



基于频散测试分析的时频电磁资料校正处理及储层评价

沈义斌^{1,5}, 杨俊⁴, 曹阳⁴, 刘雪军⁴, 王财富⁴, 何展翔^{1,2,3,5}

1. 深圳市深远海油气勘探技术重点实验室(南方科技大学), 广东深圳 518055;
2. 广东省地球物理高精度成像技术重点实验室(南方科技大学), 广东深圳 518055;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东广州 511458;
4. 东方地球物理公司, 河北涿州 072751; 5. 南方科技大学地球与空间科学系, 广东深圳 518055

摘要: 时频电磁法(TFEM)作为一项比较成熟的油气检测技术,在国内外已得到了广泛的应用。在时频电磁解释过程中,主要采用电阻率和极化率联合定性检测,不能给出含油气的定量评价,并把地层电阻率视作与温度、压力无关的量。但随着地层深度增加,地层的温度、压力变化会对电阻率产生影响。由温度、压力的变化引起的电性变化会给储层解释带来误差。通过对岩石的频散测试,分析岩石电性参数随频率变化的规律,并结合岩石的频散性质研究了地层电阻率受温度、压力影响后的变化特征,而后通过拟合获得岩石电阻率与温度、压力的近似关系式。利用恰当的温压-电阻率函数,对时频电磁储层数据进行电阻率校正;利用校正后的电阻率数据,基于 Archie 公式计算研究区储层目标段的饱和度,并对储层进行了定量评价。

关键词: 时频电磁;频散测试;电阻率校正;储层饱和度;油气评价

TIME-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC DATA CORRECTION PROCESSING AND RESERVOIR EVALUATION BASED ON DISPERSION TEST ANALYSIS

SHEN Yi-bin^{1,5}, YANG Jun⁴, CAO Yang⁴, LIU Xue-jun⁴, WANG Cai-fu⁴, HE Zhan-xiang^{1,2,3,5}

1. Shenzhen Key Laboratory of Deep Sea Oil and Gas Exploration Technology (Southern University of Science and Technology), Shenzhen 518055, Guangdong Province, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geophysical High Precision Imaging Technology (Southern University of Science and Technology), Shenzhen 518055, Guangdong Province, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;
4. Oriental Geophysics Co. Ltd., Zhuozhou 072751, Hebei Province, China;
5. Department of Earth and Space Science, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong Province, China

Abstract: Time-frequency electromagnetic method (TFEM), as a relatively mature oil and gas detection technology, has been widely used both in China and overseas. In the process of time-frequency electromagnetic interpretation, the combined qualitative detection of resistivity and polarizability is commonly used. However, such method cannot quantitatively evaluate the oil and gas content, and regards the formation resistivity as a quantity independent of

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-06-09. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金项目“深地/深海探测中强电流激发下可控源电磁法激电效应机理研究及应用”(41874085); 深圳市深远海油气勘探技术重点实验室项目(ZDSYS20190902093007855); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0203).

作者简介: 沈义斌(1995—), 男, 硕士研究生, 应用地球物理专业, 通信地址 广东省深圳市南山区学苑大道 1088 号, E-mail//11930420@mail.sustech.edu.cn

通信作者: 何展翔(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事电磁探测方法研究及应用工作, 通信地址 广东省深圳市南山区学苑大道 1088 号, E-mail//hezx@sustech.edu.cn

temperature and pressure. In fact, with the increase of formation depth, the temperature and pressure changes of the formation will affect the resistivity, which would cause errors to reservoir interpretation. This paper analyzes the variation law of rock electrical parameters with frequency through the frequency dispersion test of rock. Combined with the dispersion properties of rock, the variation characteristics of formation resistivity affected by temperature and pressure are studied, and then the approximate relationship between rock resistivity and temperature/pressure is obtained by fitting. Using appropriate temperature-pressure-resistivity function, the time-frequency electromagnetic reservoir data are corrected for resistivity, by which the saturation of the target reservoir in the study area is calculated with the Archie formula, and the reservoir is quantitatively evaluated.

Key words: TFEM; dispersion test; resistivity correction; reservoir saturation; oil-gas evaluation

0 前言

电磁法是油气勘探的主要方法之一,经过多年发展取得了长足进步.随着勘探目标的不断加深,以及勘探地区的地质构造越来越复杂,常规的电磁勘探方法已不能满足勘探开发的要求,为解决常规方法勘探能力的不足,人们开始研发其他有效的电磁勘探方法.

时频电磁法(Time Frequency Electromagnetic Method, TFEM)勘探技术就是在油气勘探走向深入,难度越来越大的背景下,为适应油气勘探开发的需要,经过 20 余年的探索发展起来的适用于深部资源探测的新方法^[1].TFEM 作为一项比较成熟的油气检测技术,在国内外多个盆地已得到了广泛的应用,并取得了较好的勘探效果^[2-6].经过多年的实践表明,该技术是在目标储层岩石物性研究基础上,有效地提取储层油气相关异常信息,弥补了地震在油气检测方面的不足.

岩石的导电性是电磁勘探的基础.储层岩石电阻率参数一直是区分油水界面、评价储层含油性与程度的核心参数.相较于岩石物理弹性理论研究方面,岩石物理电性研究起步稍晚^[7-10].通过岩石物性研究可充分了解储层含油气与岩石物性参数之间的相关性,为电磁油气检测提供必要基础^[11-12].但是,时频电磁油气检测一直停留在定性评价的基础上,直到 2021 年赵云生等利用 Archie 公式对井地电磁法的电阻率、极化率资料进行火成岩油气储层饱和度计算才突破了电磁方法定量储层评价的方法瓶颈^[13].另外,曲昕馨等基于温压与电阻率关系对电磁反演的电阻率数据进校校正研究,建立了不同类型岩石的电阻率与温度、压力定量关系,提出了一种基于温压与电阻率关系的电磁反演校正方法^[14],通过对实测数据的校正处理,证明了该方法可有效提高对薄层的精细划分能力,但并没

有进一步开展油气储层的评价.

本文利用西部 CXN 地区火山岩发育区时频电磁反演数据,在岩石物理实验测试数据分析的基础上,研究储层岩石电性参数随温度和压力变化的特征及校正方法,进而进行储层饱和度预测的探索.

1 岩石温压频散测试分析

岩石复电阻率频散实验的岩心均取自 CXN 地区.岩心有砂岩、灰岩、白云岩 3 类(表 1),合计 25 块岩石样本.本研究用于岩石频散实验的实验仪器为 AutoLab-1000,测量的频率范围 0.01~10 000 Hz,一共 31 个频点.岩心压力的频散测试时,温度控制为 25 °C,测试 10、20、30、40、50、60、70 MPa 下岩心电阻率频散曲线;温度的岩心频散实验,设置围压 10 MPa,温度为 30、45、60、75、90、100 °C,测量岩心的电阻率频散曲线.

表 1 实验岩心参数表

Table 1 Parameters of cores for experiment

岩心编号	岩性	长度/cm	直径/cm	密度/(g/cm ³)	孔隙度/%
114	灰色白云质灰岩	4.28	2.5	2.79	0.6
116	灰色白云质灰岩	4.56	2.45	2.85	0.8
120	灰色灰岩	3.95	2.46	2.74	0.5
137	灰色含砂质硅质灰岩	1.67	2.46	2.83	1.5

1.1 压力与电性参数之间的关系

储层的主要岩性多是含有孔隙的岩石,随着地层深度的增加,储层对应的地层压力增大,岩石受应力作用更加致密.储层的主要岩性是少含导电矿物的岩石,地层水会作为岩石孔隙内部的主要成分,所以岩石内部的导电机制中,电磁感应所占比重将比较小,主要

为离子导电. 本实验所选用的岩心包括灰色白云质灰岩、灰色灰岩、灰色含砂质硅质灰岩 3 种岩石. 不同压力下的电性参数频谱特征均大致相同, 这里仅以 137 号灰色含砂质硅质灰岩为例, 从 10 MPa 开始, 70 MPa 结束, 压力递增梯度为 10 MPa(图 1).

压力对电阻率数值的影响显而易见. 从图 1 中不难看出, 在 10 MPa 压力下岩心电阻率的幅值处于 1 200 Ωm 左右; 但在 70 MPa 压力下时, 电阻率数值接近 2 900 Ωm . 同样, 相位也会随压力变化逐渐变化, 但整体的数值差异不大. 曲线首端接近重合, 整体呈现下降的趋势, 且施加的压力越大, 相位数值越小, 对于岩石的极化模式影响很大.

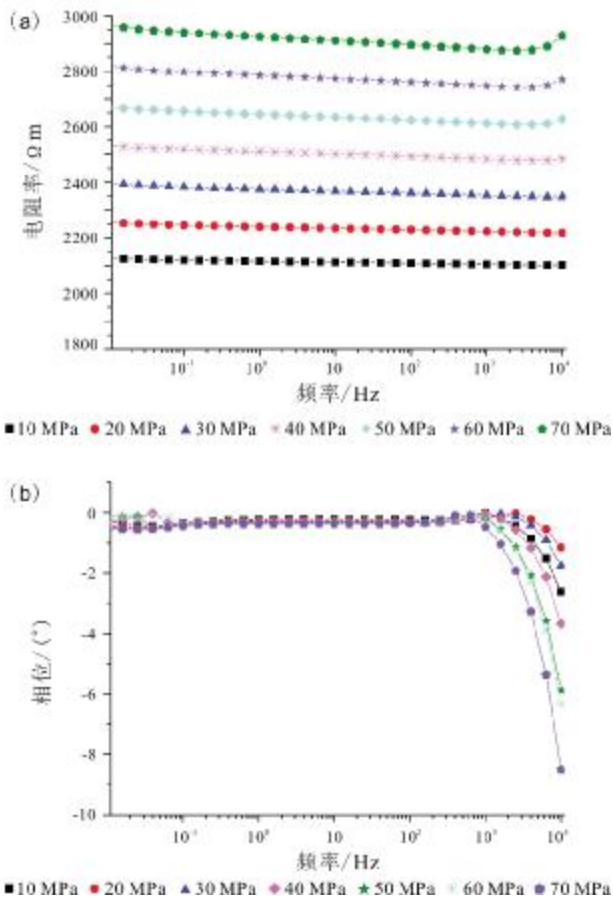


图 1 不同压力条件下灰色含砂质硅质灰岩(137 号岩心)的频谱特征

Fig. 1 Spectrum characteristics of sandy siliceous limestone (core 137) under different pressure conditions

a—振幅曲线(amplitude curve);b—相位曲线(phase curve)

1.2 温度与电性参数之间的关系

当外界温度增大的时候, 岩石内部的导电离子活

动性能也会随之变强, 因此岩石内部的导电能力也会变强, 而岩石的电阻率则会随之减小. 图 2 为 114 号岩心在不同温度情况下复电阻率随温度变化的图像.

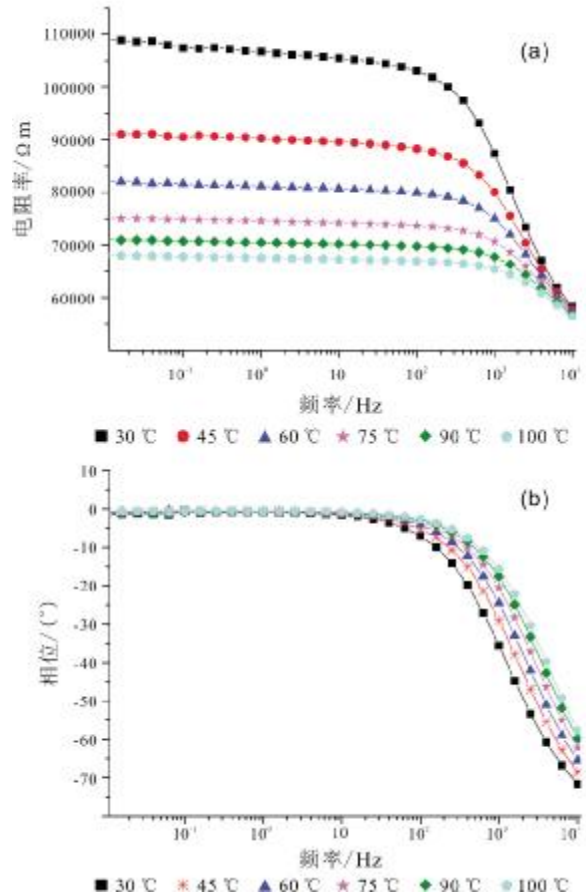


图 2 不同温度条件下灰色白云质灰岩(114 号岩心)的频谱特征

Fig. 2 Spectrum characteristics of dolomitic limestone (core 114) at different temperatures

a—振幅曲线(amplitude curve);b—相位曲线(phase curve)

从图 2a 可见, 在不同温度条件下, 灰色白云质灰岩复电阻率振幅曲线首端有明显差距, 而且随着温度的增大, 曲线趋势没有发生太大改变, 复电阻率振幅的减幅越来越小. 曲线随着频率的增大逐渐靠拢, 并一直保持下降的趋势, 直到进入高频段以后, 曲线开始重合并最终相交. 而相位曲线的情况与复电阻率振幅曲线相反, 呈现稳定的下降趋势(图 2b). 可以看到在中低频段, 曲线能完全重合在一起; 随着频率增大, 曲线开始下降并逐渐分开, 且在同一频率时, 温度越低, 相位越小.

值得注意的是,电阻率的幅值差异较大,甚至能达到几倍的差距. 30 °C时超过了 120 000 Ωm,而 100 °C 的灰色白云质灰岩复电阻率降低到 40 000 Ωm. 由此可见温度对于岩石复电阻率有很大的影响. 这说明在电磁资料反演过程中,忽视温度对于电阻率的影响,可能会给地球物理数据处理带来明显的误差.

1.3 温度、压力与电性参数之间的关系

对 5 种岩石进行温压实验. 图 3 所示为 116 号岩石样品灰色白云质灰岩的复电阻率振幅和相位随温度的变化曲线. 从图 3 可见,电阻率随温度升高而降低,相位随温度升高而增加. 图 4 为 116 样品在 30 °C 下复电阻率振幅和相位随压力的变化曲线. 观察图 4 可见,电阻率随压力升高而升高,相位随压力升高而降低. 因此,在野外工作实际处理资料过程中,通过上述关系对电性参数进行温度和压力校正后,再进行数据处理,则可以提高储层解释精度和效果.

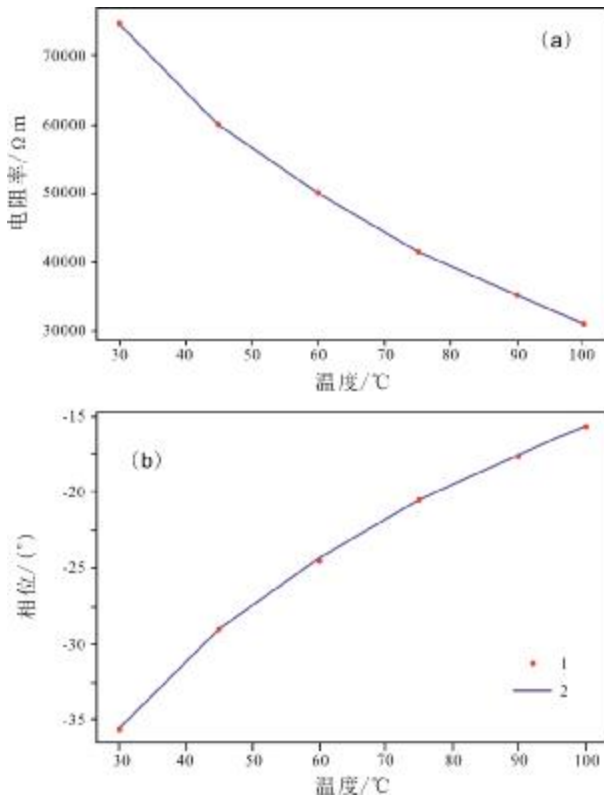


图 3 灰色白云质灰岩(116 号岩心)复电阻率温度拟合
Fig. 3 Temperature fitting of complex resistivity for dolomitic limestone (core 116)

a—振幅曲线(amplitude curve); b—相位曲线(phase curve); 1—实验数据散点(experimental data point); 2—拟合曲线(fitted curve)

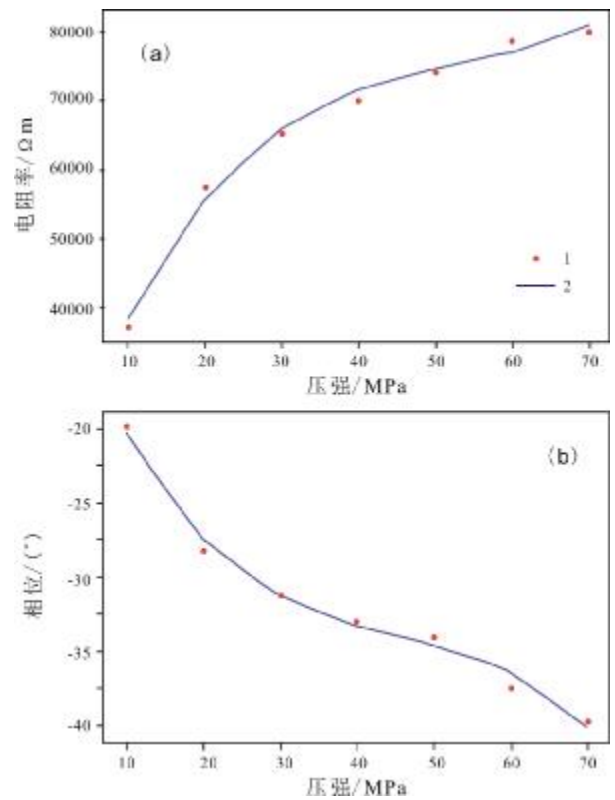


图 4 灰色白云质灰岩(116 号岩心)复电阻率压力拟合
Fig. 4 Pressure fitting of complex resistivity for dolomitic limestone (core 116)

a—振幅曲线(amplitude curve); b—相位曲线(phase curve); 1—实验数据散点(experimental data point); 2—拟合曲线(fitted curve)

2 电阻率反演数据校正方法

在对目标位置的电阻率数据进行校正之前,笔者查阅了 CXN 地区的地区温压系统,明确了研究区的压力梯度和温度梯度. 根据前人对 CXN 拗陷 20 多个含气构造的主要地层压力的分析资料^[15],对研究区的地层压力分布特征有了一定的认识. 按照压力系数对 CXN 地区地层压力进行了分类(表 2).

表 2 研究区地层压力分类表

Table 2 Classification of formation pressure in the study area

地层压力分类	常压	高压	超高压
压力系数	0.95~1.1	1.1~1.5	>1.5

刘震等^[16]提出将地层压力和地温看作一个整体系统,那么含油气盆地的地温-地层压力系统就是一个独立的封闭系统,并给出了地温-地层的压力方程^[16]:

$$T=KP+L \quad (1)$$

其中 K 和 L 均为于封闭系统内部气体体积有关的常量, T 和 P 分别为地温和地层压力. 从西部某盆地地温、地层压力特征图(图 5)可得知, 随着深度增加, 在 800~2 000 m 时, 地层压力处于 2~4 MPa 的低幅超压. 通过测量得出该地区的地温梯度为 $1.93\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$, 地压梯度为 $2\text{ MPa}/\text{hm}$, 平均地表温度为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$.

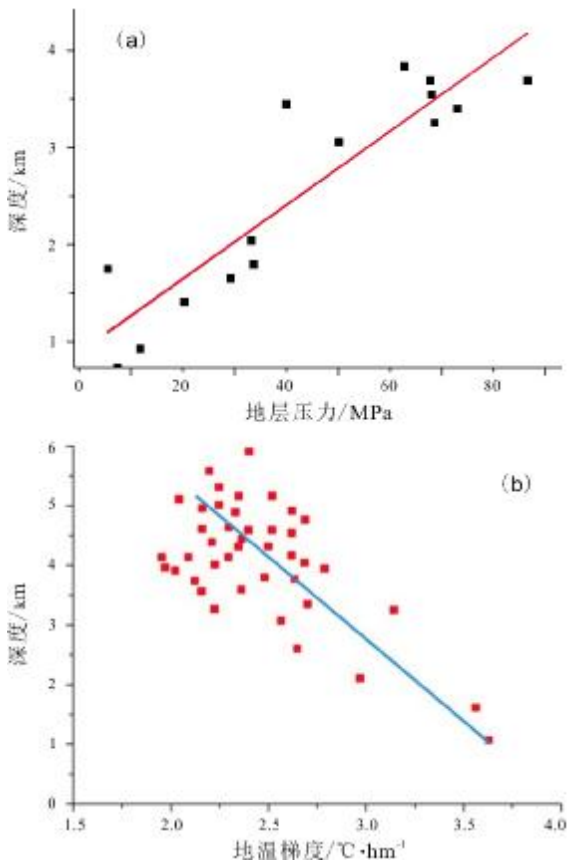


图 5 研究区温压梯度曲线
(据文献[17]修改)

Fig. 5 Temperature and pressure gradient curve of the study area
(Modified from Reference [17])

2.1 岩石温压关系曲线的拟合

在研究区根据重磁电震和 YT-1 井测井资料, 确定了测线 TFEM1902 的储层范围: 深度 5 500~6 300 m 处, 主要岩性包含灰岩、页岩和白云岩 3 种岩石. 故以岩心编号为 120 号的灰色灰岩进行温压数据拟合, 获取复电阻率振幅、相位和温度、压力对应的数值关系, 其中激发频率取 0.01 Hz . 对选取的数据拟合后得到了不同的温度和压力条件下灰色白云质灰岩的拟合图像, 如图 6、7 所示.

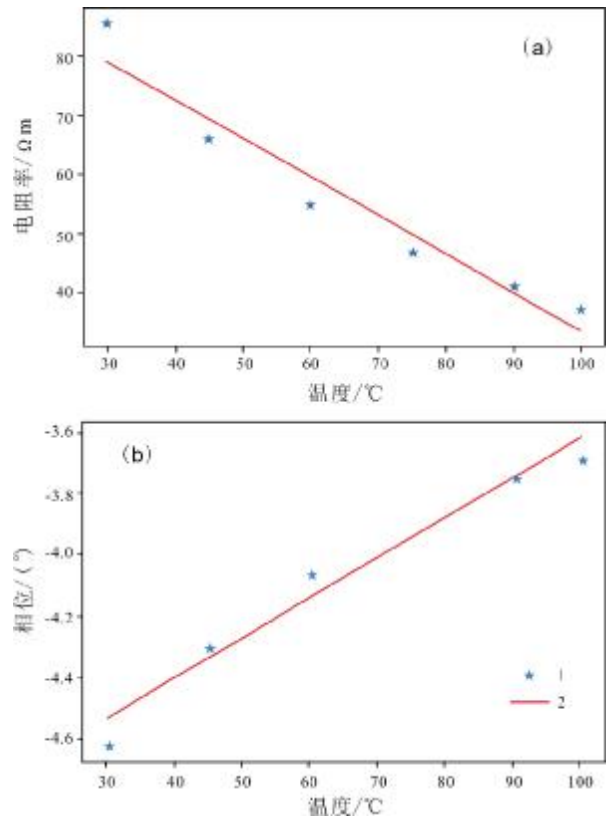


图 6 灰色灰岩(120号岩心)复电阻率温度拟合

Fig. 6 Temperature fitting of complex resistivity for gray limestone (core 120)

a—振幅曲线(amplitude curve); b—相位曲线(phase curve); 1—实验数据散点(experimental data point); 2—拟合曲线(fitted curve)

由图 6a、7a 可知, 随着温度和压强的增大, 复电阻率振幅分别减小和增大, 所以在实际的反演过程中, 随着地层深度的增加, 温压的综合作用存在互相抵消的情况. 为了使反演结果更加精确, 利用岩石物理方法获取复电阻率振幅对应温度压力的数值关系, 为后面的时频电磁数据进行温压校正提供基础.

2.2 典型剖面储层目标的圈定及数据校正

1) 提取 TFEM1902 测线资料, 绘制时频电磁反演电阻率剖面(图 8); 同样, 绘制 TFEM1902 测线的极化率剖面(图 9).

2) 将对应测线的极化率剖面与时频电磁反演剖面结合起来比较, 结合一级有利区某些深度对应的极化率较高的特点, 可以在图 8 中深度约 3.6 km 处大致确定测线 TFEM1902 的储层范围.

为了同时考虑到温度、压力对电阻率的影响. 曲昕馨等^[14]提出电阻率温压校正的综合函数:

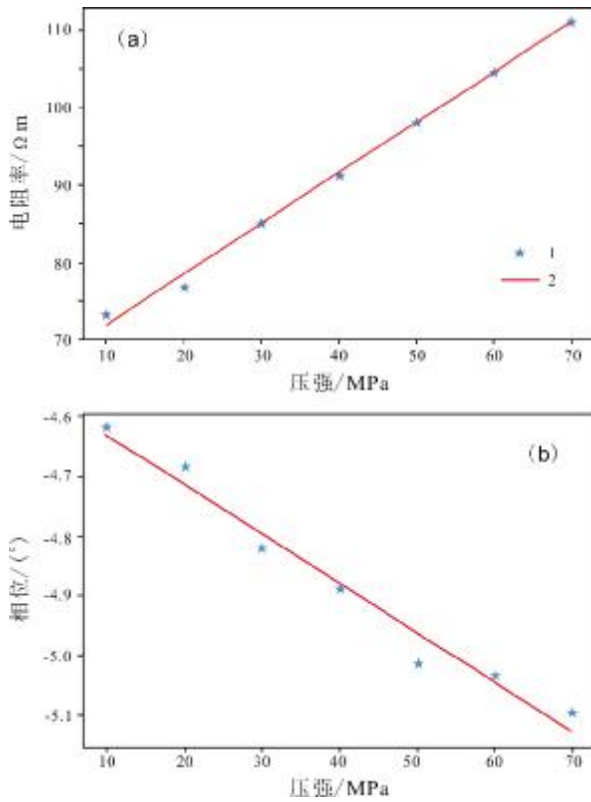


图 7 灰色灰岩(120号岩心)复电阻率压力拟合

Fig. 7 Pressure fitting of complex resistivity for gray limestone (core 120)

a—振幅曲线(amplitude curve); b—相位曲线(phase curve); 1—实验数据散点(experimental data point); 2—拟合曲线(fitted curve)

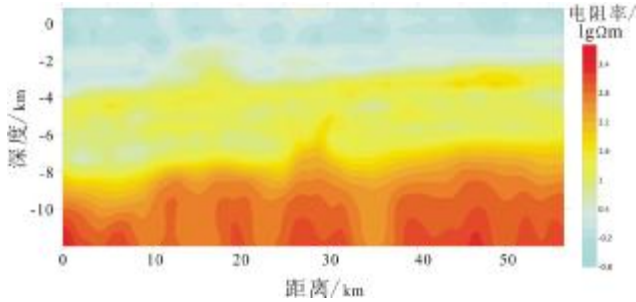


图 8 测线 EM1902 电阻率反演剖面

Fig. 8 Resistivity inversion profile of survey line EM1902

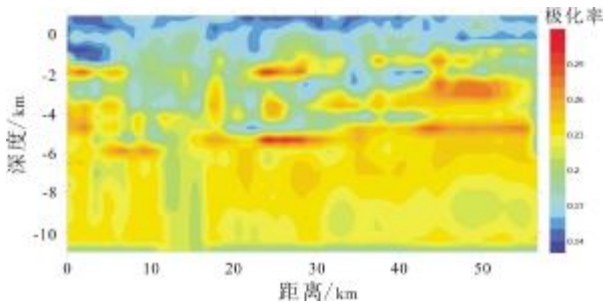


图 9 测线 EM1902 极化率剖面

Fig. 9 Polarizability profile of survey line EM1902

$$\text{Log}\rho(H)=C\cdot(H-H_0)+\text{log}\rho(H_0) \quad (2)$$

其中 C 为校正系数,可通过温度、压力梯度共同定义,可表示为:

$$C=\frac{\partial\text{log}\rho(H)}{\partial H}=\frac{\partial\text{log}\rho(H_0)}{\partial T}\times\frac{\partial T}{\partial H}+\frac{\partial\text{log}\rho(H_0)}{\partial P}\times\frac{\partial P}{\partial H}$$

$$=a\frac{\partial T}{\partial H}-m_l\text{log}(b\Phi)\frac{\partial P}{\partial H} \quad (3)$$

式中, $\rho(H)$ 为地层深度 H 下的电阻率定义,即常规勘探测得的电阻率数据; $\rho(H_0)$ 为初始深度下的地层电阻率; a 为岩石对数电阻率的地温梯度; b 为岩石对数电阻率的地压梯度; m_l 为岩石的胶结因数, $l=1,2,3 \dots$; Φ 为地层岩石的孔隙度,可由剖面的测井曲线给出. 由图 5 可知 CXN 地区的地温梯度和压力梯度,其中, $\partial P/\partial H=2$, $\partial T/\partial H=1.93$. 根据前人研究,有 $a=1.05$, $m=1.53$, $b=1.01$, $n=1.93$ ^[18]. 根据以上数据,可以通过式 (2)(3) 获得校正后的地层电阻率 $\rho(H)$,如图 10 所示.

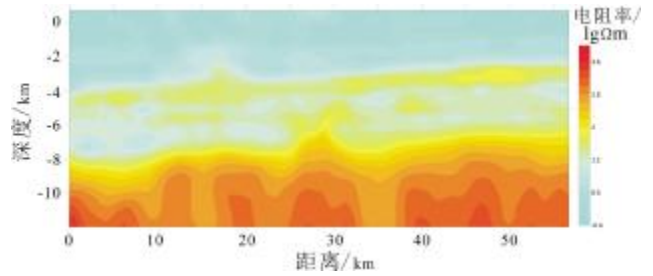


图 10 测线 EM1902 校正后反演剖面

Fig. 10 Corrected inversion profile of survey line EM1902

3 储层含油饱和度的估算

饱和度对于储层的评价十分的重要. 测饱和度模型有威克斯曼-史密斯(W-S)^[19]等类型,为便于计算一般使用 Archie 公式^[20]:

$$S_w=\sqrt[n]{\frac{abR_w}{\Phi^m R_t}} \quad (4)$$

其中, R_t 为储层地层电阻率(本研究为考虑温压影响的电阻率); R_w 为储层地层水的电阻率; S_w 储层的含水饱和度. 根据探区测井资料,地层水电阻率为 $0.65 \Omega m$,储层平均孔隙度为 0.17 , m 取值为 2 ,饱和度指数 n 设置为 2 .

这里公式中储层地层电阻率 R_t 为考虑激发极化效应的复电阻率振幅,带入前面的储层电阻率和极化率数值,同时假定时间常数和频率相关系数分别为 10 和 0.5 ,利用 Cole-Cole 模型计算近似的等效复电阻率.

利用公式(4)可对储层目标进行饱和度计算,选取测线有利储层对应 25 km(YT-1 井)附近,纵向深度为 1.6~3.9 km 处的数据绘制得到随地层深度变化,电阻率和饱和度变化的曲线,如图 11 所示.可见,估算的储层饱和度达到 80%以上,这与研究区火成岩储层工业油井的饱和度一致.

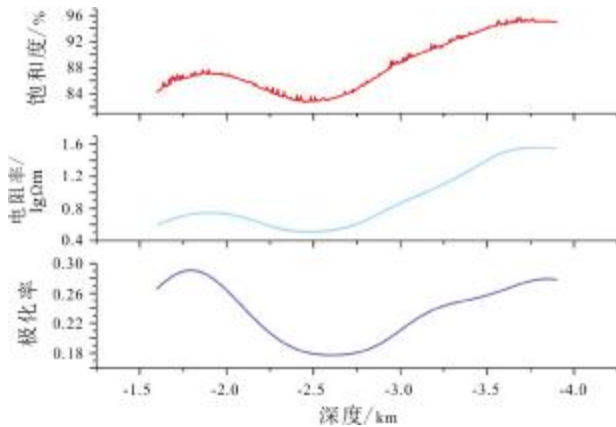


图 11 测线 TFEM1902 (1.6~3.9 km)储层饱和度估算
Fig. 11 Estimation of reservoir saturation of survey line TFEM1902 (1.6~3.9 km)

4 结论

通过岩石温压电阻率频散测试,获得研究区储层岩石随着温度和压强的增大,复电阻率分别减小和增大.因此,随着地层深度的增加,温度和压力的变化对于地层物性影响是综合作用.同时,通过岩石饱和度电阻率极化率测试研究,获得饱和度随复电阻率变化关系;利用温压校正的综合函数关系式计算地层电阻率,进而基于研究区相关储层特性开展饱和度评价.该研究无疑还存在诸多不足,但不失为时频电磁从储层含油气定性预测走向储层定量评价进行的一种探索.

致谢: 本项研究受到国家自然科学基金项目“深地/深海探测中强电流激发下可控源电磁法激电效应机理研究及应用”(41874085)、深圳市深远海油气勘探技术重点实验室项目(ZDSYS20190902093007855)、南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0203)、广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目“海洋电子信息装备浅海试验场”(GDNRC[2021]60)、广东省地球物理高精度

成像技术重点实验室项目(2022B1212010002)、深圳市科技计划项目“深海深地资源探测技术系统研发”(KQTD 20170810111725321)的联合资助,在此表示感谢.

参考文献(References):

- [1]何展翔.人工源时间频率电磁测深方法:中国, CN03150098.6[P]. 2003-08-01.
He Z X. Artificial source time frequency electromagnetic bathymetry: CN, CN03150098.6[P]. 2003-08-01.
- [2]He Z X, Suo X D, Hu Z Z, et al. Time-frequency electromagnetic method for exploring favorable deep igneous rock targets: A case study from North Xinjiang[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2019, 24(2): 215-224.
- [3]赵一丹,何展翔,郑求根,等.时频电磁法含油气有利区预测在 T 盆地的应用[J].石油地球物理勘探, 2014, 49(S1): 228-232.
Zhao Y D, He Z X, Zheng Q G, et al. Favorable oil and gas target prediction with time-frequency electromagnetic method in T Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(S1): 228-232.
- [4]孙志华,付吉林,杨书江,等.时频电磁法勘探在尼日尔 A 区块的应用效果[J].石油地球物理勘探, 2012, 47(S1): 147-151.
Sun Z H, Fu J L, Yang S J, et al. TFEM applications in the Block A, Niger[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(S1): 147-151.
- [5]张春贺,刘雪军,周惠,等.基于时频电磁法的富有机质页岩层系勘探进一步研究[J].石油物探, 2015, 54(5): 627-634.
Zhang C H, Liu X J, Zhou H, et al. A step forward study for the exploration of organic-rich shale by using time-frequency electromagnetic method (TFEM) [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(5): 627-634.
- [6]张锐锋,严良俊,孙社敏,等.时频电磁法时域激电参数提取与应用[J].石油地球物理勘探, 2016, 51(6): 1227-1232.
Zhang R F, Yan L J, Sun S M, et al. IP parameter extraction from TFEM data in the time domain [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(6): 1227-1232.
- [7]石昆法.可控源音频大地电磁法理论与应用[M].北京:科学出版社, 1999.
Shi K F. Theory and application of controlled source audio magnetotelluric method[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
- [8]邓少贵,范宜仁,仝兆岐,等.不同矿化度下泥质砂岩岩石物理特性研究[C]//第三届中国测井国际学术交流会议论文集.中国石油学会, 2004.
Deng S G, Fan Y R, Tong Z Q, et al. Research on petrophysical properties of argillaceous sandstone with different salinity[C]//The 3rd Sino-Russian Logging International Symposium. Chinese Petroleum Society, 2004. (in Chinese)
- [9]曲斌,刘玉,邵英梅,等.储层状态气体岩石电阻率测试技术及变化规律研究[C]//第四届全国石油地质实验技术及实验室管理工作

- 交流会议论文集. 上海: 中国石油天然气股份有限公司, 2001.
- Qu B, Liu Y, Shao Y M, et al. Research on test technology and variation law of resistivity of gas rock in reservoir state[C]//Proceedings of the 4th National Petroleum Geology Experiment Technology and Laboratory Management Exchange Conference. Shanghai: China National Petroleum Corporation, 2002. (in Chinese)
- [10]高妍, 沈金松, 何展翔, 等. TFEM 探测 JZ 地区潜山内幕目标的模拟及试验[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(6): 1207-1212.
- Gao Y, Shen J S, He Z X, et al. Target detection simulation and experiments in buried hills with TFEM method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(6): 1207-1212.
- [11]宋延杰, 邢丽波. 新型混合泥质砂岩通用双电层电导率模型[J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29(6): 7-10, 16.
- Song Y J, Xing L B. New generalized electric double layer conductivity model for laminated and dispersed shaly sands[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2005, 29(6): 7-10, 16.
- [12]沈金松, 苏本玉, 王智茹, 等. 泥质砂岩电导率模型的分析及对比[J]. 测井技术, 2008, 32(5): 385-393.
- Shen J S, Su B Y, Wang Z R, et al. Analysis and contrast of the shaly sandstone conductivity model [J]. Well Logging Technology, 2008, 32(5): 385-393.
- [13]Zhao Y S, He Z X, Tian G. Reservoir evaluation method for complex resistivity using the borehole-surface electromagnetic method: A case study of an igneous reservoir in the K exploration area, China[J]. Journal of Applied Geophysics, 2021, 184:104251.
- [14]曲昕馨, 董卫斌, 刘子豪, 等. 基于温压与电阻率关系的电磁反演校正技术研究[C]//2019年油气地球物理学学术年会论文集. 南京: 中国地球物理学会油气地球物理专业委员会, 2019: 463-466.
- Qu X X, Dong W B, Liu Z H, et al. Research on electromagnetic inversion correction technology based on the relationship between temperature-pressure and resistivity [C]//Proceedings of the Annual Conference on Oil and Gas Geophysics. Nanjing: Oil and Gas Geophysics Committee of Chinese Geophysical Society, 2019: 463-466. (in Chinese)
- [15]贝东. 四川盆地川西坳陷高异常地层压力分布特征[J]. 矿物岩石, 1995, 15(1): 58-62.
- Bei D. Distributing characteristics of abnormal pressure in the West Sichuan depression of Sichuan Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1995, 15(1): 58-62.
- [16]刘震, 张万选, 曾宪斌, 等. 含油气盆地地温-地压系统浅析[J]. 天然气地球科学, 1996, 7(1): 34-38.
- Liu Z, Zhang W X, Zeng X B, et al. Analysis of system of geotemperature-geopressure in oil-gas basin [J]. Natural Gas Geoscience, 1996, 7(1): 34-38. (in Chinese)
- [17]刘震, 朱文奇, 孙强, 等. 中国含油气盆地地温-地压系统[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 1-17.
- Liu Z, Zhu W Q, Sun Q, et al. Characteristics of geotemperature-geopressure systems in petroliferous basins of China[J]. Acta Petroli Sinica, 2012, 33(1): 1-17.
- [18]王建波, 冯明刚, 严伟, 等. 页岩气储层含水饱和度影响因素及计算方法——以焦石坝区块五峰组-龙马溪组为例[J]. 天然气技术与经济, 2020, 14(6): 21-28.
- Wang J B, Feng M G, Yan W, et al. Influential factors and calculation methods for water saturation in shale gas: Examples from Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Jiaoshiba block [J]. Natural Gas Technology, 2020, 14(6): 21-28.
- [19]Winsauer W O, Shearin Jr A M, Masson P H, et al. Resistivity of brine-saturated sands in relation to pore geometry[J]. AAPG Bulletin, 1952, 36(2): 253-277.
- [20]Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the AIME, 1942, 146(1): 54-62.