

文章编号:0253-9985(2012)05-0802-09

苏里格气田西区致密砂岩储层地层水分布特征

王晓梅^{1,2}, 赵靖舟², 刘新社³, 范立勇³

(1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065;
3. 中国石油 长庆油田分公司, 陕西 西安 710021)

摘要:鄂尔多斯盆地苏里格气田西区正常地层水的判别标准为:矿化度 ≥ 50 g/L, 钠氯系数($r_{\text{Na}^+}/r_{\text{Cl}^-}$) < 0.5 , 钠钙系数($r_{\text{Na}^+}/r_{\text{Ca}^{2+}}$) < 1 , 压裂液返排率 $\geq 100\%$ 。通过地层水化学特征、氢氧同位素和微量元素溴的综合分析认为,苏里格气田西区地层水来源于经过了强烈水-岩作用和蒸发浓缩作用的陆相沉积成因水。确认苏里格气田上古生界地层水封闭条件好,有利于天然气聚集和保存。进一步结合该区烃源岩、储层和盖层等成藏要素分析认为,该区地层水主要是弱动力成藏过程中的残余地层水,复杂的气-水分布源于低生烃强度和低构造位置背景下储层强非均质性和微构造的共同作用;而盆地东部的高矿化度地层水与奥陶纪盐岩的水-岩作用密切相关。

关键词:气-水分布;致密砂岩;地层水;苏里格气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:121.1

文献标识码:A

Distribution of formation water in tight sandstone reservoirs of western Sulige gas field, Ordos Basin

Wang Xiaomei^{1,2}, Zhao Jingzhou², Liu Xinshe³ and Fan Liyong³

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;
2. School of Earth Sciences and Engineering of Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;
3. PetroChina Company Limited Changqing Oilfield Branch, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: The criteria for an acceptable formation watercut level in the western Sulige gasfield in Ordos Basin can be summarized as salinity ≥ 50 g/L, sodium-chlorine ratio < 0.5 , sodium-calcium ratio < 1 and fracturing fluid flowback rate $\geq 100\%$. Based on a comprehensive analysis of water formation chemical characteristics, hydrogen and oxygen isotopes as well as trace element "Br", the paper concludes that the formation water in the western Sulige gasfield was of continental sedimentary origin and experienced extensive water-rock interaction and evaporation processes. The analysis also indicates that sealing condition for the formation water in the Upper Paleozoic is good, thus which is favorable for gas accumulation and preservation. Further analysis in combination with consideration of hydrocarbon accumulation elements such as source rocks, reservoir and cap rocks reveals that the formation water is residual water from the process of weak dynamic hydrocarbon accumulation. The complicated gas-water distribution pattern is caused by reservoir heterogeneity and microstructures on the background of low hydrocarbon-generating intensity and low tectonic position. The formation water of high salinity in the eastern Ordos Basin is suggested to be related to the water-rock process of the Ordovician salinestone.

Key words: gas-water distribution, tight sandstone, formation water, Sulige gas field, Ordos Basin

致密砂岩油气藏在国内外分布广泛,占有很大
的油气资源量和储量,北美加拿大阿尔伯达盆

地、美国大绿河盆地等亦发现了大量的致密砂岩
天然气藏^[1-3]。鄂尔多斯盆地苏里格气区是中

收稿日期:2011-08-06;修订日期:2012-08-31。

第一作者简介:王晓梅(1975—),女,博士研究生,石油与天然气地质。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05007-004)。

国最大的非常规连续型致密砂岩大气区^[4]。目前,对鄂尔多斯盆地苏里格气田西区地层水的赋存特征和成藏机理尚缺乏系统研究和深入认识。早期观点认为,鄂尔多斯盆地上古生界气-水宏观分布上显示出盆地边缘含水、盆地中央普遍含气的趋势,含气范围内零星产水^[5-9]。但是,伴随着勘探程度的加大,盆地内部尤其是苏里格气田西区出现了大量试气井产水,气藏内无统一气水界面,气水分布十分复杂^[10]①。尽管前人对苏里格地区地层水展开了一定程度的研究^[11-13],由于大部分试气井都是压裂增产措施之后,在研究中忽略了试井产水是否能够代表地层水;在复杂气水分布的表象背后,地层水在成藏过程中的所起的作用是什么?事实上,这种复杂的气水分布现象在致密砂岩储层中普遍存在,例如美国的大绿河盆地、中国的四川盆地上三叠统须家河组、松辽盆地青山口组油气藏等^[1,14-15]。基于致密砂岩储层中地层水研究的重要性,2005年AAPG举办的致密砂岩气会议中,Cumella等提出致密砂岩产水的性质和作用是评价和勘探致密砂岩天然气资源中值得深入探索的科学问题之一^[16]。

1 区域地质背景

1.1 沉积构造特征

鄂尔多斯盆地处于华北地台西缘,是一个发育于稳定克拉通盆地上的大型叠合盆地。盆地构造形态总体上表现为盆缘构造发育,盆内为西倾的大型平缓斜坡,平均坡降为3~5 m/km。苏里格气田位于伊陕斜坡北部(图1),发育多排低缓的鼻隆构造^[17]。

鄂尔多斯盆地发展经历了早古生代陆表海、晚古生代滨海平原、中生代内陆湖盆和新生代周边断陷4个阶段^[18]。盆地从晚石炭世本溪期开始下降接受沉积,上古生界太原组和山西组为滨浅海海陆交互相含煤沉积,中、上二叠统为陆相碎屑岩沉积,“广覆式”生烃和“满盆砂”的空间分布格局使盆地内上古生界富集了丰富的致密砂岩天然气资源^[19-20]。

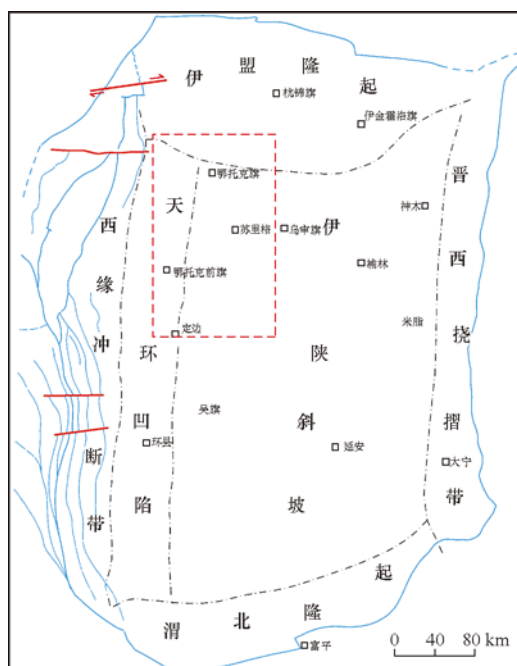


图1 苏里格气田西区位置示意图

Fig. 1 Location map of western Sulige gas field

1.2 勘探开发现状

勘探实践证明,鄂尔多斯盆地上古生界大面积含气,在上古生界本溪组、太原组、山西组、石盒子组及石千峰组均发现工业气藏,发现并探明了苏里格、榆林、乌审旗、子洲和大牛地5个大气田。目前,苏里格气田是我国最大的气田。截止2010年12月,苏里格气田西区主要的产气层石盒子组(盒)8段、山西组(山)1段生产中产水井约占二分之一,产水井主要为气水同产,水产量0.12~72 m³/d,平均单井水产量达7.1 m³/d。高产出水不仅严重制约了天然气产量的提高,同时也给勘探部署工作造成障碍。对于这类高含水、气-水同产的致密砂岩开展地层水分布特征研究不仅对于探索鄂尔多斯盆地上古生界气藏类型、成藏机理等具有重要的科学意义,同时可为同类型致密砂岩储层的勘探开发提供理论依据。

2 致密砂岩正常地层水识别

在勘探过程中,致密砂岩探井的水分析样品往往是压裂后井口取得的水样,这样就不可避免的受到钻井、完井、压裂、酸化等施工过程中的工

① 赵靖舟,王晓梅,曹青,等. 鄂尔多斯盆地上古生界低渗透储层气、水分布规律. 国家科技重大专项专题成果报告,2011.

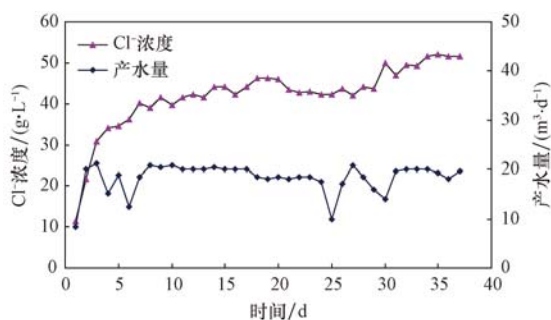


图2 苏里格气田西区 E7 井氯离子和水产量随时间的变化^①

Fig. 2 Cl^- contents and daily water production from the well E7 in western Sulige gas field

程用水及凝析水的影响。例如, E 7 井盒 6 段(3 794.0 ~ 3 799.0 m)第一天产水量为 $8.4 \text{ m}^3/\text{d}$, 水分析 Cl^- 浓度为 11.5 mg/L ; 试产 37 d 后产水量为 $19.6 \text{ m}^3/\text{d}$, Cl^- 浓度为 51.7 mg/L (图 2)。

为了准确的认识地层水化学特征, 研究统计了苏里格气田西区 78 个地层水样的水化学特征(图 3)。统计结果表明, 产水量小于 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 的地层水样品矿化度和水化学特征参数变化范围比较大, 表明正常地层水受干扰较大; 产水量大于 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 的地层水(26 个样)的水化学特征基本稳定, 可作为正常地层水的判识指标。结合达世攀等(2005)的正常地层水识别标准, 明确苏里格气田西区正常地层水的判别标准为: 矿化度 $\geq 50 \text{ g/L}$, 钠氯系数($r_{\text{Na}^+}/r_{\text{Cl}^-}$) < 0.5 , 钠钙系数($r_{\text{Na}^+}/r_{\text{Ca}^{2+}}$) < 1 , 压裂液返排率 $\geq 100\%$ 。

根据达世攀等(2005)的实验结果, SU2 井盒 8 段, 压裂后产气 $4.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 产水 $19.1 \text{ m}^3/\text{d}$, 压裂液返排率 131%, 最后排出液体性质为: $\text{pH} = 6 \sim 7$, Cl^- 浓度为 27.5 g/L , 估算总矿化度为 45.40 g/L 。为了进一步了解地下水的性质, 长庆油田公司第二年继续试水, 采用液氮助排措施, 历时 3 个月累计产水 234 m^3 , 最后排出液体性质为: $\text{pH} = 6 \sim 7$, Cl^- 浓度为 31.7 g/L , 折算矿化度 52.2 g/L ^②。该实验结果进一步证实了上述地层水判别的准确性。

3 地层水水化学特征

3.1 主要离子组成及矿化度

苏里格气田正常地层水总矿化度主要集中在

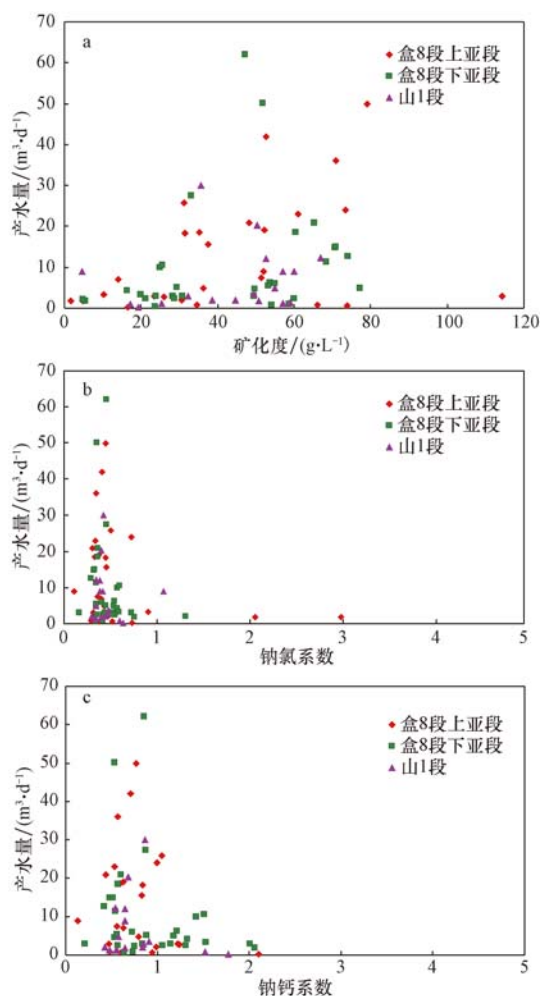


图3 苏里格气田西区水化学特征参数与产水量关系

Fig. 3 Relationship between the water chemical characteristic parameters and the daily water production in western Sulige gas field

a. 矿化度与产水量关系; b. 钠氯系数与产水量关系;
c. 钠钙系数与产水量关系

$50 \sim 114 \text{ g/L}$, 平均为 61.4 g/L , 明显具有卤水的特点。苏里格气田上古生界地层水中阴离子含量最高的是 Cl^- , Cl^- 离子含量高达 $22 \sim 72 \text{ g/L}$, 平均为 37 g/L ; 地层水中阳离子含量最高的是 Ca^{2+} , Ca^{2+} 离子含量达 $7 \sim 27 \text{ g/L}$, 平均为 13 g/L 。苏里格气田地层水主要离子浓度大小顺序为: $\text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ + \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{Ba}^{2+}$ (图 4)。苏里格气田西区地层水山 1 段、盒 8 段上亚段和盒 8 段下亚段地层水化学成分比较一致, 地层水化学类型均为 CaCl_2 型。这就表明苏里格

① 低渗透气田气、水分布问题(内部多媒体). 长庆油田分公司勘探开发研究院, 2009.

② 四川奥吉特油田科技开发有限公司. 苏里格地区石炭—二叠系天然气富集区主控因素与成因. 长庆油田分公司勘探开发研究院, 2008.

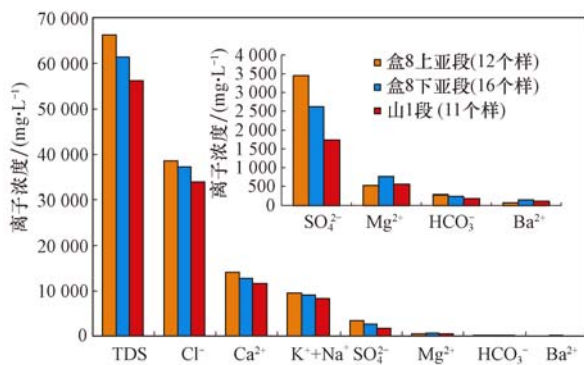


图4 苏里格气田西区上古生界地层水离子含量

Fig. 4 Ion content of formation water in western Sulige gas field

气田上古生界地层水封闭条件好,有利于天然气聚集和保存。

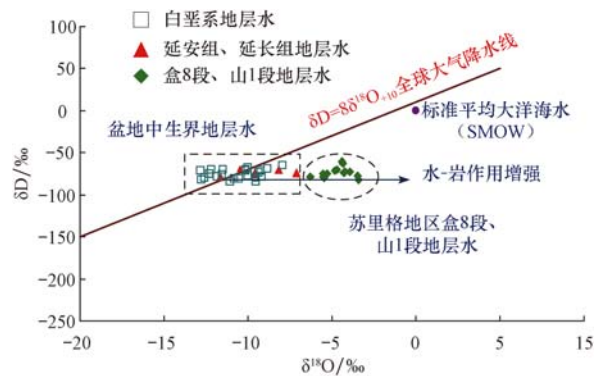
3.2 地层水化学参数

钠氯系数(r_{Na^+}/r_{Cl^-})是地层水变质程度和活动性的重要指标,系数越小反映地层水的封闭性越好;脱硫系数 $[100r_{SO_4^{2-}}/(r_{SO_4^{2-}} + r_{Cl^-})]$ 是地层水氧化还原环境的重要指标,系数越小反映地层水的封闭性越好^[21]。苏里格气田地层水钠氯系数为0.11~0.73,平均值为0.38;钠钙系数($r_{Na^+}/r_{Ca^{2+}}$)为0.13~1.22,平均值为0.64;脱硫系数为0~13.3,均值为1.96。苏里格气田西区上古生界地层水具有低钠氯系数、低脱硫系数和低钠钙系数的特征,反映出地层水良好的封存状态。

4 地层水成因

4.1 氢、氧同位素

同位素水文地质学是20世纪60年代发展起来的一门学科。同位素方法为研究地下水来源提供了有效的手段,有助于从宏观上和微观上阐明水文地质过程的机理。地层水在蒸发过程中,轻同位素富集在气相中,而重同位素则富集在液相中。因而,海水中重同位素多,而参与大气循环的天然水,即雨水、河水、井水等重同位素少^[22]。 $\delta^{18}O$ 和 δD 是稳定同位素,通过地下水和当地大气降水中 $\delta^{18}O$ 和 δD 值的对比,可以初步确定地下水的起因。当气田地层水处于深埋封闭环境,在高温、高压条件下,由于在岩层中滞留时间较长,

图5 鄂尔多斯盆地不同层位地层水 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系统计Fig. 5 Statistical data showing the δD and $\delta^{18}O$ relationship of formation water from different layers in Ordos Basin

便会发生水、岩同位素交换,使气田地层水的氧同位素增高,谓之“氧漂移”。

苏里格地区盒8段、山1段地层水氢氧同位素样品委托国土资源部中南矿产资源监督检测中心检测,地层水 $\delta^{18}O$ 的平均值为 -4.7‰ 。鄂尔多斯盆白垩系、延安和延长组 $\delta^{18}O$ 的平均值分别为 -10.63‰ 和 -9.78‰ ^[23]①,不同层位地层水氧同位素值随埋深增加而增大(图5)。盆地中生界地层水与上古生界地层水氢、氧同位素存在差异,反映了其成因上的差异性。盆地白垩系和靠近露头的延安组和延长组,氢氧同位素与全球大气降水线的氢氧同位素值靠近,分析地下水补给源为大气降水和地表水。苏里格地区盒8段、山1段地层水氢氧同位素明显偏离全球大气降水线,表明地层水水-岩反应增强, ^{18}O 逐渐从矿物相转移到流体相中。地层水氢、氧同位素特征表明,研究区盒8段、山1段地层水起源于经历了强烈水岩作用的陆相沉积成因水。

4.2 溴离子浓度

在地球上,99%的溴元素以溴离子的形式存在于海水中,海水的 Br^- 浓度一般大于 65 mg/L ^[24],大气降水 Br^- 浓度一般小于 0.1 mg/L ,化学家把溴叫作海洋元素,因而溴含量可以作为区别海相与陆相沉积封存水的一个重要标志。同时,溴浓度随地层变老、蒸发浓缩作用增强而具有增大的趋势,所以地层水中溴含量受沉积环境和蒸发浓缩的双重控制。沉积物中不太可能有足够的

① 孙继朝. 鄂尔多斯白垩系自流水盆地地下水赋存规律研究. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所,2004.

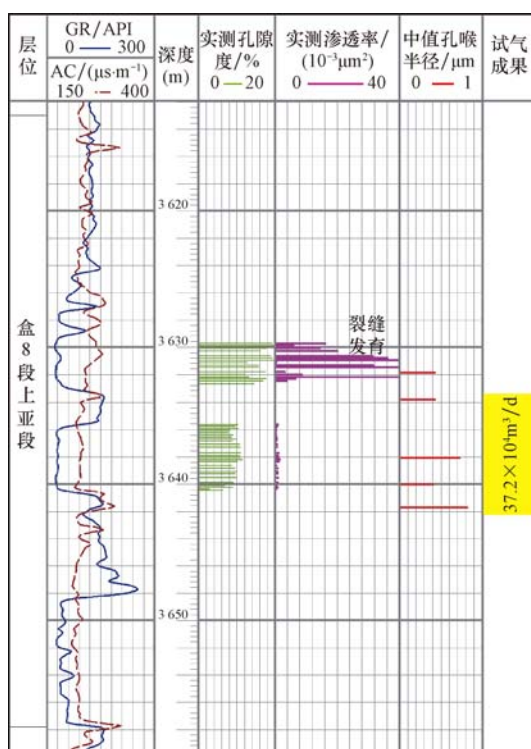


图7 苏里格气田西区 SU120 井盒 8
上亚段地层综合柱状图

Fig. 7 Stratigraphical column of the upper member 8 of the Shihezi Formation in well SU120, western Sulige gas field

况下,具有良好输导通道的 SU120 井仍保持高产。

另外, 尽管鄂尔多斯盆地上古生界整体地层平缓, 局部鼻状隆起的发育使得高孔渗联通砂体内气水发生分异。储层强非均质性和微构造的共同作用, 势必造成研究区低生烃强度背景下复杂的气水分布。

5.3 西部较强的盖层封闭能力表明地层水体为成藏过程中的残余地层水

鄂尔多斯盆地晚二叠世早期广泛发育了一套以湖相为主的碎屑岩沉积,上石盒子组泥岩厚度为 60 ~ 120 m,是上古生界理想的区域性封盖层^[19]。盆地太原组的潮坪泥质岩、山西组的三角洲平原泥质岩和下石盒子组的河漫滩泥质岩构成上古生界良好的局部盖层。

鄂尔多斯盆地上古生界天然气盖层封闭最普遍的机理是物性封闭,其中盖层岩石的排替压力是反映盖层物性封闭能力最有效的评价参数^[32]。目前,一般利用实验测得的泥质岩排替压力与声波时差的函数关系求取出二者的经验公式,利用

各井段的声波时差通过公式计算就可以得到对应泥岩盖层的排替压力值。根据神木地区上古生界具体的排替压力与声波时差的经验关系^[33], 计算得到研究区排替压力在纵向和平面上的变化情况。苏里格西区盒 8 段排替压力整体比较高, 并且有从西向东逐渐降低的趋势, 西部排体压力最高可达 13 MPa。排替压力这种分布格局表明西部气水同产区的保存条件优于东部, 基本可以排除大量产水井是由于天然气散失引起压力降低, 从而导致地层水重新进入储层而形成。根据勘探开发现状, 该区勘探井盒 7—盒 1 段极少有工业气流井, 亦表明天然气散失有限。综合分析认为, 研究区大量的出水井是该区低生烃强度和低构造位置, 形成了成藏过程中天然气不能完全驱替的残余地层水。

5.4 鄂尔多斯盆地东部高矿化度地层水与奥陶纪盐岩密切相关

沉积盆地地层水的化学特性是盆地沉积环境、地层水蒸发浓缩作用、水岩作用、流体流动及其混合作用等的综合记录。根据收集到的鄂尔多斯盆地山2段地层水水化学成分分析,盆地西部和伊盟隆起水化学成分相近,表明地层水具有同源性,而盆地东部山2段地层水矿化度平均达133 g/L,矿化度值明显高于其他地区(图8)。鄂尔多斯盆地东部米脂地区是奥陶纪盐湖的中心,岩盐储藏覆盖全县1 212 km²,盐层厚度达120~148 m,氯化钠含量为93%~98.8%^[34]。因此,从下古生界奥陶系至上古生界,盆地东部由于长期以来的水岩作用,地层水矿化度明显高于盆地其他地区。目前,盆地东部上古生界高矿化度地层

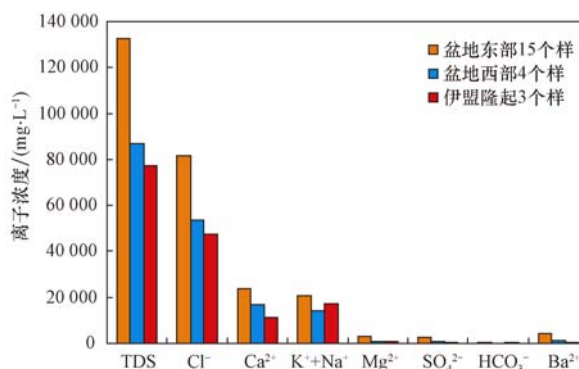


图8 鄂尔多斯盆地不同地区山2段地层水水化学特征对比
Fig. 8 Comparison of chemical characteristics of formation water in member 2 of the Shanxi Formation, Ordos Basin

水正是地层水岩作用和流体垂向流动的反映。

6 结论

1) 致密砂岩探井的水分析样品不可避免的受到钻井、完井、压裂、酸化等施工过程中的工程用水及凝析水的影响。根据试气、试产、压裂和水化学分析资料综合分析,明确苏里格气田西区正常地层水的判别标准为:矿化度 ≥ 50 g/L,钠氯系数 < 0.5 ,钠钙系数 < 1 ,压裂液返排率 $\geq 100\%$ 。苏里格气田上古生界地层水封闭条件好,有利于天然气聚集和保存。

2) 鄂尔多斯盆白垩系、延安组和延长组、上古生界地层水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随埋深增加而增大,地层水微量元素 Br^- 浓度均小于海水中 Br^- 浓度,推断地层水是起源于经过了强烈水岩作用和蒸发浓缩作用的陆相沉积成因水。

3) 研究区产水井主要位于生烃强度小于 $16 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的西部和北部原始含水饱和度高低区,盆地上古生界储层成岩演化程度高,储层强非均质性和微构造的共同作用造成低生烃强度和低构造位置背景下复杂的气水分布。

4) 研究区上古生界西高东低的盖层排替压力表明西部气水同产区的保存条件优于东部,结合勘探实践进一步分析认为地层水体主要为成藏过程中残余地层水。鄂尔多斯盆地米脂地区是奥陶纪盐湖的中心,盆地东部的高矿化度地层水与奥陶纪盐岩的水岩作用密切相关。

致谢:感谢编辑和审稿老师在文章修改过程中提出的宝贵建议。在项目的研究过程中,西安石油大学地球科学与工程学院研究生王力、本科生王倩、刘柏会等同学参与了部分基础工作,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Shanley K W, Cluff R M, Robinson J W. Factors controlling prolific gas production from low-permeability sandstone reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(8): 1083 - 1121.
- [2] Masters J A. Deep Basin gas trap, western Canada[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(2): 152 - 181.
- [3] Ben E L. Basin-Centered Gas Systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1891 - 1919.
- [4] 曹锋, 邹才能, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格大气区天然气近源运聚的证据剖析[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 857 - 866.
- [5] Cao Feng, Zou Caineng, Fu Jinhua, et al. Evidence analysis of natural gas near-source migration-accumulation model in the Sulige large gas province, Ordos basin[J]. China. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 857 - 866.
- [5] 傅诚德. 鄂尔多斯深盆地研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [6] Fu Chengde. The study of deep basin gas in the Ordos basin[M]. Beijing: Petroleum industry press, 2001.
- [6] 朱蓉, 楼章华, 金爱民, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界深盆气藏流体动力学特征及成藏过程分析[J]. 地质科学, 2003, 38(1): 31 - 43.
- [7] Zhu Rong, Lou Zhanghua, Jin Aimin, et al. Analysis on fluid dynamics and formation process of deep basin gas trap in Upper Paleozoic of the Ordos basin[J]. Scientia Geologica Sinica, 2003, 38(1): 31 - 43.
- [7] 刘孝汉, 王欣, 董钢, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界气水分布和地层压力[J]. 低渗透油气田, 1998, 3(2): 32 - 36.
- [8] Liu Xiaohan, Wang Xin, Dong Gang, et al. Gas and water distribution and formation pressure of the Upper Paleozoic in the Ordos basin[J]. Low Permeability Oil and Gas Reservoir, 1998, 3(2): 32 - 36.
- [8] 闵琪, 杨华, 付金华. 鄂尔多斯盆地的深盆地[J]. 天然气工业, 2000, 20(6): 11 - 15.
- [9] Min Qi, Yang Hua, Fu Jinhua. Deep basin gas in the Ordos basin[J]. Natural gas industry, 2000, 20(6): 11 - 15.
- [9] 马新华. 鄂尔多斯盆地上古生界深盆地特点与成藏机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 230 - 236.
- [10] Ma Xinhua. Discussion on characteristics and reservoiring mechanism of deep basin gas in Upper Paleozoic in Ordos basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 230 - 236.
- [10] 崔迎春, 李天太, 李天才, 等. 榆林气田山2气藏产水特征及其影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(6): 86 - 88.
- [11] Cui Yingchun, Li Tiantai, Li Tiancai, et al. Water producing character and influencing factors of Shan2 gas reservoir in Yulin gasfield[J]. Petroleum Geology And Recovery Efficiency, 2008, 15(6): 86 - 88.
- [11] 窦伟坦, 刘新社, 王涛. 鄂尔多斯盆地苏里格气田地层水成因及气水分布规律[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 767 - 773.
- [12] Dou Weitan, Liu Xinshe, Wang Tao. Origin of Formation Water and Regularity of Gas and Water Distribution from Sulige Gas Field in the Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 767 - 773.
- [12] 王运所, 许化政, 王传刚, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界地层水分布与矿化度特征[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 748 - 761.
- [13] Wang Yunsuo, Xu Huazheng, Wand Chuangang, et al. Characteristics of the salinity and distribution of the Neopaleozoic formation water in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 748 - 761.
- [13] 王世艳, 罗群, 宋子学, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格盒8段深盆气藏含水层成因及其物理模拟[J]. 石油与天然气地质,

- 2007, 28(3): 413-418.
- Wang Shiyun, Luo Qun, Song Zixue, et al. Genesis and physical modelling of aquifer in deep basin gas pool of He-8 Member in Sulige region, Ordos basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(3): 413-418.
- [14] 于铁星, 王震亮. 松辽盆地南部致密砂岩储层油气成藏期次研究[J]. *断块油气田*, 2011, 18(2): 203-206.
- Yu Yixing, Wang Zhenliang. Study on hydrocarbon accumulation stages of tight sandstone reservoirs in South Songliao Basin [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2011, 18(2): 203-206.
- [15] 邹才能, 陶士振, 朱如凯, 等. “连续型”气藏及其大气区形成机制与分布——以四川盆地上三叠统须家河组煤系大气区为例[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(3): 307-319.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhu Rukai, et al. Formation and distribution of “continuous” gas reservoirs and their giant gas province: A case from the Upper Triassic Xujiahe Formation giant gas province, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(3): 307-319.
- [16] Cumella S P, Shanley K W, Camp W K. Introduction. Understanding, exploring, and developing tight-gas sands-2005 Vail Hedberg Conference [M]. *AAPG Hedberg Series*, 2008, (3): 1-4.
- [17] 李会军, 吴泰然, 马宗晋. 苏里格气田优质储层的控制因素[J]. *天然气工业*, 2004, 24(8): 10-16.
- Li Huijun, Wu Tairan, Ma Zongjin. Research on the basic characteristics and control factors of high-quality reservoir in Sulige gas field [J]. *Natural gas industry*, 2004, 24(8): 10-16.
- [18] 闵琪, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移聚集特征[J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(4): 26-29.
- Min Qi, Fu Jinhua, Xi Shengli, et al. Characteristics of natural gas migration and accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(4): 26-29.
- [19] 付金华. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏条件及富集规律[D]. 西安: 西北大学博士学位论文, 2004.
- Fu Jinhua. The gas reservoir-forming conditions and accumulation rules of Upper Paleozoic in Ordos Basin [D]. Xi'an: Doctoral dissertation of Northwest University, 2004.
- [20] 李熙喆, 张满郎, 谢武仁. 鄂尔多斯盆地上古生界岩性气藏形成的主控因素与分布规律[J]. *石油学报*, 2009, 30(2): 168-175.
- Li Xizhe, Zhang Manlang, Xie Wuren. Controlling factors for lithologic gas reservoir and regularity of gas distribution in the Upper Paleozoic of Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(2): 168-175.
- [21] 张宗峰, 查明, 高长海. 大港油田埕北断阶区地层水化学特征与油气成藏[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(3): 268-274.
- Zhang Zongfeng, Zha Ming, Gao Changhai. Hydrochemical characteristics and hydrocarbon accumulation in the Chengbei fault terrace zone of Dagang oilfield [J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(3): 268-274.
- [22] 林耀庭, 熊淑君. 氢氧同位素在四川气田地层水中的分布特征及其成因分类[J]. *海相油气地质*, 1999, 4(4): 39-45.
- Lin Yaoting, Xiong shujun. The distribution characteristics and genetic classification of hydrogen and oxygen isotope of formation water in Sichuan gasfield [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 1999, 4(4): 39-45.
- [23] 王晓梅, 王震亮. 鄂尔多斯盆地中生界地下水动力系统[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(4): 479-484.
- Wang Xiaomei, Wang Zhenliang. Groundwater dynamic systems of Mesozoic Group in the middle of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(4): 479-484.
- [24] 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 158-159.
- Liu Fanghuai, Yan Wansun. Hydrogeology principles of Oil and Gas fields [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 158-159.
- [25] 蔡春芳, 梅博文, 李伟. 塔里木盆地油田水文地球化学[J]. *地球化学*, 1996, 25(6): 614-623.
- Cai Chunfang, Mei Bowen, Li Wei. The hydrogeochemistry of oil-fields in Tarim basin [J]. *Geochimica*, 1996, 25(6): 614-623.
- [26] 刘新社, 周立发, 侯云东. 运用流体包裹体研究鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏[J]. *石油学报*, 2007, 28(6): 37-41.
- Liu Xinshe, Zhou Lifa, Hou Yundong. Study of gas charging in the Upper Paleozoic of Ordos Basin using fluid inclusion [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(6): 37-41.
- [27] 陈昭佑, 王光强. 鄂尔多斯盆地大牛地气田山西组砂体组合类型及成因模式[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(5): 632-639.
- Chen Zhaoyou, Wang Guangqiang. Assemblage types and genetic models of the Shanxi sandbodies in Daniudi gasfield, the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(5): 632-639.
- [28] 侯瑞云, 刘忠群. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗储层评价与开发对策[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(1): 118-128.
- Hou Ruiyun, Liu Zhongqun. Reservoir evaluation and development strategies of Daniudi tight sand gas field in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(1): 118-128.
- [29] 席胜利, 李文厚, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界两大气田不同石英砂岩储层特征对比研究[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 221-229.
- Xi Shengli, Li Wenhui, Wei Xinshan, et al. Study on the Characteristics of Quartz Sandstone Reservoir of the Neopaleozoic of Two Gas Field in Ordos Basin [J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2009, 27(6): 221-229.
- [30] 吕延防, 付广, 于丹. 中国大中型气田盖层封盖能力综合评价及其对成藏的贡献[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(6): 742-753.
- Li Yanfang, Fu Guang, Yu Dan. Comprehensive evaluation of sealing ability of cap rock in China's large and medium gas fields and their contribution to gas accumulation [J]. *Oil & Gas*

- Geology, 2005, 26(6): 742–753.
- [31] 艾永华, 杨静, 高春. 陕北米脂依托资源优势打造中国第一盐都[J]. 陕西日报, 2010–11–25.
- Ai Yonghua, Yangjing, Gaochun. Mizhi county in the north of Shanxi province depending on resource advantage is building the first salt city in China[J]. Shaanxi Daily, 2010–11–25.
- [32] 叶成林, 王国勇, 何凯, 等. 苏里格气田储层宏观非均质性——以苏53区块石盒子组8段和山西组1段为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 236–244.
- Ye Chenglin, Wang Guoyong, He Kai, et al. Macro heterogeneity of reservoirs in Sulige gasfield—a case study of the 8th member of the Shihezi Formation and the 1st member of the Shanxi Formation in the Su53 Block [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 236–244.
- [33] 李明瑞, 宴伟坦, 蔺宏斌, 等. 鄂尔多斯盆地神木地区上古生界盖层物性封闭能力与石千峰组有利区域预测[J]. 中国石油勘探, 2006, 23(5): 21–25.
- Li Mingrui, Dou Weitan, Lin Hongbin, et al. Evaluation on sealing ability of Upper Paleozoic caprocks physical property and favorable targets prediction of Shiqianfeng formation in Shenmu region, Ordos Basin[J]. China petroleum exploration, 2006, 23(5): 21–25.
- [34] 侯瑞云. 大牛地气田盒一段低孔渗砂岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 467–478.
- Hou Ruiyun. Reservoir characteristics of low porosity and permeability sandstone of Member I of Xiashihezi Formation in Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 467–478.

(编辑 高岩)

(上接第801页)

- [8] 秦飞, 李伟才, 张磊, 等. 宝浪油田宝北 I + II 油组不同流动单元开发效果研究[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(2): 69–71, 75.
- Qi Fei, Li Weicai, Zhang Lei, et al. The research on development effect of different flow units in the I + II reservoir of Baobei block in Baolang oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(2): 69–71, 75.
- [9] 秦飞, 姚光庆, 李伟才, 等. 宝北低渗储层不同流动单元相对渗透率曲线的建立及应用[J]. 地质科技情报, 2011, 30(3): 72–76.
- Qin Fei, Yao Guangqing, Li Weicai, et al. Establishment and application of relative permeability curve on different flow units in low permeable reservoir of baobei Block [J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(3): 72–76.
- [10] 王峰. 低渗透油藏井网加密试验研究[J]. 特种油气藏, 2006, 13(3): 60–62.
- Wang Feng. Well pattern infill test study for low permeability reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2006, 13(3): 60–62.
- [11] 涂彬, 丁祖鹏, 刘月田. 火烧山油田 H3 层裂缝发育特征与剩余油分布关系[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 229–235.
- Tu Bin, Ding Zupeng, Liu Yuetian. Correlation of remaining oil distribution and fracture development in H–3 reservoir of Huo-shaoshan oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 229–235.
- [12] 蔡厥珩, 周吉培, 黄红兵. 评价注水油田注水利用率的一种新方法[J]. 特种油气藏, 2006, 13(2): 40–42.
- Cai Jueheng, Zhou Jipei, Huang Hongbing. A new evaluation method of the utilization factor of water injection in waterflood-
- ding oilfield[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2006, 13(2): 40–42.
- [13] 廖纪佳, 唐洪明, 朱筱敏, 等. 特低渗透砂岩储层水敏实验及损害机理研究——以鄂尔多斯盆地西峰油田延长组第8油层为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 321–328.
- Liao Jijia, Tang Hongming, Zhu Xiaomin, et al. Water sensitivity experiment and damage mechanism of sandstone reservoir with ultra-low permeability: a case study of the eighth oil layer in the Yanchang Formation of Xifeng oilfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 321–328.
- [14] 贺风云, 徐显军, 金春梅, 等. 朝45区块剩余油分布及挖潜效果预测[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(4): 30–32.
- He Fengyun, Xu Xianjun, Jin Chunmei, et al. Remaining oil distribution of Chao 45 and potential tapping Prediction [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2004, 28(4): 30–32.
- [15] 艾敬旭, 周生友, 马艳, 等. 高含水油藏井网重组与二元驱复合增效——以南襄盆地双河油田IV5–11层系为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 129–134.
- Ai Jingxu, Zhou Shengyou, Ma Yan, et al. Study on effectiveness of integrating well pattern rearrangement with binary combination flooding in oil reservoirs with high water-cut: an example from the IV5–11 layers in Shuanghe oilfield, the Nanxiang Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 129–134.
- [16] 孙卫, 曲志浩, 李劲峰. 安塞特低渗透油田见水后的水驱油机理及开发效果分析[J]. 石油实验地质, 1999, 31(3): 257–259.
- Sun Wei, Qu Zhihao, Li Jinfeng. Analysis on the water drive mechanism and development results of Ansai supertight oil field after water occurrence [J]. Experimental Petroleum Geology, 1999, 31(3): 257–259.

(编辑 高岩)