

PNNPlus饱和度测井技术在胜利油区剩余油评价中的应用研究

冯焕婷

中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司油藏动态监测中心, 山东 东营

收稿日期: 2026年5月9日; 录用日期: 2026年6月2日; 发布日期: 2026年6月8日

摘要

胜利油区已进入开发中后期, 长期注水开发导致储层水淹程度加剧, 剩余油分布更加零散复杂。准确识别剩余油富集层段、评价水淹级别, 并为补孔、封堵、改层和压裂等措施提供依据, 是老油田精细挖潜的重要基础。目前, 剩余油评价主要依赖常规测井、碳氧比测井、脉冲中子俘获测井及PNN饱和度测井等方法。其中, PNN技术通过宏观俘获截面Sigma反映地层含水状况, 在套管井剩余油监测中具有较好适用性, 相关研究已在复杂水淹层识别、解释参数确定及现场应用方面取得一定进展。但在胜利油区实际应用中, 传统PNN方法仍存在不足: 低矿化度条件下油水俘获差异减小, 高矿化度条件下井筒背景干扰增强, 泥质含量、孔隙度和岩性非均质性也会影响Sigma响应, 单一参数解释容易造成水淹级别误判。PNNPlus是在传统PNN基础上的改进技术, 通过增加活化伽马探测短节, 实现热中子俘获截面与活化伽马能谱信息的联合采集, 为复杂储层条件下剩余油评价提供了新的手段。本文结合胜利油区地质与开发特征, 建立以Sigma为核心, 融合GR-SIGMA交会分析、泥质校正、孔隙度修正和地层水矿化度参数的PNNPlus综合解释方法, 并通过常规老井、低孔隙度井、高矿化度井、低矿化度井及新投井实例验证其适用性, 为胜利油区剩余油精细评价和开发调整提供技术支持。

关键词

PNNPlus解释方法, 胜利油区, 水淹状况区分

Application Research of PNNPlus Saturation Logging Technology in Residual Oil Evaluation in Shengli Oilfield

Huanting Feng

Reservoir Dynamic Monitoring Center, Shengli Oilfield Branch, SINOPEC, Dongying Shandong

Received: May 9, 2026; accepted: June 2, 2026; published: June 8, 2026

Abstract

The Shengli Oilfield has entered the middle and late stages of development. Long-term waterflooding development has aggravated reservoir water flooding and made the distribution of remaining oil more scattered and complex. Accurately identifying enriched intervals of remaining oil, evaluating water flooding levels, and providing a basis for well stimulation measures such as perforation replenishment, water shutoff, layer reworking and fracturing constitute an important foundation for fine potential tapping in mature oilfields. At present, the evaluation of remaining oil mainly relies on conventional logging, carbon-oxygen ratio logging, pulsed neutron capture logging, PNN saturation logging and other technologies. As a technique reflecting formation water cut through the macroscopic capture cross-section Sigma, PNN is well applicable to remaining oil monitoring in cased wells. Relevant researches have made certain progress in the identification of complex water-flooded layers, determination of interpretation parameters and field application. Nevertheless, the conventional PNN method still has limitations in the practical application of the Shengli Oilfield: the difference in capture cross-section between oil and water decreases under low salinity conditions, while borehole background interference increases under high salinity conditions. In addition, shale content, porosity and lithological heterogeneity also affect the Sigma response, and interpretation relying on a single parameter is prone to misjudgment of water flooding levels. PNNPlus is an improved technology developed on the basis of conventional PNN. By adding an activated gamma detection sub-section, it realizes the combined acquisition of thermal neutron capture cross-section and activated gamma spectrum information, providing a new approach for remaining oil evaluation under complex reservoir conditions. Combined with the geological and development characteristics of the Shengli Oilfield, this paper establishes a comprehensive PNNPlus interpretation method centered on Sigma, integrated with GR-SIGMA crossplot analysis, shale correction, porosity correction and formation water salinity parameters. Its applicability is verified by case studies of conventional old wells, low-porosity wells, high-salinity wells, low-salinity wells and newly commissioned wells, which provides technical support for fine remaining oil evaluation and development adjustment in the Shengli Oilfield.

Keywords

PNNPlus Interpretation Method, Shengli Oilfield, Discrimination of Water-Flooded Levels

Copyright © 2026 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

针对油田中后期水淹层识别难题，郑利江等[1]等国内外专家采用了多种饱和度测井技术进行复杂水淹层识别研究，取得了相对较好的应用效果。然而，胜利油区地质条件复杂，水淹状况多样，仍需建立适合本区的解释方法。

PNNPlus 饱和度测井仪主要由通讯 + 自然伽马短节、中子发生器短节、中子探测器短节、活化伽马探测器短节四部分组成，相较于 PNN 饱和度测井仪器，PNNPlus 是传统 PNN 技术的升级版，通过增加伽马探测器和双探测器结构，实现了从“单参数(Sigma)评价”向“多参数(Sigma + 能谱)联合评价”的跨越，能更有效剔除井眼干扰，适应更复杂的储层条件，如图 1 所示。

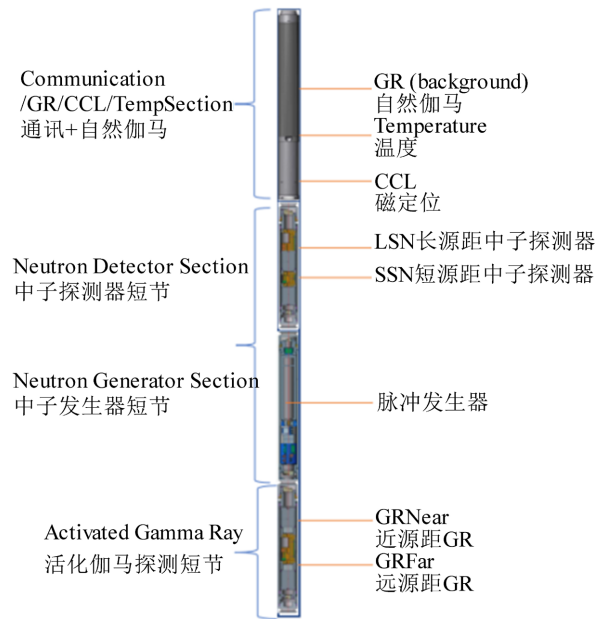


Figure 1. Structure diagram of the PNNPlus instrument
图 1. PNNPlus 仪器结构图

2. PNNPlus 解释方法

2.1. 宏观俘获截面解释基础

PNNPlus 解释的主要参数是宏观俘获截面 Σ -地层对热中子的吸收能力。不同岩石骨架、泥质成分以及孔隙流体的俘获截面存在明显差异，一般而言，地层宏观俘获截面主要包括岩石骨架、泥质、油气和地层水四部分贡献[2]。

在储层条件下，岩石骨架和泥质决定了地层的基本岩性特征，孔隙中的油、水分布则决定了流体性质对总俘获截面的影响。由于地层水中氯离子具有较强的热中子吸收能力，因此当地层含水程度增加时，宏观俘获截面通常会明显增大。基于这一特点，可以通过宏观俘获截面与其他测井参数的联合分析，反演储层的含水状况及水淹程度[3]。

PNNPlus 饱和度测井解释方法，在已知实测宏观俘获截面的前提下，求取准确的泥质含量和有效孔隙度，再计算地层水俘获截面等，最终建立含水饱和度解释模型，实现准确解释。

宏观俘获截面 Σ 与储层关系：

$$\Sigma = (1 - V_{SH} - \Phi) \Sigma_{ma} + V_{SH} \Sigma_{SH} + \Phi (1 - S_w) \Sigma_h + \Phi S_w \Sigma_w \quad (1)$$

求 S_w

$$S_w = \frac{\Sigma_{log} - \Sigma_{ma} + V_{SH} (\Sigma_{ma} - \Sigma_{SH}) + \Phi (\Sigma_{ma} - \Sigma_{SH})}{\Phi (\Sigma_w - \Sigma_{SH})} \quad (2)$$

式中： Σ ：地层的宏观俘获截面 Σ 。

第一部分：岩石骨架的贡献

$(1 - V_{SH} - \Phi)$ ：骨架体积百分比。

Σ_{ma} ：岩石骨架的俘获截面。

第二部分：泥质的贡献

V_{SH} ：泥质含量。

Σ_{SH} ：泥质的俘获截面。

第三部分：油气的贡献

$(1-S_w)$ ：含烃饱和度。

Σ_h ：油气(烃类)的俘获截面，通常 Σ_{oil} 为 18~22 (c.u.)，其数值与原油黏度有关系，重质稠油为 24~28 (c.u.)； Σ_{gas} 为 4~12 (c.u.)。

第四部分：水的贡献

Φ ：地层总孔隙度。

S_w ：含水饱和度。

Σ_w ：地层水的俘获截面，其数值取决于地层水 CI 的含量，即矿化度，低矿水一般为 22 (c.u.)，高矿水可高达 50 (c.u.)。

2.2. 泥质含量计算

泥质含量是 PNNplus 饱和度测井解释中的基础参数，也是影响孔隙度和含水饱和度计算精度的重要因素[4]。为提高泥质识别的准确性，本文采用 GR-SIGMA 交会图(如图 2)与经验模型相结合的方法计算泥质含量。

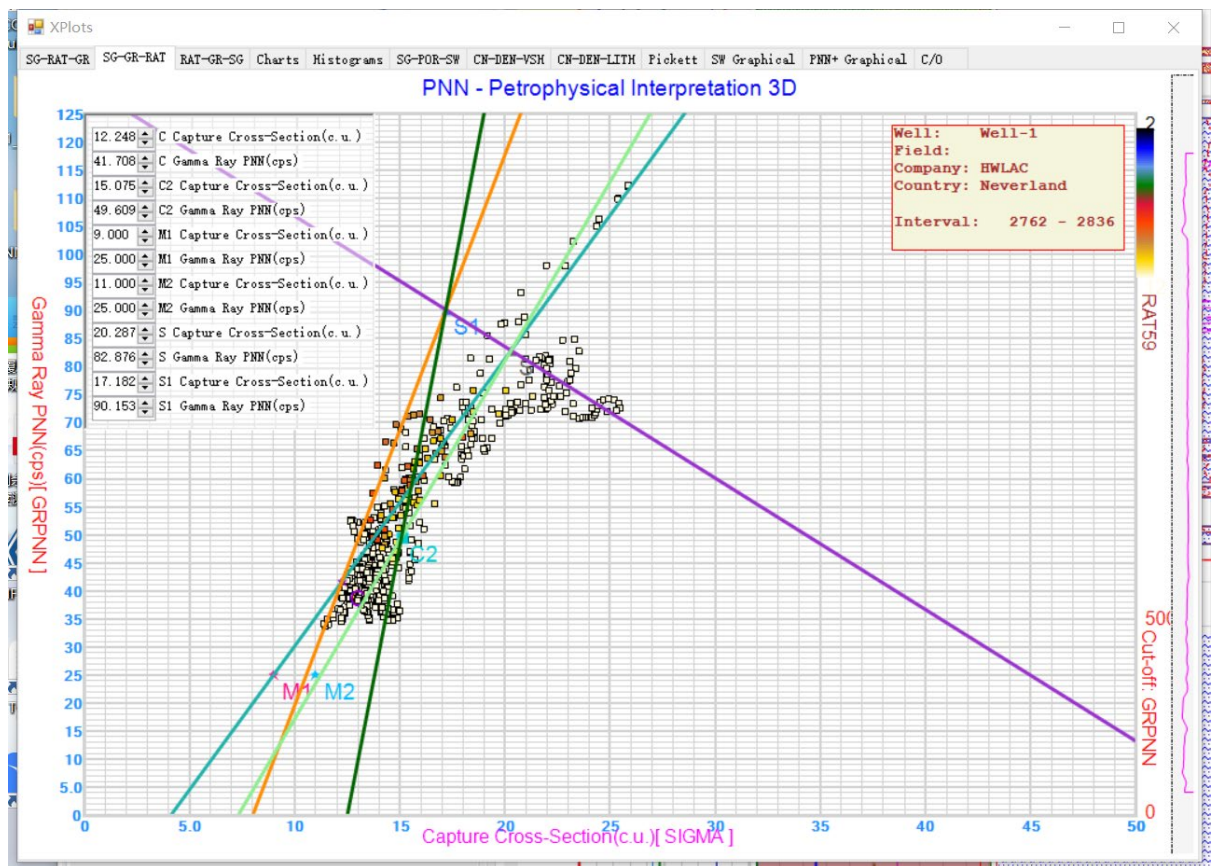


Figure 2. GR-SIGMA crossplot

图 2. GR-SIGMA 交会图

首先，根据研究区测井响应特征，在 GR-SIGMA 交会图上选取纯泥岩点和骨架端点，确定泥质和纯

净储层的响应范围[2]。与直接采用测井曲线极值的方法相比，交会图取点能够更真实地反映储层与泥岩的响应差异，有助于减小异常值和局部层段波动对解释结果的影响。随后，根据自然伽马响应计算泥质指数，并结合 Larionov 公式将泥质指数转换为泥质含量。

热中子俘获截面也会受泥质约束，需要引入 σ 相对值对泥质含量约束，因此使 GR 与 σ 共同参与泥质数值的求取。对于长期生产的地层，实测的 GR_{PNN} 与原始地层会存在差别，因此不能单靠 GR 求取。解释中根据储层动用程度调整 GR 与 σ 的权重。

Larionov 公式通过应用不同的 Larionov 指数，在泥质含量解释中补偿地层时代的影响，使用简单公式计算泥质指数或伽马指数：

$$I_{GR} = \frac{GR_{Log} - GR_{Clean}}{GR_{Shale} - GR_{Clean}} \quad (3)$$

式中：

I_{GR} ：伽马相对值，介于 0~1 之间，岩性从纯砂岩(0)到纯泥岩(1)的相对位置。

GR_{Log} ：测量的自然伽马值。

GR_{Clean} ：干净砂岩的自然伽马值。

GR_{Shale} ：泥岩地层的自然伽马值。

通过 I_{GR} 来求 V_{SH} ：

$$V_{SH} = \frac{2^{E_x I_{GR}} - 1}{2^{E_x} - 1} \quad (4)$$

式中： V_{SH} ：泥质含量。

E_x ：Larionov 指数，对于老地层典型数值 2.0。

热中子俘获截面相对值公式：

$$I_{SI} = \frac{SI - SI_{Clean}}{SI_{Shale} - SI_{Clean}} \quad (5)$$

式中：

I_{SI} ： σ 的相对值，数值在 0~1 之间，和 I_{GR} 含义一致，表示从纯砂岩(0)到纯泥岩(1)的相对位置。

SI ：热中子俘获截面 σ 测井值，单位为(c.u.)。

SI_{Clean} ：纯砂岩的 σ 最小值。

SI_{Shale} ：纯泥岩的 σ 最大值。

从交会图中泥质含量计算为：

$$V_{SH} = \lambda_1 V_{SH} + \lambda_2 I_{SI} \quad (6)$$

权重 λ_2 和 λ_1 的大小会随着 GR 的变化而进行调整。

$$\lambda_2 = clip(0.2 + 0.25T_n + 0.2G_n - 0.2S_n, 0.3, 0.8) \quad (7)$$

$$\lambda_1 = 1 - \lambda_2 \quad (8)$$

式中：

T_n ：归一化生产时间，生产时间越长，储层动用和井筒环境影响越明显， σ 约束权重适当增大。

G_n ： GR 异常程度，可由 PNNPLUS 测井的 GR 与原始裸眼 GR 的相对偏差确定，偏差越大越说明单独依赖 GR 求泥质含量的不确定性越高。

S_n ：归一化地层水矿化度，矿化度越高， σ 受流体影响越明显，适当降低 σ 在泥质计算中

的占比，避免将高含水响应误判为泥质增加。

GR 主要反映泥质中放射性元素含量，受流体性质影响小， $Sigma$ 同时受泥质、骨架和孔隙流体共同控制。当地层长期开发导致 GR 响应异常，应提高 $Sigma$ 对泥质识别的约束，即 λ_2 的数值变小， λ_1 的数值增大。

2.3. 孔隙度计算

在确定泥质含量后，需要进一步求取储层孔隙度。PNNplus 资料中提供的 PNN 的补偿中子孔隙度 RATPOR 参数反映了地层孔隙特征，可在端点标定基础上换算为中子孔隙度。由于泥质对孔隙度产生附加影响，为提高泥质识别的准确性，本文采用孔隙交会图(见图 3)与经验模型相结合的方法对孔隙度结果进行泥质修正[3]。

解释中由测井响应关系求出总孔隙度数值，结合前述泥质含量结果对孔隙度进行校正，得到能够反映储层真实储集能力的有效孔隙度，这种方法能剔除泥质附加响应对孔隙空间判断的影响，后续计算的含水饱和度会更接近实际地层。公式(10)中泥质修正参数与地区储层特征有关，不同区块因岩性组合和泥质分布的差异，修正系数不完全一致，在实际应用中需根据区块的测井资料及已有解释经验，对参数进行修正，为确保孔隙度解释结果更加准确[4]。

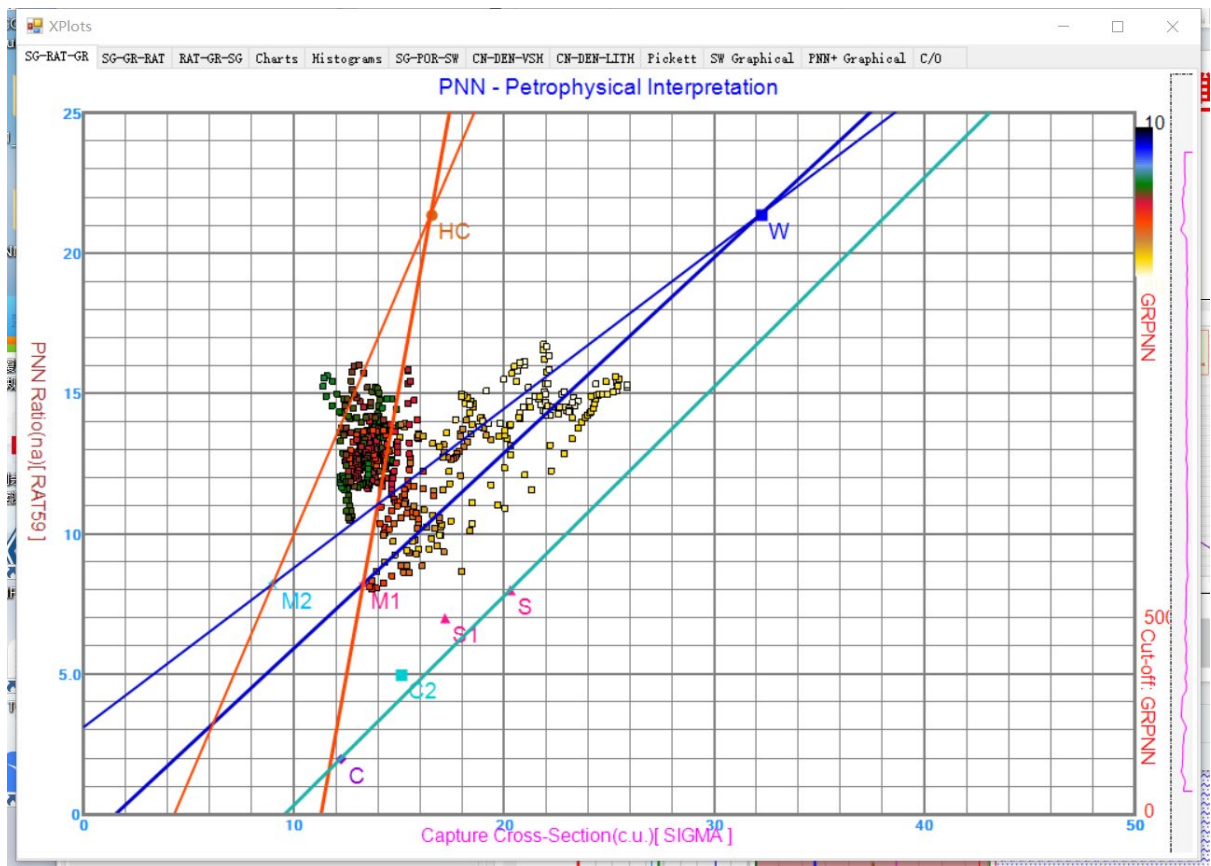


Figure 3. Porosity crossplot

图 3. 孔隙交会图

$$RATPOR = \frac{RAT_{Log} - RAT_0}{RAT_{100} - RAT_0} \times 100 \quad (9)$$

式中： $RATPOR$ ：PNN 计算出的孔隙度。

RAT_{Log} ：测量的比值。

RAT_{100} ：100%孔隙度的比值。

RAT_0 ：0%孔隙度的比值。

在考虑泥质含量的数值下通过 $RATPOR$ 来计算有效孔隙度 POR ：

$$POR = RATPOR * \left(1 - \frac{V - SH}{100}\right)^\alpha \quad (10)$$

式中： POR ：有效孔隙度等效于 Φ 。

α ：影响泥质含量导致孔隙度降低的因素，该数值会受地区的影响。胜利油区各个区块中的数值会有所差异。

2.4. 地层水俘获截面确定

地层水俘获截面其取值直接关系到含水饱和度计算结果，其数值受地层水矿化度控制，与 Cl^- 含量有关，矿化度越高，地层水对热中子的吸收能力越强，俘获截面数值越大[5]。

对于已有地层水矿化度的井，直接依据矿化度确定地层水俘获截面；而对于新井，结合裸眼电阻率、孔隙度及含水饱和度解释结果，利用阿尔奇公式(11)反推地层水电阻率，再换算为地层水矿化度确定地层水俘获截面。

$$S_w = \left(\frac{a \cdot R_w}{\Phi^m \cdot R_t}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

式中： S_w ：含水饱和度。

R_t ：地层真电阻率。

R_w ：地层水电阻率。

Φ ：孔隙度。

a, m, n ：岩性系数、胶结指数、饱和度指数，其取值优先采用研究区岩心岩电实验结果。

3. PNNPlus 饱和度测井在胜利油区的应用

3.1. 常规老井挖潜增效

胜利油田胜*油区沉积地层以新生界沉积建造为主，古近系主要发育沙河街组和东营组。PNNPlus 饱和度测井技术在胜*油田测试井段为沙*段，开井均增油见效。

胜利油田胜*油区 A 井自 2006 年 04 月投产，末期生产层位沙*段，产液 35 t/d、产油 1.2 t/d、含水 96.6%，该井目前处于低产高含水阶段，需要通过 PNNPlus 饱和度测井对剩余油饱和度和水淹级别进行分析。矿化度 15,000 mg/L，孔隙度 15%~33%。

根据 PNNPlus 测井结果图 4：(1) 42 号层 Sigma 值分布在 15~16.8 区间内，Ratgn 数值较大，高能伽马数量少；(2) 43 号层 Sigma 值 14，RATGN 曲线与 SIGMA 曲线包络明显；(3) 59.1 号层 Sigma 值 14.5，Ratgn 数值偏高。42、43、59.1 号层均含油饱和度较高，水淹程度弱；(4) 原封堵段 47、48、50、51 号层 Sigma 数值都偏高，50 号层的 Sigma 数值接近 20，均强水淹。

下步措施：43、49.1 号层合采。

开井效果：由产液 35 t/d、产油 1.2 t/d、含水 96.6%增为产液 10.3 t/d、产油 9.5 t/d、含水 8.2%。

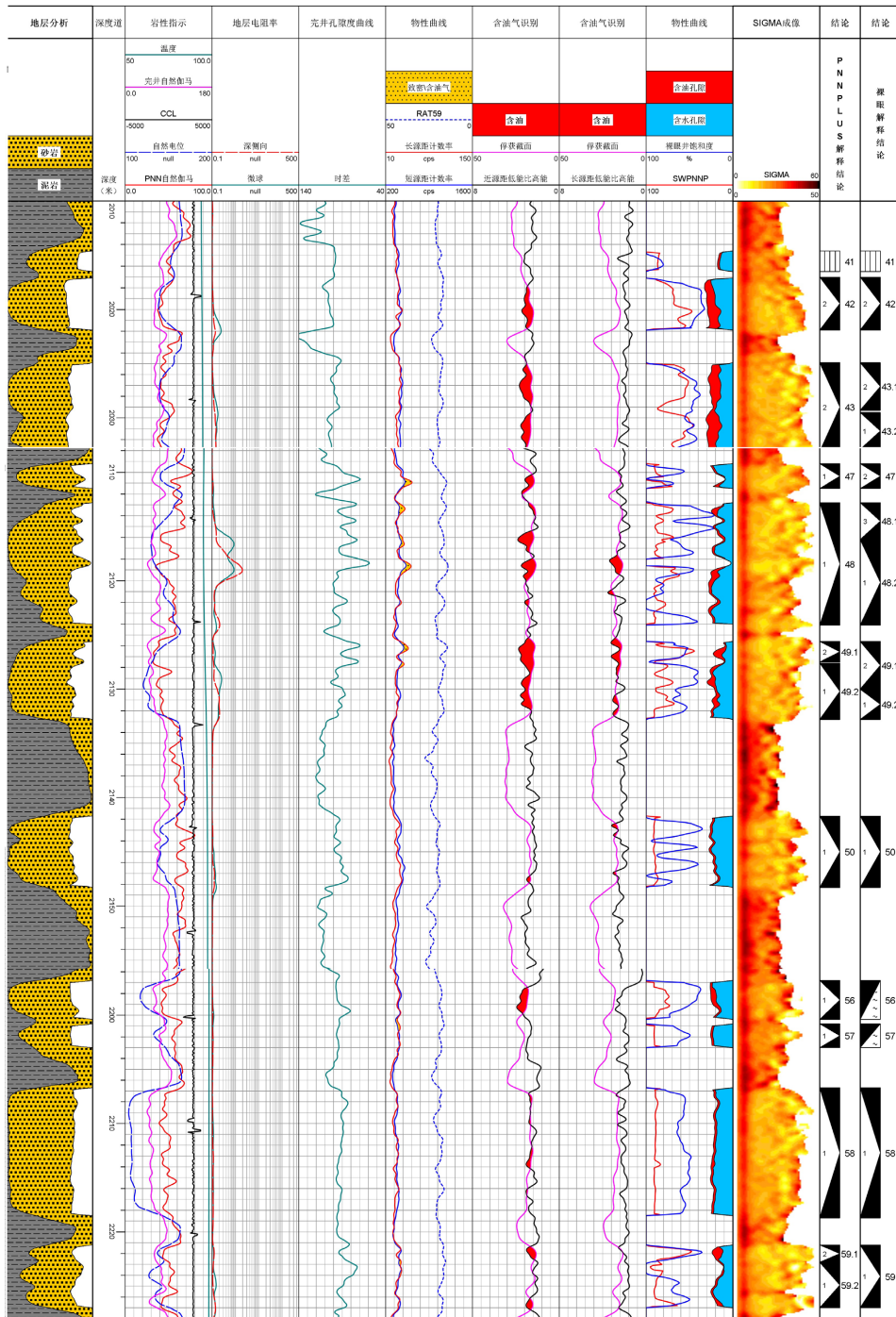


Figure 4. Log interpretation result chart for Well A
图 4. A 井测井解释成果图

3.2. 低孔隙度井(<10%)

胜利油区临*油区 B 井投产日期 2019 年 08 月，正常生产层位沙*段，2024 年 10 月 14 日该井产液 3.2 t/d、产油 0.2 t/d、含水 93%。该井位于独立断块，2024 年 10 月 10 日泵漏，本次测饱和度，根据饱和度结果定下步措施。原油粘度 19.1 mPa·s，孔隙度 < 10%。

在解释临*油区的时候结合临*油区的阿尔奇参数[6]，带入到阿尔奇公式。其中 a、m、n 的数值如下表 1。

Table 1. Parameters a, m, and n
表 1. a、m、n 参数

a	m	n
1.224	1.567	1.635

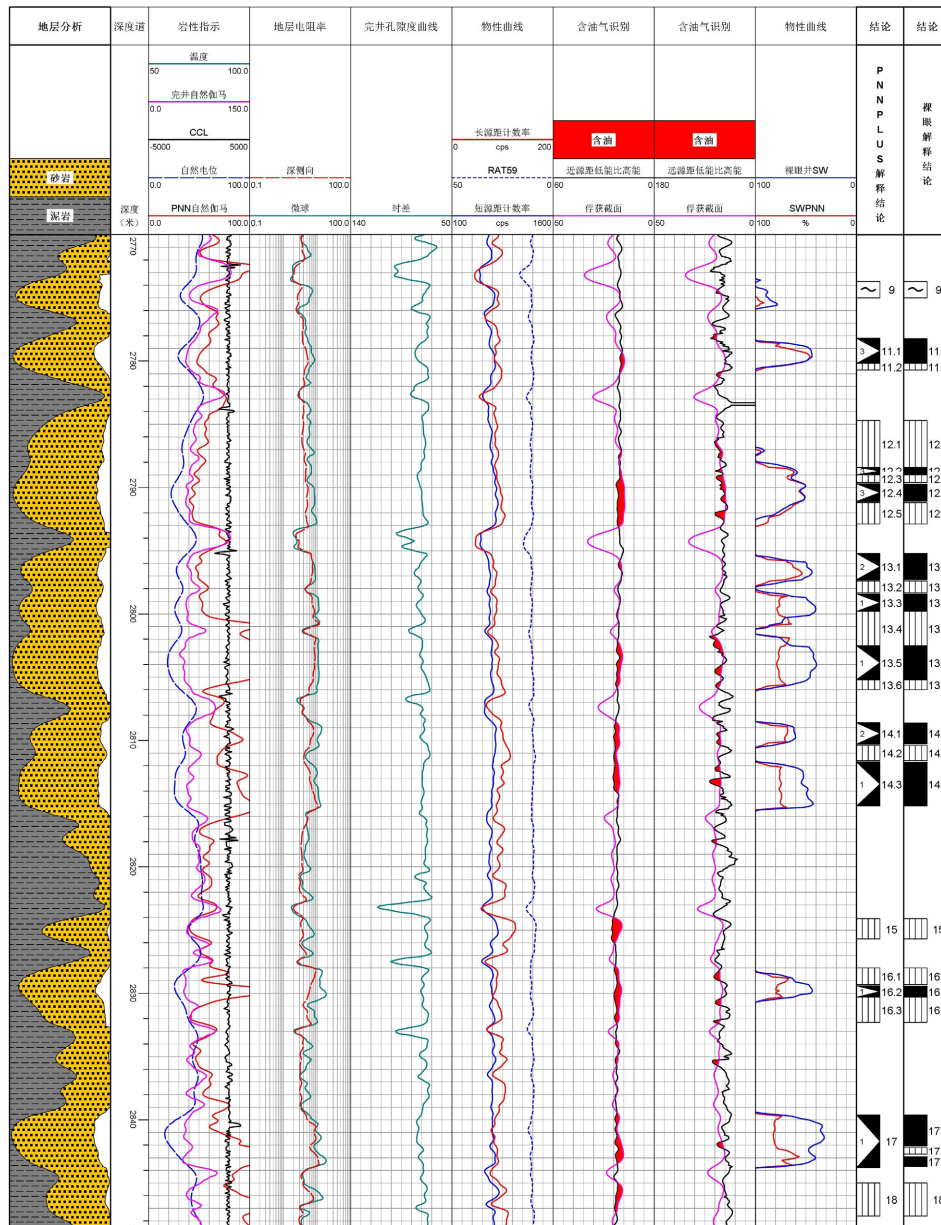


Figure 5. PNNPlus log interpretation result chart for Well B
图 5. B 井 PNNPlus 测井解释成果图

根据 PNNPlus 测井结果图 5，(1) 11、12 号层裸眼解释为油层，Sigma 数值均小于 15，含油性较好。

(2) 13、14、17 号层原为裸眼完井的油层，自 2019 年 8 月射孔投产至本次测井时，已累计生产约五年，受长期开采及前期多次工程测井作业的影响，储层性质发生变化，表现为 GR 测井值普遍增高。根据公式(6)(7)对泥质准确性影响较小，Sigma 计算值介于 15 至 20 之间。综合分析认为，这三个小层均已达到中高水淹级别。13.1、14.3 号层含水饱和度 70%左右，为中水淹层。

下步措施：根据 PNNPlus 测井结果要求该井补孔 11.1、12.2、12.4、13.1、14.1 五个小层。

开井效果：由产液 3.2 t/d、产油 0.2 t/d、含水 93.1%，变为产液 16.5 t/d、产油 8.9 t/d、含水 46.0%。

3.3. 高矿化度井(>100,000 mg/L)

胜利油田王**油区 C 井，投产日期 2025 年 02 月，正常生产层位沙*段，日产液 13.1 t/d、日产油 3.1 t/d、含水 76.25%，该井含水较高，为了解该井各层的含水情况，下步要求 PNNPlus 饱和度测井，为下步措施提供依据。该井超高矿化度 167329.43 mg/L，原油粘度 41.9 mPa·s，孔隙度 20%左右。

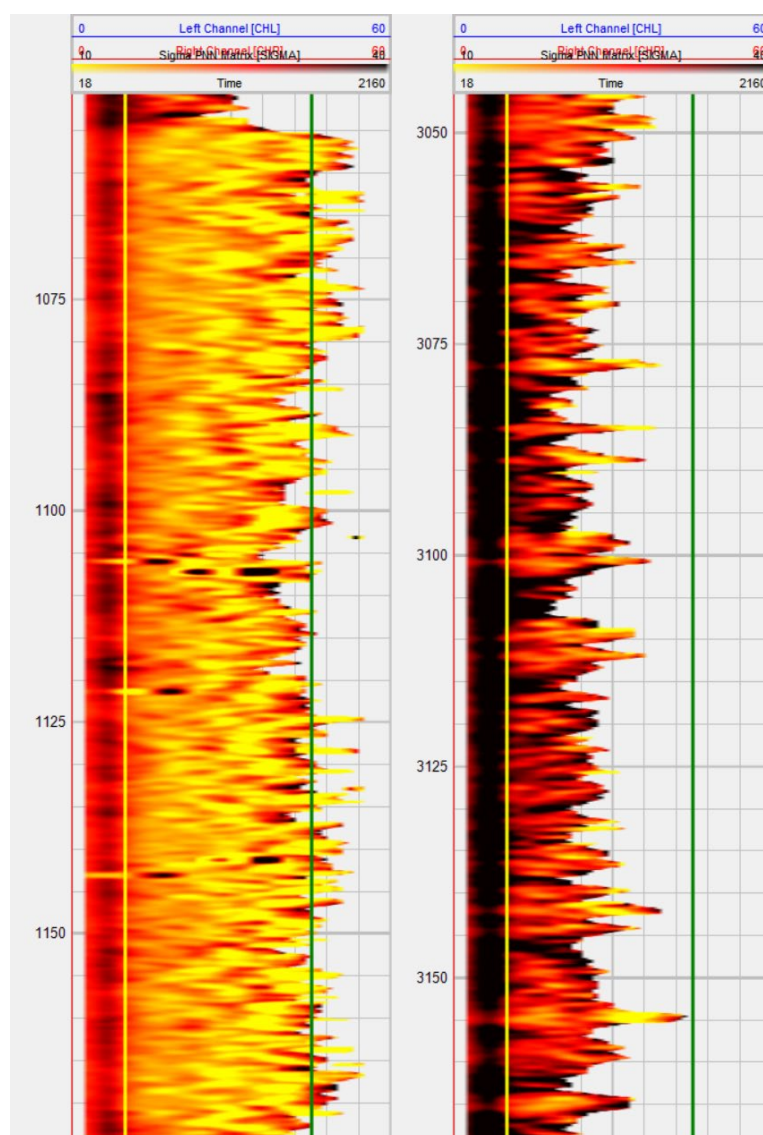


Figure 6. Normal salinity (left) and high salinity (right)
图 6. 正常矿化度(左)高矿化度(右)

据正常约为 120 API，由于式(6)影响不大。该层自 2025 年 01 月射孔，裸眼含油饱和度约为 50%，经过大约 10 个月的生产，目前测得该层的俘获截面较低且 RATGN 曲线与 SIGMA 曲线包络明显，评价为中水淹；(2) 120 号层、122 号层测得的俘获截面均较低且 RATGN 曲线与 SIGMA 曲线包络明显，均评价为弱水淹；(3) 125.2 号层从测试结果来看，俘获截面曲线呈现正异常，该层的水淹程度应较高，含油饱和度约为 15%，含油性差，高含水一部分应是由于这个层导致。

下步措施，根据 PNNPlus 测试结果要求改层生产，降低含水率，施工工序为：1、封井段 3120.1~3165.2 米，2、生产井段：3087.9~3110.7 米。

开井效果：含水由 76% 下降到 68%，含油由 3.1 t/d 上升至 5.3 t/d，日增油 2.2 t/d。

3.4. 低矿化度井(<10,000 mg/L)

胜利油田河*油区 D 井该井自 2013 年 12 投产，正常生产层段沙*段，产液 59 t/d、产油 0.82 t/d、含水 98.6%，目前鉴于该井产量较低，本次测 PNNPlus 饱和度，根据饱和度测试结果确定下步措施。该井矿化度 8612 mg/L，原油粘度 90.0 mPa·s，孔隙度 20% 左右。

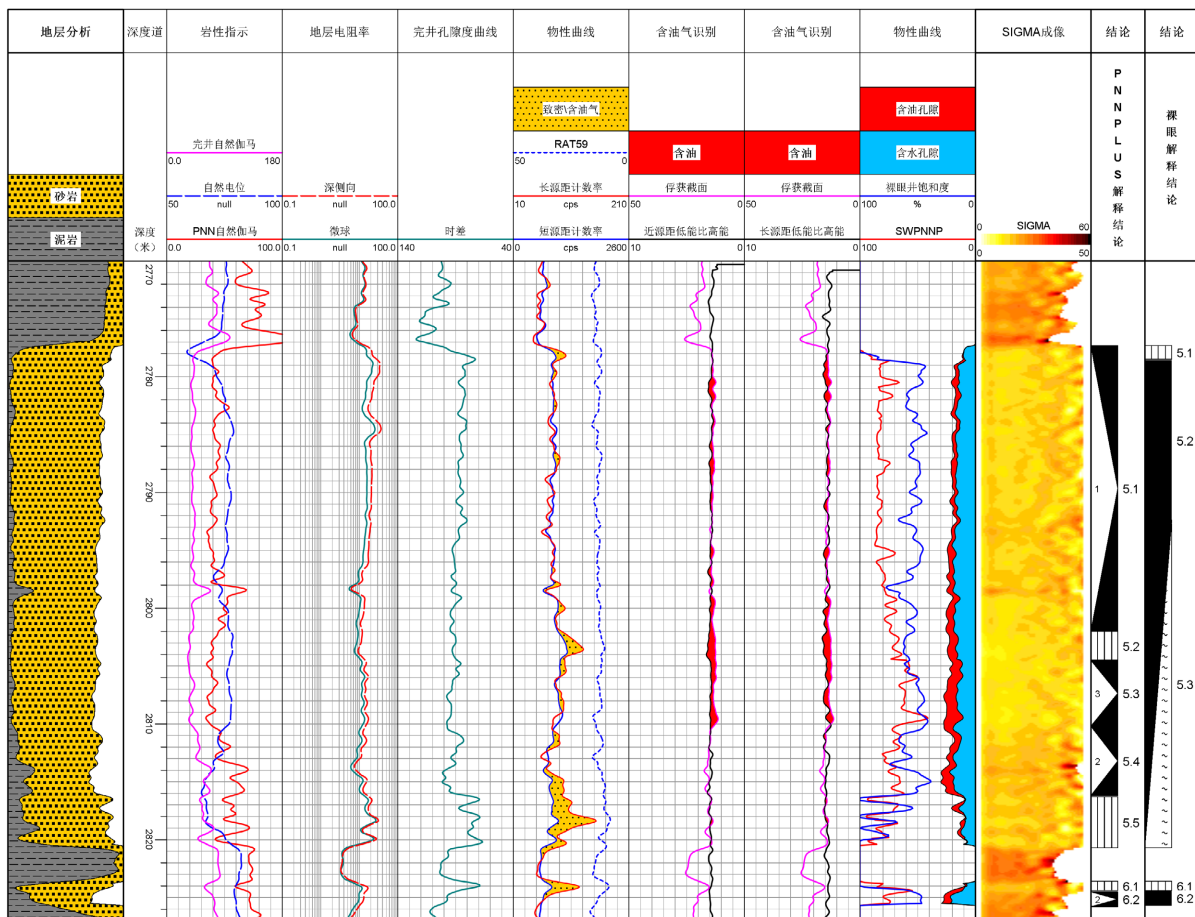


Figure 8. Log interpretation result plot of Well D

图 8. D 井测井解释成果图

根据 PNNPlus 测井结果图 8：(1) 5.1 号层 2014 年射孔，已生产接近 11 年，Sigma 数值接近 15 的边界，Ratgn 数值较小约为 2.4，评价为高水淹。(2) 5.3 号层 Sigma 数值小于 5.1 号层，Ratgn 数值接近 3.4

评价为中低水淹。

下步措施：根据 PNNPlus 测试结果要求补孔 2803~2810 米。

开井效果：产油 0.82 t/d 由增加至 1.5 t/d。

3.5. 新投井生产

胜利油区河*油区 E 井投产日期 1995 年 09 月，正常生产层位沙*段，日产液 0 t/d、日产油 0 t/d、含水 0%，为进一步挖掘层间及平面剩余油潜力，后续打通道并下入小套管。由于井壁坍塌，裸眼段未能实施测井，导致孔隙度、饱和度等基础地质资料缺失。鉴于该井为原井口侧钻的新投井，地层水矿化度及原油粘度等参数未获取，下步进行 PNNPlus 饱和度测井准确评价储层含油性，为下步措施制定提供可靠依据。

通过将原井口小层数据、本井陀螺测斜轨迹以及区域地质构造信息进行综合匹配与校正，厘定出了各个目标层段的层位位置。根据 PNNPlus 测井结果图 9：15、16、17 号层均为油层，15.2 号层含油性约为 50%，建议单采。

下步措施，根据 PNNPlus 测井结果，要求对该井进行压裂，压裂井段：2540.0 m~2559.0 m。

开井效果：产量高达日产液 25 t/d、日产油 17.6 t/d、含水 25%。

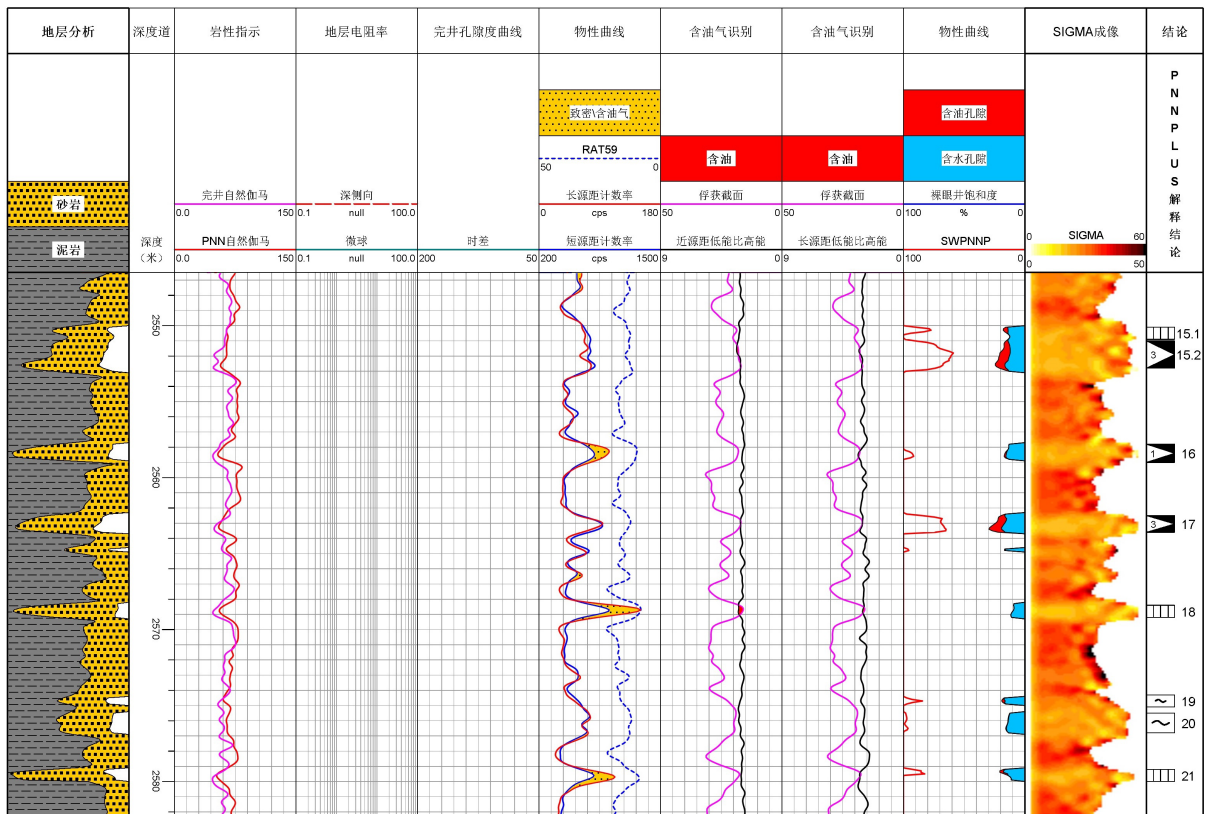


Figure 9. PNNPlus log interpretation result plot of Well E
图 9. E 井 PNNPlus 测井解释成果图

4. 结论

本文针对胜利油区开发中后期剩余油评价需求，开展了 PNNPlus 饱和度测井技术的解释方法及现场

应用研究[7]。结果表明, PNNPlus 通过引入活化伽马信息, 对传统 PNN 以宏观俘获截面 Sigma 为主的解释方法形成有效补充, 可提高油水层识别和水淹级别评价能力。结合 GR-SIGMA 交会分析、泥质含量校正、孔隙度修正及地层水矿化度参数确定, 本文建立的综合解释流程能够较好适应常规老井、低孔隙度井、高矿化度井、低矿化度井及新投井等不同井况, 并为补孔、封堵、改层生产和压裂等措施提供依据。

但本研究仍存在一定局限性, 在泥质成分复杂、泥质类型变化明显或储层非均质性较强的层段, 泥质含量校正和孔隙度修正参数仍需结合区块经验确定, 模型的普适性有待进一步验证。后续研究可进一步加强地层水矿化度动态表征、泥质类型精细识别及多参数联合反演方法研究, 并结合生产动态、试油试采及多轮次测井资料, 建立更加稳定、可推广的 PNNPlus 剩余油评价模型。

参考文献

- [1] 郑利江, 孙雅琳, 车蓉, 等. PNN+饱和度测井复杂水淹层识别[J]. 测井技术, 2019, 43(4): 434-439.
- [2] 陈猛. 基于 PNN 测井剩余油饱和度监测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2012.
- [3] 张锋, 孙建孟, 罗维炳, 等. 脉冲中子测井评价剩余油饱和度方法研究及应用[J]. 测井技术, 2006, 30(2): 113-116.
- [4] 赵建鹏, 陈惠, 李宁, 等. PNN 剩余油饱和度测井解释参数确定方法及应用[J]. 石油物探, 2023, 62(5): 999-1006.
- [5] Zhao, J.P., Chen, H., Li, N., *et al.* (2023) Interpretation Parameter Assessment of PNN Remaining Oil Saturation Logging and Its Application. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, **62**, 999-1006.
- [6] 高嵩, 王明发, 刘伟. 临盘油田水淹层测井解释方法研究[J]. 内蒙古石油化工, 2006(5): 141-142.
- [7] 孙杨沙, 刘红岐, 田杰, 等. PNN 测井在跃进油田水淹层中的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1105-1112.