引用格式：陈跃，王丽雅，李国富，等. 基于随机森林算法的低煤阶煤层气开发选区预测[J]. 油气藏评价与开发，2022，12(4)：596-603.
CHEN Yue, WANG Liya, LI Guofu, et al. Prediction of favorable areas for low-rank coalbed methane based on Random Forest algorithm [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 596-603.
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.04.007

基于随机森林算法的低煤阶煤层气开发选区预测

陈 跃[1]，王丽雅[1]，李国富[2]，张 林[3]，杨 甫[4]，马卓远[1]，高 正[1]

（1.西安科技大学地质与环境学院，陕西 西安 710054；2.煤与煤层气共采技术国家重点实验室，山西 晋城 048000；3.陕西煤层气开发利用有限公司，陕西 西安 710065；4.自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室，陕西 西安 710021）

摘要：中国低煤阶煤层气资源丰富，且煤层气作为一种清洁能源，其开发和利用可有效地缓解我国天然气资源短缺问题，但是商业化规模开发稍显不足，亟需系统研究。煤层气高效开发的前提是有利区优选，但目前煤层气开发选区评价均涉及一定的主观人为因素，会间接影响或干扰预测效果。将黄陇煤田彬长矿区大佛寺井田低煤阶作为研究对象，以生产实际数据为基础，采用机器学习中的随机森林算法对该区煤层气开发选区做出预测。结果表明：①Pearson关联系数（PCC）分析表明含气量、灰分、煤层净厚度、构造位置、顶板厚度、渗透率、储层压力和埋深这8个煤层气产出相关参数相互独立，可用于模型建立；②随机森林算法将煤层气开发选区划分为5类不同程度的区域，其中Ⅰ类（极高）和Ⅱ类（高有利）区占整个研究区域的13.88 %，主要分布在井田的中部，西部存在Ⅱ类（高有利区）分布，后续开发部署井位也可着重考虑，而井田的东南部不适于后续部署井位；③由接受者操作特征曲线（ROC）可知，一般成功率曲线与预测率曲线下的面积值（AUC）为0.961，表明随机森林模型预测精度较高，结果可靠。通过机器学习算法对煤层气开发选区进行综合预测，可规避传统算法中的人为主观因素，且具有较高的精度，可为后续非常规油气开发选区提供一定的理论参考依据。

关键词：随机森林；开发选区预测；煤层气；低阶煤；黄陇煤田
中图分类号：P618.11　　**文献标识码**：A

Prediction of favorable areas for low-rank coalbed methane based on Random Forest algorithm

CHEN Yue[1], WANG Liya[1], LI Guofu[2], ZHANG Lin[3], YANG Fu[3], MA Zhuoyuan[1], GAO Zheng[1]

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of coal and coalbed methane co-mining technology, Jincheng, Shanxi 048000, China; 3. Shaanxi Coalbed Methane Development Corp.Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China; 4. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: In China, low-rank coal and coalbed methane resources are abundant, meanwhile, as a kind of clean energy, the development and utilization of coalbed methane (CBM) can effectively alleviate the shortage of natural gas resources, but the commercial scale development is slightly insufficient, and systematic research is urgently needed. The premise of efficient CBM development is the selection of favorable areas, but the current CBM development evaluation involves certain subjective human factors, which will indirectly affect or interfere with the prediction effect. Taking the low-rank coal in the Dafosi minefield in the Binchang mining area of Huanglong Coal Field as the research object, based on the actual production data, the random forest

收稿日期：2022-04-12。
第一作者简介：陈跃（1988—），男，博士，副教授，从事非常规天然气地质研究。地址：陕西省西安市雁塔中路58号西安科技大学，邮政编码：710054。E-mail：cyxust@126.com
通信作者简介：王丽雅（1998—），女，在读硕士研究生，从事煤层气地质研究。地址：陕西省西安市雁塔中路58号西安科技大学，邮政编码：710054。E-mail：1308346025@qq.com
基金项目：国家自然科学基金项目"润湿性制约下低阶煤不同煤岩组分甲烷解吸机制"（41902175）；山西省揭榜招标项目"基于气藏工程的煤层气井人工智能排采技术与示范"（20201101002）；中国博士后科学基金项目"低煤阶镜煤与暗煤润湿性差异及对甲烷解吸的影响"（2019M653873XB）。

algorithm in machine learning is used to predict the favorable area of coalbed methane in the area. The results show that: ① Pearson correlation analysis shows that the gas content, ash content, net thickness of coal seam, structural position, roof thickness, permeability, reservoir pressure and burial depth are eight mutually independent CBM output-related parameters and can be used for model establishment; ② The Random Forest algorithm divides the CBM development area into five types of areas with different degrees, of which type Ⅰ(extremely high) to Ⅱ(highly favorable) areas account for 13.88 % of the entire study area, mainly distributed in the middle of the well field. The southeast is not suitable for subsequent deployment of well locations, and there is a distribution of highly favorable areas in the west, so the well locations for subsequent development and deployment should also be considered. ③ It can be obtained from the receiver operating characteristic(ROC) curve, and the area under the ROC curve (AUC) is 0.961, indicating that the Random Forest model has high prediction accuracy and reliable results. Using machine learning algorithms for comprehensive prediction of CBM favorable areas can avoid human subjective factors in traditional algorithms, and can provide a certain theoretical reference for subsequent unconventional oil and gas development and selection.
Keywords: Random Forest; development constituency forecast; coalbed methane(CBM); low rank coal; Huanglong Coal Field

目前,中国煤层气商业开发多集中于中、高煤阶储层,但低煤阶煤层气资源量丰富,具有非常大的开发潜力[1-2]。煤层气的选区是煤层气勘探开发的根本,将会直接影响到煤层气的勘探开发效率,而开发选区评价指标及方法的恰当性、合理性以及客观性,将会关系到评价结果的精确性[3-5]。因此,应将研究区内煤层气资源的基本特点作为煤层气开发选区评价的基点,开展综合地质的研究与评价。

诸多学者针对煤层气开发选区预测采用了多种研究方法。王金等[6]根据寿阳区块煤层气相关资料,提出"避水采气法",为甄选煤层气排采井位,提升单井产能提供了依据;XU等[7]从煤层厚度、含气量、水文地质条件、顶底板岩性和埋深等方面,综合分析了煤层气开发选区;陈晓智等[3]、姚艳斌等[8]、邵龙义等[9-11]、FU等[12]运用多层次模糊评判法建立了相关煤层气地质选区的评价体系;刘人和等[13]、张小东等[14]、王鹏等[15]、LIU等[16]依据模糊综合评价的理论,建立评判体系对煤层气开发选区做出了预测;刘灵童等[17]、白利娜等[18]基于灰色关联理论,对煤层气有利井区进行了优选;张嘉睿等[19]使用熵权法(Entropy Method)明确各影响因素的权重,通过K均值聚类法对评价结果进行划分,运用MapGIS圈定不同类型开发前景分区;罗金辉等[20]在建立组合权重向量时,所采用的方法是灰色关联分析和层次分析法,经过多层次多目标模糊优选模型对研究区进行甄选排序,最终对煤层气选区做出了评价预测。但以上评价方法一定程度上均具有主观因素和经验因素,因此,为了评价结果的客观性,有必要引入机器学习中训练样本式算法,排除人为主观因素[21-25]。以大佛寺井田为例,运用随机森林算法预测大佛寺井田煤层气后续的开发选区,以期为该区后续开发、井位部署提供一定的理论参考依据。

1 随机森林算法原理与模型

随机森林(Random Forest)是采用决策树作为弱分类器,可以看作是装袋算法(Bagging)集成学习的一个拓展。随机森林以决策树为基本模型,通过构造不同的训练数据集以及不同的特征空间来产生一系列具有差异性的决策树模型,最后的决策一般用投票或取平均值来得到。随机森林首先使用自助法(Bootstrap)重采样技术,从原始训练样本集T中有放回地重复随机抽取n个样本(一般为三分之二)生成新的训练样本集合;每一个独立抽取的训练样本用于训练一棵树,每一个棵树都有着一致的分布;剩下没有被抽取的数据集被称为袋外数据(OOB),基于自助样本集生成的n个决策树组成森林。随机森林模型具有以下优越性:①训练速度快,易于应用在大规模数据分析中;②因为使用的是集成算法,此模型的精度一般会高于大多数单一算法;③因为引入了随机性,模型会不易造成过度拟合;④能够在不用特征选择的情况下处理高纬度数据,有着较强的数据集适应能力,并且数据集不需要规范化处理[26]。

当建立每一棵分类与回归树的时候,每个节点分裂过程依靠计算分裂后的样本"纯度"来完成,基尼系数被用于分类与回归树来评定这种所谓的"纯度",基尼系数越小则代表样本的纯度越高,树划分

的效果越好。假设样本集T中包含k个类别，那么样本集的基尼系数则展现为：

$$gini(T) = 1 - \sum_{i=1}^{k} p_i^2 \quad (1)$$

式中：p_i是T中包含i类的概率。

若将T划分为两个子集T_1和T_2，则划分后的基尼系数可以表示为：

$$gini(T_1,T_2) = \frac{|T_1|}{|T|} gini(T_1) + \frac{|T_2|}{|T|} gini(T_2) \quad (2)$$

2 研究概况及数据选取

2.1 研究区概况

鄂尔多斯盆地煤层气资源量丰富，可采储量$2.80×10^{12}$ m^3，盆地内的黄陇煤田属于典型的低煤阶储层。自2010年至今，彬长矿区大佛寺煤矿建成了日产气量$30×10^4$ m^{3}的煤层气开发工程，取得较好成绩[27-28]。研究区内主要褶皱有安化向斜、祁家背斜、师家店向斜等，褶皱宽缓，延伸较远（图1），目前部署的井位主要集中在中东部，延安组4号煤为井田内的主采煤层，煤层中节理、裂隙发育程度高，煤层具有变质程度低、厚度大、含气量较好、渗透性好的特点，利于开采。但随着煤层气资源持续开发，有必要对井田内其他可开发区域进行研究[29]。

截至2020年，大佛寺井田共有27口直井，6口多分支水平井，1口U型井，共计34口煤层气井。

2.2 评价指标选取

不同开发阶段的煤层气井，对于产气量的影响因素均有一定程度的差异，因此，煤层气开发选区所选评价指标也不同，且指标应具有全面性、客观性、代表性及工程意义。对于开发初期，评价指标应该首先反映煤层的生气潜力、储集性能和保存条件，具体包括煤层厚度、含气量、灰分含量、顶板岩性及厚度等指标。在此原则下，结合该井田煤层气资源的特征，依照已施工的煤层气井钻孔资料及相关数据，优选出影响煤层气开发潜力和产能的主要影响因素，选取资源条件（含气量、灰分、煤层净厚度）、赋存条件（构造位置、顶板厚度）、开发条件（渗透率、储层压力、埋深）作为评价指标，此外，本区的断层较少，主要为褶皱，为了定量研究褶皱对煤层气开发的影响，对定性指标（构造位置），分别赋值量化，翼部为0.7，向斜轴部0.8，背斜轴部1，建立研究区4号煤煤层气开发前景评价指标体系[30]（表1）。

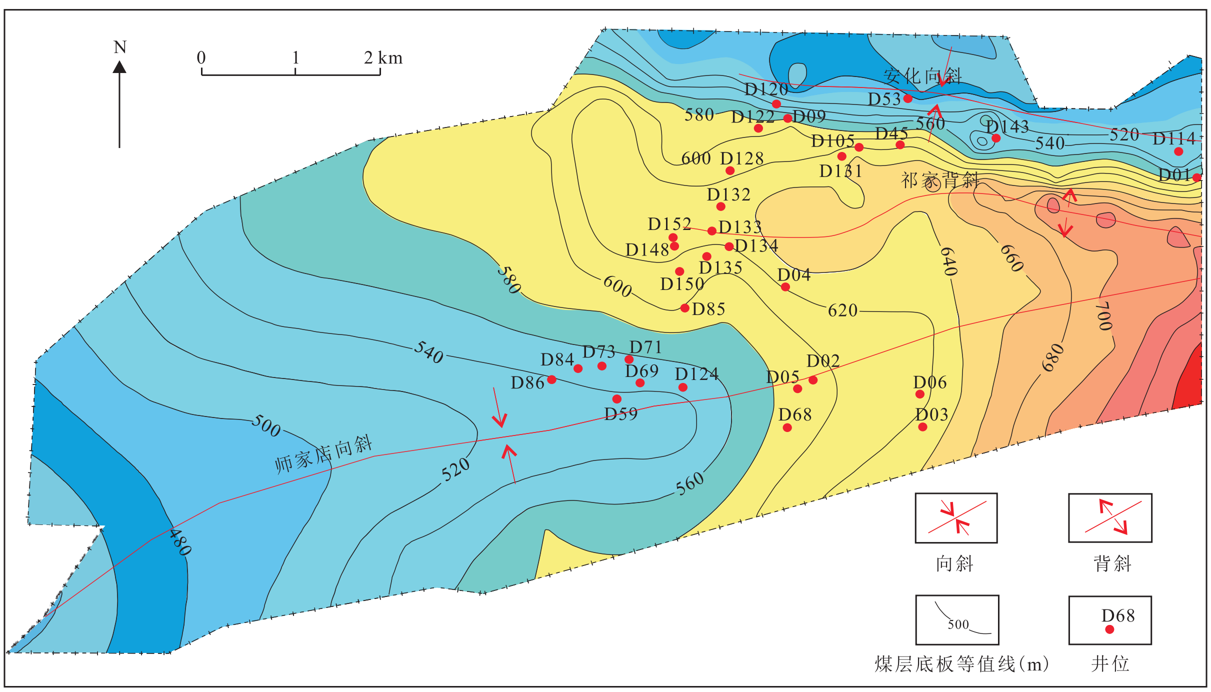


图1 鄂尔多斯盆地大佛寺井田4号煤层底板等高线及构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of contour and structure of No.4 coal seam floor of Dafosi minefield in Ordos Basin

表1 鄂尔多斯盆地大佛寺井田4号煤层评价指标参数

Table 1 Evaluation index parameters of No.4 coal seam in Dafosi minefield of Ordos Basin

井号	分类	产气量(m^3/d)	含气量(m^3/t)	埋深(m)	煤厚(m)	渗透率(10^{-3} μm^2)	储层压力(MPa)	灰分(%)	构造部位	顶板厚度(m)
D68		10 246.09	4.3	610	11.0	7.7	2.8	14.0	0.8	2.2
D02		10 181.94	2.8	590	16.8	10.0	3.3	11.0	0.8	2.1
D05		8 316.52	3.6	589	14.0	9.2	3.1	12.0	0.7	2.0
D124		4 205.09	8.1	615	11.8	6.6	3.2	15.5	1.0	2.1
D85		4 025.73	1.8	535	8.3	7.3	3.8	14.9	0.7	1.2
D09		3 998.08	6.8	465	12.6	15.0	1.2	15.2	0.7	6.0
D143		3 633.23	8.0	490	13.6	7.8	1.4	13.9	0.7	0.7
D04	高产井	3 236.77	3.3	500	10.3	3.8	2.9	10.5	0.8	0.7
D133		2 590.39	8.3	510	12.2	11.0	5.5	15.9	1.0	3.0
D01		2 032.40	3.8	505	17.6	7.8	0.8	12.0	0.8	1.2
D134		1 961.95	8.0	490	10.2	6.8	4.3	17.0	0.7	0.6
D131		1 876.32	10.0	435	13.9	12.3	3.6	14.4	1.0	1.8
D45		1 696.16	2.2	435	14.3	11.8	2.4	15.2	0.7	1.8
D148		1 629.34	7.7	500	8.3	7.4	5.5	15.8	0.7	1.4
D06		1 339.94	3.2	540	11.8	7.3	1.3	11.9	0.7	1.4
D03		1 248.76	2.8	570	10.2	4.8	2.5	19.0	0.8	1.5
D128		1 177.44	9.1	448	10.8	12.5	4.6	15.2	1.0	3.6
D132		836.56	8.3	480	11.0	18.8	5.6	15.1	1.0	6.8
DU53		643.54	3.5	540	12.3	6.0	6.0	16.0	1.0	0.8
D152		554.33	8.2	505	8.3	7.4	6.0	15.2	0.7	1.4
D59		460.25	8.6	585	20.3	6.5	3.3	17.0	1.0	2.6
D73		458.52	9.3	630	13.5	8.0	3.8	16.8	0.7	3.0
D135		450.94	8.1	510	12.3	8.1	4.8	16.3	0.7	1.0
D150	低产井	434.58	7.3	510	10.3	7.9	4.6	14.5	0.7	1.4
D105		356.06	10.0	440	14.2	11.1	3.6	14.3	0.7	0.9
D69		344.81	8.5	628	14.0	7.0	3.4	16.2	0.7	2.6
D71		340.54	8.6	600	11.0	8.1	3.7	16.2	0.7	3.0
D122		304.95	9.3	445	12.0	11.1	2.6	15.9	0.7	3.8
D84		256.95	8.2	630	14.7	7.5	4.0	17.2	0.7	2.6
D114		244.23	6.5	565	17.8	14.0	3.0	13.0	0.7	3.6
D86		239.53	8.1	650	13.0	6.8	3.9	17.8	0.8	2.3
D120		212.47	8.1	500	12.2	11.0	2.5	15.8	1.0	3.7

2.3 开发选区评价因子相关性分析

采用ArcGIS软件提取各评价因子图层(图2),用以检验因子间的关联性,并利用Pearson关联系数(PCC)来分析各因子之间的关联程度,得到各因子间关联系数。

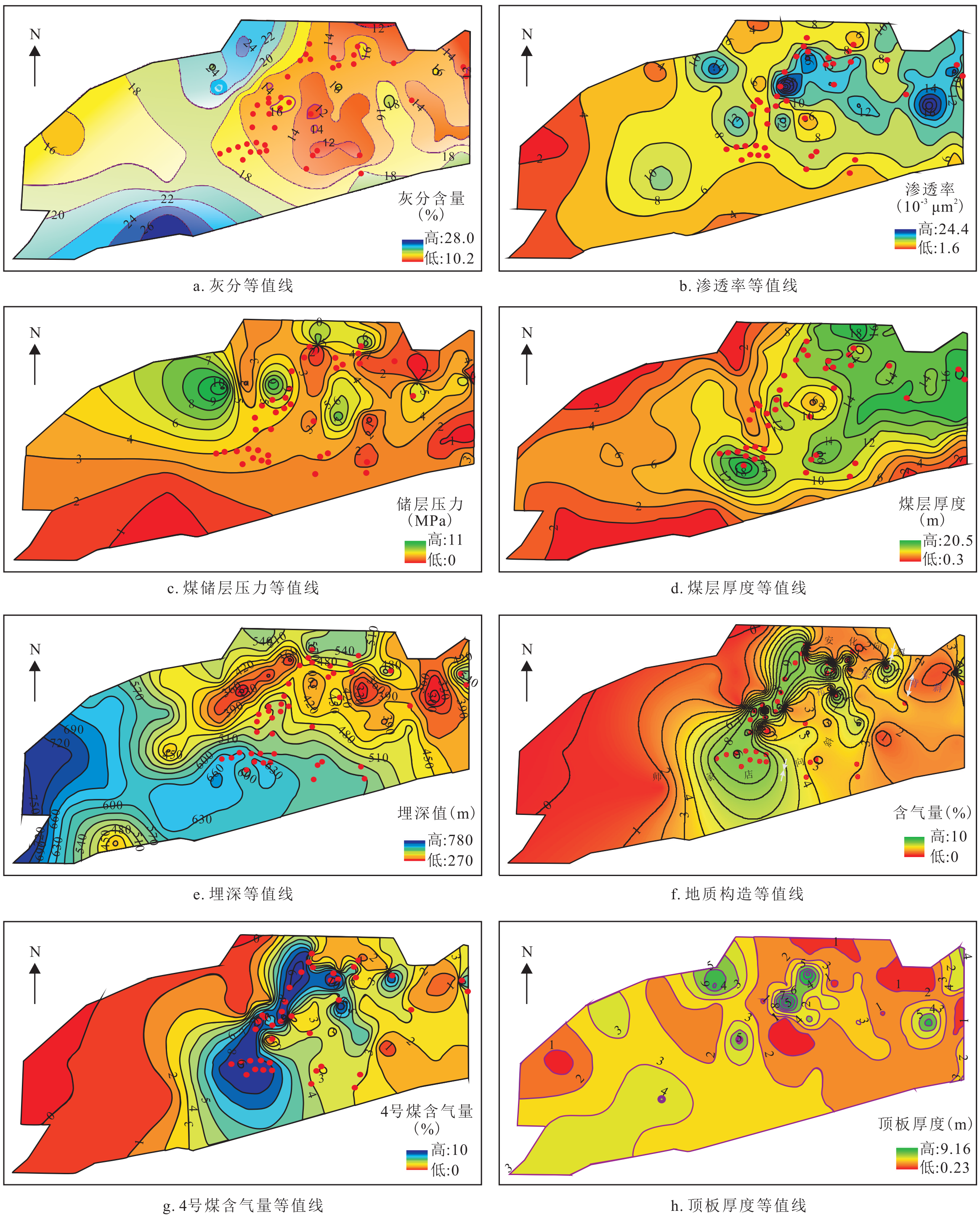
假设有开发选区评价因子样本数据集$\left(X_i,Y_j\right)=\left(x_1,y_1\right),\left(x_2,y_2\right),\dots,\left(x_n,y_n\right)$,则含气量、储层压力和渗透率等8个评价因子间相关系数的计算公式为:

$$\lambda_{\mathrm{PCC}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)\sum_{j=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2\sum_{j=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \tag{3}$$

式中:λ_{PCC}为Pearson关联系数;x_i、y_j分别为X_i、Y_j的变

量值;$\bar{x}$、$\bar{y}$分别为X_i、Y_j的平均值。

关联系数结果表明(表2)λ_{PCC}值越大,说明因子的相关性越强:当$0 \leqslant |\lambda_{PCC}| \leqslant 0.4$时,因子不相关或弱相关;当$|\lambda_{PCC}| > 0.6$时,因子强相关。且所有因子间相关系数的绝对值均小于0.4,构造部位接近的因子系数也接近0.4,因此,研究选取的各因子可以认为是相互独立的,在后期训练中不会出现过渡拟合。



a. 灰分等值线　　b. 渗透率等值线

c. 煤储层压力等值线　　d. 煤层厚度等值线

e. 埋深等值线　　f. 地质构造等值线

g. 4号煤含气量等值线　　h. 顶板厚度等值线

图2　鄂尔多斯盆地大佛寺井田评价因子

Fig. 2　Conditioning factor of Dafosi mine field in Ordos Basin

表2 开发选区评价因子关联系数
Table 2 Factor correlation coefficient

	含气量	埋深	煤厚	渗透率	储层压力	构造部位	灰分	顶板厚度
含气量	1.000	−0.130	0.044	0.284	0.312	0.417	0.194	0.318
埋深	−0.130	1.000	0.186	−0.475	0.011	0.199	−0.127	−0.047
煤厚	0.044	0.186	1.000	0.166	−0.396	−0.198	0.141	0.106
渗透率	0.284	−0.475	0.166	1.000	0.021	−0.122	0.218	0.768
储层压力	0.312	0.011	−0.396	0.021	1.000	0.350	0.231	−0.012
构造部位	0.417	0.199	−0.198	−0.122	0.350	1.000	0.075	0.146
灰分	0.194	−0.127	0.141	0.218	0.231	0.075	1.000	0.271
顶板厚度	0.318	−0.047	0.106	0.768	−0.012	0.146	0.271	1.000

3 研究方法及结果

3.1 研究方法

由大佛寺煤层气井稳产阶段生产数据产气量可知,大佛寺井田煤层气井产气量差异较大。为区别高产和低产井,以稳产阶段1 200 m^3/d为界限,大于1 200 m^3/d为高产井,小于1 200 m^3/d为低产井。研究选用的煤层气井共计32口,其中高产和低产(非高产)井各16口。具体操作过程如下:首先运用ArcGIS将研究区分为30 m×30 m大小的栅格单元,全区共计划分为79 142个像元,将基本栅格单元认定为评估单元,为使煤层气开发选区评价研究能够有充足的数据支持,在提取研究区各评价因子的属性值时,使用ArcGIS栅格转点工具,建立区域属性数据库;然后,随机选取11处高产井(约为总煤层气井数的70 %)与相同数量的非高产井属性数据作为训练样本集,余下的5处高产井(大约是总煤层气井数的30 %)与数量一致的非高产井点组成测试样本集;最后,基于MATLAB软件平台,运用随机森林算法,随机森林计算过程中涵盖着2个关键的参数,分别为ntree(森林中决策树的数量)和mtry(每次随机抽取的变量个数),研究中将ntree和mtry的值分别设为500和3,得到模型的预测准确率为70 %(图3),预测结果良好。因此,认为该模型可靠,可用于下一步评价全区。

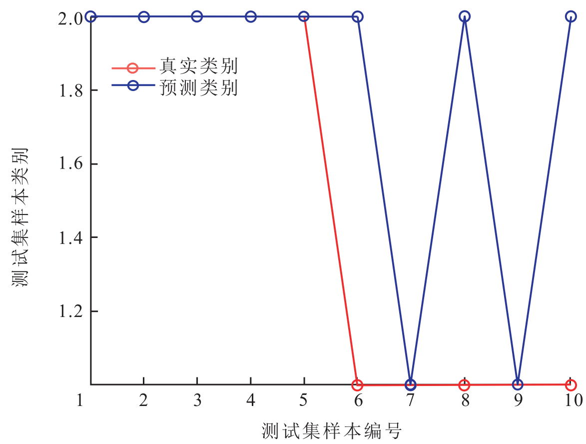


图3 测试集预测结果对比
Fig. 3 Comparison of test set prediction results

3.2 研究结果

将属性数据库导入训练好的模型之中,可以得到煤层气开发选区指数,区间为[0,0.948]。采用自然间断点法将其等级划分为5类:Ⅰ类为极有利区,区间为[0.678,0.948];Ⅱ类为高有利区,区间为[0.51,0.678];Ⅲ类为中有利区[0.386,0.51];Ⅳ类为不利区,区间为[0.268,0.386];Ⅴ类为极不利区,区间为[0.03,0.268]。生成的煤层气开发选区预测结果如图4所示,其中,极有利区面积、高有利区面积、中有利区面积、不利区面积、极不利区面积占全区的比例依次为4.53 %、9.35 %、32.02 %、39.79 %、14.31 %。

3.3 模型的检验

通过ROC曲线对模型的性能进行检验,一般用成功率曲线与预测率曲线下面积(AUC)作为评定标准。成功率曲线是基于训练样本数据绘制而成,可有效地考察评价模型的分类能力。预测率曲线则是

基于验证样本绘制而成,可对模型的预测能力进行评定。当AUC=1时,预测的结果与高产井的实际分布完全一致;当AUC值越接近于1,则检测方法精确性就会越高。将研究区按煤层气开发选区指数由高到低分为16等份,通过计算参与训练的70 %及参与预测的30 %的煤层气井在此范围内的累积百分比值,绘制基于随机森林评价模型下成功率曲线和预测率曲线,得到其成功率曲线(图5)。结果显示:随机森林模型的成功率曲线AUC值为0.961,说明预测结果成功率非常高,采用随机森林模型预测煤层气开发选区在数学理论上具有较高的精度。

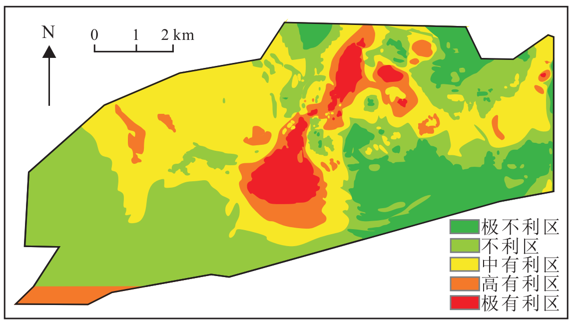


图4 鄂尔多斯盆地大佛寺井田有利区预测结果
Fig. 4 Forecast results of favorable areas in Dafosi minefield of Ordos Basin

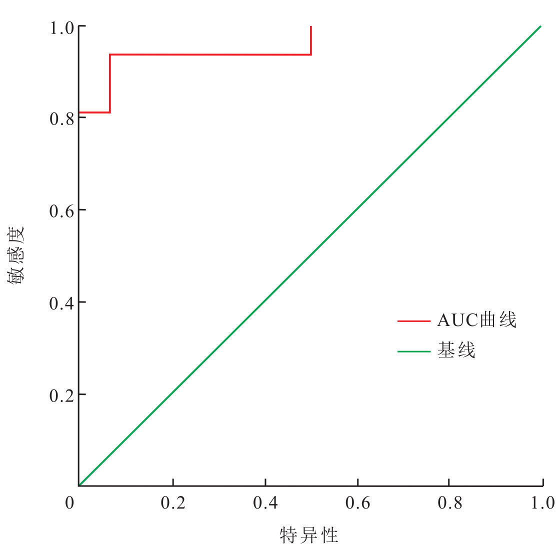


图5 AUC检验结果
Fig. 5 AUC inspection results

4 结论

以大佛寺井田作为研究区,利用多源数据、ArcGIS以及随机森林算法对区内煤层气开发选区预测,可以得到以下结论:

1)根据PCC相关分析,研究选取的8个参数(含气量、灰分、煤层净厚度、构造位置、顶板厚度、渗透率、储层压力、埋深)相互独立,可用于模型建立。

2)通过分析所得到的有利区分布图可知,高—极高有利区占整个研究区域的13.88 %,主要分布在井田的中部。从预测分析结果的整体空间布局看来,井田的东南部不适于后续部署井位,而井田的西部存在高有利区分布,后续开发部署井位可着重考虑。

3)由ROC曲线可得,随机森林模型的成功率曲线的AUC值为0.961,随机森林算法展现了优秀的机能,在后续的研究工作中使用机器学习算法对井田内煤层气开发选区进行综合预测,可规避传统算法中的人为主观因素。

参 考 文 献

[1] 李勇,许卫凯,高计县,等."源-储-输导系统"联控煤系气富集成藏机制——以鄂尔多斯盆地东缘为例[J].煤炭学报,2021,46(8):2440-2453.
LI Yong, XU Weikai, GAO Jixian, et al. Mechanism of coal measure gas accumulation under integrated control of "source reservoir-transport system": A case study from east margin of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2440-2453.

[2] 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.

[3] 陈晓智,汤达祯,许浩,等.低、中煤阶煤层气地质选区评价体系[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(S2):115-120.
CHEN Xiaozhi, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Geological evaluation system of potential coalbed methane exploration and development blocks with Low and Medium coal ranks[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42 (S2): 115-120.

[4] 张莉娜,刘欣,张耀祖.基于正交试验设计的页岩气藏压裂敏感性分析[J].非常规油气,2021,8(5):77-86.
ZHANG Lina, LIU Xin, ZHANG Yaozu. Sensitivity analysis of shale gas reservoir based on orthogonal experimental design[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(5): 77-86.

[5] 胡凯.川西南威远地区五峰—龙马溪组页岩储层特征及甜点分布规律研究[J].非常规油气,2021,8(5):34-44.

HU Kai. Reservoir and sweet pot distribution characteristics of shale gas in Wufeng and Longmaxi Formation, southwest of Sichuan Basin, China[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(5): 34-44.

[6] 王金,康永尚,姜杉钰,等.沁水盆地寿阳区块煤层气井产水差异性原因分析及有利区预测[J].天然气工业,2016,36(8):52-59.
WANG Jin, KANG Yongshang, JIANG Shanyu, et al. Reasons for water production difference of CBM wells in Shouyang Block, Qinshui Basin, and prediction on favorable areas[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(8): 52-59.

[7] XU H,TANG D Z,LIU D M, et al. Study on coalbed methane accumulation characteristics and favorable areas in the Binchang area, southwestern Ordos Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 95: 1-11.

[8] 姚艳斌,刘大锰,汤达祯,等.平顶山煤田煤储层物性特征与煤层气有利区预测[J].地球科学(中国地质大学学报),2007,32(2):285-290.
YAO Yanbin, LIU Dameng, TANG Dazhen, et al. Coal reservoir physical characteristics and prospective areas for CBM exploitation in Pingdingshan coalfield[J]. Earth Science(Journal of China University of Geoscience), 2007, 32(2): 285-290.

[9] SHAO L Y, HOU H H, TANG Y, et al. Selection of strategic replacement areas for CBM exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry B, 2015, 2(2): 211-221.

[10] 邵龙义,王学天,张家强,等.滇东北地区煤层气富集特征及勘探目标优选[J].天然气工业,2018,38(9):17-27.
SHAO Longyi, WANG Xuetian, ZHANG Jiaqiang, et al. CBM accumulation characteristics and exploration target selection in northeastern Yunnan, China[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 17-27.

[11] 邵龙义,文怀军,李永红,等.青海省天峻县木里煤田煤层气有利区块的多层次模糊数学评判[J].地质通报,2011,30(12):1896-1903.
SHAO Longyi, WEN Huaijun, LI Yonghong, et al. Assessment of favorable areas for coalbed methane resources exploration in the Muli coalfield of Qin hai Province based on multi-layered fuzzy mathematics[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(12): 1896-1903.

[12] FU H, TANG D, XU H, et al. Geological characteristics and CBM exploration potential evaluation: A case study in the middle of the southern Junggar Basin, NW China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 30: 557-570.

[13] 刘人和,刘飞,周文,等.沁水盆地煤岩储层特征及有利区预测[J].油气地质与采收率,2008,73(4):16-19.
LIU Renhe, LIU Fei, ZHOU Wen, et al. Characteristics and favorable area prediction of coal reservoirs in Qinshui Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 73(4): 16-19.

[14] 张小东,张硕,许亚坤,等.基于模糊数学的豫东煤系气资源勘探有利区预测[J].煤炭科学技术,2018,46(11):172-181.
ZHANG Xiaodong, ZHANG Shuo, XU Yakun, et al. Favorable block prediction of coal measure gas resource exploration in eastern Henan area based on fuzzy mathematics[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11): 172-181.

[15] 王鹏,李图南.基于MapGIS的大佛寺井田煤层气资源有利区预测[J].煤炭科学技术,2019,47(5):193-197.
WANG Peng, LI Tunan. Prediction on favorable areas of CBM resources based on MapGIS in Dafosi Minefield[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 193-197.

[16] LIU H, SANG S X, WANG G X, et al. Evaluation of the synergetic gas-enrichment and higher-permeability regions for coalbed methane recovery with a fuzzy model[J]. Energy, 2012, 39: 426-439.

[17] 刘灵童,王文升,尹彦君,等.灰色关联分析在中阶煤层气有利井区快速优选中的应用[J].长江大学学报(自然科学版),2016,13(10):17-21.
LIU Lingtong, WANG Wensheng, YIN Yanjun, et al. Application of grey correlational analysis in fast optimization of favorable well block of medium-rank coalbed methane[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2016, 13(10): 17-21 .

[18] 白利娜,曾家瑶,高为.基于灰色关联分析的盘关向斜煤层气有利井区优选[J].煤炭科学技术,2019,47(4):169-173.
BAI Li' na, ZENG Jiayao, GAO Wei. Optimization of favorable well for CBM based on grey correlation analysis in Panguan Syncline [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 169-173.

[19] 张嘉睿,夏玉成,李涛,等.Entropy-Kmeans方法在煤层气开发前景评价中的应用[J].煤矿安全,2020,51(8):158-163.
ZHANG Jiarui, XIA Yucheng, LI Tao, et al. Application of Entropy-Kmeans in evaluation of coalbed methane development prospect[J]. Coal Mine Safety, 2020, 51(8): 158-163.

[20] 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 Jinhui, YANG Yongguo, QIN Yong, et al. Fuzzy optimization for CBM favorable targets based on combined weights[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 242-246.

[21] 张吉军.模糊层次分析法(FAHP)[J].模糊系统与数学,2000(2):80-88.
ZHANG Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000(2): 80-88.

[22] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP wight vector and its applications [J]. Mathematics in Practice and Knowledge, 2012, 42(7): 93-100.

[23] 常建娥,蒋太立.层次分析法确定权重的研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2007,134(1):153-156.
CHANG Jian'e, JIANG Taili. Research on the weight of coefficient through analytic hierarchy process[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering Edition), 2007, 134(1): 153-156.

[24] 康保平,姜帆.四川盆地威远地区下志留统龙马溪组页岩储层有利区评价[J].天然气勘探与开发,2021,44(3):87-95.
KANG Baoping, JIANG Fan. Evaluation on favorable shale reservoirs of Lower Silurian Longmaxi Formation, Weiyuan

(下转第616页)

simulation of fracture network propagation in formation containing frictional and cemented natural fractures[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 50: 309-324.

[21] SHI F, WANG X, LIU C, et al. An XFEM-based method with reduction technique for modeling hydraulic fracture propagation in formations containing frictional natural fractures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 173: 64-90.

[22] NGUYEN T T, YVONNET J, ZHU Q Z, et al. A phase-field method for computational modeling of interfacial damage interacting with crack propagation in realistic microstructures obtained by microtomography[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2016, 312: 567-595.

[23] LIANG X, YVONNET J, GHABEZLOO S. Phase field modeling of hydraulic fracturing with interfacial damage in highly heterogeneous fluid-saturated porous media[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 186: 158-180.

[24] MIEHE C, MAUTHE S. Phase field modeling of fracture in multi-physics problems. Part Ⅲ. Crack driving forces in hydro-poro-elasticity and hydraulic fracturing of fluid-saturated porous media[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2016, 304(1): 619-655.

[25] 易良平，胡滨，李小刚，等.基于相场法的煤砂互层水力裂缝纵向延伸计算模型[J].煤炭学报，2020，45(S2)：706-716.
YI Liangping, HU Bin, LI Xiaogang, et al. Calculation model of hydraulic crack vertical propagation in coal-sand interbedded formation based on the phase field method[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 706-716.

[26] FRANCFORT G A, MARIGO J J. Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1998, 46(8): 1319-1342.

[27] BOURDIN B, FRANFORT G A, MARIGO J J. The variational approach to fracture[J]. Journal of Elasticity, 2008, 91(1): 5-148.

[28] MIEHE C, WELSCHINGER F, HOFACKER M. Thermodynamically consistent phase-field models of fracture: Variational principles and multi-field FE implementations[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 83(10): 1273-1311.

[29] ZHOU S W, RABCZUK T, ZHUANG X Y. Phase field modeling of quasi-static and dynamic crack propagation: COMSOL implementation and case studies[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 122: 31-49.

[30] ZHOU S W, ZHUANG X Y, RABCZUK T. A phase-field modeling approach of fracture propagation in poroelastic media[J]. Engineering Geology, 2018, 240(5): 189-203.

[31] 易良平.致密砂岩储层水力压裂裂缝延伸关键理论问题研究[D].成都：西南石油大学，2020.
YI Liangping. Study on key theoretical problems of hydraulic fracture extension in the tight sandstone reservoir[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2020.

[32] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12(2): 155-164.

[33] EMDADI A, FAHRENHOLTZ W G, HILMAS G E, et al. A modified phase-field model for quantitative simulation of crack propagation in single-phase and multi-phase materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 200: 339-354.

（编辑　余聪）

（上接第603页）

area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2021, 44(3): 87-95.

[25] 来鹏，杜世涛，杨曙光，等.博乐盆地石炭系阿克沙克组沉积演化及页岩气有利区预测[J].非常规油气，2020，7(5)：32-40.
LAI Peng, DU Shitao, YANG Shuguang, et al. Sedimentary evolution of Carboniferous Akshak Formation and prediction of favorable shale gas areas in Bole Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2020, 7(5): 32-40.

[26] 朱庆忠，胡秋嘉，杜海为，等.基于随机森林算法的煤层气直井产气量模型[J].煤炭学报，2020，45(8)：2846-2855.
ZHU Qingzhong, HU Qiujia, DU Haiwei, et al. A gas production model of vertical coalbed methane well based on random forest algorithm[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2846-2855.

[27] 蔺亚兵，宋一民，蒋同昌，等.黄陇煤田永陇矿区煤层气成藏条件及主控因素研究[J].煤炭科学技术，2018，46(3)：168-175.
LIN Yabing, SONG Yimin, JIANG Tongchang, et al. Study on forming conditions and main controlling factors of CBM reservoirs in Yonglong Mining Area of Huanglong Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(3): 168-175.

[28] 高正，马东民，陈跃，等.含水率对不同宏观煤岩类型甲烷吸附/解吸特征的影响[J].煤炭科学技术，2020，48(8)：97-105.
GAO Zheng, MA Dongmin, CHEN Yue, et al. Effect of water content on adsorption/desorption of methane of different macroscopic lithotypes [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 97-105.

[29] 马东民，王传涛，夏玉成，等.大佛寺井田煤层气井压裂参数优化方案[J].西安科技大学学报，2019，39(2)：263-269.
MA Dongmin, WANG Chuantao, XIA Yucheng, et al. Optimization program of fracturing parameters for coalbed methane wells in Dafosi Minefield[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(2): 263-269.

[30] 彭文利，薛冽，马效杰，等.准噶尔盆地南缘齐古地区煤层气地质特征[J].非常规油气，2021，8(1)：8-14.
PENG Wenli, XUE Lie, MA Xiaojie, et al. Geological characteristics of coalbed methane in Qigu area, southern Margin of Junggar Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(1): 8-14.

（编辑　余聪）