

引用: 刘子雄, 李啸南, 王金伟, 等. 致密气藏水平井甜点段识别方法研究[J]. 中国石油勘探, 2021,26(3):117-125.

Liu Zixiong, Li Xiaonan, Wang Jinwei, et al. Study on method of sweet spot interval identification of tight gas reservoir in horizontal well[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(3):117-125.

# 致密气藏水平井甜点段识别方法研究

刘子雄<sup>1</sup> 李啸南<sup>1</sup> 王金伟<sup>1</sup> 刘汝敏<sup>1</sup> 王 涛<sup>1</sup> 王一竹<sup>2</sup> 闫治东<sup>2</sup> 李新发<sup>2</sup>

(1 中海油服油田生产研究院; 2 中国石油玉门油田公司工程技术研究院)

**摘 要:** 水平井分段压裂已经成为致密气储层开发的重要方式, 但由于致密气储层非均质性强, 各段产能贡献差异大, 有效识别水平段甜点位置, 针对性优化压裂规模, 成为提高压裂产能的关键。根据6口水平井57个压裂段微地震向量扫描监测结果, 识别出压裂期间72处有效破裂位置。将这些点的测井、录井参数进行关联度分析, 结果表明全烃和钻时对破裂位置的表征最为显著。因此利用全烃和钻时建立了水平井甜点段位置(易破裂位置)表征参数 $K_{tr}$ 的计算公式。应用结果表明: 在S-13H井的 $K_{tr}$ 值异常段监测到的微地震事件明显多于其他段, 表明起裂裂缝多, 识别出的3个甜点发育段的产能贡献占90%以上; 在其他未监测的5口水平井的产能与通过 $K_{tr}$ 值识别出的甜点段呈现较好的对应关系。通过验证,  $K_{tr}$ 法能准确识别出水平段甜点位置, 对水平井选择性分段压裂和工艺优化具有指导意义。

**关键词:** 压裂甜点; 水平段; 分段压裂; 全烃; 钻时

**中图分类号:** TE357 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.03.011

## Study on method of sweet spot interval identification of tight gas reservoir in horizontal well

Liu Zixiong<sup>1</sup>, Li Xiaonan<sup>1</sup>, Wang Jinwei<sup>1</sup>, Liu Rumin<sup>1</sup>, Wang Tao<sup>1</sup>, Wang Yizhu<sup>2</sup>, Yan Zhidong<sup>2</sup>, Li Xinfu<sup>2</sup>

(1 Research Institute of Oilfield Production, COSL; 2 Engineering Technology Research Institute of PetroChina Yumen Oilfield Company)

**Abstract:** Horizontal well drilling combining with multi-staged fracturing is proved to be an important method for tight gas reservoir development. However, due to the strong heterogeneity of tight gas reservoir and the great difference in production contribution of each stage, accurately identifying the sweet spot interval of horizontal section and optimizing fracturing scale has become the key process to improve production capacity. The microseismic vector scanning monitoring was conducted for 57 stages in six horizontal wells, and 72 effective fractured intervals were identified. The correlation analysis of these intervals and the related parameters of wireline logging and mud logging data shows that total hydrocarbon and the rate of penetration (ROP) have the best correlation with those fractured intervals. Therefore, formula for calculating the parameter  $K_{tr}$  of sweet spot interval (easily fractured position) is established by using total hydrocarbon and ROP. The application result shows significantly more microseismic events in stages with abnormal  $K_{tr}$  than other stages in Well S-13H, indicating more initiated fractures, and three sweet spot intervals contribute more than 90% of the total production. In addition, production has a good relationship with the sweet spot interval identified by  $K_{tr}$  value in another five horizontal wells without microseismic monitoring data. It is verified that the  $K_{tr}$  method can accurately identify the sweet spot interval in horizontal section, which has guiding significance for selecting the fracturing stage and technology optimization of horizontal wells.

**Key words:** fracturing sweet spot, horizontal section, staged fracturing, total hydrocarbon, ROP

基金项目: 中海油服科研项目“致密气微观选择性控水技术研究”(YSB19YF012)。

第一作者简介: 刘子雄(1982-), 男, 湖北随州人, 硕士, 2009年毕业于长江大学, 高级工程师, 现主要从事油气田开发研究工作。地址: 天津市滨海新区塘沽海洋高新技术开发区海川路1581号, 邮政编码: 300459。E-mail: liuzx2@cosl.com.cn

收稿日期: 2020-12-03; 修改日期: 2021-03-25

## 0 引言

鄂尔多斯盆地致密气资源量大<sup>[1-3]</sup>, 储层普遍具有非均质性强、渗透率低的特点, 采用直井开发时单井产量低, 产能递减快、采出程度低, 因此水平井分段压裂成为开发该类储层的关键技术<sup>[4-6]</sup>。对盆地东部某致密气田压裂的 22 口水平井统计发现, 压裂产能与水平段长度、气层钻遇率及压裂段数均未表现出相关性。部分水平井的示踪剂监测结果表明, 主要的产能贡献段仅占 30% 左右, 与一些文献中统计的水平井有产能贡献的段低于 65%<sup>[7-8]</sup> 相符。由于大部分压裂段无产能贡献, 形成了大量的无效压裂段, 一方面增加了水平井施工风险和作业成本, 另一方面由于缝间干扰影响了其他段的产能贡献<sup>[9-10]</sup>。因此通过识别水平段压裂甜点位置, 进而优化压裂分段和压裂规模, 对提高水平井开发效果尤为重要。目前水平井分段大部分是基于理论模型开展的裂缝延伸及缝间干扰来进行优化<sup>[11-14]</sup>, 而针对水平段储层非均质性强的特征, 缺少相应的甜点位置识别方法和压裂分段优化

方法。水平井压裂时采用的微地震向量扫描监测结果显示, 部分压裂段存在多个破裂位置, 对监测的 6 口水平井识别出的 72 处有效破裂位置 (即甜点位置, 应力薄弱, 容易起裂) 用甜点识别参数 ( $K_{tr}$ ) 表征, 将破裂位置的测井参数和录井参数进行统一提取, 为了消除不同井间的测井、录井仪器差异, 均采用异常倍数 (测量值与背景值之比) 进行关联度计算, 结果表明录井的全烃和钻时与破裂点关联度分别达到 42.4%、32%。应用这两个参数采用试凑法建立了  $K_{tr}$  的计算公式, 进而实现对整个井段的甜点分布位置的识别。应用表明, 识别出的甜点位置与微地震向量扫描监测结果和示踪剂监测结果一致, 同时  $K_{tr}$  法识别出的甜点数量与压裂井产能相关性高, 为后期实施选择性的分段压裂和工艺优化提供了指导。

## 1 水平井开发特征

A 气田位于鄂尔多斯盆地东缘 (图 1), 储层非均质性强, 孔隙度和渗透率很低, 为典型的致密储层。

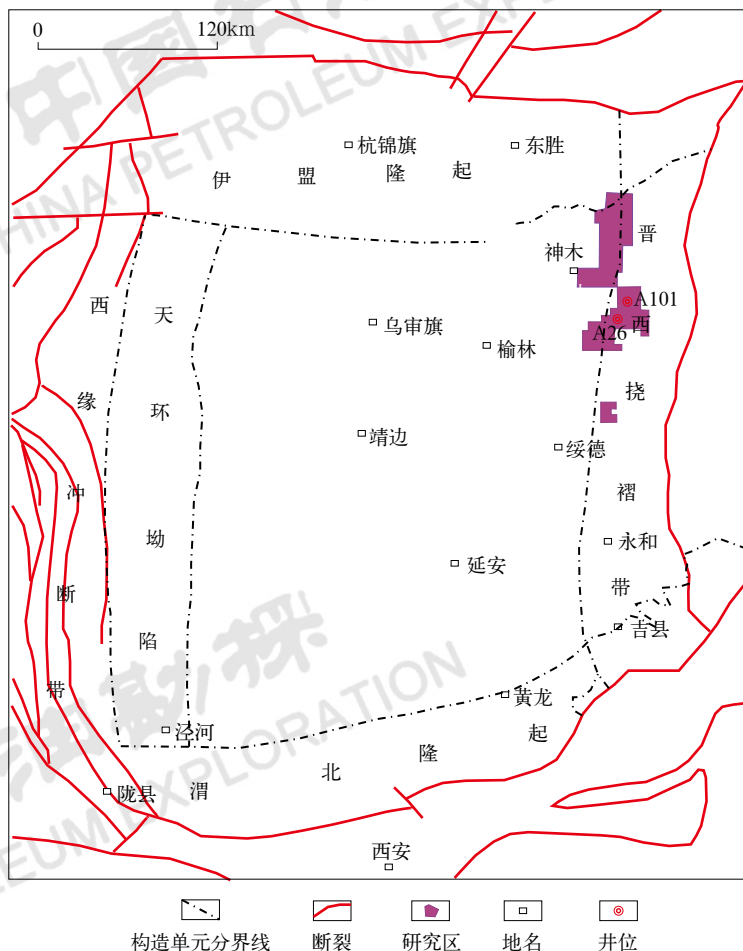


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

区域内采用水平井分段压裂开发,压裂段间距为100~120m。由于忽略了储层非均质性对压裂改造的影响,每一段设计的压裂规模相近,导致同层位水平井压裂后初期产能及稳产期差异较大。22口水平井测试情况统计表明,压裂产能与水平段长度、砂岩气层钻遇率及压裂段数无明显相关性。由于研究区经历了4期构造运动<sup>[15]</sup>,导致区域内发育多个方向的天然裂缝,微地震向量扫描监测显示,水平段裂缝形态和长度差异较大,部分高产井在压裂时存在多个起裂位置,形成了多条裂缝,部分为单条裂缝。同时,压裂时部分段存在造缝困难和砂堵风险,示踪剂监测结果表明,

水平井中60%的裂缝基本无产能贡献。对比同层位两口生产井的动态曲线看出,S-5H井受多条裂缝影响,压裂后初期产量高(无阻流量为 $18.3 \times 10^4 \text{m}^3$ ),但投产后产能递减快(图2),反映出改造规模偏小的特征;S-4H井(无阻流量为 $3.1 \times 10^4 \text{m}^3$ )尽管裂缝条数少,但裂缝半长更长,控制面积大,产能递减慢。由于压裂时缺少对潜在形成多条裂缝的考虑,设计的压裂规模与常规储层类似,导致部分天然裂缝发育段改造不充分。因此,有效识别水平段甜点发育位置,针对性地优化压裂分段和设计压裂规模,对提高压裂产能和延长稳产期具有重要意义。

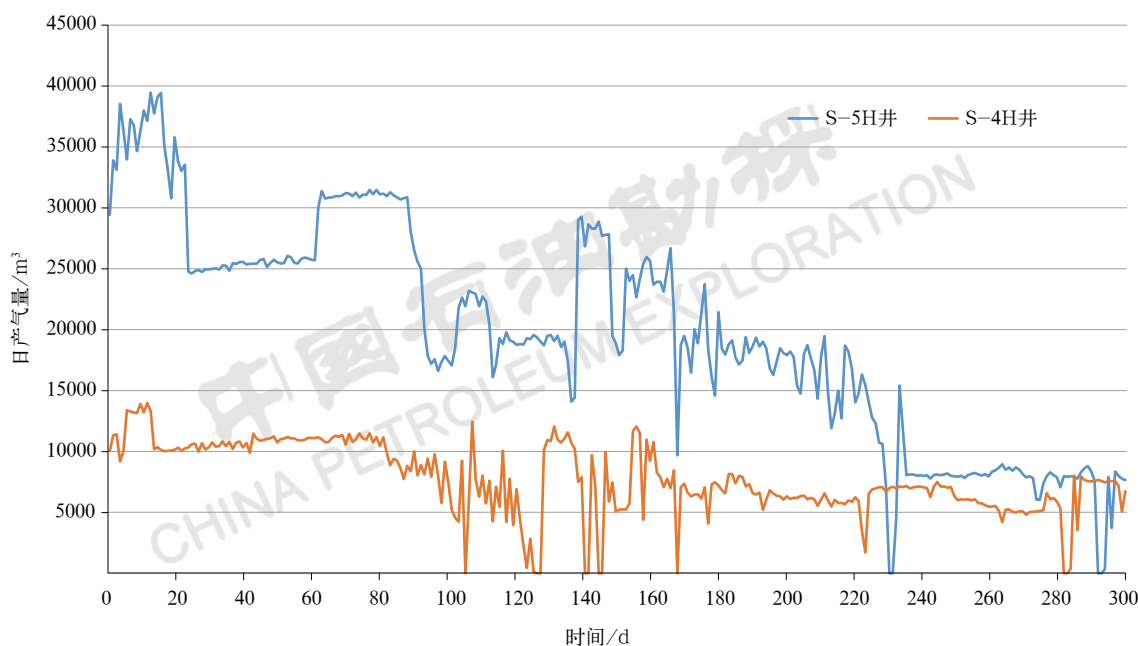


图2 同层位水平井压裂后产量曲线

Fig.2 Production curve of the same layer after fracturing in different horizontal wells

## 2 水平井压裂甜点区识别方法研究

### 2.1 微地震向量扫描监测技术

微地震裂缝监测已经成为压裂效果评价的一个重要手段<sup>[16-17]</sup>。在压裂时向地层中注入高压流体,地层受到挤压后发生破裂,因此会产生强烈的微地震事件。在此过程中,破裂位置一般是应力薄弱发育位置<sup>[15]</sup>,通常伴随高孔渗条带、天然裂缝或微裂缝发育的位置,即甜点位置。通过微地震向量扫描监测技术对水平段压裂过程中的破裂位置进行识别,准确性较高。其主要机理是通过对压裂期间的破裂能量进行反演,得到

监测区平面上的破裂能量差异,并对破裂过程中的每一分钟能量切片,识别出水平段不同位置的破裂情况(图3)。由于压裂引起的地层破裂比较剧烈,微地震信号强,监测显示的破裂能量一般是经井筒向地层延伸,容易识别,且较强的破裂能量对环境噪声有一定压制作用,因此识别结果相对准确。当其他段压裂时,之前已经压裂开的地层受到挤压后再次产生微地震事件,使前期压裂的裂缝显现出来。从图4可以看出,在压裂第3个封隔段时,前两段压裂产生的裂缝也显现出来,其起裂位置并非都在滑套位置,在不同封隔段中形成的裂缝条数不同,最多达到3~6条。

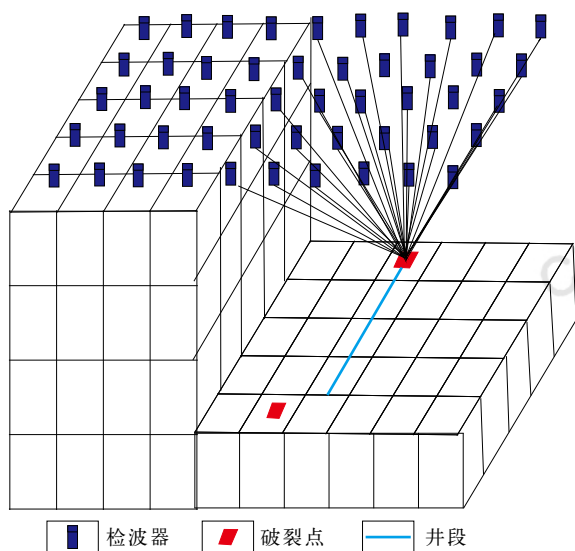


图3 水平井压裂监测示意图

Fig.3 Schematic diagram of horizontal well fracturing monitoring

由于在压裂过程中,岩石的破裂并非持续的<sup>[18]</sup>,在不同的时间段所显示出的破裂位置不同。压裂监测时,每间隔1分钟进行一次破裂能量切片,因此同一个破裂位置会在多个破裂能量切片图中有显示,一般认为出

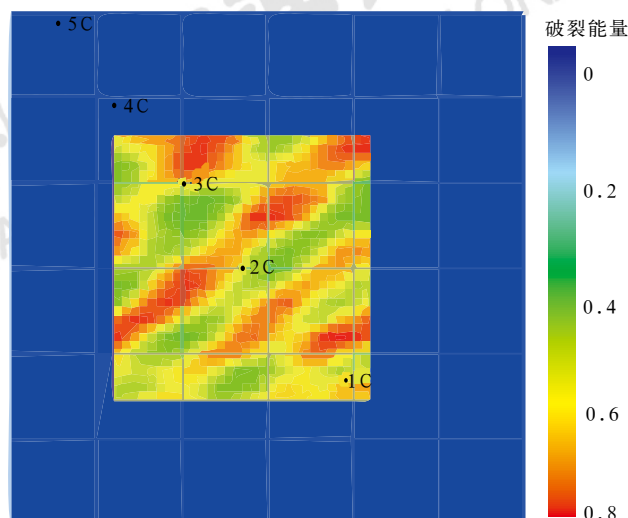


图4 S-1H 井前3段裂缝监测结果图

Fig.4 Fracture monitoring results of the first three stages of well S-1H

1C、2C、3C 表示水平段第1个、第2个、第3个滑套所在位置

现3次以上则标记为确定的破裂点,以消除信号采集和去噪过程中的“伪能量”<sup>[19-20]</sup>,提高识别的准确性。从图5可以看出,在压裂第4段时,滑套4C处出现了多个高的破裂能量显示,则该处标记为破裂点。

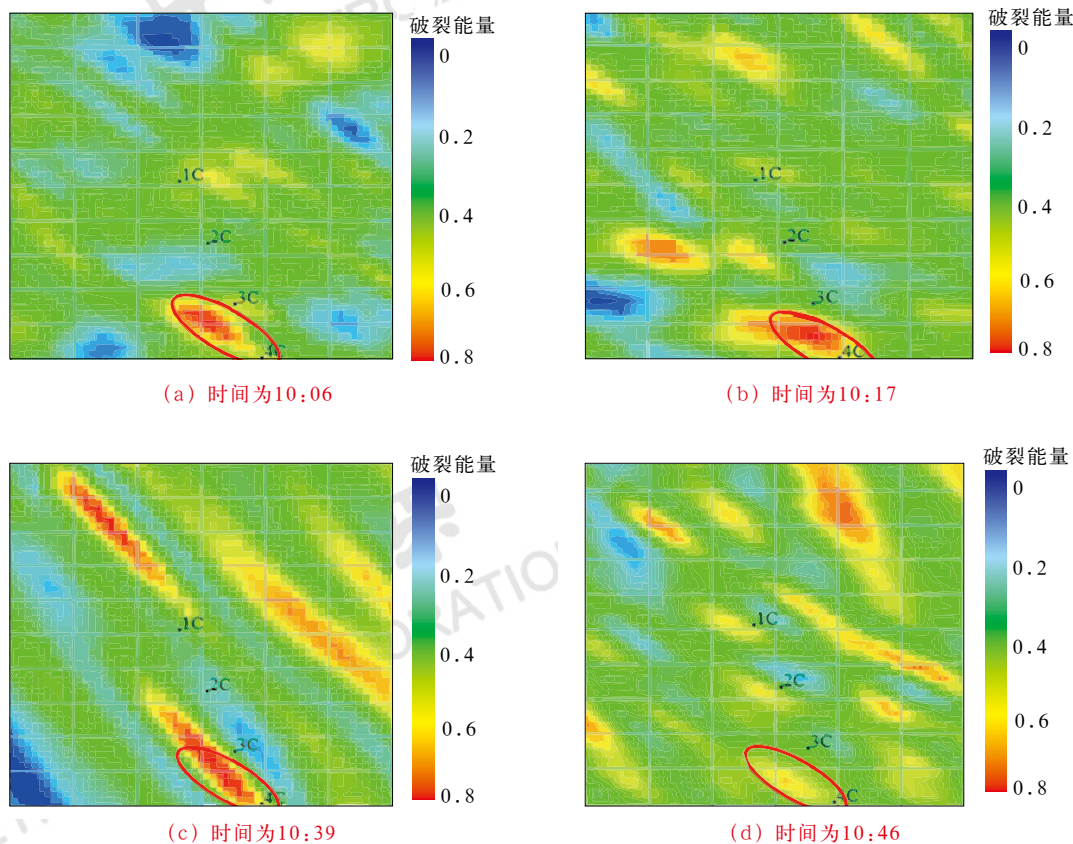


图5 S-3H 井不同时刻破裂能量切片图

Fig.5 Fracture energy slices at different fracturing times of well S-3H



应用微地震向量扫描监测方法对6口水平井共计57段压裂时不同时刻的破裂能量分析,识别出103处破裂位置,其中有效破裂位置(一个压裂段产生两处以上的破裂位置)72处。一个压裂段内只有一条裂缝产生时,不能完全肯定该段储层为甜点发育区,为了准确标识出井段甜点,在数据分析时仅针对一个压裂段内有两处以上破裂位置的区域进行研究。

## 2.2 水平段甜点影响因素分析

为了能够识别出水平段甜点位置,需要对标记为甜点位置的各个参数进行分析,找出关联度最高的参数建立计算方程。为此提取标记为甜点位置的测井和

录井参数,进行关联度分析。由于各井的钻井参数和测井仪器间存在差异,各个参数均采用异常幅度进行分析。

关联度计算主要是通过数据序列曲线的相似程度来判别各个因素之间的关联程度,关联程度越高,对目标的影响越显著。关联度计算模型中主要有邓氏关联度、T型关联度、斜率关联度、B型关联度、C型关联度、广义灰色关联度等方法。本文主要选择邓氏关联度分析法进行计算,它是立足于变量(影响因素)相关关系的R型分析<sup>[21]</sup>。计算结果表明,钻时和全烃与甜点位置的关联度最高(图6),与部分文献中采用录井参数进行产能表征方法一致<sup>[22-23]</sup>。

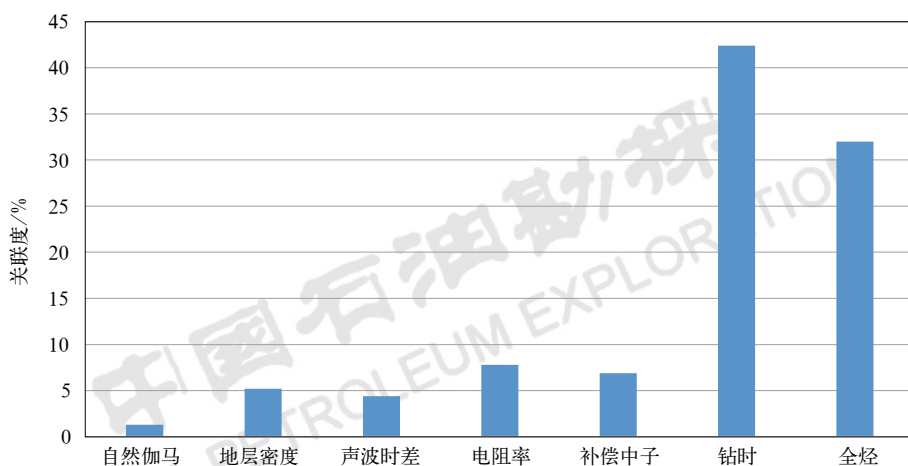


图6 各个参数与甜点位置的关联度计算结果

Fig.6 Correlation degree between various parameters and the sweet spot interval

## 2.3 甜点识别参数 $K_{tr}$ 模型建立

由于不同井的钻井参数不同,在表征甜点时采用测量值与背景值之比,以消除录井的环境差异,保证计算公式的通用性。为了能够找出甜点识别参数 $K_{tr}$ 的截取值和计算公式,分别设置钻时和全烃的权重为 $a$ 、 $b$ 。由于钻时的异常倍数较小,全烃的异常倍数大,为使两个参数处于同一量级,均进行取对数处理,且为了保证 $K_{tr}$ 值的范围在0~1,需再对其进行求取指数。最后的表达式为

$$K_{tr} = \exp \left[ a \cdot \lg \left( \frac{R_{op1}}{R_{op}} - 1 \right) + b \cdot \lg \left( \frac{T_g}{T_{g1}} - 10 \right) \right] \quad (1)$$

式中  $K_{tr}$ ——甜点识别参数;

$a$ 、 $b$ ——钻时和全烃的分配权重;

$R_{op}$ 、 $R_{op1}$ ——砂岩段的钻时基线值和邻近非储

层段的钻时基线值, min/m;

$T_g$ 、 $T_{g1}$ ——砂岩段全烃最大值和邻近非储层段的全烃基线值, %。

由于公式(1)中对应的 $K_{tr}$ 值为截取值,并非一个特定的参数,因此对应的 $a$ 、 $b$ 组合方式有多种,限制 $a+b<1$ ,采用试凑法求解。将识别出的72处有效破裂位置分为两组,一组为50个,各点的钻时与全烃用于试凑求解(部分参数见表1);另一组为22个,各点的钻时和全烃用于验证。调整 $a$ 、 $b$ 值,拟合出与微地震向量扫描监测结果一致的 $K_{tr}$ 模型。通过拟合得出 $a=0.7$ ,  $b=0.2$ ,  $K_{tr}$ 的截取值为0.85。由于应用 $K_{tr}$ 法识别时,仅定性地判断甜点段是否发育,对发育程度未进行评价,即高于 $K_{tr}$ 截取值的段都是甜点位置。但由于部分井段的钻时和全烃异常倍数较高,部分少量位置会出现 $K_{tr}$ 值大于1的情况,在应用时直接将大于1的值取为最大值1,表示甜点段发育。

表1 部分标记为甜点位置的录井全烃和钻时异常倍数

Table 1 Anomaly multiples of total hydrocarbon and ROP of marked sweet spot intervals

编号	井段 /m	全烃		钻时	
		幅度 /%	异常倍数	幅度 / (min · m <sup>-1</sup> )	异常倍数
1	1744.5 ~ 1788.7	32	21.3	4.4	2.7
2	1796.7 ~ 1801.6	21	17.5	4.9	2.4
3	1501.3 ~ 1504.5	32	21.3	4.7	2.6
4	1916.0 ~ 1919.2	24	16.0	5.3	2.3
5	1923.7 ~ 1926.2	16	32.0	5.7	2.1
6	1631.1 ~ 1636.9	27	18.0	4.9	2.4
7	1605.0 ~ 1613.8	60	30.0	6.2	1.9
8	1771.3 ~ 1776.3	62	20.7	5.2	2.3
9	1478.6 ~ 1483.5	42	28.0	5.9	2.0
10	2286.0 ~ 3103.0	37	24.7	7.0	1.7
11	2092.1 ~ 2098.4	50	29.4	5.4	2.2
12	1836.4 ~ 1843.9	29	19.3	6.3	1.9
13	2477.7 ~ 2486.8	44	29.3	5.9	2.0
14	2187.0 ~ 2196.3	39	35.5	6.5	1.8
15	1727.5 ~ 1752.8	27	18.0	6.1	2.0
16	1576.1 ~ 1578.9	19	14.6	6.8	1.8
17	2047.9 ~ 3293.6	33	22.0	7.2	1.7
18	2087.2 ~ 2089.0	41	37.3	5.1	2.4
19	1842.0 ~ 1847.9	62	41.3	4.9	2.4
20	1790.2 ~ 1811.6	33	22.0	7.4	1.6

### 3 现场应用

S-13H 井于 2019 年 4 月完钻, 完钻后根据经验, 将 1154m 长的水平段设计成间隔 120m 左右的 10 段, 并下入井下压裂工具。在压裂前采用  $K_{tr}$  计算公式识别出水平段的甜点分布情况, 其主要的甜点位置分布在第 6 段、第 7 段、第 10 段 (图 7)。由于区域内经历了 4 期强烈的构造运动, 天然裂缝较为发育, 在部分较薄的泥岩段也发育裂缝<sup>[24]</sup>, 因此在该井的第 10 段录井全烃表现出异常响应特征。在这些段适当增加压裂规

模, 加砂量由设计的 40m<sup>3</sup> 增加到 55m<sup>3</sup>。该井在压裂期间进行井下微地震向量扫描监测和示踪剂监测, 从微地震向量扫描监测结果看, 在甜点段的微地震事件点明显多于其他段, 表明这些段形成了多条裂缝 (图 8)。返排期间的示踪剂显示, 前 5 段基本无产能贡献, 第 6 段、第 7 段、第 10 段的产能贡献占 90% 左右 (图 9), 表明示踪剂监测和微地震向量扫描监测的结果与甜点识别结论一致 (施工曲线和裂缝监测都反映出甜点段泥岩也能顺利压开, 并对产能有较大贡献)。

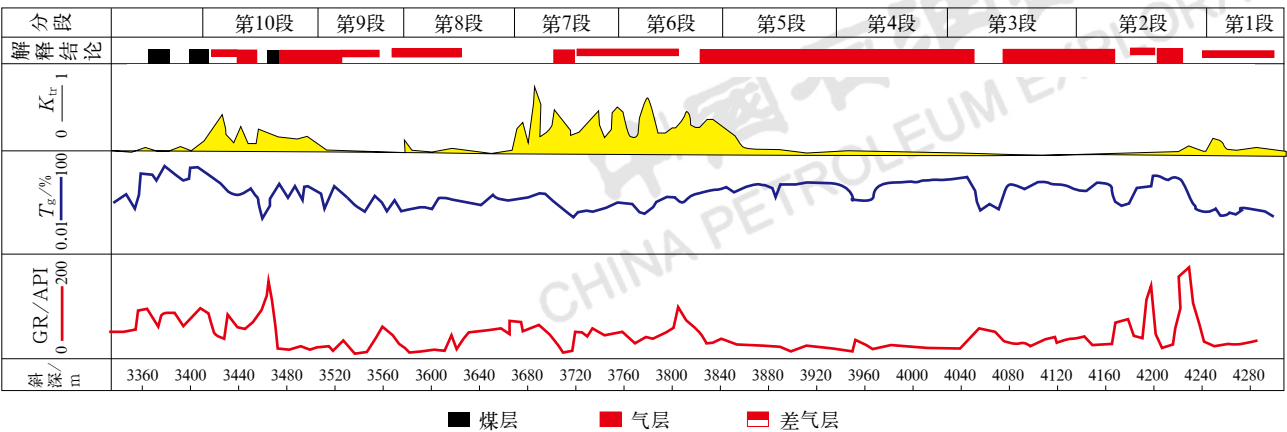


图 7 S-13H 井测井解释图 (黄色填充部分为甜点发育位置)

Fig.7 Log interpretation result of Well S-13H (Yellow filling parts are the sweet spots)

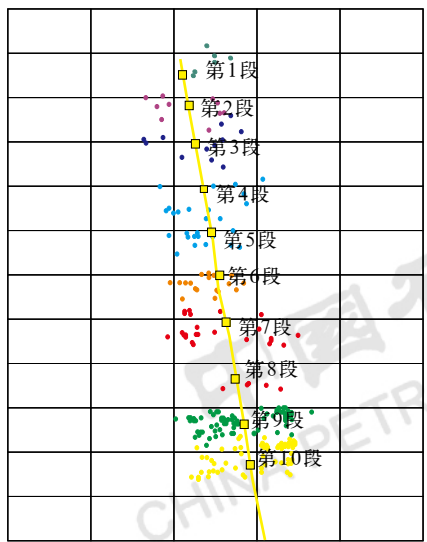


图 8 S-13H 井微地震向量扫描监测图

Fig.8 Microseismic vector scanning monitoring of Well S-13H

图中不同颜色的点为不同压裂段的微地震事件点

对区域内其他 5 口水平井进行压裂甜点计算, 结果表明  $K_{tr}$  模型识别出的甜点数量与压裂井产能具有较高的相关性 (图 10)。在 S-11H 井中尽管砂岩厚度大, 但计算出的  $K_{tr}$  值表明水平段甜点不发育, 压裂后基本不产气, 与识别出的甜点段发育情况一致。S-5H 井大部分位于泥岩段中, 但由于在薄泥岩段中发育天然裂缝, 应用  $K_{tr}$  计算时也有准确响应, 压裂沟通了下部砂岩, 产气量高。因此应用  $K_{tr}$  值识别出的甜点位置越多, 压裂后水平井产能越高, 这为后期实施选择性的分段压裂工艺优化提供了指导。对于压裂甜点分布少的水平井, 可以集中改造对应的应力薄弱段, 从而减少无效压裂段, 降低施工费用和 risk, 提高经济性; 对于压裂甜点分布密集的水平井, 可以细分压裂段数, 增加压裂改造体积, 提高压裂产能。

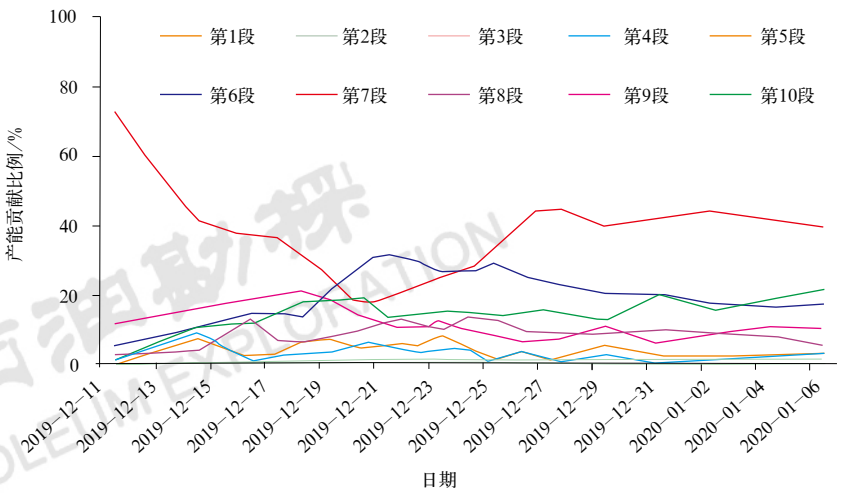


图 9 S-13H 井示踪剂监测图

Fig.9 Tracer monitoring diagram of Well S-13H

第 3 段、第 5 段产能贡献比例为零

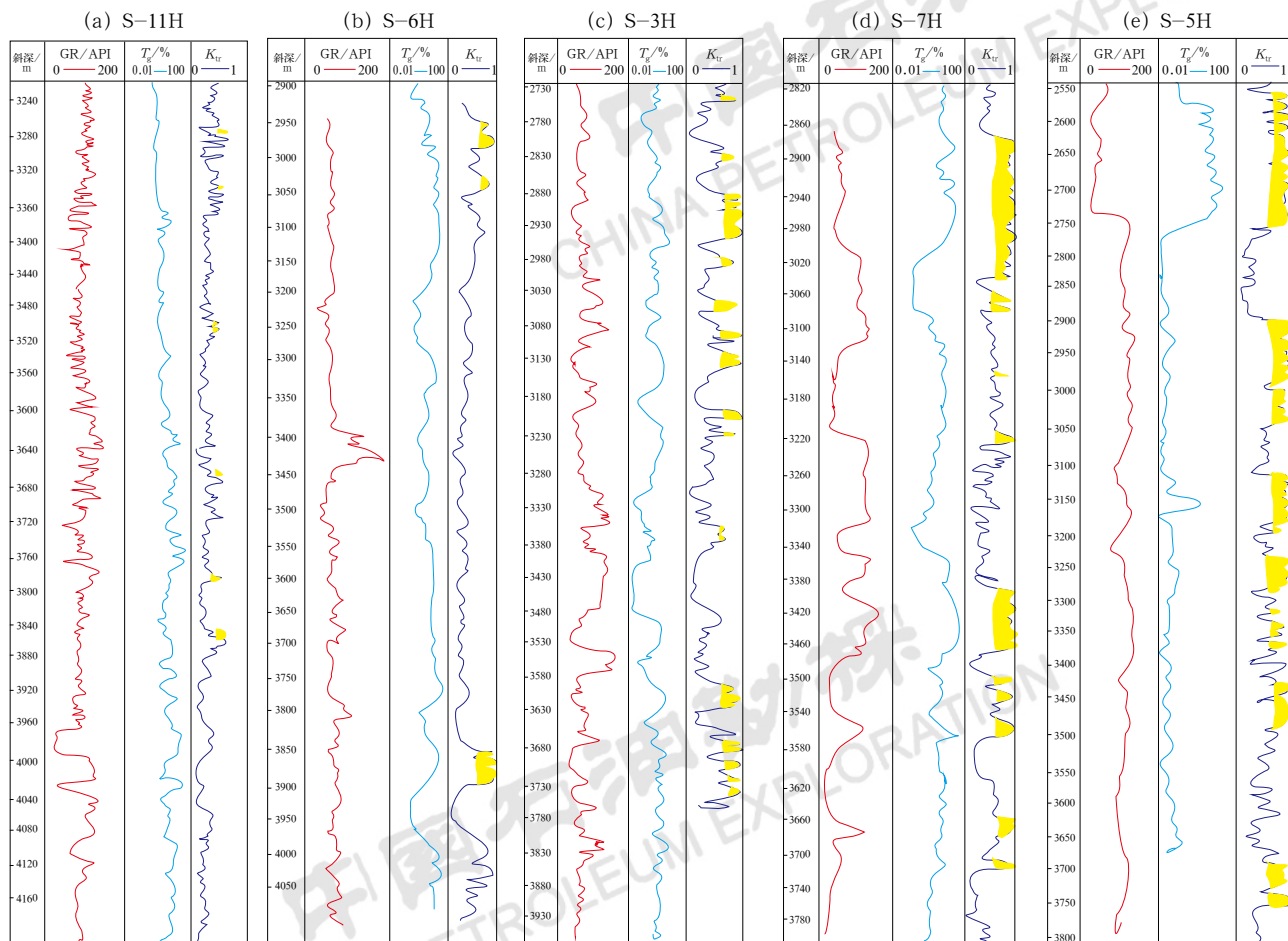


图10 研究区5口水平井压裂甜点位置分布图

Fig.10 Distribution of fracturing sweet spots in five horizontal Wells in the study area

(a) 压裂后微量产气; (b) 压裂后无阻流量为  $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; (c) 压裂后无阻流量为  $2.85 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; (d) 压裂后无阻流量为  $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; (e) 压裂后无阻流量为  $18.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。黄色位置为识别出的压裂甜点

## 4 结论

(1) 压裂井的微地震向量扫描监测表明, 部分水平井段容易形成多条裂缝, 需要针对性增加压裂规模, 扩大泄油面积, 延缓产能递减。

(2) 通过关联度分析, 录井的全烃和钻时与水平段甜点位置的关联度最高, 应用这两个参数可以表征水平段甜点识别参数  $K_{tr}$ , 并采用试凑法建立了计算公式。通过对比甜点位置和非甜点位置, 取  $K_{tr}$  截取值为 0.85, 即高于 0.85 表示甜点发育, 值越大表示甜点发育程度越高。

(3) 对多口井的水平段甜点识别表明, 甜点段为主要的产能贡献段, 且甜点段越发育, 压裂产能越高。

(4) 应用识别的甜点进行压裂设计, 可以针对性地改造甜点段, 降低施工风险和成本, 提高压裂效果。

## 参考文献

- [1] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129-145.  
Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.
- [2] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.  
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [3] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 1-13.  
Li Guoxin, Zhu Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 1-13.



- [4] 金成志, 何剑, 林庆祥, 等. 松辽盆地北部芳 198-133 区块致密油地质工程一体化压裂实践[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 218-225.  
Jin Chengzhi, He Jian, Lin Qingxiang, *et al.* Fracturing stimulation based on geology-engineering integration to tight oil reservoirs in Block Fang 198-133, northern Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 218-225.
- [5] 孙赞东, 贾承造, 李相方, 等. 非常规油气勘探与开发: 上册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 52.  
Sun Zandong, Jia Chengzao, Li Xiangfang, *et al.* Unconventional oil and gas exploration and development: volume I[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 52.
- [6] 朱卫平, 甄怀宾, 刘曰武, 等. 煤层气复杂渗流机制下水平井压裂参数优化研究[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 822-830.  
Zhu Weiping, Zhen Huaibin, Liu Yuewu, *et al.* Study on optimization of fracturing parameters for horizontal wells under complex flow mechanism of coalbed methane[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 822-830.
- [7] Kok J, Moon B, Han S Y, *et al.* The significance of accurate well placement in the shale gas plays[R]. SPE 138438, 2010.
- [8] Mendoza E, Aular J, Sousa L. Optimizing horizontal-well hydraulic fracture spacing in the Eagle Ford Formation, Texas[R]. SPE 143681, 2011.
- [9] 王博, 周福建, 邹雨时, 等. 水平井暂堵分段缝间干扰数值模拟方法[J]. 断块油气田, 2018, 25(4): 506-509.  
Wang Bo, Zhou Fujian, Zou Yushi, *et al.* Numerical simulation method of fracture interaction during temporary plugging staged fracturing[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(4): 506-509.
- [10] 李芳玉, 代力, 吴德志, 等. 多级压裂水平井分段测试压力分析方法[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(1): 120-126.  
Li Fangyu, Dai Li, Wu Dezhi, *et al.* An analysis method for the segmental pressure measurement in multi-stage fractured horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(1): 120-126.
- [11] 周小金, 雍锐, 范宇, 等. 天然裂缝对页岩气水平井压裂的影响及工艺调整[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(6): 94-104.  
Zhou Xiaojin, Yong Rui, Fan Yu, *et al.* Influence of natural fractures on fracturing of horizontal shale gas wells and process adjustment[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6): 94-104.
- [12] 张汝生, 李克智, 黄志文. 定北区块致密气储层水平井压裂参数优化[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(2): 249-253.  
Zhang Rusheng, Li Kezhi, Huang Zhiwen. Horizontal well fracturing parameter optimization for the tight gas reservoir in Dingbei Block[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(2): 249-253.
- [13] 马新仿, 樊凤玲, 张守良. 低渗气藏水平井压裂裂缝参数优化[J]. 天然气工业, 2005, 25(9): 61-63, 155.  
Ma Xinfang, Fan Fengling, Zhang Shouliang. Fracture parameter optimization of horizontal well fracturing in low permeability gas reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(9): 61-63, 155.
- [14] 陈汾君, 汤勇, 刘世铎, 等. 低渗致密气藏水平井分段压裂优化研究[J]. 特种油气藏, 2012, 19(6): 85-87, 145.  
Chen Fenjun, Tang Yong, Liu Shiduo, *et al.* Study on the optimization of staged fracturing of a horizontal well in a tight gas reservoir with low permeability[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(6): 85-87, 145.
- [15] 刘子雄, 常菁铨, 李新发, 等. 基于裂缝监测的致密储层压裂裂缝走向预测[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(6): 846-854.  
Liu Zixiong, Chang Jingxuan, Li Xinfang, *et al.* Fracturing direction prediction based on fracturing monitoring of tight gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(6): 846-854.
- [16] 赵争光, 秦月霜, 杨瑞召. 地面微地震监测致密砂岩储层水力裂缝[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2136-2139.  
Zhao Zhengguang, Qin Yueshuang, Yang Ruizhao. Hydraulic fracture mapping for a tight sands reservoir by surface based microseismic monitoring[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2136-2139.
- [17] 沈琛, 梁北援, 李宗田. 微破裂向量扫描技术原理[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 744-748.  
Shen Chen, Liang Beiyuan, Li Zongtian. Principle of vector scanning technique for micro-fractures[J]. Acta Petrole Sinica, 2009, 30(5): 744-748.
- [18] 刘子雄, 陈玲. 四维影像裂缝监测技术在致密气砂体展布研究中的应用[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 815-821.  
Liu Zixiong, Chen Ling. Application of 4D microseismic fracture monitoring for studying tight gas sandstone distribution[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 815-821.
- [19] 刁瑞, 吴国忱, 崔庆辉, 等. 地面阵列式微地震监测关键技术研究[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(1): 104-109.  
Diao Rui, Wu Guochen, Cui Qinghui, *et al.* Key techniques for surface array microseismic monitoring[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(1): 104-109.
- [20] 梁北援, 程百利, 吴壮坤, 等. 微破裂向量扫描技术的自动化数据处理[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 377-386.  
Liang Beiyuan, Cheng Baili, Wu Zhuangkun, *et al.* Data process in automatically in vector scanning for microseismic[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 377-386.
- [21] 杨兆中, 杨晨曦, 李小刚, 等. 基于灰色关联的逼近理想解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.
- [22] 刘子雄, 李敬松, 黄子俊, 等. 利用气测录井全烃评价压裂产能方法研究[J]. 录井工程, 2015, 26(1): 1-4, 84.  
Liu Zixiong, Li Jingsong, Huang Zijun, *et al.* Research on the method of evaluating fracturing productivity by using gas logging with total hydrocarbon[J]. Mud Logging Engineering, 2015, 26(1): 1-4, 84.
- [23] 印森林, 程乐利, 刘子雄, 等. 基于测录井曲线的致密砂岩储层产能评价方法[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(11): 1627-1638.  
Yin Senlin, Cheng Leli, Liu Zixiong, *et al.* Evaluation of production capacity to tight sandstone reservoir based on logging and mud logging curve[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(11): 1627-1638.
- [24] 姚泾利, 刘晓鹏, 赵会涛, 等. 鄂尔多斯盆地盒 8 段致密砂岩气藏储层特征及地质工程一体化对策[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 186-195.  
Yao Jingli, Liu Xiaopeng, Zhao Huitao, *et al.* Characteristics of He 8<sup>th</sup> member tight sandstone gas reservoir and solution based on geology-engineering integration in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 186-195.