

引用格式: 孔祥伟, 谢昕, 王存武, 等. 基于灰色关联方法的深层煤层气井压后产能影响地质工程因素评价[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(4): 433-440.

KONG Xiangwei, XIE Xin, WANG Cunwu, et al. Evaluation of geological engineering factors for productivity of CBM well after fracturing based on grey correlation method[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 433-440.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.04.004

基于灰色关联方法的深层煤层气井压后产能影响地质工程因素评价

孔祥伟^{1,2}, 谢昕³, 王存武³, 时贤⁴

(1. 长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430100; 2. 油气钻采工程湖北省重点实验室(长江大学), 湖北 武汉 430100;
3. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 4. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 煤储层具有低孔、低渗和低压特征, 实现煤层气工业开采主要依靠水力压裂等技术。沁水盆地柿庄区块目前日产量小于 500 m³ 的气井占到 50% 以上, 气井改造后增产效果不理想, 气井产能主控影响因素不清楚, 直接影响气井整体产能的提升。基于煤层气井压裂及产能数据, 利用灰色关联方法刻画了煤层气地质工程因素对压裂产能的影响程度, 分析了气井压裂后产能主控影响因素。根据皮尔逊相关性分析方法, 建立产能主控因素与气井产量的关联数学模型来预测气井产能, 结合气井生产数据验证了预测模型可靠性。采用卡方自动交互检测决策树方法, 建立了已压裂井地质和工程因素对气井产能影响关系分类决策树, 高含气量条件下工程因素对气井产能提升影响较小, 随着含气量降低, 不同工程因素对气井产能的影响程度逐渐增大, 有助于优化排量、砂量及总液量等主要设计参数, 丰富了煤层气压裂后产能评价方法。

关键词: 煤层气; 灰色关联方法; 压裂效果; K-均值聚类算法; 多参数模型

中图分类号: TE328

文献标志码: A

Evaluation of geological engineering factors for productivity of deep CBM well after fracturing based on grey correlation method

KONG Xiangwei^{1,2}, XIE Xin³, WANG Cunwu⁴, SHI Xian⁴

(1. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil and Gas, Hubei Province (Yangtze University), Wuhan, Hubei 430100, China; 3. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 4. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Coal-bed methane reservoirs are characterized by low porosity, low permeability and low pressure, making their industrial exploitation primarily reliant on techniques like hydraulic fracturing. Currently, more than 50 percent of the gas wells in the Shizhuang block in the Qinshui Basin currently produce less than 500 m³/d of coal bed methane. However, the increase in production after gas well retrofitting has not been ideal and the main factors affecting gas well productivity remain unclear, directly impacting the overall improvement. To address this, the degree of influence of geological and engineering factors on fracturing productivity in coal-bed gas wells is described using the gray correlation method, and the main factors controlling gas well productivity after fracturing are analyzed. A correlation mathematical model between the main control factors and gas well production is established using the Pearson correlation analysis method to predict gas well productivity. The reliability of the prediction model is verified through gas well data validation. Furthermore, a classification decision tree is established using the

收稿日期: 2023-04-10。

第一作者简介: 孔祥伟(1982—), 男, 博士后, 副教授, 现从事油气井力学与工作液、储层改造等相关井筒力学研究。地址: 湖北省武汉市蔡甸区大学路特1号, 邮政编码: 430100。E-mail: 501074@yangtzeu.edu.cn

基金项目: 中海油“十四五”规划重大项目“差异化大型压裂物模实验及可压性研究”(CCL2022RCPS0471RSN), “柿庄区块煤层气水平井高效压裂优化研究及应用”(CCL2022RCPS0038ESN)。

chi-square automatic interactive detection decision tree method, in conjunction with gas well productivity data, to understand the impact of geological and engineering factors on gas well productivity in fractured wells. Under high gas content conditions, engineering factors have a relatively small impact on the productivity improvement of gas wells. However, as the gas content decreases, the impact of different engineering factors on the gas well productivity gradually increases, which helps optimize the main design parameters such as displacement, sand volume, and total liquid volume, enriching the evaluation methods for post fracturing productivity of coal seam pressure.

Keywords: coal-bed methane; grey correlation method; fracturing effect; K-means clustering algorithm; optimization of fracturing parameters

中国煤层气资源丰富,埋深2 000 m及以深煤层气资源量为 $40.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中可采资源量达 $10.01 \times 10^{12} \text{ m}^3$,开发利用前景广阔^[1-4]。煤层气储层具有低孔、低渗和低压特征,需利用增产改造技术来获得工业产量^[5-9]。水力压裂是实现煤层气工业开采必不可少的主要技术手段^[10-15]。随着开发生产的持续推进,沁水盆地柿庄区块目前日产量小于 500 m^3 的煤层气井占50%以上,气井压裂改造后增产效果不理想,其产能与压裂施工参数关系不清楚影响气井产能的提升^[16-19]。

由于煤层气初次压裂设计因地质因素不明确而优化改进有限,压后改造效果评估方法有待进一步提升,同时有助于提升二次选井重复压裂的改造效果。煤层气井压裂后效果评估技术常采用模糊评价、模糊聚类、灰色关联、层次分析的方法^[20-24]。倪小明等^[25]整合“系统工程事故树分析法+多层模糊数学综合评价法”来优化煤层气二次压裂选井标准,显著提高了煤层气直井压裂改造效率。杨兆中等^[26-27]采用灰色关联法计算了煤层气井产量影响因素的权重,利用逼近理想解排序法指导煤层气井重复压裂。马新仿等^[28]利用考虑储层物性及可压性的地质与工程因素的压裂选井的层次聚类模型来指导煤层气压裂选井选层,采用聚类集成算法来确定气井重复压裂的潜能大小,为压裂选井选层提供了一种可借鉴的方法。

借鉴上述研究方法,提出了一种基于地质工程一体化的煤层气压裂效果评价方法,利用灰色关联方法来刻画煤层气压裂及地质岩石力学等地质工程各因素之间的影响程度,客观分析气井产能的影响因素。根据皮尔逊相关性分析压裂参数与气井产能的相关性,建立压裂参数与气井产能的多元关联模型,并利用K-均值聚类算法度量每个关联模型的分区及其每个参数的显著性特征,评价煤层气井产能压裂效果,优化煤层气井压裂设计参数。

1 柿庄区块煤层地质特征

沁水盆地柿庄区块山西组3号和15号煤层为主力层系,其中3号煤层是目前开发的主要煤层,埋深650.0~1 506.0 m,平均1 089 m,煤层厚1.25~12.43 m,平均6.39 m,煤层含气量一般 $4.0 \sim 23.4 \text{ m}^3/\text{t}$,平均 $13.96 \text{ m}^3/\text{t}$ 。煤体结构主要以原生-碎粒煤为主,仅在断裂发育区碎粒煤发育。渗透率较低: $(0.01 \sim 1.50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $0.27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度介于3.0%~9.9%,平均值为5.43%^[29-30]。3号、15号煤层显微裂隙密度平均分别为6.2、7.1条/cm;15号煤层宏观割理裂隙、显微裂隙整体较3号煤层发育^[31]。3号煤层顶底板多以粉砂质泥岩为主,顶底板封盖性较好;15号煤层顶板以灰岩覆盖,底板以粉砂质泥岩为主,封盖性较好,但顶板灰岩局部含水(表1)。

表1 柿庄区块煤储层参数
Table 1 Coal reservoir parameters of Shizhuang block

煤层	埋深/ m	储厚/ m	含气量/ (m^3/t)	煤岩密度/ (t/m^3)	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度/ %	储层压力/ MPa	顶板岩性	底板岩性	显微裂隙密度/ (条/cm)
3号	651	6.21	13.69	1.58	0.21~0.60	4.53	3.21	粉砂质泥岩	粉砂质泥岩	6.2
15号	742	4.93	13.38	1.60	0.14~0.46	5.17	4.26	灰岩	粉砂质泥岩	7.1

2 气井产能影响因素评价方法

2.1 灰色关联分析方法

2.1.1 原理

基于对煤层气气井产能影响因素的前期认识,利用灰色关联分析方法定量分析各因素,结合研究区块产能数据,确定了地质工程参数对煤层气气井产能影响的权重及关联度,形成了气井产能影响因素评价方法。

灰色系统理论通过明确系统中各因素间主要关系,找出最大影响因素,从而分析关联度^[32-35]。若两因素在系统发展过程中相对变化一致,则两者关联度大;反之则两者关联度小。关联分析首先确定参考序列,然后比较其他数列同参考数列的接近程度,比较判断其他数列。通过灰色关联系数、灰色关联度等参数来刻画压裂参数及地质岩石力学各因素之间的影响程度,客观反映气井产能的影响因素^[36-37]。

2.1.2 计算步骤

分析煤层气井压后产能效果评价因素(储层厚度、含气量、渗透率、可压指数、最大施工排量、最后瞬时停泵压力、支撑剂总量、压裂液总量、平均砂比、前置液液量、携砂液量、施工泵压等,用 X_i 表示),采用灰色关联模型确定产能影响因素的关联度(图1)。

按灰色关联分析法,以影响产能因素为指标,其测试值序列为:

$$\{X_i(j)\} = \{X_0(1), X_1(2), \dots, X_m(n)\} \quad (1)$$

式中: $X_i(j)$ 为 $m \times n$ 维矩阵; i 为煤层气井井数, $i=1, 2, 3, \dots, m$; j 为每口气井的评价指标数, $j=1, 2, 3, \dots, n$ 。

为使得参考因素和对比因素具有可比性,对其

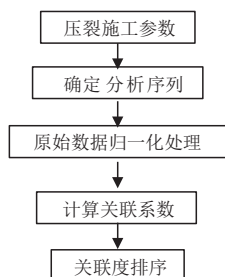


图1 灰色关联分析方法计算流程

Fig. 1 Calculation process of grey correlation analysis method

无因次化处理^[34]:

$$Y_i(j) = \frac{x_i(j)}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_i(j)} \quad (2)$$

计算 $Y_i(j)$ 对 $Y_0(j)$ 在第 j 个点的关联度:

$$\xi_i(j) = \frac{\min_i \min_j |Y_0(j) - Y_i(j)| + 0.5 \max_i \max_j |Y_0(j) - Y_i(j)|}{|Y_0(j) - Y_i(j)| + 0.5 \max_i \max_j |Y_0(j) - Y_i(j)|} \quad (3)$$

式中: $\xi_i(j)$ 为关联度。

对储层厚度、含气量、渗透率、可压指数、最大施工排量、最后瞬时停泵压力、支撑剂总量、压裂液总量、平均砂比、前置液液量、携砂液液量、施工泵压等参数归一化处理:

$$r_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \xi_{0i}(j) \Rightarrow a_i = \frac{r_{0i}}{\sum_{i=1}^m r_{0i}} \quad (4)$$

式中: r_{0i} 为各因素之间的关联度, $i=1, 2, 3, \dots, m$; a_i 为建立的各个评价指标的权重。

按 a_i 大小对各因素的关联度排序,明确煤层气产能主控因素影响的权重。

2.2 地质参数影响分析

根据柿庄区块39组单井产量与压裂施工参数的数据样本,分析了煤层气单井产量与地质参数的相关性,确定了地质参数与气井产能的相关度(表2)。根据计算结果,柿庄区块3号煤层气井产能的地质主控因素排序为:含气量>储层厚度>渗透率>可压指数。根据气井产量与储层厚度、含气量、渗透率及可压性之间的关系,即通过目标区块气井地质参数与气井压裂后产量之间的关系。储层厚度与含气量是影响单井产能的主控因素,储层厚度与含气量越大,煤层气资源量越高,气源供给越充分,单井产能越大,并且稳产持续时间越长。煤层渗透率反映煤层中的解析气和游离气流入井筒中的难易程度,是储层评价、实现稳产高产的关键因素。

表2 地质参数对产能的相关度

Table 2 Correlation of geological parameters with production capacity

影响次序	压裂参数	相关度
1	含气量	0.102 4
2	储层厚度	0.101 5
3	渗透率	0.100 2
4	可压指数	0.088 9

2.3 工程参数影响分析

根据柿庄区块39组单井产量与压裂施工参数的数据样本,分析了煤层气单井产量与压裂参数的相关性,确定了工程参数与气井产能的相关度(表3)。根据计算结果,柿庄区块3号煤层气井产能的工程主控因素排序为:最大施工排量>支撑剂总量>平均砂比>施工总液量>最后瞬时停泵压力>携砂液量>施工泵压>前置液量。

3 气井压后产能预测

3.1 气井压裂效果评价方法

基于皮尔逊相关性分析压裂参数与气井产能的相关性,形成考虑压裂参数影响的气井产能多元关联数学模型,利用K-均值聚类算法度量每个关联模型的分区,分析每个参数的显著性特征,开展煤层气井压裂效果评价(图2)。

表3 工程参数对产能的相关度

Table 3 Correlation of engineering parameters with production capacity

影响次序	压裂参数	相关度
1	最大施工排量	0.104 7
2	支撑剂总量	0.101 1
3	平均砂比	0.081 0
4	施工总液量	0.080 4
5	最后瞬时停泵压力	0.066 7
6	携砂液量	0.061 4
7	施工泵压	0.058 2
8	前置液量	0.053 6

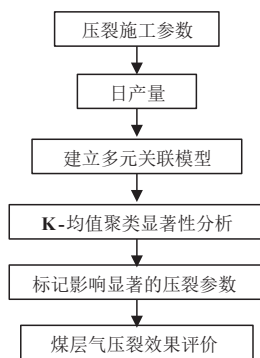


图2 基于皮尔逊相关性分析的压裂效果评价方法

Fig. 2 Fracturing effect evaluation method based on Pearson correlation analysis

样本间的皮尔逊相关系数表达式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

式中: r_{xy} 为变量 x 和 y 之间的线性相关系数,介于-1和1之间; X_i, Y_i 分别为 X, Y 变量中的第 i 个值; \bar{X}, \bar{Y} 分别为 X, Y 变量的平均值。

K-均值聚类算法基于距离相似度判定,两个样本数据之间距离越小越相似,可划分到同一簇中,最终由所有距离相近的样本数据构成不同的簇,得到紧凑而独立的类别。首先在输入数据集中随机选择 k 个初始聚类中心,然后根据距离相近原则,利用适当的距离公式计算每个数据对象与 k 个聚类中心间的距离,划分数据到距它最近的聚类中心所在的聚类域中,组成一个由聚类中心和所有分配给该中心的数据对象所组成的聚类。所有数据分配成功一次后,重复计算每个聚类中全部数据对象的平均值,得到新的聚类中心,依次迭代,直到满足某终止条件,表明此时所有数据对象的类别划分完毕,即得到了 k 个聚类^[38-39]。算法的终止条件有以下3种情况:

- 1) 没有或最小数目的数据对象被重新分配给不同的聚类;
- 2) 没有或最小数目的聚类中心再发生变化;
- 3) 误差平方和局部最小。

其中误差平方和聚类准则函数 J 的计算公式如式(6)所示,其值越小表示数据的集中性越好,聚类效果越好。

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{u \in c_j} d(X_u, m_j)^2 \quad (6)$$

代表聚类中心矢量的 m_j :

$$m_j = \frac{1}{n_j} \sum_{u \in c_j} X_u \quad (7)$$

式(6)一式(7)中: X_u 为数据 u 的全部属性值的矢量; m_1, m_2, \dots, m_k 是 k 个聚类中心所对应的矢量集合; c_j 为聚类中心 m_j 的聚类域; n_j 为聚类域 c_j 中所有数据的个数。

3.2 压后产能预测多参数模型

根据上节煤层气产能主控因素影响权重和压裂效果评价方法,综合考虑储层厚度、含气量、渗透率、可压指数(自然伽马、有效孔隙度)、支撑剂总量、压裂总液量等地质工程参数,建立了气井压后产能预

测多参数模型:

$$Q_{\text{avg}} = 0.95h + 181.39V + 21.64k - 1.13\gamma + 734.21\alpha + 229.86q + 27.36m_1 + 19.31m_2 + 3786.43 \quad (8)$$

式中: Q_{avg} 为平均产能,单位 m^3/d ; h 为储层厚度,单位 m ; V 为含气量,单位 m^3/t ; k 为渗透率,单位 $10^{-3} \mu\text{m}^2$; γ 为自然伽马; α 为施工排量,单位 m^3/min ; q 为可压指数; m_1 为支撑剂总量,单位 m^3 ; m_2 为压裂液总量,单位 m^3 。

16口直斜井产能模型计算值与实际值对比和误差结果说明(图3):多参数模型的准确精度随气井平均日产量增大而提高,平均产能小于 $600 \text{ m}^3/\text{d}$ 的气井模型预测平均误差为 33.20%;平均产能介于 $600 \sim 1\,200 \text{ m}^3/\text{d}$ 的气井模型预测平均误差为 11.42%;平均产能大于 $1\,200 \text{ m}^3/\text{d}$ 的气井模型预测平均误差为 1.81%。结合模型计算得到压裂参数显著性分析结果(表4),分析认为储层物性越差、非均质性越强,则导致多参数预测模型精度降低,因此提高日产量较低的气井的产能预测模型精度,需进一步考虑储层特征,如节理及非均质性等。

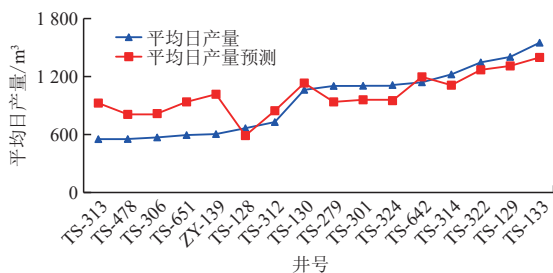
根据上述分析的16井次压裂数据,模型计算得到压裂参数显著性分析结果(表4),平均日产量显著参数为(显著性由大到小):施工排量、含气量、储层

厚度、支撑剂总量、渗透率、可压指数、施工总量。分析认为:煤层气压裂取得显著效果的关键是地质工程因素紧密结合,较好的地质参数(含气量、储层厚度和渗透率)为必需条件,施工排量等工程参数是充分条件,故在含气性好、储层厚度大的煤层气富集层段,优化压裂排量、支撑剂及压裂液总量,形成导流能力高、改造范围广的压裂裂缝网络,建立并形成煤层气“高速”渗流通道。

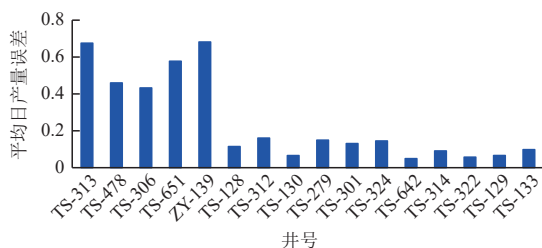
根据煤层气单井产能预测多参数模型,采用卡方自动交互检测决策树方法^[40],对煤层气气井产能进行分类决策,通过上述建立的单井产能预测多参数模型公式(8)计算,结合现场获取的气井测试数据,分析并建立了已压裂井地质和工程因素对气井产能影响关系分类决策树(图4),有助于优化压裂设计参数。煤层气井产能主控因素包括含气量、储层厚度、支撑剂总量和施工总液量等,其中,首要因素为含气量,含气量小于 $14.13 \text{ m}^3/\text{t}$,产能较低;含气量大于 $14.13 \text{ m}^3/\text{t}$,产能中等;含气量大于 $17.43 \text{ m}^3/\text{t}$,产能最高。分析结果表明,高含气量地质条件下工程因素对气井产能提升影响较小,随着含气量降低,气井产能逐渐受不同工程因素影响,且影响程度增大。

4 结论

1) 建立了煤层气井压后产能影响因素评价的灰色关联模型,通过灰色关联系数、灰色关联度等参数刻画工程及地质因素之间的影响程度,明确气井产能主控因素的影响程度:最大施工排量>含气量>储层厚度>支撑剂总量>渗透率>可压指数>平均砂比



a. 产能多参数模型预测值与实际值对比



b. 产能多参数模型预测误差

图3 16口直斜井产能多参数模型计算值与实际值对比和预测误差

Fig. 3 Comparison and prediction error between calculated and actual values of multi-parameter production model for 16 vertical inclined wells

表4 煤层气平均日产量多参数显著性分析

Table 4 Multi-parameter significance analysis of average production per day of CBM

模型参数	平均日产量	
	显著性	显著性等级
储层厚度	0.144	3
含气量	0.151	2
渗透率	0.139	5
可压指数	0.137	6
施工排量	0.154	1
支撑剂总量	0.142	4
施工总液量	0.133	7

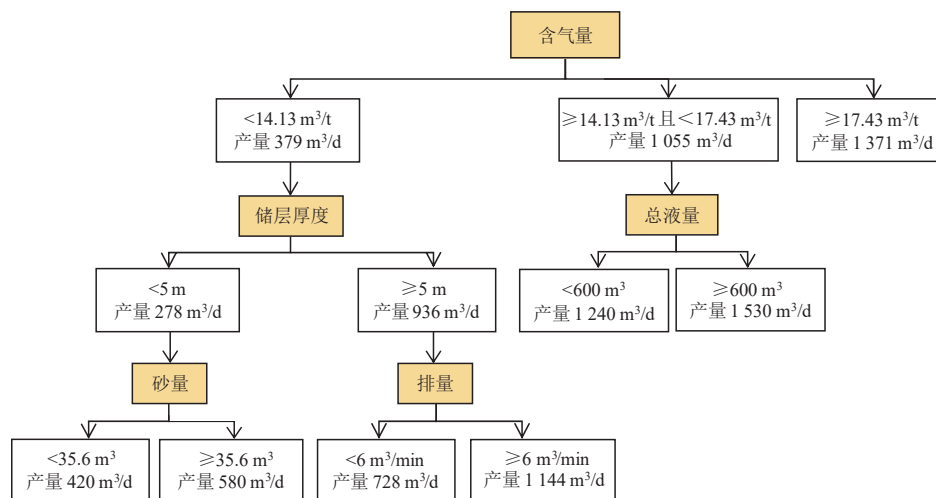


图4 已压裂井地质和工程因素对气井产能影响关系分类决策树

Fig. 4 Classification decision tree of geological and engineering impact on production of fractured wells

>施工总液量>最后瞬时停泵压力>携砂液量>施工泵压>前置液量。

2) 基于皮尔逊相关性分析方法,建立了气井产能与其主控因素的关联数学模型,利用K-均值聚类算法量化关联参数对气井产能的影响,结合气井生产数据验证了预测模型的可靠性:平均产能小于600 m³/d的气井模型预测平均误差为33.20%,平均产能介于600~1 200 m³/d的气井模型预测平均误差为11.42%,平均产能大于1 200 m³/d的气井模型预测平均误差为1.81%。

3) 根据煤层气产能预测多参数模型,采用卡方自动交互检测决策树方法,建立了已压裂井地质和工程因素对气井产能影响关系分类决策树,结合不同产能类型的气井生产数据(高产井、中产井及低产井),指出高含气量条件下工程因素对气井产能提升影响较小,随着含气量降低,不同工程因素对气井产能的影响程度逐渐增大,有助于优化排量、砂量及总液量等主要设计参数、丰富煤层气压裂后产能评价方法。

参考文献

[1] 李勇,徐立富,张守仁,等.深煤层含气系统差异及开发对策[J].煤炭学报,2023,48(2):900-917.
LI Yong, XU Lifu, ZHANG Shouren, et al. Gas bearing system difference in deep coal seams and corresponded development strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 900-917.

[2] 秦勇,申建,史锐.中国煤层气大产业建设战略价值与战略选择[J].煤炭学报,2022,47(1):371-387.
QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 371-387.

[3] 李勇,王延斌,孟尚志,等.煤系非常规天然气合采地质基础理论进展及展望[J].煤炭学报,2020,45(4):1406-1418.
LI Yong, WANG Yanbin, MENG Shangzhi, et al. Theoretical basis and prospect of coal measure unconventional natural gas co-production[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1406-1418.

[4] 邹才能,杨智,黄士鹏,等.煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景[J].石油勘探与开发,2019,46(3):433-442.
ZOU Caineng, YANG Zhi, HUANG Shipeng, et al. Resource types, formation, distribution and prospects of coal-measure gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 433-442.

[5] 杨长鑫,杨兆中,李小刚,等.中国煤层气地面井开采储层改造技术现状与展望[J].天然气工业,2022,42(6):154-162.
YANG Changxin, YANG Zhaozhong, LI Xiaogang, et al. Status and prospect of reservoir stimulation technologies for CBM surface well production in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 154-162.

[6] 叶建平,杨兆中,夏日桂,等.深煤层水力波及压裂技术及其在沁南地区的应用[J].天然气工业,2017,37(10):35-45.
YE Jianping, YANG Zhaozhong, XIA Rigui, et al. Synchronous hydraulic conformance fracturing technology used for deep coal beds and its field application in the Southern Qinshui Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(10): 35-45.

[7] 罗平亚.关于大幅度提高我国煤层气井单井产量的探讨[J].天然气工业,2013,33(6):1-6.

- LUO Pingya. A discussion on how to significantly improve the single-well productivity of CBM gas wells in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(6): 1-6.
- [8] 兰俊. 海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征[J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(5): 27-32.
- LAN Jun. Reservoir forming conditions and reservoir characteristics of coal measure shale gas in marine continental transitional facies[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2021, 35(5): 27-32.
- [9] 秦雪霏. 分布于厚煤系之间的薄砂岩储层间接预测方法[J]. *石油地质与工程*, 2022, 36(5): 28-34.
- QIN Xuefei. Indirect prediction method of thin sandstone reservoir distributed between thick coal measure strata[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2022, 36(5): 28-34.
- [10] 李勇, 胡海涛, 王延斌, 等. 煤层气井低产原因及二次改造技术应用分析[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(1): 55-70.
- LI Yong, HU Haitao, WANG Yanbin, et al. Analysis of low production coalbed methane wells and application of secondary reconstruction technologies[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(1): 55-70.
- [11] 门相勇, 韩征, 宫厚健, 等. 新形势下中国煤层气勘探开发面临的挑战与机遇[J]. *天然气工业*, 2018, 38(9): 10-16.
- MEN Xiangyong, HAN Zheng, GONG Houjian, et al. Challenges and opportunities of CBM exploration and development in China under new situations[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(9): 10-16.
- [12] 许飞. 考虑化学渗透压作用下页岩气储层压裂液的自发渗吸特征[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(3): 145-152.
- XU Fei. Spontaneous imbibition characteristics of fracturing fluid in shale gas reservoir considering chemical osmotic pressure[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021, 33(3): 145-152.
- [13] 闫霞, 温声明, 聂志宏, 等. 影响煤层气开发效果的地质因素再认识[J]. *断块油气田*, 2020, 27(3): 375-380.
- YAN Xia, WEN Shengming, NIE Zhihong, et al. Recognition of geological factors affecting coalbed methane development effect [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(3): 375-380.
- [14] 高玉巧, 郭涛, 何希鹏, 等. 贵州省织金地区煤层气多层合采层位优选[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(2): 227-232.
- GAO Yuqiao, GUO Tao, HE Xipeng, et al. Optimization of multi-layer commingled coalbed methane production in Zhijin area, Guizhou province[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(2): 227-232.
- [15] 李勇, 王延斌, 倪小明, 等. 煤层气低效井成因判识及治理体系构建研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(2): 185-193.
- LI Yong, WANG Yanbin, NI Xiaoming, 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.
- [16] 耿燕飞, 韩校锋, 周慧敏. 沁水盆地晋中地区上古生界致密砂岩气勘探潜力[J]. *石油地质与工程*, 2022, 36(4): 41-47.
- GENG Yanfei, HAN Xiaofeng, ZHOU Huimin, et al. Exploration potential of tight sandstone gas in upper Paleozoic in Jinzhong area of Qinshui basin[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2022, 36(4): 41-47.
- [17] 罗陶涛. 沁水盆地煤岩储层特征及压裂增产措施研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- LUO Taotao. Research on the characteristics of coal rock reservoirs and fracturing stimulation measures in the Qinshui Basin [D] Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [18] 朱志良, 高小明. 陇东煤田侏罗系煤层气成藏主控因素与模式[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(1): 86-94.
- ZHU Zhiliang, GAO Xiaoming. Main controlling factors and models of Jurassic coalbed methane accumulation in Longdong coalfield[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(1): 86-94.
- [19] 赵武鹏, 刘春春, 申兴伟, 等. 郑庄区块煤层气低产井增产技术研究[J]. *石油钻采工艺*, 2017, 39(4): 491-494.
- ZHAO Wupeng, LIU Chunchun, SHEN Xingwei, et al. Study on the stimulation technologies for low-yield CBM wells in Zhengzhuang Block[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(4): 491-494.
- [20] 张万春, 郭布民, 孔鹏, 等. 柿庄南煤层气重复压裂裂缝形态反演及效果分析评价[J]. *非常规油气*, 2022, 9(1): 119-128.
- ZHANG Wanchun, GUO Bumin, KONG Peng, et al. Fracture morphology inversion and effect evaluation of CBM refracturing in southern Shizhuang Block[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2022, 9(1): 119-128.
- [21] 梁智飞, 刘长松, 甄怀宾, 等. 韩城区块煤层气井二次改造工艺优化及现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(3): 92-98.
- LIANG Zhifei, LIU Changsong, ZHEN Huaibin, et al. Optimization and field application of secondary stimulation technologies for coalbed methane wells in Hancheng Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(3): 92-98.
- [22] 张雷, 郝帅, 张伟, 等. 中低煤阶煤层气储量复算及认识——以鄂尔多斯盆地东缘保德煤层气田为例[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(1): 147-155.
- ZHANG Lei, HAO Shuai, ZHANG Wei, et al. Recalculation and understanding of middle and low rank coalbed methane reserves: a case study of Baode Coalbed Methane Field on the eastern edge of Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(1): 147-155.
- [23] 冯兴武. 渭北油田浅层致密砂岩储层多缝驱油压裂技术应用[J]. *石油地质与工程*, 2022, 36(3): 99-103.
- FENG Xingwu. Application of multi-fracture oil displacement fracturing technology in shallow tight sandstone reservoir in Weibei oilfield[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2022, 36(3): 99-103.
- [24] 王涛. 樊庄区块煤层气直井低产的关键影响因素及二次压裂改造[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- WANG Tao. Key factors of low production of coalbed methane vertical well in Fanzhuang Block and its secondary fracturing reconstruction[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [25] 倪小明, 朱明阳, 苏现波, 等. 煤层气垂直井重复水力压裂综合评价方法研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(1): 39-43.

- NI Xiaoming, ZHU Mingyang, SU Xianbo, et al. Study on methods of repeated hydraulic fracturing comprehensive evaluation about CBM vertical Wells[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2012, 31(1): 39-43.
- [26] 杨兆中, 杨晨曦, 李小刚, 等. 基于灰色关联的逼近理想解的排序法的煤层气井重复压裂选井——以沁水盆地柿庄南区块为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4680-4686.
- YANG Zhaozhong, YANG Chenxi, LI Xiaogang, et al. Multiple fracturing well selection of coalbed methane wells based on technique for order preference by similarity to ideal solution method of gray correlation: taking the case of Qinshui Basin Shizhuang South Block as an examples[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12): 4680-4686.
- [27] 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 Zhaozhong, XIONG Junya, LIU Jun, 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.
- [28] 马新仿, 李忠城, 孔鹏, 等. 基于聚类分析的煤层气二次压裂选井选层方法研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(1): 79-87.
- MA Xinfang, LI Zhongcheng, KONG Peng, et al. Study on secondary fracturing candidate selection of coalbed methane based on clustering analysis[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(1): 79-87.
- [29] 姜杉钰, 康永尚, 张守仁, 等. 沁水盆地柿庄区块煤层气井排采动态影响因素分析及开发对策研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(60): 1134-1142.
- JIANG Shanyu, KANG Yongshang, ZHANG Shouren, et al. Analysis on influencing factors of drainage dynamic of wells and CBM development strategy in Shizhuang block[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(60): 1134-1142.
- [30] 郭广山, 柳迎红, 张苗, 等. 沁水盆地柿庄南区块排采水特征及其对煤层气富集的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(7): 1115-1125.
- GUO Guangshan, LIU Yinghong, ZHANG Miao, et al. The characteristics of drainage water and its controlling effects on the favorable area of CBM in Shizhuangnan block, Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(7): 1115-1125.
- [31] 汪剑, 崔永谦, 史今雄, 等. 沁水盆地南部煤储层裂缝测井响应与参数重构[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(11): 2086-2092.
- WANG Jian, CUI Yongqian, SHI Jinxiang, et al. Logging response and parameters reconstruction of coal reservoir fractures in the southern Qinshui Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(11): 2086-2092.
- [32] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- DENG Julong. Grey system theory tutorial[M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1990.
- [33] 宋子齐, 谭成任. 灰色理论油气储层评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- SONG Ziqi, TAN Chengqian. Grey theory evaluation of oil and gas reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [34] 罗红旗, 黄其鸿. 基于关联度分析的农业机械化对农业产出的影响研究[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2007, 25(6): 16-18.
- LUO Hongqi, HUANG Qihong. Research on effect of agricultural mechanization input about agricultural products based on relation index analysis[J]. Journal of Beijing Technology and Business University(Natural Science Edition), 2007, 25(6): 16-18.
- [35] 胡咤咤, 黄文辉, 许启鲁, 等. 柿庄北区块3号煤含气量影响因素关联性分析[J]. 科技通报, 2016, 32(7): 36-42.
- HU Zhazha, HUANG Wenhui, XU Qilu, et al. The correlation analysis on influence factors of coalbed methane content in No. 3 coalbed of Northern Shizhuang block[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(7): 36-42.
- [36] 蒋永平, 杨松. 鄂尔多斯盆地东缘延川南区块煤层气井排水采气新工艺[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 384-389.
- JIANG Yongping, YANG Song. New technology of dewatering gas recovery for CBM wells in southern Yanchuan Block, eastern margin of Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 384-389.
- [37] 孔祥伟, 孙腾飞. 信息背景下的控压钻井课程“创新发散实用教学”方法探讨[J]. 高教学刊, 2022, 25: 35-39.
- KONG Xiangwei, SUN Tengfei. Exploring the method of "innovative and divergent practical teaching" in the course of controlled pressure drilling under the background of information [J]. Journal of Higher Education, 2022, 25: 35-39.
- [38] 陶莹, 杨锋, 刘洋, 等. K均值聚类算法的研究与优化[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(6): 90-92.
- TAO Ying, YANG Feng, LIU Yang, et al. Research and optimization of K-means clustering algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(6): 90-92.
- [39] 林璐, 陈健, 曲大义, 等. 基于K均值聚类算法的交通状态判别方法研究[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(4): 109-114.
- LIN Lu, CHEN Jian, QU Dayi, et al. Study on traffic state identification method based on K-means clustering algorithm [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2019, 40(4): 109-114.
- [40] 黄发明, 石雨, 欧阳慰平, 等. 基于证据权和卡方自动交互检测决策树的滑坡易发性预测[J]. 土木与环境工程学报, 2022, 44(5): 16-28.
- HUANG Faming, SHI Yu, OUYANG Weiping, et al. Landslide susceptibility prediction modeling based on weight of evidence and chi-square automatic interactive detection decision tree[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 16-28.