

引用格式:杨兆中,熊俊雅,刘俊,等.基于Apriori关联分析的煤层气压裂效果主控因素识别[J].油气藏评价与开发,2020,10(4):63-69.

YANG Z Z, XIONG J Y, LIU J, et al. Identification of main controlling factors on performance of CBM well fracturing based on Apriori association analysis[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 63-69.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.04.010

基于Apriori关联分析的煤层气压裂效果主控因素识别

杨兆中,熊俊雅,刘俊,闵超,李小刚,杨晨曦

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610500)

摘要:煤层气井压裂增产改造效果会受到多方面因素综合制约,如煤储层地质特征、水力压裂施工参数等,故分析各因素的显著性,明确影响煤层气井压裂效果的主控因素具有重要的研究意义。基于国内Z气田区块的压裂施工数据,利用Apriori关联规则分析法对压裂效果主控因素进行追踪,并结合灰色关联度分析,形成了一套新的压裂措施效果主控因素识别方法,同时判断出影响该区块压裂效果的8个主控因素依次为:最大施工排量>平均砂比>含气饱和度>含气量>支撑剂施工总量>压裂液施工总量>携砂液量>前置液量,在压裂设计时可基于该方法,参照关联度大小优先调节不同的主控因素以控制压裂效果,进而为现场施工提供理论依据。

关键词:煤储层;压裂效果;主控因素;Apriori关联分析;灰色关联度

中图分类号:TE358

文献标识码:A

Identification of main controlling factors on performance of CBM well fracturing based on Apriori association analysis

YANG Zhaozhong, XIONG Junya, LIU Jun, MIN Chao, LI Xiaogang, YANG Chenxi

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: The effect of CBM wells fracturing is controlled by multiple factors including geological characteristics of coal reservoir and data of hydraulic fracturing technology, therefore, it's important to analyze the significance of each factor and determine the main controlling factors affecting the fracturing effect of CBM wells. With reference to the fracturing data from a CBM gas field in China, Apriori association analysis is employed to track the main controlling factors, and in combination of grey correlation method, a new set of identification methods of these factors for the effect of fracturing measures has been put forward. Meanwhile, it is figured out that eight main controlling factors affecting the fracturing effects are in the order as follows: maximum operation displacement of fracturing>average sand ratio>gas saturation>gas content>total proppant volume>total fracturing fluid volume>sand carrying fluid volume>prepad fracturing volume. Based on this method, different main control factors can be adjusted preferentially with reference to the degree of correlation in fracturing design to control fracturing effect, so as to provide theoretical basis for field application.

Key words: coal seam, evaluation of fracturing effect, main controlling factors, Apriori association analysis, grey correlation method

我国煤层气资源量位居世界第三,具有低储层压力、低渗透性、低含气饱和度的“三低”特征^[1],通常需经储层改造后才能达到经济开采标准。水力压裂作为煤层气开采的一项重要增产措施,具有高风险、高成本的特点,为提高储层改造效率,需合理分析主

控因素、提前预判压裂效果,为压裂选井及压裂施工参数的选取提供设计依据。

目前针对研究煤层气压裂效果主控因素的数学方法主要包括:层次分析法^[2-3]、灰色关联法^[4-5]、数值模拟法^[6-7]、模糊综合分析法^[8-9]、多层次综合评价模

收稿日期:2019-12-04。

第一作者简介:杨兆中(1969—),男,博士,教授,从事低渗透油气藏增产改造理论、技术与油气藏数值模拟研究。通讯地址:四川省成都市新都区西南石油大学,邮政编码:610500。E-mail: yangzhaozhong@swpu.edu.cn

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发之专题四”(2016ZX05027003-007)。

型^[10-11]等。但这些方法都有各自的局限性,层次分析法需求取特征向量并进行一致性检验,会导致计算复杂,且权重确定受人为主观因素影响较大;灰色关联法为了追求较高的准确度,需要大量的数据做支撑;数值模拟法人为进行了很多假设,模拟结果容易失真;模糊综合分析法隶属度函数等的求取较为困难;相关性分析仅能考虑因素之间的线性关系,而不能分析因素对产量的非线性影响。

提出了一种新的主控因素识别方法,该法利用了Apriori关联分析方法关注数据项概率分布和关联的优点,克服了相关性分析等统计方法只能发现线性关系的缺点,并基于灰色关联分析对识别的主控因素进行了排序。所得结果能够对压裂历史数据进行更为客观的分析,最后针对某特定区块进行数值实验,选出了在该区块影响压裂效果较大的8个主控因素并进行排序。

1 煤层气井压裂效果影响因素分析

在煤层气开发生产过程中,地质条件、工程因素都会对压后产能造成重大影响,因此,需要根据煤层气开发的基本原理和现场经验,分析哪些因素可能会对煤层气压裂效果造成影响。依据我国各大煤层气田现场压裂施工效果研究^[12-14],主要影响因素见表1。

1.1 工程因素

1.1.1 压裂液施工总量对压裂效果的影响

理论上,施工规模越大意味着所需压裂液总量越多,相同排量下会产生更长更宽的人工裂缝,但由于煤储层的特殊性,压裂缝宽通常远大于煤层厚度,目前从现场统计结果来看,压裂注入液量与产量具有一定正相关关系^[5]。

1.1.2 前置液量对压裂效果的影响

前置液主要用于形成和延伸一定几何尺寸的压裂缝,为支撑剂进入地层建立必要空间。前置液量过少易造成携砂液在窄缝区形成砂堵,若前置液量

过多,可能导致压裂缝内铺砂形态不均匀。因此,前置液量可能会对压裂效果产生影响。该文选了36口已进入稳产期的气井数据,绘制了稳定产气峰值与前置液占比(以 P 表示)的柱状关系(图1),可看出前置液占比不同,稳定产气峰值相差高达 $200\text{ m}^3/\text{d}$ 。

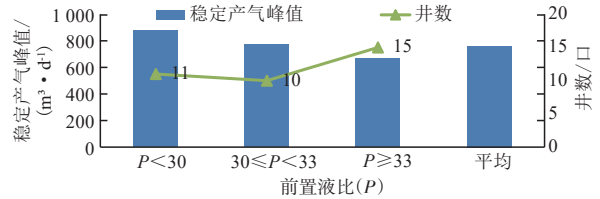


图1 稳定产气峰值与前置液比

Fig. 1 Ratio of peak value of stable gas production to pre-liquid

1.1.3 携砂液量对压裂效果的影响

施工所需携砂液量主要通过平均砂比计算得到,携砂液量越多表明进入地层的支撑剂越多,但此时若裂缝仅在缝宽和缝高上延伸,携砂量太大易形成砂堵,对压裂造缝、布砂及填砂浓度均会造成不利影响。

1.1.4 支撑剂施工总量对压裂效果的影响

支撑剂的作用在于压裂施工结束后维持裂缝壁面一定开度,理论上支撑剂施工总量的增加利于增加缝长和缝宽,增加煤层气的降压范围,扩大有效泄流面积,提升产气效果^[15]。

1.1.5 破裂压力对压裂效果的影响

破裂压力反映储层产生裂缝的难易程度,低破裂压力更易形成复杂缝网,煤层气井压裂过程中若破裂压力过高甚至会导致施工停止,进而展开重复作业的客观情况。且通常情况下,煤层厚度越大供气能力越强,潜在产量就越高^[16]。

1.1.6 最大施工排量对压裂效果的影响

产生人工裂缝的基础是在井底憋起高压,施工排量必须大于地层吸液能力。大排量利于支撑剂的输送以及裂缝的延伸,但排量过高会导致裂缝穿层、过高的井口施工压力等不利影响。稳定产气峰值与最大施工排量(Q)的柱状关系见图2。

表1 影响煤层气压裂效果主要影响因素

Table 1 Main influencing factors of CBM fracturing

工程因素		静态地质参数
压裂技术参数	完井参数	
压裂液施工总量、前置液量、携砂液量、支撑剂施工总量、破裂压力、最大施工排量、平均砂比、压裂施工曲线形态	射孔段厚度	含气饱和度、含气量、储层压力、临储比、渗透率

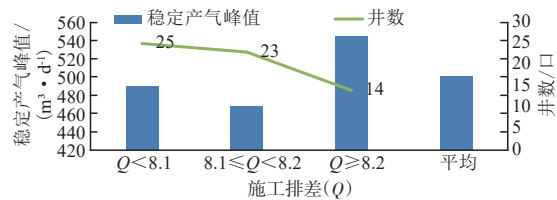


图2 稳定产气峰值与最大施工排量

Fig. 2 Relation between peak value of stable gas production and maximum construction discharge

1.1.7 平均砂比对压裂效果的影响

平均砂比是计算施工所需携砂液量的重要依据,通过一定调整计算可建立平均砂比与缝内铺砂浓度的关系,铺砂浓度越高,裂缝导流能力越大,压裂效果越好。稳定产气峰值与平均砂比(S)的柱状关系见图3。

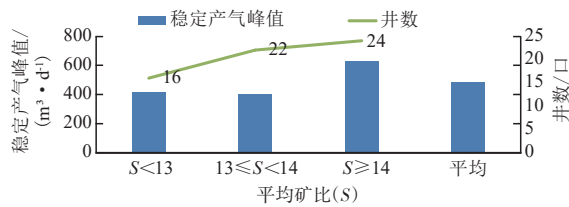


图3 稳定产气峰值与平均砂比

Fig. 3 Ratio of peak value of stable gas production and average sand

1.1.8 压裂施工曲线形态对压裂效果的影响

不同类型压裂施工曲线形态反映了不同压后裂缝展布情况,根据不同类型施工曲线的判别标准可对压后产气效果进行评价^[14],绘制稳定产气峰值与压裂施工曲线形态(图4)。

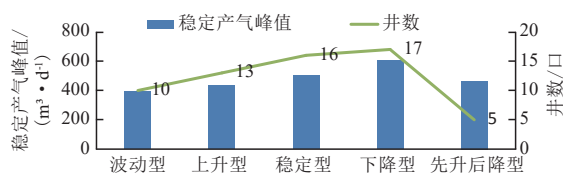


图4 稳定产气峰值与压裂施工曲线类型

Fig. 4 Peak value of stable gas production and fracturing construction curve

1.2 地质因素

煤层气含气饱和度直接影响其压裂效果。若煤层气具有较高的含气饱和度,作业后只需保证高顺畅的渗流通道,选择合理的排采制度即可保证良好的产气量;若含气饱和度较低,即使支撑裂缝具有再高的渗透率,也不会具有良好压后效果。同时煤层含气量直接影响到最终产气量以及产气时间,其值

越大,理论上平均日产气量也越高^[17],二者间具有较强的正相关关系。此外,储层压力是储层能力大小的反映,决定了储层流体的流动潜能,该参数值与煤层储层含气量、临储比等关系紧密。临储比是临界解吸压力与储层压力之比,与含气饱和度正相关,临储比越大,含气饱和度越高,临界解吸压力与储层压力越接近,煤层气排水降压期越短,煤层气越容易解吸,产气动力越大^[18]。煤储层渗透性是影响煤层气由储层渗流至井筒的主要因素,渗透率越大即裂隙中流体渗流阻力越小,相同压差下传导流体能力更强。TYLER^[19]根据国外资料认为煤层气高产井区一般位于渗透率 $(0.5\sim 100)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的地区,渗透率过低或者过高都不利于煤层气井生产。

2 基于 Apriori 算法的压裂效果主控因素分析

据相关经验和理论,总结压后产能会造成影响因素,但在不同类型区块或者气田,这些因素中起主要作用的可能各不相同,且前人多是从不同角度定性分析各因素与煤层气产能间的关系,故在上述因素的基础上,引入 Apriori 关联规则,定量分析各因素与煤层气产能的相关程度,确定影响压裂效果的主控因素。

2.1 Apriori 算法的基本思想

Apriori 算法作为关联规则分析中的一种较常用的算法^[20-21],主要根据发现频繁项集和发现关联规则,来分析数据属性之间的潜在联系。Apriori 关联规则分析有 4 项基础定义:频繁项集、关联规则、支持度以及置信度。频繁项集指的是经常出现在一起的数据集合,所述的频繁是一般根据支持度确定,而支持度则指的是该项集在所有数据中出现的概率,如式(1),X 和 Y 代表要分析的 2 个个体,支持度定义为:

$$\text{Support}(X, Y) = P(XY) = \frac{\text{number}(XY)}{\text{num}(\text{AllSamples})} \quad (1)$$

关联规则指的是 2 个个体之间的关联性,一般用置信度进行衡量,置信度如式(2)。

$$\text{Confidence}(X \rightarrow Y) = P(Y|X) = \frac{P(XY)}{P(X)} \quad (2)$$

对于给定的规则 $X \rightarrow Y$,如果置信度的值较大的话,Y 在包含 X 的事务中出现的可能性就越大。置信度也可以估计 Y 在给定 X 下的条件概率,这里条件概率的条件也就是我们关联规则中的条件。

Apriori算法的具体步骤为:

1) 通过迭代更新的方法,先找到所有的1—项集,根据相应的支持度,进行判断将低于最小支持度的剔除,留下的即为频繁的1—项集;

2) 对全部频繁1—项集进行拼接,即为2—项集,在根据最小支持度进行筛选,低的也剔除掉,剩下的就是真正的频繁2—项集。一直不断地进行迭代,就可以得到频繁(k+1)—项集,再根据最小支持度进行剔除,得到最终的频繁k—项集的输出结果。

2.2 压裂数据预处理

利用 Apriori 算法对压裂施工数据进行分析前,首先需对数据进行预处理,转换成相应的逻辑特征集合数据。数据来源于国内 M 煤层气田 181 口压裂井的历史数据,获得了其影响因素数据以及现场施工人员对压裂效果评价的类标签。笔者首先对缺失或者异常数据进行了剔除,剩余 163 口井的完整数据。同时在 14 项影响因素中,有 13 项为数值型数据变量,1 项为标称型数据变量,即压裂施工曲线形态的描述。

对于数值型数据,根据现场人员经验设置阈值,将其进行离散化,分为优、良、中、差 4 个等级后进行编号;对于标称型数据,则直接将其标称型描述进行编号。如,压裂施工曲线形态数据,有 5 项不同的值,分别为:上升型、下降型、先升后降型、波动型和稳定型^[4],可以直接对齐编号。总的编号规则见表 2。

最终将压裂施工数据转化为逻辑数据表 3。

2.3 基于 Apriori 算法的关联规则挖掘

实际压裂施工中,需要针对的是压裂效果差的气井分析影响因素,为进行二次压裂施工设计提供借鉴。所以在上述 163 组数据中,选取压裂效果类标签逻辑值为‘101’(即压裂施工效果的好坏程度为“差”)的数据进行关联规则分析。“frozenset()”是“python”的一个常用命令,用于生成不可变的集合(冻结的集合),存在哈希值,好处是它可以作为字典的“key”,也可以作为其它集合的元素,FP 树方法要生成因素之间的关联,需要发现其中的频繁项集。

表 2 原始数据转换规则
Table 2 Raw data conversion rules

因素	符号	转换后的逻辑值
压裂液施工总量	x1	(1,2,3,4)
前置液量	x2	(5,6,7,8)
携砂液量	x3	(9,10,11,12)
支撑剂施工总量	x4	(13,14,15,16)
破裂压力	x5	(17,18,19,20)
最大施工排量	x6	(21,22,23,24)
平均砂比	x7	(25,26,27,28)
含气饱和度	x8	(29,30,31,32)
含气量	x9	(33,34,35,36)
储层压力	x10	(37,38,39,40)
临储比	x11	(41,42,43,44)
渗透率	x12	(45,46,47,48)
射孔段厚度	x13	(49,50,51,52)
压裂施工曲线形态	x14	(53,54,55,56,57)
压裂效果类标签	y	(101,102,103,104)

在这里“frozenset”就是相应元素所生成的集合,通过统计频数可知道这些因素所生成的频繁项集之间的关联情况。此处只是挖掘单因素之间的组合关系,实际上此时的“frozenset”还可以生成多因素的频繁项集,进而挖掘多因素之间的相互关系。利用“python”编程实现得到关联规则见表 4。

根据表 4 中的每个因素的逻辑数据值与压裂效果类标签逻辑值‘101’的关联规则可知,从压裂液因素、施工因素和地质因素 3 个方面,该地区气井压裂效果较差的原因有以下几点:

表 4 关联规则结果
Table 4 Association rule result

影响因素	关联规则	置信度
压裂液施工总量	frozenset({'101'}) --> frozenset({'4'})	0.5
前置液量	frozenset({'101'}) --> frozenset({'8'})	0.428 57
携砂液量	frozenset({'101'}) --> frozenset({'12'})	0.357
支撑剂施工总量	frozenset({'101'}) --> frozenset({'16'})	0.714
破裂压力	frozenset({'101'}) --> frozenset({'19'})	0.428 57
最大施工排量	frozenset({'101'}) --> frozenset({'24'})	0.428 57
平均砂比	frozenset({'101'}) --> frozenset({'28'})	0.428 57
含气饱和度	frozenset({'101'}) --> frozenset({'31'})	0.428 57
含气量	frozenset({'101'}) --> frozenset({'35'})	0.5
储层压力	frozenset({'101'}) --> frozenset({'39'})	0.428 57
临储比	frozenset({'101'}) --> frozenset({'42'})	0.428 57
渗透率	frozenset({'101'}) --> frozenset({'48'})	0.357
射孔段厚度	frozenset({'101'}) --> frozenset({'50'})	0.428 75
压裂施工曲线形态	frozenset({'101'}) --> frozenset({'56'})	0.285 7

表 3 压裂施工转换后逻辑数据
Table 3 Logical data after fracturing construction conversion

“num”	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	y
1	4	8	12	13	19	24	25	30	33	39	42	46	52	55	103
2	1	5	9	13	18	23	28	30	35	39	43	45	49	57	102
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
163	3	7	11	14	19	21	28	32	35	40	44	46	50	57	102

1) 压裂液施工总量、支撑剂施工总量、前置液量以及携砂液量相对偏高,从压裂液施工量来看,可能由于多形成短宽缝,在缝长方向未能沟通足够有效的渗流面积,且携砂液量过高,导致支撑剂在缝内铺置不均,故填砂裂缝导流能力受到一定程度的影响。

2) 破裂压力、最大施工排量、平均砂比过大,导致裂缝在缝高方向不断延伸甚至穿层,难以形成高导流能力的填砂长裂缝,同时高砂比容易造成砂堵,甚至暂停施工。

3) 含气饱和度、含气量、储层压力以及临储比偏低,这些因素都是直接影响产气量大小和产气时间早晚,说明煤层本身产气潜力较低、产气动力不足,因此造成最终压裂效果较差。

若要进一步提高该地区煤层气井压裂改造有效率,可从优化这些因素着手。

3 基于灰色关联分析的压裂效果主控因素排序

通过上述研究,得出了对煤层气压裂效果可能产生影响的因素关联规则,结合灰色关联度分析对这些因素进行程度排序。灰色关联分析^[22]不需要大量样本数据,且突破了一般系统分析中使用两个因素进行对比的局限性,将更多的因素尽可能归入系统中用于分析和比较,能确定离散函数对其他任一函数的相对程度。基于灰色关联分析的压裂效果主控因素排序方法主要包括以下几步。

1) 确定分析序列

对所选的163组井的数据,将压裂效果类标签构成的序列作为参考数列为 $X_0 = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(163)\}$; 将选取的影响压裂效果的14个主要因素构成的序列定义为比较数列 $X_i = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(163)\} (i = 1, 2, \dots, 14)$ 。

2) 原始数据预处理

为使影响结果不受到特征数据之间的维数影响,对数据进行归一化处理,如式3。

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (3)$$

式中: X_{ij} 为指标 X_i 对应的第 j 个数据; $X_{j\max}$ 为指标 X_i 对应所有数据中的最大值; $X_{j\min}$ 为指标 X_i 对应所有数据中的最小值; X'_{ij} 为归一化处理后,指标 X_i 对应的第 j 个数据。

3) 求差

对每一个点的参考序列,计算其与比较序列的

差的绝对值 $\Delta_{oi}(k)$:

$$\Delta_{oi}(k) = |X_0(k) - X_i(k)| \quad (4)$$

4) 求最值

根据上一步计算得到所有差值绝对值,求出最大值 Δ_{\max} , 和最小值 Δ_{\min} 。

5) 求关联系数

计算参考序列 X_0 与各个比较序列 X_i 之间的关联系数,即:

$$\xi_{oi}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \rho\Delta_{\max}} \quad (5)$$

其中, ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 一般来说, ρ 较小可以提高相关度的分辨率。然而这种方法的关键在于对关联度进行排序,其顺序反映因素影响程度,这与它们差异的大小无关。通常取0.5。

6) 计算每个参考序列的关联系数平均值

$$\gamma_{oi} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{oi}(k) \quad (6)$$

$k = 1, 2, 3, \dots, 163$

7) 关联排序

对关联度大小进行排序,如果 $\gamma_{oa} > \gamma_{ob}$ 则表示 X_a 与 X_0 的关联程度大于 X_b 与 X_0 的关联程度;如果 $\gamma_{oa} < \gamma_{ob}$, 则表示 X_a 与 X_0 的关联程度小于 X_b 与 X_0 的关联程度;如果 $\gamma_{oa} = \gamma_{ob}$ 则表示 X_a 与 X_0 的关联程度和 X_b 与 X_0 的关联程度相当。

绘制各个影响因素之间的关联系数热力图(图5)。

通过比较14个因素对气井压裂效果产生影响的关联系数,发现上述因素重要性依次为:最大施工排量(0.7)、平均砂比(0.64)、含气饱和度(0.63)、含气量(0.63)、支撑剂施工总量(0.62)、压裂液施工总量

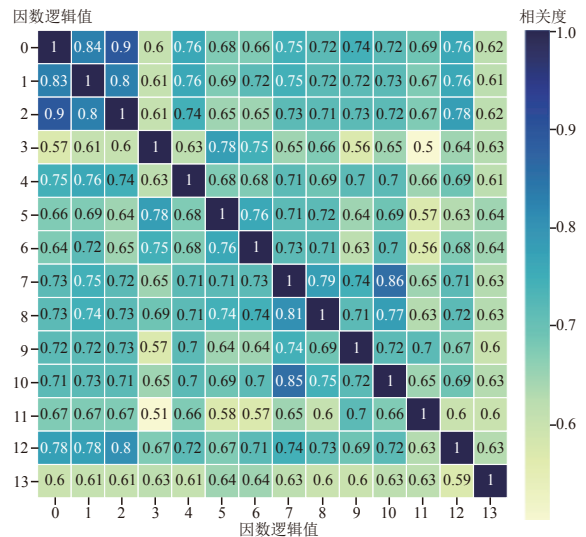


图5 关联系数热力图

Fig. 5 Thermodynamic diagram of correlation coefficient

(0.62)、携砂液量(0.62)、前置液量(0.61)、临储比(0.61)、破裂压力(0.61)、储层压力(0.6)、射孔段厚度(0.6)、渗透率(0.59)、压裂施工曲线形态(0.5)。

综上所述,对影响该地区气井压后产量的主要因素进行筛选,得到影响压裂效果的前8个主控因素排序:最大施工排量>平均砂比>含气饱和度>含气量>支撑剂施工总量>压裂液施工总量>携砂液量>前置液量。

为了验证评价结果的正确性,且因排序靠后的因素可能存在一定误差,故选择了部分数据样本对前4个因素:最大施工排量、平均砂比、含气饱和度和含气量进行评价验证,各井所占比例见表5。以部分数据样本中某口井为例进行说明,该井压后排采在143 d内便累计产气 10^4 m^3 ,呈现出良好的压后效果,该井最大施工排量很低为 $6.6 \text{ m}^3/\text{min}$,平均砂比也很低仅 7.7 m^3 ,而含气饱和度和含气量均偏高。结果表明,4类参数确实对最终压裂效果具有一定影响,且并非呈现出简单线性关系。

表5 压裂效果评价
Table 5 Evaluation of fracturing effect

压裂效果	井数占比/%				
	评价	最大施工排量低	平均砂比低	含气饱和度低	含气量低
好		20	15	10	20
坏		40	20	10	10

4 结论

1) 基于国内区块181口井压裂数据和压后评估资料,利用Apriori关联规则分析进行了主控因素追踪,结合灰色关联度分析,克服了相关性分析等统计方法只能发现线性关系的缺点,定量分析各因素与煤层气产能的相关程度。找到了该区块压裂效果较差的压裂井的前8个主控因素依次为:最大施工排量>平均砂比>含气饱和度>含气量>支撑剂施工总量>压裂液施工总量>携砂液量>前置液量。

2) 分析的数据有限且来源于同一气田,为了系统深入地对影响压裂效果的各类因素进行研究分析,有必要将所涉及的研究思路与算法应用到其他大规模气田进行评价分析,并对其进行进一步改进。

参考文献

- [1] 尹锦涛,孙建博,刘刚,等.煤层气储层渗透率动态变化规律研究综述[J].非常规油气,2017,4(2):114.
YIN J T, SUN J B, LIU G, et al. Literature review of permeability dynamic change law in CBM reservoir[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(2): 114.
- [2] 崔春兰,董振国,吴德山.湖南保靖区块龙马溪组岩石力学特

征及可压性评价[J].天然气地球科学,2019,30(5):626-634.
CUI C L, DONG Z G, WU D S. Rock mechanics study and fracability evaluation for Longmaxi Formation of Baojing block in Hunan Province[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(5): 626-634.

- [3] 冯帆,何亮.基于层次分析法(AHP)的煤层气区块产能潜力分区——以山西柿庄镇北区块3#煤为例[J].中国煤炭地质,2018,30(6):51-54.
FENG F, HE L. CBM block capacity potential partitioning based on AHP—a case study of coal No.3 in Shizhuang north Block, Shanxi[J]. China Coal Geology, 2018, 30(6): 43-45.
- [4] 杨显成,蒋有录,杨昕睿,等.煤层气含量的主控因素——以卡拉哈里盆地XX区块为例[J].油气地质与采收率,2018,25(1):56-60.
YANG X C, JIANG Y L, YANG X R, et al. Study on main controlling factors of the coalbed methane content: A case study of Block XX in Kgalahari Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1): 56-60.
- [5] 王维旭,贺满江,王希友,等.筠连区块煤层气产能主控因素分析及综合评价[J].煤炭科学技术,2017,45(9):194-200.
WANG W X, HE M J, WANG X Y, et al. Analysis on main controlling factors and comprehensive evaluation of coalbed methane production capacity of Junlian Block[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 194-200.
- [6] LU S S, CHEN H, PENG Z G, et al. Coalbed methane productivity differences and gas recovery in Qinshui Basin[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2013, 32(6): 721-724.
- [7] 刘佳.煤层气产能影响因素分析及常用的预测技术[J].国外测井技术,2015,30(2):15-18.
LIU J. Analysis of the influencing factors and the common forecasting techniques of coal-bed gas capacity[J]. World Well Logging Technology, 2015, 20(2): 15-18.
- [8] 罗金辉,杨永国,秦勇,等.基于组合权重的煤层气有利区块模糊优选[J].煤炭学报,2012,37(2):242-246.
LUO J H, YANG Y G, XU W W. Fuzzy optimization for CBM favorable targets based on combined weights[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 242-246.
- [9] 李陈,赵刚,陈丽群.考虑基质收缩效应的煤层气藏产能评价[J].特种油气藏,2019,26(1):106-110.
LI C, ZHAO G, CHEN L Q. Productivity evaluation of coalbed methane reservoir with matrix shrinkage effect[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(1): 106-110.
- [10] PING S, PAN H D, SHEN Y C, et al. Main deposit styles and associated tectonics of the West Junggar region, NW China[J]. Geoscience Frontiers, 2015, 6(2): 175-190.
- [11] MENG Y J, TANG D Z, XU H, et al. Geological controls and coalbed methane production potential evaluation: A case study in Liulin area, eastern Ordos Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 95-111.
- [12] 杨建强.芦岭井田煤层气直井产能主控因素研究[D].西安:西安科技大学,2016.
YANG J Q. Study on the main control factors of coal bed methane vertical well productivity in Luling Mine Field[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.
- [13] 冯立杰,贾依帛,岳俊举,等.煤层气开采关键地质影响因素[J].石油与天然气地质,2017,38(6):1105-1112.
FENG L J, JIA Y B, YUE J J, et al. Key geological factors influencing coal-bed methane exploitation[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1105-1112.
- [14] 穆福元,王红岩,吴京桐,等.中国煤层气开发实践与建议[J].天然气工业,2018,38(9):55-60.
MU F Y, WANG H Y, WU J T, et al. Practice of and suggestions on CBM development in China[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 55-60.

- [15] CHEN Z H, WANG Y B, YANG J S, et al. Influencing factors on coal-bed methane production of single well: A case of Fanzhuang Block in the south part of Qinshui Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(23): 34-38.
- [16] 王勃,姚红星,王红娜,等.沁水盆地成庄区块煤层气成藏优势及富集高产主控地质因素[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2):366-372.
WANG B, YAO H X, WANG H N, et al. Favorable and major geological controlling factors for coalbed methane accumulation and high production in the Chengzhuang Block, Qinshui Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 366-372.
- [17] WU C F, QIN Y, FU X H, et al. Evolution history simulation of stratum energy of coalbed gas reservoirs Qinshui Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(4): 557-571.
- [18] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbed: a new model[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1998, 11(6): 539-544.
- [19] GENTRY R W. Decline curve analysis[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1972, 24(1): 38-41.
- [20] 刘鹏,张燕,张重生,等.大数据[M].北京:电子工业出版社, 2017:112-113.
LIU P, ZHANG Y, ZHANG C S, et al. *Big data*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2017: 112-113.
- [21] 聂玲,周德胜,郭向东,等.利用灰色关联法分析低渗气藏压裂影响因素[J]. *断块油气田*, 2013, 20(1):133-136.
NIE L, ZHOU D S, GUO X D, et al. Analysis on influencing factors of postfracture response in low permeability gas reservoir with gray correlation method[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(1): 133-136.
- [22] 李玉伟,艾池,胡超洋,等.应用模糊综合评判和灰色关联度分析评价水平井多级压裂效果[J]. *数学的实践与认识*, 2014, 44(2):51-56.
LI Y W, AI C, HU C Y, et al. Evaluating multistage fracturing effect of horizontal wells using fuzzy comprehensive evaluation and grey relational grade analysis[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2014, 44(2): 51-56.

(编辑 尹淑容)

(上接第62页)

- Technology, 2016, 44(5): 1-4.
- [5] 李存磊,杨兆彪,孙晗森,等.多煤层区煤体结构测井解释模型构建[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 721-730.
LI C L, YANG Z B, SUN H S, et al. Construction of a logging interpretation model for coal structure from multi-coal seams area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 721-730.
- [6] 贾慧敏,胡秋嘉,祁空军.高煤阶煤层气不正常井类型及治理技术[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(2):80-83.
JIA H M, HU Q J, QI K J. Abnormal well types and management techniques of high rank coalbed methane[J]. *Safety of Coal Mines*, 2020, 51(2): 80-83.
- [7] 赵贤正,朱庆忠,孙粉锦,等.沁水盆地高阶煤层气勘探开发实践与思考[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(9):2131-2136.
ZHAO X Z, ZHU Q Z, SUN F J, et al. Practice and thought of coalbed methane exploration and development in Qinshui Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(9): 2131-2136.
- [8] 李勇,王延斌,倪小明,等.煤层气低效井成因认识及治理体系构建研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(2): 185-193.
LI Y, WANG Y B, NI X M, et al. Study on identification and control system construction of low efficiency coalbed methane wells[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(2): 185-193.
- [9] 许晓晨,陶占盛,张智勇,等.中国煤层气开发技术发展方向浅谈[J]. *能源与节能*, 2019, 24(11):145-146.
XU X C, TAO Z S, ZHANG Z Y, et al. Discussion on development direction of coalbed methane development technology in China[J]. *Energy and Conservation*, 2019, 24(11): 145-146.
- [10] 毕延森,鲜保安,张晓斌.煤层气水平井玻璃钢筛管完井工艺技术[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(5):107-111.
BI Y S, XIAN B A, ZHANG X B. Fiber reinforced plastic screen pipe completion technology of coalbed methane horizontal well[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(5): 107-111.
- [11] 郑力会,李秀云,苏关东,等.煤层气工作流体储层伤害评价方法的适宜性研究[J]. *天然气工业*, 2018, 38(9):28-38.
ZHEN L H, LI X Y, SU G D, et al. Applicability of working fluid damage assessment methods for coalbed methane reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(9): 28-38.
- [12] 孙晗森,王成文.固井水泥浆对裂缝割理发育型煤层气储层的伤害机理[J]. *天然气工业*, 2018, 38(9):82-86.
SUN H S, WANG C W. Damage mechanism of cement slurry to CBM reservoirs with developed fractures and cleats: A case study from eastern Yunnan and western Guizhou in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(9): 82-86.
- [13] 黄质强,蒋光忠,郑双进,等.煤层气储层保护钻井关键技术研究[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(6):116-118.
HUANG Z Q, JIANG G Z, ZHENG S J, et al. The key drilling technique of formation protection for coal-bed methane[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(6): 116-118.
- [14] 张义,鲜保安,孙粉锦,等.煤层气低产井低产原因及增产改造技术[J]. *天然气工业*, 2010, 30(6):55-59.
ZHANG Y, XIAN B A, SUN F J, et al. Reason analysis and stimulation measures of low coalbed methane gas production wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(6): 55-59.
- [15] 崔迎春.煤层气储层钻井过程中的地层损害及保护[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 1998, 42(4):50-52.
CUI Y C. The damage mechanism of coalbed gas reservoir in drilling operation and protection[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 1998, 42(4): 50-52.
- [16] 申瑞臣,时文,徐义,等.煤层气U型井PE筛管完井泵送方案[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(5):96-99.
SHEN R C, SHI W, XU Y, et al. PE screen completion for U-shaped coal-bed methane wells with pumping method[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*: 2012, 36(5): 96-99.
- [17] 付利,申瑞臣,苏海洋,等.煤层气水平井完井用塑料筛管优化设计[J]. *石油机械*, 2012, 40(8):47-51.
FU L, SHEN R C, SU H Y, et al. Optimized design of plastic screen pipe for coal bed methane horizontal well completion[J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 40(8): 47-51.
- [18] 黄中伟,李根生,闫相祯,等.煤层气井钢质筛管与非金属筛管强度对比实验[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(4):489-493.
HUANG Z W, LI G S, YAN X Z, et al. Comparison experiments on steel and non-steel slotted screen pipes used in coalbed methane wells[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 489-493.
- [19] 杨刚,鲜保安,毕延森,等.煤层气超短完井水平井筛管完井技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(3):175-181.
YANG G, XIAN B A, BI Y S, et al. Study on technology of screen completion of CBM ultra-short radius horizontal well[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(3): 175-181.

(编辑 徐佩)