

柴达木盆地英雄岭页岩油甜点敏感性参数及综合评价

张娜^{1,2}, 陈琰^{1,2}, 伍坤宇^{1,2}, 王波^{1,2}, 王付勇³, 张博策^{1,2}, 李亚锋^{1,2},
刘睿⁴, 邓立本^{1,2}, 侯欢^{1,2}, 李昕^{1,2}

(1. 青海省高原咸化湖盆地油气地质重点实验室, 甘肃 敦煌 73620; 2. 中国石油天然气股份有限公司 青海油田分公司
勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202; 3. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083; 4. 西南石油大学
地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要:针对柴达木盆地英雄岭页岩油传统岩-电图版甜点综合评价准确率低、甜点敏感性参数优选难以及适应性评价标准建立难等问题,提出了一种基于主成分分析(PCA)的多参数加权与层次分析法结合的综合评价思路,以实现英雄岭页岩油甜点敏感性参数的科学筛选与综合量化评价。研究结果表明:①通过皮尔逊相关性分析,优选出孔隙度、含油饱和度、总有机碳含量、岩石热解游离烃含量、脆性矿物含量及碳酸盐矿物含量6项核心评价参数;②结合主成分载荷与方差贡献率,明确了6项核心评价参数权重,构建了甜点线性加权综合评价模型和分级综合评价标准;③在新评价模型指导下,C12井和C20井两个甜点层试油分别获日产原油17.61 m³和13.70 m³,CP13井压后日产原油20.50 m³,且该井水平段综合指数与油相示踪剂产液剖面贡献率呈显著正相关关系,证实了该模型的适用性与可推广性。

关键词:主成分分析;敏感性参数;综合评价;甜点;页岩油;英雄岭地区;柴达木盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Sensitive parameters and comprehensive evaluation of shale oil sweet spots in the Yingxiongling area, Qaidam Basin

ZHANG Na^{1,2}, CHEN Yan^{1,2}, WU Kunyu^{1,2}, WANG Bo^{1,2}, WANG Fuyong³, ZHANG Boce^{1,2},
LI Yafeng^{1,2}, LIU Rui⁴, DENG Libeng^{1,2}, HOU Huan^{1,2}, Li Xin^{1,2}

(1. Qinghai Provincial Key Laboratory of Plateau Saline-Lacustrine Basinal Oil & Gas Geology, Dunhuang, Gansu 736202, China;
2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202,
China; 3. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
4. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: When used for the comprehensive evaluation of shale oil sweet spots in the Yingxiongling area, the traditional lithology-electric crossplots face many challenges, including low accuracy and difficulties in selecting optimal sensitive parameters and establishing adaptive evaluation criteria. To address these limitations, we propose a comprehensive evaluation approach that integrates principal component analysis (PCA)-based multi-parameter weighting with the analytic hierarchy process (AHP). This approach facilitates the scientific selection of sensitive parameters and the comprehensive quantitative evaluation of shale oil sweet spots in the Yingxiongling area. Six core parameters are identified through Pearson correlation analysis: porosity, oil saturation, total organic carbon (TOC) content, rock pyrolysis-derived free hydrocarbons content (S_1), brittle mineral content, and carbonate content. The weights of these parameters are determined based on the loadings and variance contribution rates of the principal components. Accordingly, a linearly weighted comprehensive evaluation model for sweet spots, along with criteria for classification and comprehensive evaluation, is established. Under the guidance of this novel model, daily oil flow rates of 17.61 m³

收稿日期:2025-08-07;修回日期:2025-10-17。

第一作者简介:张娜(1988—),女,工程师,非常规油气勘探开发。E-mail: 83834649@qq.com。

通信作者简介:伍坤宇(1986—),男,博士,高级工程师,非常规油气勘探开发。E-mail: wukunyu1986@126.com。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技重大专项(2023ZZ15)。

and 13.7 m³ were tested from sweet spot intervals in wells C12 and C20, respectively, while a post-fracturing daily oil flow rate of 20.5 m³ was tested in well CP13. For the horizontal section of well CP13, the comprehensive index showed a significant positive correlation with the liquid production contribution rate detected using an oil-phase tracer. These results demonstrate that the proposed model is suitable and can be widely applied in shale oil sweet spot evaluation.

Key words: principal component analysis (PCA), sensitive parameter, comprehensive evaluation, sweet spot, shale oil, Yingxiongling area, Qaidam Basin

引用格式:张娜,陈琰,伍坤宇,等. 柴达木盆地英雄岭页岩油甜点敏感性参数及综合评价[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(3): 920-935. DOI: 10.11743/ogg20260314.

ZHANG Na, CHEN Yan, WU Kunyu, et al. Sensitive parameters and comprehensive evaluation of shale oil sweet spots in the Yingxiongling area, Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(3): 920-935. DOI: 10.11743/ogg20260314.

页岩油作为全球能源增长的新领域,在世界能源格局中的地位日益提升^[1-2]。2018年,美国页岩油产量全面超过常规油,成为原油产量的主要来源(占比超过60%)^[3-4]。“十四五”期间,中国陆相页岩油年产量突破400×10⁴ t,已成为原油年产量稳定在2×10⁸ t以上的重要支撑^[5-7]。然而,相较于常规油,页岩油勘探开发面临非均质性强、效益增储难度大和高度依赖压裂改造等技术挑战,地质风险和开发成本显著上升,亟需探索评价新方法 with 工程新技术以降低地质风险与投资成本^[8-10]。

近年来,随着中国陆相页岩油勘探工作的推进,针对不同类型页岩油的甜点敏感参数和评价技术研究也已逐步开展^[11]。孙龙德等总结了夹层型和混积型页岩油源-储关系,认为储层的物性、含油气性和脆性是这类页岩油甜点评价的关键指标^[12]。白雪峰等针对四川盆地东北部侏罗系凉高山组页岩层系甜点综合评价较为薄弱的问题,通过优选含油性、物性、弹性能和可压裂性4个甜点敏感参数,并基于层次分析法建立了甜点综合评价模型^[13]。此外,微地震监测与地震敏感性融合模型的应用也使得甜点预测的精度和可靠性得到提升^[14]。尽管目前各类评价模型在页岩油甜点评价中得到了广泛应用,但受页岩油地质特点差异影响,如何构建适配性最优的甜点评价模型依然存在挑战。实践表明,随着页岩油甜点评价模型日益多样化,各类模型的局限性也日益凸显。目前大多数模型未充分考虑实际地质条件的差异和复杂性^[15-16],仅聚焦相对简单的构造区带,例如陆内克拉通^[17-18]和裂谷^[19-20]等。因此,开发适用于复杂地质条件且具有更强适应性的甜点评价模型,仍是重要的研究方向。

柴达木盆地西部坳陷英雄岭页岩油勘探取得重要突破,为柴达木盆地页岩油勘探开发拉开了序幕^[21-24]。与中国其他页岩油相比,英雄岭页岩油具有更为复杂的地质条件,包括:①岩性混积,甜点层多但分散;②烃

源岩有机质以I-II₁型干酪根为主,氢指数高但有机碳丰度偏低;③历经多期构造改造,地表和地下“双复杂”等^[25-27]。这些复杂因素给页岩油甜点的科学定量化评价带来了极大挑战。主要体现在以下两个方面:①目的层岩性以细粒混积岩为主,层间电性差异小,传统岩-电版定量综合评价准确率低。此外,仅选用孔隙度和电阻率等少数静态参数开展分类评价,难以全面反映英雄岭页岩油在饱和度、可动性及非均质性等方面的差异。②沉积环境高频变化条件下形成的混积型页岩油甜点富集影响因素多,敏感性参数优选困难,导致评价标准适应性较差,制约了甜点评价准确性与勘探成功率的提升。为解决上述问题,针对地质条件复杂的英雄岭页岩油甜点评价提出了一种基于主成分分析的多参数加权与层次分析法结合的综合评价思路,以期实现英雄岭页岩油甜点敏感性参数的科学筛选与综合量化评价,为咸化湖盆混积型页岩油的精准勘探与高效开发提供技术支撑。

1 研究区概况

柴达木盆地为阿尔金山、东昆仑山和祁连山环绕,是青藏高原北缘最大的沉积盆地,也是该区唯一实现油气商业化开发的含油气盆地。盆地整体呈西宽东窄的不规则菱形,可划分为柴西坳陷、阿尔金山前带、柴北断陷、三湖坳陷和德令哈隆起5个一级构造单元,其中柴西坳陷是盆地新生界沉积中心^[28-29]。英雄岭次级凹陷位于柴西坳陷西部,为古近系生烃中心,其西北部的干柴沟区块为一个由阿尔金山前向盆内倾没的大型鼻状构造,埋深适中,断裂发育程度相对较低,构造稳定,是盆地当前页岩油勘探开发的先导试验区(图1a,b)。

研究区新生界发育5套地层,由老至新包括古新统-始新统路乐河组(E₁₋₂l)、始新统-渐新统下干柴沟组(E₂₋₃xg)、渐新统-中新统上干柴沟组(E₃sg-N₁sg)、中

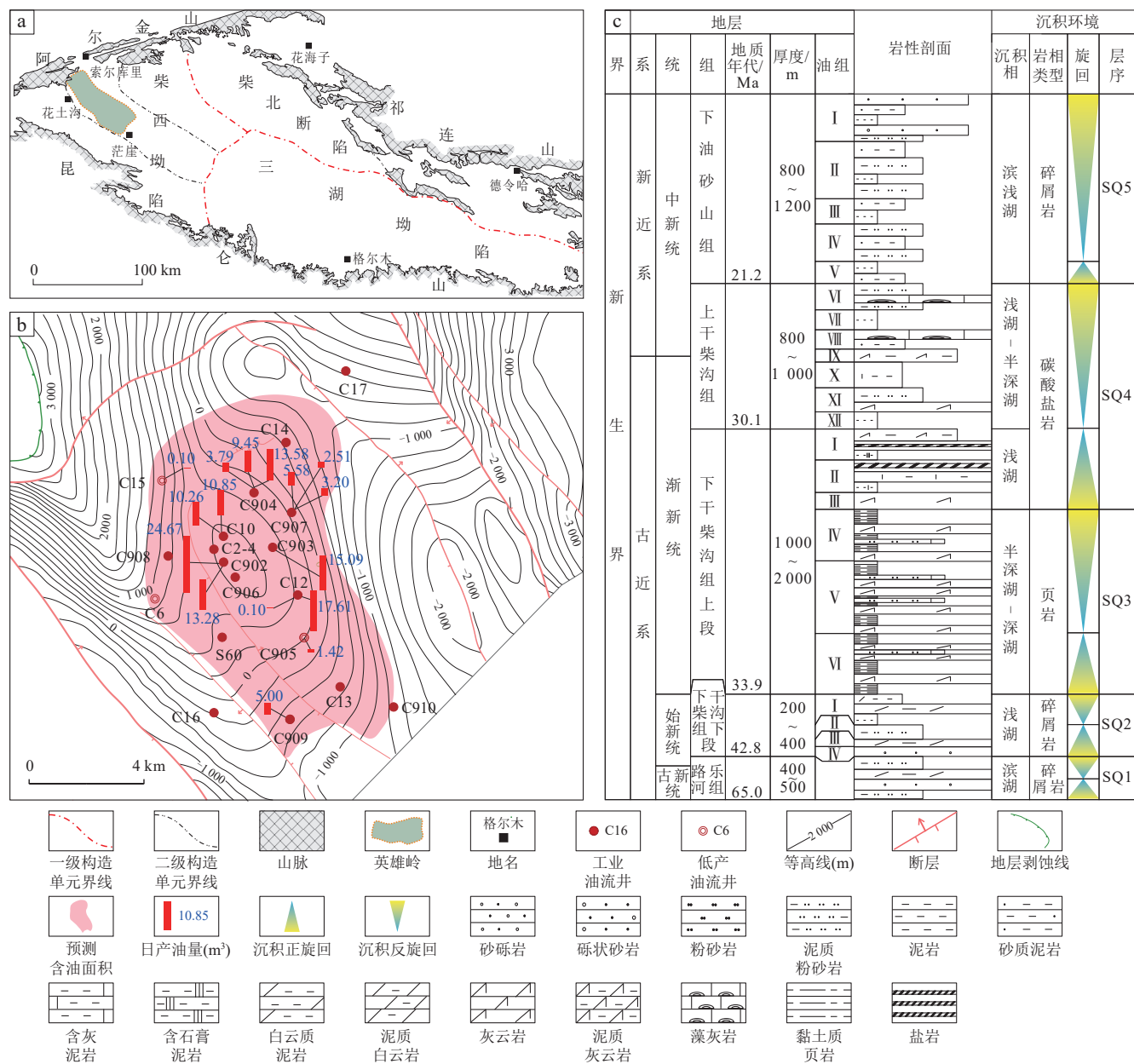


图1 柴达木盆地构造单元划分(a)、干柴沟先导试验区勘探成果(b)和英雄岭地区地层综合柱状图(c)

Fig. 1 Structural unit division (a), exploration achievements from the pilot test area of the Ganchaigou Formation (b), and composite stratigraphic column of the Yingxiongling area (c) of the Qaidam Basin

新统下油砂山组(N_{xy})以及中新统上油砂山组(N_{sy})。其中,下干柴沟组分为下段($E_{2-3}xg^1$)和上段($E_{2-3}xg^2$),而下干柴沟组上段($E_{2-3}xg^2$)IV—VI油组为页岩油勘探开发的主要目的层,厚度1 000 ~ 2 000 m(图1c)。生产中将该套页岩油层段按高频沉积旋回自上而下划分为1—23号箱体和上(4—6号箱体)、中(12—16号箱体)、下(19—21号箱体)3个甜点集中段^[25]。李国欣等^[21]研究表明,下干柴沟组上段为盆地古近系最优质烃源岩层,具有“低碳富氢”的特点,其总有机碳含量(TOC)平均值仅为0.91%,氢指数为200 ~ 800 mg/g。岩相组合以纹层状黏土质页岩及云灰

岩与薄层状灰云岩互层发育为主,源-储组合关系较好。储层储集空间以微纳米级白云石晶间孔、层理缝和构造微裂缝为主。 $E_{2-3}xg^2$ 顶部发育叠合厚度为100 ~ 300 m的区域性盐岩盖层,保存条件较好,地层压力系数为1.7 ~ 2.1。

勘探实践表明,传统依赖孔隙度和电阻率等少数岩石物理参数构建的岩-电图版难以全面反映页岩油甜点的多维度综合特征,导致评价结果与实际生产之间存在显著偏差。因此,传统岩-电图版的评价方法难以适应页岩油甜点受多参数耦合控制的特点,图2可见传统的电阻率与孔隙度交汇图版法在研究区只能

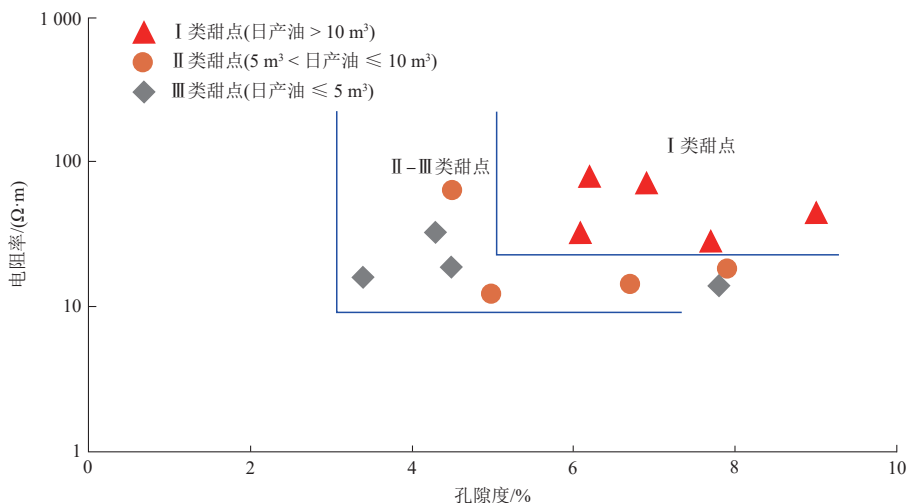


图2 柴达木盆地英雄岭地区基于测井孔隙度和电阻率的传统页岩油甜点识别图版

Fig. 2 Traditional chart based on porosity and resistivity for shale oil sweet spot identification in the Yingxiongling area, Qaidam Basin

区分出 I 类甜点,难以准确界定 II 类和 III 类甜点之间的界线。为解决多参数耦合控甜的问题,需基于多参数数据集,采用多元统计方法构建综合甜点评价模型。已有研究指出,甜点发育规律在不同程度上受 *TOC*、有效孔隙度、含油饱和度、脆性矿物含量、压力系数和碳酸盐矿物含量等^[21]多参数共同影响,但过多的维度使得主要特征参数提取、权重计算和评价模型适用性面临困难。为此,需选择一种能够有效降维并保留原始数据中主要信息特征的技术方法用于综合评价模型的构建。主成分分析法(principal component analysis, PCA)作为一种无监督降维和数据特征提取技术在地质研究中已得到广泛应用,并取得较好的应用效果。例如,在碳酸盐岩裂缝识别中,基于主成分分析法对不同方法的裂缝识别结果进行综合考量和降维分析,能够消除不同方法之间存在的偏差以及工况影响,实现地层裂缝的精准预测^[30];在岩性识别中,利用主成分分析方法,建立岩性判定指数,能够解决地层岩性多解问题,精准识别岩性^[31];在油气勘探成效评价中,采用主成分分析方法,构建油气勘探成效综合评价模型,能够实现油气勘探成效定量和等级评价^[32]。本研究在前期试油及岩心测试成果的基础上,通过主成分分析法筛选和提炼适用于综合评价模型的核心参数,并通过构建多指标线性加权综合评价方法,实现柴达木盆地英雄岭页岩油甜点的准确评价。

2 技术方法

本文针对柴达木盆地英雄岭页岩油甜点评价的技术需求,提出了一个多元统计分析的多参数定量评价

技术流程,主要包括以下步骤。

2.1 参数预处理与相关性筛选

首先,选取影响产量的地质和工程参数,对这些参数与稳定日产量进行皮尔逊相关性分析,以剔除冗余或弱相关因素并保留与产能高度相关的核心指标。皮尔逊相关系数,无量纲(r_{xy})定义为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中: x_i 和 y_i 分别为第 i 个样本的评价指标值和日产量, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为其样本平均值。其中 $\bar{x}$ 的单位与评价指标一致, $\bar{y}$ 的单位为 m^3/d 。 r_{xy} 的取值范围为 $[-1, 1]$,其绝对值越大表示线性相关性越强, $r_{xy} > 0$ 为正相关, $r_{xy} < 0$ 为负相关。

2.2 PCA 与适应性检验

在完成核心指标的相关性筛选之后,为了量化各参数对甜点评价的相对贡献并构建稳健的综合评价模型,本文进一步引入 PCA 对多项指标进行降维与权重分配。PCA 旨在通过正交线性变换,将多个原始变量转化为少数几个彼此无关的主成分,在最大程度保留总体方差的同时,消除变量间的多重共线性对模型的干扰。

在展开 PCA 之前,必须检验数据是否适合进行因子分析。首先,利用 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 取样适切性检验评估样本与变量间的相关程度;当 KMO 指数大于 0.5 时,表明变量间具有足够的公共方差,适宜应用 PCA。其次,采用 Bartlett 球形度检验以验证相关

矩阵是否偏离单位矩阵;当其显著性水平(p)小于0.05时,可拒绝单位矩阵假设,说明样本数据的相关性达到了开展PCA的统计要求。

通过检验后,对标准化的数据矩阵 Z 构造相关系数矩阵:

$$R = \frac{1}{n-1} Z^T Z \quad (2)$$

式中: R 为变量的相关系数矩阵,矩阵中元素为变量间的相关系数,无量纲; n 为样本数量,无量纲; Z 为标准化后的数据矩阵,矩阵中元素为各指标的标准化值,无量纲。

求解其特征值与特征变量:

$$Ra_k = \lambda_k a_k \quad (3)$$

式中: λ_k 与 a_k 分别为第 k 个特征值和对应特征变量,无量纲。第 k 个主成分定义为:

$$Y_k = Za_k \quad (4)$$

式中: Y_k 为第 k 个主成分的得分,无量纲。

各主成分的方差贡献率为:

$$P_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \times 100\% \quad (5)$$

式中: P_k 为第 k 个主成分的方差贡献率,%; p 为原始变量的数量,无量纲。

依据碎石图与累计方差贡献率选择前两个主成分,并通过Varimax正交旋转以明确因子载荷结构。

2.3 权重计算与归一化

根据每个指标在各主成分中的载荷 a_{jk} 和主成分特征值 λ_k ,按公式计算出各指标的初始权重:

$$w_j = \sum_{k=1}^2 \left(\frac{a_{jk}}{\sqrt{\lambda_k}} \frac{\lambda_k}{\lambda_1 + \lambda_2} \right) \quad (6)$$

为保证权重总和为1,对初始权重进行归一化处理:

$$W_j = \frac{w_j}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (7)$$

式中: a_{jk} 为第 j 个指标在 k 个主成分上的载荷,无量纲; w_j 为第 j 个指标的初始权重,无量纲; W_j 为第 j 个指标的归一化权重系数,无量纲。

2.4 综合评价模型构建

对6项核心指标再次进行Z-Score标准化,消除量纲差异,并将标准化值 $Z(I_j)$ 按权重系数 W_j 线性加权,构建综合指数:

$$F = \sum_{j=1}^n [W_j Z(I_j)] \quad (8)$$

式中: W_j 为主成分分析后归一化的权重系数; $Z(I_j)$ 为第 j 项指标的标准化值。

根据 F 的取值范围,将各层段划分为Ⅰ—Ⅲ类页岩油甜点以及水层、干层,以实现优势产层的精细化识别;随后,通过将模型预测的甜点分级与独立试油产能数据进行对比,评估模型的准确性与适用性。

3 应用结果

3.1 甜点评价指标优选与验证

为了筛选出对页岩油产能影响显著的评价参数,基于柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区9口直井20层的测井、岩心与试油数据,选择包括烃源岩(总有机碳含量 TOC)、储层(碳酸盐矿物含量、石英含量、纹层指数和孔隙度)、油藏流体(含油饱和度、岩石热解游离烃含量 S_1 和压力系数)、储层地质力学(脆性指数和脆性矿物含量)及工程改造参数(射孔厚度、压裂总液量和压裂总砂量)在内的5类、13个评价指标作为量化表征页岩油甜点的参数,对其试油期间产液量稳定阶段的平均日产油量(稳定日产油量)进行皮尔逊相关性分析,相关性分析结果见表1。

优选出6个与日产油量呈显著正相关关系的参数,包括:①孔隙度,与日产油量的相关系数(r)=0.78,显著性概率值(p)<0.01,表明储集性能与产能之间存在显著正相关关系;②含油饱和度,与日产油量的 r =0.65, p <0.01,正相关性较强,进一步验证了饱和度是甜点发育的主要敏感参数之一;③ TOC ,与日产油量的 r =0.66, p <0.01,说明尽管柴西坳陷咸化湖盆烃源岩 TOC 整体偏低,但相对较高的 TOC 仍对甜点发育起到关键控制作用;④ S_1 ,与日产油量的 r =0.73, p <0.01,指示游离油丰度是影响单井试油效果的重要因素之一;⑤脆性矿物含量,与日产油量的 r =0.66, p <0.01,表明脆性矿物含量及储层的可改造性与产能呈正相关关系;⑥碳酸盐矿物含量,与日产油量的 r =0.68, p <0.01,一定程度上反映储层岩性对甜点层段发育的控制作用。综上所述,孔隙度、含油饱和度、 TOC 、 S_1 、脆性矿物含量及碳酸盐矿物含量为页岩油甜点评价的核心参数指标(表2),为后续主成分分析及综合权重确定提供了可靠依据。

除单变量相关性外,本研究还对各敏感参数与日产油量进行了线性回归拟合(图3)。结果显示 S_1 、

表1 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区页岩油井皮尔逊相关系数

Table 1 Matrix of the Pearson's correlation coefficients for shale oil wells in the Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam Basin

评价指标	皮尔逊相关系数													
	稳定日 产油量	TOC	孔隙度	碳酸盐矿 物含量	石英 含量	纹层 指数	含油 饱和度	S ₁	射孔 厚度	压裂 总液量	压裂 总砂量	脆性 指数	脆性矿物 含量	压力 系数
稳定日产油量	1.000	0.656	0.780	0.677	-0.509	0.008	0.645	0.727	-0.040	-0.053	-0.242	-0.171	0.665	0.268
TOC	0.656	1.000	0.491	0.594	-0.410	-0.142	0.363	0.699	-0.011	-0.056	-0.226	0.044	0.609	0.132
孔隙度	0.780	0.491	1.000	0.334	-0.267	-0.096	0.485	0.676	-0.164	-0.219	-0.215	-0.403	0.317	0.339
碳酸盐矿物含量	0.677	0.594	0.334	1.000	-0.833	0.128	0.352	0.363	0.308	0.253	-0.100	0.085	0.928	0.282
石英含量	-0.509	-0.410	-0.267	-0.833	1.000	-0.132	-0.144	-0.214	-0.331	-0.219	0.217	-0.115	-0.567	-0.307
纹层指数	0.008	-0.142	-0.096	0.128	-0.132	1.000	0.096	-0.102	0.098	0.163	0.067	0.363	0.102	-0.083
含油饱和度	0.645	0.363	0.485	0.352	-0.144	0.096	1.000	0.250	-0.118	-0.025	0.056	-0.092	0.427	0.466
S ₁	0.727	0.699	0.676	0.363	-0.214	-0.102	0.250	1.000	-0.314	-0.335	-0.278	-0.160	0.396	0.033
射孔厚度	-0.040	-0.011	-0.164	0.308	-0.331	0.098	-0.118	-0.314	1.000	0.580	0.218	0.269	0.236	-0.052
压裂总液量	-0.053	-0.056	-0.219	0.253	-0.219	0.163	-0.025	-0.335	0.580	1.000	0.689	0.224	0.229	-0.045
压裂总砂量	-0.242	-0.226	-0.215	-0.100	0.217	0.067	0.056	-0.278	0.218	0.689	1.000	0.241	-0.003	0.133
脆性指数	-0.171	0.044	-0.403	0.085	-0.115	0.363	-0.092	-0.160	0.269	0.224	0.241	1.000	0.050	0.012
脆性矿物含量	0.665	0.609	0.317	0.928	-0.567	0.102	0.427	0.396	0.236	0.229	-0.003	0.050	1.000	0.213
压力系数	0.268	0.132	0.339	0.282	-0.307	-0.083	0.466	0.033	-0.052	-0.045	0.133	0.012	0.213	1.000

注:TOC表示总有机碳含量;S₁表示岩石热解游离烃含量。

表2 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区页岩油井关键参数评价指标

Table 2 Key parameters as evaluation indices for shale oil sweet spots in shale oil wells in the Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam Basin

井号	稳定日产油量/m ³	烃源岩特征	储层特征			油藏流体特征		可压性
		TOC/%	碳酸盐矿物含量/%	孔隙度/%		含油饱和度/%	S ₁ /(mg/g)	脆性矿物含量/%
C10-1	10.26	1.05	0.546	5.39		55.26	1.70	0.763
C10-2	10.85	1.09	0.621	6.15		58.85	2.65	0.808
C12	0.01	0.52	0.524	3.30		30.01	0.99	0.725
C15-1	0.01	0.89	0.462	4.01		40.68	0.89	0.701
C15-2	0.01	0.78	0.458	3.31		40.76	1.53	0.687
C15-3	0.01	0.76	0.465	5.42		18.15	1.72	0.704
C902-1	13.28	0.95	0.554	6.48		57.00	1.90	0.773
C902-2	24.67	1.06	0.546	9.55		66.23	4.36	0.744
C903	15.09	1.52	0.596	7.09		59.60	3.20	0.819
C904-1	13.58	0.90	0.631	6.31		60.51	0.92	0.790
C904-2	9.45	0.88	0.595	6.19		54.95	0.58	0.749
C904-3	3.79	0.84	0.468	5.36		54.16	0.68	0.691
C905-1	0.97	0.52	0.429	5.35		43.33	0.83	0.677
C905-2	1.42	0.74	0.531	5.00		42.94	0.89	0.763
C907-1	1.05	0.56	0.373	6.00		51.20	0.80	0.665
C907-2	5.58	0.84	0.551	4.94		67.70	0.95	0.768
C907-3	3.20	0.53	0.401	4.46		67.40	0.72	0.681
C907-4	2.51	0.50	0.488	6.63		53.38	0.86	0.721
C909-1	5.00	0.73	0.508	5.34		47.18	1.56	0.723
C909-2	0.75	0.93	0.428	6.27		39.36	1.70	0.642

注:TOC表示总有机碳含量;S₁表示岩石热解游离烃含量。

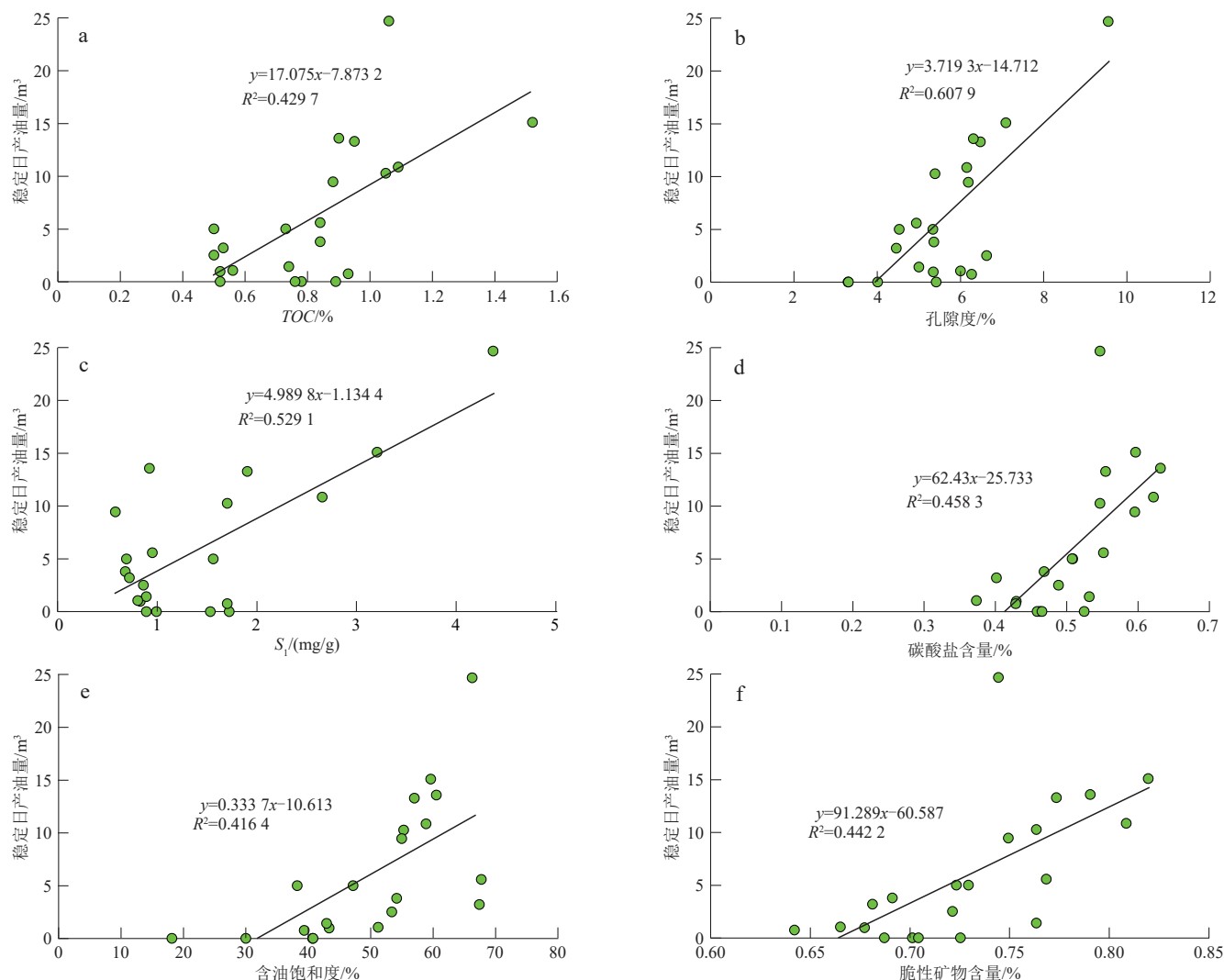


图3 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区页岩油井稳定日产油量与TOC(a)、孔隙度(b)、 S_i (c)、碳酸盐矿物含量(d)、含油饱和度(e)和脆性矿物含量(f)相关关系

Fig. 3 Relationships of stable daily oil production with TOC content(a), porosity (b), S_i (c), carbonate mineral content (d), oil saturation (e), and brittle mineral content (f) of shale oil wells in the Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam Basin (TOC表示总有机碳含量; S_i 表示岩石热解游离烃含量。)

TOC、孔隙度与日产油量的拟合度(复相关系数 R^2)均大于0.4,进一步印证了这些参数与产量之间存在较强的正相关关系。脆性矿物和碳酸盐矿物含量虽线性拟合优度略低,但作为可压裂性和优势岩性评价的重要指标,仍保留在多变量因子分析中。

3.2 综合指数计算及验证

在确定了孔隙度、含油饱和度、TOC、 S_i 、脆性矿物含量和碳酸盐矿物含量6项核心指标后,下一步需为各指标分配合理的权重系数,以构建科学的综合评价模型。首先,针对上述6项指标的标准化(Z-Score)数据,进行KMO取样适切性检验和Bartlett球形度检验,以确认是否具备因子分析的条件。检验结果显示,

KMO指数为0.603(>0.5),Bartlett球形度检验卡方值为52,自由度为15, $p \approx 0$ (<0.05),表明各指标间相关性显著、可开展主成分分析。

在进行因子提取时,以相关系数矩阵为基础,通过特征值分解得到初始特征值和累积方差贡献率。结果表明,前两个主成分的特征值分别为2.907和1.382,对应的方差贡献率为48.45%和23.03%,累积贡献率达71.48%(表3),足以代表原始指标的绝大部分信息。随后,对这两个主成分进行Varimax正交旋转,得到6项指标在两个因子上的载荷矩阵(成分矩阵)(表4)。

从载荷绝对值可见:①因子1主要由 S_i 、TOC、孔隙度和含油饱和度贡献,代表地质有利因子;②因子2则主要由碳酸盐矿物含量和脆性矿物含量贡献,反映工

表3 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区页岩油评价指标数据集主成分方差贡献率

Table 3 The evaluation index dataset of shale oil in the pilot test area of the Ganchaigou Formation and the variance contribution rates of principal components in the Yingxiongling area, Qaidam Basin

成分	成分特征值			主成分特征值		
	初始特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	初始特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	2.907	48.450	48.450	2.907	48.450	48.450
2	1.382	23.034	71.484	1.382	23.034	71.484
3	0.775	12.921	84.405	—	—	—
4	0.507	8.449	92.854	—	—	—
5	0.277	4.621	97.474	—	—	—
6	0.152	2.526	100.000	—	—	—

注:“—”代表该成分未被提取为主成分。

表4 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区页岩油评价指标数据集成分矩阵

Table 4 Component matrix of the shale oil evaluation index dataset from the pilot test area of the Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam Basin

评价指标	Z-Score 标准化值	
	因子1载荷值	因子2载荷值
S_1	0.909	-0.227
TOC	0.744	0.416
孔隙度	0.715	0.315
含油饱和度	0.462	0.453
碳酸盐矿物含量	0.105	0.934
脆性矿物含量	0.350	0.810

注: TOC 表示总有机碳含量; S_1 表示岩石热解游离烃含量。

表5 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区页岩油各评价指标权重系数

Table 5 Weight coefficients of various shale oil evaluation indices for the pilot test area of the Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam Basin

评价指标	Z-Score 标准化值	
	初始权重(w_j)	归一化权重
S_1	0.30	0.16
TOC	0.41	0.20
孔隙度	0.37	0.19
含油饱和度	0.31	0.15
碳酸盐矿物含量	0.26	0.12
脆性矿物含量	0.36	0.18

注: TOC 表示总有机碳含量; S_1 表示岩石热解游离烃含量。

程可改造性。利用下列公式计算得到各个指标权重系数(表5):

$$W_j = \frac{w_j}{\sum_{i=1}^6 w_i} \quad (9)$$

归一化后,各指标的权重系数依次为:0.16(S_1), 0.20(TOC), 0.19(孔隙度), 0.15(含油饱和度), 0.18(脆性矿物含量)和0.12(碳酸盐矿物含量)。结合权重结果,构建页岩油甜点综合评价模型,线性叠加公式为:

$$F = 0.16Z(S_1) + 0.20Z(TOC) + 0.19Z(\Phi) + 0.15Z(S_o) + 0.18Z(C_b) + 0.12Z(C_{carb}) \quad (10)$$

式中: $Z(\cdot)$ 表示对应指标经Z-Score标准化处理后的值,无量纲; S_1 表示岩石热解游离烃含量,mg/g; TOC 表示总有机碳含量,%; Φ 表示孔隙度,%; S_o 表示含油饱和度,%; C_b 表示脆性矿物含量,%; C_{carb} 表示碳酸盐矿物含量,%; F 为综合评价模型得分,即综合指数,无量纲。

参考中国石油天然气集团有限公司企业标准《页岩油储量估算方法》(DZ/T 0501—2025)^[33]中关于页岩油产能分类规范,基于直井千米井深稳定产量 $[m^3/(km \cdot d)]$ 将页岩油产能分为4类:高产(≥ 5)、中产

(3~5)、低产(1~3)及特低产(< 1)。对于柴沟先导试验区埋深2 500~3 000 m页岩油进行折算,得到对应的产油量阈值为:高产($\geq 15.0 m^3/d$)、中产(7.5~15.0 m^3/d)、低产(2.5~7.5 m^3/d)及特低产($< 2.5 m^3/d$)。为将上述行业产能标准转化为本模型的指数分级标准,系统开展工区内已试油井的综合指数 F 与实际测试产能的相关性分析。结果表明, F 值与稳定日产油量之间存在显著的正相关关系,回归决定系数为0.834 2(表6;图4),表明综合指数能够较好地表征页岩油甜点的产能潜力。基于这一强相关关系,本研究将产能等级映射至 F 的取值区间,最终建立如下分级标准:I类甜点($F \geq 0.71$),对应高产层(产油量 $\geq 15.0 m^3/d$);II类甜点($0.45 \leq F < 0.71$),对应中产层(产油量7.5~15.0 m^3/d);III类甜点($0.30 \leq F < 0.45$),对应低产层(产油量2.5~7.5 m^3/d);水层及干层($F < 0.30$),对应特低产层(产油量 $< 2.5 m^3/d$)。

根据各井的综合指数和页岩油井井位信息,绘制了干柴沟先导试验区上甜点与中甜点页岩油综合指数分级平面图(图5)。从分布特征来看,综合指数高值($F \geq 0.71$)主要集中于干柴沟先导试验区主体(即

表6 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区页岩油试油段关键参数

Table 6 Key parameters for the tested intervals of shale oil in the pilot test area of the Ganchaigou Formation , Yingxiongling area, Qaidam Basin

井号	箱体号	稳定日产油量/m³	参数(归一化权重系数)							综合评价指数(F)	综合解释结论
			TOC/%	S _I /(mg/g)	孔隙度/%	碳酸盐含量/%	饱和度/%	脆性矿物含量/%			
			(0.20)	(0.16)	(0.19)	(0.12)	(0.15)	(0.18)			
C10	20	10.26	1.05	1.78	5.39	0.55	55.26	0.76	0.54	I类甜点	
	15	10.85	1.09	2.65	6.15	0.62	58.85	0.81	0.70	II类甜点	
C902	14	13.28	0.95	2.20	6.48	0.55	57.00	0.77	0.59	II类甜点	
	5	24.67	1.06	4.36	9.55	0.55	66.23	0.74	0.79	I类甜点	
C903	16	15.09	1.52	3.23	7.09	0.60	59.60	0.82	0.85	I类甜点	
C904	16	13.58	0.90	3.20	6.31	0.63	60.51	0.79	0.67	II类甜点	
	11	9.45	0.88	0.58	6.19	0.60	54.95	0.75	0.47	II类甜点	
	6	3.79	0.84	0.68	5.36	0.47	54.16	0.69	0.34	III类甜点	
C905	16	1.42	0.74	0.89	5.00	0.53	42.94	0.76	0.39	III类甜点	
C907	14	5.58	0.84	1.81	4.94	0.54	67.70	0.76	0.51	II类甜点	
	12	3.20	0.53	1.64	4.46	0.40	67.40	0.68	0.30	III类甜点	
	6	2.51	0.50	1.34	5.40	0.49	53.38	0.72	0.34	III类甜点	
C909	14	5.00	0.73	1.56	5.34	0.51	47.18	0.72	0.38	III类甜点	
C12	15	0.10	0.52	0.99	3.30	0.52	30.01	0.73	0.21	水层	
C15	20	0.10	0.89	0.89	4.01	0.46	40.68	0.70	0.29	干层	
	6	0.10	0.76	0.70	5.42	0.47	18.15	0.70	0.23	水层	

注:TOC表示总有机碳含量;S_i表示岩石热解游离烃含量。

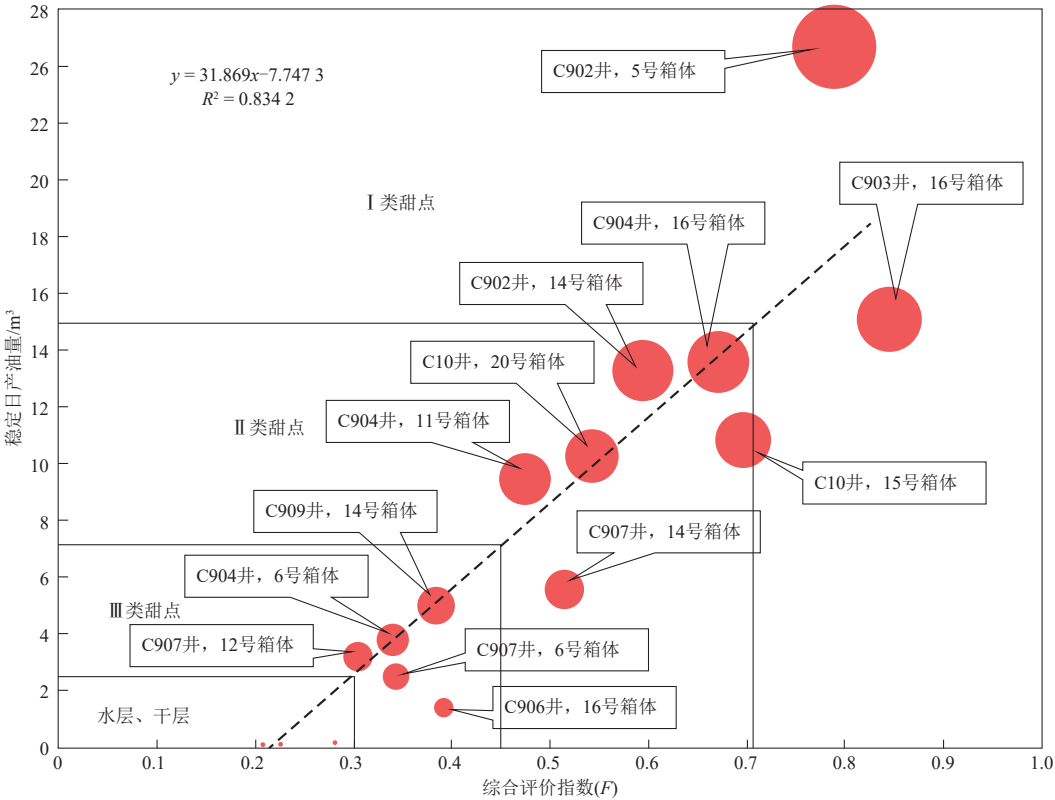


图4 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区页岩油井[9口(16层)]稳定日产油量与综合评价指数相关关系

Fig. 4 Correlation between stable daily oil production and comprehensive index for shale oil wells in the Ganchaigou Formation , Yingxiongling area, Qaidam Basin

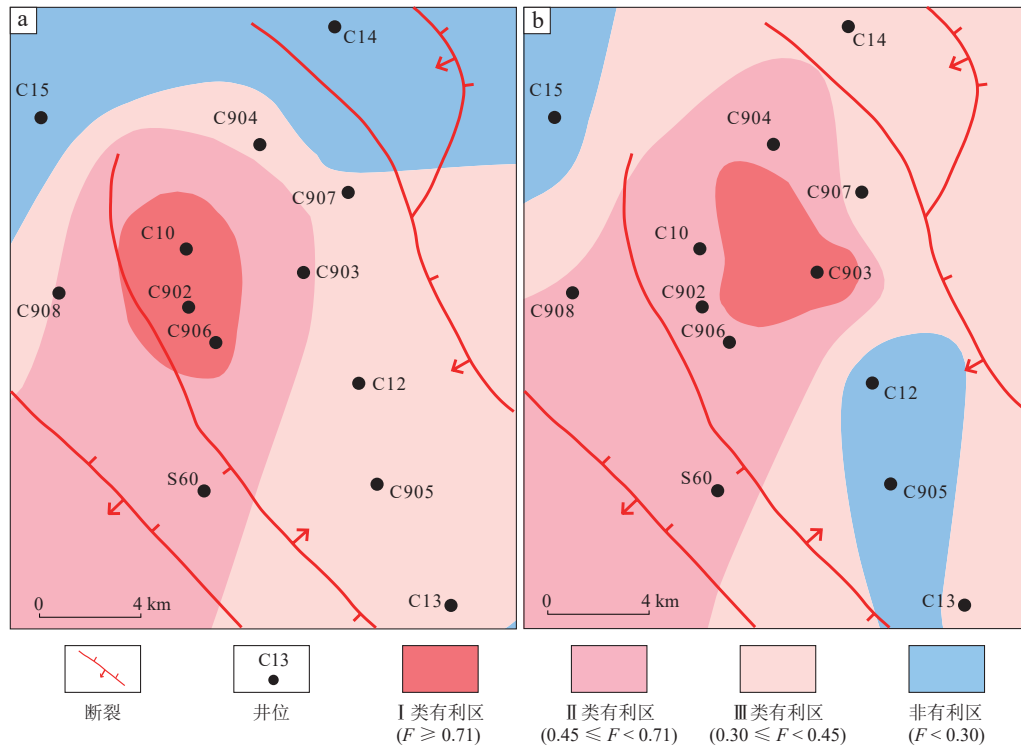


图5 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区页岩油井甜点综合评价指数(F)分级平面图

Fig. 5 Diagrams showing the comprehensive index-based classification of shale oil sweet spots in shale oil wells in the Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam Basin

a. 上甜点(5号和6号箱体);b. 中甜点(14号—16号箱体)

C902井区一带),该区域被划分为页岩油 I 类有利区。目前该区直井试油 2 口(2 层),均获得工业油流,试油成功率达 100%。II 类和 III 类有利区 F 值介于 0.30 ~ 0.71,该区域内试油 7 口(9 层),其中 4 口(5 层)获得工业油流,3 口(3 层)获低产油流。

4 甜点评价标准

基于直井试油和水平井试采数据,结合前述产能分级表征体系,建立了更加符合实际生产特征的

评价标准(表 7),其参数组合与阈值包括:① S_i 下限为 0.5 mg/g,III 类甜点 $0.5 \text{ mg/g} \leq S_i < 1.0 \text{ mg/g}$,II 类甜点 $1.0 \text{ mg/g} \leq S_i < 3.0 \text{ mg/g}$,I 类甜点 $S_i \geq 3.0 \text{ mg/g}$;② TOC 下限为 0.6%,III 类、II 类和 I 类甜点阈值分别为 $0.6\% \leq TOC < 0.8\%$, $0.8\% \leq TOC < 1.0\%$, $TOC \geq 1.0\%$;③孔隙度(Φ)下限为 3.5%,III 类甜点 $3.5\% \leq \Phi < 4.5\%$,II 类甜点 $4.5\% \leq \Phi < 7.0\%$,I 类甜点 $\Phi \geq 7.0\%$;④ S_o 下限为 35%,III 类甜点 $35\% \leq S_o < 45\%$,II 类甜点 $45\% \leq S_o < 65\%$,I 类甜点 $S_o \geq 65\%$;⑤脆性矿物含量与碳酸盐矿物含量下限分别为

表 7 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区页岩油井修订后的甜点评价标准

Table 7 Modified criteria for sweet spot evaluation of shale oil wells in the Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam Basin

甜点类型	评价参数						
	综合评价 指数 F	烃源岩条件	储层条件		油藏条件		工程条件
		$TOC/\%$	碳酸盐矿物含量/ $\%$	孔隙度(Φ)/ $\%$	$S_i/(\text{mg/g})$	含油饱和度(S_o)/ $\%$	脆性矿物含量/ $\%$
I 类甜点	≥ 0.71	> 1.0	> 60.0	> 7.0	> 3.0	> 60.0	> 80.0
II 类甜点	$0.45 \sim 0.70$	$0.8 \sim 1.0$	$45.0 \sim 60.0$	$4.5 \sim 7.0$	$1.0 \sim 3.0$	$45.0 \sim 60.0$	$70.0 \sim 80.0$
III 类甜点	$0.30 \sim 0.45$	$0.6 \sim 0.8$	$30.0 \sim 45.0$	$3.5 \sim 4.5$	$0.5 \sim 1.0$	$35.0 \sim 45.0$	$65.0 \sim 70.0$
干层、水层	< 0.30	< 0.6	< 30.0	< 3.5	< 0.5	< 35.0	< 65.0

注: TOC 表示总有机碳含量; S_i 表示岩石热解游离烃含量。

65%和35%,分级区间Ⅲ类甜点分别为65%~70%和35%~45%,Ⅱ类甜点分别为70%~80%和45%~60%,Ⅰ类甜点分别为>80%和>60%。此外,即使F值在Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类甜点的阈值范围内,也必须同时满足孔隙度、含油饱和度、TOC、S_i、脆性矿物含量和碳酸盐矿物含量下限要求,方可最终判定甜点类别。

5 应用验证

5.1 试验区评价与生产情况

以C12井为例,如图6和表8所示,基于孔隙度和电阻率的传统解释标准将C12井试油①层组内4个小

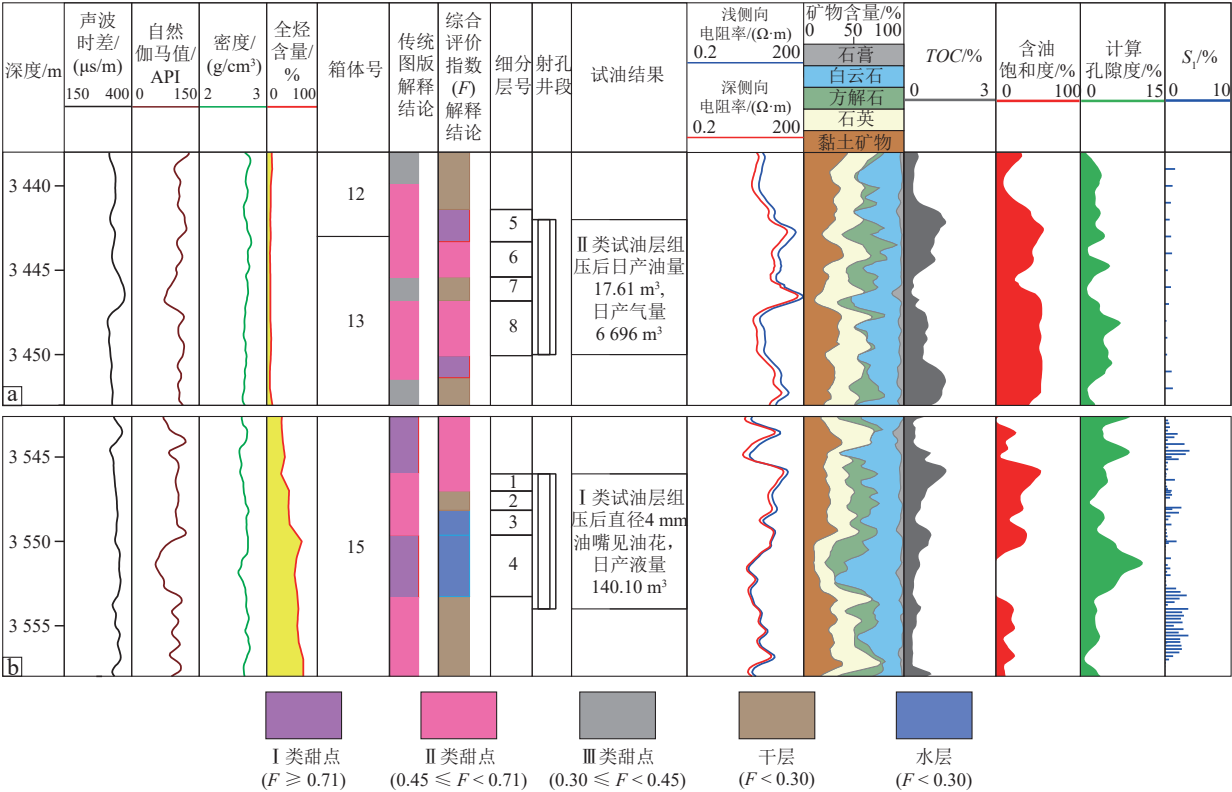


图6 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区C12井测井解释成果综合柱状图

Fig. 6 Column showing the logging interpretations of the Ganchaigou Formation in well C12, Yingxiongling area, Qaidam Basin

TOC表示总有机碳含量;S_i表示岩石热解游离烃含量。

表8 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区C12井试油段参数及解释结论

Table 8 Parameters and interpretations of the tested intervals of shale oil in the Ganchaigou Formation in well C12, Yingxiongling area, Qaidam Basin

试油层段	解释层号	顶深/m	底深/m	厚度/m	电阻率/(Ω·m)	TOC/%	碳酸盐矿物含量/%	孔隙度/%	S _i /(mg/g)	S _o /%	脆性矿物含量/%	原解释	综合评价指数(F)	综合解释	试油成果
①层组	1号小层	3 546.0	3 547.0	1.0	50.8	1.03	51.42	4.36	0.90	43.72	72.51	Ⅱ类层	0.60	Ⅱ类甜点	水层
	2号小层	3 547.0	3 548.2	1.1	34.2	0.61	50.32	2.43	1.19	30.54	71.39	Ⅱ类层	0.37	干层	
	3号小层	3 548.2	3 549.6	1.5	31.7	0.57	44.68	3.70	0.61	26.19	68.66	Ⅱ类层	0.15	水层	
	4号小层	3 549.6	3 553.3	3.6	15.4	0.49	64.16	7.22	0.74	8.98	82.56	Ⅰ类层	0.52	水层	
②层组	5号小层	3 441.4	3 443.3	1.9	46.6	1.20	46.24	4.00	0.82	49.64	70.19	Ⅱ类层	0.78	Ⅰ类甜点	Ⅰ类甜点
	6号小层	3 443.3	3 446.0	2.7	35.3	0.83	43.40	4.61	0.75	40.99	67.68	Ⅱ类层	0.54	Ⅱ类甜点	
	7号小层	3 446.0	3 446.8	0.8	77.8	0.32	44.10	1.66	0.90	36.82	75.65	Ⅲ类层	0.42	干层	
	8号小层	3 446.8	3 450.1	3.2	17.7	0.67	39.19	5.00	0.38	53.22	65.62	Ⅱ类层	0.41	Ⅱ类甜点	

层划分为3个Ⅱ类甜点和1个Ⅰ类甜点。然而,射孔后压裂,该井日产水量 50 m^3 ,未见油流(图7a),表明传统方法的解释结果与实际试油效果存在偏差。相比之下,采用新的甜点综合评价模型重新解释后,该层组1号层和3号层综合评价指数 F 分别为0.57和0.15,分别为Ⅱ类甜点和水层。而2号和4号小层分别为0.37和0.52,虽然根据综合评价指数划分标准其均可以被判定为Ⅱ类甜点,但由于其孔隙度、含油饱和度其均可以低于对应的下限值,最终被识别为干层和水层。整体上,新评价模型的解释结论与试油结果一致,这一结果表明,该评价体系能够有效克服传统方法可能对甜点层误判的问题。

为进一步验证模型的适用性与推广性,基于新建立的甜点综合评价指数模型对老井C12井进行了系统复查,重新推荐了新的试油层位(②层组,埋深 $3\,442\sim 3\,450\text{ m}$)(图6)。该层 F 值介于 $0.47\sim 0.78$,评价结果为Ⅰ-Ⅱ类甜点。经试油验证,该层获工业油流,压裂后直径 3.0 mm 油嘴放喷,最高日产油量 17.6 m^3 ,11 d累计产油量 144.8 m^3 ,平均日产油量 13.2 m^3 (图7b)。

5.2 邻区应用效果及推广潜力

此外,为验证模型在柴达木盆地英雄岭干柴沟先导试验区之外的适用性,采用综合评价指数模型对相邻C20井区的C20和C16两口井开展甜点综合评价。C20井试油层段的 F 值为 $0.45\sim 0.78$,平均值为0.61,

被划分为Ⅰ-Ⅱ类甜点(图8a),经压裂改造后,获得工业油流,采用直径 3.5 mm 油嘴放喷,测试峰值日产油量 13.7 m^3 ,稳定日产油量 9.8 m^3 ,试油40 d累产油量 351.6 m^3 (图9b)。C16井试油层段的 F 值为0.68,被划分为Ⅱ类甜点(图8b),压裂改造后直径 $2.0\sim 2.5\text{ mm}$ 油嘴放喷,测试峰值日产油量 22.8 m^3 ,稳定日产油量 13.3 m^3 ,试油81 d累产油量 990.4 m^3 (图9c)。同时,基于干柴沟组页岩油先导试验区和相邻的柴20井区预探井和评价井综合评价指数模型评价结果开展有利区预测。结果表明,在综合评价指数分级平面图中,C20井和C16井位于Ⅱ类有利区(图9a),这与两口井甜点层试油均获工业油流结果一致,证实了该方法不仅适用于干柴沟先导试验区,对于地质条件相似的邻区也有较好的适用性。

此外,水平井综合评价指数模型评价结果与生产数据证实,该模型不仅在直井纵向选层中表现出良好的适用性,还能有效识别水平井甜点段,为水平井压裂设计提供可靠依据。CP13井甜点综合评价指数模型评价结果表明,该井水平段的综合评价指数与油相示踪剂监测的产量贡献率趋势一致(图10),二者具有较好的正相关关系,复相关系数(R^2)为0.6104(图11)。根据综合评价指数优选CP13井压裂段,压后峰值日产量为 20.5 m^3 ,300 d累产油 $4\,043\text{ m}^3$ 。根据CP13井水平段甜点段评价的实际情况,在地质环境相同或相近时,可选取总有机碳含量、孔隙度、热解游离烃含量、含油饱和度、碳酸盐矿物含量和脆性矿物含量等6个评

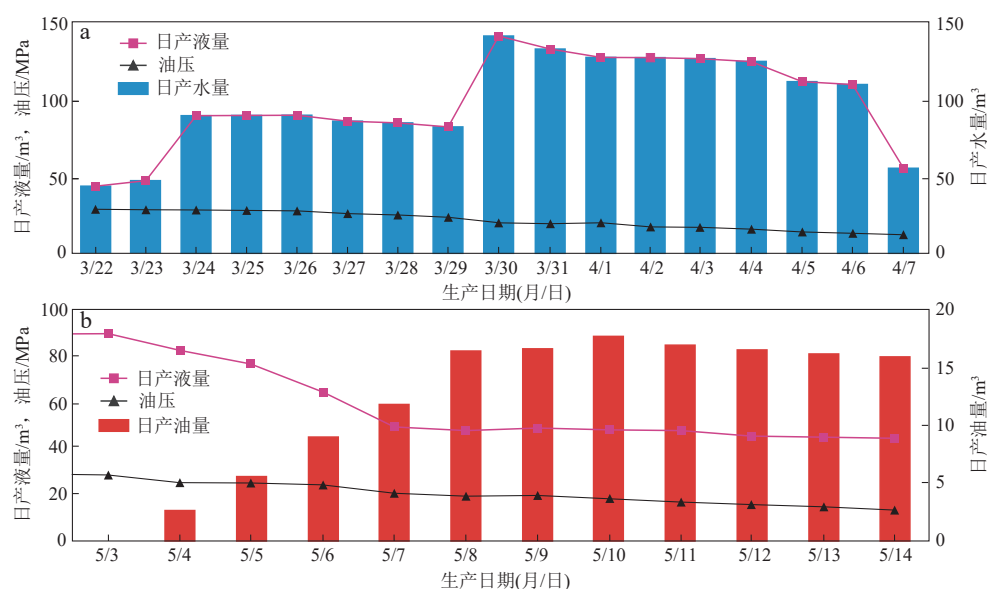


图7 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区C12井①层组(a)和②层组(b)试油段生产曲线

Fig. 7 Production curves of tested intervals of shale oil in Classes I (a) and II (b) oil groups of the Ganchaigou Formation in well C12, Yingxiongling area, Qaidam Basin

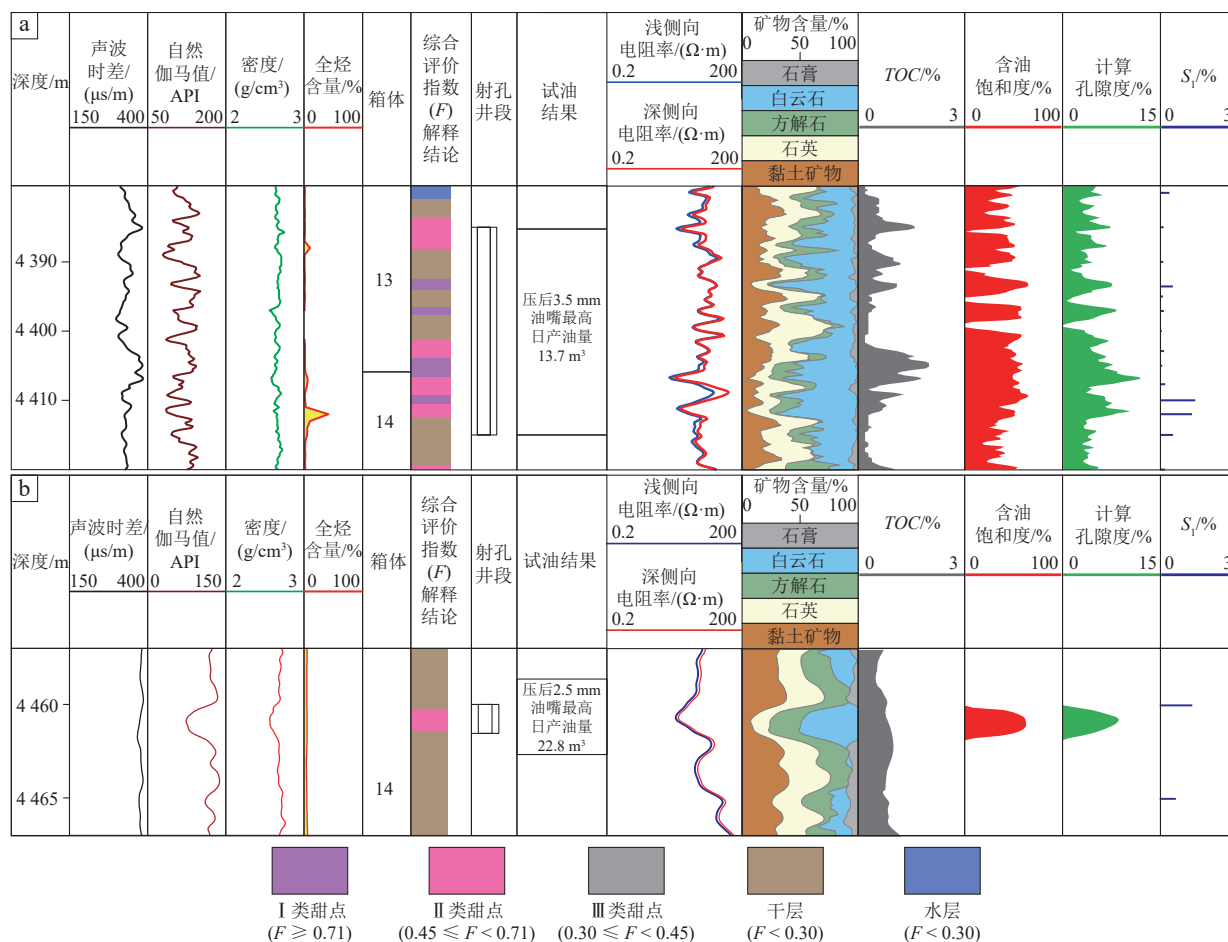


图8 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区之外的页岩油井C20井(a)和C16井(b)试油段测井解释成果综合柱状图

Fig. 8 Columns showing logging interpretations of Class I oil group in shale oil wells C20 (a) and C16 (b) outside the pilot test area of the Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam Basin

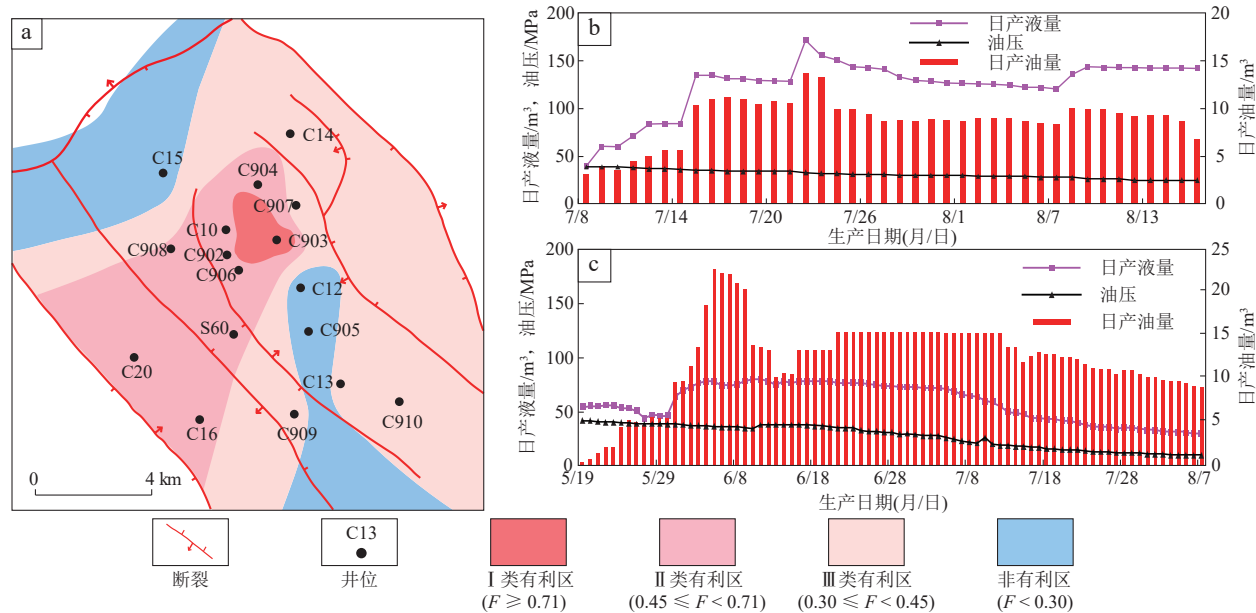


图9 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区之外的页岩油井综合评价指数(F)分级平面图(a)及C20井(b)和C16井试油段生产曲线图(c)

Fig. 9 Diagram showing the comprehensive index-based shale oil sweet spot classification (a) and production curves of the tested intervals in Class I oil groups in wells C20 (b) and C16 (c) outside the pilot test area of the Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam Basin

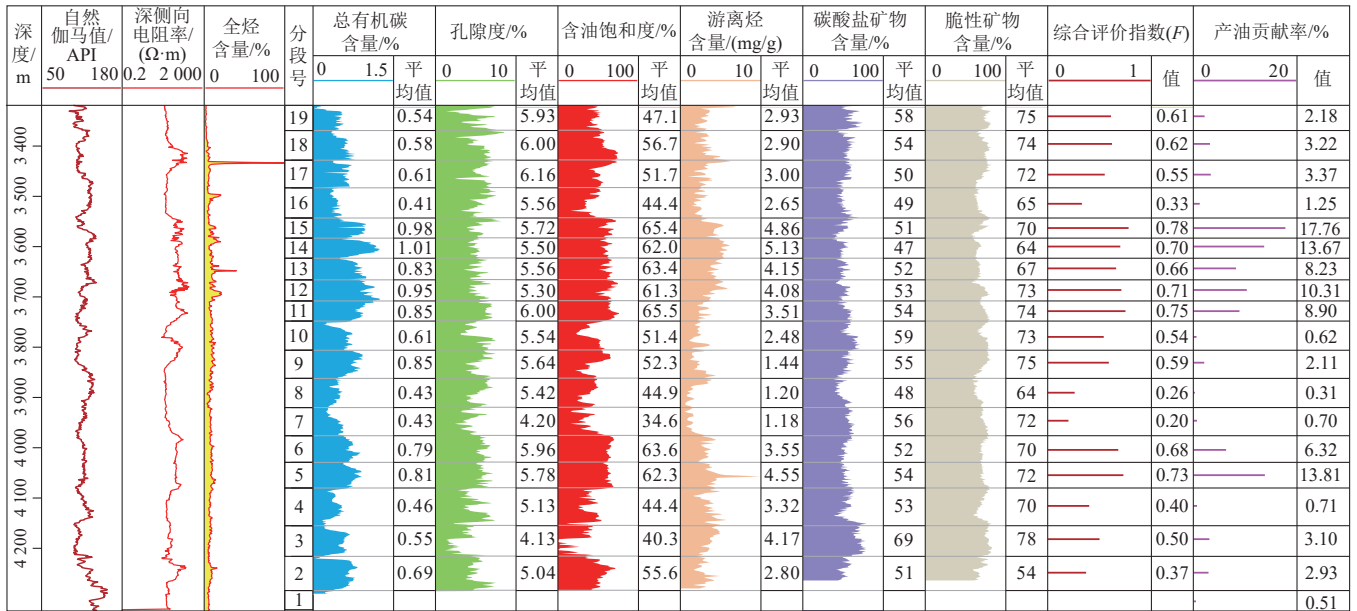


图 10 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区 CP13 井水平段综合评价结果柱状图

Fig. 10 Comprehensive index-derived evaluation results of the horizontal section of well CP13 in the Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam Basin

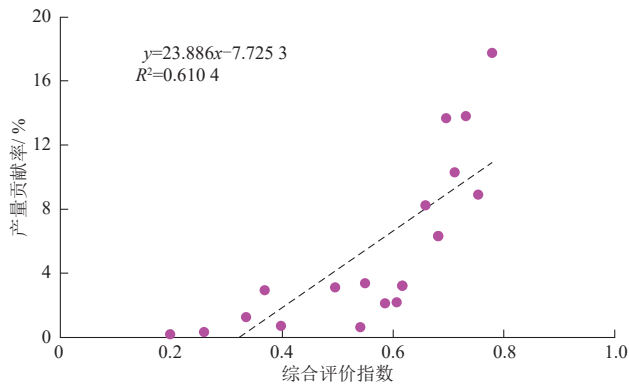


图 11 柴达木盆地英雄岭地区干柴沟先导试验区 CP13 井水平段综合评价指数与产量贡献率相关关系

Fig. 11 Correlation between the comprehensive index and production contribution rate for the horizontal section of well CP13 in the pilot test area of the Ganchaigou Formation, Yingxiongling area, Qaidam Basin

价指标计算综合评价指数,并指导后续压裂方案的优化。

5 结论

1) 通过开展皮尔逊相关性分析,优选出孔隙度、含油饱和度、TOC、 S_1 、脆性矿物及碳酸盐矿物含量6项甜点核心评价参数。

2) 采用主成分分析法(PCA)可提取累计方差贡献率达71.48%的两个主因子,明确了6项核心评价参

数权重,构建了甜点线性加权综合评价模型和分级综合评价标准。

3) 结合甜点综合评价指数与试油数据,参照行业规范建立了英雄页岩油甜点分级综合评价标准,实现Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类甜点及水层、干层的定量划分。

4) 综合评价指数模型在干柴沟组先导试验区及邻区的应用效果良好,实现了老井及邻区新井甜点的精准识别。通过运用该模型,C12井、C20井和C16井在3个甜点层试油分别获得日产原油17.6、13.7和22.8 m³,证实新模型具有推广应用价值。

5) 综合评价指数模型可有效提高水平井甜点识别准确率,CP13井水平段综合评价指数与油相示踪剂产量贡献率显著相关,表明该模型可用于水平井甜点评价,为工程方案优化提供关键依据。

致谢:中国石油勘探开发研究院吴松涛老师在本文撰写过程中给出了多方面的建议和指导,论文修改过程中,两位审稿专家和编辑部老师给予细心的建议和指导,并提出了诸多有益的修改意见,为文章的进一步完善起到了至关重要的作用,作者在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] 邹才能,潘松圻,党刘栓.论能源革命与科技使命[J].西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(3):1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, DANG Liushuan. On the energy revolution and the mission of science and technology[J]. Journal

- of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2019, 41(3): 1-12.
- [2] 邹才能, 马锋, 潘松圻, 等. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 128-142.
- ZOU Caineng, MA Feng, PAN Songqi, et al. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 128-142.
- [3] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
- ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [4] 杨雷, 金之钧. 全球页岩油发展及展望[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 553-559.
- YANG Lei, JIN Zhijun. Global shale oil development and prospects [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 553-559.
- [5] 郭旭升, 黎茂稳, 赵梦云. 页岩油开发利用及在能源中的作用[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 38-47.
- GUO Xusheng, LI Maowen, ZHAO Mengyun. Shale oil development and utilization and its role in energy industry [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 38-47.
- [6] 贾承造, 王祖纲, 姜林, 等. 中国页岩油勘探开发研究进展与科学技术问题[J]. 世界石油工业, 2024, 31(4): 1-11.
- JIA Chengzao, WANG Zugang, JIANG Lin, et al. Progress and key scientific and technological problems of shale oil exploration and development in China [J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(4): 1-11.
- [7] 金之钧, 张谦, 朱如凯, 等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 801-819.
- JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 801-819.
- [8] 李国欣, 雷征东, 董伟宏, 等. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 1-11.
- LI Guoxin, LEI Zhengdong, DONG Weihong, et al. Progress, challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 1-11.
- [9] 刘惠民, 王敏生, 李中超, 等. 中国页岩油勘探开发面临的挑战与高效运营机制研究[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(3): 1-10.
- LIU Huimin, WANG Minsheng, LI Zhongchao, et al. Challenges and efficient operation mechanism of shale oil exploration and development in China [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 1-10.
- [10] ZHANG J J, FAN Zhihui. Key technologies for increasing production based on the best practices of major shale oil and gas basins [J]. Energy Geoscience, 2025, 6(3): 100414.
- [11] ROSHDY R, ABDELFAHATTAH M, MONDAL I, et al. Facies and NMR-based petrophysical analyses of the Apollonia unconventional gas reservoir: A case study from the BED-9 field, Abu Gharadig Basin, North Western Desert, Egypt [J]. Energy Geoscience, 2025, 6(3): 100428.
- [12] 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 1-13.
- SUN Longde, ZHAO Wenzhi, LIU He, et al. Concept and application of “sweet spot” in shale oil [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 1-13.
- [13] 白雪峰, 王民, 王鑫, 等. 四川盆地东北部侏罗系凉高山组页岩油甜点与富集区评价[J]. 地球科学, 2024, 49(12): 4483-4500.
- BAI Xuefeng, WANG Min, WANG Xin, et al. Evaluation of shale oil sweet spot and rich area in Jurassic Liangaoshan Formation, northeast Sichuan Basin [J]. Earth Science, 2024, 49(12): 4483-4500.
- [14] 杜金玲, 林鹤, 纪拥军, 等. 地震与微地震融合技术在页岩油压后评估中的应用[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(2): 127-134.
- DU Jinling, LIN He, JI Yongjun, et al. Application of seismic and microseismic data fusion technology in post-fracturing evaluation of shale oil reservoir [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(2): 127-134.
- [15] QIAN Keran, HE Zhiliang, LIU Xiwu, et al. Intelligent prediction and integral analysis of shale oil and gas sweet spots [J]. Petroleum Science, 2018, 15(4): 744-755.
- [16] QIN Zhengye, XU Tianji. Shale gas geological “sweet spot” parameter prediction method and its application based on convolutional neural network [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 15405.
- [17] WANG Hongjun, GUO Zekun, KONG Xiangwen, et al. Application of machine learning for shale oil and gas “sweet spots” prediction [J]. Energies, 2024, 17(9): 2191.
- [18] HUI Gang, CHEN Shengnan, HE Yongming, et al. Machine learning-based production forecast for shale gas in unconventional reservoirs via integration of geological and operational factors [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 94: 104045.
- [19] WU Yuqi, JIANG Fujie, HU Tao, et al. Shale oil content evaluation and sweet spot prediction based on convolutional neural network [J]. Marine and Petroleum Geology, 2024, 167: 106997.
- [20] HUANG Ruoxin, LI Yifan, GAO Zhiqian, et al. Machine learning-based sweet spot prediction for lacustrine shale oil in the Weixinan Sag, Beibu Gulf Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2025, 179: 107436.
- [21] 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 18-31.
- LI Guoxin, ZHU Rukai, ZHANG Yongshu, et al. Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxiongling shale oil in Qaidam Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1):

- 18-31.
- [22] 李国欣, 张永庶, 陈琰, 等. 柴达木盆地油气勘探进展、方向与对策[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(3): 1-19.
LI Guoxin, ZHANG Yongshu, CHEN Yan, et al. Progress, orientation and countermeasures of petroleum exploration in Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(3): 1-19.
- [23] 刘国勇, 薛建勤, 吴松涛, 等. 柴达木盆地柴西坳陷古近系-新近系石油地质特征与油气环带状分布模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1007-1017.
LIU Guoyong, XUE Jianqin, WU Songtao, et al. Petroleum geology and ring-shaped distribution of the Paleogene-Neogene hydrocarbon resources in western Qaidam Depression, Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1007-1017.
- [24] 陈琰, 张永庶, 徐兆辉, 等. 柴达木盆地干柴沟地区勘探突破及启示[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1018-1031.
CHEN Yan, ZHANG Yongshu, XU Zhaohui, et al. Breakthroughs in hydrocarbon exploration in the Ganchaigou area, Qaidam Basin and their implications[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1018-1031.
- [25] 李国欣, 伍坤宇, 朱如凯, 等. 巨厚高原山地式页岩油藏的富集模式与高效动用方式——以柴达木盆地英雄岭页岩油藏为例[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 144-157.
LI Guoxin, WU Kunyu, ZHU Rukai, et al. Enrichment model and high-efficiency production of thick plateau mountainous shale oil reservoir: A case study of the Yingxiongling shale oil reservoir in Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 144-157.
- [26] 郭得龙, 申颖浩, 林海, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油CP1井压裂后甜点分析[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 117-128.
GUO Delong, SHEN Yinghao, LIN Hai, et al. Post fracturing shale oil sweet spot evaluation in Well CP1 in Yingxiongling area, Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 117-128.
- [27] 孙平恒, 李国欣, 王小军, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征与勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 1-12.
SUN Pingheng, LI Guoxin, WANG Xiaojun, et al. Geological characteristics and exploration practice of shale oil in the Yingxiongling structural belt, Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 1-12.
- [28] 李国欣, 张永庶, 陈琰, 等. 柴达木盆地油气勘探进展、方向与对策[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(3): 1-19.
LI Guoxin, ZHANG Yongshu, CHEN Yan, et al. Progress, orientation and countermeasures of petroleum exploration in Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(3): 1-19.
- [29] 邢浩婷, 匡立春, 伍坤宇, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩岩相特征及有利源储组合[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(2): 70-82.
XING Haoting, KUANG Lichun, WU Kunyu, et al. Lithofacies characteristics and favorable source rock-reservoir combination of Yingxiongling shale in Qaidam Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(2): 70-82.
- [30] 曹继飞, 邹德永, 舒腾飞, 等. 基于主成分分析的碳酸盐岩裂缝识别方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15421-15428.
CAO Jifei, ZOU Deyong, SHU Tengfei, et al. Fracture identification in carbonate rocks based on principle component analysis [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15421-15428.
- [31] 陈阳, 王兴建, 何发岐, 等. 基于主成分分析法的测井数据识别岩性——以富县延长组长6地层为例[J]. 物探化探计算技术, 2024, 46(6): 637-646.
CHEN Yang, WANG Xingjian, HE Faqi, et al. Lithology identification based on logging data of principal component analysis—A case study of Chang 6 formation in Yanchang, Fuxian [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 46(6): 637-646.
- [32] 刘辉, 王晶, 战薇芸, 等. 基于主成分分析法和综合指数法的油气勘探成效综合评价[J]. 天然气勘探与开发, 2025, 48(2): 49-57.
LIU Hui, WANG Jing, ZHAN Weiyun, et al. Comprehensively evaluating the petroleum exploration success based on PCA and synthetic index method [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2025, 48(2): 49-57.
- [33] 中国石油天然气集团有限公司. 页岩油储量估算方法: Q/SY 01057-2024[S]. 北京: 石油工业出版社, 2024.
China National Petroleum Corporation Limited. Specifications for shale oil reserves estimation: Q/SY 01057-2024 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2024.

(编辑 孙川翔)