

天然气成藏过程中地层水相态变化

——以鄂尔多斯盆地上古生界为例

张春林^{1,2}, 庞雄奇¹, 田世澄³, 许化政¹, 张福东¹, 刘锐娥¹

(1. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油 勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007; 3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要:根据千米桥潜山异常高温气藏的生产特点、气井凝析水的采出机理以及采出水的矿化度特征,认为鄂尔多斯盆地上古生界气藏形成于异常高温阶段。异常高温不仅导致了甲烷的生成,还导致了部分地层水的汽化和异常高压的形成。气(汽)相流体在异常高压推动下向上部地层扩散,运移使下部地层中的压力降低,加速地层水汽化,并积聚新的压力和新一轮的运移,如此反复,逐渐将甲烷、蒸汽水及伴生的温度、压力扩散至封存箱内的每个部位,达到封存箱内的区域势平衡,从而形成盆地级的高温高压气藏。抬升剥蚀导致上古生界温度、压力下降,水蒸气的液化使气藏中的蒸汽水密度降低,甲烷气浓度降低,气柱压力降低,从而形成负压气藏。

关键词:相态;封存箱;负压气藏;地层水;上古生界;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE132.2 **文献标识码:**A

Phase state changes of formation water in gas accumulation process: a case study from the Upper Paleozoic, Ordos Basin

Zhang Chunlin^{1,2}, Pang Xiongqi¹, Tian Shicheng³, Xu Huazheng¹, Zhang Fudong¹, Liu Rui'e¹

(1. College of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Langfang Branch of PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang, Hebei 065007, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the production characteristics of the abnormal high temperature gas reservoir, the producing mechanism of condensate water in gas wells, and the salinity characteristics of the produced water in the Qianmiqiao buried hill, we believe that the gas reservoir of the Upper Paleozoic was formed during the abnormal high temperature phase in Ordos Basin. The abnormal high temperature resulted in not only the generation of methane but also the vaporization of some formation water and the formation of abnormal high pressure. The gas (vapor) diffused upward under the driving of the abnormal high pressure. This gas migration led to the decreasing of pressure in the lower strata and the speeding up of formation water vaporization. The vaporization of formation water may in turn increase the pressure of the lower strata, leading to a new round of hydrocarbon migration. This process may repeat again and again, gradually making the methane, the vapor, the associated temperature and pressure diffuse to the whole compartment, realizing local balance of potential field in the compartment, and finally resulting in the formation of gas reservoirs of high temperature and pressure in the basin. After that, uplifting and erosion cause the lowering of temperature and pressure, while liquefaction of vapor leads to the decreasing of vapor density, methane concentration and gas column pressure, resulting in the formation of underpressured gas reservoirs.

Key words: phase state, compartment, underpressured gas reservoir, formation water, Upper Paleozoic, Ordos Basin

近年来,大庆油田徐家围子、松辽盆地南部长岭断陷腰英台地区深层发现了地温超过 150℃ 的火成岩天然气田,新疆塔里木、大港千米桥地区也发现了地温达 160℃ 的凝析油气田,国外更有凝析油气田地温达 230℃ 的报道^[1-6]。这些气田、凝析油气田的共同特点

是生产中带有凝析水,且凝析水产量随储层压力递减而呈指数升高,且地温越高,凝析水的产出量越大。产出的凝析水水型为 CaCl₂ 型,普遍具有低矿化度特征。这些油气藏大多没有边底水,有的边底水是在开发过程中认识到的,量少且局部,勘探阶段凭钻井、测井资

料无法认识到水层的存在。

地层水是沉积盆地内的主要流体,其在地层高温高压条件下的相态变化影响着流体的压力,制约着油气的成藏,是地质学家们必须关心和研究的课题。

鄂尔多斯盆地上古生界在近八万平方公里的伊陕斜坡上很难钻遇地层水,现有苏里格、神木、榆林等气田的气层温度低、压力系数小,均无边低水。巨量的地层水哪里去了?难道都被天然气排驱到盆地边缘地区了吗?这是无法认同和无法想像的事情,毕竟地层中的含水量远比有机质(包括衍生物)要丰富的多。文中依据高温高压气藏、凝析油气藏的生产特征,认识地层水在埋藏过程中的相态变化,进而解释鄂尔多斯盆地上古生界高温高压埋藏阶段(J_3-K_1)气藏的形成机理,以及抬升剥蚀阶段(K_2-E)负压的形成,对于油田今后的勘探开发具有重要的指导意义。

1 高温高压体系中水的相态变化

1.1 高温高压油气藏普遍产水

千米桥潜山含油气层为奥陶系峰峰组 and 上马家沟组,平均埋藏深度 4 300 m,为中等凝析油含量的气藏,凝析油含量 290 g/m³,平均地层温度 168 ℃,平均地层压力 43.5 MPa。该气藏曾有 5 口井投入试采,均不同程度出水。试采过程中除千 12-18 井认为有自由水(可能为边底水)产出外,其他 4 口井均为凝析水。产出水普遍具低矿化度特征,如板深 7 井为 5 000~6 000 mg/L(水气比 $1.666 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$);板深 8 井为 3 000~4 000 mg/L(水气比 $0.272 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$);千 12~18 井以产水为主,水的矿化度偏高,为 9 000~10 000 mg/L,矿化度偏高可能与凝析水、地层水同时产出有关。从生产井井底无积液、矿化度极低,以及产水量越来越大等情况分析,这些水在地下压力为 43.5 MPa、温度为 168 ℃的环境中是蒸汽状态,即以高压水蒸汽的形式混溶于烃气体中,当其在上升到地面 1 MPa 和约 40 ℃的环境后变成了液态水。以板深 7 井为例,试采初期的水气比平均为 $0.3 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[7],以后逐渐升高,

10 个月后水气比升至 $7.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$ ^[8]。

生产过程中凝析水产量递增的现象可以解释为:油气、特别是高压水蒸汽的产出使近井地带产生压降漏斗,地层水蒸发加剧,汽态水含量升高,且距井筒越近,生产压差降低越快,地层汽态水含量越高,凝析水产量上升越快,部分井甚至因产水量高而停产。因此,控制生产压差成为高温高压气藏和凝析油气藏开发中的重要课题^[9]。

1.2 苏里格气田盒 8 段气藏产水特征

与千米桥高温高压凝析油气田不同,鄂尔多斯盆地苏里格气田下石盒子组 8 段(盒 8 段)气藏是一个较典型的常温负压、以甲烷为主的干气藏(CH_4 含量 > 92%),平均埋深 3 300 m,气层流体压力为 22.5~31.5 MPa,温度 100~110 ℃^[10]。两者虽地质环境差别较大,但同样产出地层水。根据产出水状态(井底有无积液等)、气水比、矿化度等资料分析,产出水在地下有自由态和蒸汽态两种形式(表 1)。

1.3 封闭条件下汽、水相态模拟实验

有关学者针对凝析气田的汽、水两相做过相关的实验^[8-9]。文中对这些实验并结合地下实际情况做了进一步的分析,可以得出如下认识:1)在完全封闭环境中,压力保持在恒压 40 MPa(相当于 4 000 m 埋深的水柱压力)下,当温度在 100~150 ℃时,随着温度降低,地层水体积增加较快,汽态水迅速减少;温度在 150~300 ℃时,随着温度增加,地层自由水体积减少,汽态水体积增加,但增加速度相对缓慢,体系中始终汽、液两相共存;当温度超过 370 ℃后,体系中完全为汽相饱和,不存在液态水(图 1a)。2)当温度保持在恒温 150 ℃,压力从 40 MPa 开始逐步降低时,地层水的体积减少较快,汽相体积增加较慢,当压力低于到露点压力(30 MPa)后,凝析油开始析出;随着地层压力的继续降低,地层水体积继续减少、气相体积增加加快;而当压力超过 40 MPa,并继续增加时,汽、液相的体积基本不变,分别保持在 50% 左右(图 1b)。3)与上述实验

表 1 苏里格气田盒 8 段含气范围内部分井产水情况

Table 1 Water production of some wells in the gas-bearing 8 th Member of Xiashihezi Formation, Sulige gas field						
井号	射孔深度/m	日产气/m ³	日产水/t	矿化度/(mg·L ⁻¹)	水气比/(10 ⁻⁴ m ³ ·m ⁻³)	备注
苏 4	3 286~3 327	222 800	微量	1 949	0.210	凝析水
苏 6	3 320~3 329	367 800	微量	1 263	0.200	凝析水
桃 5	3 272~3 276	210 700	微量	2 163	0.160	凝析水
苏 20	3 444~3 472	53 098	0.04	790	0.007	凝析水
桃 1	3 240~3 242	11 322	0.10	16 546	0.108	地层水
陕 188	3 386~3 390	41 306	0.50	23 802	0.109	地层水
苏 12	3 247~3 251	8 197	3.00	21 435	3.660	地层水
苏 7	3 320~3 328	12 229	1.70	19 579	1.349	地层水

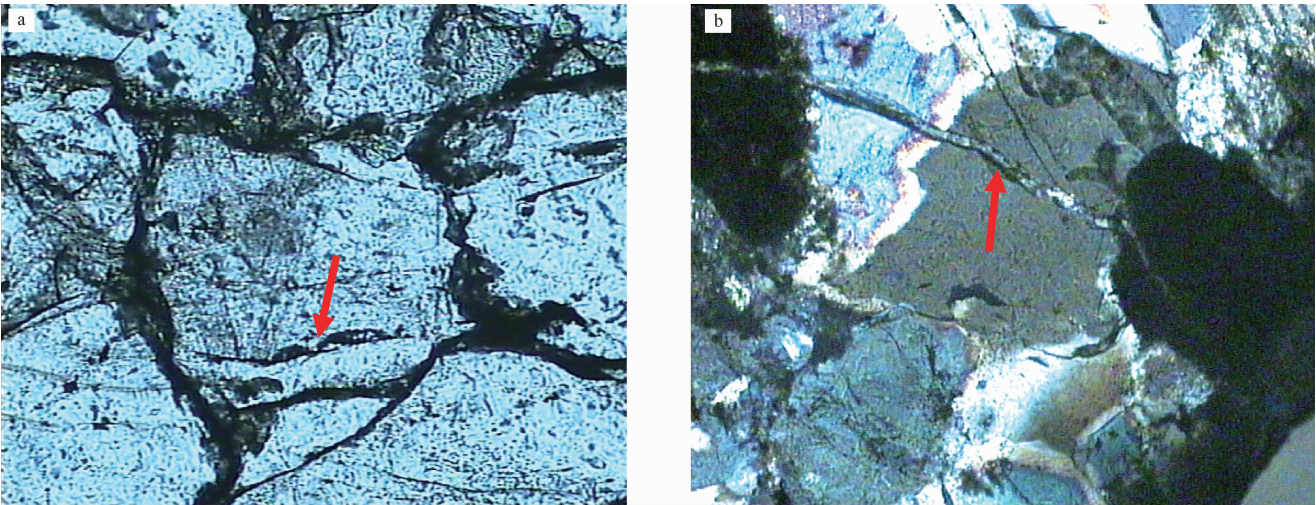


图 3 鄂尔多斯盆地上古生界气藏砂岩裂隙特征

Fig. 3 Fracture characteristics of sandstone in gas reservoirs of the Upper Paleozoic, Ordos Basin
a. 榆 17 井, 山西组, 石英砂岩, 包裹体沿早期微裂缝分布, 均一温度 130 ~ 180 ℃; b. 苏 147 井, 山西组, 石英砂岩, 包裹体沿晚期微裂缝分布, 均一温度 150 ~ 180 ℃

成过程中的一种特殊地质现象。通过镜下薄片观察可见到相对发育的微裂缝(图 3)。

依据盆地下石盒子组储层包裹体测压数据,早白垩世的成藏压力为 45 ~ 53 MPa,压力系数为 1.3 ~ 1.5。盆地模拟资料表明,晚侏罗世—早白垩世生排气高峰期的地温梯度为 38.0 ℃/km,压力系数为 1.6 ~ 1.7;而地温梯度在 41.5 ~ 55.0 ℃/km 时,压力系数则高达 2.0 ~ 2.4。岩石的自然破裂压力系数为 1.96,大量晚期裂缝的出现,证明盆地天然气成藏期的地层压力曾超过了 80 MPa,压力系数超过 2.0。

2.3 气藏形成与地层水相态变化

早白垩世末,上古生界下部形成了一个盆地级的

高温高压封存箱,封存箱的顶部是厚度超过 70 m 的上石盒子组河漫滩相泥岩,上古生界所有的天然气生成、运移、聚集和地层水的相态变化都发生在这个巨型封存箱中。从包裹体温度、压力及组分资料可以看出,封存箱上部石千峰组储层段处于高温常压状态,包裹体内为水溶液充满,表明没有烃类运移,地层水仍以液相为主。封存箱泥岩盖层本身的隔热作用使其所含地层水为蒸汽状态,且处于超压状态,对下伏封存箱内的流体不仅起物性封闭作用,而且还具有压力封闭作用,因而持久和有效。在封存箱内部,由于下部地层(山 2 段、太原组)含有机质丰富,聚敛的温度高,气、水转化量大,流体压力大;上部地层(山 2 段、盒 8 段)含有机质丰度低,聚敛的温

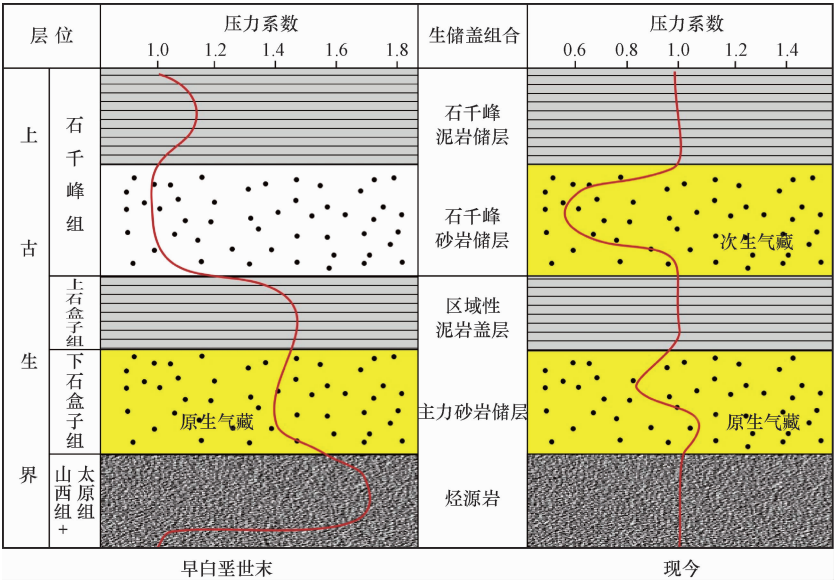


图 4 鄂尔多斯盆地上古生界气藏与压力系数匹配关系

Fig. 4 Match relations between gas reservoirs and pressure coefficient in the Upper Paleozoic of Ordos Basin

度低,气、水转化量小,流体压力低,自下而上存在着压力梯度(图4),因而会发生气(汽)相流体的垂向运移。

当封存箱下部气(汽)相流体发生逸散,地层压力会降低,打破了气、水的相态平衡,加速了地层水的汽化和有机质的生烃。在漫长的地质历史中,如此气(汽)化—增压—逸散—降压反复进行,直到地层水完全汽化,有机质生烃终止,封存箱内部压力、温度趋于平衡。

由于煤系有机质的快速熟化是和地层水的相态转化同期发生的,甲烷气与气态水的互溶能力大大增强。甲烷气逐渐稀释、溶解和扩散致密储层中的水蒸气,双相流转变为单相流,二者一起无孔不入地渗透到封存箱内的各种孔隙中。这种过程历经数百万年,天然气、水蒸气不断由高势区(体)向低势区(体)运移,范围越来越大,直至充满盆地内煤系 R_o 值大于 1.2% 的所有地区,直至巨型封存箱内温度、压力趋于平衡,封存箱内储集体逐渐被气(汽)饱和,只见气而不见水的气藏自此形成。这时的高压气藏内几乎没有可流动的自由水,甲烷气内的水蒸气混容量达到最大值。

在盆地气藏形成过程中,地层水溶解度因温度增加逐渐减少,特别是其由液态转变为气态的过程中,水中溶解的盐类被析出,高矿化度的地层水变成了纯净的气态水。这在一定程度上解释了鄂尔多斯盆地储层致密的原因,以及钻井产出水矿化度低的成因。

3 负压气藏的形成与地层水的相态变化

早白垩世以后,华北盆地东部隆起褶皱并遭受剥蚀,鄂尔多斯地区相对稳定,成为一个独立的盆地。盆地的伊陕斜坡单元除东抬西降外,基本未出现大的构造变动,早期形成的气藏被保存下来。白垩纪末期,鄂尔多斯盆地发生了强度最大的一期剥蚀事件,整体以不均匀抬升剥蚀为主,剥蚀量自西向东逐渐增大,晋西挠褶带抬升幅度大、剥蚀速度快(剥蚀厚度达 1 200 m 以上),天环坳陷剥蚀厚度小(剥蚀厚度小于 800 m)^[13],并在抬升过程中由早白垩世的大型坳陷盆地(沉积中心在定边—环县地区)转变为东高西低的大型低角度区域斜坡。大幅度的抬升剥蚀使富煤地层埋藏变浅、地温梯度降低(由早白垩世的 38.0 ~ 55.0 °C/km 降至晚白垩世 24.0 ~ 31.0 °C/km),使盆地上古生界气藏发生流体压力梯度降低、气浓度降低、水蒸气液化成水和凝析水在重力作用下重新聚集成“酸点”等一系列变化^[14],最终形成现今大面积分布的负压气藏(图5)。

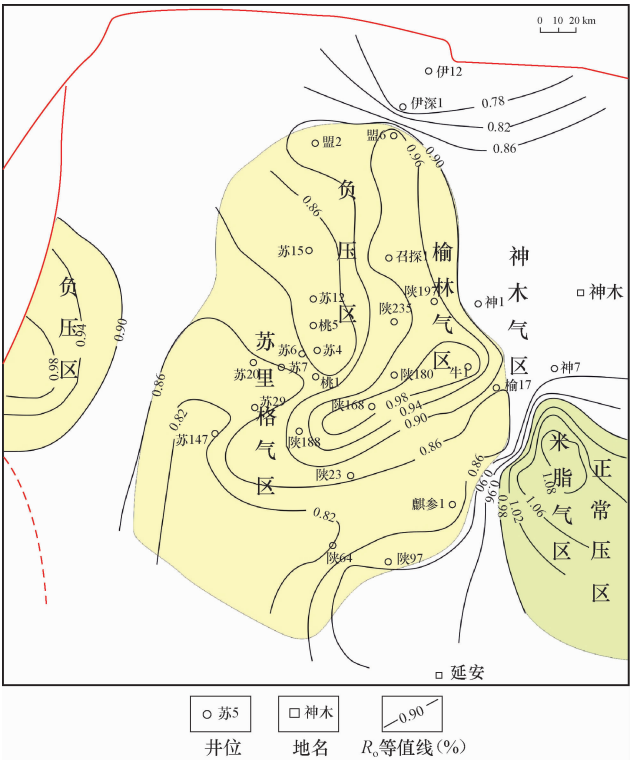


图5 鄂尔多斯盆地上古生界盒8段地层压力系数及负压气区分布

Fig. 5 Formation pressure coefficient and distribution of underpressured gas zone of the 8th Member of Xiashihezi Formation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin

对于鄂尔多斯盆地分布面积最大、储量最高的苏里格气田而言,其流体压力的变化可归纳如下:1)成藏时期($J_3—K_1$)的温度为 130 ~ 160 °C,现今温度为 95 ~ 110 °C,则温度下降约 35 ~ 65 °C^[15];2)早白垩世时期的流体压力梯度为 15.0 ~ 20.0 MPa/km,降为现今的 6.5 ~ 9.2 MPa/km,则下降了 6.5 ~ 11.5 MPa/km^[16];3)因为存在如此高的温度、压力下降梯度,及其所导致的水蒸气凝析成水,致使孔隙内水蒸气密度大为减少,而甲烷得以扩散,比重降低,气藏气柱压力降低,这才是负压气藏最主要的成因。

同时,通过研究认为苏里格气田水蒸气凝析成水的压力环境约为 22.5 ~ 31.5 MPa,是在孔隙度小于 12% 的致密储层中进行的,致密岩石的亲水性常使裂隙、孔隙的水膜加厚,或形成具束缚态的空间水,水相不连通,不能形成水柱压力。只有在储集层物性较好的情况下,凝析水在重力作用下才能重新聚集成“酸点”水,进而孤立于盆地的局部砂体中。

4 结论

异常高温高压环境中,地层水以汽态和液态两种形式存在,温度、压力的任何改变,都会改变汽相和液

相的存在比例。高温高压油气藏流体中混有蒸汽态的地层水,液态水以边底水形式存在。生产过程中的产出水以凝析态为主,压力下降会使油气藏的边底水加速蒸发,使其也以凝析态产出。

水蒸气和甲烷一起造就了鄂尔多斯盆地上古生界的异常高压,其混容物在异常高压的推动下大规模扩散,同时扩散了温度和压力,使压力封存箱内的势场逐渐平衡,从而形成盆地级的高温高压气藏,这时的气藏具有最高的水蒸气含量。抬升剥蚀期的温度、压力下降,促使气藏中的水蒸气液化,蒸汽水密度降低,甲烷气浓度降低,气柱压力降低,从而形成盆地级的负压气藏。现今的地层水以束缚态的加厚水膜、半束缚态的孔隙水存在为主,局部地区存在有层状的“酸点”水。

参 考 文 献

[1] 王洪江,吴聿元.松辽盆地长岭断陷火山岩天然气藏分布规律与控制因素[J].石油与天然气地质,2011,32(3):360-367.
Wang Hongjiang, Wu Yuyuan. Distribution patterns and controlling factors of volcanic gas pools in the Changling fault depression, the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 360-367.

[2] 吴颜雄,王璞珺,边伟华,等.松辽盆地深层火山岩储集性能[J].石油与天然气地质,2012,33(2):236-247.
Wu Yanxiong, Wang Pujun, Bian Weihua, et al. Poroperm characteristics of deep volcanic reservoirs in Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 236-247.

[3] 张敏,黄光辉,赵红静,等.塔里木盆地柯克亚地区凝析油气藏成因特征研究[J].中国科学(D辑),2008,38(增刊II):17-23.
Zhang Min, Huang Guanghui, Zhao Hongjing, et al. Study on origin of Kekeya condensate oil and gas pool, Tarim Basin[J]. Science in China(Series D), 2008, 38(S II): 17-23.

[4] 崔景伟,王铁冠,胡健,等.塔里木盆地和田河气田轻质油成熟度判定及其油源意义[J].石油与天然气地质,2013,34(1):27-36.
Cui Jingwei, Wang Tieguan, Hu Jian, et al. Maturity of light oil and its significance in indicating oil source in Hetianhe gas field, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 27-36.

[5] 张亚光,苏俊青,朱银霞,等.千米桥潜山凝析气藏地质特征[J].天然气地球科学,2003,14(4):264-266.
Zhang Yaguang, Su Junqing, Zhu Yinxia, et al. The geological characteristics of Qianmiqiao buried hill condensated pool[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(4): 264-266.

[6] Zuluaga E, Monsalve J C. Water vaporization in gas reservoirs[J]. SPE 84829, 2003.

[7] 陶自强.千米桥潜山凝析气藏生产井出水原因分析[J].天然气地球科学,2003,14(4):295-297.
Tao Ziqiang. The study of the water production principle in Qianmiqiao condensated gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(4): 295-297.

[8] 汤勇,孙雷,杜志敏,等.异常高温气井凝析水产出机理及动态研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2007,22(1):68-71.
Tang Yong, Sun Lei, Du Zhimin, et al. Study on the mechanism and performance of the condensate water producing from abnormal high-temperature gas wells[J]. Journal of Xian Shiyou University(Natural Science Edition), 2007, 22(1): 68-71.

[9] 李士伦,王鸣华,何江川,等.气田与凝析气田开发[M].北京:石油工业出版社,2004.
Li Shilun, Wang Minhua, He Jiangchuan, et al. Gas field and condensate gas field development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.

[10] 赵靖舟,白玉彬,曹青,等.鄂尔多斯盆地准连续型低渗透-致密砂岩大油田成藏模式[J].石油与天然气地质,2012,33(6):811-827.
Zhao Jingzhou, Bai Yubin, Cao Qing, et al. Quasi-continuous hydrocarbon accumulation: a new pattern for large tight sand oilfields in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 811-827.

[11] 任战利,张盛,高胜利,等.鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨[J].地质学报,2006,80(5):674-684.
Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Research on region of maturation anomaly and formation time in Ordos basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 674-684.

[12] 刘锐娥,孙粉锦,拜文华,等.苏里格庙盒8气层次生孔隙成因及孔隙演化模式探讨[J].石油勘探与开发,2002,29(4):47-49.
Liu Rui'e, Sun Fenjin, Bai Wenhua, et al. An approach to the generating mechanism of secondary pores and pore evolution model of He 8 gas layer in Suligemiao gas field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 47-49.

[13] 陈瑞银,罗晓容,陈占坤,等.鄂尔多斯盆地中生代地层剥蚀量估算及其地质意义[J].地质学报,2006,80(5):685-693.
Chen Ruiyin, Luo Xiaorong, Chen Zhankun, et al. Estimation of denudation thickness of mesozoic strata in the Ordos basin and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 685-693.

[14] 马新华.鄂尔多斯盆地上古生界深盆气特点与成藏机理探讨[J].石油与天然气地质,2005,26(2):230-236.
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.

[15] 王康东,李贤庆,冯松宝,等.苏里格大气田上古生界储层流体包裹体特征及天然气成藏意义[J].天然气地球科学,2011,22(6):961-968.
Wang Kangdong, Li Xianqing, Feng Songbao, et al. Characteristics of fluid inclusions and natural gas pool-forming significance of the Upper Paleozoic reservoirs in Sulige gas field[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 961-968.

[16] 冯乔,耿安松,徐小蓉,等.鄂尔多斯盆地上古生界低压气藏成因[J].石油学报,2007,28(1):33-37.
Feng Qiao, Geng Ansong, Xu Xiaorong, et al. Genesis of low-pressure gas reservoir of the Upper Paleozoic in Ordos basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2007, 28(1): 33-37.

(编辑 高岩)