

等权共振法在油页岩区“甜点”预测中的应用

刘雷颂*, 郭增虎, 张浩, 韩宇春, 刘冬民, 杨鑫

东方地球物理公司研究院地质研究中心, 河北 涿州

收稿日期: 2022年10月18日; 录用日期: 2022年11月16日; 发布日期: 2022年11月23日

摘要

油页岩区“甜点”一般分工程“甜点”与地质“甜点”, 又称之为双“甜点”。五维数据的出现, 使“甜点”的预测更多元化。预测“甜点”的目的是提高钻井的采收率, 使每口钻井更具有效益化。过去各种“甜点”预测结果以多种图形式或叠合形式(该形式的弱点不能叠合过多图件)提供给决策者参考, 多种图形式不能将最有利的区域更直观地展现出来, 叠合的形式如果效果不好反而影响决策者的判断。那么如何使更多的信息能综合表现出来, 等权共振法使各种“甜点”信息综合在一起, 总体表现在一张图中, 决策者可以一目了然。

关键词

“甜点”, 等权共振法, 预测, “甜点”参数

Application of Equal-Weight Resonance Method for “Sweet Spot” Prediction in Oil Shale Area

Leisong Liu*, Zenghu Guo, Hao Zhang, Yuchun Han, Dongming Liu, Xin Yang

BGP Geological Research Center, CNPC, Zhuozhou Heibei

Received: Oct. 18th, 2022; accepted: Nov. 16th, 2022; published: Nov. 23rd, 2022

Abstract

The “dessert” in the oil shale area generally includes engineering “dessert” and geological “dessert”, also called double “dessert”. The emergence of five-dimensional data makes the prediction of the “dessert” more diversified. The purpose of predicting the “dessert” is to increase the recov-

*第一作者。

文章引用: 刘雷颂, 郭增虎, 张浩, 韩宇春, 刘冬民, 杨鑫. 等权共振法在油页岩区“甜点”预测中的应用[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(11): 1400-1408. DOI: 10.12677/ag.2022.1211137

ery rate of drilling and make each well more profitable. In the past, various “desserts” prediction results were provided to decision makers in multiple graph forms or superimposed forms (the weaknesses of this form cannot be superimposed on too many graphs), and the areas where multiple graph forms cannot be the most advantageous are more intuitively displayed. So how to make more information can be comprehensively displayed? The equal-weight resonance method integrates all kinds of “dessert” information together, and the overall performance is shown in a picture, so that decision makers can see it at a glance.

Keywords

“Dessert”, Equal-Weight Resonance, Prediction, The “Dessert” Parameter

Copyright © 2022 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

美国因为页岩油的工业生产从石油净进口国,变成了石油净出口国。页岩油作为非常规油气的一项,近年来在我国油气总产量的比重也是逐渐上升[1]。同时页岩油勘探开启了“进源找油”[2][3][4]新理论。页岩油在新技术的应用下,取得了突出效果,正在成为非常规油气勘探领域的新热点[5][6][7][8][9]。“两高一宽”资料的出现,使通过物探技术预测工程“甜点”参数成为可行。在相应公式推导的基础上,借助叠前地震数据可以预测双“甜点”的多个参数。参数中如:TOC、裂缝、脆性、孔隙等参数较为常规,孔隙压力、抗压、破裂压力等参数逐渐开始被重视。

2. 实验区概况

实验工区为松辽盆地 B 凹陷,目的层位沙四段油页岩,地层厚度 30~80 m。该层段室内岩性分析表明,储层主要由黏土矿物、脆性矿物和有机质三部分组成。脆性矿物主要由砂岩和碳酸盐岩两类。该层段可进一步细分为 3 个层组,上部为含碳酸盐油页岩、油页岩及含粉砂油页岩,中部为泥质云岩、粉砂岩和含碳酸盐油页岩,底部主要发育泥质云岩及含碳酸盐油页岩、含粉砂油页岩。已钻井证实中部为最有利层组,录井均见到了很好的显示,部分井进行简单压裂进入了工业生产。

3. 各种“甜点”参数预测

3.1. 叠前地质统计反演

大部分“甜点”参数都与弹性参数有关,获得弹性参数的常规方法即叠前反演,三参数反演可以得到密度、纵波阻抗、横波阻抗及纵横波速比等弹性参数,通过相应的公式可以得到拉梅系数、剪切模量、体积模量、杨氏模量、泊松比等弹性参数。叠前地质统计反演获得的弹性参数纵、横向分辨率会相对高些。基于试验区“两高一宽”[10][11][12]采集数据,本次研究采用的是分方位叠前地质统计反演,即对叠前数据首先进行分方位,然后再进行分角度叠加。首先针对每个方位的不同角度叠加数据进行马尔科夫链叠前地质统计反演,核心算法为贝叶斯推论与马尔科夫链相结合的方法[13],简单讲就是把目的层分成若干小的层段,每个层段的概率预测用贝叶斯推论表达,该方法又称遗传算法,从一个小层段转移相邻层段的过程需要一个转移矩阵,一个一个的转移矩阵用到的表达式即马尔科夫链,该方法的优点是转移过程不受相邻状态(小层段概率分布)的影响。

通过对每个方位的叠前地质统计反演，得到该方位的密度、纵波阻抗、横波阻抗及纵横波速比参数 (ρ 、P-imp、S-imp、 V_p/V_s)。

弹性参数转换公式如下：

$$\sigma = \frac{r-2}{2r-2} \tag{1}$$

$$r = \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2$$

$$\lambda = (V_p^2 - 2V_s^2) / \rho \tag{2}$$

$$\mu = 2V_s^2 / \rho \tag{3}$$

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \tag{4}$$

$$K = \frac{3\lambda + 2\mu}{3} \tag{5}$$

上式中： σ 为泊松比， V_p 为纵波速， V_s 为横波速， λ 为拉梅系数， μ 为剪切模量， E 杨氏模量， K 体积模量，公式(1)~(5) [14]。

叠前反演流程如下(图 1)，图 1 中远、中、近角度叠加数据是反演的基础数据，该数据的信噪比及饱和度是影响最终结果的重要数据，子波体提取的时窗需要针对目的层，且时窗大于一个子波长度，弹性曲线是分析结果的关键素材及反演质控因素，如果是大套地层反演，层位的格架对地层的接触关系及储层的展布预测有引导性的作用。

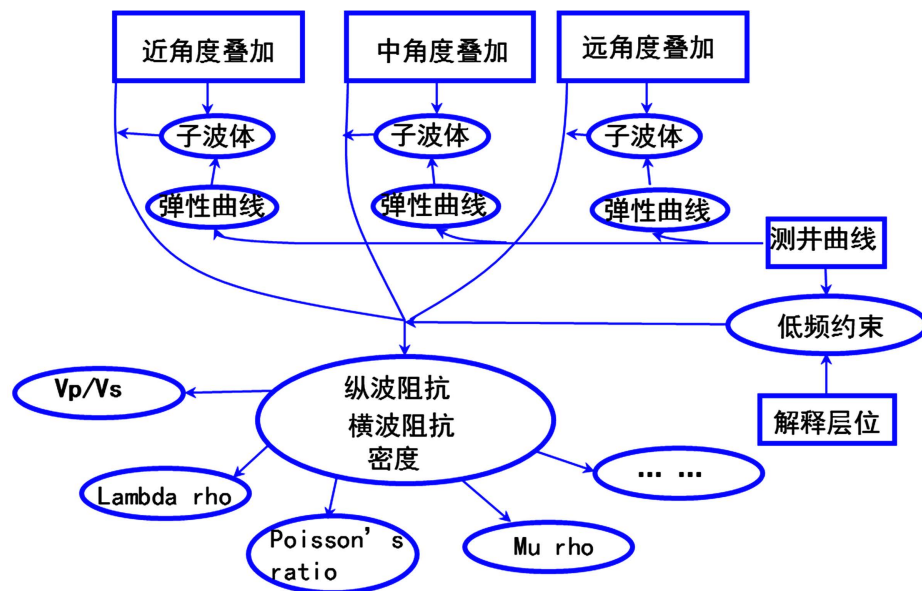


Figure 1. Pre-stack inversion process
图 1. 叠前反演流程

3.2. 各项异性反演

各项异性反演是在 HTI 介质模型基础上推导出的公式：

$$\log\left(\frac{V_p}{V_s}\right)' = b_0 + b_1 * \cos[2(\omega - \phi)] + b_2 * \cos[4(\omega - \phi)] \quad (6)$$

$$b_0 = \ln \frac{V_p}{V_s} + \frac{1}{2}\gamma + \left(\frac{4K+3}{64K}\right)\delta + \left(\frac{12K-3}{64K}\right)\varepsilon$$

$$b_1 = \frac{1}{2}\gamma + \frac{1}{16K}\delta + \left(\frac{4k-1}{16K}\right)\varepsilon$$

$$b_2 = -\left(\frac{4K-1}{64K}\right)\delta + \left(\frac{4K-1}{64K}\right)\varepsilon$$

$$\varepsilon \approx \frac{V_p(90^\circ) - V_p(0^\circ)}{V_p(0^\circ)}$$

$$\gamma \approx \frac{V_s(90^\circ) - V_s(0^\circ)}{V_s(0^\circ)}$$

$$\delta \approx 4 \left[\frac{V_p(45^\circ) - V_p(0^\circ)}{V_p(0^\circ)} \right] - \varepsilon$$

上式中: ω 为工区方位, ϕ 各项异性方位, K 体积模量, V_p 纵波速, V_s 横波速。

通过分方位叠前地质统计反演, 得到各个方位的纵横波速度比, 通过公式(6) (该公式引自 CGG 软件说明书)反演得到各向异性数据。

3.3. 脆性指数预测

简单的脆性指数公式如下:

$$Brt = \frac{E + \sigma}{2} \quad (7)$$

式中: E 为杨氏模量, σ 为泊松比。

张平[15]等对公式(7)进行了改进, 公式如下:

$$Brt = \frac{E_{Brt} + \sigma_{Brt}}{2} \quad (8)$$

$$E_{Brt} = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}$$

$$\sigma_{Brt} = \frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}$$

上式中: E_{Brt} 为均一化杨氏模量, E_{\max} 为最大杨氏模量, E_{\min} 为最小杨氏模量, σ_{Brt} 为均一化泊松比, σ_{\max} 为最大泊松比, σ_{\min} 为最小泊松比。

公式(8)中的杨氏模量和泊松比可以通过叠前反演结果利用相应公式计算可得。

3.4. 应力甜点预测

应力甜点[16]: 页岩油藏为裂缝性油藏, 当所受的地层应力大于岩石破裂所需的压力时便产生了裂缝, 地层应力大于破裂压力区称为应力甜点区。

地层应力亦称地层孔隙压力。原理公式为 Fillippone 法公式:

$$P_p(H) = \frac{V_{\max} - V_i}{V_{\max} - V_{\min}} \int_0^H \rho_b(h) g dh \quad (9)$$

式中 V_{\max} 为岩石骨架速度, 通过 Voigt 模型估算, V_{\min} 为临界孔隙速度, 可以通过 Reuss 模型估算, V_i 地层速度, ρ_b 地层密度。

公式(9)的速度体可以通过反演结果波阻抗除以密度体得到, 密度体在叠前反演中可以直接获得。地层破裂压力公式如下:

$$P_f = \frac{\sigma}{1-\sigma} (P_e + P_p) + P_p \quad (10)$$

$$P_e = a_1 + a_2 e^{a_3 K}$$

上式中 P_e 为有效应力, a_1 、 a_2 、 a_3 为常数, K 为体积模量(叠前反演结果计算可得), σ 为泊松比。

3.5. TOC 预测

针对研究区实际情况, 采用改进行型 $\Delta \log R$ 公式。

$$\Delta \log R = \log(R/R_{\text{基线}}) + 0.02(\Delta t - \Delta t_{\text{基线}}) \quad (11)$$

式中: $\Delta \log R$ 为两条曲线间的距离; R 为测井仪实测电阻率(单位为 $\Omega \cdot m$); $R_{\text{基线}}$ 为基线对应的电阻率(单位为 $\Omega \cdot m$); Δt 为实测的声波时差(单位为 $\mu s/ft$); $\Delta t_{\text{基线}}$ 为基线对应的声波时差(单位为 $\mu s/ft$; 若单位为 $\mu s/m$ 时, 则需除以 3.28, 因为 1 m 等于 3.28 ft)。

$\Delta \log R$ 与 TOC 呈线性相关, 并且是成熟度的函数, 由 $\Delta \log R$ 计算 TOC 的定量关系式是:

$$TOC = 10(2.297 - 0.1688R_o) \Delta \log R \quad (12)$$

可简化为 $TOC = a \Delta \log R$ 。

式(11)中 Δt 替换为波阻抗(impr), $\log R$ 替换为由电阻率通过 foust 公式转换为伪声波时差, 再计算的伪波阻抗(impr)。那么改进的公式(11)两部分基线就统一为同一条波阻抗曲线, 进而可以简化为波阻抗与伪波阻抗的差值。通过参数回归公式(12)可以改进为

$$TOC = f(\text{impr} - \text{imp}) \quad (13)$$

3.6. 抗压强度预测

抗压强度预测在土木工程中应用的比较多, 对非常规油气预测可以提供参考, 尤其是后期压裂工程有参考价值。抗压强度公式[17]本次直接用前人的经验公式:

$$S_c = 3.3 \times 10^{14} \rho V_p^4 \left(\frac{1+\sigma}{1-\sigma} \right)^2 (1-2\sigma)(1+V_{sh}) \quad (14)$$

上式中: ρ 为密度, V_p 为纵波速, σ 为泊松比, V_{sh} 泥质含量。

表 1 中为常见的岩石抗压强度, 单位 Mpa, 参考表 1, 可以对预测结果有个感性认识, 配合前面脆性预测可以提高工程甜点的预测精度。

Table 1. Common rock compressive strength

表 1. 常见的岩石抗压强度

岩石	抗压强度	岩石	抗压强度	岩石	抗压强度	岩石	抗压强度
辉绿岩	180~300	花岗岩	100~250	流纹岩	180~300	闪长岩	100~250
安山岩	100~250	白云岩	80~250	辉绿岩	200~350	玄武岩	150~300

Continued

石英岩	150~350	大理岩	100~250	片麻岩	50~200	灰岩	20~200
页岩	10~100	砂岩	20~200	砾岩	10~150	板岩	60~200

3.7. 流体因子预测

在叠前反演结果的基础上, 进行流体预测一般通过单参数门槛值或两参数交会进行预测。Russell (2003)等提出流体因子的识别方法, 其公式为:

$$\rho f = I_p^2 - CI_s^2 \quad (15)$$

$$C = \frac{V_p - dry}{V_s - dry}$$

I_p 为纵波阻抗, I_s 为横波阻抗, C 为调节参数, V_p 为纵波速, V_s 为横波速, dry 为骨架速度。贺振华、宁忠华(2006)等提出高灵敏流体识别因子, 同时去掉了调节参数, 公式如下:

$$\rho f = \frac{I_p}{I_s} (I_p^2 - 2I_s^2) \quad (16)$$

4. 等权共振法的应用

前面介绍了油页岩中常见的“甜点”预测原理, 各种“甜点”针对不同的地质或工程参数不同, 预测有利区的结果会有差别。如图 2, 图 2(a)为脆性指数目的层预测结果, 数值范围为 30~60。图 2(b)为抗压强度, 数值范围在 60~200 之间, 图 2(c)为目的层应力甜点预测结果, 数值范围 0.03~1.2, 图 2(d)为流体因子目的层预测结果, 数值范围为 $1e+7 \sim 1.3e+8$, 图 2(e)为目的层 TOC 预测结果, 数值范围在 0.65~1.75 之间。其中图 2(a)~(c)为工程“甜点”, 图 2(d)和图 2(e)为地质“甜点”。以往选择有利钻探区需参考各个“甜点”预测参数, 有时候用到叠合法, 叠合法的缺点是两、三个参数还可以较清楚的表达, 参数多了反而显得乱、不能突出有利区。

如何才能使各种“甜点”参数表现在一张图上, 简单明了, 以供决策者快速选择目标, 等权共振法是目前想到的较好的方法。等权共振法的原理是对各种“甜点”参数的有利部分进行叠加, 即各种参数有利区的交集。

具体做法是, 首先对每个“甜点”参数进行重新刻度到 0~1, 公式如下:

$$X_a = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (16)$$

X_a 刻度后的“甜点”参数, X 刻度前“甜点”参数, X_{\min} 刻度前“甜点”参数最小值, X_{\max} 刻度前“甜点”参数最大值。

然后对各个参数进行累加再求均值, 公式如下:

$$X_{mean} = \sum_i^n X_i / n \quad (17)$$

X_{mean} “甜点”参数均值, X_i 刻度后“甜点”参数。

图 2(f)为等权共振法在目的层“甜点”预测的平面图, 暖色为有利区, 冷色为相对不利区。目前位于预测高值中的钻井均为工业油流井, 根据预测结果, 在研究区西部有利区部署一口水平井 BP1 井, 如图 3, 其中右图为局部放大图。图 4 为 BP1 井随钻录井图, 目的层共钻 1785 米, 其中钻遇碳酸盐岩油页岩 1245 米, 泥质云岩 540, 均为脆性岩性, 研究区该岩性经过压裂即可见产, 通过后期钻井验证, 证明等权共振法预测“甜点”精度可靠。

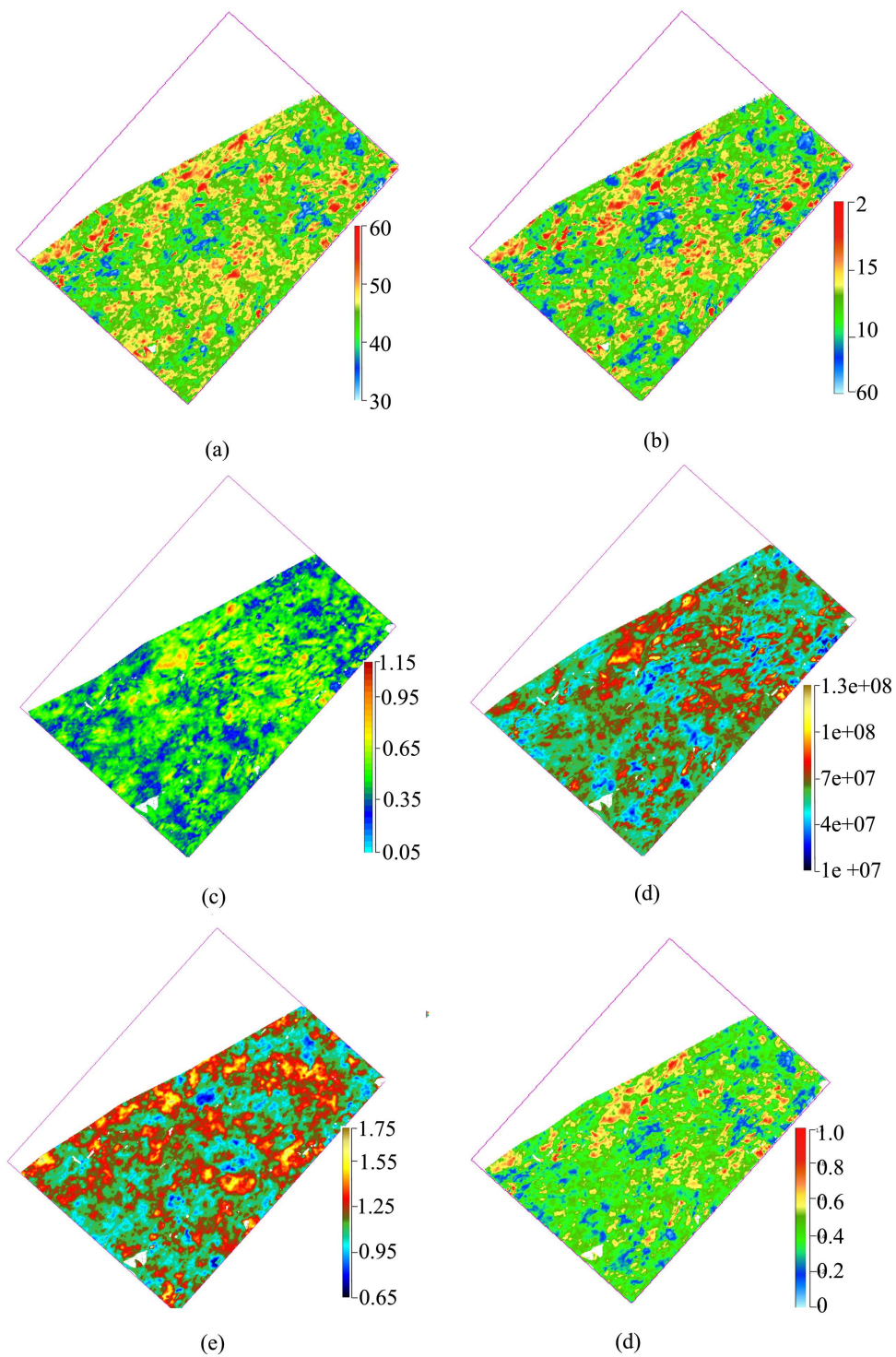


Figure 2. The “dessert” attribute map of target layer. ((a) The prediction map of target brittleness index, (b) The prediction map of compressive strength of target layer, (c) The prediction map of stress dessert in target layer, (d) The prediction map of fluid factor in target layer, (e) The prediction map of total organic carbon in target layer, (f) The prediction map of “dessert” by equal-weight resonance method in target layer)

图 2. 目的层“甜点”属性图。((a) 目的层脆性指数预测平面图, (b) 目的层抗压强度预测平面图, (c) 目的层应力甜点预测平面图, (d) 目的层流体因子预测平面图, (e) 目的层 TOC 预测平面图, (f) 等权共振法“甜点”预测平面图)

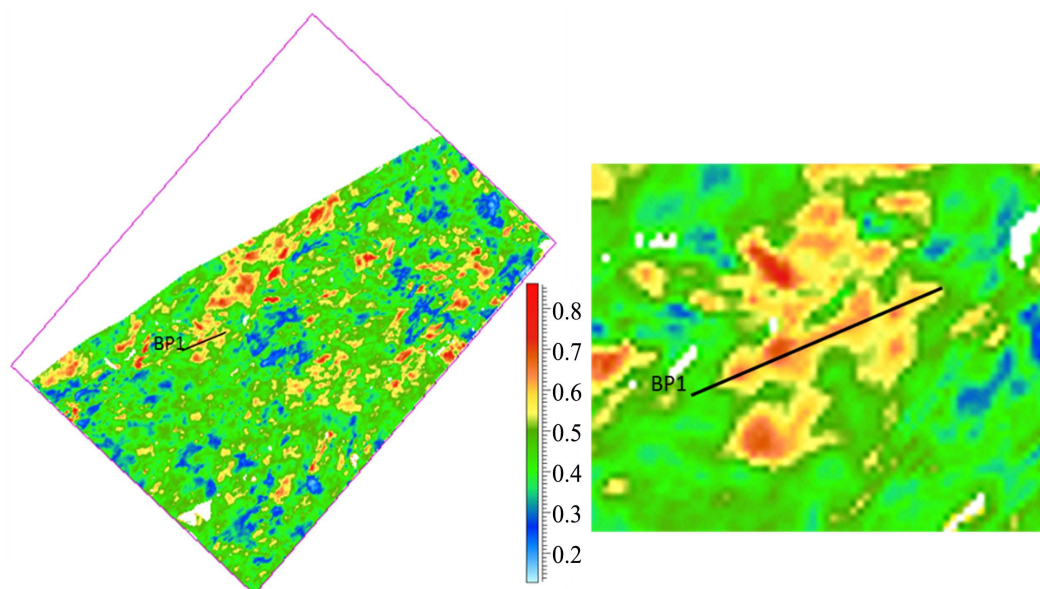


Figure 3. Well plane trajectory of BP1
图 3. BP1 井平面轨迹图

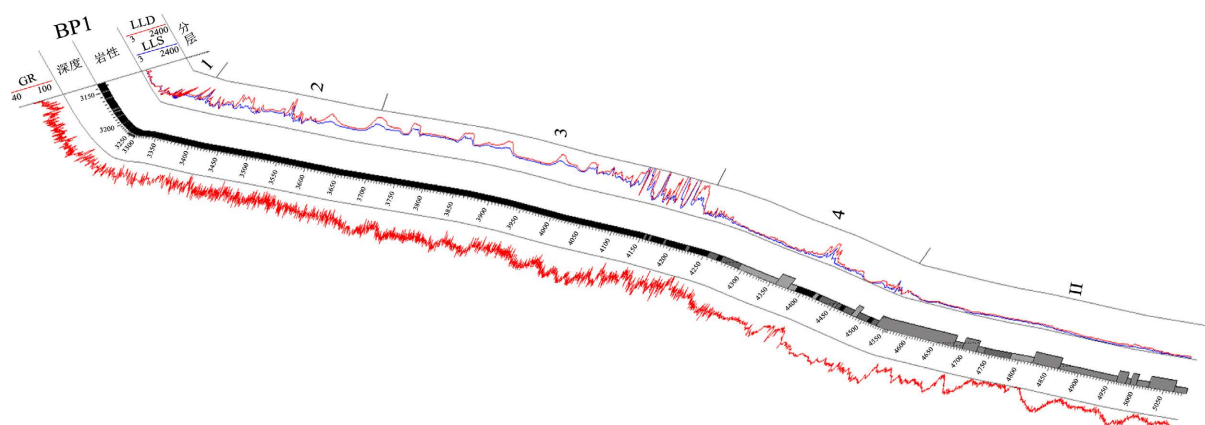


Figure 4. The with drilling logging of BP1
图 4. BP1 井随钻录井图

5. 结论与建议

结论：通过在研究区的实验表明，等权共振法的精度在油页岩区能满足钻井要求，对井位的部署具有指导意义。

建议：等权共振法需要的“甜点”参数不限，参数越多钻遇工业油流的几率越大。针对工程和地质“甜点”至少各有一个，这样利用等权共振法才有意义。另外，对原始数据的质控也很关键，原始数据是预测“甜点”的基础。

该方法可以推广在其他油藏类型中应用，比如碎屑岩、碳酸盐、致密岩等。

参考文献

- [1] 邱振, 邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29.
- [2] 邹才能, 杨智, 孙莎莎, 等. “进源找油”: 论四川盆地页岩油气[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(7): 903-920.

- [3] 杨智, 邹才能. “进源找油”: 源岩油气内涵与前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 173-184.
- [4] 邹才能, 杨智, 王红岩, 等. “进源找油”: 论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田[J]. 地质学报, 2019, 93(7): 1551-1562.
- [5] 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.
- [6] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 李登华, 郑民. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350.
- [7] 邹才能, 陶士振, 白斌, 杨智, 朱如凯, 侯连华, 等. 论非常规油气与常规油气的区别和联系[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(1): 1-16.
- [8] 邹才能, 陶士振, 侯连华. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 1-31.
- [9] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 杨智. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25-32.
- [10] 王华忠, 郭颂, 周阳. “两宽一高”地震数据下的宽带波阻抗建模技术[J]. 石油物探, 2019, 58(1): 1-8.
- [11] 周佳和, 徐聪. “两宽一高”地震勘探技术在复杂油气勘探中的应用[J]. 世界地质, 2020, 39(2): 422-428.
- [12] 王华忠. “两宽一高”油气地震勘探中的关键问题分析[J]. 石油物探, 2019, 58(3): 313-32.
- [13] 覃素华, 刘雷颂, 李想, 等. 分方位马尔科夫链叠前地质统计反演在 Q 区块碎屑岩薄储层预测中的应用[J]. 地质与勘探, 2021, 57(1): 156-165.
- [14] 陈颀. 岩石物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 69-71.
- [15] 张平, 夏晓敏, 催涵, 等. 基于岩石物理实验的致密油储集层脆性指数预测——以柴达木盆地跃灰 101 井区为例[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(5): 615-623.
- [16] 刘建伟, 张云银, 曾联波, 等. 非常规油藏地应力和应力甜点地球物理预测——渤南地区沙三下亚段页岩油藏勘探实例[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(4): 792-800.
- [17] 田野. 地层三压力预测技术及在霍多莫尔油田中的应用[J]. 西部探矿工程, 2018(8): 38-40.