

文章编号:0253-9985(2011)06-0882-08

盖层封盖能力对天然气聚集的影响

——以鄂尔多斯盆地大牛地气田大12井区为例

张文旗¹, 王志章², 侯秀林¹, 徐芳³, 刘浪¹, 李春雷¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学, 北京 102249;

3. 中国石油大港油田分公司, 天津 300280)

摘要:针对大牛地气田生产过程中出现的纵向和平面产能差异大的问题,以岩心、分析化验和测井资料为基础,通过对盖层封闭机理及封闭能力对天然气富集影响分析,发现研究区盖层属于致密泥岩层与欠压实泥岩层相互叠置形成的超压封闭盖层,盖层封闭能力受正常压实的泥岩与欠压实泥岩共同控制;针对两种封闭机理分别选择盖层厚度、总孔隙度、含砂量和异常孔隙流体压力参数对盖层进行评价。评价结果表明:盖层封闭能力与储层平均试采无阻流量和最大试采无阻流量具有正相关关系;下石盒子组三段在区域盖层的封闭下成为主力产气层段,其高产气区主要集中在研究区的西部边缘,其他目的层段受制于直接盖层封闭能力,含气丰度较低,平面分布比较零散,均未形成大规模连片的含气区,这正是研究区产能受限的关键所在。

关键词:盖层;封闭机理;天然气;大牛地气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE112.25 **文献标识码:**A

Influences of caprock sealing capacity on natural gas accumulation : an example from D-12 wellblock of Daniudi gas field in Ordos Basin

Zhang Wenqi¹, Wang Zhizhang², Hou Xiulin¹, Xu Fang³, Liu Lang¹ and Li Chunlei¹

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;*

2. *China University of Petroleum, Beijing 102249, China;*

3. *Dagang Oilfield Branch, PetroChina, Tianjin 300280, China)*

Abstract: In view of the large variations of production capacity both vertically and laterally in Daniudi gas field, this paper analyzed the influences of the caprock sealing mechanism and capability on natural gas accumulation by cores, laboratory test and logging data. The result indicates that the caprocks are overpressure sealing caprocks consisting of interbedded tight mudstone and undercompacted mudstone. The sealing capability is jointly controlled by the normal compacted mudstone and uncompacted mudstone. Thickness, total porosity, gross-to-net ratio and abnormal pore fluid pressure are selected as parameters to assess the sealing capacity of caprocks. The sealing capability is in positive correlation with the tested average open flow capacity and the maximum open flow capacity. The 3rd member of Xiashihezi Formation is the main gas pay zone thanks to the regional caprocks, and the high yield area is located on the western edge of the study area. The other pay zones are controlled by the sealing ability of direct caprocks, their gas are too scattered with low abundance to form large-scale contiguous gas-bearing areas which is a key factor limiting productivity in the D-12 wellblock.

Key words: caprock, sealing mechanism, natural gas, Daniudi gas field, Ordos Basin

收稿日期:2011-06-01。

第一作者简介:张文旗(1981—),男,博士生,油气田开发地质。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05045)。

天然气勘探实践表明,盖层是作为天然气聚集成藏必不可少的条件之一,不仅控制着天然气在空间上的分布,而且控制着天然气富集的数量^[1]。有关盖层封气机理及其对成藏的作用,许多学者从盖层厚度、总孔隙度、含砂量、异常孔隙流体压力、排替压力、断裂对盖层的破坏程度及封堵性等方面对盖层封闭性进行了评价,并提出了许多对盖层封闭能力进行评价的方法^[1-7]。但这些研究多是在圈闭评价阶段,关注的是不同圈闭区域盖层的封盖能力对油气藏规模的影响。

本文以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例,针对同一圈闭内,生产过程中出现的纵向和平面产能差异大的问题,利用大量的生产井的测井与试采资料,从盖层厚度、总孔隙度、含砂量和异常孔隙流体压力参数出发,探讨了局部盖层封闭能力与试采关系。

1 地层及生储盖组合

大牛地气田位于陕西省榆林市与内蒙古自治区伊金霍洛旗、乌审旗交界地区。区域构造位置为鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部东段(图1),区内构造、断裂不发育,总体为一北东高、西南低的平缓单斜^[7-9]。大12井区位于气田的中部。

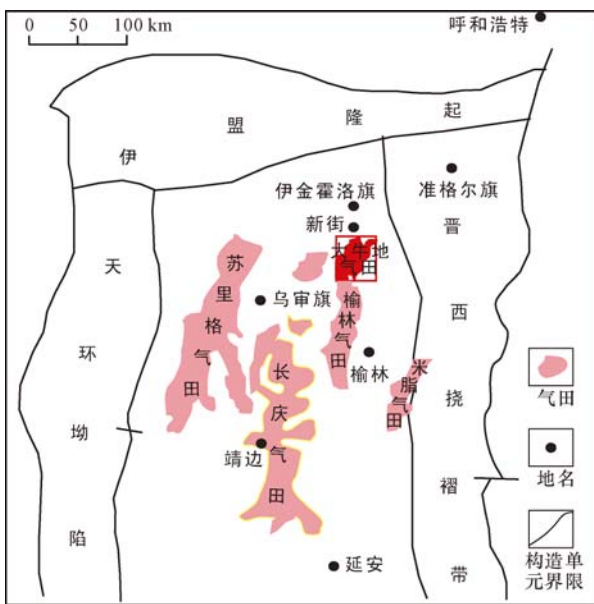


图1 鄂尔多斯盆地大牛地气田构造位置

Fig. 1 Structural location of Daniudi gas field, Ordos Basin

钻井揭露古生代地层有上二叠统石千峰组、上石盒子组,下二叠统下石盒子组、山西组,上石炭统太原组,中石炭统本溪组和下奥陶统马家沟组。盆地经过5个构造演化阶段形成了3套含油气系统^[10]。大牛地气田属于上古生界石炭-二叠系海陆交互相含煤碎屑岩含油气系统。该含油气系统发育多套生储盖组合(图2)。上石炭统太原组和下二叠统山西组的煤层、炭质泥岩和暗色泥岩是主要的气源岩。太原组障壁砂坝砂体、山西组三角洲前缘亚相分流河道砂体和下石盒子组辫状河河道砂体是有利的储层。下石盒子组和山西组厚层泥岩直接覆盖在储层之上,是局部性盖层;上石盒子组和石千峰组泥岩厚度大,分布广,是上古生界油气的区域性盖层。

2 盖层封闭机理

泥岩盖层声波时差值与泥岩欠压实程度存在明显的特征关系^[11]。因此,提取泥岩盖层段声波时差值,并建立它们与深度的关系。从图3可以看出,大牛地气田上古生界含气层系泥岩盖层普遍欠压实且存在超压,埋深不同,导致压实成岩程度不同,使其开始欠压实形成超压的埋深和超压值也不同。超压封闭的欠压实泥岩分为上、下致密层段和中间欠压实层段3个部分,上、下正常压实致密泥岩层段,将大量孔隙流体封闭在欠压实层段中,从而产生了较正常压实泥岩高的孔隙流体压力^[11]。正常压实的泥岩与欠压实泥岩共同控制研究区盖层的质量。

大牛地气田超压封闭泥岩盖层层位性极强,在全区可以对比,而且绝大多数出现在上二叠统上石盒子组中下部。不同地区由于埋深不同,其压实成岩程度不同,使其开始欠压实形成超压的埋深(或时期)和超压值也不同,超压值主要分布在20~25 MPa。由于泥岩之间泄压的不均一性,因此剩余压力在平面上具有差异性。剩余压力较大的区域主要分布在西南(DK1井)、中部(D10-4、D10-5井)及东北(D10-2、D25井)3个区块(图4),其过剩压力大于20 MPa。其余地区过剩压力多小于19 MPa,并且有从西南向东北减小的趋势。

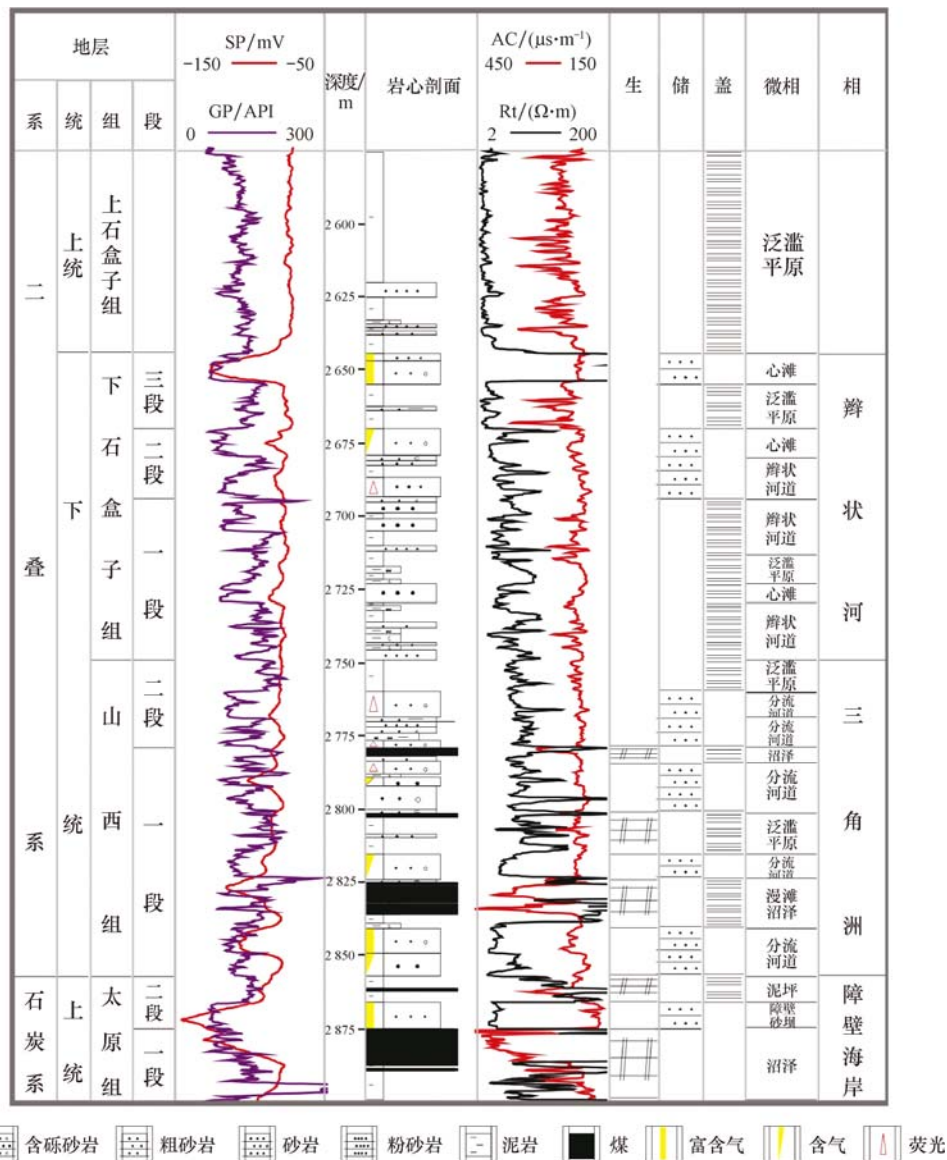


图 2 鄂尔多斯盆地大牛地气田生储盖组合综合柱状图

Fig. 2 Composite columnar section of source-reservoir-caprock combination of Daniudi gas field, Ordos Basin

3 盖层分类评价

3.1 泥岩盖层评价参数

根据研究区盖层的封闭机理,分别选取厚度、总孔隙度、含砂量和异常孔隙流体压力等几个参数对泥岩盖层的封盖性能进行评价^[12]:

1) 厚度

研究区上石盒子组为红色泥岩与砂质泥岩互层,单层泥岩厚度约 35 ~ 95 m,泥岩总厚约 110 ~ 190 m,研究区分布广泛,且连续性较好。构成了太原组—山西组—下石盒子组的区域性盖层。山

西组和下石盒子组内发育的三角洲分流河道间、沼泽和泛滥盆地泥岩,单层厚度为 5 ~ 30 m,可以形成直接盖层或侧向遮挡层。

2) 总孔隙度

总孔隙度的大小反映泥岩压实的程度。由中子、密度测井曲线计算得到泥岩的总孔隙度。研究区泥岩盖层总孔隙度分布在 4.4% ~ 14.6%,平均总孔隙度为 7.6%,总体上该区泥岩压实程度较高,封闭性能较好。

3) 含砂量

含砂量的高低直接影响孔隙度、渗透率和排替压力的大小。直接利用自然伽马测井曲线计算

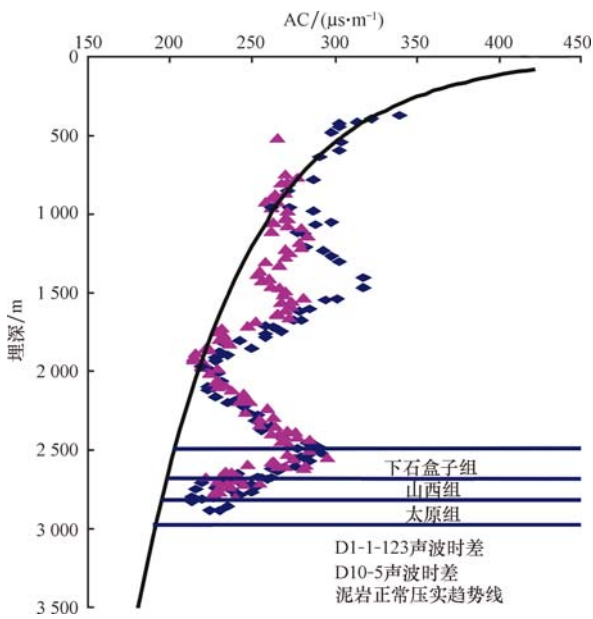


图3 鄂尔多斯盆地大牛地气田泥岩盖层声波时差与埋深关系

Fig.3 Relationship between interval transit time and depth of the mudstone caprock in Daniudi gas field, Ordos Basin

得到泥岩含砂量。研究区泥岩盖层含砂量主要分布在 8.0% ~ 42.1%, 平均含砂量为 17%, 含砂量较低。

4) 异常孔隙流体压力

根据 Magara 提出的等效深度法^[13], 求得本区目前埋深状况下的欠压实泥岩内的总孔隙流体压力。研究区最大异常孔隙流体压力一般出现在上石盒子组区域盖层, 基本在 12 ~ 18 MPa; 从下石盒子组到太原组, 泥岩异常孔隙流体压力逐渐减小, 说明泥岩孔隙流体排出越彻底, 异常孔隙流体压力幅度越小。

3.2 盖层分类评价

对于下石盒子组、山西组和太原组的盖层, 选取厚度、总孔隙度、含砂量和最大异常孔隙流体压力作为评价的参数, 进行 Q 型聚类分析, 按照欧氏距离 2.1 的标准(图 5), 可把本区盖层分为好、中、差和极差 4 类(表 1)。

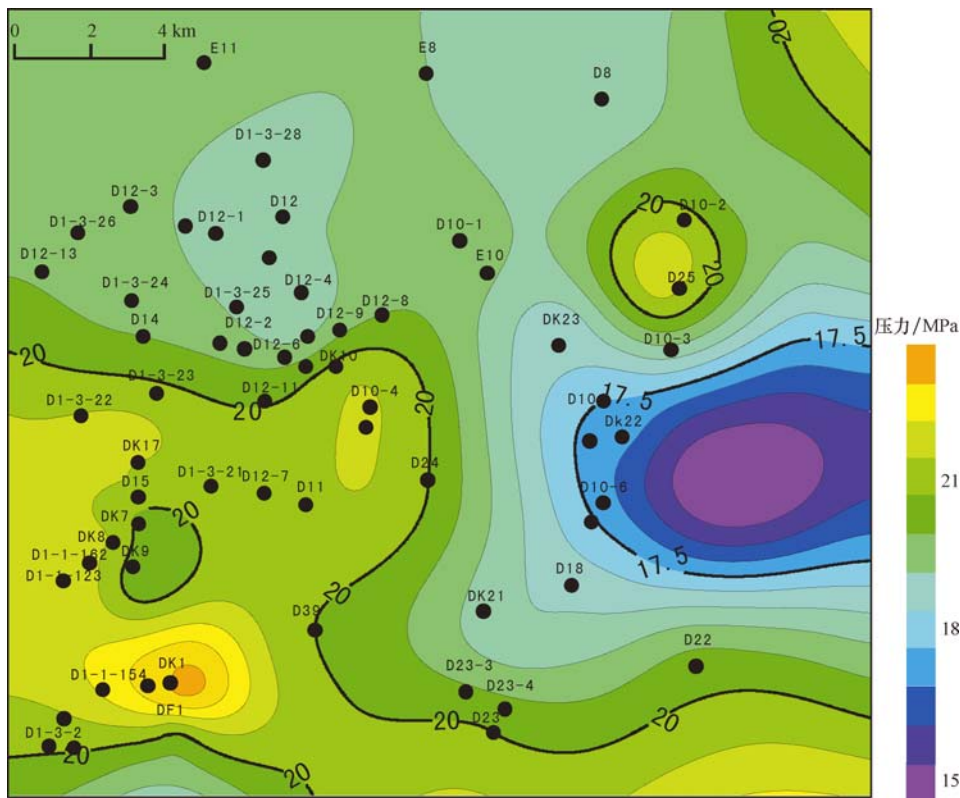


图4 鄂尔多斯盆地大牛地气田大12井区盖层剩余压力分布

Fig.4 Residual pressure distribution of caprocks in D-12 wellblock, Daniudi gas field, Ordos Basin

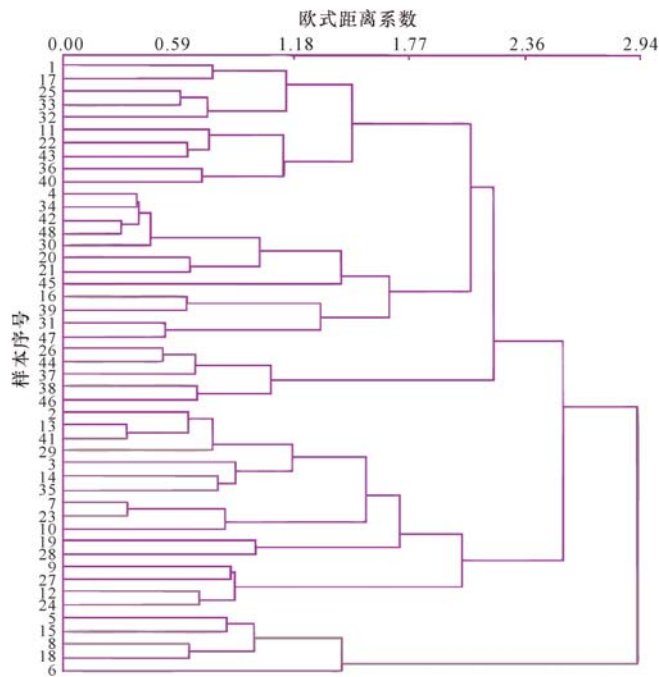


图 5 欧氏距离法聚类谱系特征

Fig. 5 Clustering spectral characteristics of Euclidean distance method

表 1 鄂尔多斯盆地大牛地气田盖层分类标准

Table 1 Standards for classification of caprocks in Daniudi gas field, Ordos Basin

类别	厚度/m		总孔隙度,%		含砂量,%		最大异常孔隙流体压力/MPa	
	平均	分布范围	平均	分布范围	平均	分布范围	平均	分布范围
I类(好)	45.2	28.3~97.2	6.5	4.4~10.4	9.4	1.4~22.6	18.1	13.3~23.4
II类(中)	27.2	10.1~46.8	7.7	5.9~11.6	16.3	0.8~31.6	13.6	10.0~20.5
III类(差)	22.8	7.0~35.9	8.6	6.7~13.1	19.6	4.3~38.4	9.7	6.0~11.8
IV类(极差)	7.7	3.4~23.7	9.2	9.9~14.6	31.0	20.3~42.1	6.5	4.5~10.0

表 2 鄂尔多斯盆地大牛地气田盖层分布与试采关系

Table 2 Relationship between caprock distribution and tested production in Daniudi gas field, Ordos Basin

层号	I类盖层面积 百分比,%	II类盖层面积 百分比,%	III类盖层面积 百分比,%	IV类盖层面积 百分比,%	平均储层 厚度/m	单层试气 井数/口	平均单层试采无阻 流量/(10 ⁴ m ³ /d)	最大单层试采无阻 流量/(10 ⁴ m ³ /d)
盒3段	100	0	0	0	15.0	11	6.30	21.00
盒2段	5	14	56	19	13.0	8	1.32	2.01
盒1段	3	32	39	26	26.0	26	1.34	4.52
山2段	9	43	42	5	17.0	21	2.14	7.03
山1段	4	17	52	27	27.0	26	1.35	3.59
太2段	0	23	67	10	8.5	15	1.47	2.92

4 盖层对天然气聚集影响分析

从太原组、山西组到下石盒子组是近源型成藏组合。在成藏组合内,几乎所有砂层都含气^[14-17]。在此背景下,盖层的封闭性决定了天然气聚集丰度的高低。利用盖层分类评价结果,统计了研究区盖层分布与试采无阻流量的关系(表2)。

4.1 区域性盖层

石盒子组二段上覆上石盒子组泥岩盖层厚 100 m 左右,泥岩总孔隙度及含砂量低,排替压力高,全部属于 I 类盖层,对整个研究区的目的层形成了整体封盖。在其封闭下的石盒子组三段储层平均试采无阻流量为 $6.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最大试采无阻流量为 $21 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,达到本区最大水平,纵向上与

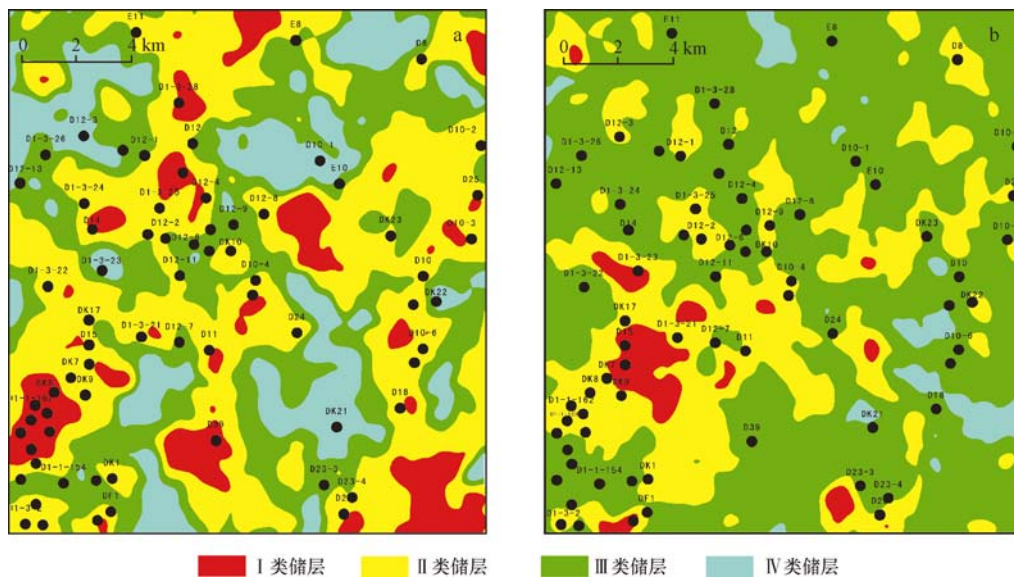


图6 鄂尔多斯盆地大12井区储层质量评价

Fig. 6 Reservoir quality of D-12 wellblock in Daniudi gas field, Ordos Basin

a. 下石盒子组盒三段; b. 山西组一段

其他生产层相比含气丰度最大。

从石盒子组三段储层质量综合评价图可以看出(图6a), I 和 II 类储层在平面上沿着物源呈南北方向展布。I 类储层对应辫状河沉积中的心滩微相,生产井无阻流量基本大于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; II 类储层对应辫状河道微相,生产井无阻流量基本大于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均为 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; III 类储层对应河道侧缘微相,生产井无阻流量都小于 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。石盒子组三段储层在上部区域盖层的整体封盖下,生产井的无阻流量主要由储层控制。

4.2 局部性盖层

以山西组一段为例,山西组是主要的成煤期,山西组一段中上部发育的煤层既是气源层,同时又是山西组一段的盖层。另外,太原组二段顶部广泛发育的煤层和暗色泥岩也是山西组一段的气源层。储层主要位于山西组一段下部,其平均厚度较大,接近 30 m。整个山西组一段有良好的气源层和储层。

由盖层分类评价结果来看,山西组一段盖层质量差, I 类盖层面积仅占 4%, III 和 IV 类盖层的比重达到 79%,因此盖层对天然气的封盖性差,致使整个山西组一段平均单层试采无阻流量只有 $1.35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,最大单层试采无阻流量也只有 $3.59 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (表 2),这充分说明在天然气聚

集的过程中向上逸散较多,盖层质量对气层的含气丰度起着宏观的控制作用。

对于 D8 井,山西组一段储层较好(图 6b),而该层相应无阻流量只有 $0.09 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,与其他同类储层相差巨大。D8 井所在的研究区东北部地区山西组一段盖层质量差,主要为 III 类、IV 类盖层(图 7),同类储层无阻流量的巨大差异由盖层质量所控制。

综上所述,通过盖层对天然气富集影响分析,石盒子组三段在区域盖层的封闭下成为研究区主力产气层段;研究区其他目的层段受制于直接盖层封闭能力,总体上处于低产规模,虽然各个目的层段具体的产气区分布不尽相同,但总体上含气丰度较低,平面分布比较零散,均未形成大规模连片的含气区,这正是研究区产能受限的关键所在。

5 结论

1) 大牛地气田太原组、山西组和下石盒子组的盖层特征具有一定的差异性,各层段盖层的差异性主要表现在盖层厚度与展布、岩石学特征及测井响应等方面。

2) 研究区泥岩盖层属于超压封闭盖层;下石盒子组在区域盖层的封闭下成为研究区主力产气层段,其高产气区主要集中在研究区的西部边缘,

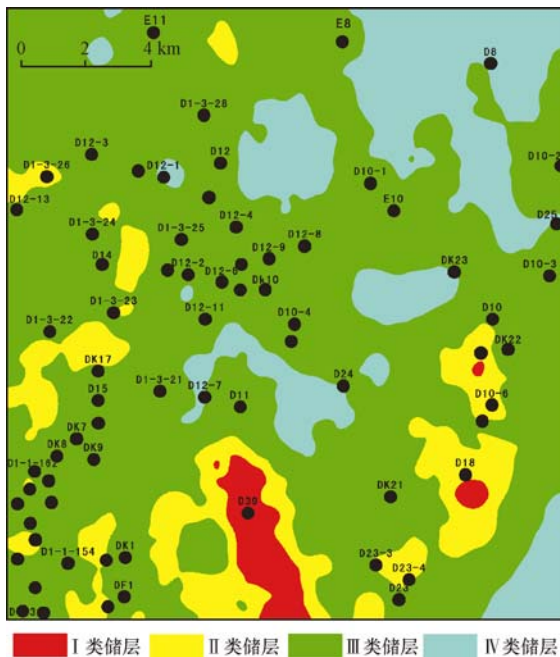


图7 鄂尔多斯盆地大牛地气田大12井区
山西组一段盖层质量评价

Fig.7 Caprock quality of the 1st Member of Shanxi Formation of D-12 wellblock in Daniudi gas field, Ordos Basin

其他目的层段受制于直接盖层封闭能力,含气丰度较低,平面分布比较零散,未形成大规模连片的含气区。

参 考 文 献

- [1] 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): 742-745, 753.
Lü 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): 742-745, 753.
- [2] 付广,陈章明,姜振学. 盖层封堵能力评价方法及其应用[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(3): 46-50.
Fu Guang, Chen Zhangming, Jiang Zhenxue. Evaluation of the sealing ability of cap rock and its application[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(3): 46-50.
- [3] 张立含,周广胜. 气藏盖层封气能力评价方法的改进及应用——以我国46个大中型气田为例[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 388-394.
Zhang Lihan, Zhou Guangsheng. Improvement and application of the methods of gas reservoir cap sealing ability[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 388-394.
- [4] 吕延防,张绍臣,王亚明. 盖层封闭能力与盖层厚度的定量关系[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 27-30.

- Lü Yanfang, Zhang Shaochen, Wang Yaming. Research of quantitative relations between sealing ability and thickness of cap rock[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(2): 27-30.
- [5] 付广,付晓飞,孟庆芬. 用声波时差研究泥岩盖层毛细管封闭能力[J]. 石油物探, 2003, 42(2): 261-264
Fu Guang, Fu Xiaofei, Meng Qingfen. Research of capillary seal ability and its formation period of mudstone cap rock with acoustic transit time[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003, 42(2): 261-264.
- [6] 薛永超,程林松,付广. 大庆长垣以东地区登二段泥质岩盖层封气能力综合评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(5): 626-630.
Xue Yongchao, Cheng Linsong, Fu Guang. Comprehensive evaluation of gas sealing ability of the lower Denglouku formation (K1d2) mudstone cap-rock in the east of the Daqing placanticline[J]. Depression Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2005, 35(5): 626-630.
- [7] 赵长举. 大牛地气田上古生界储盖组合测井分析[J]. 测井技术, 2005, 29(4): 345-347.
Zhao Changju. Log interpretation of reservoir & cap rock in upper Palaeozoic in Daniudi gas field[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(4): 345-347.
- [8] 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, Hui Kuanyang, et al. Accumulation regularity of Upper Paleozoic gas in north Ordos basin[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 268-271.
- [9] 郝蜀民,惠宽洋,李良. 鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 762-768.
Hao Shumin, Hui Kuanyang, Li Liang. Reservoiring features of Daniudi low-permeability gas field in Ordos basin and its exploration and development technologies[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 762-768.
- [10] 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.
- [11] 付广. 泥岩盖层的超压封闭演化特征及封气有效性[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(5): 7-9.
Fu Guang. Seal evolution characteristics of overpressured mudstone and its seal efficiency[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007, 31(5): 7-9.
- [12] 谭增响,刘洪亮. 应用测井资料评价吐哈盆地盖层物性封闭[J]. 测井技术, 2004, 28(1): 41-44.
Tan Zengxiang, Liu Hongliang. Evaluation of trap properties of capping beds in Tuha basin using log data[J]. Well Logging Technology, 2004, 28(1): 41-44.

- [13] 李国平. 天然气封盖层研究与评价[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
Li Guoping. Research and evaluation of natural gas seal layer [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [14] 杨华,张军,王飞雁,等. 鄂尔多斯盆地古生界含气系统特征[J]. 天然气工业,2000,20(6):7-11.
Yang Hua, Zhang Jun, Wang Feiyan, et al. Characteristics of Paleozoic gas system in e'erdusi basin[J]. Natural gas industry, 2000, 20(6): 7-11.
- [15] 郝蜀民,李良,尤欢增. 大牛地气田石炭—二叠系海陆过渡沉积体系与近源成藏模式[J]. 中国地质,2007,38(4):606-610.
Hao Shumin, Li Liang, You Huanzeng. Permo-Carboniferous paralic depositional systems in the Daniudi gas field and its near-source box-type gas accumulation-forming model [J]. Geology in China, 2007, 38(4): 606-610.
- [16] 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.
- [17] 赵林,夏新宇,戴金星. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气的运移与聚集[J]. 地质地球化学,2000,28(3):48-53.
Zhao Lin, Xia Xinyu, Dai Jinxing. Migration and accumulation of natural gases in Upper Paleozoic Ordos basin [J]. Geology - Geochemistry, 2000, 28(3): 48-53.

(编辑 张亚雄)

(上接第866页)

- [9] Fisher R V, Schmincke H U. Pyroclastic rocks [M]. London: Springer Verlag, 1984: 1-472.
- [10] 刘祥,向天元. 中国东北地区新生代火山和火山碎屑堆积物资源与灾害[M]. 长春:吉林大学出版社,1997:1-161.
Liu Xiang, Xiang Tianyuan. Cenozoic volcanoes and pyroclastic deposits in northeastern China [M]. Changchun: Jilin University Publishing House, 1997: 1-161.
- [11] Malm O A, Furnes H, Bjorlykke K. Volcaniclastic of Middle Jurassic age in the statford oil field of the North Sea [J]. Neues Jahrbuch Geologische Palaeontologie Monatshefte, 1979, 10: 607-618.
- [12] Cita M B, Grignani D. Nature and origin of Late Neogene Mediterranean sapropels [J]. Nature and Origin of Cretaceous Carbon-rich facies, 1982: 165-196.
- [13] Cas R A F, Wright J V. Volcanic successions, modern and ancient [M]. London, United Kingdom: Allen and Unwin, 1987: 1-472.
- [14] French D E, Freeman K J. Volcanic yield another oil field [J]. World Oil, 1979: 58-63.
- [15] Parsons W H. Criteria for the recognition of volcanic breccias [J]. Review: Geological Society of America Memoir 115, 1969: 263-304.
- [16] 刘祥,王锡魁. 吉林省辉南县大龙湾火山基浪(base-surge)堆积物的发现[J]. 地质论评,1987,33(6):577-582.
Liu Xiang, Wang Xikui. Discovery of the volcanic base-surge deposits in Dalongwan, Huinan County, Jilin Province [J]. Geological Review, 1987, 33(6): 577-582.
- [17] Crowe B M, Fisher R V. Sedimentary structure in base-surge deposits with special reference to cross-bedding Ubehebe Craters, Death Valley, California [J]. Geological society American Bulletin, 1973, 84: 663-682.
- [18] Moor J G, Nakamura K, Alcaraz A. The 1965 eruption of Taal volcano [J]. Science, 1966, 51: 955-960.
- [19] Waters A C, Fisher R V. Base-surge and their deposits: Capelinhos and Taal Volcanoes [J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76: 5596-5614.
- [20] Riggs N R, Busby-spera C J. Evolution of a multi-vent volcanic complex within a subsiding arc graben depression: Mount Wrightson Formation, Arizona [J]. Geological Society of America Bulletin, 1990, 102: 1114-1135.
- [21] Loucks R G, Dodge M M, Galloway W E. Regional controls on diagenesis and reservoir quality in Lower Tertiary sandstones along the Texas Gulf Coast [J]. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1984, 37: 15-45.
- [22] Klass M J, Kersey D G, Berg R R, et al. Diagenesis and secondary porosity in Vicksburg sandstones, McAllen ranch field, Hidalgo County, Texas [J]. Transactions, Gulf Coast Association of Geological Societies, 1981, 30: 115-123.
- [23] Loucks R G, Dodge M M, Galloway W E. Importance of secondary leached porosity in Lower Tertiary sandstones along the Texas Gulf Coast [J]. Transactions, Gulf Coast Association of Geological Societies, 1979, 29: 164-171.
- [24] Vernik L. A new type of reservoir rock in volcaniclastic sequences [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1990, 74: 830-836.
- [25] 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.

(编辑 高岩)