

鄂尔多斯盆地苏里格气田西部盒8段 地层水地球化学特征及成因

梁积伟^{1,2},李荣西¹,陈玉良¹

(1. 长安大学 资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要:通过对苏里格气田西部盒8段地层水性质及地球化学特征研究,推断地层水的成因,寻找天然气富集区,揭示气田油、气、水分布规律。苏里格气田西部39口井的地层水具有如下地球化学特征:①地层水阴、阳离子含量(r)高低差异悬殊,阴离子以 Cl^- 占绝对优势, HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 含量很低,阳离子以 Ca^{2+} 占优势, $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 含量也较高, Mg^{2+} 含量低;②地层水呈弱酸性,具中-高矿化度;③水型以氯化钙V型水为主,局部有氯化钙IV型和III型水;④地层水化学特征参数具有钠氯系数($r_{\text{Na}^+}/r_{\text{Cl}^-}$)低、脱硫系数($2 \times 100 \times r_{\text{SO}_4^{2-}}/r_{\text{Cl}^-}$)高、变质系数 $[\frac{1}{2}(r_{\text{Cl}^-} - r_{\text{Na}^+})/r_{\text{Mg}^{2+}}]$ 高和镁钙系数($r_{\text{Mg}^{2+}}/r_{\text{Ca}^{2+}}$)低的特征。研究结果表明:苏里格气田西部盒8段地层水具有油气伴生水特点,属于天然气充注时留下的残余地层水,形成于封闭、还原的水文地球化学环境。地层水分布受砂体和成藏条件控制,可能有3种成因类型:孤立砂体封闭地层水、弱动力生烃气水驱替不完全的残留水及大砂体低部位滞水。

关键词:地层水;地球化学;盒8段;苏里格气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE133

文献标识码:A

Geochemical behaviors and genesis of formation water in 8th Member of Xiashihezi Formation in western Sulige gas field, Ordos Basin

Liang Jiwei^{1,2}, Li Rongxi¹, Chen Yuliang¹

(1. Collage of Geosciences and Resource, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: Genesis of formation water of 8th Member of Xiashihezi Formation (H8) and their relationships with gas accumulation in western Sulige gas field of Ordos Basin in central China was studied by means of analysis of the geochemical behaviors of formation water samples from 39 gas wells. The distribution regularity of oil, gas and water was investigated. There is an obvious difference in the concentration(r) of anion and cation of formation water. Content of Cl^- is very high and dominant among the anions of the water, while that of HCO_3^- and SO_4^{2-} are very low. Content of Ca^{2+} is the highest among the cations of formation water, followed by $\text{K}^+ + \text{Na}^+$, while the content of Mg^{2+} is low. The formation water show property of weak acidity with medium-high salinity. The calcium chloride V-type water is predominant, with the calcium chloride III-type and IV-type water occurring locally. The chemical characteristic parameters of the formation water are characterized by low sodium-chloride ratio ($r_{\text{Na}^+}/r_{\text{Cl}^-}$), high coefficient of desulfurization ($2 \times 100 \times r_{\text{SO}_4^{2-}}/r_{\text{Cl}^-}$), high metamorphic coefficient $[\frac{1}{2}(r_{\text{Cl}^-} - r_{\text{Na}^+})/r_{\text{Mg}^{2+}}]$ and low magnesium-chloride ratio ($r_{\text{Mg}^{2+}}/r_{\text{Ca}^{2+}}$). The formation water of H8 in western Sulige gas field has the characteristics of gas-associated water. It could be residual formation water formed when gas was charged under a closed and reducing environment. The distribution of formation water is controlled by sand body and reservoir conditions. Three genetic types of formation water are identified, namely the closed formation water within isolated sand body, the residual water with weak dynamic and incomplete gas-water displacement, and the stagnant water at lower position of large sand body.

Key words: formation water, geochemistry, 8th Member of Xiashihezi Formation, Sulige gas field, Ordos Basin

地层水是油气储层中与油气伴生的地下水,是油气运移的动力和载体。地层水中常常保留了油气运

收稿日期:2012-06-12;修订日期:2013-08-05。

第一作者简介:梁积伟(1968—)男,博士、副教授,沉积学与盆地分析。E-mail:jiwei@chd.edu.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2003CB214602);国家科技重大专项(2008ZX05005-004-09HZ);西北大学大陆动力学国家重点实验室开放基金项目(07LCB11)。

移、聚集和成藏的信息^[1-5]。地层水与石油、天然气共存于同一地层流体系统中,它们之间存在着密切的成因联系。从有机质的热演化到油气生成、运移和聚集成藏,乃至油气藏后期破坏,地层水在其中都起到重要作用。因此,地层水化学成分及其分布特征在一定程度上反映了油气形成与分布特征。研究地层水性质及地球化学特征,推断地层水的成因,对于发现油气田油、气、水分布规律,分析油气运移、聚集和油气藏形成都具有重要意义^[6-8]。

苏里格气田主力含气层段为二叠系下石盒子组8段(盒8段)和山西组1段(山1段)^[9-10]。近年来,随着苏里格气田勘探向西推进,在苏里格气田西部探区盒8段也见到了良好的气层,部分井具有较高的产能;但是不同井产能差别较大,部分井出水严重。如苏75井日产气 $8.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,紧邻的鄂6井产气仅为 $0.01 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、产水20.9 t;苏60井产水25 t,而其周围紧邻的苏48、苏41、苏61、苏18、苏59和苏44井分别产气 4.3×10^4 、 7.6×10^4 、 12.6×10^4 、 1.5×10^4 、 8.8×10^4 和 $7.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。这些产能数据显示,苏里格气田西部探区气、水分布关系复杂,气、水分布控制因素不明,由此影响了苏里格气田西部探区天然气勘探进展。本文通过研究苏里格气田西部盒8段地层水性质及地球化学特征,推断地层水的成因,进而指出天然气富集有利区,希望对该区的油气勘探有借鉴意义。

1 盒8段地层水 pH 值和矿化度

1.1 地层水 pH 值

苏里格气田西部盒8段地层水样品统计结果表明,其pH值在5.5~6.5,多数为6.0,偏酸性。偏酸性地层水也是油气层地层水的一大特点^[11]。

1.2 地层水总矿化度

苏里格气田西部盒8段39口井的水样数据统计分析表明,盒8段地层水的总矿化度为5.47~79.12 g/L,主要分布范围是30.55~69.32 g/L,平均43.69 g/L。对比表明,地层水矿化度高于地表水(一般为0.1 g/L左右),大部分数据也高于海水矿化度(35 g/L),但是低于下伏的马家沟组地层水矿化度(130~356 g/L)^[12]。一般情况下,地层水的矿化度可以反映出储层封闭条件的好坏^[13]。封闭条件好的储层,地层水的矿化度相对较高。研究区盒8段地层水封闭条件相对较好。

从苏里格气田西部盒8段地层水矿化度等值线图(图1a)可以看出,盒8段地层水的总矿化度值总体分

布是以苏86—苏87—苏135—苏136—苏2—苏130—苏98—苏70—苏53—苏74井一线为界,此线以北和以西地区矿化度大于40 g/L,此线以南和以东地区的矿化度小于40 g/L。这种矿化度的分布与砂体分布是一致的。由砂体边缘向中心,总矿化度值增加,主要阴离子中的 Cl^- 离子含量也增加,而 HCO_3^- 离子含量趋向减少,反映出由砂体边缘向中心地层水逐渐浓缩的特点。盒8段总矿化度平面分布主要出现3个高值区(>60 g/L),分别为察1—鄂6—苏65—苏64井区、苏100—苏52井区和苏56—苏51井区。这3个高值区与砂体厚度等值线的高值区一致,即砂体厚度越大的地区,其地层水的总矿化度值越大,说明高矿化度的地层水为厚砂体原生地层水,封闭性好。

2 地层水阴、阳离子组成及水型

地层水的化学成分同油气一样,经历了复杂而漫长的演化过程。在沉积、埋藏、变质及淋滤等水文地质发展阶段,地层水的水型和水化学特征会发生变化,形成新的水型和特殊的水化学性质,反映了油气层流体分布与变化特征。

2.1 地层水阴、阳离子组成

盒8段地层水主要阴离子有 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- ,主要阳离子有 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。地层水的离子组成和浓度(r),受其水动力特征和水文地球化学环境控制,能反映油气保存条件的优劣。从39口井地层水的主要阴、阳离子含量表(表1)和组成三角图(图2)中可以看出,苏里格气田西部盒8段地层水具有如下水化学特征。

盒8段地层水中 Cl^- 离子含量在2 136~45 333 mg/L, Cl^- 离子含量最大占阴离子总量的99.72%(鄂6井),最小占81.81%(苏14井),平均为93.15%; HCO_3^- 离子含量在82~706 mg/L,平均304 mg/L,占阴离子总量的0.23%~11.42%(平均1.18%); SO_4^{2-} 离子含量也很低。这说明地层水处于封闭、缺氧的还原环境^[14]。

盒8段地层水阳离子以 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 和 Ca^{2+} 离子占优势, Mg^{2+} 离子含量低为最明显特征。

盒8段地层水主要离子浓度(r)随总矿化度(TDS)的变化见图3。 Cl^- 离子浓度随总矿化度增大而增高,相关系数达0.99; $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 和 Ca^{2+} 离子浓度也随总矿化度增大而升高,其正相关性比 Cl^- 离子略差; Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 离子浓度与总矿化度呈散点关系。这说明,盒8段地层水的总矿化度大小主要取决于 Cl^- 、 Ca^{2+} 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 离子的含量。

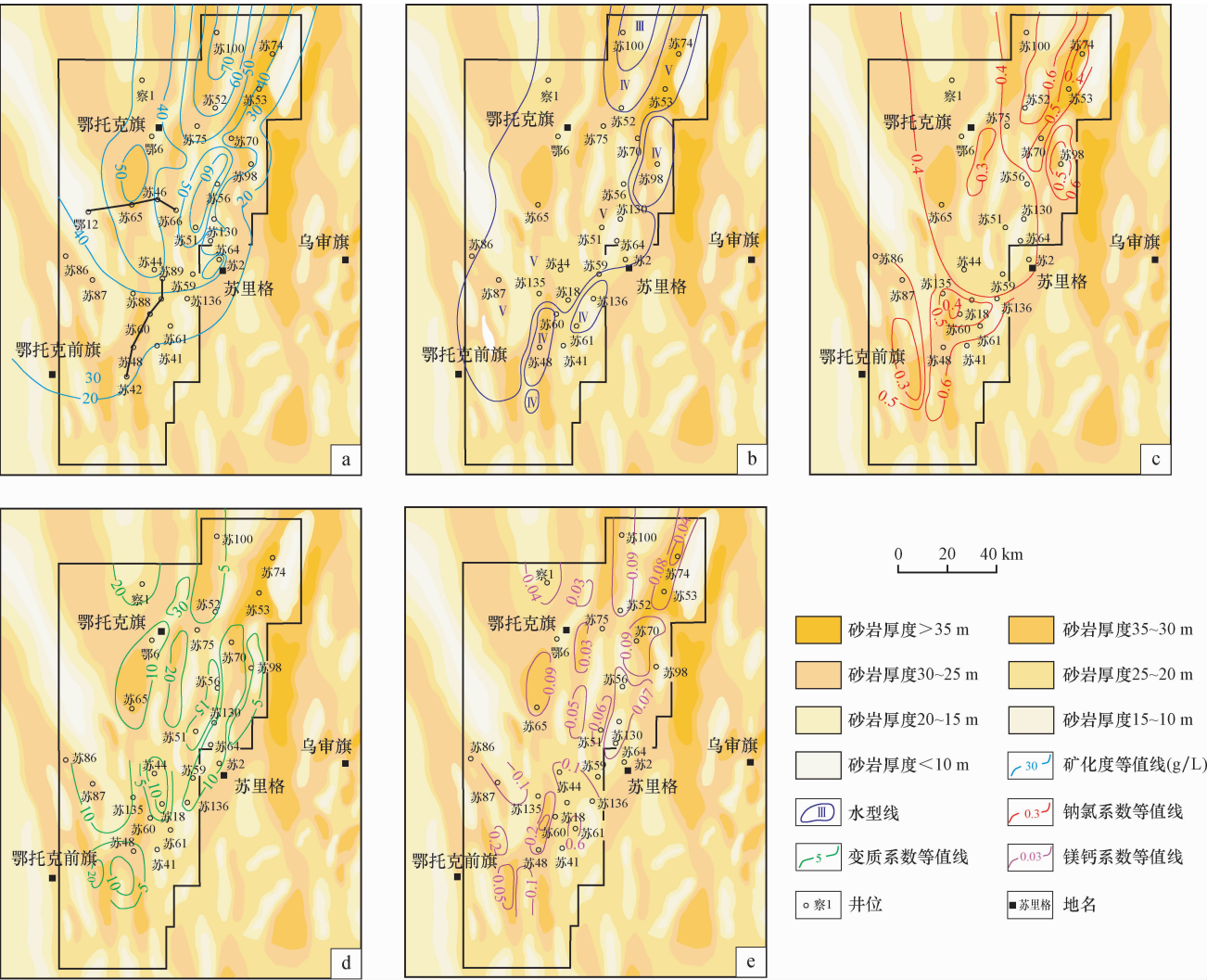


图1 苏里格气田西部盒8段地层水地球化学参数平面图

Fig.1 Outline of geochemical parameters of formation water of H8 in western Sulige gas field

(图1a中黑色折线为气藏剖面位置。)

a. 矿化度等值线;b. 水型平面分布;c. 钠氯系数分布;d. 变质系数分布;e. 镁钙系数分布

表1 苏里格气田西部盒8段地层水化学离子含量对比

Table 1 Comparison of ion contents of formation water of H8 in western Sulige gas field

主要离子含量/(mg·L ⁻¹)						矿化度/(g·L ⁻¹)
K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
1 394~13 301/7 091	589~15 295/8 402	18~1 206/459	2 838~45 333/25 605	0~19 445/1 824	107~706/303	5.47~79.12/43.69

注:表中数据为最小值~最大值/平均值。

2.2 地层水水型

水型是反映油气运聚与保存条件的重要水化学因素^[15]。苏里格气田西部盒8段地层水的水化学特征参数见表2。按苏林的分类^[16],研究区内水型为氯化钙(CaCl₂)型地层水(图4)。氯化钙型水分布区是区域水动力相对阻滞区,为深盆滞留水,地下水强烈地浓缩,并发生脱硫作用,使SO₄²⁻离子含量急剧减少,而Cl⁻和Ca²⁺离子相对富集,反映了储层封闭条件良好,对气藏形成和保存十分有利。

据博雅尔斯基等人研究^[17]认为,氯化钙水型可进

一步划分为5类(表3)。在盒8段的水型分布图上可以看出(图1b),盒8段水型具有成带分布特征。研究区内主要为V型水;IV型水分布区呈孤立状,分布于苏73—苏52井、苏96—苏69—苏99井、苏136—苏61井和苏60—苏42井区域;仅北部苏100井见出现Ⅲ型水。总体来说,研究区盒8段地层水水型特征表明其有利于天然气的聚集和保存。

3 地层水化学特征参数

地层水的化学特征参数通常包括钠氯系数、脱硫

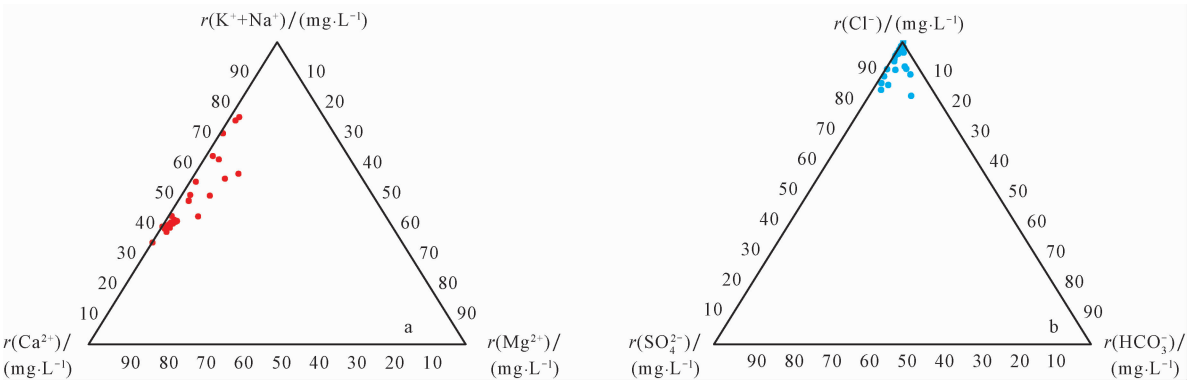


图2 苏里格气田西部盒8段地层水主要阳、阴离子组成(r)三角图

Fig.2 Triangular diagram showing the major cation and anion concentration(r) of formation water of H8 in western Sulige gas field

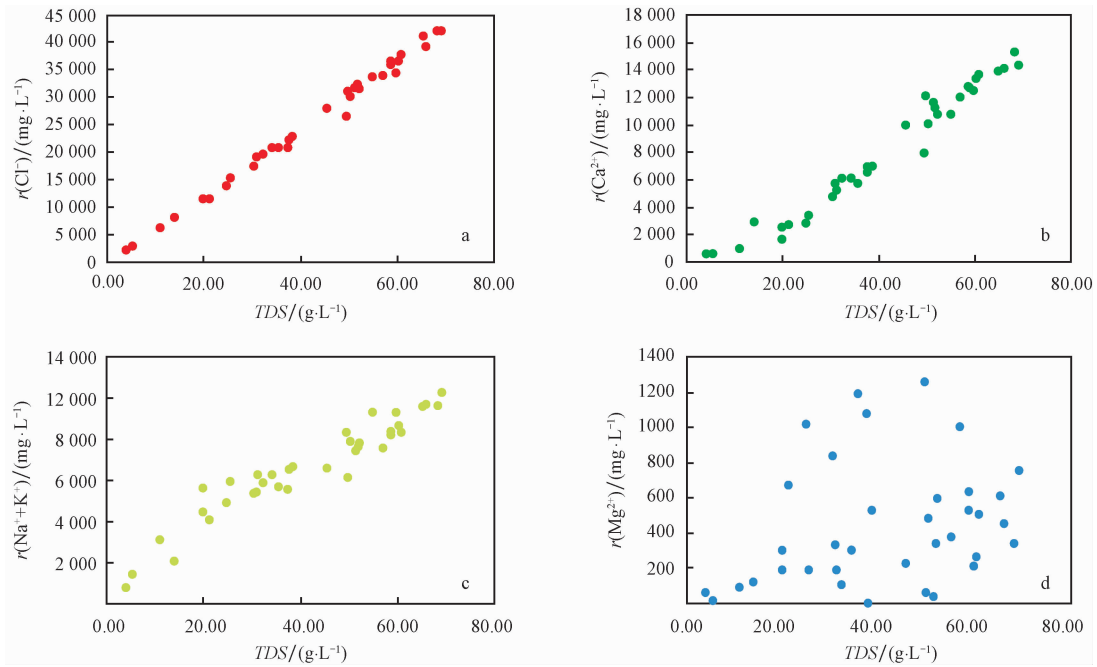


图3 苏里格气田西部盒8段地层水主要离子浓度(r)随总矿化度(TDS)的变化

Fig.3 Variations of ion concentration(r) with total degree of salinity (TDS) of H8 in western Sulige gas field

系数、变质系数及镁钙系数等,其成因、变化规律能够反映油气的运移和保存信息。

3.1 钠氯系数(r_{Na+}/r_{Cl-})

盒8段地层水的钠氯系数较低,在0.30~0.78,平均0.45,绝大多数井小于0.50。在盒8段,钠氯系数等值线呈带状分布(图1c),与砂体分布具有一致性。

表2 自然界地下水水型判别标准

Table 2 Classification and discrimination criterion of groundwater				
分类		地层水	淡化地层水	凝析水
矿化度($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)		>35	15 ~ 35	< 15
特征参数	钠氯系数	< 0.45	0.45 ~ 0.75	> 0.75
	钠钙系数	< 1	1 ~ 2	> 2
水型		CaCl_2 型	CaCl_2 型	CaCl_2 型

在砂体中部,钠氯系数较小;而在砂体边部,钠氯系数增大。钠氯系数越小,对气藏的聚集与保存越有利^[9-10,18]。

3.2 脱硫系数($2 \times 100 \times r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl-}$)

盒8段地层水的脱硫系数在0.34~12.53,平均4.19。脱硫系数越小,地层水封闭性越好^[9-10,18],越有利于气藏的聚集与保存。

3.3 变质系数 $[\frac{1}{2}(r_{Cl-}-r_{Na+})/r_{Mg^{2+}}]$

盒8段地层水的变质系数为2.08~180.01,平均20.79。在盒8段,变质系数等值线也呈与砂体一致的带状分布(图1d)。变质系数越大,表明水岩作用的强度和离子交换的程度越大,油气藏封闭性越好,越有利于油气保存^[9-10]。盒8段变质系数大于10的高值区

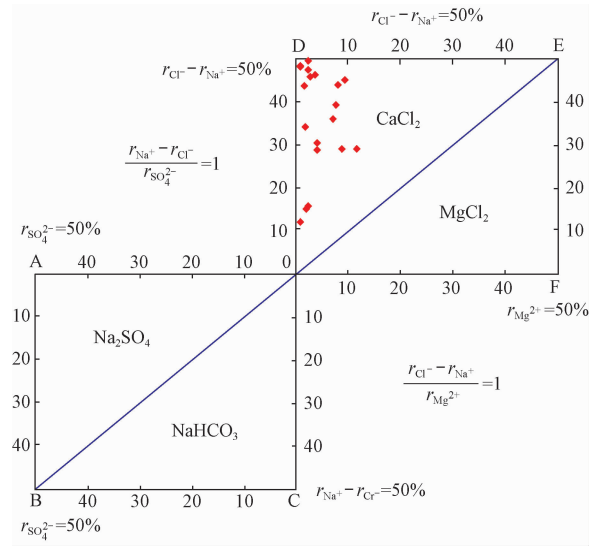


图4 苏里格气田西部盒8段地层水苏林成因分类

Fig.4 Surin genetic classification diagram of the formation water in H8 in western Sulige gas field

是天然气最有利富集区。

3.4 镁钙系数($r_{Mg^{2+}}/r_{Ca^{2+}}$)

盒8段地层水的镁钙系数在0.01~0.61,平均0.13,大于0.30的只有两个数据。盒8段地层水镁钙系数等值线也呈带状分布(图1e),与砂体分布一致。含气区 $r_{Mg^{2+}}/r_{Ca^{2+}}$ 比值一般小于0.30^[19]。盒8段地层水镁钙系数小于0.10的低值区为天然气有利富集区。

4 结论和讨论

- 苏里格气田西部盒8段地层水具有如下特征：
- 1) 地层水具弱酸性,中-高矿化度,水型以氯化钙V型水为主,局部有氯化钙Ⅳ型和Ⅲ型水。
 - 2) 地层水的离子含量高低差异悬殊,以 Cl^- 离子和 Ca^{2+} 离子占优势。

表3 氯化钙型水详细分类(博雅尔斯基,1970)

Table 3 Classification of the calcium chloride type water(from Burson-Marsteller Chhabra,1970)

水型	r_{Na+}/r_{Cl-}	石油地质意义
I型	>0.85	表现出水的运动速度相当大的水动力活跃的特点,这个地带保存条件差,保存油气藏的前景不大
Ⅱ型	0.75~0.85	具有沉积盆地的积极水动力带和较稳定的静水带之间过渡带的特点,一般认为是烃类保存条件较差的地区
Ⅲ型	0.65~0.75	水动力条件平缓,有利于保存油气,认为是保存烃类较好的有利环境
Ⅳ型	0.50~0.65	具有烃类聚集、与外界隔绝、并且有残余水存在的特点,是烃类保存的有利地带
V型	<0.50	溶解固体的浓度和溶解组分的比率具有古代残余海水特点,在原始沉积时就被高度变质,是烃类聚集最有希望的区域;需具备的附加条件有:① $r_{I-}>1\text{ mg/L}$,② $r_{Br-}>300\text{ mg/L}$,③ $r_{Cl-}/r_{Br-}<350$,④ $r_{SO_4^{2-}}\times 100/r_{Cl-}<1$

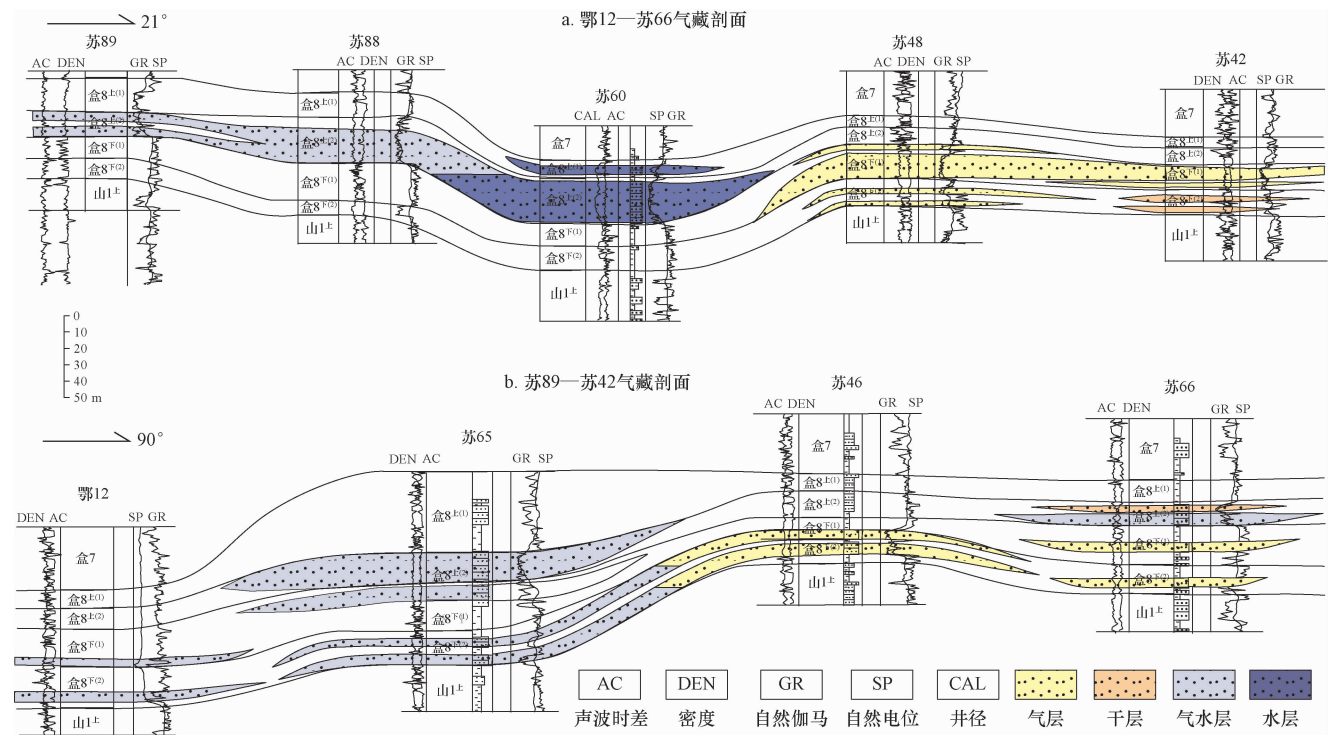


图5 苏里格气田西部石盒子组盒8气藏剖面(剖面位置见图1a)

Fig.5 Cross section of the H8 gas reservoir in western Sulige gas field (see Fig.1a for the location)

3) 地层水化学特征参数具有钠氯系数低、脱硫系数高、变质系数高和镁钙系数低的特征,地层水具有油气伴生水特点,属于天然气充注时留下的残余地层水,形成于封闭、还原的水文地球化学环境。

4) 盒8段地层水的地球化学特征在空间上存在差异,表明盒8段地层水不属于统一的流体场。

对于低渗透性岩性气藏来说,构造对地层水分布的影响程度相对较弱。勘探实践也证明,苏里格气田西部探区盒8段不存在统一的边水和底水^[9]。而地层水与砂体分布和成藏的关系可能更为密切。按照沉积旋回,盒8段可以进一步分为4个含气砂层,从上向下分别为盒8^{上(1)}、盒8^{上(2)}、盒8^{下(1)}和盒8^{下(2)}。推测苏里格气田西部地层水可能受以下3个因素控制。

1) 孤立砂体控水

透镜状孤立砂体在天然气充注时,原始地层水排出受透镜状孤立砂体限制,该类型储层砂体含原始地层水。苏60井盒8^{上(1)}砂体、苏65井盒8^{上(2)}砂体和苏65井盒8^{下(1)}砂体都属于孤立砂体控水(图5)。

2) 弱动力生燃气水驱替不完全残留水

砂体因成岩致密渗透性变差,或者由渗透层变成不渗透层,气、水置换不彻底,残余地层水被砂体封闭。

3) 弱动力成藏大砂体低部位滞水

由于苏里格气田西部远离生烃中心,也不在天然气运移的优势方向,所以天然气供给能力有限,造成气、水驱替动力不足,使连通性好的大砂体低部位残留了原始地层水,造成大砂体低部位只产水、不产气。苏60井盒8^{上(2)}发育大砂体,该砂体南北向延伸大于50 km,厚度25 m。苏60井位于构造低部位,使得苏60井处大量产水(图5)。

参 考 文 献

- [1] Fisher J B, Boles J R. Water-rock interaction in Tertiary sandstones, San Joaquin basin, California, USA: diagenetic controls on water composition[J]. *Chemical Geology*, 1990, 82: 83-101.
- [2] Hanor J S. Origin of saline fluids in sedimentary basins[C]//Parnell M. Geofluids: origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins. Geological Society Special Publication, 1994, 78: 151-174.
- [3] Hanor J S. Physical and chemical controls on the composition of waters in sedimentary basins[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1994, 11(1): 31-45.
- [4] Land L S. Na-Ca-Cl saline formation waters, Frio Formation (Oligocene), South Texas, USA: products of diagenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(11): 2163-2174.
- [5] Land L S, Macpherson G L. Origin of saline formation waters, Cenozoic section, Gulf of Mexico sedimentary basin[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(9): 1344-1362.
- [6] Hou Dujie, Li Xianqing, Tang Youjun. New evidence for the origin of natural gas in Ordos Basin from hydrocarbons of oil water[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(10): 835-856.
- [7] Li Xiangqing, Hou Dujie, Hu Guoyi, et al. Characteristics of organic

components in formation waters and their relations to natural gas reservoirs in Central Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2003, 22(2): 116-122.

- [8] Li Xiangqing, Hou Dujie, Tang Youjun, et al. Molecular geochemical evidence for the origin of natural gas from dissolved hydrocarbon in Ordovician formation waters in Central Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2003, 22(3): 193-202.
- [9] 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.
- [9] Dou Weitan, Liu Xinshe, Wang Tao. The origin of formation water and the regularity of gas and water distribution for the Sulige gas field, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(5): 767-773.
- [10] 王泽明, 鲁宝菊, 段传丽, 等. 苏里格气田苏20区块气水分布规律[J]. *天然气工业*, 2010, 30(12): 37-40.
- [10] Wang Zeming, Lu Baoju, Duan Chuanli, et al. Gas-water distribution pattern in Block 20 of the Sulige Gas Field[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(12): 37-40.
- [11] 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): 748-753.
- [11] Wang Yunsuo, Xu Huazheng, Wang Chuangang, et al. Characteristics of the salinity and distribution of the Neopaleozoic formation water in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(5): 748-753.
- [12] 李贤庆, 侯读杰, 胡国艺. 鄂尔多斯中部气田下古生界水化学特征及天然气藏富集区判识[J]. *天然气工业*, 2002, 22(4): 10-14.
- [12] Li Xianqing, Hou Dujie, Hu Guoyi. Hydrochemical characteristics of Lower Paleozoic formation water and identification of natural gas enrichment area in central gas fields in Ordos[J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(4): 10-14.
- [13] 康南昌, 焦贵浩, 蔡加铭, 等. 柴达木盆地三湖拗陷石油地质特征及下步勘探与研究方向[J]. *石油地球物理勘探*, 2009, 44(4): 508-514.
- [13] Kang Nanchang, Jiao Guihao, Cai Jiaming, et al. Oil geologic feature in Sanhu depression of Qaidam Basin and next exploration and study direction[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009, 44(4): 508-514.
- [14] 刘济民. 油田水文地质勘探中水化学及其特征指标的综合应用[J]. *石油勘探与开发*, 1982, 9(6): 49-55.
- [14] 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.
- [15] 楼章华, 尚长健, 姚根顺. 桂中坳陷及周缘海相地层油气保存条件[J]. *石油学报*, 2011, 32(3): 432-441.
- [15] Lou Zhanghua, Shang Changjian, Yao Genshun, et al. Hydrocarbon preservation conditions in marine strata of the Guizhong Depression and its margin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(3): 432-441.
- [16] 张厚福, 方朝亮, 高先志, 等. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 27-31.
- [16] Zhang Houfu, Fang Chaoliang, Gao Xianzhi, et al. *Petroleum geology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 27-31.
- [17] 楼章华, 朱蓉. 中国南方海相地层水水文地质地球化学特征与油气保存条件[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(5): 584-593.
- [17] Lou Zhanghua, Zhu Rong. Hydrogeological and hydrogeochemical characteristics and hydrocarbon preservation conditions in marine strata in southern China[J]. *Oil and Gas Geology*, 2006, 27(5): 584-593.
- [18] 王晓梅, 赵靖舟, 刘新社, 等. 苏里格气田西区致密砂岩储层地层水分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(5): 802-810.
- [18] Wang Xiaomei, Zhao Jingzhou, Liu Xinshe, et al. Distribution of formation water in tight sandstone reservoirs of western Sulige gas field, Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2012, 33(5): 802-810.
- [19] 徐国盛, 宋焕荣, 周文. 鄂尔多斯盆地中部气田水化学条件与天然气聚集[J]. *石油实验地质*, 2000, 22(4): 330-335.
- [19] Xu Guosheng, Song Huanrong, Zhou Wen. Hydrochemical conditions and natural gas accumulation in the middle part gasfield of the Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2000, 22(4): 330-335.