文章编号：1673−9469（2018）03−0086−04　　doi:10.3969/j.issn.1673−9469.2018.03.017

多层合采气藏层间动用差异及其主控因素研究

代金友[1]，任茜莹[1]，吕利刚[2]，穆中奇[1]，刘永建[2]，代 恒[2]，王永林[2]，张争航[2]
(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院，北京 102249；2. 中国石油长庆油田公司 第一采气厂，宁夏 银川 750006)

摘要：以靖边气田A井区为例，利用钻井及生产动态资料，通过地质储量、动储量、泄流半径、动静储量比计算与分析，详细剖析了多层合采气藏层间动用差异及其主控因素。研究表明：靖边气田多层合采条件下层间动用极不均衡，小层动静储量比最小6.8%、最大79.8%，差异较大；气藏呈现一高多低的动用格局，马五$_1^3$动用突出，其它小层动用普遍较低；相关性分析表明，层间动用差异受控于储层物性，尤其是渗透率，且小层动静储量比与渗透率呈指数密切相关。

关键词：靖边气田；多层合采；层间动用差异；主控因素
中图分类号：TE3　　**文献标志码**：A

Study on interlayer production difference and main control factors of commingling production gas reservoir

DAI Jinyou[1]，REN Qianying[1]，LV Ligang[2]，MU Zhongqi[1]，LIU Yongjian[2]，DAI Heng[2]，WANG Yonglin[2]，ZHANG Zhenghang[2]
(1.College of Petroleum Engineering，China University of Petroleum (Beijing)，Beijing 102249，China；
2. No.1 Production Plant，Petro China Changqing Oilfield Company，Yinchuan，Ningxia 750006，China)

Abstract：Taking Jingbian gas field A area as an example，this paper analyzes the interlayer production difference and main control factors of commingling production gas reservoir by using drilling and production dynamic data and through calculation and analysis of geological reserves，dynamic reserves，discharge radius and dynamic-static reserves ratio. The results show that the dynamic and static reserve ratio of the small layer is 6.8 % minimum and 79.8 % maximum in Jingbian gas field. The utilization of gas reservoir shows a pattern of one high and the rest low，the utilization of Ma 513 is prominent，and the utilization of other layers is generally low；The correlation analysis shows that the interlayer production difference is controlled by reservoir physical properties，especially permeability，which shows that the ratio of static and dynamic reserves of small layer increases exponentially with permeability.

Key words：Jingbian gas field；Commingling production；Interlayer production difference；Main control factors.

我国气田以多层叠合气田为主，其开发的最大特点是多层合采[1-5]。多层合采必然引发层间矛盾，导致层间动用不均衡。目前，多数学者着重于对气藏整体动用程度进行研究[6]或对气藏平面动用差异的分类研究[7]，而对层间动用程度及其动用差异的研究较少；近年来油田现场注意到了层间动用差异对生产的影响，并利用产气剖面资料开展了分层产量贡献率的研究[8]，但由于测试井资料有限，尚不能对多层合采气藏层间动用差异给出全面系统的规律性认识。本文针对目前研究工作不足，以靖边气田A井区为例，综合利用钻井及生产动态资料，通过地质储量、动储量、泄流半径、动静储量比计算与分析，

收稿日期：2018-03-22
基金项目：国家科技重大专项(2008ZX05009-004-03)
作者简介：代金友(1975-)，男，黑龙江海伦人，博士，副教授，主要从事油气田开发理论教学与研究工作。

详细剖析了多层合采气藏层间动用差异及其主控因素，以期对此类气田深入开发和后期调整提供参考。

1 井区概况

A 井区位于靖边气田中部，是靖边气田的主力产气区，采用一套井网多层合采方式开发。井区面积 804 km^2，地质储量 395.1×10^8 m^3，区内共有气井 100 口，单井控制半径 1.6 km。A 井区主要含气层为马家沟组五段顶部风化壳储层，由上到下发育 8 个气层：马五$_1^1$、马五$_1^2$、马五$_1^3$、马五$_1^4$、马五$_2^1$、马五$_2^2$、马五$_3^1$、马五$_4^{1a}$。气层平均孔隙度 5.5%、渗透率 0.29×10^{-3} μm^2、含气饱和度 75.7 %，整体属于特低孔 - 超低渗气藏。

自 1998 年开采以来，A 井区累产气 135.9×10^8 m^3，累产水 24.4×10^4 m^3，地质储量采出程度 34.4%。开采整个过程中地层压力下降明显，井区平均油压由 25 MPa 下降到 5.2 MPa，下降了 80%；平均套压由 25 MPa 下降到 7.2 MPa，下降了 70%。目前，A 井区平均日产气 149.9×10^4 m^3，日产水 36.8 m^3，开井数 70 口 (图 1)。A 井区经过近 20 年的开发，目前处于稳产末期，弄清气藏层间动用程度、动用差异及其主控因素是落实气藏开发潜力，明确后期调整挖潜方向和提高采收率的迫切需求。

2 层间动用差异研究

考虑到 A 井区采用多层合采方式开发，为弄清气藏层间储量动用程度及动用差异，利用钻井、测井解释、高压物性及生产动态资料，以小层为目标单元，进行了地质储量、动储量、泄流半径、动静储量比计算与分析。其中，地质储量采用容积法计算，动储量应用产量不稳定法计算。产量不稳定分析法是在引入拟等效时间将变压力 (或变产量) 生产数据等效为恒压力 (或恒流量) 数据基础上，利用气井生产历史数据与典型图版进行拟合，进而计算可动储量的方法。该方法建立在常规的生产动态资料之上 (井口产量、压力)，在很大程度上能够适应气

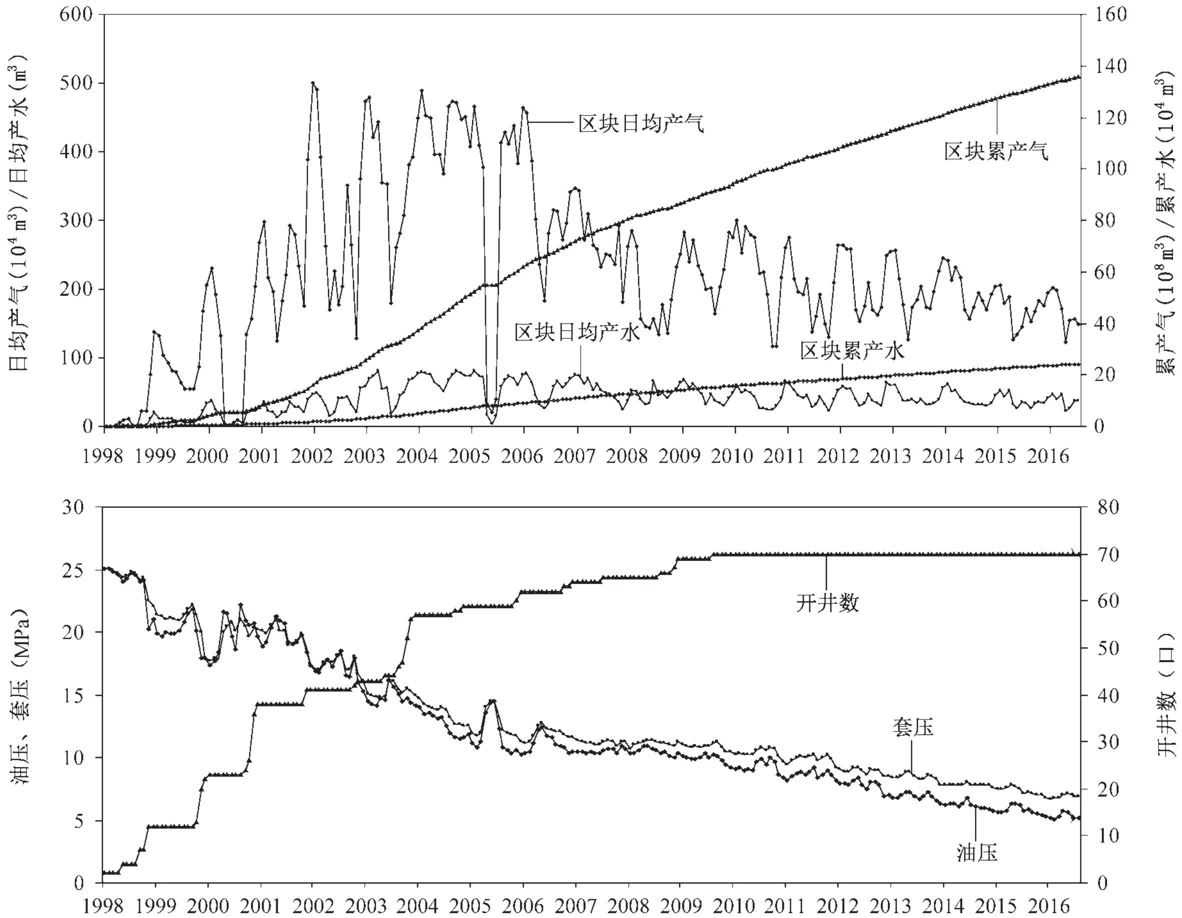

图 1 A 井区生产曲线

Fig.1 Production curve of area A

井工作制度不稳定的情况，对地层压力测试点的依赖程度也相对较低，对于低渗非均质气藏具有较大优势 [9]。为了将动储量拟合到小层，采用产量不稳定分析法计算之前，首先结合生产动态资料、射孔数据以及测井解释成果采用地层系数法 (KH 值法) 进行了产量劈分 [10]，然后应用产量不稳定法 (RTA 软件) 分层计算动储量和泄流半径。

由表 1 可以看出，A 井区地质储量合计为 395.1×10^8 m^3，动储量合计 220.9×10^8 m^3。地质储量和动储量在各小层分布不均衡：地质储量比例由高至低依次为：马五 $_1^3$(40.88%)> 马五 $_1^2$(16.72%)> 马五 $_4^{1a}$(16.55%)> 马五 $_2^2$(11.58%)> 马五 $_1^4$(8.67%)> 马五 $_1^1$(4.75%)> 马五 $_2^1$(0.51%)> 马五 $_3^1$(0.33%)。动储量比例由高至低依次为：马五 $_1^3$(58.37%)> 马五 $_4^{1a}$(16.38%)> 马五 $_1^2$(11.87%)> 马五 $_1^4$(8.34%)> 马五 $_1^1$(3.29%)> 马五 $_2^2$(1.6%)> 马五 $_2^1$(0.11%)> 马五 $_3^1$(0.04%)。即马五 $_1^3$ 小层地质储量和动储量比例最高，而马五 $_3^1$ 小层地质储量和动储量比例最低。

由于地质储量为储层中的天然气蕴藏量，是储层动用的物质基础；而动储量是在现有工艺技术和井网条件下，气井投入生产直至波及范围内的地层压力降为零时可采出的天然气总量，反映了储层中天然气地质储量的动用规模 [11]；为此，选取动静储量比作为定量评价小层储量动用程度的指标，动静储量比是动储量与原始地质储量比值，综合反映了目前井网下地质储量的动用程度：

动静储量比 = 动储量 / 地质储量 ×100%

从表 1 来看：A 井区小层动用程度由高到低依次为：马五 $_1^3$(79.8%)> 马五 $_4^{1a}$(55.3%)> 马五 $_1^4$(53.7%)> 马五 $_1^2$(39.7%)> 马五 $_1^1$(38.7%)> 马五 $_2^1$(12.1%)> 马五 $_2^2$(7.7%)> 马五 $_3^1$(6.8%)。这说明靖边气田多层合采条件下小层动用极不均衡，小层动静储量比介于 6.8% ～ 79.8% 之间，差异很大。气藏动用整体呈现一高多低的格局，即马五 $_1^3$ 动用突出、动静储量比高达 79.8%，其它小层动用普遍较低 (6.8% ～ 55.3%)，具有较大挖潜潜力。

3 层间动用差异主控因素

靖边气田储层动用呈现一高多低的动用格局，层间动用差异很大。确定产生层间动用差异的原因、明确层间动用差异主控因素，是气藏后期均衡开采、调整挖潜和提高采收率的关键。为此，选取小层孔隙度、渗透率、有效厚度、含气饱和度、地层系数等多项参数进行统计并与小层动静储量比进行相关性分析，发现储层物性、尤其渗透率对小层动用程度有直接影响。

由表 1 可以看出：靖边气田 A 井区小层渗透率由高至低排序为：马五 $_1^3$(0.619×10^{-3} μm^2)> 马五 $_1^4$ (0.425×10^{-3} μm^2) > 马五 $_1^2$(0.422×10^{-3} μm^2) > 马五 $_4^{1a}$ (0.394×10^{-3} μm^2)> 马五 $_1^1$(0.389×10^{-3} μm^2) > 马五 $_2^2$ (0.052×10^{-3} μm^2) > 马五 $_2^1$($.029\times10^{-3}$ μm^2)> 马五 $_3^1$ (0.01×10^{-3} μm^2)。

从渗透率与泄流半径、动静储量比相关关系 (图 2、图 3) 来看，渗透率对小层泄流半径以及动静储量比有着直接而显著影响。由图 2 可知：渗透率越高，小层泄流半径越大，二者呈幂指数相关，复相关系数 0.947 2。其中，马五 $_1^3$ 渗透率最好、泄流半径最大，为 1 485 m；而马五 $_1^4$、马五 $_1^2$、马五 $_4^{1a}$、马五 $_1^1$ 渗透率中等、泄流半径在 849 ～ 1 329 m 之间；马五 $_2^2$、马五 $_2^1$、马五 $_3^1$ 渗透率差、泄流半径 316 ～ 540 m。这说明渗透率越高、泄流半径越大，小层动用区域越广。由图 3 可知：渗透率越高，小层动静储量比越大，二者呈指数相关，复相关系数

表 1 A 井区地质储量、动储量、泄流半径、动静储量比计算结果表

Tab.1 Geological reserves，dynamic reserves，discharge radius，dynamic and static reserves ratio calculation results of area A

小层		马五 $_1^1$	马五 $_1^2$	马五 $_1^3$	马五 $_1^4$	马五 $_2^1$	马五 $_2^2$	马五 $_3^1$	马五 $_4^{1a}$	井区
地质储量	规模 /10^8 m^3	18.8	66.1	161.5	34.3	2	45.8	1.3	65.4	395.1
	比例 /%	4.75	16.72	40.88	8.67	0.51	11.58	0.33	16.55	100.0
动储量	规模 /10^8 m^3	7.3	26.2	128.9	18.4	0.2	3.5	0.1	36.2	220.9
	比例 /%	3.29	11.87	58.37	8.34	0.11	1.60	0.04	16.38	100
泄流半径 /m		849.2	1 157.3	1 485.0	1 257.2	421.3	540.5	316.4	1 329.0	1 523
动静储量比 /%		38.7	39.7	79.8	53.7	12.1	7.7	6.8	55.3	55.9
渗透率 /10-3 μm2		0.389	0.422	0.619	0.425	0.029	0.052	0.010	0.394	0.293

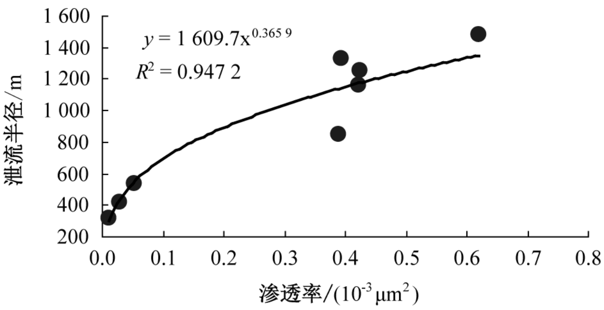

图 2 渗透率与渗流半径关系

Fig.2 Relationship between permeability and drainage radius

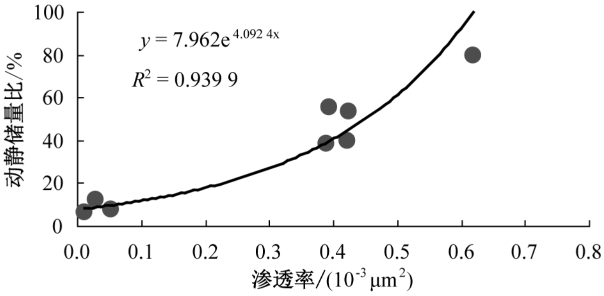

图 3 渗透率与动静储量比关系

Fig.3 Relationship between permeability and ratio of static and dynamic reserves

0.939 9。其中，马五 $_1{}^3$ 渗透率最好、动静储量比最大，为 79.8%；而马五 $_1{}^4$、马五 $_1{}^2$、马五 $_4{}^{1a}$、马五 $_1{}^1$ 渗透率中等、动静储量比在 38.7% ～ 55.3% 之间；马五 $_2{}^2$、马五 $_2{}^1$、马五 $_3{}^1$ 渗透率差、动静储量比小于 12.1%。这说明渗透率越高、动静储量比越大，小层动用效果越好。

综上所述，多层合采气藏层间动用效果直接受控于储层物性，物性好的层，泄流范围大，储层动用程度高；反之，泄流范围小，储层动用程度低。上述分析表明，多层合采气藏层间物性、尤其是渗透率差异越大，层间动用差异越大，合采层中相对低渗层动用效果越差。因此，对于多层合采气藏现场更应重视合采层中相对低渗层的挖潜。如靖边气田马五 $_4{}^{1a}$、马五 $_1{}^4$、马五 $_1{}^2$、马五 $_1{}^1$、马五 $_2{}^2$ 等 5 个小层地质储量基础较好而动用程度较低，可作为后期调整挖潜主要对象。对于合采层中相对低渗层的挖潜，建议挖潜途径有两种，一是通过储层改造提高相对低渗层渗透率，增大其泄流范围；亦或对相对低渗层进行井网加密，提高气层控制程度。

4 结论

1) 靖边气田多层合采条件下层间动用极不均衡，小层动静储量比最小为 6.8%、最大为 79.8%，差异很大。气藏动用整体呈现一高多低的格局，马五 $_1{}^3$ 动用突出，其它小层动用普遍较低；分析表明，异常高的层间动用差异显著受控于储层物性，尤其是渗透率，渗透率越高、储层动用效果越好，二者呈指数密切相关。

2) 多层合采气藏层间物性，尤其是渗透率差异越大，层间动用差异越大，合采层中相对低渗层动用效果越差。因此，对于多层合采气藏现场更应重视合采层中相对低渗层的挖潜。如靖边气田马五 $_4{}^{1a}$、马五 $_1{}^4$、马五 $_1{}^2$、马五 $_1{}^1$、马五 $_2{}^2$ 等 5 个小层地质储量基础较好而动用程度较低，可作为后期调整挖潜主要对象。

参考文献：

[1] 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.

[2] 何自新，郑聪斌，王彩丽，等 . 中国海相油气田勘探实例之二：鄂尔多斯盆地靖边气田的发现与勘探 [J]. 海相油气地质，2005，10(2)：37-44.

[3] 代金友，李建霆，赵晨晖，等 . 长岭气田登娄库组致密砂岩储层特征及孔隙演化 [J]. 石油地质与工程，2014，28(6)：29-32.

[4] 车国琼，龚昌明，汪 楠，等 . 广安地区须家河组气藏成藏条件 [J]. 天然气工业，2007，27(6)：1-5.

[5] 万金玉，孙贺东，黄伟岗，等 . 涩北气田多层气藏储量动用程度分析 [J]. 天然气工业，2009，29(7)：59-60.

[6] 王卫红，沈平平，马新华，等 . 非均质低渗透气藏储层动用能力及影响因素研究 [J]. 天然气地球科学，2005，16(1)：93-97.

[7] 王东旭，王鸿章，李跃刚 . 长庆气田难采储量动用程度评价 [J]. 天然气工业，2000，20(5)：64-66.

[8] 刘茂果，晏宁平，吕利刚，等 . 靖边气田下古分层产量贡献率影响因素分析 [J]. 石油化工应用，2015，34(7)：47-52.

[9] 张明禄 . 长庆气区低渗透非均质气藏可动储量评价技术 [J]. 天然气工业，2010，30(4)：50-53.

[10] 王振升，刘子藏，杜艳蕾，等 . 层状油气藏多层合采油气井产量劈分方法 [J]. 天然气地球科学，2016，27(10)：1878-1882.

[11] 张伦友 . 关于可动储量的概念及确定经济可采储量的方法 [J]. 天然气勘探与开发，1996，19(4)：75-76.

（责任编辑 王利君）