

基于概率法的页岩气单井最终可采量评估

——以焦石坝页岩气田加密井为例

魏绍蕾¹, 黄学斌¹, 李 军¹, 苏映宏¹, 潘立生²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院, 武汉 430223)

摘要:页岩储层大面积连续分布的地质特征和“工厂化”作业的工程特性,使得同一区域内页岩气单井最终可采量(Estimated Ultimate Reserve, EUR)的统计分布具有可重复性,是概率法计算 EUR 的基础。常规确定性方法只能给出一个储量值,概率法能够计算储量的概率分布。四川盆地焦石坝页岩气田一期工程采用 600 m 井距开发,井间动用程度不高;为了提高气藏采收率,开展了焦石坝加密井网调整。采用概率法对加密调整方案的最终可采量进行计算,通过对焦石坝一期产建区页岩气井的地质、工程及试气情况的分析,筛选合适的类比井组,建立类比井组的 EUR 概率分布;借助蒙特卡洛算法,生成加密井网内页岩气平均单井 EUR 的概率分布,确定不同概率下的储量大小;借鉴类比井组动态储量评估参数,确定了加密井网内不同水平段长度页岩气井的典型井曲线。采用概率法实现了焦石坝气田加密井网内生产动态和最终可采量的预测,可为下一步开发方案部署和投资安排提供科学决策依据。

关键词:页岩气;概率法;最终可采量;焦石坝页岩气田;四川盆地

中图分类号:TE155

文献标识码:A

Shale gas EUR estimation based on a probability method:

a case study of infill wells in Jiaoshiba shale gas field

WEI Shaolei¹, HUANG Xuebin¹, LI Jun¹, SU Yinghong¹, PAN Lisheng²

(1. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC Jiangnan Oil Field Company, Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract: The characteristics of shale gas reservoirs and the engineering characteristics of “factory” operation lead to repeated production performance among wells, which is the theoretical basis of a probability method to calculate estimated ultimate recovery (EUR). Compared to the conventional deterministic method, the probability method can calculate a reserve probability distribution. The well spacing of the Jiaoshiba shale gas field in the Sichuan Basin is 600 m, leading to low production extent. Infill wells have been introduced in order to improve gas recovery. In this paper, a probability method was adopted to calculate the EUR for the infill adjustment. Suitable analogy wells were selected by taking geological characteristics, engineering conditions, testing data and well locations into consideration. Based on the EUR probability distribution of analogy wells, the EUR probability curves of infill wells were calculated with the Monte-Carlo method. Typical well curves were established by analyzing the decline parameters of analogy wells. Future production performance and EUR of new wells or undrilled wells can be estimated with this probability method, which is the basis for future strategic decisions.

Key words: shale gas; probability method; estimated ultimate reserve; Jiaoshiba shale gas field; Sichuan Basin

近年来,中国页岩气资源的勘探开发不断取得突破,成为油气领域增产上储的主要阵地。2014年,中国石化提交了焦石坝页岩气区块的探明地质储量为 $1.068 \times 10^8 \text{ m}^3$,是国内首个大型页岩气田。四川盆地焦石坝页岩气田一期采用 600 m 井距进行开发,通过微地震监测和生产动态跟踪等措施发

现井间动用程度不高,为了提高气藏采收率,开展了焦石坝加密井网调整的二期工程。储量计算是编制二期开发方案的基础,从参数取值方法来说,页岩气可采储量评估方法^[1]可分为确定性方法和不确定性方法。确定性方法^[2-5]包括产量递减分析法、物质平衡法、解析和数值模拟法。一般而言,

收稿日期:2020-05-28;修订日期:2020-12-16。

作者简介:魏绍蕾(1987—),女,博士,高级工程师,从事储量评估和油气田开发规划工作。E-mail:leisurewin@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“页岩气地质建模与可采储量评价技术研究”(2016ZX05060001-033)资助。

当油气藏经过一段时间的开发,积累了一定的生产数据,常常选用合适的确定性方法来估算最终油气可采量;对于新建项目(新建产区、整体井网加密等),目前北美一般采用油气储量评估协会(Society of Petroleum Estimation Engineering, SPEE)提出的概率法^[6]进行评估。

概率法又称不确定性法,一般不能单独使用,常常结合容积法来计算原地资源量的概率分布。在油气藏开发早期,对油藏的认识还带有很大的不确定性,通过给定全部或部分储量相关参数的概率分布,得到地质储量的概率分布。概率法不但给出了储量的大小,而且估计了不同储量值所对应的风险。另外,根据石油资源管理系统(PRMS-2018)应用指南^[7-8],概率法还可以结合产量递减法和其他动态法计算可采储量的概率分布。2010年,石油储量工程师评估协会(SPEE)专门针对非常规油气资源形成了《非常规油气区带未开发储量评估指南》^[6],用来计算以页岩气为代表的非常规油气未开发储量,简称SPEE3概率法。目前,该方法已广泛应用于北美页岩气未开发储量评估。随着页岩气资源在国内勘探开发工作的推进^[9-10],概率法的研究和应用也逐渐展开。

与常规油气资源相比,页岩气的储层特征和所采用的工程技术更为复杂,单井开发效果的不确定性更大。确定性的储量评估方法只能给定一个储量值,不能估算储量的不确定性大小。概率法通过类比一组具有同一概率分布的页岩气井,得到新建项目的储量概率分布,既能确定储量大小,又能表征项目的开发概率。因此,概率法更加适用于不确定性程度高的页岩气储量评估。

1 方法论述

1.1 页岩区块的统计学特征

页岩气储层属于“非常规范畴”,是大范围连续性分布的油气聚集场所^[11]。但是,这并不代表页岩气储层是均质的;与此相反,页岩气井生产表现出非常强烈的差异性,即使井位相邻的两口井的生产状况也可能存在很大的不同^[12]。因此,利用单口井或少量井去预测新建项目内页岩气井的开发动态存在很大的风险^[13]。另一方面,由于页岩气开发采用大规模钻完井的生产方式^[14-15],地质(储层厚度、渗透率、孔隙度、含气性、压力系数、地应力和脆性矿物含量等)和工程(水平段长度、压裂液量和加砂量等)特征相似的页岩气井的试气产量、EUR等生产参数具有可重复性。这就意味

着在井间干扰很小的情况下,可以利用类比井组的统计学特征,预测新建项目或未开发区块内页岩气井EUR的概率分布。

利用概率法不仅可以估算储量大小,还可以预测对应储量下的不确定性。根据PRMS-2018关于储量的定义,证实储量(1P)对应累积概率曲线的 P_{90} ,证实储量+概算储量(2P)对应累积概率曲线的 P_{50} ,证实储量+概算储量+可能储量(3P)对应累积概率曲线的 P_{10} 。从本质上说,储量的不确定性是由于储层和流体物性参数的不确定性造成的。根据中心极限定理,如果一个随机变量是多个独立的随机变量相乘的结果,那么这个随机变量常常表现出对数正态分布的特征,如试气参数、单井EUR等。

使用概率法,首先要筛选类比井。根据SPEE3概率法的论述,所选用的类比井组除了要满足地质和工程的相似性以外,还要达到一定的数量。SPEE3概率法按照类比井组试气参数或EUR的概率分布来确定最小样本数,即最少类比井数。表1给出了不同 P_{10}/P_{90} 情形下的最小类比井数。

1.2 SPEE3 概率法评估流程

SPEE3 概率法对页岩气新建项目或待钻区进行储量评估的流程如图1所示。作为页岩气储量评估人员,首先要确定用于类比的页岩气区块,并进一步筛选类比井,类比井组和待评价区的页岩气井必须要满足地质和工程特征具有相似性。类比井组要有一定的生产数据,且生产规律认识较为成熟,可通过确定性方法中的动态储量预测方法得到类比井组各口井的EUR大小,绘制类比井组EUR概率分布。针对新建产井区的井数问题,SPEE3概率法提出利用井距单位法和扩大同心圆法来圈定证实储量面积,国内一般采用井距单位法;存在

表 1 不同 P_{10}/P_{90} 比值下所要求的最少类比井数目

Table 1 Least numbers of analogy wells under different P_{10}/P_{90}

P_{10}/P_{90}	最小类比井数	备注
2	15	很难出现
3	35	常见
4	60	常见
5	75	常见
6	100	常见
8	130	常见
10	170	数据质量/模拟可能存在问题
15	290	数据质量/模拟可能存在问题
20	420	数据质量/模拟可能存在问题
30	670	数据质量/模拟可能存在问题

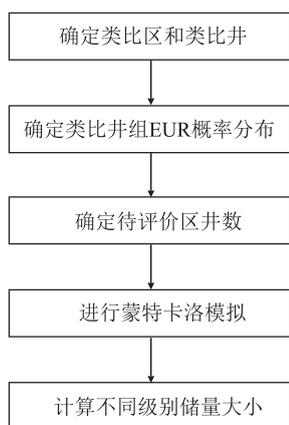


图1 概率法预测 EUR 的流程

Fig.1 Flow chart of EUR prediction using a probability method

具体的开发方案(如探明储量报告)时,要参考开发方案设计的井数。然后,以类比井组 EUR 的概率分布为基础,借助蒙特卡洛算法计算待评价井区页岩气井 EUR 的概率分布。蒙特卡洛模拟是一种随机算法,它以类比井组的 EUR 概率分布作为自变量,随机生成新建项目或待评价区块 N 口待评价井的 EUR 分布,对 N 口待评价井的 EUR 进行合并,得到新建井区内平均单井 EUR,对上述过程重复几次甚至几十万次得到新建井区内平均单井 EUR 的概率分布曲线。最后,根据生成的概率分布曲线,可确定不同级别下的储量大小或特定储量的不确定性。

2 实例应用

2.1 项目背景

焦石坝页岩气田位于重庆市涪陵、南川、武隆等区县境内,构造上位于四川盆地川东高陡褶皱带万县复向斜^[16-19]。气田的主要开发层系为上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组龙一段,属于深水陆棚沉积环境,厚度 85~120 m,岩性主要为灰黑色硅质页岩。2013 年 1 月,焦石坝一期产建项目正式投入开发,共钻页岩气井 257 口,投产 254 口。截至 2019 年底,一期产建区平均井口压力 4.66 MPa,外输压力 4.81 MPa,日产气量 $912.37 \times 10^4 \text{ m}^3$,日产水量 676.60 m^3 。为了提高气藏的动用效果,2018 年 7 月焦石坝页岩气田开始了井网加密调整的二期产建工作。图 2 给出了井网加密开发调整方案的井位,共设计 74 口加密井,目前已有 41 口水平井完成试气,35 口水平井正式投产。

焦石坝一期产建区已有 7 年开发历史,目前全部气井均已进入产量递减阶段,具备比较好的生产规律,可以利用产量递减法或其他动态储量预测方

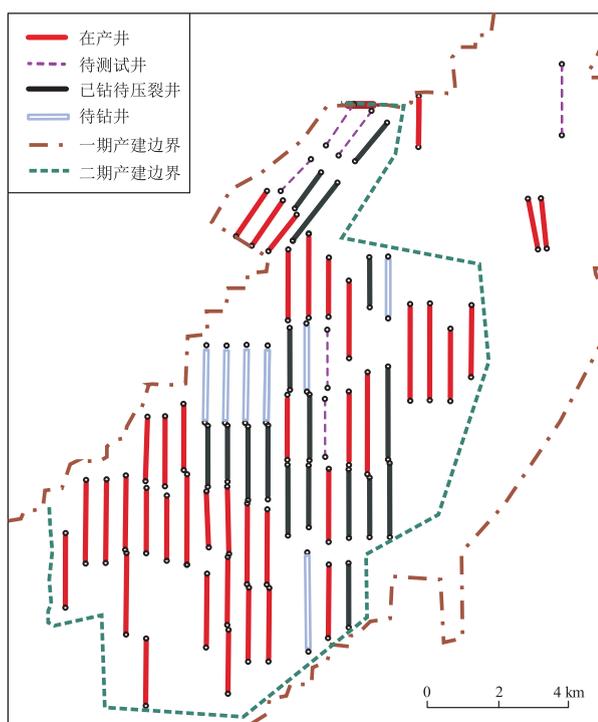


图2 四川盆地焦石坝页岩气田加密井网井位分布示意

Fig.2 Well locations of the infill well pattern in Jiaoshiba shale gas reservoir, Sichuan Basin

法评估单井 EUR。借鉴北美页岩气储量评估经验,一期产建区页岩气井主要采用两段式递减方法(前期采用调和递减,待递减率降低到 5%~10%左右再转为指数递减)预测未来的生产动态,计算最终可采量。

焦石坝页岩气田二期产建井网加密工作未完成,部分投产井生产时间很短并且采用“降压限产”的生产模式,生产规律尚不明朗,利用递减法和其他动态储量评估方法的不确定性大。因此,建议类比一期产建区页岩气井的储量评估结果,采用概率法评估加密井网的单井 EUR。

2.2 应用过程

焦石坝井网加密是在一期产建区内进行的,两者属于同一套储层,具有同样的沉积环境和地质构造,并且开发机理相同。因此,一期产建区是理想的“类比油气藏”,一期产建区在产的 254 口井为备选的类比井。国内外已有的研究成果^[20-27]表明,页岩气单井 EUR 与试气产量/无阻流量、测试压力表现出很强的相关性。为了消除水平段长度对开发效果的影响,绘制了焦石坝一期产建区全部页岩气井单位长度的测试参数 F (试气产量、测试压力)和单位长度的 EUR 关系(图 3)。

图 4 给出了焦石坝页岩气田一期产建区 254 口单井试气产量的 Profit 图。一般而言,同一井组

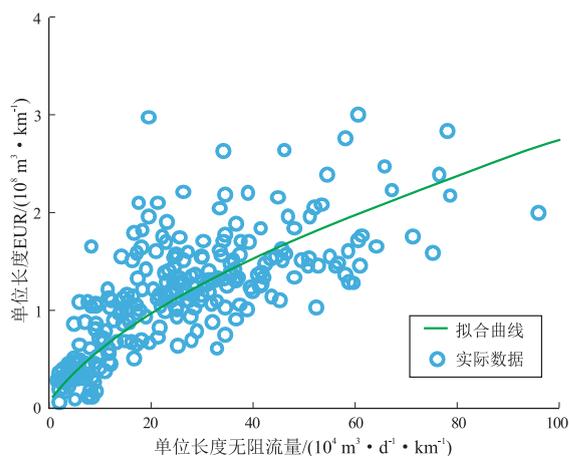


图 3 四川盆地焦石坝一期产建区页岩气单井单位长度测试参数 F 与单位长度 EUR 关系

Fig.3 Relationship between EUR and AOF per unit length for the first stage wells in Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin

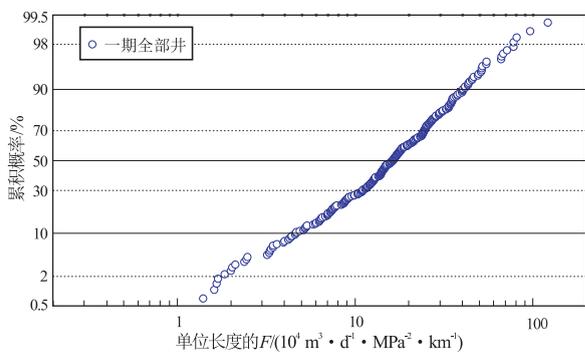


图 4 四川盆地焦石坝一期产建区页岩气单井单位长度测试参数 F 累计概率分布 Profit 图

Fig.4 Cumulative probability diagram of AOF per unit length for the first stage wells in Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin

页岩气井的试气产量或单井 EUR 在 Profit 图上表现为一条直线。由图 4 可以看出,一期产建区内全部井试气产量的 Profit 曲线与直线的偏差较大。另外,单位长度试气产量的 P_{10} 高达 $41.6 \times 10^4 \text{ m}^3 / (\text{d} \cdot \text{MPa}^2 \cdot \text{km})$, P_{90} 仅为 $4.6 \times 10^4 \text{ m}^3 / (\text{d} \cdot \text{MPa}^2 \cdot \text{km})$, $P_{10}/P_{90} = 8.9$ 。根据表 1 可知,当 $P_{10}/P_{90} > 8$ 时,样本点的数据或模拟存在问题,应将样本点进一步细分。

以试气参数为主要指标,综合其他储层和流体物性参数(孔隙度、渗透率、含气饱和度、储层埋深、有机质含量、脆性矿物含量等),并结合井点坐标对 254 口井划分为 4 个分区(主体区、东区、西区和西南区)(图 5)。

图 6 给出了分区后的单位长度试气参数概率分布 Profit 图。主体区包含井数 147 口, $P_{10}/P_{90} = 4.2$; 东区包含井数 35 口, $P_{10}/P_{90} = 5.8$; 西区包含井数 27 口, $P_{10}/P_{90} = 4.3$; 西南区包含井数 27 口, $P_{10}/P_{90} = 6.0$ 。分区后的页岩气井单位长度试气参

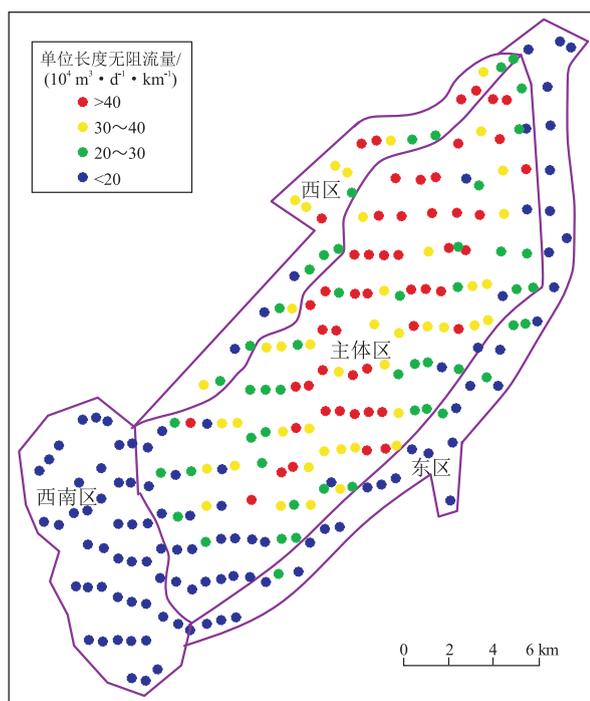


图 5 四川盆地焦石坝一期产建区页岩气井分组

Fig.5 Four sub-sections for the first stage wells in Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin

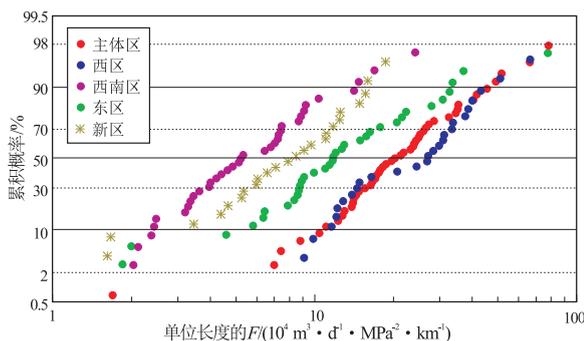


图 6 四川盆地焦石坝一期产建区页岩气井分区后的单位长度无阻流量概率分布 Profit 图

Fig.6 Cumulative probability diagram of AOF per unit length for the four sub-sections for the first stage wells in Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin

数在 Profit 图上有很好的线性规律,且 P_{10}/P_{90} 比值在表 1 推荐的理想范围内(图 6)。

将焦石坝页岩气田加密井区已完成试气的 41 口井的单位长度测试参数 F 概率分布叠合到图 6,可以看出加密井网介于西南区和东区之间,因此,选用东区和西南区的页岩气井构建类比井组。类比井组与加密井区的试气参数概率对比如图 7a 所示,两者具有很好的相似性;如图 7b 类比井组的单井 EUR 概率分布,可以用来预测加密井网的页岩气单井动态。

2018 年 7 月,焦石坝页岩气田加密井网调整方案获得公司审批通过。根据开发调整方案,在图 2

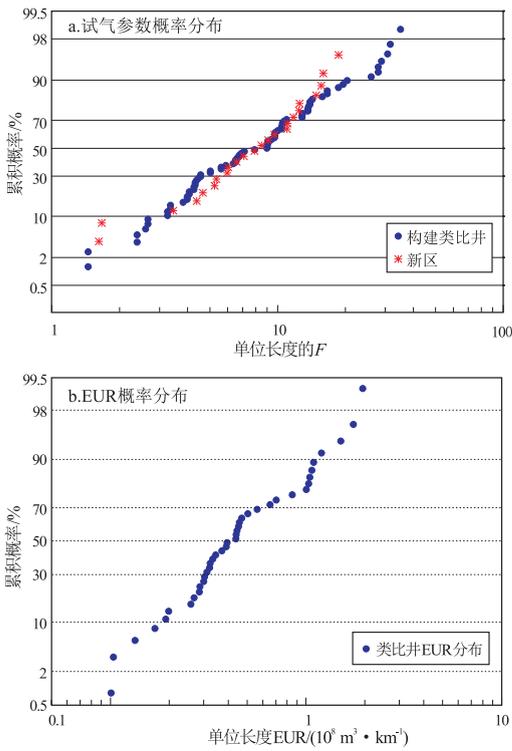


图 7 四川盆地焦石坝页岩气田一期产建区类比井组概率分布

Fig.7 Cumulative probability plots of EUR per unit length for analog well groups for the first stage wells in Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin

绿色虚线圈定的区域内进行加密,共设计水平井 74 口。基于一期产建区优选类比井组 EUR 的概率分布,对加密井网的 74 口页岩气井进行 20 000 次蒙特卡洛模拟得到加密井网内平均单位长度 EUR 概率分布(图 8),1P 储量对应 P_{90} ,为 $0.51 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}$; 2P 储量对应 P_{50} ,为 $0.58 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}$; 3P 储量对应 P_{10} ,为 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}$ 。

3 结果分析

3.1 不同级别储量取值

与确定性方法相比,概率法不仅能够给出储量

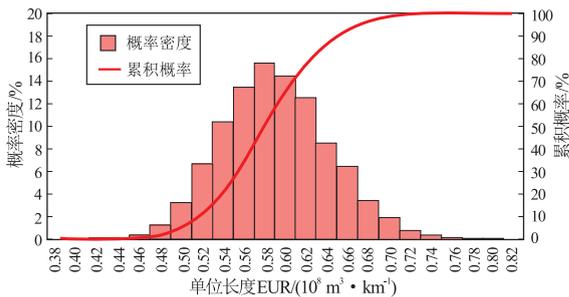


图 8 四川盆地焦石坝页岩气田加密井网平均单位长度 EUR 概率分布

Fig.8 Probability plots of EUR per unit length for infilled well pattern in Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin

的评估结果,还能给出特定储量评估结果下的概率取值。例如,焦石坝页岩气田加密井网调整方案中共设计水平井 74 口,通过对 74 口井进行蒙特卡洛模拟得到加密井网内平均单位长度 EUR 概率分布(图 8)。

加密井网完井段长度在 1 200~3 000 m 之间(图 9a),根据单位长度 EUR 可以计算特定完井段长度下页岩气井的 EUR 取值(图 9b)。例如,水平段长度为 2 000 m 的页岩气井,1P 储量 $1.02 \times 10^8 \text{ m}^3$,用作上市储量申报的依据;2P 储量为 $1.16 \times 10^8 \text{ m}^3$,用作公司制定未来规划的依据;3P 储量为 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,为油田经营者努力实现的目标。

焦石坝一期产建区大部分井采用“稳产—递减”的生产模式,按照测试产量的大小配置稳产期的产量。借鉴一期产建区页岩气井的生产规律,当稳产期日产气量为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 时,进入递减阶段的初期递减率约为 65%。在确定的单井 EUR 条件下,通过反算稳产期产量、稳产时间、初始递减率,得到不同水平段长度下的典型井生产曲线(图 10)。加密井

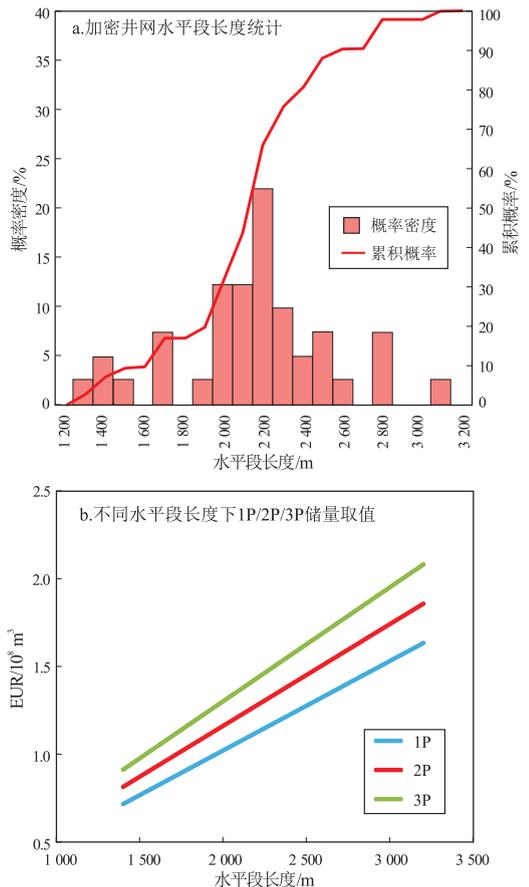


图 9 四川盆地焦石坝页岩气田加密井网页岩气井水平段长度分布及单井 EUR

Fig.9 Probability plots of well length for infilled well pattern and EUR prediction for different well lengths in Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin

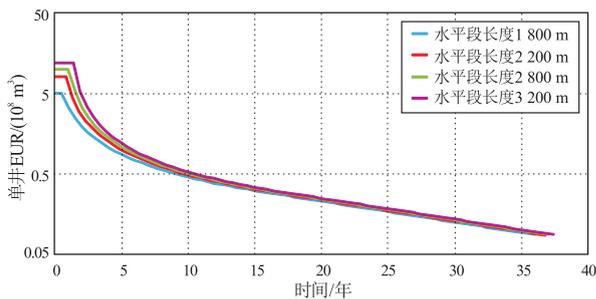


图 10 四川盆地焦石坝页岩气田加密井网不同水平段长度下的典型井曲线

Fig.10 Typical well curves for different well lengths of infilled well pattern in Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin

网采用“限产降压”的生产模式,稳产期一般在 0.5~2 年左右;进入递减阶段后,初期递减快,后来递减逐渐变缓。

3.2 分组与不分组结果对比

类比井的选择是概率法评估储量的关键。从统计意义上来说,类比井的数量越多越好,但是在实际应用中类比井的选择要符合一定的前提条件,即所选定的类比井与待评价的页岩气井满足地质和工程相似,从而保证类比井和待评价井的生产符合相同或相似的概率分布。

影响页岩气井生产状况的因素很多,众多研究都提及试气参数和最终采出量满足很好的相关关系。以测试参数为主控因素,综合考虑其他地质和工程参数进一步细分组,发现加密井网的生产动态介于一期产建东区和西南区之间,因此,利用一期产建东区和西南区的页岩气井构建类比井组。

本文分别对两种情形(情形 1:优选东区和西南区作为类比井组;情形 2:利用一期产建全部井作为类比井组)的结果进行了对比(图 11)。从概率密度曲线和累计概率曲线来看,红线比蓝线整体右移,这说明利用全部井作为类比井组时 EUR 预测值偏高。这主要是由于在一期产建区高产井大部分集中在北部,而加密井网大部分井位于中部甚至偏南的位置,类比井组中这些高产井的存在“不合理”地高估了加密井网内页岩气井的开发效果。

3.3 不同阶段储量风险对比

利用概率法可以定量表征项目面临的风险。随着开发工程的推进,完钻井数增多,项目的风险也会发生变化。对于实际项目来说,一般会通过补充新井的数据对之前的认识进行调整,有时会更新或修正类比井组的概率分布曲线。本文从方便应用角度出发,假设在项目推进过程中所采用类比井组的概率分布曲线未发生变化。

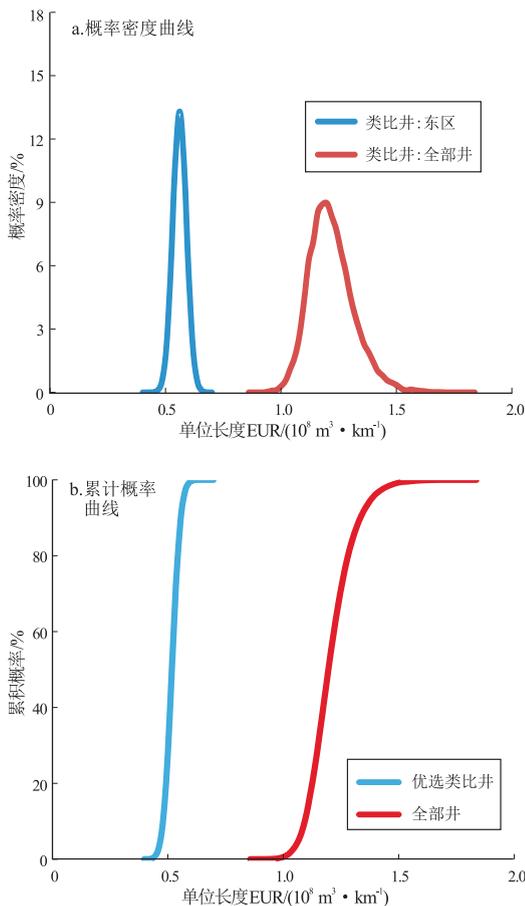


图 11 四川盆地焦石坝页岩气田不同类比井组下单井长度 EUR 概率分布对比

Fig.11 Probability distribution of EUR per unit well length under two cases in Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin

图 12 给出了不同完钻井数目下(早期 10 口井;中期 30 口井;后期 74 口井)利用概率法计算的平均单位长度 EUR 概率密度曲线和累计概率曲线。对比不同阶段的概率分布曲线可以看出,三条曲线 P_{50} 值($0.56 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$)基本保持不变;但是随着钻井工作的推进,曲线变陡直, P_{10} 和 P_{90} 的取值更加接近于 P_{50} 。当完钻 10 口井时, P_{90} 为 $0.41 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, P_{10} 为 $0.78 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, $P_{10}/P_{90} = 1.90$;当完钻 30 口井时, P_{90} 为 $0.43 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, P_{10} 为 $0.69 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, $P_{10}/P_{90} = 1.6$;当 74 口井全部完钻时, P_{90} 为 $0.51 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, P_{10} 为 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, $P_{10}/P_{90} = 1.28$,说明随着钻井数目的增加,项目的不确定性降低,风险减少。

4 结论

(1)与常规确定性方法相比,概率法能够给出不同概率下的储量大小。本文针对尚在建设的焦石坝加密井网调整,采用概率法给出了平均单井单位长度 EUR 的概率分布,将水平段长度为 2 000 m

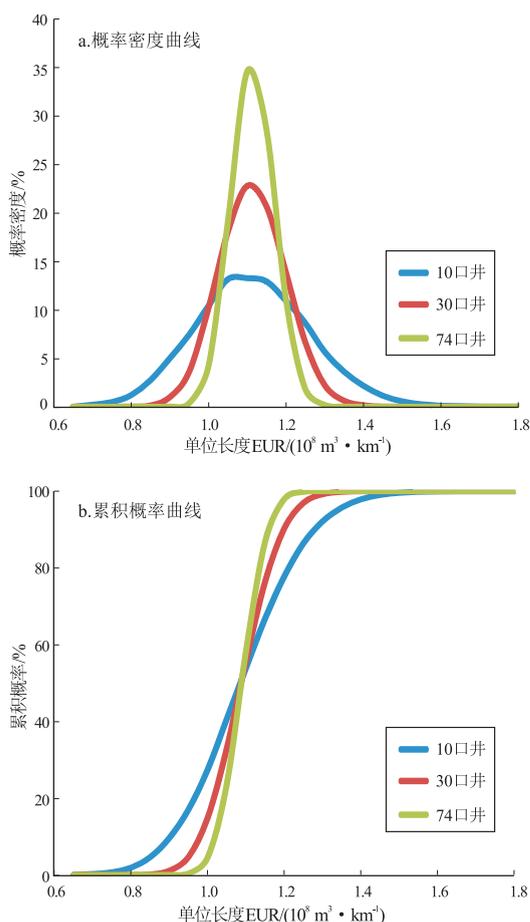


图12 四川盆地焦石坝页岩气田不同完钻井数目下单位长度 EUR 概率分布对比

Fig.12 Probability distribution of EUR per unit well length for different numbers of drilled wells in Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin

的页岩气井 1P 储量 $1.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ 作为上市储量申报的依据;2P 储量 $1.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 作为规划方案的编制依据;3P 储量 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 作为油田经营者努力经营的目标。

(2) 类比井组的选择对储量计算的准确性具有重要的意义。以测试参数为主,综合其他储层地质、流体物性、工程参数以及井点坐标等因素,对焦石坝一期产建区的页岩气井分成 4 个井组(主体区、西区、东区和西南区),加密井网的生产规律介于东区和西南区之间,可用作类比井组。与选用一期所有井作为类比井相比,优选类比井后计算的储量值更加可靠。

(3) 储量评估伴随气藏开发的整个生命过程,研究表明待评价区平均单井 EUR 的 2P 储量不受井数的影响,但是 1P 和 3P 储量受井数的影响;随着钻井数目的增加, EUR 概率曲线更加陡直,项目的风险逐渐降低。另外,随着气藏的开发,新的资料 and 认识不断增加,应及时更新储量评估结果,为

下一步生产规划奠定基础。

参考文献:

- [1] 贾承造.美国 SEC 油气储量评估方法[M].北京:石油工业出版社,2004.
JIA Chengzao. SEC estimation approach for oil & gas reserves[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [2] 朱维耀, 元倩, 马千, 等.页岩气不稳定渗流压力传播规律和数学模型[J].石油勘探与开发, 2016, 43(2): 261-267.
ZHU Weiyao, QI Qian, MA Qian, et al. Unstable seepage modeling and pressure propagation of shale gas reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 261-267.
- [3] 王勇, 张林霞, 徐剑良, 等.页岩气井产量递减分析经验法优化应用研究[J].石油化工应用, 2020, 39(1): 8-12.
WANG Yong, ZHANG Linxia, XU Jianliang, et al. Empirical method for shale gas well production decline analysis optimization applied research [J]. Petrochemical Industry Application, 2020, 39(1): 8-12.
- [4] 汤亚硕.涪陵页岩气田可采储量评价方法优选[J].江汉石油科技, 2019, 29(4): 23-34.
TANG Yawan. Optimization of recoverable reserves assessment for Fuling shale gas field [J]. Jiangnan Petroleum Science and Technology, 2019, 29(4): 23-34.
- [5] 覃利娟.概率法在油气储量不确定性分析中的应用[J].断块油气田, 2019, 26(6): 723-727.
QIN Lijuan. Application of probability method to uncertainty analysis of oil and gas reserves [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(6): 723-727.
- [6] 王永祥, 李建忠.非常规油气区带未开发储量评估指南[M].北京:石油工业出版社, 2012.
WANG Yongxiang, LI Jianzhong. Guidelines for the practical evaluation of undeveloped reserves in resource plays [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [7] 王永祥, 张君峰, 谢锦龙, 等.《石油资源管理体系应用指南》导读[M].北京:石油工业出版社, 2012.
WANG Yongxiang, ZHANG Junfeng, XIE Jinlong, et al. A conduct on guidelines for application of the petroleum resources management system [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [8] SPE, AAPG, WPC, et al. Guidelines for application of the petroleum resources management system [M]. Houston: Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [9] 董大忠, 邹才能, 杨桦, 等.中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J].石油学报, 2012, 33(S1): 107-114.
DONG Dazhong, ZOU Caineng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 107-114.
- [10] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣.中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J].石油勘探与开发, 2018, 45(4): 561-574.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. China's shale gas exploration and development: understanding and practice [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 561-574.
- [11] 邹才能, 陶士振, 袁俊俊, 等.“连续型”油气藏及其在全球的重要性: 成藏、分布与评价[J].石油勘探与开发, 2009,

- 36(6):669-682.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, YUAN Xuanjun, et al. Global importance of "continuous" petroleum reservoirs: accumulation, distribution and evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-682.
- [12] 易积正, 王超. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组海相页岩储层非均质性特征[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 13-19.
- YI Jizheng, WANG Chao. Differential pore development characteristics in various shale lithofacies of Longmaxi Formation in Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(1): 13-19.
- [13] 陈劲松, 韩洪宝, 年静波, 等. 概率法在页岩气未开发最终可采量评估中的应用: 以北美成熟页岩气区块为例[J]. 天然气工业, 2018, 38(7): 52-58.
- CHEN Jinsong, HAN Hongbao, NIAN Jingbo, et al. Application of the probability method to undeveloped EUR assessment of shale gas: a case study on one mature shale gas block in North America[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(7): 52-58.
- [14] 黄昌武. 页岩油气压裂理论方法和技术体系初步形成[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(4): 443.
- HUANG Changwu. Theoretical methodology and technical system for shale reservoir fracturing[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 443.
- [15] 吴奇, 胥云, 王晓泉, 等. 非常规油气藏体积改造技术: 内涵、优化设计与实现[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 352-358.
- WU Qi, XU Yun, WANG Xiaoquan, et al. Volume fracturing technology of unconventional reservoirs: connotation, optimization design and implementation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 352-358.
- [16] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551-561.
- WANG Yuman, DONG Dazhong, LI Jianzhong, et al. Reservoir characteristics of shale gas in Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 551-561.
- [17] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 28-36.
- GUO Tonglou, ZHANG Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 28-36.
- [18] 刘智颖, 张柏桥, 许巍, 等. 焦石坝地区页岩 Cole-Cole 模型参数的快速计算方法[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(5): 42-48.
- LIU Zhiying, ZHANG Baiqiao, XU Wei, et al. A fast computing method for rock electric parameters of Cole-Cole model in Jiaoshiba zone[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(5): 42-48.
- [19] 李金磊, 尹成, 王明飞, 等. 四川盆地涪陵焦石坝地区保存条件差异性分析[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 341-347.
- LI Jinlei, YIN Cheng, WANG Mingfei, et al. Preservation condition differences in Jiaoshiba area, Fuling, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 341-347.
- [20] 陈新军, 包书景, 侯读杰, 等. 页岩气资源评价方法与关键参数探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 566-571.
- CHEN Xinjun, BAO Shujing, HOU Dujie, et al. Methods and key parameters of shale gas resources evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 566-571.
- [21] 方栋梁, 孟志勇. 页岩气富集高产主控因素分析: 以四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组一段页岩为例[J]. 石油实验地质, 2020, 42(1): 37-41.
- FANG Dongliang, MENG Zhiyong. Main controlling factors of shale gas enrichment and high yield: a case study of Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(1): 37-41.
- [22] 胡德高, 刘超. 四川盆地涪陵页岩气田单井可压性地质因素研究[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 20-24.
- HU Degao, LIU Chao. Geological factors of well fracability in Fuling shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 40(1): 20-24.
- [23] 张汉荣, 王强, 倪楷, 等. 川东南五峰—龙马溪组页岩储层六性特征及主控因素分析[J]. 石油实验地质, 2016, 38(3): 320-325.
- ZHANG Hanrong, WANG Qiang, NI Kai, et al. Six characteristics and main controlling factors of shale reservoirs in the Wufeng-Longmaxi formations, southeastern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(3): 320-325.
- [24] 庞河清, 熊亮, 魏力民, 等. 川南深层页岩气富集高产主要地质因素分析: 以威荣页岩气田为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(S1): 78-84.
- PANG Heqing, XIONG Liang, WEI Limin, et al. Analysis of geological factors for high productivity in Chuannan deep shale gas reservoirs: taking Weirong shale gas field as an example[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 78-84.
- [25] 刘华, 王卫红, 王妍妍, 等. 页岩气井产能表征方法研究[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(5): 63-69.
- LIU Hua, WANG Weihong, WANG Yanyan, et al. Productivity characterization method of shale gas wells[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(5): 63-69.
- [26] 熊小林. 威远页岩气井 EUR 主控因素量化评价研究[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 532-538.
- XIONG Xiaolin. Quantitative evaluation of controlling factors on EUR of shale gas wells in Weiyuan block[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 532-538.
- [27] 宋振响, 徐旭辉, 王保华, 等. 页岩气资源评价方法研究进展与发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 1038-1047.
- Song Zhenxiang, Xu Xuhui, Wang Baohua, et al. Advances in shale gas resource assessment methods and their future evolution[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1038-1047.