

文章编号: 1001-1986(2019)03-097-08

# 煤层气直井产气曲线特征及其与储层条件匹配性

韩文龙, 王延斌, 刘度, 常宏, 丁涛

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 煤层气产气曲线类型与地质条件的匹配与否直接影响产气效果。以沁水盆地柿庄南区块排采 4 a 以上的直井为研究对象, 在产气曲线类型划分基础上, 分析不同产气曲线特征, 进一步分析产气曲线与储层参数的匹配性。结果表明: 研究区产气曲线可划分为单峰快速上升、单峰稳定上升、双峰后低和双峰后高 4 种类型。产气曲线所表现出的特征受控于储层原始渗透率, 储层动力及压裂效果。单峰快速上升型适用于含气量大于  $12 \text{ m}^3/\text{d}$ 、临储比大于 0.4 和渗透率大于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的储层, 该种曲线容易造成产气量的骤降; 单峰稳定上升型适用的储层条件广泛, 与储层参数匹配性较高; 双峰后低型产气效果整体不佳, 与储层参数的匹配性差; 双峰后高型适用于压裂效果较好的井、对储层原始参数要求较低, 其后峰产气量的增加速率影响整体的排采效果。基于上述分析, 将储层划分为七种类型, 对研究区及其相邻区块实施“一井一策”的排采制度具有重要的指导意义。

**关 键 词:** 煤层气直井; 产气曲线特征; 储层条件; 匹配性; 沁水盆地

中图分类号: P618. 11 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.03.016



## The matching of gas production curve characteristic and reservoir conditions in vertical coalbed methane wells

HAN Wenlong, WANG Yanbin, LIU Du, CHANG Hong, DING Tao

(School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The matching of coalbed methane(CBM) production curve type and geological conditions directly affects the gas production. Based on dividing gas production curves types of vertical CBM wells in the southern block of Shizhuang in Qinshui basin over 4 years, the characteristics of gas production curve were analyzed. The matching of gas production curve with reservoir parameters was further analyzed. The paper discovered and divided the gas production curve into four types: type of fast rising of single peak, type of stable rising of single peak, bimodal type of being low later and bimodal type of being high later. The original permeability, dynamic condition, and fracturing effect control the characteristics of gas production curve. The reservoir parameters of the type of fast rising of single peak has high gas content( $>12 \text{ m}^3/\text{d}$ ), high permeability( $>0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), high specific value of critical desorption pressure and reservoir pressure( $>0.4$ ). This kind of curve is easy to cause sharp drop of gas production in the peak period. The type of stable rising of single peak is applicable in a wide range of reservoir conditions. Gas production of bimodal type of being low of is usually lower than other types. The gas production curve is poorly matched to the reservoir characteristics. The bimodal type of being high later is suitable for wells with better fracturing effect and have lower requirements for reservoir parameters. Gas production growth rate of the back peak determines the gas production effect. On the basis of above analysis, the reservoir is divided into seven types, which has important guiding significance for the implementation of the “one well and one scheme” drainage system in the study area and its adjacent blocks.

**Keywords:** vertical coalbed methane wells; gas production curve characteristic; reservoir condition; matching; Qinshui basin

收稿日期: 2018-05-25

基金项目: 国家科技重大专项课题(2017ZX05064-005)

Foundation item : National Science and Technology Major Project(2017ZX05064-005)

第一作者简介: 韩文龙, 1991 年生, 男, 河北唐山人, 博士研究生, 从事非常规油气地质及开发研究工作. E-mail : hanwl0417@126.com

引用格式: 韩文龙, 王延斌, 刘度, 等. 煤层气直井产气曲线特征及其与储层条件匹配性[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(3) : 97-104.

HAN Wenlong, WANG Yanbin, LIU Du, et al. The matching of gas production curve characteristic and reservoir conditions in vertical coalbed methane wells[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(3) : 97-104.

目前,全国大部分的煤层气井表现出低产低效的特征。排采工作是煤层气开发的重要环节,合理的排采制度能够延长产气高峰维持时间进而提高排采效率。我国煤层气排采制度经历了“快速降压”—“连续、渐变、稳定、长期”—“五段三压四点”3个阶段<sup>[1]</sup>。排采的目的是改变地质环境,使吸附在煤层中的气体得到释放<sup>[2]</sup>。合理控制产水产气速率是增大泄压面积的关键,产水过快近井地带有效应力增加,降压漏斗扩展有限;产气过快,气体占用液体通道,造成产液困难,影响降压漏斗的扩展<sup>[3]</sup>。现阶段多集中在物理实验和数值模拟等方面分析排采过程中渗透率的变化<sup>[4-8]</sup>,但实际地质环境相对复杂,研究结果适用范围有限。基于现场实际生产资料分析排采合理性更具有实际的指导价值<sup>[9-11]</sup>,鉴于煤层气储层非均质强,地质参数横向和纵向上变化较大的特性<sup>[12-13]</sup>,不同储层特征所适应的排采制度应有所不同。

笔者基于沁水盆地柿庄南煤层气商业开发区实际生产资料,在排采机理分析的基础上对煤层气产气曲线类型和产气阶段进行划分,通过分析影响排采制度关键地质参数与平均产气量之间的关系,获得研究区不同地质类型下合理的产气曲线类型,对制定研究区及其地质条件相似区块的合理排采制度具有重要指导意义。

## 1 地质概况

柿庄南区块位于沁水盆地南部,含煤地层为石炭-二叠系太原组和二叠系山西组,稳定发育3号和15号煤层,其中3号煤层厚度1.35~11.00 m,平均6.30 m,埋深515~1 082 m,为主要开发煤层;15号煤层厚度1.10~6.25 m,平均3 m左右。自煤层形成以后共经历印支期、燕山期和喜马拉雅期3期构造运动,多期构造运动耦合下形成北部以断层发育为主,南部以复式褶皱为主的构造格局。研究区地下水动力场较简单,自东南向西北流动,南部受顶底板泥岩隔水层的阻挡,层间补给相对较少,北部大的断裂沟通顶底板含水层,导致煤层气井产水量较高。

## 2 煤层气排采机理与生产特征

### 2.1 排采机理

煤层气排采主要通过排水降压的方式来降低煤层中的压力,进而使吸附在煤基质表面的气体得到解吸,再通过扩散-渗流的方式进入井筒,其实质为释放煤层中压力的过程。压力释放顺序为宏观裂隙—显微裂隙—煤层表面,并由近井向远井传递。因

此,尽可能使更多面积的压力降低到临界解吸压力以下才能获得更大经济效益<sup>[14]</sup>。

我国高阶煤储层基本处于欠饱和状态,这就决定了煤层气渗流过程包括3个阶段(图1):第一阶段为单相水流阶段,即储层压力降低到临界解吸压力之前,煤层中气体尚未解吸,井筒中只有水产出,该阶段储层压力不断下降,有效应力增大,导致裂缝闭合,渗透率降低,气水产出阻力变大;第二阶段为非饱和流阶段,近井地带的储层压力达到临界解吸压力以下,气体开始解吸,呈不连续气流,该阶段气体解吸量较少,基质收缩效应影响较小,仍以有效应力作用为主,储层渗透率继续降低;第三阶段为气水两相流阶段,随着压降漏斗的进一步扩展,气体大量解吸,形成连续的气流,随着气体的大量解吸,基质收缩效应起主导作用,并产生气体滑脱效应,渗透率增大<sup>[15-16]</sup>。当井筒中的气体连续稳定产出后,由井筒至远端依次为气水两相流、非饱和流和单相水流阶段<sup>[17]</sup>。

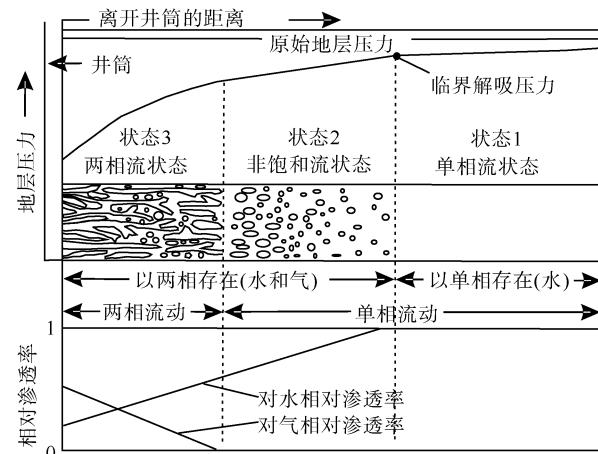


图1 煤层气排采的3个渗流阶段<sup>[17]</sup>

Fig.1 Fluid flow patterns in different production stages

### 2.2 生产特征

煤层气产出机理决定了排采过程具有阶段性,不同的排采阶段煤层气井产水产气差异较大<sup>[18]</sup>。以研究区排采时间在4 a以上且排采较为连续井作为研究对象,其依据:4 a以上生产井的排采制度基本定型;保证所有井都已达到产气高峰,并维持一定时间;4 a以上井产气曲线类型更加显著;

4 a以上井排采时间差距不大,具有较强的可比性;排采较为连续可消除停机事故对产气特征的影响。

基于以上要求,研究区共151口生产井满足上述条件,截至2018年3月14日,排采时间在1 700~3 000 d,均经历了单相水流阶段和产气高峰阶段,并

出现不同程度的产气衰减。平均产气量  $40\sim3040 \text{ m}^3/\text{d}$  , 峰值产气量  $220\sim4800 \text{ m}^3/\text{d}$  , 累计产气量介于  $17\sim600 \text{ 万 m}^3$  , 平均产水量  $0.3\sim10.2 \text{ m}^3/\text{d}$  , 最大产水量介于  $2\sim40 \text{ m}^3/\text{d}$ 。单相水流时间  $1\sim502 \text{ d}$  , 产气高峰维持时间  $60\sim2640 \text{ d}$ 。

### 3 产气曲线类型划分及其地质参数特征

通过对所选井排采数据统计分析发现,井底流压可划分为快速下降和稳压波动2个变化阶段,快速下降阶段压力从初始井底流压快速下降到  $0.5\sim1.0 \text{ MPa}$  , 下降速率  $0.012\sim0.056 \text{ MPa/d}$  ;稳定波动阶段压力维持在  $0.2\sim1.8 \text{ MPa}$ 。所选井底流压变化特征类似,但产气曲线表现出不同的变化特征,可将其划分为4种类型(图2),分别为单峰快速上升型,共计56口,占37.1%;单峰稳定上升型,共计53口,占35.1%;双峰后低型,共计12口,占7.9%;双峰后高型,

共计30口,占19.9%。

#### 3.1 单峰快速上升型

单峰快速上升型产气曲线表现为初期经历较长的单相水流阶段或低产气阶段,使降压漏斗得到充分扩展,检泵后产气突然增加,无明显的产气上升阶段或维持时间较短(图2a),可以划分为单相水流、峰前低产或产气快速上升、产气高峰以及峰后低产4个阶段。对56口井各阶段持续天数统计发现,单相水流阶段为  $1\sim304 \text{ d}$  , 峰前低产阶段为  $205\sim1877 \text{ d}$  , 产气快速上升阶段为  $26\sim277 \text{ d}$  , 产气高峰阶段为  $206\sim2556 \text{ d}$ 。

由储层参数与产气量关系(图3)可知,当储层初始渗透率较高(一般大于  $0.1\times10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),渗透性较好,含气饱和度一般大于50%,临储比大部分大于0.4,储层产水产气较容易,降压漏斗扩展容易,当降压漏斗得到充分扩展后,气体很容易产出,会出现产气突然增高的现象。

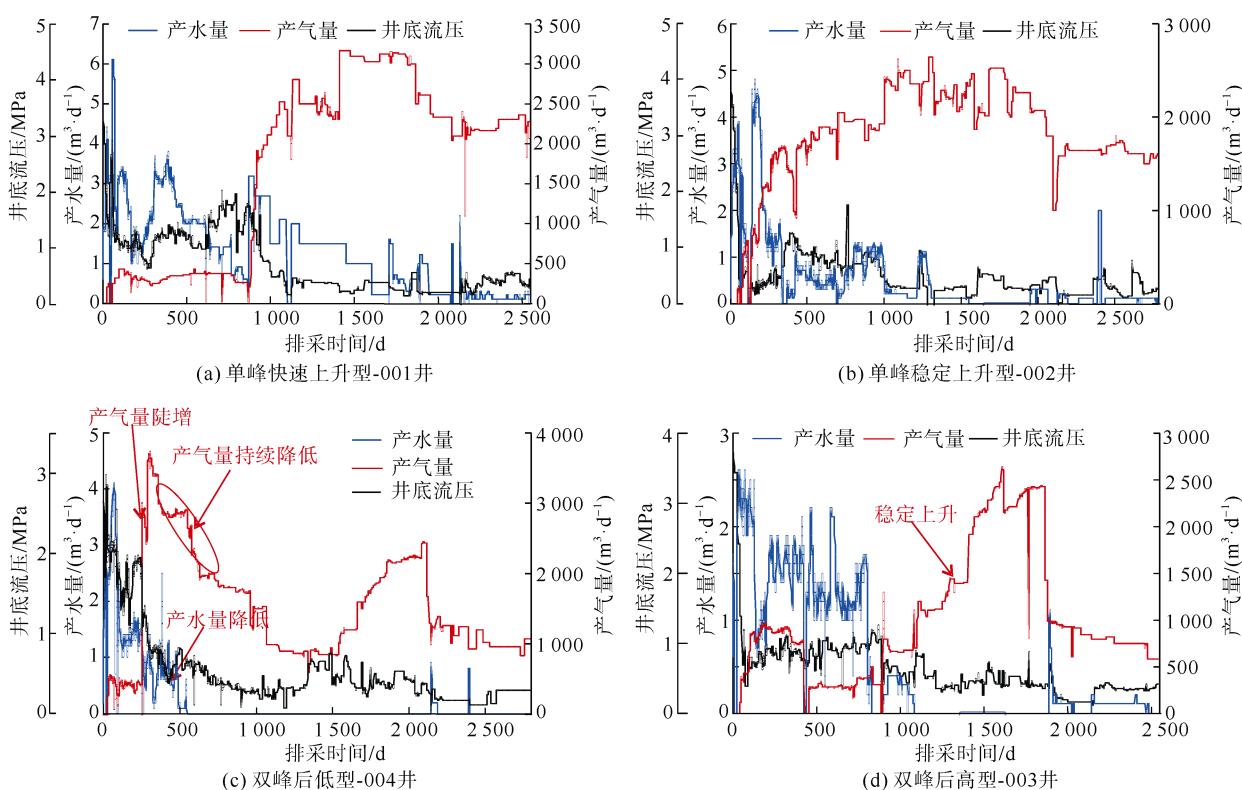


图2 产气曲线类型划分

Fig.2 The division of CMB gas production curve types

由图3还可以发现,当含气量小于  $12 \text{ m}^3/\text{t}$ 、含气饱和度小于60%和临储比小于0.4时,产气量难以达到  $700 \text{ m}^3/\text{d}$ 。以006井为例(图4),其含气量  $13.99 \text{ m}^3/\text{t}$ 、含气饱和度58%、渗透率  $0.36\times10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、临储压力比0.43,采用此种类型的产气曲线很容易达成产气高峰,但难以维持较长时间,并且会出现产气量陡然降低的现象。

分析认为,由于产气量突然升高,井筒远端的气体无法快速补充,近井地带储层中的气体大量解吸产出以补充井筒较大的产气量,且占用大量的产液通道,造成储层产水阻力变大,当储层压力梯度较低,降压漏斗扩展更加困难,井筒远端气体难以靠水压降低解吸,气压传递引起的气体解吸成为主力,如果储层含气量和含气饱和度较低时,气压传

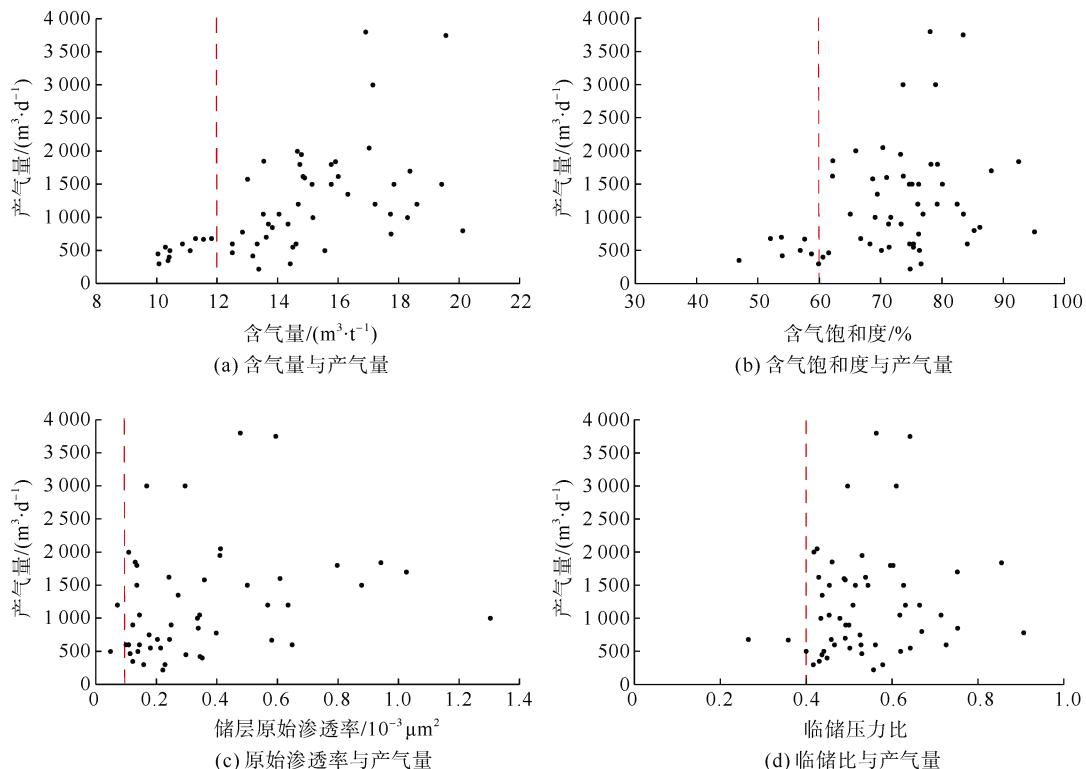


图 3 单峰快速上升型储层参数与产气量关系

Fig.3 Relationship between reservoir parameters and gas production of the type of fast rising of single peak

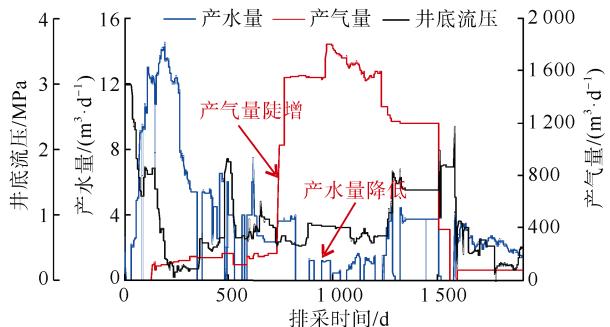


图 4 006 井产气曲线特征

Fig.4 Gas production curve characteristics of well 006

递较慢, 进一步造成远端气体难以解吸运移产出。因此, 产气高峰很难维持较长时间, 并可能出现陡然下降的现象。综上认为, 当储层渗透性较大, 但煤层气资源量、含气饱和度和储层压力梯度较差时, 应慎重采用该种排采制度, 避免造成产气陡然降低的现象, 影响煤层气井整体的排采效果。

### 3.2 单峰稳定上升型

单峰稳定上升型产气曲线表现为排采初期产气量缓慢上升, 随后达到产气高峰, 形成单峰稳定上升型, 根据单峰稳定上升型曲线(图 2b)特征, 可以将其划分为单相水流、峰前低产、产气上升、产气高峰和峰后低产 5 个阶段。对 53 口井各阶段持续时间统计发现, 单相水流阶段为 4~428 d, 峰前低产阶段为 65~2 022 d, 产气上升阶段为 117~1 098 d, 产

气高峰阶段为 204~2 077 d。

由储层参数与产气量关系(图 5)可知, 当储层含气量大于  $10 \text{ m}^3/\text{t}$ , 含气饱和度一般大于 50%, 初始渗透率为  $(0.01 \sim 0.6) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 临储比大于 0.3, 其渗透性整体较单峰快速上升型差, 气水运移阻力较大, 根据储层的供液、供气能力, 缓慢增加产气量使其逐步达到产气高峰且能够维持较长的时间, 进而表现出单峰稳定上升的产气曲线特征。

由储层参数与产气量关系(图 5)还可以看出, 当含气量小于  $12 \text{ m}^3/\text{t}$ 、含气饱和度小于 60%, 渗透率小于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  和临储比小于 0.4 时, 产气量仍能达到  $500 \text{ m}^3/\text{d}$ , 因此, 该种产气曲线对于储层动力条件较差、渗透性较低的井比较适用。当资源量和储层动力条件较好时, 合理地控制产气量的增速是决定排采效果的关键, 产气量增加过快时, 气体占用大量渗流通道, 造成产液困难, 影响降压漏斗的扩展<sup>[19-20]</sup>; 产气量增加过慢, 排采周期变长, 造成经济浪费, 并且近井地带气体未大量解吸之前, 有效应力长时间起主导作用, 渗透率长期处在较低水平, 影响气液的产出。

### 3.3 双峰后低型

双峰后低型产气曲线表现为见气经历短暂的低产阶段或产气上升阶段后达到产气高峰, 产气高峰维持时间较短, 随后进入较长的低产气阶段, 降压

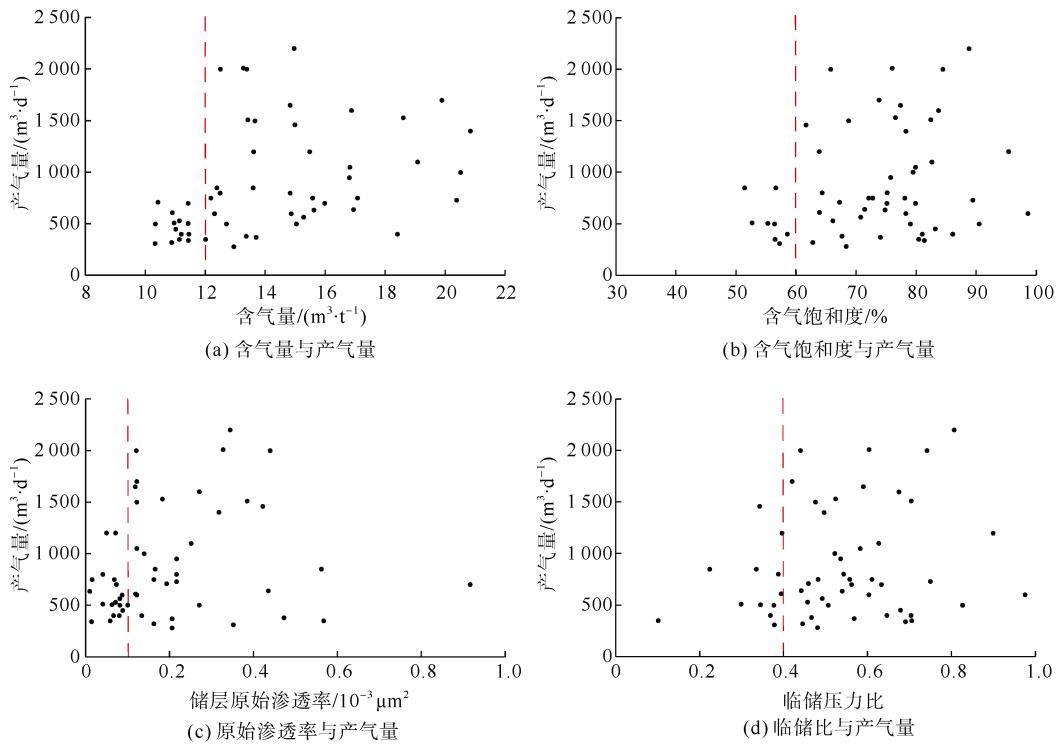


图 5 单峰稳定上升型储层参数与产气量关系

Fig.5 Relationship between reservoir parameters and gas production of the type of stable rising of single peak

漏斗得到充分扩展后, 产气缓慢上升, 达到第二个产气高峰, 但峰值产气量远远低于第一个峰值产气量。根据产气特征(图 2c)可以划分为单相水流、第一个低产、第一个产气高峰、第二低产或产气上升和第二产气高峰等阶段。对 12 口井各阶段持续时间

统计发现, 单相水流阶段为 1~199 d, 第一个低产阶段为 30~244 d, 第一个产气高峰为 54~829 d。

由储层参数与产气量关系(图 6)可知, 储层原始渗透性好, 初始渗透率较高(一般大于  $0.1 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ), 含气量一般大于  $10 \text{ m}^3/\text{t}$ , 含气饱和度一般大于 60 %,

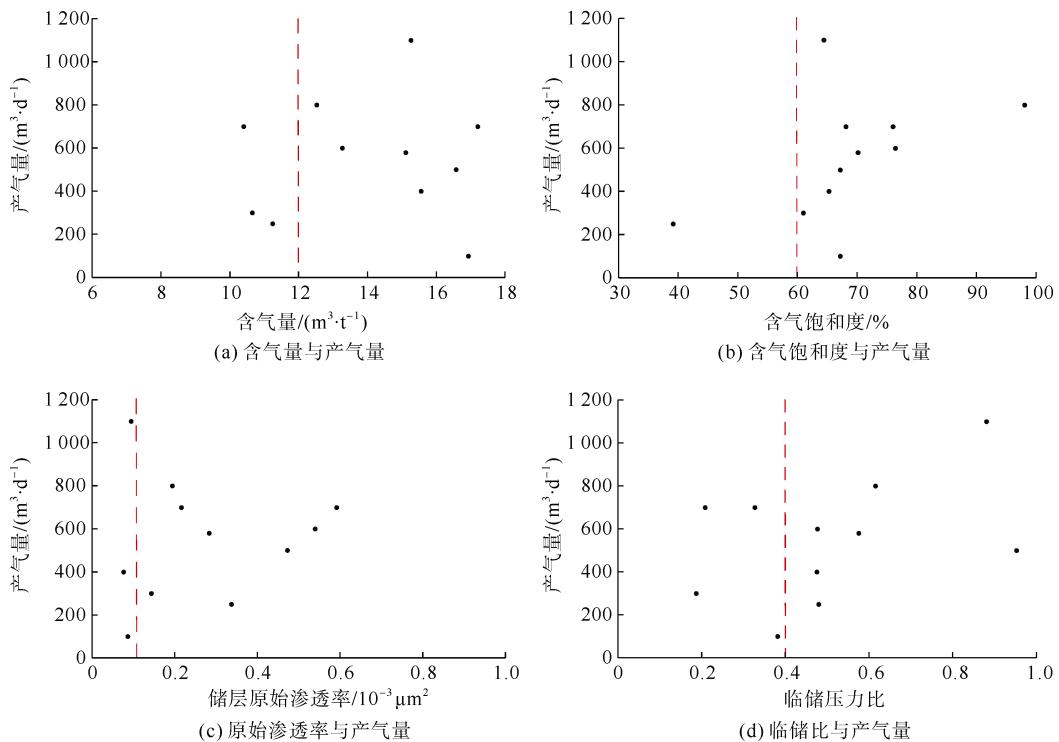


图 6 双峰后低型储层参数与产气量关系

Fig.6 Relationship between reservoir parameters and gas production of the bimodal type of being low later

临储比大于 0.4, 该种产气曲线类型的煤层气井具有优质的储层地质条件, 且压裂效果好。因此, 可以迅速形成第一个产气高峰, 但气体未发生大面积解吸, 造成产气高峰难以维持; 随着降压漏斗的进一步扩展, 产气量回升, 表现出双峰后低型的产气曲线特征。

如图 2c 所示, 较“单峰快速上升型”曲线, 双峰后低型产气曲线缺少峰前的长时间单相水流或低产阶段, 降压漏斗未得到有效扩展后突然增加产气量, 气体占用大量渗流通道, 产液困难, 降压漏斗扩展受限; 远端气体难以快速补给, 近井地带解吸气体有限, 产气量难以维持, 造成产气量不断降低; 储层初始渗透性好, 气压能够不断传递同样促使气体大量解吸, 产气量得以回升, 但很难达到原有水平, 影响最终的采收率。因此, 不建议研究区采用该种排采方式。

### 3.4 双峰后高型

该种产气曲线表现为见气后迅速形成一个产气小高峰, 但产气量不大, 随后经历较长的低产阶段或产气上升阶段后达到产气高峰, 根据产气特征(图 2d)可以划分为单相水流、产气小高峰、峰前低产和产气高峰等阶段。对 30 口井各阶段持续时间统计发现, 单相水流阶段为 7~495 d, 产气小高峰阶段为 35~502 d, 峰前低产阶段为 264~2 732 d, 产气上升阶段为 55~1 044 d, 产气

高峰阶段为 122~1 355 d。

该种产气曲线类型的煤层气井压裂效果较好, 初期压裂缝所沟通区域内的液体能够快速排出, 因此能够产生第一个产气小高峰; 由储层参数与产气量关系(图 7)可知, 储层初始渗透率为  $(0.02\sim0.7)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ , 相对双峰后低型较差; 含气饱和度一般大于 50%, 临储比 0.2~1; 含气量为 8~23  $\text{m}^3/\text{t}$ ; 气水运移阻力较大, 降压漏斗扩展较难, 因此, 第一个产气小高峰难以维持较长时间, 在经历较长时间的排采降压后达到第二个产气高峰并维持。

该种产气曲线可进一步划分为后峰快速上升型(图 8)和后峰稳定上升型(图 2d), 其产气曲线特征与储层参数的匹配性对产气产水效果影响较大, 以典型的 007 井(后峰快速上升型)和 003 井(后峰稳定上升型)为例, 其储层的主要参数如表 1 所示。

007 井产气特征: 单相水流时间为 98 d, 平均动液面降速为 2.3  $\text{m}/\text{d}$ ; 第一个产气高峰维持时间 203 d, 峰值产气量为 550  $\text{m}^3/\text{d}$ ; 随后进入 772 d 的低产阶段, 检泵后产气量由 200  $\text{m}^3/\text{d}$  陡增至 1 300  $\text{m}^3/\text{d}$ , 平均增速 12.5  $\text{m}^3/\text{d}$ , 产气高峰维持 335 d; 截至 2018 年 3 月 14 日, 最大产气量为 1 350  $\text{m}^3/\text{d}$ , 累计产气量为 125.76 万  $\text{m}^3$ , 累计产水量 2 215.6  $\text{m}^3$ 。003 井单相水流时间为 30 d, 平均动液面降速为 9.4  $\text{m}/\text{d}$ , 第一个产气高峰维持时间 342 d, 随后进入 450 d 的低产阶段, 检泵后产气量由 680  $\text{m}^3/\text{d}$  缓慢增至

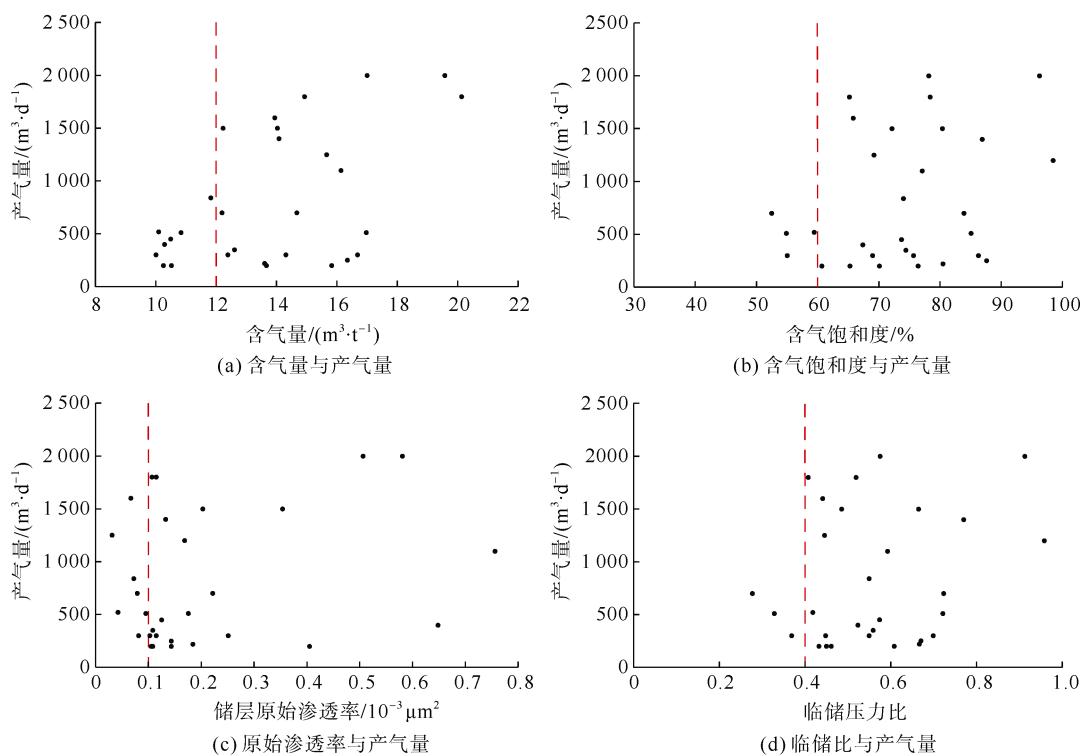


图 7 双峰后高型储层参数与产气量关系

Fig. 7 Relationship between reservoir parameters and gas production of the bimodal type of being high later

2 400  $\text{m}^3/\text{d}$ , 平均增速 2.4  $\text{m}^3/\text{d}$ , 产气高峰维持 293 d, 截至 2018 年 3 月 14 日, 最大产气量 2 610  $\text{m}^3/\text{d}$ , 累计产气量 253.30 万  $\text{m}^3$ , 累计产水量 1 283.5  $\text{m}^3$ 。

两口井的含气量相差不大, 007 井渗透性、含气饱和度和临储压力比等参数较 003 井好, 并且由产液特征表明, 前者供液能力较后者强, 因此, 007 井应尽可能多地排除储层中的液体, 扩大排采影响范围, 采用快速产气的方式, 将影响液体的产出。相比之下, 007 井产气曲线类型与储层参数匹配性较差, 导致其最大产气量与累计产气量仅是 003 井的一半。

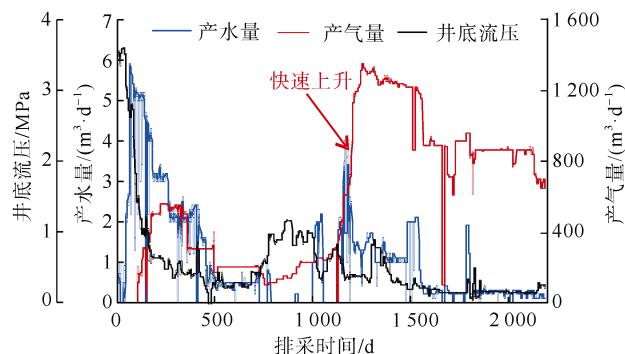


图 8 双峰后高型典型井产气曲线特征-007 井

Fig.8 Gas production curve characteristics of the bimodal type of being high later

表 1 双峰后高型典型井产气特征  
Table 1 Gas production characteristics of the bimodal type of being high later

井号	排采时间/d	含气量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	含气饱和度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	临储压力比	最高产气量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	累计产气量/万 $\text{m}^3$	产气高峰维持时间/d
003	2 492	16.99	78.13	0.356	0.57	2 610	253.30	293
007	2 197	15.65	69.15	0.251	0.46	1 350	125.76	335

### 3.5 储层类型

根据上述储层参数与产气曲线类型的关系, 将

研究区储层划分为 7 种类型(表 2), 并提出了针对性的排采建议。

表 2 储层类型划分及排采建议表  
Table 2 Suggestions of reservoir type division and gas drainage

储层类型	含气量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	临储压力比	井数/口	排采建议
I型	>12	>0.1	>0.4	82	降压漏斗得到一定扩展后, 连续稳定快速提产
II型	>12	>0.1	<0.4	10	降压漏斗得到充分扩展后, 连续稳定快速提产
III型	>12	<0.1	>0.4	15	根据套压值特征, 连续稳定缓慢提产
IV型	<12	>0.1	>0.4	21	降压漏斗得到一定扩展后, 根据套压值适当快速稳定提产
V型	<12	>0.1	<0.4	14	降压漏斗得到充分扩展后, 根据套压值适当快速稳定提产
VI型	<12	<0.1	>0.4	8	缓慢排水, 连续稳定缓慢提产, 不追求一时的产气高峰
VII型	<12	<0.1	<0.4	7	缓慢排水, 充分降压, 连续稳定缓慢提产, 不追求一时的产气高峰

## 4 结论

a. 储层原始渗透性、压裂效果和动力条件决定了产气曲线特征, 压裂效果一般的井多表现为单峰型, 压裂效果较好的井多表现为双峰型, 储层原始渗透性及动力条件影响产气量的增速。

b. 研究区产气曲线可划分为单峰快速上升型、单峰稳定上升型、双峰后高型和双峰后低型 4 种类型。单峰快速上升型对储层参数要求较为苛刻, 排采过程中容易造成产气骤降; 单峰稳定上升型能够适用更广泛的储层条件, 但要合理地控制产气量的增速; 双峰后低型与储层匹配性差; 双峰后高型适用的储层条件较为广泛, 应重点控制后峰的产气增速。

c. 基于不同储层参数所表现出的产气曲线特征, 研究区储层可划分为 7 种类型, 并给出了相应的排采建议, 这对研究区及其相邻区块实施针对性的排采制度具有重要的指导意义。

## 参考文献

- [1] 倪小明, 王延斌, 张崇崇, 等. 煤层气产出过程渗透率变化与排采控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [2] 汪吉林, 秦勇, 傅雪海. 关于煤层气排采动态变化机制的新认识[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3): 583-588.  
WANG Jilin, QIN Yong, FU Xuehai. New insight into the mechanism for dynamic coalbed methane drainage[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3): 583-588.
- [3] 刘世奇, 赵贤正, 桑树勋, 等. 煤层气井排采液面-套压协同管控: 以沁水盆地樊庄区块为例[J]. 石油学报, 2015, 36(增): 1-10.

- 刊 1) : 97–108.
- LIU Shiqi ,ZHAO Xianzheng ,SANG Shuxun ,et al. Cooperative control of working fluid level and casing pressure for coalbed methane production :A case study of Fanzhuang block in Qinshui basin[J]. *Acta Petrolei Sinica* , 2015 , 36(S1) : 97–108.
- [4] 陈金刚 ,秦勇 ,傅雪海. 高煤级煤储层渗透率在煤层气排采中的动态变化数值模拟[J]. *中国矿业大学学报* , 2006 , 35(1) : 49–53.
- CHEN Jingang ,QIN Yong ,FU Xuehai. Numerical simulation on dynamic variation of the permeability of high rank coal reservoirs during gas recovery[J]. *Journal of China University of Mining & Technology* , 2006 , 35(1) : 49–53.
- [5] 李国富 ,侯泉林. 沁水盆地南部煤层气井排采动态过程与差异性[J]. *煤炭学报* , 2012 , 37(5) : 798–803.
- LI Guofu ,HOU Quanlin. Dynamic process and difference of coalbed methane wells production in southern Qinshui basin[J]. *Journal of China Coal Society* , 2012 , 37(5) : 798–803.
- [6] 杨秀春 ,李明宅. 煤层气排采动态参数及其相互关系[J]. *煤田地质与勘探* , 2008 , 36(2) : 19–23.
- YANG Xiuchun ,LI Mingzhai. Dynamic parameters of CBM well drainage and relationship among them[J]. *Coal Geology & Exploration* , 2008 , 36(2) : 19–23.
- [7] 邵先杰 ,董新秀 ,汤达祯 ,等. 煤层气开发过程中渗透率动态变化规律及对产能的影响[J]. *煤炭学报* , 2014 , 39(增刊 1) : 146–151.
- SHAO Xianjie ,DONG Xinxiu ,TANG Dazhen ,et al. Permeability dynamic change law and its effect on productivity during coalbed methane development[J]. *Journal of China Coal Society* , 2014 , 39(S1) : 146–151.
- [8] 倪小明 ,苏现波 ,魏庆喜 ,等. 煤储层渗透率与煤层气垂直井排采曲线关系[J]. *煤炭学报* , 2009 , 34(9) : 1194–1198.
- NI Xiaoming ,SU Xianbo ,WEI Qingxi ,et al. The relationship between the permeability of coalbed and production curve about coalbed methane vertical wells[J]. *Journal of China Coal Society* , 2009 , 34(9) : 1194–1198.
- [9] 杨国桥 ,唐书恒 ,李忠诚 ,等. 柏庄南区块煤层气高产井排采制度分析[J]. *煤炭科学技术* , 2016 , 44(8) : 176–181.
- YANG Guoqiao ,TANG Shuheng ,LI Zhongcheng ,et al. Analysis on drainage system of coalbed methane high production well in south block of Shizhuang[J]. *Coal Science and Technology* , 2016 , 44(8) : 176–181.
- [10] 尹中山 ,肖建新 ,汪威. 四川古蔺 DCMT-3 井排采曲线特征及开发前景分析[J]. *中国煤炭地质* , 2012 , 24(1) : 13–16.
- YIN Zhongshan ,XIAO Jianxin ,WANG Wei. Analysis of DCMT-3 well drainage curve characteristics and exploitation prospect ,Gulin ,Sichuan[J]. *Coal Geology of China* , 2012 , 24(1) : 13–16.
- [11] 胡秋嘉 ,李梦溪 ,王立龙 ,等. 樊庄区块煤层气直井产气曲线特征分析[J]. *中国煤层气* , 2012 , 9(6) : 3–7.
- HU Qiuji ,LI Mengxi ,WANG Lilong ,et al. Analysis on coalbed methane straight well gas yield curve characteristic of Fanzhuang block[J]. *China Coalbed Methane* , 2012 , 9(6) : 3–7.
- [12] 林柏泉 ,李庆钊 ,原德胜 ,等. 彬长矿区低煤阶煤层气井的排采特征与井型优化[J]. *煤炭学报* , 2015 , 40(1) : 135–141.
- LIN Baiquan ,LI Qingzhao ,YUAN Desheng ,et al. CBM production character and surface well selection in Binchang low rank coal field[J]. *Journal of China Coal Society* , 2015 , 40(1) : 135–141.
- [13] 潘建旭 ,王延斌 ,倪小明 ,等. 资源条件与煤层气垂直井产能关系 :以沁水盆地南部樊庄与潘庄区块为例[J]. *煤田地质与勘探* , 2011 , 39(4) : 24–27.
- PAN Jianxu ,WANG Yanbin ,NI Xiaoming ,et al. The relationship between resource conditions and CBM productivity of vertical wells : A case of Fanzhuang and Panzhuang blocks in southern Qinshui basin[J]. *Coal Geology & Exploration* , 2011 , 39(4) : 24–27.
- [14] 吴国代 ,郭东鑫 ,程礼军. 松藻矿区多煤层合采储层压降特征及启示[J]. *煤田地质与勘探* , 2018 , 46(5) : 123–128.
- WU Guodai ,GUO Dongxin ,CHENG Lijun ,et al. Characteristics and revelation of pressure drop of reservoir during combined CBM production of multi-coal seams in Songzao mining area[J]. *Coal Geology & Exploration* , 2018 , 46(5) : 123–128.
- [15] 刘会虎 ,桑树勋 ,冯清凌 ,等. 沁水盆地南部煤层气井排采储层应力敏感研究[J]. *煤炭学报* , 2014 , 39(9) : 1873–1878.
- LIU Huihu ,SANG Shuxun ,FENG Qingling ,et al. Study on stress sen-sitivity of coal reservoir during drainage of coalbed methane well in southern Qinshui basin[J]. *Journal of China Coal Society* , 2014 , 39(9) : 1873–1878.
- [16] 郭春华 ,周文 ,孙晗森 ,等. 考虑应力敏感性的煤层气井排采特征[J]. *煤田地质与勘探* , 2011 , 39(5) : 27–30.
- GUO Chunhua ,ZHOU Wen ,SUN Hansen ,et al. The relationship between stress sensitivity and production of coalbed methane wells[J]. *Coal Geology & Exploration* , 2011 , 39(5) : 27–30.
- [17] 陈云涛. 煤层气排采曲线特征及其影响因素分析[J]. *中国煤层气* , 2016 , 13(4) : 26–29.
- CHEN Yuntao. CMB emission and exploitation curve features and analysis[J]. *China Coalbed Methane* , 2016 , 13(4) : 26–29.
- [18] 陶树 ,汤达祯 ,许浩 ,等. 沁南煤层气井产能影响因素分析及开发建议[J]. *煤炭学报* , 2011 , 36(2) : 194–198.
- TAO Shu ,TANG Dazhen ,XU Hao ,et al. Analysis on influence factors of coalbed methane wells productivity and development proposals in southern Qinshui basin[J]. *Journal of China Coal Society* , 2011 , 36(2) : 194–198.
- [19] 王兴隆 ,赵益忠 ,吴桐. 沁南高煤阶煤层气井排采机理与生产特征[J]. *煤田地质与勘探* , 2009 , 37(5) : 19–22.
- WANG Xinglong ,ZHAO Yizhong ,WU Tong. Study on pressure drop transmission law of coalbed methane drainage reservoir stratum[J]. *Coal Geology & Exploration* , 2009 , 37(5) : 19–22.
- [20] 刘世奇 ,桑树勋 ,李梦溪 ,等. 沁水盆地南部煤层气井网排采压降漏斗的控制因素[J]. *中国矿业大学学报* , 2012 , 41(6) : 943–950.
- LIU Shiqi ,SANG Shuxun ,LI Mengxi ,et al. Control factor of coalbed methane well depressurization cone under drainage well network in southern Qinshui basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology* , 2012 , 41(6) : 943–950.