

鄂尔多斯盆地东南部上古生界地层压力与天然气分布

王伟力^{1,2}, 高海仁²

1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054
2. 延长石油油气勘探公司, 延安 716000

摘要 鄂尔多斯盆地东南部上古生界近几年勘探成果备受瞩目,但针对本地区地层压力及与天然气分布关系的研究较少。本文通过293口井实测的压力数据和154口井的测井数据分析发现,二叠系上石盒子组—太原组泥岩普遍存在“欠压实”特征,4个目标层位在压力剖面上分异明显,可划分为石炭系本溪组常压系统和二叠系山2段—盒8段负压系统。现今地层压力分布总体上具有东北高西南低的特点,二叠系压力分布与沉积相分布具有较好的一致性。“欠压实”泥岩层控制气藏纵向上的分布。二叠系气藏主要分布在负压地层中的“低压”部位,而石炭系本溪组气藏则主要分布在常压地层中的“高压”区域。发现地层压力与气藏分布关系对于本地区天然气勘探其有重要指导意义。

关键词 地层压力;天然气分布;上古生界;鄂尔多斯盆地

中图分类号 P618.130.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.03.005

Formation pressure and distribution of natural gas in the Upper Paleozoic, southeastern Ordos Basin

WANG Weili^{1,2}, GAO Hai ren²

1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2. Oil and Gas Exploration Company, Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Yan'an 716000, China

Abstract Exploration achievements in the Southeastern Ordos Basin have attracted tremendous attention in recent years. However, few researches about distribution of formation pressure and relation with natural gas have been carried out in this area. The measured formation pressure data of 293 wells and well log data of 154 wells are analyzed in this paper, and the results show that the mudstones from Upper Shihezi Formation to Taiyuan Formation of Permian are mostly undercompacted, and that the variations with depth of formation pressure in 4 target layers have obvious differentiation, which can be divided into negative pressure system of Permian and normal pressure system of Carboniferous in further. The distribution of current formation pressure is high in the east and north and low in the west and south, the relation between sedimentary facies and distribution of formation pressure in Permian are in a good consistency. Gas reservoirs on vertical zonation are controlled by the under compacted mudstone layers, and also can be found in the "low pressure" areas of negative pressure stratum in Permian and "high pressure" regions of normal pressure in Carboniferous. The discovery of the relation between formation pressure and gas reservoirs is significant for the following natural gas exploration in this area.

Keywords formation pressure; natural gas distribution; Upper Paleozoic; Ordos Basin

收稿日期:2014-08-05;修回日期:2014-09-23

基金项目:中央高校基本科研专项(2013G5270008)

作者简介:王伟力,博士研究生,研究方向为储层与成藏地质,电子信箱:wileyz@qq.com

引用格式:王伟力,高海仁.鄂尔多斯盆地东南部上古生界地层压力与天然气分布[J].科技导报,2015,33(3):37-42.

地层压力作为油气藏研究中的重要内容,贯穿于天然气勘探和开发的全过程,是气藏研究工作的重点和难点^[1-3]。近些年国内外诸多气田的勘探发现异常压力与气藏的分布存在着很大的联系,因此分析地层压力分布特征,寻找异常压力的成因和控制因素,通过剖析压力特征与天然气分布关系的内在机制,指导油气藏的勘探和发现,成为国内外学者的研究热点^[4-8]。

目前普遍认为鄂尔多斯盆地上古生界地层压力以负压和常压为主,高压较少存在^[9-11]。前人对地层负压的成因进行了深入探讨,认为低压形成原因有:白垩系地层大幅抬升剥蚀后地层温度下降、砂岩孔隙反弹和气体散失导致压力下降^[12,13],燕山运动后地层埋深增加导致的压力梯度降低和汽水密度差导致的负压存在^[14,15]。普遍认为构造抬升导致地层温度的下降是造成地层负压存在的主要原因^[16]。

鄂尔多斯盆地东南部在早古生代以浅海陆棚、三角洲前缘、前三三角洲等沉积环境为主,储层较北部河流沉积环境发育程度低,非天然气聚集的最有利场所^[17,18],针对该地区的研

究较少。近几年随着几个超千亿方储量大气田的发现,再次引起了广泛关注。本文借助实测压力数据和测井资料,对本地区地层压力进行系统描述,寻找地层压力与天然气分布的关系。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地东南部构造上位于伊陕斜坡东南侧,紧邻晋西挠褶(图1^[7])。地势上呈东高西低,北高南低^[19]。区内上古生界发育了石炭系上统的本溪组、二叠系下统的太原组和山西组、中统的下石盒子组和上石盒子组及上统的石千峰组(图1)。其中,本溪组、山西组山2段和山1段以及石盒子组盒8段的砂岩储层是本地区主要的含气层位^[17,20]。4套气层埋藏深度多在1970~3500 m,没有明显的边底水,所发育的沉积环境以本溪期的障壁岛沉积相和二叠系的三角洲前缘亚相为主,有别于盆地北部河流或三角洲平原沉积环境^[21]。4套气层孔隙度多小于10%,地面渗透率普遍低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于典型的致密砂岩气藏^[22,23]。

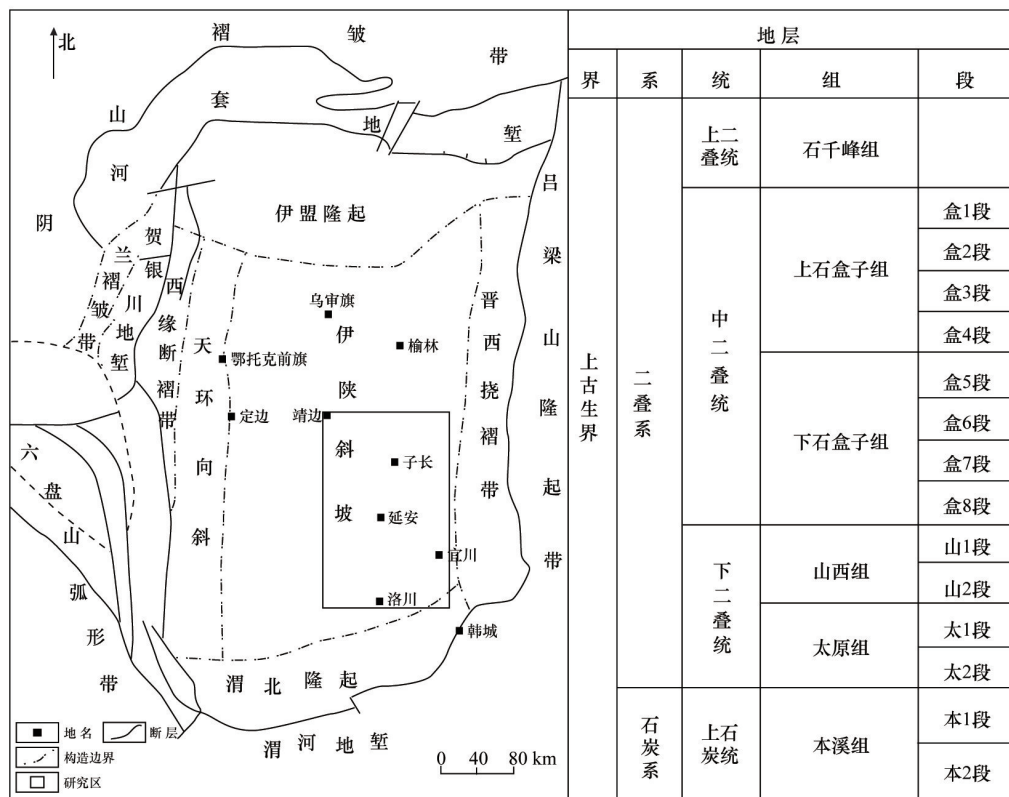


图1 鄂尔多斯盆地中东部构造位置及地层划分

Fig. 1 Structural position stratigraphic division in the Southeastern Ordos Basin

2 数据采集及处理

共收集了293口井本溪组一盒8段地层压力数据和154口测井曲线数据。数据点能够覆盖整个研究区,对区内的地层压力研究具有很好的代表性。

获得可靠稳定的地层压力数据,最直接的方法是实测法。但由于致密砂岩储层渗透性低,压力测试资料的准确性主要依据原始地层压力的恢复程度。一般情况,只要能够保证足够的压力恢复时间,就可以获得反映原始地层压力的准

确资料^[11]。本次研究中所用的压力数据均是在井中下入DDI石英电子压力计,关井恢复压力一定时间(大于400 h)后测得的。根据本地区上古生界试气报告等资料,对于关井压力恢复时间不够69口井的资料进行了排除,确保了所用数据的准确性。

3 地层压力分布特征

前人在不同地区根据地层压力系数的不同,对地层压力进行了划分,但因为研究内容和研究对象的不同,划分的标准存在着一定的差异^[7,24]。本文采用《GB/T 26979—2011天然气藏分类》的划分标准^[25]。根据研究区4个目的层位224个压力实测数据统计结果,本地区总体上以低压气藏为主(68.8%),常压为辅(31.2%),不存在高压及超高压气藏(表1)。根据154口井的测井数据分析认为,二叠系泥岩普遍存在“欠压实”状况(图2)。

表1 鄂尔多斯盆地东南部上古生界气藏类型分类统计
Table 1 Gas reservoir types of Upper Paleozoic in the southeastern Ordos Basin

层位	数据点	频率/%		
		压力系数 <0.9	压力系数 0.9~1.3	压力系数 1.3~1.8
盒8段	38	78.9	21.1	0
山1段	46	76.1	23.9	0
山2段	65	87.7	12.3	0
本溪组	75	42.7	57.3	0
合计	224	68.8	31.2	0
气藏分类		低压气藏	常压气藏	高压气藏

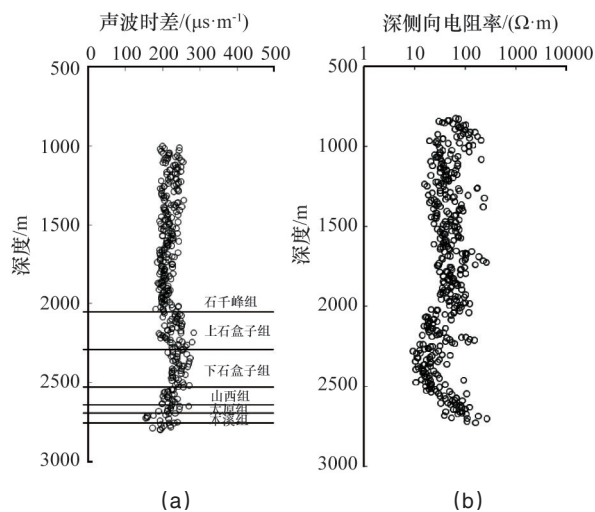


图2 鄂尔多斯盆地东南部Y451井声波时差(a)、深侧向电阻率(b)与深度关系

Fig. 2 Relationship between depth and AC (a), LLD (b) of well Y451 in the southeastern Ordos Basin

3.1 泥岩地层压力特征

通过对鄂尔多斯盆地东南部154口井泥岩压实研究表明,泥岩声波时差随深度变化关系与电阻率随深度变化关系此消彼长,声波时差大的部位,孔隙度大,电阻率小,符合一般的“欠压实”特征^[26,27]。区内上古生界泥岩“欠压实”从二叠系石千峰组底部开始,到上石盒子组底部达到最大幅度,从下石盒子组—太原组“欠压实”程度逐渐减小,一般在太原组底部“欠压实”消失,石炭系本溪组泥岩一般不存在“欠压实”状况。

本地区泥岩“欠压实”主要是由于晚三叠世—早白垩世盆地快速沉积造成的^[7,16,28]。与正常压实的泥岩相比,“欠压实”泥岩孔隙中的地层水排出受阻,泥岩层保存了较高的过剩压力^[29]。而较高的过剩压力可以有效地阻止下伏储层中天然气向上运移,对下覆气藏起到“高压封存”的作用。

3.2 储层垂向分布特征

鄂尔多斯盆地东南部上古生界砂岩地层压力整体表现为低压或常压(图3(a)),压力离散程度高,压力系数最小为0.62,最大1.18,地层压力梯度为0.65~1.18 MPa/hm。压力系数与气藏的埋藏深度负相关(图3(b))。这可能是因为在同一层段中,随着埋深的增大,地层温度升高,烃源岩生气强度增强,砂体中气柱高度增高,压力系数因此变小^[9,14]。本溪组、山2段、山1段及盒8段4套目的层段在压力剖面中分异特征明显(图3(a))。二叠系山2段—盒8段3套气层所测149个样品点中负压比例高(表1),压力基本上位于静水压力线左侧,少部分地区气层为常压(图3(a))。石炭系本溪组75个测试样品点中常压气藏占57.3%,负压为42.7%。因此鄂尔多斯盆地东南部上古生界气藏可进一步划分为石炭系本溪组常压系统和二叠系山2段—盒8段负压系统。

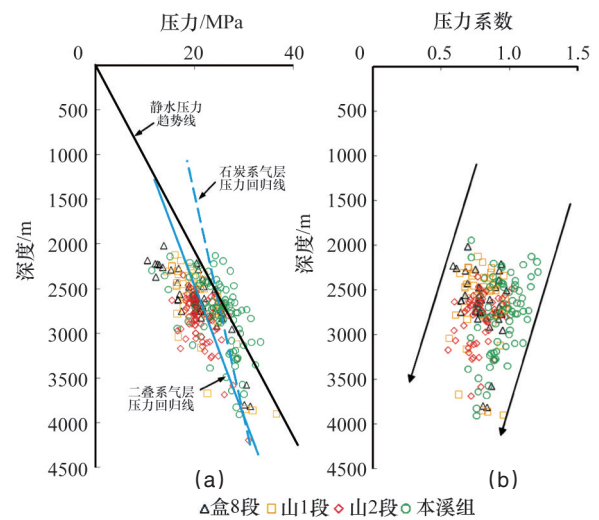


图3 鄂尔多斯盆地东南部地层压力(a)、压力系数(b)与深度关系

Fig. 3 Relationships between depth and geopressure (a), pressure coefficient (b) in the southeastern Ordos Basin

3.3 储层平面分布特征

鄂尔多斯盆地东南部上古生界现今地层压力分布总体具有东北高西南低特点(图4),这与区内东高西低,北高南低的构造形态基本一致。二叠系3套地层平面分布特征大致相似,以二叠系山西组山2段为例,常压地层仅集中在清涧—延川东侧小部分地区,西侧大部分地区则以负压地层为主,中部甘泉—延安—延长—富县一带呈现负压中的“高压”特征,总体上呈现“东北高西南低,中部高两侧低”的特征(图4(a))。本溪组常压地层分布范围较广,主要位于安塞—延安—宜川东侧,西侧为负压地区,且越往西压力系数越低(图4(b))。

二叠系地层压力平面分布与本地区沉积相分布具有较好的一致性(图4(a))。中部“高压”条带大多位于三角洲前

缘或前三角洲深水粉砂泥或泥质烃源岩沉积区域,负压则位于两侧的三角洲前缘水下分流河道浅水沉积环境。由于经历了晚三叠—早白垩世快速沉积阶段,本地区泥岩大多处于“欠压实”状态,再加上后期的生烃增压作用,经历过抬升剥蚀作用后的二叠系泥岩层内部依然表现为常压或高压^[12]。而“高压”两侧的区域由于天然气不断充注,砂体孔隙水中的地层水不断被驱替,再加上后期地层抬升剥蚀导致的上覆地层压力卸载和地层温度下降,使得本地区地层压力小于相同深度的静水压力,表现为负压状态。石炭系本溪组地层压力与沉积关系不明显(图4(b)),常压和负压地层在各个沉积环境中都有分布,而呈现东高西低的压力分布趋势可能与气藏埋深和天然气充注差异有一定关系^[11]。

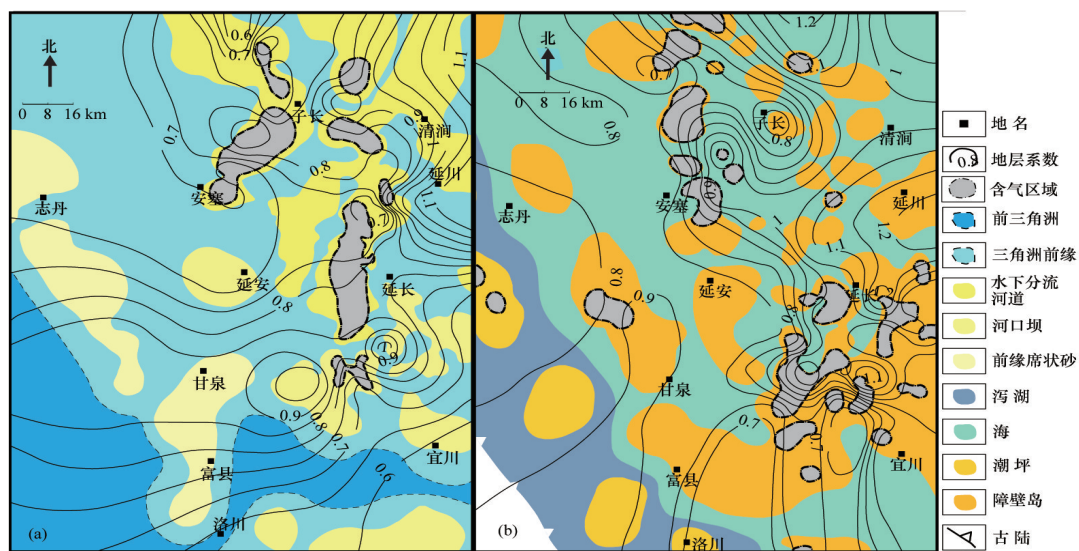


图4 鄂尔多斯盆地东南部上古生界山2段(a)和本溪组(b)压力系数与含气区域和沉积环境叠合图

Fig. 4 Maps show the relations between pressure coefficient and gas bearing area, sedimentary facies in the second member of Shanxi Formation (a) and Benxi Formation (b) of the Upper Paleozoic in the southeastern Ordos Basin

4 压力与气藏分布关系

4.1 气层主要分布在“欠压实”泥岩层以下层位

鄂尔多斯盆地东南部上古生界的区域盖层为上石盒子组巨厚泥岩层,区域盖层之下又存在多套储盖组合,储层与盖层多呈互层式发育,较厚的泥岩盖层多与储层直接接触,可作为其直接盖层。烃源岩层与储层之间存在的多条超压“欠压实”泥岩隔层,有效地阻挡了天然气扩散作用,使得区内目的层在纵向上含气性存在明显差异。

鄂尔多斯盆地东南部上古生界区域盖层上石盒子组上、下层段含气性存在明显差异。区域盖层以上的石千峰组,虽有储层和盖层的发育,但是其平均含气饱和度仅有13.6%。仅在盆地北东部的神木、米脂及西部的天深1井一带因盖层变薄或被破坏,在石千峰组形成了次生气藏^[30]。区域盖层以下的本溪组、山西组和石盒子组是本地区发现的主要含气层位,其含气性明显优于上覆层位,平均含气饱和度均高于

50%。由于含气目标层位内多条泥岩隔层处于“欠压实”状态,成为天然气向上二次运移的阻力,这导致从下而上各气层含气性存在差异。其中,靠近烃源岩层的山2段的含气性最好,累计扩散聚集强度为 $0.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。本溪组、山1段和盒8段累计扩散聚集强度分别只有 0.56×10^8 、 0.69×10^8 和 $0.68 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。含气性总体上呈现从山2段向两边目标层位逐渐降低的趋势。

4.2 二叠系气层主要分布在负压地层中的“低压”部位

最新的勘探实践证明,鄂尔多斯盆地东南部上古生界二叠系含气区主要分布在子长—安塞—延安—延长—清涧区域(图4(a))。该区域平均地层压力系数小于0.8,远小于研究区的东部和南部烃源岩发育区域,气藏多位于负压地层中的“低压”部位。

鄂尔多斯盆地上古生界天然气的以垂向运移为主^[31],天然气的充注使孔隙中的地层水不断被驱替,从而形成“上水

下气”的现象。气藏内部的地层压力等于气水面之上的静水柱压力与该点到气水界面的气柱压力之和,而天然气的密度远小于地层水的密度,因此普遍含气的二叠系地层以负压为主^[9]。研究区北部天然气富集程度好于其他区域,气柱高度高于其他地区,因此地层压力系数也小于临近区域,表现为负压地层中的“低压”。并且,地层压力系数与含气性成较好的负相关性,即含气性越好的区域,其压力系数也越低。

4.3 石炭系本溪组气层多分布在常压地层中的“高压”部位

石炭系本溪组含气区主要分布在延长—宜川和安塞—子长东一带(图4(b))。这些地区地层压力系数一般分布在0.9~1.1,高于周边以泥页岩为主的地层,气藏总体上位于常压地层中的“高压”部位。

Baker曾指出,充满自由气相的储层与充满液体的储层压力分布存在较大的区别。他认为负压、常压还是高压的出现受多种条件影响,但主要取决于储层与周围的连通情况。并依此将它们分为3类:第1类为隔离的刚性体,压力系数随埋藏加深而降低,可出现负压;第2类为开放系统,随着埋深增加,压力仍为静水压力;第3类为隔离的压实系统,压力有向岩石静压力趋近的趋势。假如有气体的充注会形成高压^[32,33]。石炭纪本溪期沉积环境以障壁岛、潮坪和泻湖为主,储层主要为透镜状砂体^[7]。这些砂体被周围的泥岩包裹,再加上上覆太原组致密的碳酸盐岩地层隔挡,使本溪组砂体形成了一个“隔离的压实系统”。部分物性较好的砂体在排烃期优先接收气体的充注,成藏后形成高压气藏。晚白垩世地层抬升剥蚀后,地层压力虽然有所下降,但依然表现为常压,且压力系数要高于周围充注程度较差的砂体地层和正常压实的泥岩地层。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地东南部上古生界二叠系上石盒子组—太原组泥岩普遍存在“欠压实”特征。“欠压实”的泥岩层保存了较高的过剩压力,对下覆气藏可以起到“高压封存”的作用。压力系数与埋深负相关。4个目标层位在压力剖面上分异明显,根据气藏压力与深度分布关系,将鄂尔多斯盆地东南部上古生界分为石炭系本溪组常压系统和二叠系山2—盒8段负压系统。

2) 鄂尔多斯盆地东南部现今地层压力分布总体上具有东北高西南低的特点。二叠系压力分布与沉积相分布具有较好的一致性,“高压”部分主要分布在三角洲前缘或前三角洲烃源岩发育区域,负压区域则主要位于烃源岩灶两侧的三角洲前缘水下分流通道。石炭系本溪组地层压力与沉积关系不明显。

3) “欠压实”泥岩层控制气层在纵向上的分布。已发现气藏多位于区域盖层上石盒子组以下的本溪组、山西组山2段、山1段和下石盒子组盒8段。4套含气层因泥岩隔层的存在,含气性总体上呈现从山2段向两边目的层位逐渐降低的趋势。平面上,由于气水密度差的原因,二叠系气藏多分布

在负压地层中的“低压部位”;而石炭系本溪组透镜状砂体作为“隔离的压实系统”,气藏则主要分布在常压地层中的“高压”部位。

参考文献(References)

- [1] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1-12.
- [2] Bachu S, Underschlutz J R. Large-scale under pressuring in the Mississippian-Cretaceous succession, southwestern Alberta Basin[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(7): 989-1004.
- [3] 李明诚, 李先奇, 尚尔杰. 深盆气预测与评价中的两个问题[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 6-7.
Li Mingcheng, Li Xianqi, Shang Erjie. Two problems on prediction and evaluation of deep basin gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(2): 6-7.
- [4] 杜树, 郑洪印, 焦秀琼. 异常压力与油气分布[J]. 地球科学前缘, 1995, 2(3/4): 137-147.
Du Xu, Zheng Hongyin, Jiao Xiuqiong. Abnormal pressure and hydrocarbon accumulation[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3/4): 137-147.
- [5] 邹华耀, 郝芳, 蔡勋育. 沉积盆地异常低压与低压油气藏成藏机理综述[J]. 地质科技情报, 2003, 22(2): 45-50.
Zou Huayao, Hao Fang, Cai Xunyu. Summarization of subnormal pressure and accumulation mechanisms of subnormally pressured petroleum reservoirs[J]. Geology Science and Technology Information, 2003, 22(2): 45-50.
- [6] 金博, 刘震, 张荣新, 等. 沉积盆地异常低压(负压)与油气分布[J]. 地球学报, 2004, 25(3): 351-356.
Jin Bo, Liu Zhen, Zhang Rongxin, et al. The anomalous low pressure (negative pressure) and hydrocarbon accumulation in a sedimentary basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(3): 351-356.
- [7] 过敏, 李仲东, 惠宽洋, 等. 储层压力与天然气分布关系——以鄂北塔巴庙地区上古生界储层为例[J]. 天然气工业, 2007, 27(4): 15-17.
Guo Min, Li Zhongdong, Xi Kuanyang, et al. Relationship between characteristics of reservoir pressure and distribution of natural gas: An example of Tabamiao Area, the northern Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(4): 15-17.
- [8] 杨帆, 于兴河, 李胜利, 等. 饶阳凹陷蠡县斜坡地层流体压力分布规律及其对油气成藏的影响[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(5): 809-813.
Yang Fan, Yu Xinghe, Li Shengli, et al. Distribution characteristics of fluid pressure in lixian slope, raoyang sub-basin and its impact on hydrocarbon accumulations[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(5): 809-813.
- [9] 袁际华, 柳广弟. 鄂尔多斯盆地上古生界异常低压分布特征及形成过程[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 792-799.
Yuan Jihua, Liu Guangdi. Distribution characteristics and formation process of Upper Paleozoic abnormally low pressure zones in Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2005, 26(6): 792-799.
- [10] Xu H, Tang D Z, Zhang J F, et al. Factors affecting the development of the pressure differential in Upper Paleozoic gas reservoirs in the Sulige and Yulin areas of the Ordos Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 85(1): 103-111.
- [11] 王晓梅, 赵靖舟, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界现今地层压力分布特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 646-651.
Wang Xiaomei, Zhao Jingzhou, Liu Xinshe, et al. Distribution characteristics and genesis of present formation pressure of the Upper

- Paleozoic in the eastern Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2013, 34(5): 646-651.
- [12] 王震亮, 陈荷立. 神木-榆林地区上古生界流体压力分布演化及对天然气成藏的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37(增1): 49-61.
Wang Zhenliang, Chen Heli. Distribution evolution of Upper Paleozoic fluid pressure and their effect on hydrocarbon accumulation in Shenmu-Yulin Area[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2007, 37(Suppl 1): 49-60.
- [13] 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): 34-37.
Feng Qiao, Geng Ansong, Xu Xiaorong, et al. Genesis of low-pressure gas reservoir of the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(1): 34-37.
- [14] 王胜利, 许化政. 鄂尔多斯盆地上古生界流体压力分布与成因[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(6): 536-540.
Wang Shengli, Xu Huazheng. Pressure distribution and genesis of fluid in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2010, 32(6): 536-540.
- [15] 陈义才, 张胜, 魏新善, 等. 苏里格气田下二叠统盒8段异常低压成因及其分布特征[J]. *天然气工业*, 2010, 30(11): 1-4.
Chen Yicai, Zhang Sheng, Wei Xinshan, et al. Causes and distribution of abnormal low pressure in the 8th member of the Lower Permian Shihezi Formation in the Sulige Gas Field[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(11): 1-4.
- [16] 许浩, 张君峰, 汤达祯, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田低压形成的控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 64-68.
Xu Hao, Zhang Junfeng, Tang Dazhen, et al. Controlling factors of underpressure reservoirs in the Sulige gas field, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 64-68.
- [17] 王伟力, 高海仁. 鄂尔多斯盆地中东部致密砂岩储层地质特征及控制因素[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(6): 1-8.
Wang Weili, Gao Hai ren. Geological characteristics and controlling factors of the upper paleozoic tight lithologic reservoir beds in the east central Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoir*, 2013, 25(6): 1-8.
- [18] Wang W L, Wang W B, Yao J, et al. Tight gas reservoir accumulation conditions and distribution patterns during the Upper Palaeozoic of the East-central Ordos Basin, Central China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2014, 32(4): 657-672.
- [19] 付金华, 段晓文, 姜英昆. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏地质特征及勘探方法[J]. *中国石油勘探*, 2001, 6(4): 68-75.
Fu Jinhua, Duan Xiaowen, Jiang Yingkun. Natural gas geology characteristics and exploration methods in Upper Paleozoic of Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2001, 6(4): 68-75.
- [20] Yang H, Fu J H, Liu X S, et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3): 295-303.
- [21] 李良, 袁志祥, 惠宽洋, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(3): 268-271.
Li Liang, Yuan Zhixiang, Xi Kuanyang, et al. Accumulation regularity of Upper Paleozoic gas in northern Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2000, 21(3): 268-271.
- [22] Kazemi H. Low-permeability gas sands[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1982, 34(10): 2229-2232.
- [23] 赵靖舟, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩大气田成藏模式[J]. *石油学报*, 2012, 33(增1): 37-52.
Zhao Jingzhou, Fu Jinhua, Yao Jingli, et al. Quasi-continuous accumulation model of large tight sandstone gas field in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(Suppl 1): 37-52.
- [24] 王宏语, 康西栋, 李军, 等. 松辽盆地徐家围子地区深层异常压力分布及其成因[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2002, 32(1): 40-42.
Wang Hongyu, Kang Xidong, Li Jun, et al. The distribution of anomalous pressure in the deep zone of Xujiaweizi, Songliao Basin and its genesis[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2002, 32(1): 40-42.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 26979—2011 天然气藏分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
The people's Republic of China State Administration of Quality Supervision Inspection and quarantine, Chinese National Standardization Management Committee. GB/T 26979—2011 The classification of natural gas pool[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2011.
- [26] 陈荷立, 罗晓容. 砂泥岩中异常高压流体压力的定量计算及其地质应用[J]. *地质论评*, 1988, 34(1): 54-62.
Chen Heli, Luo Xiaorong. The quantitative calculation of abnormal fluid pressure in argillaceous and arenaceous rocks and its geological applications[J]. *Geological Review*, 1988, 34(1): 54-62.
- [27] 易远元, 李健雄, 王功军. 测井资料在异常地层压力预测中的应用——以 LW21-1-1 井为例[J]. *石油天然气学报*, 2011, 33(9): 92-95.
Yi Yuanyuan, Li Jianxiong, Wang Gongjun. Application of logging data in abnormal pressure prediction: By taking Well 21-1-1 for example[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(9): 92-95.
- [28] 王伟, 崔晓朵. 鄂尔多斯盆地上古生界泥岩在油气成藏中的作用[J]. *沉积与特提斯地质*, 2010, 30(4): 24-28.
Wang Wei, Cui Xiaoduo. Role of the Upper Palaeozoic mudstones in the hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2010, 30(4): 24-28.
- [29] 傅广, 陈章明, 姜振学, 等. 欠压实泥岩在封盖油气中的作用[J]. *中国海上油气*, 1995, 9(3): 164-168.
Fu Guang, Chen Zhangming, Jiang Zhenxue, et al. The sealing of uncompact mudstone[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 1995, 9(3): 164-168.
- [30] 李仲东, 郝蜀民, 李良, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界压力封存箱与天然气的富集规律[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(4): 466-472.
Li Zhongdong, Hao Shumin, Li Liang, et al. Compartments in the Upper Paleozoic of Northern Ordos Basin and their relationship with gas enrichment[J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(4): 466-472.
- [31] 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.
- [32] 华保钦, 林锡祥, 杨小梅. 鄂尔多斯盆地地下古生界负压气藏及运移[J]. *沉积学报*, 1994, 11(2): 105-113.
Hua Baoqin, Lin Xixiang, Yang Xiaomei. The underpressure gas reservoir and gas migration of Ordovician in the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 11(2): 105-113.
- [33] Barker C. Generation of anomalous internal pressures in source rocks and its role in driving petroleum migration[J]. *Revue de l'Institut Francais du Petrole*, 1988, 43(3): 349-355.

(责任编辑 刘志远)