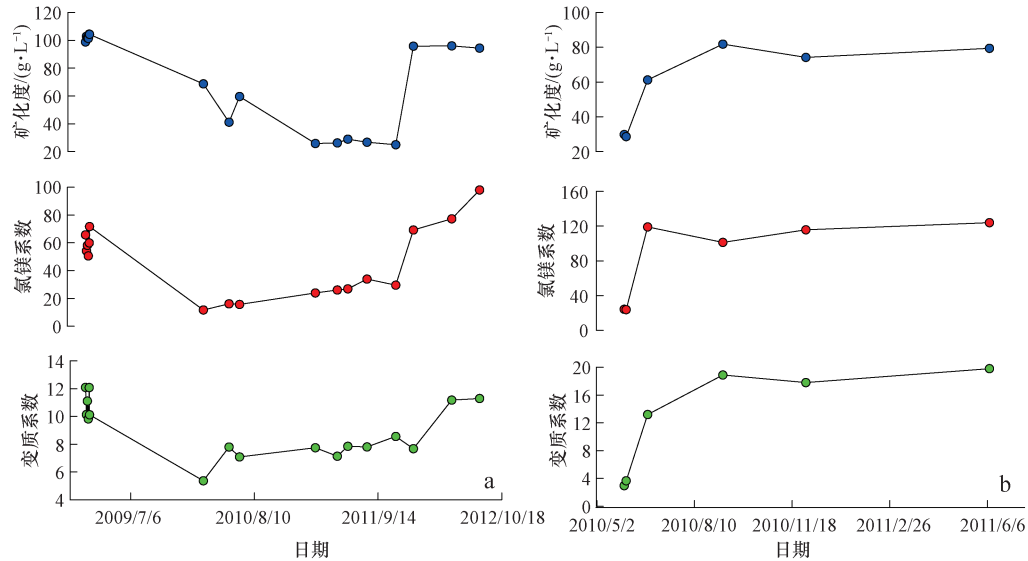


图 5 川西坳陷新场构造带新 5 井(a)和新 10-1H 井(b)上三叠统须二段地层水矿化度、变质系数和氯镁系数随时间变化
Fig.5 Salinity, metamorphic coefficient and chlorine/magnesium ratio vs. time, samples from Xin 5(a) and Xin 10-1H(b) wells in the second member of the Upper Triassic Xujiahe Formation, Xinchang structural belt, Western Sichuan Depression

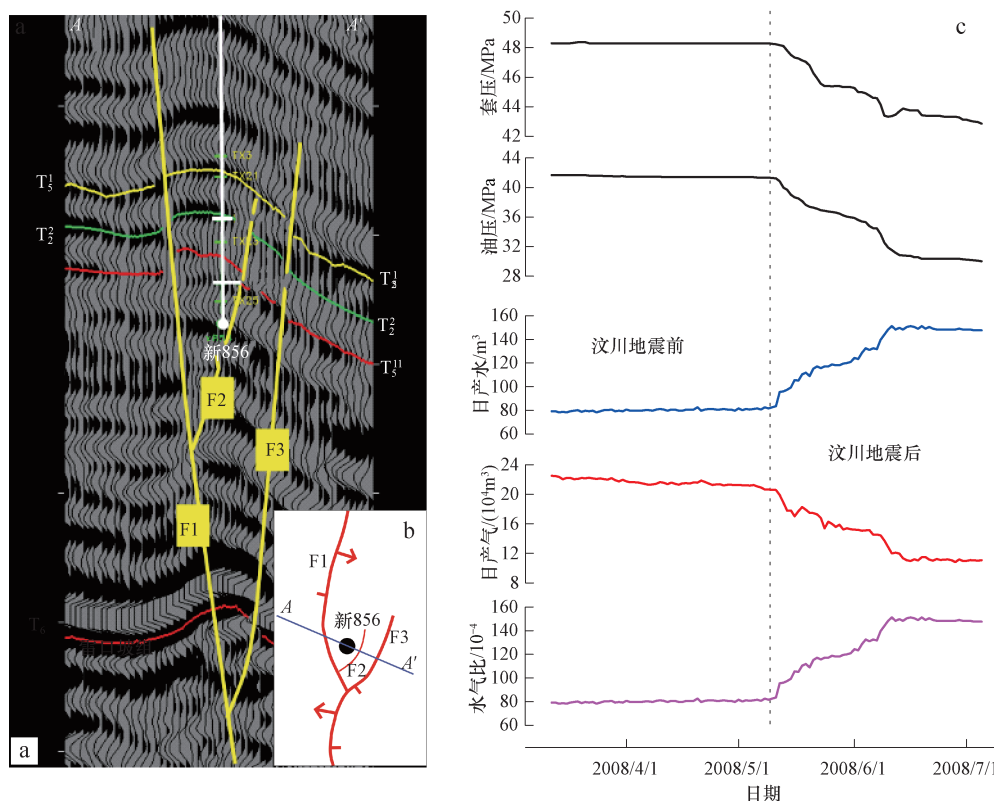


图6 川西坳陷新场构造带新856井附近断层分布及产能曲线(数据来源于中石化石油勘探开发研究院四川中心)

Fig.6 Seismic section (a) and map (b) showing distribution of faults near Well Xin 856 and productivity curves of the well (c), Xinchang structural belt, Western Sichuan Depression (courtesy of Sichuan Center of Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute)

a. 断层剖面示意图; b. 断层位置示意图; c. 新856井产能曲线

生显著变化,推测同样由于汶川地震影响导致断层活动开启,深部雷口坡组海相地层水沿断层进入须二段。

新5井西侧176 m处发育一条形成于喜马拉雅期的SN向断层,断层向上断至须四段,推测该断层为新5井须四段地层水进入须二段的运移通道。同样,新10-1H井西侧48 m处发育了一条形成于喜马拉雅期的SN向断层,断层向上断至须四段,推测该断层为新10-1H井地层水跨层运移的主要通道。

5 结论

1) 须四段地层水矿化度主要集中在50~90 g/L,氯镁系数通常小于50,变质系数通常小于10;须二段地层水矿化度主要集中在70~110 g/L,氯镁系数通常大于50,变质系数通常大于10。两者地层水诺瓦克相图差异也较为明显。因此,矿化度、氯镁系数、变质系数和诺瓦克相图可作为地层水分布层系判别指标。

2) 新场须二段地层水来源较为一致,以须二段同层水为主。部分井生产过程中地层水化学特征发生动

态变化,反映其地层水来源发生变化。新856井和新2井在汶川地震后有深部雷口坡组海相地层水混入,新5井和新10-1H井有浅部须四段地层水混入。

参 考 文 献

- [1] 汪虎,何治亮,张永贵,等. 四川盆地海相页岩储层微裂缝类型及其对储层物性影响[J]. 石油与天然气地质,2019,40(1):41-49.
Wang Hu, He Zhiliang, Zhang Yonggui, et al. Microfracture types of marine shale reservoir of Sichuan Basin and its influence on reservoir property [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 41-49.
- [2] 吕文雅,苗凤彬,张本键,等. 四川盆地剑阁地区须家河组致密砾岩储层裂缝特征及对天然气产能的影响[J]. 石油与天然气地质,2020,41(3):484-491.
Lyu Wenya, Miao Fengbin, Zhang Benjian, et al. Fracture characteristics and their influence on natural gas production: A case study of the tight conglomerate reservoir in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Jian'ge area, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 484-491.
- [3] 唐自成,钟大康,王威,等. 川东北元坝地区须家河组三段钙屑砂岩孔隙类型及地质意义[J]. 石油与天然气地质,2019,40(5):1115-1125.

- Tang Zicheng, Zhong Dakang, Wang Wei, et al. Pore types and geological significance of calcarenaceous sandstones in the 3rd member of Xujiahe Formation in Yuanba area, Northeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 1115–1125.
- [4] 胡东风, 王良军, 黄仁春, 等. 四川盆地中国石化探区油气勘探历程与启示[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(3): 283–290.
- Hu Dongfeng, Wang Liangjun, Huang Renchun, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Sichuan Basin: A case study on Sinopec Exploration Areas [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(3): 283–290.
- [5] 何登发, 孙方源, 翟咏荷, 等. 鄂尔多斯盆地西缘石沟驿向斜的形成演化与致密砂岩气成藏模式[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 370–390.
- He Dengfa, Sun Fangyuan, Zhai Yonghe, et al. Syncline development and tight sandstone gas accumulation model in Shigouyi area at western margin of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 370–390.
- [6] 李进步, 李娅, 张吉, 等. 苏里格气田西南部致密砂岩气藏资源评价方法及评价参数的影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(4): 730–743.
- Li Jinbu, Li Ya, Zhang Ji, et al. Mingming. Resource evaluation method and influence factors of its parameters for tight sand gas reservoir in southwestern Sulige gas field [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 730–743.
- [7] 唐大海, 谭秀成, 王小娟, 等. 四川盆地须家河组致密气藏成藏要素及有利区带评价[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(3): 40–46.
- Tang Dahai, Tan Xiucheng, Wang Xiaojuan, et al. Tight gas accumulation elements and favorable zone evaluation of Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(3): 40–46.
- [8] 林建力, 张宪国, 林承焰, 等. 岩相约束下的深层致密砂岩气藏储层演化特征[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 886–899.
- Lin Jianli, Zhang Xianguo, Lin Chengyan, et al. Diagenetic evolution characteristics constrained by lithofacies in deep tight sand gas reservoir [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 886–899.
- [9] 陈朝兵, 杨友运, 邵金辉, 等. 鄂尔多斯东北部致密砂岩气藏地层水成因及分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(2): 313–325.
- Chen Zhaobing, Yang Youyun, Shao Jinhui, et al. Origin and distribution of formation water in tight sandstone reservoirs in the northeastern Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(2): 313–325.
- [10] 李蒙, 商晓飞, 赵华伟, 等. 基于 likelihood 地震属性的致密气藏断裂预测——以四川盆地川西坳陷新场地区须二段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(6): 1299–1309.
- Li Meng, Shang Xiaofei, Zhao Huawei, et al. Prediction of fractures in tight gas reservoirs based on likelihood attribute—A case study of the 2nd member of Xujiahe Formation in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(6): 1299–1309.
- [11] 宫亚军, 沈忠民, 刘四兵, 等. 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*, 2010, 30(1): 72–74.
- Gong Yajun, Shen Zhongmin, Liu Sibing, et al. Geochemical characteristics of formation water of Xujiahe Formation in Xinchang area of Western Sichuan depression [J]. *Sichuan Journal of Geology*, 2010, 30(1): 72–74.
- [12] 陈冬霞, 庞雄奇, 李林涛, 等. 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*, 2010, 24(6): 1117–1125.
- Chen Dongxia, Pang Xiongqi, Li Lintao, et al. Gas water distribution characteristics and genetic mechanism of Upper Triassic Xu2 member in the middle section of Western Sichuan depression [J]. *Modern geology*, 2010, 24(6): 1117–1125.
- [13] 吴小奇, 罗开平, 王萍, 等. 川西坳陷新场气田须家河组五段流体赋存状态[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1068–1078.
- Wu Xiaoqi, Luo Kaiping, Wang Ping, et al. Fluid occurrence state of the fifth member of Xujiahe Formation in Xinchang gas field of Western Sichuan depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1068–1078.
- [14] 刘四兵, 沈忠民, 刘昊年, 等. 川西坳陷中段上三叠统须家河组水岩相互作用机制[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 47–58.
- Liu Sibing, Shen Zhongmin, Liu Haonian, et al. Water rock interaction mechanism of Upper Triassic Xujiahe Formation in the middle section of Western Sichuan depression [J]. *Acta petrologica Sinica*, 2013, 34(1): 47–58.
- [15] 林耀庭, 何金权, 赵泽君. 诺瓦克水化学系数在川中地区上三叠统气田(卤)水产层判别的应用及意义[J]. *四川地质学报*(3): 146–148.
- Lin Yaoting, He Jinquan, Zhao Zejun. The application and significance of novak hydrochemical coefficient in the identification of Upper Triassic gas field (brine) aquatic layers in Central Sichuan [J]. *Journal of Sichuan Geology*(3): 146–148.
- [16] 李天宇, 靳军, 田英, 等. 准噶尔盆地西北缘地层水化学特征及与油气保存关系[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(6): 972–980.
- Li Tianyu, Jin Jun, Tian Ying, et al. Chemical characteristics of formation water and the relationship with oil and gas preservation on northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(6): 972–980.
- [17] 邓虎成, 周文, 周秋媚, 等. 新场气田须二气藏天然裂缝有效性定量表征方法及应用[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 1087–1097.
- Deng Hucheng, Zhou Wen, Zhou Qiumei, et al. Quantitative characterization method and application of natural fracture effectiveness in Xu2 gas reservoir, Xinchang gas field [J]. *Acta petrologica Sinica*, 2013, 29(3): 1087–1097.
- [18] 邓宾, 何宇, 黄家强, 等. 前陆盆地形成与演化砂箱物理模拟启示——以四川盆地西部龙门山为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 401–415.
- Deng Bin, He Yu, Huang Jiaqiang, et al. Analogue modeling insights to foreland basin growth: A case study on the Longmenshan thrust belt in western Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 401–415.
- [19] 李国蓉, 刘正中, 谢子潇, 等. 四川盆地西部雷口坡组非热液成因鞍形白云石的发现及意义[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 164–176.
- Li Guorong, Liu Zhengzhong, Xie Zixiao, et al. Discovery of non-hydrothermal saddle-shaped dolomite in Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin and its significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 164–176.

- (1):164-176.
- [20] 周凌方,钱一雄,宋晓波,等. 四川盆地西部彭州气田中三叠统雷口坡组四段上亚段白云岩孔隙表征、分布及成因[J]. 石油与天然气地质,2020,41(1):177-188.
- Zhou Lingfang, Qian Yixiong, Song Xiaobo, et al. Characteristics, distribution and origin of dolomite reservoir in the upper Lei 4 member of the Middle Triassic, Pengzhou gas field, western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1):177-188.
- [21] 孔强夫,杨才,李浩,等. 基于图论聚类和最小临近算法的岩性识别方法——以四川盆地西部雷口坡组碳酸盐岩储层为例[J]. 石油与天然气地质,2020,41(4):884-890.
- Kong Qiangfu, Yang Cai, Li Hao, et al. A lithology recognition method based on multi-resolution graph-based clustering and K-Nearest Neighbor: A case study from the Leikoupo Formation carbonate reservoirs in western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4):884-890.
- [22] Tokunaga T, Mogi K, Matsubara O. Buoyancy and Interfacial Force Effects on Two-Phase Displacement Patterns: An Experimental Study[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(1):65-74.
- [23] 曾辉辉,金之钧. 油气二次运移和聚集物理模拟[M]. 北京:石油工业出版社,2000.
- Zeng tanhui, Jin Zhijun. Physical simulation of secondary migration and accumulation of oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [24] 王睿婧. 新场气田须四气藏气水分布特征研究[D]. 成都:成都理工大学,2012.
- Wang Ruijing. Study on gas water distribution characteristics of xusi gas reservoir in Xinchang gas field [D]. Chengdu: Chengdu University of technology, 2012.
- [25] 舒志国,周林,李雄,等. 四川盆地东部复兴地区侏罗系自流井组东岳庙段陆相页岩凝析气藏地质特征及勘探开发前景[J]. 石油与天然气地质,2021,42(1):212-223.
- Shu Zhiguo, Zhou Lin, Li Xiong, et al. Geological characteristics of gas condensate reservoirs and their exploration and development prospect in the Jurassic continental shale of the Dongyuemiao Member of Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1):212-223.
- [26] 薛永安,王奇,牛成民,等. 渤海海域渤中凹陷渤中 19-6 深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J]. 石油与天然气地质,2020,41(5):891-902.
- Xue Yong'an, Wang Qi, Niu Chengmin, et al. Hydrocarbon charging and accumulation of BZ 19-6 gas condensate field in deep buried hills of Bozhong Depression, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5):891-902.
- [27] 胡安文,王德英,于海波,等. 渤海湾盆地渤中 19-6 凝析气田天然气成因及油气成因关系认识[J]. 石油与天然气地质,2020,41(5):903-912.
- Hu Anwen, Wang Deying, Yu Haibo, et al. Genesis of natural gas and genetic relationship between the gas and associated condensate in Bozhong 19-6 gas condensate field, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5):903-912.
- [28] 赵永胜,周文. 川西坳陷须二气藏凝析水地球化学特征及成因初探[J]. 天然气地球科学, 1995(1):30-33.
- Zhao Yongsheng, Zhou Wen. Geochemical characteristics and origin of condensate water in Xu'er gas reservoir in West Sichuan Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 1995(1):30-33.
- [29] 刘林玉,柳益群,李文厚,等. 碳酸盐岩气藏出水特征分析——以华北油田苏 4 气藏为例[J]. 石油与天然气地质,2004(3):324-327+332.
- Liu Linyu, Liu Yiqun, Li Wenhui, et al. Analysis of water production characteristics of carbonate gas reservoirs——Taking the Su 4 gas reservoir of Huabei Oilfield as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2004(3):324-327+332.
- [30] 庞河清,匡建超,罗桂滨,等. 川西新场气田须二气藏水体动态分布与水化学特征[J]. 天然气地球科学,2012,23(1):190-197.
- Pang Heqing, Kuang Jianchao, Luo Guibin, et al. Water dynamic distribution and hydrochemical characteristics of Xu2 gas reservoir in Xinchang gas field, Western Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1):190-197.
- [31] Liu Shan, Qi Shihua, Luo Zhaohui, et al. The origin of high hydrocarbon groundwater in shallow aquifer: experimental evidences from water-rock interaction. [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(31):32574-32588.
- [32] Yu H T, Ma T, Du Y, et al. Genesis of formation water in the northern sedimentary basin of South China Sea: Clues from hydrochemistry and stable isotopes (D, 18 O, 37 Cl and 81 Br) [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 57-65.
- [33] Irén Varsányi, Lajos Kovács. Origin, chemical and isotopic evolution of formation water in geopressured zones in the Pannonian Basin, Hungary [J]. Chemical Geology, 2009, 264(1-4):187-196.
- [34] Li H, Cai C. Origin and evolution of formation water from the Ordovician carbonate reservoir in the Tazhong area, Tarim Basin, NW China [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2016: S0920410516306088.
- [35] Pang J, Pang Z, Lv M. Geochemical and isotopic characteristics of fluids in the Niutuozen geothermal field, North China [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(1):12.
- [36] Novak S A, Eckstein Y. Hydrochemical Characterization of Brines and Identification of Brine Contamination in Aquifers [J]. Groundwater, 1988, 26, 317-324.
- [37] 邓莉,刘君龙,钱玉贵,等. 川西地区龙门山前带侏罗系物源与沉积体系演化[J]. 石油与天然气地质,2019,40(2):380-391.
- Deng Li, Liu Junlong, Qian Yugui, et al. Provenance and sedimentary system of the Jurassic successions in the front of Longmen Mountain in western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2):380-391.

(编辑 张亚雄)