

# 海上油田多层砂岩定向井合采初期产能预测方法及应用

## ——以渤中C油田为例

李辉<sup>1\*</sup>, 邓津辉<sup>2</sup>, 韩春林<sup>1</sup>, 陈铭帅<sup>1</sup>, 刘佩佩<sup>1</sup>, 张瀚澎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津

<sup>2</sup>中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津

收稿日期: 2024年1月7日; 录用日期: 2024年2月19日; 发布日期: 2024年2月28日

### 摘要

海上油田初期产能评价通常采用基于DST测试资料的比采油指数法,但由于储层物性和流体性质的变化,以及多层合采层间干扰等因素影响,取值具有人为性,造成初期产能预测评价准确性降低。根据海上油田定向井多层合采开发的特点,通过分析储层渗透率、渗透率变异系数、流体性质和层间干扰系数等对产能的影响,建立储层物性参数、渗透率变异系数等参数和比采油指数的关系,提出了综合产能指数法和利用定向井实际投产数据样本通过机器学习法预测评价定向井初期产能。对比分析不同预测方法适用性和预测效果,为海上油田定向井多层合采初期产能预测提供可靠方法,以提高新井初期产量评价预测的准确性。实例应用表明,基于生产井大数据样本应用机器学习法评价预测定向井初期产能,比传统的比采油指数法更加便捷、准确性也较高,具有良好的应用前景。

### 关键词

开发初期, 产能评价, 影响因素, 预测方法, 多层合采, 机器学习

# Prediction Method and Application of Initial Productivity in Combined Production of Multilayer Sandstone Directional Well in Offshore Oilfield

## —Taking Bozhong C Oilfield as an Example

Hui Li<sup>1\*</sup>, Jinhui Deng<sup>2</sup>, Chunlin Han<sup>1</sup>, Mingshuai Chen<sup>1</sup>, Peipei Liu<sup>1</sup>, Hanpeng Zhang<sup>1</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 李辉, 邓津辉, 韩春林, 陈铭帅, 刘佩佩, 张瀚澎. 海上油田多层砂岩定向井合采初期产能预测方法及应用[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(2): 177-185. DOI: 10.12677/ag.2024.142017

<sup>1</sup>CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin<sup>2</sup>Tianjin Branch of CNOOC Ltd., TianjinReceived: Jan. 7<sup>th</sup>, 2024; accepted: Feb. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The specific oil recovery index method based on DST test data is usually used to evaluate the initial productivity of offshore oil fields. However, due to the change in reservoir physical and fluid properties, as well as the interference between layers of multi-layer production, the value is artificial, resulting in a decrease in the accuracy of the initial productivity prediction and evaluation. According to the characteristics of multi-layer combined production development of directional Wells in offshore oil fields, the relationship between reservoir physical property parameters, permeability variation coefficient, fluid properties and interlayer interference coefficient and specific oil recovery index is established by analyzing the effects of reservoir permeability, permeability variation coefficient, fluid properties and interlayer interference coefficient on productivity. The comprehensive productivity index method and machine learning method are proposed to predict and evaluate the initial productivity of directional Wells by using the actual production data samples. The applicability and prediction effect of different prediction methods are compared and analyzed to provide a reliable method for the initial productivity prediction of multi-zone combined production of oriented Wells in offshore oil fields, so as to improve the accuracy of the initial production evaluation and prediction of new Wells. The example application shows that the application of the machine learning method to evaluate and predict the initial productivity of directional Wells based on big data samples of production Wells is more convenient and accurate than the traditional specific oil recovery index method, and has a good application prospect.

## Keywords

Early Stage of Development, Productivity Evaluation, Influencing Factors, Prediction Method, Multilayer Mining, Machine Learning

Copyright © 2024 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

油层初期产能评价与预测是油藏勘探开发的重要工作，是确定新区产量的关键，海上油田开发的特殊性，使试油、试采常规产能评价方法受到限制。渤海 C 油田古近系东三段和沙河街组为陆相多层砂岩，纵向含油层段多，为兼顾开发效果与生产成本，初期采用 1 套层系定向井多层合采的开发方式[1] [2] [3]。渤中 C 油田油井初期产能预测结果决定了钻井工作量和投资规模，能够科学有效地预测油井初期产能[4] [5]。

目前定向井初期产能预测一般基于比采油指数预测法，对不同时期多种预测方法预测效果评价较少，本文应用探井 DST 测试比采油指数法、综合产能指数法和机器学习法对定向井投产初期产能预测效果分析评价，探寻适用定向井多层合采开发初期产能预测方法，使初期产能预测更准确。

## 2. 油田概况

### 2.1. 油藏地质特征

渤中 C 油田构造位于黄河口凹陷中洼南部斜坡带上, 主体区为受中部一组大断层控制的复杂断块构造, 平面上断层发育有多个断块、多个高点分为不同井区。储层为辫状河三角洲沉积, 岩性以中、细粒岩屑长石砂岩为主, 东三段平均孔隙度 19.4%, 渗透率 736.2 mD, 为中孔中高渗储层; 沙一、二段平均孔隙度 18.9%, 渗透率为 254.7 mD, 为中孔中渗储层, 油层厚度 17.2~88.0 m, 具有纵向含油层段多, 非均质性强的特点, 纵向存在多套流体系统, 油藏类型为层状构造油藏。

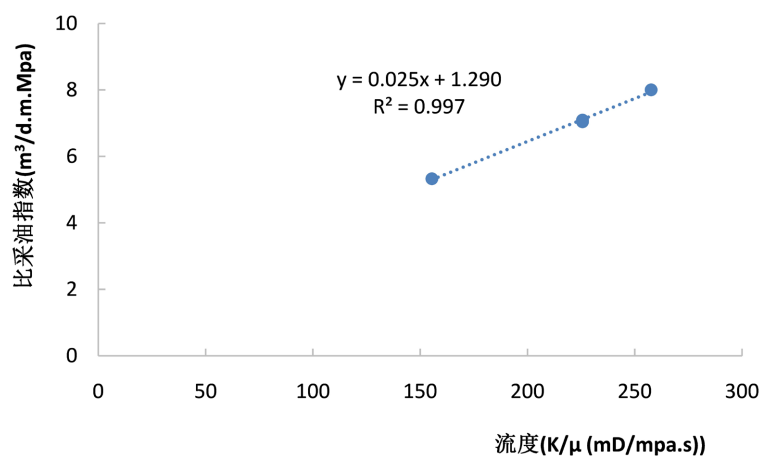
### 2.2. 测试产能分析

渤中 C 油田探井测试资料较少, 有 3 口探井 4 井次测试结果为油层, 测试结果见表 1。

**Table 1.** Statistical table of reservoir test data of exploration well test in Bozhong C oilfield

**表 1.** 渤中 C 油田探井测试油层测试资料统计表

井号	层位	射孔井段(m)	油层厚度(m)	日产油量(m <sup>3</sup> /d)	测井渗透率(mD)	表皮系数	流量(mD/mpa.s)	实测比采油指数(m <sup>3</sup> /MPa.d.m)	校正比采油指数(表皮系数为 3)(m <sup>3</sup> /MPa.d.m)
BZC-1	E <sub>3</sub> d <sup>3</sup>	2923.0~2930.0	7	202.6	830.9	1.17	225.66	10.44	8.37
		2910.0~2917.0	7						
BZC-2	N <sub>1</sub> m <sup>1</sup>	1646.5~1648.0	1.5	102.8	399.2	-0.12	155.47	9.37	6.42
		1650.0~1654.0	4						
BZC-3	N <sub>1</sub> m <sup>1</sup>	1545.0~1548.5	3.5	178.9	1306.5	2.03	225.63	9.79	8.44
		1553.0~1563.0	10						
		3010.0~3018.0	8						
BZC-5	E <sub>3</sub> s <sub>1</sub>	3019.0~3022.0	3	157.3	342.7	6.08	257.63	7.21	9.47
		3032.0~3038.0	6						



**Figure 1.** Relation between specific oil production index and fluidity in Bozhong C exploration well

**图 1.** 渤中 C 油田探井测试比采油指数与流量关系图

由表 1、图 1 可见, 试井渗透率计算地层流量与应用试井表皮系数校正比采油指数相关性较好, 可以用于开发井初期产能预测计算。但探井 DST 测试时间短, 与开发井稳定生产有差别, 且开发井初期为

多层合采层间干扰严重，层间干扰系数等也很难定量表征，给开发井初期产能预测带来难题，因此需针对开发井投产初期产能预测进一步研究。

### 2.3. 开发井初期产能分析

统计渤中 C 油田投产东三段和沙河街组多层合采的 21 口生产井，投产初期产能差异较大，投产厚度 18.3~88.0 m，日产油 23.99~841.59 m<sup>3</sup>/d，比采油指数 0.05~18.7 m<sup>3</sup>/MPa.d.m，流度与比采油指数有一定相关性(图 2)，说明储层渗透率和流体性质是影响生产井初期产能的主要因素，但还受其他因素影响。

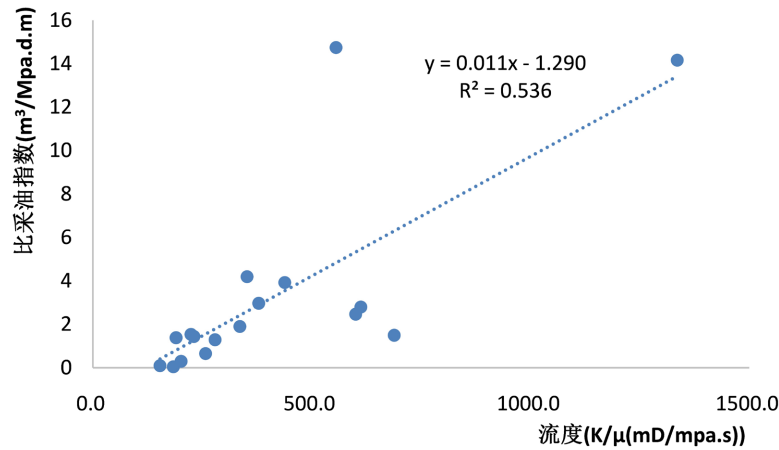


Figure 2. Relation between production specific oil recovery index and mobility of Bozhong C development well

图 2. 渤中 C 油田开发井投产比采油指数与流度关系图

## 3. 油井初期产能影响因素分析

### 3.1. 灰度关联法分析初期产能影响因素

根据定向井投产数据，应用灰色关联法找出影响油井初期比采油指数的影响因素。灰色关联分析是指对一个系统发展变化态势的定量描述和比较的方法[1]，设其母数列为  $X_0 = \{X_0(i) | i = 1, 2, \dots, n\}$ ，对比数列为  $X_j = \{X_j(i) | i = 1, 2, \dots, n\} (j = 1, 2, \dots, m)$ ，其中  $n$  为井数， $m$  为参数个数  $\rho$  为分辨系数，通常取 0.5。则  $X_j(i)$  与  $X_0(i)$  的关联系数  $\xi_j(i)$  可表示为：

$$\xi_j(i) = \frac{\text{Min}_j \text{Min}_i \Delta_j(i) + \rho \text{Max}_j \text{Max}_i \Delta_j(i)}{\Delta_j(i) + \rho \text{Max}_j \text{Max}_i \Delta_j(i)} \quad (1)$$

Table 2. Basic data table of production interval of development well in Bozhong C oilfield

表 2. 渤中 C 油田开发井投产层段基础数据表

井号	KH (mD)	VK	RT (Ω·m)	φ (%)	μ <sub>o</sub> (mPa·s)	H <sub>有效</sub> (m)	VSH (%)	生产压差 (MPa)	K/μ (mD/mpa.s)	比采油指数 (m <sup>3</sup> /MPa.d.m)
A1	258.69	0.62	17.13	18.75	0.59	31.50	10.60	3.31	438.45	3.92
A2	354.31	0.86	22.86	18.51	0.59	33.10	11.46	3.17	600.52	2.46
A5	198.20	0.97	18.02	18.64	0.59	38.70	10.46	3.45	335.94	1.90
A6	366.43	0.69	29.88	19.50	1.04	25.50	12.34	3.16	352.33	4.33
A10	294.51	0.54	21.68	19.88	1.04	19.40	13.19	3.72	283.18	2.97

续表

A16	406.19	0.93	33.84	17.40	0.59	45.20	11.29	4.11	688.45	1.49
A18	132.21	0.86	20.30	17.75	0.59	32.20	14.18	3.89	224.09	1.53
A21	577.83	0.52	44.66	21.71	1.04	24.20	7.02	2.36	555.61	14.73
A26	521.05	0.82	26.65	21.27	1.65	32.60	11.63	6.92	315.79	1.29
A28	378.63	0.99	22.48	19.37	1.04	51.00	12.62	8.42	364.06	0.65
A29	365.03	0.82	20.57	21.17	1.81	50.70	8.64	13.59	201.68	0.29
A33	1107.34	0.77	61.84	20.96	1.81	51.90	10.89	5.52	611.79	2.79
B1	381.56	0.86	22.83	18.37	1.65	88.00	12.88	2.76	231.25	1.44
B3	271.68	0.77	12.58	17.47	1.43	69.00	12.99	1.73	189.98	1.38
B7	264.29	0.46	17.67	18.62	1.44	40.40	11.36	12.80	183.53	0.05
均值	391.86	0.77	26.20	19.29	1.13	42.23	11.44	5.26	371.78	2.75
标准差	220.50	0.16	12.15	1.37	0.46	17.50	1.76	3.54	163.33	3.41

**Table 3.** Specific oil recovery index of development wells and correlation of various parameters in Bozhong C oilfield**表 3.** 渤中 C 油田开发井比采油指数与各参数关联系数表

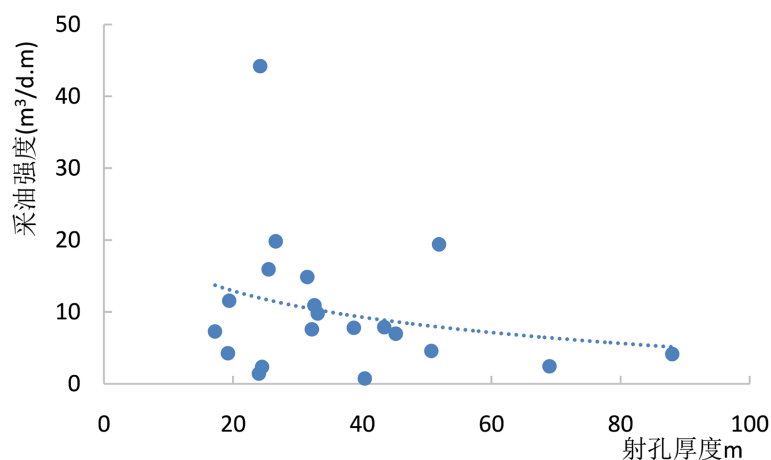
参数	RT	K/ $\mu$	K <sub>H</sub>	$\phi$	$\Delta P$	V <sub>SH</sub>	H <sub>有效</sub>	$\mu_o$	V <sub>k</sub>
$\gamma(X_o, X_i)$	0.8518	0.8281	0.8211	0.8033	0.7936	0.7950	0.7717	0.7331	0.7461

依据开发井初期产能影响因素,选取油田开发井投产层段基础数据表(表 2)作为比较数列,求出比采油指数与各参数的灰色关联度。计算结果见表 3,计算结果表明对比采油指数影响较大的主要参数为:电阻率、地层流度、渗透率。

### 3.2. 地层流度

渗透率是反映储集层物性最重要的参数[6] [7],根据定向井产能公式可知,油井产量与储层渗透率成正比,与原油粘度成反比。渤中 C 油田 DST 测试结果表明,地层流度是影响产能的主要因素。

### 3.3. 层间干扰因素

**Figure 3.** Relation between oil production intensity and perforation thickness of single well in Bozhong C oilfield**图 3.** 渤中 C 油田单井采油强度与射孔厚度的关系

渤中 C 油田生产井射孔井段长, 合采层数多, 层间干扰大, 从渤中 C 油田单井采油强度与射孔厚度的关系(图 3)中可以看出, 射孔厚度大于 35 m 后, 随着射孔厚度的增加, 采油强度反而下降, 表明层间干扰对初期产能影响, 使得采油强度下降。

### 3.4. 地层电阻率和含油饱和度

地层电阻率和含油饱和度既是评价油藏石油地质储量、储集层油相渗流能力的重要参数, 即含油饱和度越高、油相渗流能力越强。油田测试资料表明, 含油饱和度越大, 油井产能(比采油指数)也越高(见图 4)。

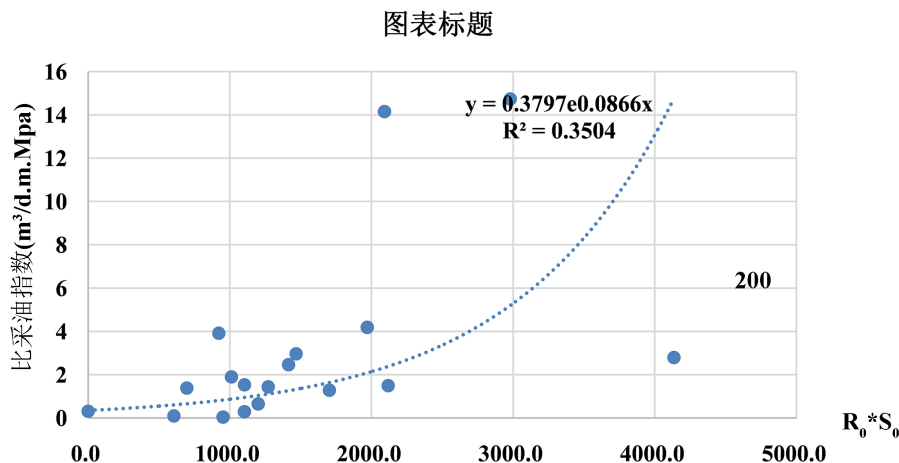


Figure 4. Relation between product of resistivity and oil saturation and specific oil production index

图 4. 电阻率与含油饱和度乘积与比采油指数关系图

## 4. 多层合采定向井初期产能预测方法及对比

不同的产能评价预测方法适应不同时期勘探开发, 探井 DST 测试比采油指数法主要应用区块开发初期, 能够满足 ODP 对区块产能总体认识, 为开发规模、投资和排采工艺等提供依据; 开发井产能综合指数法适用开发初期开展试验区或部分开发井区投产, 对后继开发井的产能预测评价, 可以提高单井初期产能预测的准确率, 为下步开发方案实施提供依据; 智能算法机器学习法是近年随着大数据的应用, 新出现的产能预测方法, 预测的准确率主要受样本数量和算法优化的影响, 样本数量越多, 预测结果越准确。

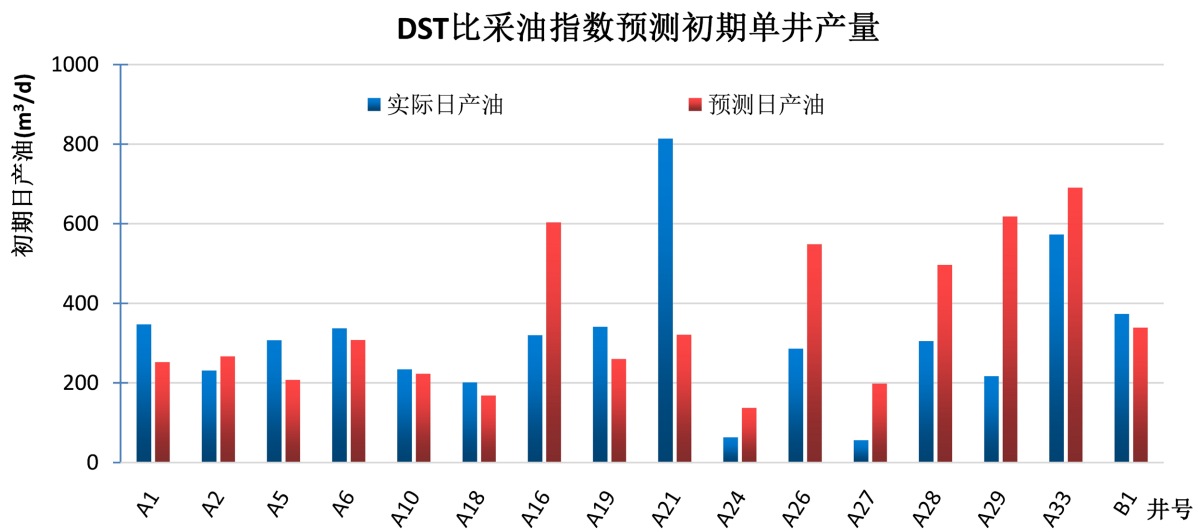
### 4.1. 探井 DST 测试比采油指数预测法

渤中 C 油田开发井投产前, 根据投产厚度和生产压差预测出生产井的初期产能, 油井初期产能计算公式如下:

$$Q_o = \alpha \times \beta \times \gamma \times J_o \times \Delta P \times h \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为层间干扰系数,  $\beta$  为测试时间校正系数,  $\gamma$  为表皮校正系数,  $J_o$  为推荐比采油指数  $\text{m}^3/(\text{MPa}\cdot\text{d}\cdot\text{m})$ ,  $h$  为油井射孔有效厚度  $\text{m}$ ;  $\Delta P$  为油井生产压差  $\text{Mpa}$ 。

考虑了层间干扰和测试时间的影响, 根据生产井合采层数和单层厚度等确定层间干扰系数 0.3~0.7, 测试时间校正系数 0.6, 预测 16 口井, 有 50% 的井预测产能误差在 20% 以内, 结果物性好的井预测产量偏低, 物性差的井预测产量偏高(见图 5)。

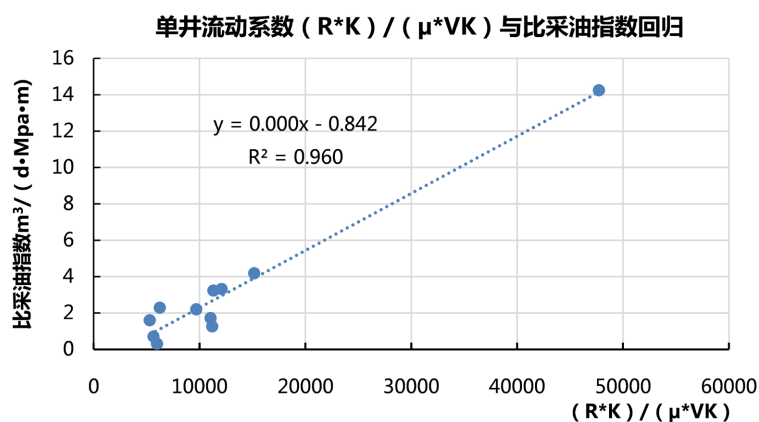


**Figure 5.** Comparison between initial production and actual production predicted by the DST recommended ratio oil recovery index

**图 5.** 探井 DST 推荐比采油指数预测初期产量与实际产量对比图

#### 4.2. 生产井综合产能指数预测法

渤中 C 油田定向井投产初期产能与预测有较大差异，主要是因为油层厚度、渗透率和层间干扰系数等因素引起。根据投产井的初期实际生产数据，利用实际比采油指数与投产层参数的相关关系进行预测，参考影响因素分析结果，结合油藏工程理论，确定复合参数 $(R \cdot K) / (\mu \cdot V_k)$ 作为特征参数值，电阻率  $R$  和渗透率  $k$  为生产层的厚度加权平均值、 $V_k$  为投产层渗透率变异系数， $\mu$  为地层原油粘度，预测模型相关系数较高( $R^2$ 为 0.9606)，预测 14 口井初期产量(以预测产量误差在 20% 以内为准)单井预测符合率为 71%，如新投产 A40 井预测产量为 332  $m^3/d$ ，实际投产初期日产油 324.5  $m^3/d$ ，误差为 3% (图 6)。



**Figure 6.** Relationship between comprehensive flow coefficient and specific oil recovery index of producing wells

**图 6.** 生产井综合流动系数与比采油指数关系图

#### 4.3. 机器学习预测方法

本次机器学习应用随机森林算法，是一种个体学习器全部为决策树的同质集成学习器[8] [9] [10]。随机森林模型由多棵决策树模型组成，在进行预测时，由多棵决策树进行联合预测，精度较高[11] [12] [13]

[14] [15]。机器学习计算结果对日产油影响因素进行排序,依次为:电阻率、渗透率、含烃饱和度、生产厚度、泥质含量和孔隙度等。

考虑了油田开发井投产层段基础数据的影响,预测 28 口井(图 7),有 53%的井预测产能误差在 20% 以内,93%的井预测产能误差在 30%以内,结果表明机器学习预测法具有较高的准确率。

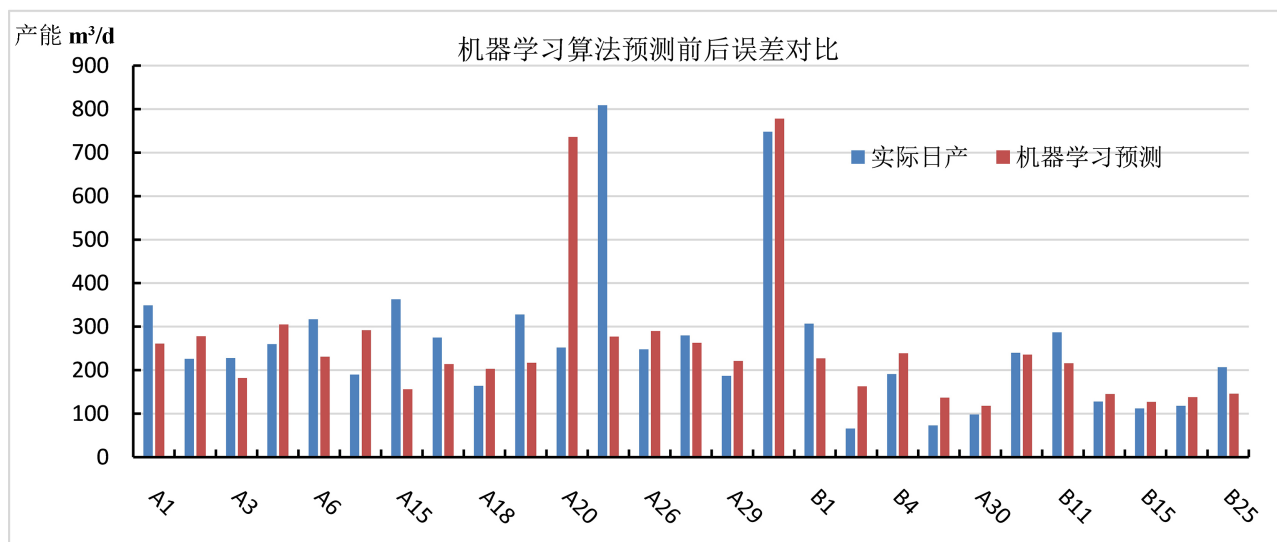


Figure 7. Machine learning yield prediction results

图 7. 机器学习产量预测结果

## 5. 结论与认识

1) 影响油井初期产能的主要因素包括电阻率、地层流度以及渗透率,且电阻率、地层流度以及渗透率均与比采油指数呈正比。

2) 探井 DST 测试比采油指数法适用于开发初期,可满足 ODP 对产能认识需要;开发井产能综合指数法建立复合参数产能预测模型,可以提高单井初期产能的预测精度;在学习数据样本足够的前提下,机器学习法可以考虑更多初期产能影响因素,能够更快捷、智能地达到较好的预测效果,提高预测精度。

3) 油井初期产能的准确预测可以减小开发风险,定向井多层合采初期产能受到多种因素的影响,通过 C 油田实例应用,可以利用大数据收集同一区域油藏地质特征相同的定向井投产初期产能数据,作为学习样本,通过优化机器学习算法建立一套适合海上油气田油井初期产能预测的新方法,为提高单井初期产能预测准确率提供可靠的科学依据。

## 基金项目

中国海油十四五重大专项“海上深层/超深层油气勘探地质作业关键技术研究”(KJGG2022-0405);中海油能源发展股份有限公司重大科研专项(课题)“深层深井地层压力预测监测技术研究”(HFKJ-ZX-GJ-2023-05-01)。

## 参考文献

- [1] 周守为. 中国近海典型油田开发实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 28-29.
- [2] 周守为. 海上稠油高效开发新模式研究及应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2007, 29(5): 1-4.
- [3] 王德民. 分层开采理论研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985.



- 
- [4] 王进财, 赵伦, 张祥忠, 等. 古潜山岩溶储集层特征及其对产能的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 779-786.
- [5] 李隆新, 王梦雨, 胡勇, 等. 缝洞型碳酸盐岩地下储气库高速注采渗流特征及库容动用机理[J]. 天然气工业, 2023, 43(10): 73-82.
- [6] 刘彦成, 罗宪薄, 康凯, 等. 陆相多层砂岩油藏渗透率表征与定向井初期产能预测——以蓬莱 19-3 油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 97-103.
- [7] 薛婷, 黄天镜, 成良丙, 等. 鄂尔多斯盆地庆城油田页岩油水平井产能主控因素及开发对策优化[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(12): 1880-1888.
- [8] 李波, 罗宪波, 刘英, 等. 海上稠油油田合理单井产能预测新方法[J]. 中国海上油气田, 2008, 20(4): 243-245.
- [9] 李传亮. 油藏工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [10] Breiman, L.E.O. (2001) Random Forests. *Machine Learning*, **45**, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- [11] 李欣海. 随机森林模型在分类与回归分析中的应用[J]. 应用昆虫学报, 2013, 50(4): 1190-1197.
- [12] 韩学婷, 杨刚, 何沛其, 等. 基于储层特征不确定性的产能分析——以古交区块为例[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 157-168.
- [13] 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.
- [14] 赵军龙, 丁阳阳, 池佳玮, 等. 甘陕古河中段侏罗系延 10 油藏初产产能预测技术研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(2): 723-729.
- [15] 张瀚澎, 任大忠, 张荣军, 等. 苏里格致密砂岩气藏流体微观分布规律及影响因素[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(6): 744-757.