

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025114

广域电磁法识别深层边水气藏纵横向水侵前缘的应用探索

张连进¹, 李滔¹, 唐松², 张敏知², 张春¹, 庞榆¹, 李顺², 李秋¹

(1. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041;

2. 中国石油西南油气田公司川中油气矿, 四川 遂宁 629000)

摘要: 中国深层/超深层天然气资源丰富, 累计探明天然气地质储量近 $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 累计天然气产量超过 $5\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 该领域是保障国家能源安全的重要战略领域。然而, 深层/超深层气藏均为有水气藏且普遍采用稀井网开发模式, 在此条件下, 水侵前缘准确刻画难度大, 成为制约深层/超深层有水气藏高效开发的关键因素。研究结合广域电磁法可通过反演电阻率差异区分气区、气水过渡区、水区的优势, 以四川盆地磨溪龙王庙组气藏1井组为研究对象, 开展了 2 km^2 的三维广域电磁探测, 获取了地下 $5\,000 \text{ m}$ 的地电特征, 形成一套震电融合的流体识别方法, 构建了地电模型, 首次实现了广域电磁法对深层边水气藏纵横向水侵前缘的识别。研究结果表明: 基于测井电阻率与广域反演电阻率的线性回归, 得到1井组水区的广域电磁法反演电阻率小于 $227 \Omega \cdot \text{m}$, 气水过渡区的广域电磁法反演电阻率介于 $227 \sim 383 \Omega \cdot \text{m}$, 纯气区的广域电磁法反演电阻率大于 $383 \Omega \cdot \text{m}$; 边水自1号井向气藏内部均匀推进, 未发现优势水侵通道, 水侵前缘呈非均匀状, 整体侵袭速率约 50 m/a ; 井组宜采取排控结合的治水对策, 1号井排水量介于 $300 \sim 400 \text{ m}^3/\text{d}$, 内部气井产气规模由 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 降至 $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下。该成果在深层/超深层气藏气水分布描述、水侵前缘刻画和精细治水等方面具有广阔应用前景。

关键词: 广域电磁法; 深层边水气藏; 电阻率; 水侵前缘; 治水对策

中图分类号: TE332

文献标识码: A

Application exploration of wide field electromagnetic method for identification of longitudinal and lateral water intrusion fronts of deep edge-water gas reservoirs

ZHANG Lianjin¹, LI Tao¹, TANG Song², ZHANG Minzhi², ZHANG Chun¹, PANG Yu¹, LI Shun², LI Qiu¹

(1. PetroChina Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. PetroChina Central Sichuan Oil and Gas District, Southwest Oil & Gasfield Company, Suining, Sichuan 629000, China)

Abstract: China is rich in deep and ultra-deep natural gas resources. The cumulative proven geological reserves of natural gas are nearly $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, and the cumulative natural gas production exceeds $5\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$. It is an important strategic field for ensuring national energy security. However, deep and ultra-deep gas reservoirs are all water-bearing gas reservoirs and are generally developed using sparse well patterns. Under the condition of sparse well pattern development, it is difficult to accurately depict the leading edge of water invasion, which has become a key factor restricting the efficient development of deep/ultra-deep water-bearing gas reservoirs. This study leveraged the advantages of the wide field electromagnetic method that could distinguish gas zones, gas-water transition zones, and water zones through differences in inversion resistivity. Taking well group 1 of the Longwangmiao Formation gas reservoir, Moxi area, Sichuan Basin as the research object, a three-dimensional wide field electromagnetic detection of 2 km^2 was conducted. The geoelectric characteristics from $5\,000 \text{ m}$ underground were obtained, a set of fluid identification methods integrating vibration and electricity was formed, and a geoelectric model was constructed. The wide field electromagnetic method was used for the first time to identify the leading edge of water invasion in deep edge-

收稿日期: 2025-03-10。

第一作者简介: 张连进(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 现主要从事天然气开发研究工作。地址: 四川省成都市高新区天府大道北段12号, 邮政编码: 610041。E-mail: zhanglianjin268@petrochina.com.cn

通信作者简介: 李滔(1991—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事气藏渗流模拟及动态分析工作。地址: 四川省成都市高新区天府大道北段12号, 邮政编码: 610041。E-mail: litao_2019@petrochina.com.cn

基金项目: 中国石油重大科技专项“海相碳酸盐岩油气规模增储上产与勘探开发技术研究”(2023ZZ16); 国家科技重大专项项目“四川盆地深层超深层碳酸盐岩气藏勘探开发技术与集成示范”(2025ZD1402500)。

water gas reservoirs. The results showed that: (1) based on the linear regression relationship between well-logging resistivity and the wide field inversion resistivity, it was determined that the wide field electromagnetic inversion resistivity in the water zones of well group 1 was less than $227 \Omega \cdot \text{m}$, the wide field electromagnetic inversion resistivity in the gas-water transition zones ranged from $227 \Omega \cdot \text{m}$ to $383 \Omega \cdot \text{m}$, and the wide field electromagnetic inversion resistivity in the pure gas zones was greater than $383 \Omega \cdot \text{m}$. (2) The edge water advanced relatively uniformly from well 1 into the interior of the gas reservoir without obvious water invasion channels. The leading edge of the water invasion showed uneven water invasion characteristics, with an overall water invasion rate of approximately 50 m/a. (3) The well group should adopt a water control strategy combining drainage and control. The daily drainage capacity of well 1 was 300 to 400 m^3/d , and the daily gas production capacity of the internal wells should be reduced from the current $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ to below $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. This achievement has broad application prospects in the description of gas-water distribution in deep/ultra-deep gas reservoirs, the characterization of the leading edge of water invasion, and precise water control.

Keywords: wide field electromagnetic method; deep edge-water gas reservoir; resistivity; water invasion front; water control strategy

广域电磁法是由何继善^[1]于2010年提出的一种人工源频率域电磁测深新方法。该方法以介质导电性、导磁性为物质基础,依据电磁感应原理,通过观测和研究交变电磁场在空间或时间上的分布规律等手段,探测介质的电性特征^[1-4]。广域电磁法克服了传统的可控源音频大地电磁法电阻率定义不精确、探测深度有限及精度不足的缺点,为深层/超深层油气资源的勘探和流体识别等提供了新的技术路径^[5-10]。目前,广域电磁法已在金属矿勘探、油气资源构造刻画、地层格架识别及非常规储层水力压裂监测等领域成功应用,成效显著。相关成果支撑提交页岩气地质储量 $1.240 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、石油地质储量 $1.86 \times 10^8 \text{ t}$ ^[11-14]。此外,高精度广域电磁法技术在埋深3 000 m的中江气田致密砂岩气藏气水分布识别中也取得了应用,结果表明其对流体具有更高的敏感性,识别准确率达到91.7%,有效支撑了气藏的高效开发^[15]。然而,随着地层埋深增大,电磁法纵向分辨率会降低,且深层电磁信号微弱、有效信号采集难度加剧,电阻率特征明显的标志性地层确定难度大,加之深层气水电阻率区分度较弱,对气水识别提出了更大的挑战。因此,目前尚未见该技术应用于深层(埋深>4 500 m)/超深层(埋深>6 000 m)气藏气水识别的相关研究。

中国深层/超深层气藏资源潜力巨大,是天然气高质量上产稳产的“压舱石”^[16]。深层/超深层气藏均为有水气藏,例如塔里木盆地克拉2气藏、克深2气藏,四川盆地磨溪龙王庙组气藏、双鱼石栖霞组气藏等。在开发过程中,水侵易导致气井产能大幅降低甚至停产,进而制约气藏开发效果,因此及时准确识别气藏水侵前缘,对减缓水侵危害、提高气藏采收率至关重要^[17-21]。然而,深层/超深层气藏普遍具有高温、高压特征,井下动态监测实施难度大,导致气藏动态监测资料少且数据质量相对较差。同时,深层/超深层气藏普遍采用稀井网开发,常规水侵前缘刻画方法(如试井分析、井点流体分析和气藏数值模拟等)在稀井网条件下准确性不足,易延误气藏最佳治水时机,降低采收率。因此,亟需探索可准确识别深层/超深气藏水侵前缘的新技术和新方法。

以四川盆地磨溪龙王庙组气藏1井组为例,首次运用广域电磁法开展了深层边水气藏水侵前缘识别的应用探索,实现了水侵前缘纵横向位置的准确刻画,效果显著,为深层/超深层气藏精细化治水和提高采收率提供新的技术路径。

1 广域电磁法基本原理

1.1 基本的理论方程

广域电磁法从场的统一性出发,通过定义广域视电阻率,将“近区”“过渡区”和“远区”有机地统一起来,使得电磁测深的观测范围扩大到广大区域。下面以目前应用最广泛的基于水平电流源发射信号 $E-E_x$ 的广域电磁法来说明该方法的理论内涵。

在准静态均匀大地表面的电场水平分量 E_x 可表示为:

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)] \quad (1)$$

式中: E_x 为均匀地表水平电偶极源产生的 x 方向电场强度; σ 为介质电导率,单位 s/m ; r 为收发距,单位 m ; I 为供电电流,单位 A ; dL 为极子的长度,单位 m ; φ 为方位角,单位($^\circ$); i 为纯虚数; k 为波数,单位($^\circ$)/ s 。

令式(1)中:

$$K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN} \quad (2)$$

$$\Delta V_{MN} = E_x \cdot MN \quad (3)$$

$$E_{E-E_x} = [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)] \quad (4)$$

式中: E_{E-E_x} 为与观测装置的几何尺寸有关的系数; ΔV_{MN} 为 M 、 N 两点间的电位差, MN 为测量电极级距。

可将广域视电阻率定义为:

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)} \quad (5)$$

式中: ρ_a 为表观电阻率,单位 $\Omega \cdot \text{m}$; I 为电流,单位 A ; F_{E-E_x} 为观测装置在均匀半空间电阻率的隐含项迭代。

从式(5)的定义可以看出,只需要测量出电位差、发送电流以及有关的极距参数,采用迭代法计算,便可提取出地下的视电阻率信息。由上述推演过程可知,广域视电阻率的定义未做任何近似,而是从精确的电磁场单分量表达式中推导出广域视电阻率的定义,因而该方法可实现对广大区域的探测^[22-23],且该方法只需测量电磁场的1个分量,相对传统的可控源音频大地电磁法可以在确保高计算精度的情况下大幅度提高野外生产效率。同时,广域电磁法发送的是伪随机信号,一次发射就包含了多个有效频率信号,可以削弱野外环境下随机干扰的影响,进一步提高观测效率和观测精度。

1.2 水侵识别关键特征参数选取

根据广域电磁法的基本原理,该方法本质是通过一系列数学手段(包括一维、二维以及其他的数学手段)反演获取地下介质的真实电阻率分布特征进而识别介质类型。然而,深层/超深层气藏中储层介质类型分布差异较大,其反演成像存在多解性,若直接对成像结果进行分析往往误差较大,甚至会出现错误^[24-25]。因此,在基于常规广域电磁反演流程的基础上建立了1套震电融合的流体识别方法(图1):以地质、地震和测井等资料为基础,落实地层、构造和电性分布特征,结合广域视电阻率反演结果,标定各电性层和构造单元的地质属性,构建地质-电性统一框架模型,进而利用流体识别模版在井震模型中刻画出储层的流体分布。常规广域电磁反演流程多解性强,所得电阻率剖面存在显著偏差,通过引入基于井震地质格架约束的导向反演技术,可有效压制多解性,获取高精度电阻率剖面。在已知地质构架的约束下,反演电阻率剖面的横向连续性显著改善,与测井电阻率变化趋势的符合率提升,反演精度由70%提升至90%。此处反演精度计算公式为:

$$\text{反演精度} = \left(1 - \frac{\text{广域电磁法反演电阻率} - \text{测井电阻率}}{\text{测井电阻率}}\right) \times 100\% \quad (6)$$

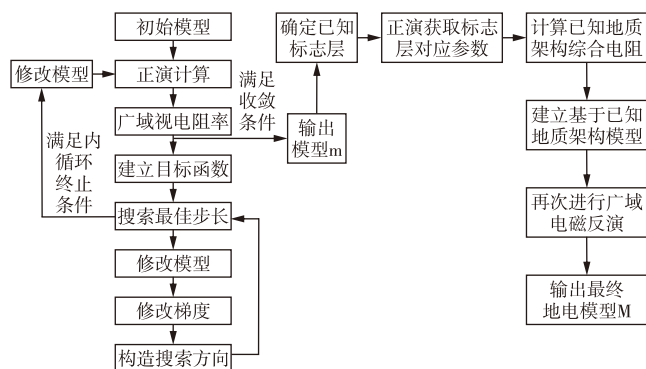


图1 改进后的广域电磁法反演流程

Fig. 1 Inversion workflow of improved wide field electromagnetic method

此外,基于井震确定的已知地质构架导向的反演技术准确识别储层水侵前缘需掌握以下3个关键特征:①目标区域的地质构架;②广域视电阻率与测井电阻率间的转换关系;③基于测井电阻率的储层流体识别图版。上述3点构成广域电磁法的成功应用的前提,目标区域的地质构架指的是研究区的纵横向深度剖面,用以修正广域电磁反演目标层位深度;测井电阻率的储层流体识别图版指的是研究区已有的实钻井气水层定量识别图版,作为广域电磁法反演电阻率气水定量识别的标准依据;广域视电阻率与测井电阻率间的转换关系指的是建立二者量化相关关系,作为广域电磁法准确识别流体的桥梁。

2 广域电磁法在龙王庙组气藏的应用

2.1 基本情况

四川盆地磨溪龙王庙组气藏是中国迄今发现的单体规模最大的海相碳酸盐岩整装气藏。气藏地层倾角平缓(1°~3°),储层发育微裂缝及毫米级溶蚀孔洞,渗透率级差达2~3个数量级,非均质性极强;气藏存在大面积边水,不同区域的边水能量及储层储集特征差异显著。

磨溪龙王庙组气藏井网密度为0.1口/km²,开发后边部气井陆续见水。通过开展精细气藏描述,形成了水侵优势通道定量刻画技术,精准量化表征了水侵类型与水侵优势通道特征,综合识别出气藏存在4个水侵方向、9条水侵通道和4类水侵模式,其中2个为优势水侵通道,建立了气藏“早期防水、中期控水、晚期治水”全生命周期治水策略,制定了不同阶段的针对性治水措施。该策略有效支撑气藏连续稳产8 a,累产气量超过800×10⁸ m³。1井组位于磨溪龙王庙组气藏西翼边部,处于水侵优势通道上,是气藏主力气区及治水关键监控对象。该井组包含5口高产气井,储层渗流能力强、井间连通性好,井组日产气达到300×10⁴ m³。其中,位于边部的1号井投产2 a后见地层水(最高日产水量达388 m³),水侵导致其产井产能快速递减,已作为主动排水井。目前,急需准确认识1井组水侵前缘的纵横向位置,制定针对性治水对策,降低水侵速度、延缓水侵危害以及保护内部主力气井。针对1井组已开展了生产动态分析、流动物质平衡分析和压力恢复试井分析等工作,但均只能识别气井周边有限范围内的水侵前缘且结果存在多解性,无法准确识别井间广大区域水侵前缘的纵横向位置。为此,选取1井组作为广域电磁法识别深层边水气藏水侵前缘的试验区,以填补井间监测空白。

2.2 现场试验

2.2.1 方案设计

根据1井组水侵动态监测需求,结合气藏特征与地

面情况,设计了广域电磁探测的测线数量、测点和点距等。其中,测线需沿着水侵推进方向布设,覆盖水区与气区,且尽量选择过井剖面,便于井电标定。同时,网格测点需考虑储层平面非均质性。最终,确定1井组布置测线43条,测点1 545个,线距100 m,点距100 m(图2)。

2.2.2 可行性论证

利用过井地震剖面与合成地震记录进行标定,明确各反射层进行地质层位归属。标定结果显示:龙王庙组底界为连续波谷反射特征;龙王庙组顶界为弱峰或波谷反射特征;龙王庙组储层内部为强波峰反射。在确定地质构架的基础上进行广域电磁反演,对各电性层进行标定和确认,构建区块地电模型。根据广域电磁法理论,模拟龙王庙组储层的电磁响应特征,分析广域电磁法识别深层气藏流体性质的可行性。

1) 设计电阻率不变,改变储层厚度大小,模拟不同厚度条件下的广域电磁法识别能力。设定电阻率100 Ω ,地层厚度从10 m增加至50 m,开展广域电磁法正演模拟。结果显示:当地层厚度>30 m时,电磁响应信号异常显著,幅度超过5 μV ;当地层厚度<30 m时,异常信号强度明显减弱。磨溪龙王庙组储层厚度普遍>30 m,表明广域电磁法具备对该储层纵向边界的准确分辨能力。

2) 地层厚度不变,改变储层电阻率大小,模拟不同电性条件下的广域电磁法识别能力。设定储层厚度30 m,电阻率变化从3 000 Ω 减小至50 Ω ,正演模拟信号异常大小。结果表明,信号值变化均达到 μV 级别,当电阻率从100 Ω 变化到50 Ω 时,信号变化幅度达到5.6 μV 。目前广域电磁仪器识别信号精度可以达到0.1 μV ,因此可准确识别龙王庙组储层的流体性质。

2.2.3 现场施工

开展广域电磁探测现场施工,包括信号发射和信号

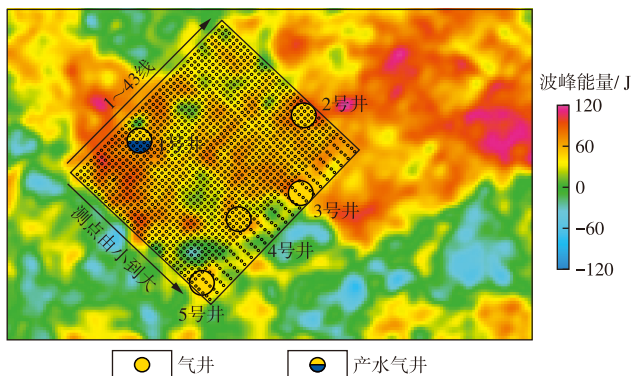


图2 四川盆地磨溪龙王庙组气藏1井组测线布置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of survey line layout in well group 1 of Longwangmiao Formation gas reservoir, Moxi area, Sichuan Basin

接收。其中,信号发射系统包括轻便型信号控制器和电源柜,主要用于大功率电磁信号的发送;信号接收采用广域电磁仪,仪器内置高性能计算机,可完成多个通道并行高速数据的实时采集、运算和处理。根据正演及野外试验,确定测点MN间距100 m,频率采用伪随机7频波、8个频组,加密频组(3频波 \times 3组),收发距14~16 km,场源AB极距2.2 km。同时,施工过程中采用不定时的自检、互检,检查点分布相对均匀,且质量检查率不少于总物理点的3%,并对测量资料进行100%的检查复核,确保测量资料准确无误。此外,实测点位原则上与设计点位尽可能一致。但测区内存在村镇、高压输电线等人文活动影响,以及河谷、陡崖等恶劣地形地貌,为采集到可靠数据,可偏离某些测点,测点沿测线偏移一般不超过点距的20%,垂直测线方向偏移一般不超过线距的10%,保持测线的连续性。

2.3 资料处理与解释

采用震电融合流体识别方法处理采集数据,具体流程包括原始数据资料评价、去噪及有效信息提取、广域视电阻率计算、井震处理、广域电磁反演、流体识别模版建立、气水识别等7个步骤。数据处理详细流程如下:①原始数据资料评价:消除测点视电阻率曲线的突变点,排除人为因素导致的异常数据。②去噪及有效信息提取:基于电磁噪声特征参数值(最大值、峰峰值、峰值因子、脉冲因子、裕度因子等)显著大于有效信号特征,在原始信号基础上消除噪声信号,重构时间域信号,随后通过傅里叶变换将时间域数据转换为频率域,最终根据发射频率提取有效信号。③广域视电阻率计算:计算各测点广域视电阻率并绘制曲线图,分析曲线类型(定性反映地下电性层分布特征,划分地质构造单元)和等频率视电阻率曲线(揭示测线电性分布、基底起伏、断层位置及电性层划分等断面特征)。④井震处理:以地质、物探、测井等资料为基础,落实地层、构造和电性分布特征,对各电性层和构造进行标定和确认,明确其地质意义,共同组构与各种已知信息均相容的初始地电模型。⑤广域电磁反演:基于初始地电模型和处理后的广域视电阻率数据,进行反演,生成测线广域反演电阻率剖面图。⑥气水广域电阻率识别模版建立:龙王庙组气井双侧向电阻率多为“正差异”,水层双侧向电阻率多为“无差异”或小幅度“负差异”,选择磨溪龙王庙组气藏测井平均孔隙度主要为4%~6%的完钻井,根据气井、水井测井电阻率,建立龙王庙组气藏测井储层流体识别图版(图3),气层电阻率>100 $\Omega\cdot\text{m}$,水层电阻率<100 $\Omega\cdot\text{m}$ 。结合测井电阻率与广域反演电阻率的线性回归关系(图4),计算水区的广域反演电阻率<227 $\Omega\cdot\text{m}$;结合1井组相邻纯气

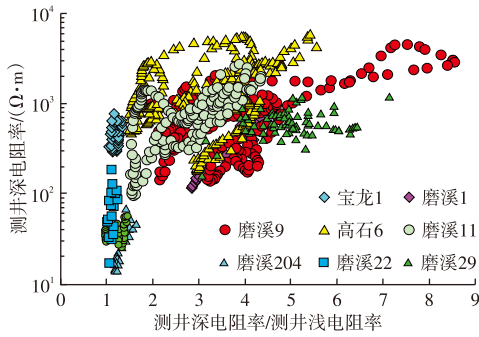


图3 四川盆地磨溪龙王庙组测井储层流体识别图版
Fig. 3 Well-logging reservoir fluid identification chart of Longwangmiao Formation, Moxi area, Sichuan Basin

井生产情况及广域电阻率,进一步明确纯气区广域反演电阻率 $>383 \Omega \cdot m$;气水过渡区的广域反演电阻率介于 $227 \sim 383 \Omega \cdot m$ 。⑦气水识别:通过相位高分辨率图识别所有测线标志层、目的层,精准定位目的层顶底边界,再根据气层、水层的广域电阻率识别标准,开展工区

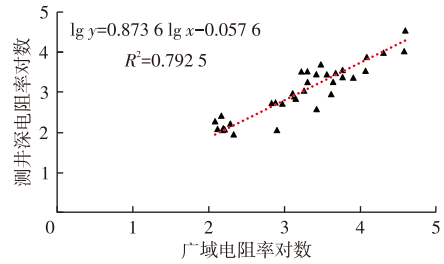


图4 四川盆地磨溪龙王庙组测井电阻率与反演电阻率关系
Fig. 4 Relationship between well-logging resistivity and inverse resistivity of Longwangmiao Formation, Moxi area, Sichuan Basin

各条测线目的层的气水识别。

2.4 水侵前缘识别和治水对策优化

2.4.1 水侵前缘识别

基于上述方法,利用相位高分辨率图识别目的层范围,并结合测井曲线进行定量分析,得到1井组1~43线

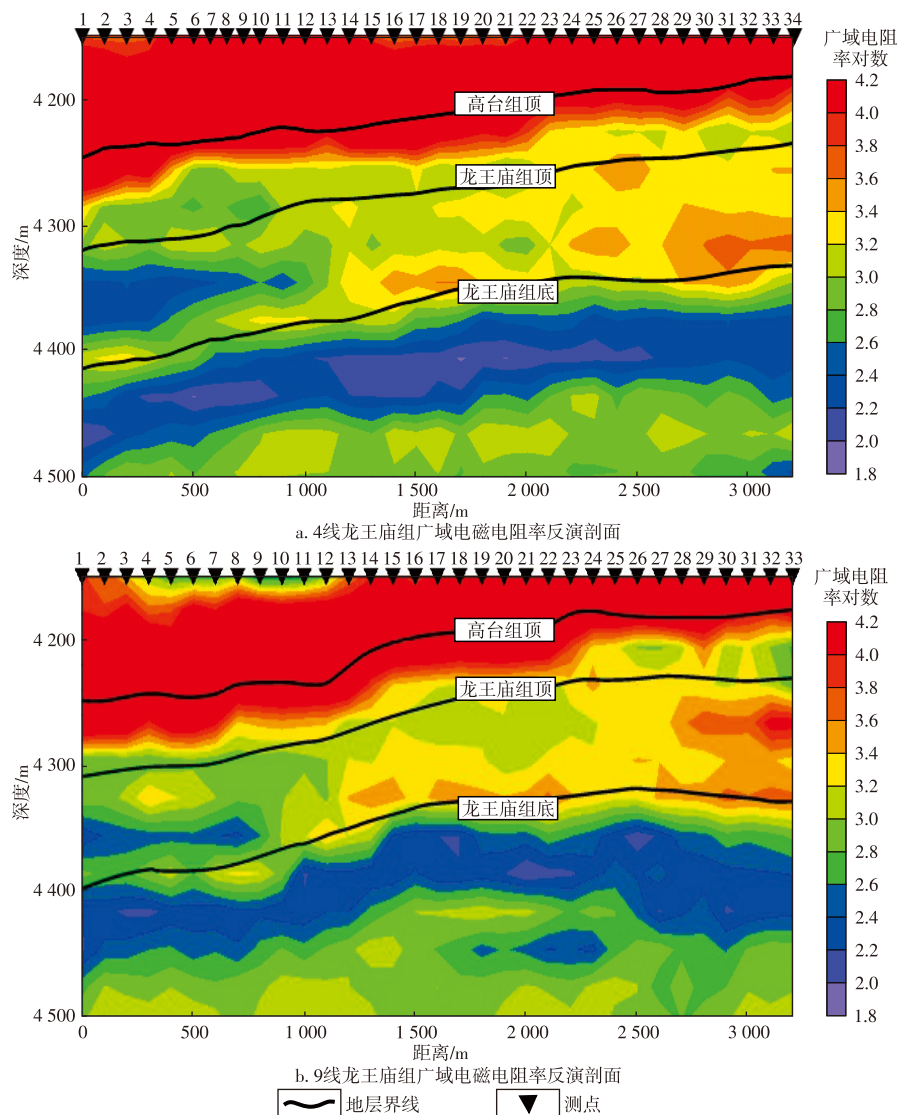


图5 四川盆地磨溪龙王庙组广域电磁目的层电阻率反演剖面

Fig. 5 Inversion profiles of target layer resistivity by wide field electromagnetic method for Longwangmiao Formation, Moxi area, Sichuan Basin

广域电磁目的层的电阻率反演剖面(图5)。随后,根据广域电磁电阻率反演剖面和气水识别图版,即可划分出气区、气水过渡区和水区。以3线为例,1~9测点间为低阻异常体,分析该异常体是水体入侵导致电阻率异常低阻。结合气水识别图版和测点的广域电阻率分析认为,1~8测点区域为纯水区,8、9测点之间区域为过渡区,9测点之后的区域为纯气区。同时,综合1~43线可以发现,1井组龙王庙组呈现上部电阻率低、下部电阻率高的整体特征。这是由于下部基本为非储层,岩石致密导致电阻率非常高;而上部大部分为储层,物性好,电阻率相对较低。此外,上部储层中存在不同流体时,电阻率也差异明显。当储层含水时,电阻率呈现极低特征;当储层含气时,电阻率相对较高。总体上,龙王庙组储层在1~25线、1~13测点区域存在低电阻率,表示该区域为水区或气水过渡区。相邻的震旦系过路井实钻证实为气水同层,电阻率在 $200\sim 6\,000\ \Omega\cdot\text{m}$,测井电阻率与广域视电阻率相吻合,表明广域电磁反演预测该井组水侵前缘较为可靠。

随后,根据各测线的气水分布,绘制了1井组龙王庙组储层广域电阻率分布平面(图6),进一步明确1井组的气水平面分布。图6显示,广域电阻率平面分布不均匀,

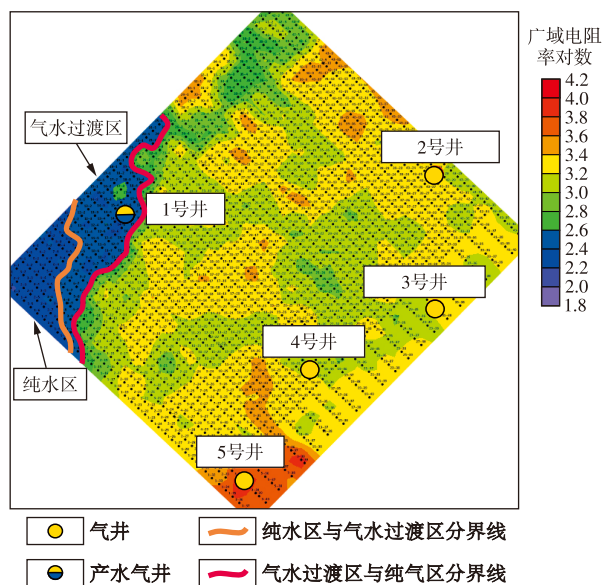


图6 四川盆地磨溪龙王庙组气藏1井组储层电阻率平面图

Fig. 6 Planar view of reservoir resistivity of well group 1 in Longwangmiao Formation, Moxi area, Sichuan Basin

西翼广域电阻率受储层含水影响呈现低值,南翼广域电阻率受储层较差影响局部呈现高值(电阻率在 $3\,000\ \Omega\cdot\text{m}$ 以上),其他区域整体广域电阻率在 $700\sim 2\,000\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间。结合电阻率的变化特征和气水判识图版,进一步刻画了该区域的气水分布和水侵前缘。图7表明,边水由西向东相对均匀地向气藏内部侵入,无明显的水侵通道。同时,1号井水侵前缘呈现非均匀水侵特征,到达西翼高

渗层位置时,边水沿高渗层推进。

图8显示,广域电磁反演成果及气井生产动态基本一致。1号井初期产水量相对较低(日产水量约 $50\ \text{m}^3$)且保持稳定,后期产水量快速增加(最大日产水量为 $388\ \text{m}^3$),但总体上水侵前缘推进速度较慢,水侵速度约 $50\ \text{m/a}$ 。由此证实,广域电磁法可有效识别深层边水气藏的水侵前缘,进一步明确储层中气水的空间分布位置。

2.4.2 治水对策优化

由以上分析可知,边水由1号井向气藏内部相对均匀推进,水侵前缘呈现非均匀水侵特征,到达西翼高渗层位置时,边水沿高渗层推进,但水侵速度总体较慢。同时,过1号井不同方向的地震叠前时间剖面(图9)显示,1号井与西北方向2号井和3号井所在区域的储层连续性较好,与东南方向4号井的储层连续性较差。因此,结合最新的水侵前缘认识,边水由1号井向3号井方向侵入的风险更大。1号井与3号井相距 $3.1\ \text{km}$ 。2024年3号井压力恢复试井曲线显示,探测范围($2\,016\ \text{m}$)内尚未出现水侵迹象,进一步证实该区域的水侵推进速度相对较慢。为进一步降低水侵影响,建议对1井组采取“排控结合”的治水对策:1号井持续开展主动排水,排水规模保持在 $300\sim 400\ \text{m}^3/\text{d}$;结合数值模拟预测结果,将2号井和3号井的生产规模由目前的 $200\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 降至 $150\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 以下。数值模拟预测在1号井持续排水,可有效抑制1号井方向水侵前缘推进速度,确保内部2号井和3号井稳定生产,井组稳产年限较优化前可延长1 a。

3 结论

1) 基于测井电阻率与广域电磁反演电阻率的线性回归关系,确定1井组水区的广域反演电阻率小于 $227\ \Omega\cdot\text{m}$,气水过渡区的广域反演电阻率介于 $227\sim 383\ \Omega\cdot\text{m}$,纯气区的广域电磁反演电阻率大于 $383\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

2) 根据广域电磁电阻率反演剖面和气水识别图版,可划分出气区、气水过渡区和水区。结果表明:边水由1号井向气藏内部推进相对均匀,到达西翼高渗层位置时,边水沿高渗层推进,但水侵速度总体较慢,首次实现了广域电磁法对深层边水气藏水侵前缘的准确识别。

参考文献

- [1] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
HE Jishan. Wide-area electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [2] 何继善. 频率域电法的新进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1250-1254.
HE Jishan. The new development of frequency domain electro-prospecting[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1250-1254.

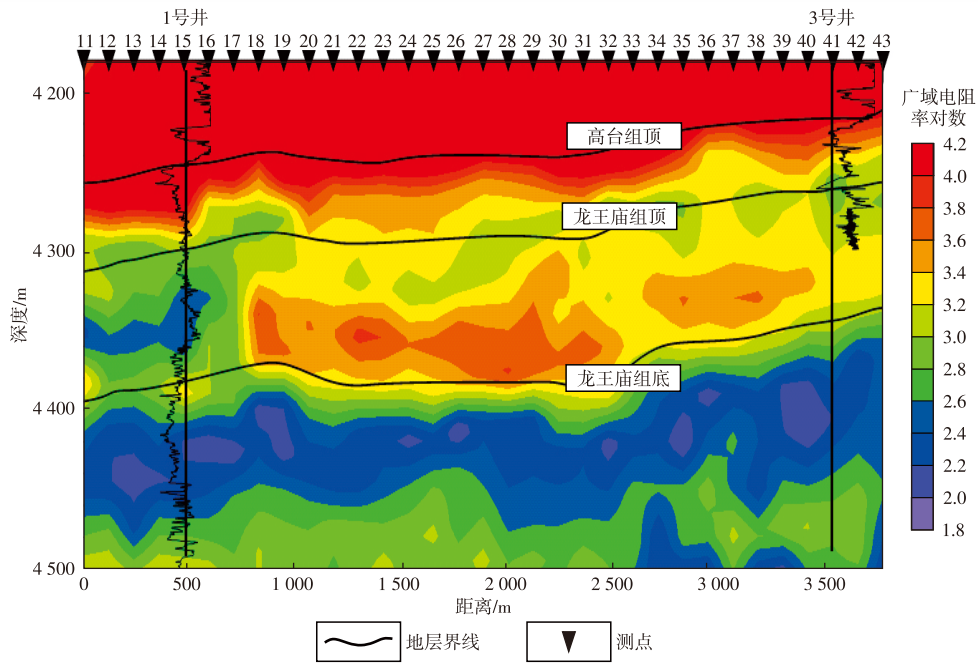


图7 四川盆地磨溪龙王庙组气藏过1号井和3号井气水剖面对比

Fig. 7 Comparison of gas-water profiles between well 1 and well 3 in Longwangmiao Formation gas reservoir, Moxi area, Sichuan Basin

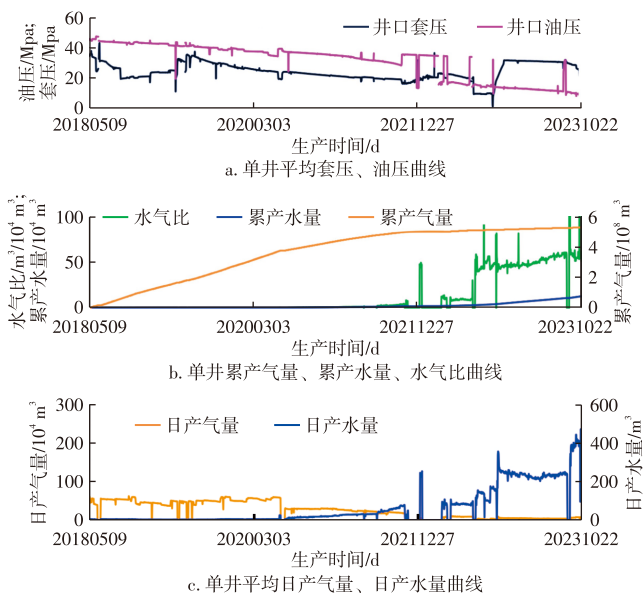


图8 四川盆地磨溪龙王庙组气藏1号井生产曲线

Fig. 8 Production curves of well 1 in Longwangmiao Formation gas reservoir, Moxi area, Sichuan Basin

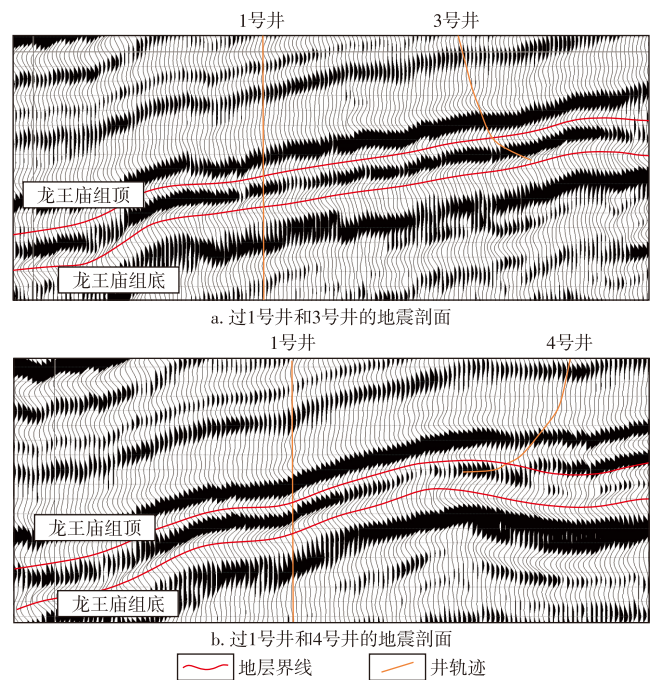


图9 1号井与不同方向的叠前时间剖面

Fig. 9 Pre-stack time profiles of well 1 in different directions

[3] 何继善. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(3): 1065-1072.
HE Jishan. Wide field electromagnetic sounding methods[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(3): 1065-1072.

[4] 何继善, 李帝铨, 戴世坤. 广域电磁法在湘西北页岩气探测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5): 1006-1012.
HE Jishan, LI Diqian, DAI Shikun. Shale gas detection with wide field electromagnetic method in North-western Hunan[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(5): 1006-1012.

[5] 徐锦通, 汤井田. 基于谱元法的广域电磁法三维正演模拟[J]. 地

球物理学报, 2022, 65(4): 1461-1471.
XU Jintong, TANG Jingtian. Spectral element method for 3D wide field electromagnetic method forward modeling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(4): 1461-1471.

[6] 何继善, 李帝铨, 戴世坤. 广域电磁法在湘西北页岩气探测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5): 1006-1012
HE Jishan, LI Diqian, DAI Shikun. Shale gas detection with wide field electromagnetic method in North-western Hunan[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(5): 1006-1012.

[7] 王宏宇. 广域电磁法探测含油富集区试验研究[D]. 长沙: 中南大

- 学, 2013.
- WANG Hongyu. A research of wide field electromagnetic method applied in screening oil enrichment area[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [8] 王若, 王妙月. 可控源音频大地电磁数据的反演方法[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 197-202.
- WANG Ruo, WANG Miaoyue. Inversion method of controlled source audio-frequency magnetotelluric data[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(2): 197-202.
- [9] 何继善, 佟铁钢, 柳建新. a^n 序列伪随机多频信号数学分析及实现[J]. 中南大学学报自然科学版, 2009, 40(6): 1666-1671.
- HE Jishan, TONG Tiegang, LIU Jianxin. Mathematical analysis and realization of a^n sequence pseudo-random multi-frequencies signal [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2009, 40(6): 1666-1671.
- [10] 王家映. 我国大地电磁探测研究新进展[J]. 地球物理学报, 1997, 40, 206-217.
- WANG Jiaying. NEW DEVELOPMENT OF MAGNETOTELLURIC SOUNDING IN CHINA[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40, 206-217.
- [11] 何继善, 李帝铨, 戴世坤. 广域电磁法在湘西北页岩气探测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5): 1006-1012.
- HE Jishan, LI Diqian, DAI Shikun. Shale gas wide area electromagnetic method in shale gas exploration in northwestern Hunan[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(5): 1006-1012.
- [12] 凌帆, 朱裕振, 周明磊. 广域电磁法在南华北盆地长山隆起页岩气资源潜力评价中的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 369-376.
- LING Fan, ZHU Yuzheng, ZHOU Minglei. Application of wide area electromagnetic method to shale gas resource potential assessment in the Long Hills Uplift, South China Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 369-376.
- [13] 童明慧. 广域电磁法在青海省都兰县八宝山地区的应用效果[D]. 吉林大学, 2018.
- TONG Minghui. Application of the Wide Field Electromagnetic Method to Babaoshan Area in Dulan Connty, Qinghai Province[D]. Jilin University·China, 2018.
- [14] 王宏宇, 李帝铨, 柳建新, 等. 广域电磁法在鄂尔多斯盆地西南缘含油富集区探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(3): 1038-1047.
- WANG Hongyu, LI Diqian, LIU Jianxing, et al. Application of wide-area electromagnetic method in exploration of oil-rich areas in the southwest margin of Ordos Basin[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(3): 1038-1047.
- [15] 颜晓华, 黄佳, 李芳书. 广域电磁法压裂监测技术在致密砂岩气藏中的应用-以川中金秋气田为例[J]. 非常规油气, 2024, 11(4): 121-134.
- YAN Xiao hua, Huang Jia, LI Fangshu. Application of wide field electromagnetic method fracturing monitoring technology in tight sandstone gas reservoir: A case study of Jinqiu Gas Field in central Sichuan[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(4): 121-13.
- [16] 李明强, 马梓珂, 唐松, 等. 四川盆地磨溪地区龙王庙组碳酸盐岩气藏水侵规律[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(2): 366-378.
- LI MingQiang, MA Zike, TANG Song, et al. Water invasion law of carbonate gas reservoir of Longwangmiao Formation in Moxi area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(2): 366-378.
- [17] 冯曦, 钟兵, 杨学锋, 等. 有效治理气藏开发过程中水侵影响的问题及认识[J]. 天然气工业, 2015, 35(2): 35-40.
- FENG Xi, ZHONG Bing, YANG Xuefeng, et al. Effective water influx control in gas reservoir development: Problems and countermeasures[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(2): 35-40.
- [18] 谢武仁, 杨威, 李熙喆, 等. 四川盆地川中地区寒武系龙王庙组颗粒滩储层成因及其影响[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(12): 1715-1726.
- XIE Wuren, YANG Wei, LI Xiezhe, et al. The origin and influence of the grain beach reservoirs of Cambrian Longwangmiao Formation in Central Sichuan area, Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(12): 1715-1726.
- [19] 冯曦, 杨学锋, 邓惠, 等. 根据水区压力变化特征辨识高含硫边水气藏水侵规律[J]. 天然气工业, 2013, 33(1): 75-78.
- FENG Xi, YANG Xuefeng, DENG Hui, et al. Identification of the water invasion law in high-sulfur and edge-water gas reservoirs based on the characteristics of pressure variation in the water zone[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 75-78.
- [20] 李滔, 李闽, 荆雪琪, 等. 孔隙尺度各向异性与孔隙分布非均质性对多孔介质渗透率的影响机理[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 569-579.
- LI Tao, LI Min, JING Xueqi, et al. Influence mechanism of pore-scale anisotropy and pore distribution heterogeneity on permeability of porous media[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 569-579.
- [21] 胡勇, 陈颖莉, 李滔. 气田开发中"气藏整体治水"技术理念的形 成、发展及理论内涵[J]. 天然气工业, 2022, 42(09): 10-20.
- HU Yong, CHENG Yingli, LI Tao. The formation development and theoretical connotations of "overall water control of gas reservoir" technology in gas field development[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(9): 10-20.
- [22] 郑冰. 过渡区条件下广域电磁法探测深度问题的理论研究[J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 78-82.
- ZHENG Bin. A theoretical study of the detection depth of WFEM under the condition of transition zone[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 78-82.
- [23] 周印明, 王金海, 胡晓颖, 等. 基于矢量位和标量位的广域电磁法三维有限元数值模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(1): 181-189.
- ZHOU Yingming, WANG Jinhai, HU Xiaoying, et al. WFEM 3D finite element numerical simulation based on the vector potential and scalar potential[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(1): 181-189.
- [24] 李帝铨, 王中乐, 刘子杰, 等. 新元煤矿富水区广域电磁法精细探测[J]. 地球物理学进展, 39(1): 0174-0182.
- LI Diqian, WANG Zhongle, LIU Zijie, et al. Fine detection of wide field electromagnetic method in water-rich area of Xinyuan Coal mine[J]. Progress in Geophysics, 39(1): 0174-0182.
- [25] 谭章坤, 古志文, 尹雪波, 等. 广域电磁法地热勘探应用效果[J]. 四川地质学报, 2021, 41(1).
- TANG Zhangkun, GU Zhiwen, YING Xuebo, et al. Effect of the Application of Wide-Field Electromagnetic Method in geothermal exploration[J]. Acta Geologica Sichuan, 2021, 41(1).