

Duong产量递减模型在窄河道致密砂岩气藏中的应用

——以中江气田沙溪庙组气藏为例

牛娜¹, 范照伟², 詹泽东¹, 张岩¹, 刘沙¹

¹中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都

²中国石化石油勘探开发研究院, 北京

收稿日期: 2021年9月30日; 录用日期: 2021年10月21日; 发布日期: 2021年10月28日

摘要

中江气田沙溪庙组气藏属窄河道致密砂岩气藏, 大部分气井需压裂后测试获产, 气井渗流通过较长时间达到边界流, 用常规Arps方法进行气井产量预测误差较大。从理论角度, 分析传统Arps方法和适用于页岩气产量递减分析模型——Duong方法的内在联系, 结合中江气田气井生产实践, 拓展研究Duong模型的使用条件及适用性。研究表明, Duong模型是Arps模型的非线性扩展, 本质上是在双对数坐标下的趋势预测, 可用于致密砂岩气藏气井产量预测; 在Duong模型研究的基础上, 进一步验证该模型也适用于以径向流为主导的气井; 对于连续生产、多次调产、压恢井三种情况下的气井, 要重新选取初始点进行拟合。通过实例验证, Duong模型对于致密砂岩气藏处于非稳态流气井产量预测具有较强的实用性。

关键词

Duong模型, Arps模型, 适用性, 产量预测, 非稳态流

Application of Duong Production Decline Model in Narrow Channel Tight Sandstone Gas Reservoir

—By Taking Zhongjiang Gas Reservoir as an Example

Na Niu¹, Zhaowei Fan², Zedong Zhan¹, Yan Zhang¹, Sha Liu¹

¹Exploration and Production Research Institute, Southwest Branch Company, Sinopec, Chengdu Sichuan

²Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing

Received: Sep. 30th, 2021; accepted: Oct. 21st, 2021; published: Oct. 28th, 2021

文章引用: 牛娜, 范照伟, 詹泽东, 张岩, 刘沙. Duong产量递减模型在窄河道致密砂岩气藏中的应用[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(10): 1361-1369. DOI: 10.12677/ag.2021.1110131

Abstract

Sha Ximiaof ormation of Zhongjiang gas field belongs to narrow channel tight sandstone gas reservoir. Most gas wells need to be fractured for production. It takes a long time for gas well seepage to reach the boundary flow, so the conventional Arps method has a large error in predicting gas well production. Compared with Duong and Arps production decline model, the intrinsic relation between the two models is demonstrated theoretically. Combined with the production practice of gas Wells in Zhongjiang gas field, the application conditions and applicability of Duong production decline model are analyzed. The Duong production decline model is a nonlinear extension of the Arps decline model, which can be applied to gas wells dominated by fracture flow as well as radial flow. The applicability of Duong production decline model under three gas wells conditions such as continuous production, production regulation and pressure recovery, is analyzed in close combination with the field practice, which provides a theoretical basis for better use of Duong model in tight sandstone gas reservoirs. It provides a new method for calculating reasonable production and reserves of gas wells, which has important practical value.

Keywords

Duong Production Decline Model, Arps Production Model, Applicability, Production Prediction, Unsteady Flow

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在常规气藏产量递减分析工作中, Arps 提出的指数、双曲、调和三种经典递减模型得到了广泛的应用, 但该方法的使用条件为具有较长生产史且定井底流压生产, 即达到边界流控制阶段的气井[1]。中江气田沙溪庙组气藏属于曲流河三角洲体系的致密砂岩气藏, 砂体厚薄(5~40 m), 河道较长(10~35 km)、窄(300~1000 m), 储层孔隙度平均 8.66%, 基质渗透率平均 0.21 mD, 属于低 - 特低孔、低渗 - 超低渗孔隙型储层[2], 大多数气井经过加砂压裂等储层改造获产, 气井渗流以线性流或双线性流为主导[3] [4] [5]。由于储层致密, 气井生产难以达到边界流, Arps 产量递减模型进行产量递减分析时, 误差较大, 递减率与日产气的相关性较差, 且递减指数常常大于 1, 导致物性参数异常。

非常规气藏页岩气气井通常需要经过压裂改造后获产, 气井基质渗流阻力较大, 气井在生产中压裂产生的裂缝流动占主导。2010 年, Anh N. Duong 提出 Duong 模型产量递减模型, 他认为非常规气藏页岩气气井经过储层压裂改造后, 无论是裂缝有限导流还是无限导流, 在双对数坐标中产量与累产和生产时间呈线性关系, 方程中的系数在对数坐标中容易确定[5], 且不需要气井储层参数故被广泛使用。

在研究 Duong 模型的基础上, 针对国内外页岩气气田, 部分学者对该方法进行了应用, 并进一步总结出该方法的适用条件及适用阶段[6] [7] [8]。在此基础上, 针对于该方法的不足, 还有学者提出了 Duong 模型与其他页岩气常用递减模型的组合模型及基于不同气藏渗流特征的新方法[9] [10] [11]。

本文分析 Duong 递减模型与常规递减模型 Arps 方法的内在关系, 在致密气藏中进行 Duong 模型的

拓展性研究, 为致密气藏产量递减方法研究提供一些借鉴。

2. Duong 模型与 Arps 递减模型的关系

Arps 递减方法适用于常规气藏, 是单位时间内的产量变化率[12]

$$D = -\frac{dq}{qdt} \quad (1)$$

式中: D 为递减率, d^{-1} ; q 为递减阶段产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; t 为生产时间, d 。

递减率与时间的关系式为

$$D = \frac{D_i}{1+nD_it} \quad (2)$$

式中: n 为递减指数, 取值 $0 \sim 1$, $n=0$ 时产量为递减指数, $0 < n < 1$ 为双曲递减, $n=1$ 时为调和递减。

因此, 产量 q 和累产 G_p 表达式为[13] [14]:

$$q = q_i (1+nD_i(t-t_i))^{-\frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$G_p = \frac{q_i [1+nD_i(t-t_i)]^{\frac{n-1}{n}}}{D_i(n-1)} - \frac{q_i}{D_i(n-1)} \quad (4)$$

式中: q 为日产气量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; q_i 为初始递减日产气量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; G_p 为累产气量, 10^4 m^3 ; D_i 为初始递减率, $1/d$; t_i 为初始递减时间, d , 其余同上。

针对非常规页岩气气藏, Duong 产量递减模型表达式为[15]:

$$q = q_0 t^{-m} e^{\frac{a}{1-m}(t^{1-m}-1)} \quad (5)$$

$$G_p = \frac{q_0}{a} e^{\frac{a}{1-m}(t^{1-m}-1)} \quad (6)$$

式中 q_0 为初始递减日产气量, 仅角标不同与 Arps 递减表达式区别; a 、 m 为常数, 无量纲; 其余物理量同上。

两种气藏的储层性质、储集机理及渗流机理不同, 从而导致产量递减模型的差异性。由两种模型的表达式(3)至(6)可以看出, 其累产量与产量表达式均满足:

$$G_p/q = \lambda(t) \quad (7)$$

其中 $\lambda(t)$ 是时间 t 的函数表达式, 不难证明, 当气藏递减模型为 Arps 递减时, 且生产时间足够长, 即 $t \rightarrow \infty$, $\lambda(t)$ 是 t 的线性函数, 即:

$$\lambda_1(t) = at + b \quad (8)$$

当气藏递减模型为 Duong 模型时, $\lambda(t)$ 是 t 非线性函数, 即:

$$\lambda_2(t) = at^m \quad (9)$$

从式(5)、(6)可以看出, Duong 递减模型本质上是 Arps 递减模型的非线性扩展, 对表达式(8)、(9)求极限,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 0 \quad (10)$$

即 Duong 模型是 Arps 模型的高阶无穷小(见公式 10), 表明在气井生产后期, Duong 产量递减模型相对 Arps 递减模型具有更长的生产尾部, 与中江气田沙溪庙组气藏气井后期低压低产、间歇生产时间较长的特征相对应(见图 1), 符合致密气藏气井产量递减的典型特征。

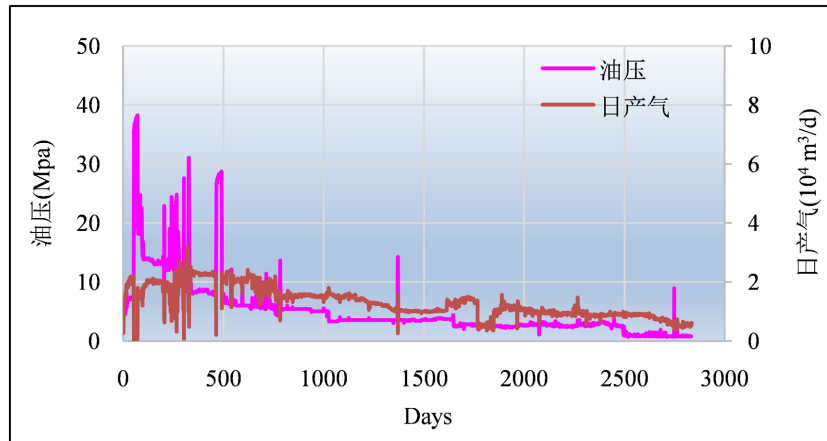


Figure 1. Well Z gas productivity curve.
图 1. 中江气田 Z 井采气曲线

3. Duong 模型诊断及拓展

3.1. Duong 模型的诊断

Duong 模型本质上为气井产量递减的趋势预测, 在双对数坐标中绘制 $q/G_p - t$ 曲线, 具有明显的线性关系(见式 11)。

$$q/G_p = at^{-m} \quad (11)$$

a, m 为正数。根据公式(11)开展 Duong 模型诊断, 即建立累产气/日产气量(q/G_p)与天数(Days)的关系曲线图, 诊断曲线相关性系数接近于 1, 则建立的 Duong 模型预测越准确, 可选取相应阶段的 q_0 和 t 气井进行产量预测。

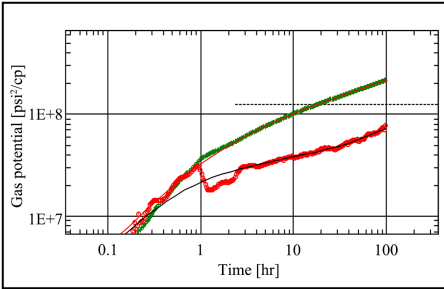
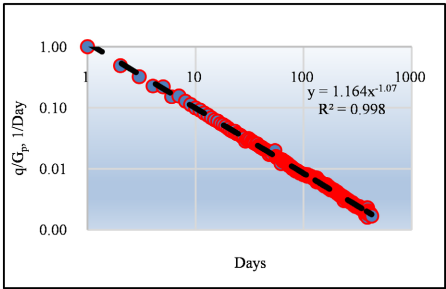
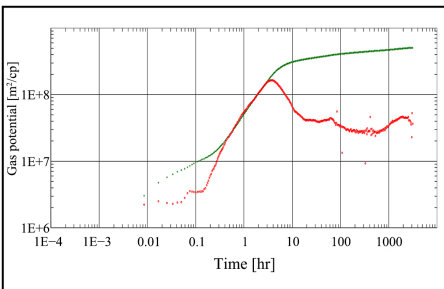
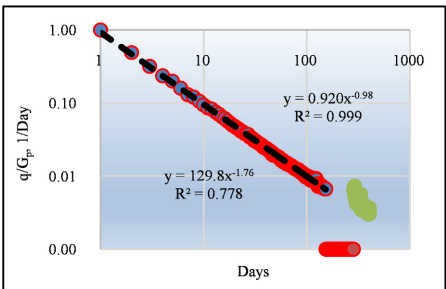
3.2. Duong 模型的拓展

中江气田沙溪庙组气藏储层改造后渗流以裂缝线性为主, 因河道较窄, 大部分气井压恢双对数导数曲线表现出以双线性流为主导, 典型气井流态即为即井筒续流段——裂缝双线性流阶段(斜率 1/4)——裂缝线性流阶段(斜率 1/2)。但也有储层物性较好河道河道较宽的气井, 经射孔试气后, 获得工业产能, 压恢曲线呈现径向流的特征, 即井筒续流段——拟径向流阶段。

经过对中江气田 34 口压恢井进行 Duong 模型产量递减诊断。在双对数坐标中建立累产气/日产气量(q/G_p -Days)的关系曲线图, 得出相应参数 a, m , 拟合得到气井的 Duong 模型产量递减公式, 典型井拟合结果见表 1 所示。

拟合结果表明, 以裂缝线性流为主的 A 井、径向流为主的 B 井两种流态类型气井均可使用 Duong 模型, 这拓展了 Duong 模型主要运用于裂缝流为主导的气井的使用条件。

Table 1. Typical wells of Duong model curve diagnosis in Zhongjiang gas field
表 1. 中江 JS 气藏线性流、径向流典型井 Duong 模型诊断图

典型井	流态	压恢双对数曲线	Duong 模型诊断图	Duong 模型 诊断参数
A 井	线性流、 双线性流			$a = 1.164$ $m = 1.071$ 相关系数 0.998
B 井	径向流			$a = 0.9204$ $m = 0.984$ 相关系数 0.999

4. Duong 模型适用性分析

对中江气田沙溪庙组气藏 193 口生产井做 Duong 模型诊断, 按照诊断结果, 可将气井递减分为以下三种类型:

1) 气井连续生产

该类气井自投产开始连续生产, 在达到边界流之前未有调产、压恢作业措施等, 产量属自然递减。以 C 气井为例, 该井自投产开始至 2015 年 11 月 4 日属于自然递减, 线性相关系数为 0.9859, Duong 递减模型拟合效果较好。

2) 多次调产

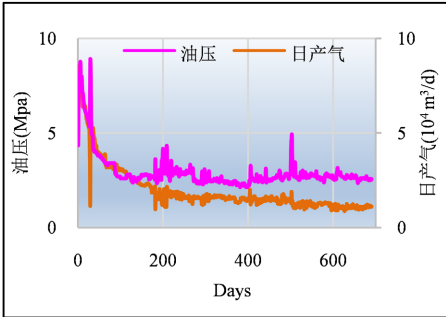
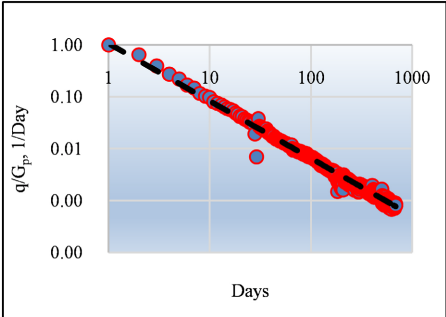
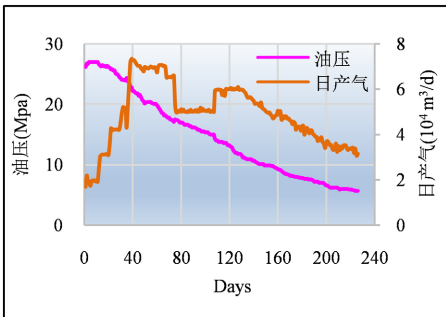
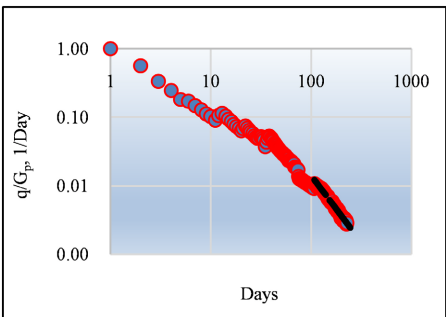
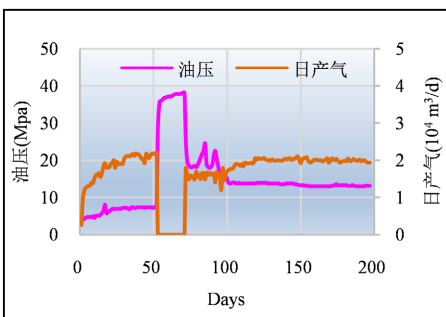
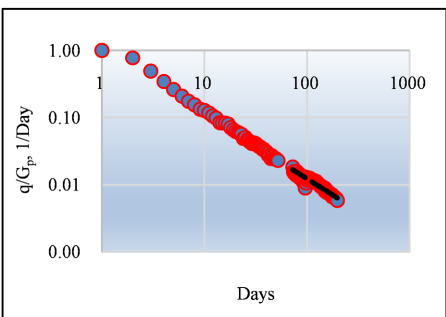
目前中江气田沙溪庙组气藏生产井大部分为该类型气井, 由于生产初期工作制度的调整, 气井井底流态发生变化, 压力梯度改变。如 D 气井, 该井在投产初期 Duong 递减模型诊断图呈分段台阶状, 每一次调产后, 井底压力 - 产量会达到自适应性, 应用最近一段拟合结果来进行产量预测。

3) 压恢井

以 E 井为例, 对该类气井进行了 Duong 产量递减模型诊断, 由于关井压恢, 井底压力恢复, 关井前后井底流态发生了变化, 但气井气藏条件与工作制度形成自适应的渗流状态, 压恢前后都符合 Duong 产量递减模型。

综上, 由三种类型的 Duong 模型诊断图可以看出(见表 2), 该模型对工作制度、初始条件敏感, 如上述三种类型中所述的第一种 C 井, 后期由于地层能量不足, 气井自身带液困难, 现场采用排水采气工艺对气井进行维护, 气井降压梯度发生改变, Duong 模型不再适用, 故对于非连续生产气井进行产量预测、储量计算时应以最近趋势数据作为拟合段, 选取相应的 q_0 和 t 。

Table 2. Duong model diagnostic curves for three types of gas well production
表 2. 中江气田沙溪庙组气藏三种气井生产类型 Duong 模型诊断曲线

典型井类型	生产曲线	Duong 模型诊断曲线	Duong 模型参数
C 井, 连续生产			$a = 1.0703$ $m = 1.107$ 相关系数 0.9859
D 井, 多次调产			$a = 1.2545$ $m = 1.108$ 相关系数 0.9968
E 井, 压恢作业			$a = 1.0399$ $m = 0.965$ 相关系数 0.9457

5. Duong 模型应用实例

以中江 JS₂ 气层 F 井区气井为例, 该井区 3 口气井水平井投产, 投产时间较短, 气井尚未达到边界流状态, 不符合 Arps 递减生产的使用条件, 运用 Duong 模型对该井区 3 口水平井进行产量预测及储量计算。

F 井自投产后至 2018 年 3 月 30 日由于措施作业, 产量压力有波动, 2018 年 8 月 7 日~2020 年 3 月 17 日为自然递减, 无外界干扰, 2020 年 3 月 18 日至目前为低压低产期, 介入排水采气等作业措施(见图 2)。因此选取 2018 年 8 月 7 日至 2020 年 3 月 17 日作为该井 Duong 模型产量预测诊断区间。通过拟合诊断, 线性相关系数为 0.999(见图 3), 线性相关性较好。同理, 对 F-1 井、F-2 井气井诊断, 线性相关系数较高(见表 3), 表明气井产量递减模式均满足 Duong 递减模型。

F 井 Duong 模型诊断结果 $a = 1.2042$, $m = 1.056$, 故该气井 Duong 递减模型为 $q = 3.8t^{-1.056}e^{22.15(r^{-0.056}-1)}$ 。

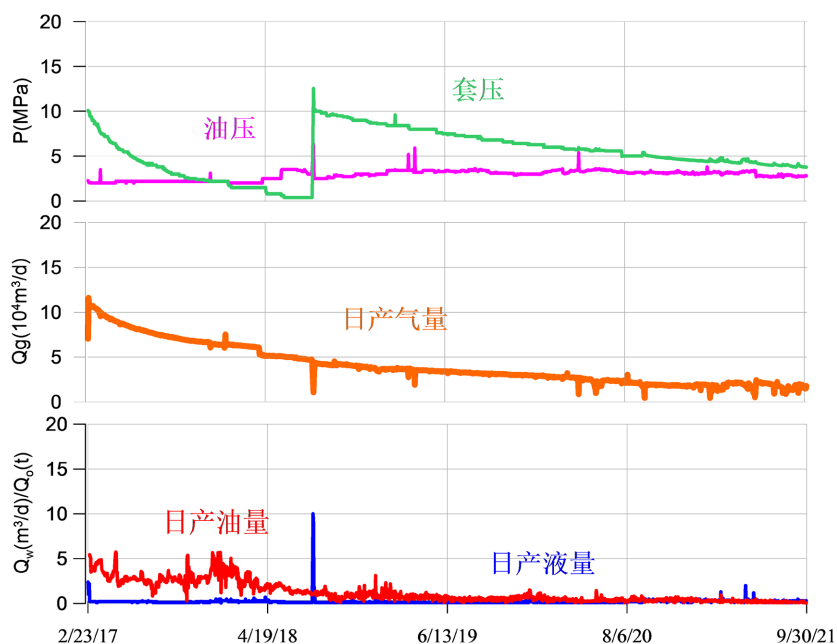


Figure 2. Well F gas productivity curve
图 2. F 气井采气曲线

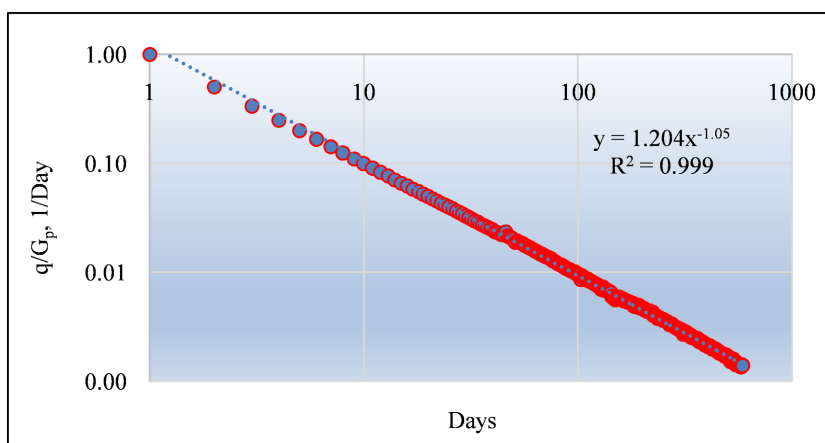


Figure 3. Duong model diagnostic diagram
图 3. F 井 Duong 模型诊断图

Table 3. Duong model gas well diagnosis results in well area F
表 3. F 井区 Duong 模型气井诊断结果表

井号	Duong 递减模型		相关系数	Duong 产量递减模型
	a	m		
F	1.2402	1.056	0.9999	$q = 3.8r^{-1.056}e^{22.15(r^{-0.056}-1)}$
F-1	1.0199	1.031	0.9999	$q = 3.04^{-1.031}e^{32.9(r^{-0.031}-1)}$
F-2	1.038	1.013	0.9998	$q = 5.27^{-1.013}e^{79.8(r^{-0.013}-1)}$

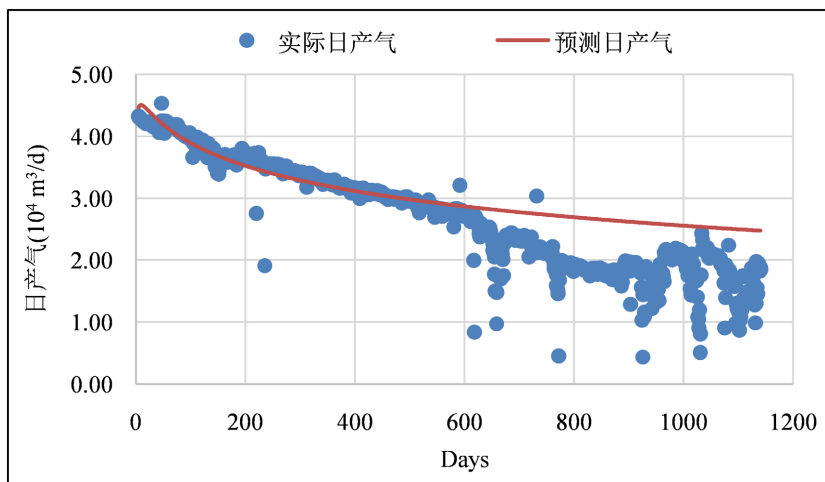


Figure 4. Production forecast result for well F
图 4. F 井产量预测图

由图 4 可知,运用 Duong 模型预测产量后期误差较大(见图 5),表明在气井投产初期处于非稳态流时,运用该模型预测产量递减较为准确。根据预测累产量结果,预测阶段累产气为 6506 万方,与实际累产 6400 万方相当。

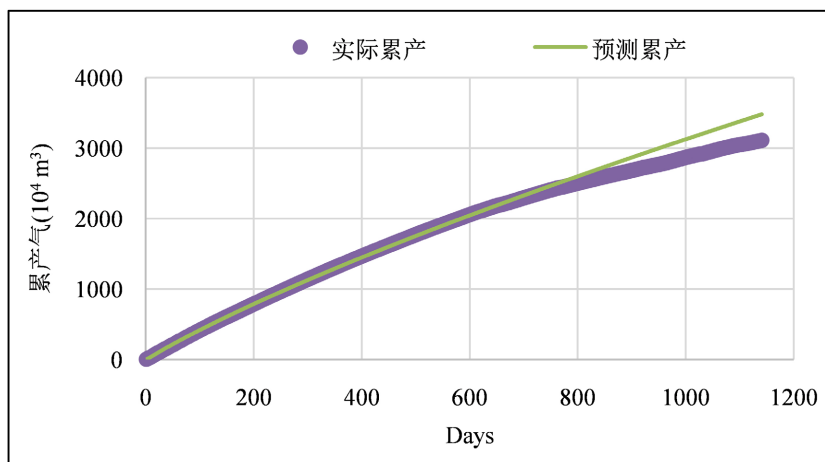


Figure 5. Accumulated gas forecast result for well F
图 5. F 井累产气预测图

6. 结论

1) 通过分析 Duong 模型与 Arps 递减方法的内在联系,表明 Duong 模型本质上为趋势预测,可适用于致密砂岩气藏气井产量预测。

2) 在 Duong 模型适用于页岩气以裂缝流为主导气井这一使用条件的基础上,进一步验证了 Duong 模型也适用于致密砂岩气藏径向流的气井。

3) Duong 产量递减模型是气井生产压力 - 产量自适应的调整过程,在气井流态进入自适应状态条件下均可使用 Duong 递减模型。但该模型对于生产数据要求较高,对于数据离散或者有外界干扰的气井,如现场调峰调产、压恢等因外界条件改变产量的情况下的气井,应用最近的拟合段进行拟合。

4) 针对于投产时间较短、处于非稳定流的气井, Duong 递减模型在确定气井产量预测方面有较强的实用性。

参考文献

- [1] 孙贺东. 油气井现代产量递减分析方法及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- [2] 黎华继, 周文雅, 代平, 詹泽东. 川西坳陷致密河道砂岩气藏类型及其高产富集模式[J]. 天然气勘探与开发, 2018, 2(42): 7-8.
- [3] 庄惠农. 气藏动态描述和试井[M]. 第二版. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [4] 王怒涛, 黄炳光. 实用气藏动态分析方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- [5] Duong, A.N. (2010) Rate-Decline Analysis for Fracture-Dominated Shale Reservoirs. SPE 137748.
- [6] 王科, 李海涛, 李留杰, 张庆, 补成中, 王志强. 3 种常用页岩气井经验递减方法——以四川盆地威远区块为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 30(7): 949-952.
- [7] 张德良, 吴建发, 张鉴, 吴天鹏, 朱怡辉. 北美页岩气规整化产量递减分析方法应用——以长宁-威远示范区为例[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 51-56.
- [8] 韩娟鸽. 页岩气产量递减分析研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [9] 张天泽. 页岩气储层产量曲线分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(2): 157-159.
- [10] 刘传斌, 姜汉桥, 李俊健, 糜利栋, 赵林, 乐雪霖. 预测页岩气产量递减组合模型的研究[J]. 断块油气田, 2015, 22(4): 482-483.
- [11] 庞进, 李尚, 刘洪, 梁洁, 赵子元. 基于流态划分的页岩气产量预测可靠性分析[J]. 特种油气藏, 2018, 25(2): 62.
- [12] 陈元千, 郝明强. Arps 递减微分方程的推导及应用[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 57.
- [13] 詹泽东, 张岩, 段永明, 王启颖, 邓美洲. 非常规气藏产量递减规律与评价研究[J]. 钻采工艺, 2016, 1(39): 76-78.
- [14] 梁倚维, 王东, 李霆钧, 杜超. 致密气井 Arps 产量递减指数变化特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2018, 33(2): 77-81.
- [15] Zhan, Z.D., Wang, Q.Y., Zhou, H., *et al.* (2019) A New Rate-Decline Analysis Model for Gas Reservoirs Based on Statistics. *Ekoloji*, **28**, 4025-4032.