doi: 10.11720/wtyht.2022.1336

股启春,王元俊,周道容,等.复电阻率法在安徽南陵盆地海相页岩气勘探中的应用[J].物探与化探,2022,46(3):668-677.http://doi.org/10. 11720/wtyht.2022.1336

Yin Q C, Wang Y J, Zhou D R, et al. Application of complex resistivity method to the exploration of marine shale gas in the Nanling Basin, Anhui Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3):668-677. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1336

# 复电阻率法在安徽南陵盆地海相页岩气 勘探中的应用

# 殷启春<sup>1,2</sup>,王元俊<sup>1</sup>,周道容<sup>1</sup>,张丽<sup>3</sup>,孙桐<sup>2</sup>

(1.中国地质调查局南京地质调查中心,江苏南京 210016; 2.中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心,黑龙江哈尔滨 150081; 3.安徽省勘查技术院,安徽 合肥 230041)

摘要:安徽南陵盆地主体为中生代陆相红盆,红盆下海相地层分布不明,页岩气资源潜力不清。根据本区周边二 叠系富有机质泥页岩储层含有黄铁矿的物性特征,选用复电阻率法开展页岩气地质调查工作。针对盆内、盆外不 同地质特点设计合适的观测系统,采用 Cole-Brown 和 Cole-Cole 模型拟合反演,绘制近区场电磁电阻率和视充电率 参数图。研究结果发现:①研究区二叠系富有机质泥页岩碳质含量高、富含黄铁矿颗粒,具有明显的"低电阻率、高 极化率"特征,可以有效与其围岩区分,有利于开展复电阻率法勘探;②极化率是识别深部富有机质泥页岩地层乃 至页岩气藏的有效参数;③根据复电阻率法勘探结果,实施钻孔验证,成功钻遇三叠系灰岩地层,并预测南陵盆地 红盆下为二叠系页岩气藏有利区。本次研究表明了复电阻率法在南陵盆地可探测深达 2 000 m 以下累计厚度约 200 m 的含黄铁矿泥页岩地层,是电磁法勘探中唯一能直接指示页岩气藏的方法,可以适用于地质情况复杂的南陵 盆地乃至中国南方海相页岩气地球物理勘探。本次勘探结果也为在南陵盆地进一步开展海相页岩气勘探提供了 依据。

## 0 引言

电磁法相对目前页岩气勘探中主要运用的地震 方法而言,具有勘探深度大、不受碳酸盐岩地层屏 蔽、对低阻层分辨灵敏等特点<sup>[1]</sup>。近年来,以广域 电磁法为代表的电磁法在南方海相页岩气勘探中取 得了较好的效果<sup>[2-6]</sup>,但其只利用了电阻率特性,对 极化率特性尚未充分应用。复电阻率法作为电磁法 的一种,用于研究地下地质体的导电特性和激发极 化特性,在探测金属矿领域获得了广泛应用<sup>[7-11]</sup>。 在常规油气勘探中,许传建等<sup>[12]</sup>认为油气藏上方存 在电性—电极化性异常,应用于直接探测油气藏效 果较好。苏朱刘等<sup>[13-14]</sup>对 800 m 以浅的油气探井进 行了对比,发现产油井相对干井而言具有>10%的高极化异常,并开展了2600m以浅的油气藏圈闭预测,取得了较好的成果。

复电阻率法应用在我国南方页岩气勘探中尚处 于探索阶段。赵迪斐等<sup>[15]</sup>通过对四川盆地龙马溪 组页岩储层特征和复电阻率特征研究后认为,龙马 溪组页岩储层普遍含有可增强储层极化特征的黄铁 矿,具备复电阻率勘探应用的基础。在涪陵地区开 展了复电阻率法勘探页岩气的试验和初步定性识别 工作<sup>[16]</sup>,但未做地质或油气工作的解释、验证。复 电阻率法在页岩气勘探中的应用有待进一步开展。

南方海相页岩气勘探区具有如下地质—地球物 理特点:①富有机质泥页岩与碳酸盐岩地层共生构 成地层组合;②地表条件为基岩山区与中生代红盆

收稿日期: 2021-06-10; 修回日期: 2022-01-15

基金项目:中国地质调查局项目"苏皖地区页岩气地质调查"(DD20190083)、"下扬子地区油气页岩气调查评价"(DD20221662)

**第一作者:** 殷启春(1977-),男,高级工程师;2010年毕业于中国科学院研究生院,主要从事地球物理勘探研究和非常规油气勘探评价工作。 Email: yinqc@ mail.cgs.gov.cn

区共存,红层厚度大、地层变化剧烈,造成了地面人 工场源地震波传播衰减快;③地球物理方法往往无 法有效直接识别南方地区普遍发育的低角度滑脱 层。以上地质—地球物理特点导致地震资料信噪比 低,使得海相页岩地层成像难度较大<sup>[17-20]</sup>。因此, 目前以地震勘探为主的页岩气地球物理勘探迫切需 要寻找新的勘探方法。

本次研究对比了南陵盆地盆外及盆内的复电阻 率法勘探效果,以期查明富有机质页岩的电阻率特 征和激发极化特征,从而了解埋深2500m以浅的地 层与构造分布,预测富有机质泥页岩地层分布、埋深 乃至页岩气藏情况,为后续南方海相地区特别是下 扬子地区页岩气的勘探突破奠定基础。

#### 1 复电阻率法

复电阻率法(complex resistivity method)也称为 CR法,当地质体存在激电(IP)效应和电磁(EM)效 应时,通过测量大地的视复电阻率频谱或激电场的 衰减曲线,借助分析大地总电阻率的实分量和虚分 量来研究大地的电性,因其测出的视电阻率是频率 的复变函数,故称作复电阻率。相对常规激发极化 法,CR法对频率域和时间域信息都予考虑,因此可 对整个地电系统进行研究<sup>[21]</sup>。

在野外实测得到复电阻率频谱后,对其进行拟 合反演,可分离出电磁谱(SEM)和激电谱(SIP)。 这两种频谱参数在圈定异常方面各有特点:SEM 谱 由感应电流形成,有较高的灵敏度和几何分辨率,而 SIP 谱则直接反映了极化物质的体积含量和结构特 性。根据实际点位对多个谱参数进行校正,编制拟 剖面图,其中比较重要的参数为电磁电阻率 $\rho_{\omega}$ 和视 充电率 $m_{so}$ 电磁电阻率 $\rho_{\omega}$ 为用近区电磁场计算的 平均电阻率,该参数对地下目标体的导电性变化有 较高的电性和几何分辨率且形态单一,反演深度断 面能够较全面地反映地下地质情况,对主要的电性/ 地层界面和深大断裂定量刻画效果较好,可用于地 层与构造解释,绘制综合地质解释剖面。

视充电率  $m_s$  与常规电法中的视极化率( $\eta_s$ )的 物理意义相同,但  $m_s$  是全域的,是在极限条件下 (低频趋于零、高频趋于无穷大)计算的视充电率。 对于体极化目标体, $m_s$ 的大小直接反映了勘探体积 内极化物质体积含量的变化,可用于含有极化物质 地层如岩体、矿体或富含黄铁矿的富有机质页岩地 层的评价。 2 研究区地质和电性特征

## 2.1 研究区基本地质特征

研究区南陵盆地及其周缘位于南方海相页岩气 勘探区内的下扬子地区,其地理位置位于长江下游 (图1)。本区中—晚二叠世以深水陆棚—陆棚凹陷 沉积相为主,广泛沉积了较厚的泥岩、页岩、碳质泥 岩、硅质岩和硅质碳质页岩。二叠系大隆组和孤峰 组泥页岩富含有机质,有机质成熟度适中,总体页岩 气静态评价条件好,是下扬子地区页岩气勘探的重 点目标<sup>[22-25]</sup>,其上下围岩均为巨厚的海相碳酸盐岩 地层。



## 图 1 南陵盆地 CR 法测点分布 Fig.1 Distribution map of measuring points by complex resistivity method in the Nanling Basin

在研究区内,南陵盆地南东缘大致以白垩系陆 相地层出露的南边界为界,盆地以南出露地层主要 为位于孤峰向斜内的下志留统、上泥盆统—下三叠 统海相地层。盆地深层的海相地层保存情况尚无钻 孔揭露,需开展工作探索其页岩气资源潜力。

南陵盆地南东侧的孤峰向斜内泾页1井首次在 下扬子皖南地区获得二叠系海陆过渡相页岩气发现<sup>[26]</sup>。邻近的港地1井在二叠系大隆组、龙潭组获 得了页岩气、煤层气、致密砂岩气和页岩油"三气一 油"发现<sup>[27]</sup>,但均未取得工业油气流。南陵盆地与 孤峰向斜相邻,海相地层沉积环境一致,页岩气评价 的静态地质条件如厚度、品质等相近,而盆地面积更 大且构造保存条件可能会更好<sup>[28]</sup>,是值得进一步开 展海相页岩气勘探工作的区域。

#### 2.2 富有机质页岩地层特征

本区孤峰向斜内地层出露情况较好。根据向斜 内昌桥实测剖面,大隆组富有机质泥页岩连续厚度 达 61.35 m,孤峰组连续厚度超过 30 m,中一上二叠 统泥页岩累计真厚度为 229.09 m。周边 WYD1 井揭 示中一上二叠统泥页岩视厚度为 226 m。以上数据 表明本区中—上二叠统大隆组、龙潭组和孤峰组的 富有机质页岩累计厚度大,页岩气勘探前景较好。 黄铁矿为本区海相富有机质页岩中的主要极化物质,区内露头、岩心的二叠系泥页岩中均富含黄铁矿。在昌桥剖面龙潭组中发育黄铁矿结核(图 2a), 宣城牛山剖面大隆组中可见晶型较好的黄铁矿体 (图 2b),WXY1井大隆组泥页岩的扫描电镜下可见 发育密集的草莓状黄铁矿(图 2c),粒间填充有机 质,孔隙发育。对WXY1井大隆组、孤峰组(共 30 个样品)的泥页岩(挑除肉眼可见黄铁矿体)进行全 岩X射线衍射分析,测试结果显示:大隆组页岩分 散型黄铁矿含量可达 9.4%,平均为 5.9%;孤峰组页 岩黄铁矿平均含量为 2.68%。



(a) 宣城泾县昌桥剖面龙潭组 露头黄铁矿结核

(b) 宣城牛山剖面大隆组 手标本黄铁矿

(c) WYD1井大隆组电镜观察 草莓状黄铁矿

## 图 2 皖南地区二叠系泥页岩中黄铁矿分布照片

#### Fig.2 Photos of pyrite distribution in Permian shale in southern Anhui Province

#### 2.3 研究区电性特征

根据位于孤峰向斜东侧的 WYD1 井电阻率测 井曲线(图3),目的层二叠系大隆组、龙潭组、孤峰 组的泥页岩视电阻率均低于 100 Ω · m。目的层上 下地层主要岩性均为高阻灰岩,上覆三叠系和龙山 组、殷坑组灰岩因含泥量相对较高、薄层发育,电阻 率比目标层约高1 个数量级,下伏栖霞组灰岩含泥 量低、层厚大,电阻率比目标层约高1~2 个数量级。 整体来看,二叠系大隆组、龙潭组、孤峰组泥页岩明 显低于上覆三叠系灰岩和下伏二叠系栖霞组灰岩。 电阻率测井结果很好地反映了泥页岩地层及其与围 岩电阻率的关系。

为了进一步研究岩石真电阻率,实测了本区露 头、岩心标本,地层电阻率统计结果见表1。

1) 第四系一白垩系(Q-K):岩性以砂砾岩、粉砂岩、泥质粉砂岩为主,标本平均电阻率为182.3

表1 研究区地层综合电性分层统计

地层	代号	主要岩性	标本数量	平均电阻率/( <b>Ω・</b> m)	电性分层	
白垩系	K	粉砂岩、砂砾岩	282	182	低阻层	
三叠系	Т	灰岩、泥灰岩	1 163	848	高阻层	
二叠系大隆组	$P_3d$	页岩	65			
二叠系龙潭组	D I	页岩、煤	95			
	$P_2 l$	细砂岩	214	132	低阻层	
二叠系孤峰组	Pag	页岩、泥岩	64			
	- 28	黑色含炭硅质岩	598			层 层 层
二叠系栖霞组	$\mathbf{P}_1 q$	灰岩	4 059	1790	音四目	
石炭系	С	灰岩、白云岩	2 538		同阻层	
泥盆系五峰组	$D_3w$	石英砂岩、细砂岩	875	450	中阻层	
士叼亥真安边组	S. a	含泥页岩、泥岩	65	134	低阳巨	
心田不同豕辺组	018	粉砂岩、泥岩、页岩	158	134	[以]出/云	

地层单位		生产性学	深度/ 视电阻率 / (Ω·m)						
系	组	石口油处	m	10 <sup>0</sup> :	10 <sup>1</sup> 1	$0^{2}$	$10^{3}$	$10^{4}$	105
第四系		松散层	0						
			100-		When				
白	赤	粉砂岩、含	200 -		- MA				
垩	Ш	砾砂岩、含 砂砾岩夹薄	300-		Y				
系	组	层砂岩	400-		hurr				
			500-		~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	τ			
			600-		5	-			
=	南陵湖组	上部白云岩 夹灰岩,下 灰岩部	700 -			Mr.	N	2	
_			800-			3			
叠	和龙山	灰岩夹薄层 钙质泥岩	900 -		N		-		
系	组		1000 -			3	_	_	
	殷坑组	灰岩、泥灰岩 和钙质泥岩互 层	1100 -			Munh	-		
	大隆组	碳质、硅质泥岩	1200 -		*				
二 叠	龙潭组	砂质泥岩、细 砂岩夹碳质泥 岩、薄煤层	1300 -		Mann				
系	孤峰组 栖霞组	硅质、碳质泥岩 中厚层灰岩	1400 -	V			-	-	2
			1500					_	$\leq$

## 图 3 WYD1 井电阻率测井曲线 Fig.3 Resistivity logging curve of Well WYD1

Ω・m,为低阻层。其地层厚度特征为盆缘较薄,盆
 地沉积中心较厚,据区域地质资料记载,最厚处可达
 2 km 以上。

 三叠系(T):岩性以灰岩为主,平均电阻率 为 848 Ω·m,为高阻层。其初始地层累计厚度大于 2 km,因在隆起期普遍遭遇剥蚀导致残留厚度变化 差异大。

3)中一上二叠统的孤峰组、龙潭组、大隆组 (P<sub>23</sub>):岩性以泥岩、页岩、碳质泥岩、硅质岩和硅质 碳质页岩、粉砂岩、细砂岩等为主,局部夹煤层,电阻 率值均较低,平均电阻率为132Ω・m,呈现低阻特 征,故属低阻层。其地层厚度累计约229m,在研究 区内厚度变化不大。

4) 石炭系—二叠系栖霞组(C—P<sub>1</sub>):以灰岩为 主,电阻率平均为1780Ω·m,属高阻层。其地层厚 度累计约300~500m,下部以巨厚的五通群砂岩和 高家边组砂泥岩为主,分别为中阻和低阻层。

总体来看,该区主要相关地层由下而上、由老至 新电性差异明显,由志留系至第四系,电阻率表现出 "低—高—低—高—低"的特征。 在南方海相泥页岩极化率研究方面,向葵等<sup>[29]</sup> 对上扬子川黔地区龙马溪组4块泥页岩样品进行了 测试,电阻率均值为150.4 Ω·m,黄铁矿含量均值 为2.9%,极化率平均值稳定在21.7%左右,表明黄 铁矿是南方海相泥页岩低阻和激电效应较强的主要 原因之一。本区二叠系大隆组的黄铁矿含量明显高 于上扬子龙马溪组,孤峰组黄铁矿含量与上扬子龙 马溪组相当。

上述地层组合出现物性差异的原因在于:碳酸 盐岩成分含量高时电阻率较高;碎屑岩地层因泥质 含量高使得电阻率相对较低;海相泥岩富含有机质 (碳质)以及陆相砂砾岩含水时电阻率都降低,二者 的区别在于极化率,因为富有机质泥岩中伴生黄铁 矿,极化率相对较高,而中生代红盆内碎屑岩基本不 含黄铁矿,极化率总体较低;在构造因素方面,断裂 带表现为高角度的低阻带。

以上岩性—电性规律结合区域地层、构造认识, 可作为本区地球物理解释的依据。

## 3 数据采集与工作量

本项研究的单条剖面长 20 km,于 2019 年 5~8 月完成野外数据采集,于 2019 年底前完成处理、解 释工作,根据解释结果,于 2020 年实施了皖南地 2 井钻探验证工作。

#### 3.1 测线布置

为对比盆地内外的勘探效果,测线横跨研究区 2个不同的构造单元,且测线右侧经过泾页1井 (图1)。研究区南东侧盆外基岩区地貌以丘陵和山 地为主,海拔40~200m;北西侧盆内覆盖区地貌以 平原为主,间有低矮丘陵,海拔20~30m。

#### 3.2 仪器设备

测量采用加拿大凤凰公司的大功率 V8 系列数 据采集系统。观测频带为 2<sup>8</sup>~2<sup>-6</sup> Hz,扫频步长为 2<sup>0.5</sup> Hz。采用 GPS 卫星同步(同步误差为±0.2 µs), 接收精度 0.005 mV,采集系统中各仪器在相隔数百 米内均可进行无线数据通讯。T200 发射机发射功 率达 200 kW,最大供电电流可达 150 A。

#### 3.3 观测系统

本次观测采用偶极—偶极装置形式。偶极—偶 极是 CR 法剖面测量最常采用的排列形式,此种装 置的特点是电磁耦合干扰较小(图 4)。

偶极—偶极排列的极距r计算公式为:

$$r = \left(N + \frac{k+1}{2}\right)a ,$$





式中:N为隔离系数;k为供电电极系数;供电电极 距AB=ka;a为偶极距。

要根据探测目标层的深浅、目标规模以及各测 量道上的讯号强度(不小于 0.01 mV)来选择偶极距 *a*、隔离系数 N 和供电电极系数 k。V8 接收机共有 多个测量道接收来自地下的信息,每一道对应一个 探测深度,共同构成一个窗口。探测深度 H 和窗口 深度范围 ΔH 分别为:

$$H_i = \frac{a}{2} \left( N_i + \frac{k+1}{2} \right) \quad .$$
$$\Delta H = H \quad -H \quad .$$

式中: $H_i$  表示第 i 道的探测深度; $N_i$  表示第 i 道的隔 离系数; $H_{max}$ 、 $H_{min}$ 分别为  $N_i$  取最大值、最小值时的 探测深度。

一般情况下,为获得较好的地质效果,应把探测 目标放在探测窗口的中部或中偏下部位。在同一条 剖面上,如果目标体深度变化不大,可以用一种窗口 深度来控制,若目标体埋深变化较大,则需要用多种 窗口深度来控制。本次 CR 法勘探根据研究区盆内 外不同地质特征设定了 2 种窗口深度:针对孤峰向 斜内相对浅层目标,设定点距 200 m,偶极距 200 m, 供电极距 400 m,15 道采集,隔离系数 N=1~15,勘 探窗口 250~1650 m;针对南陵盆地内较深目标,设 定点距 300 m,偶极距 300 m,供电极距 600 m 或 900 m,15 道采集,隔离系数 N=3~17,勘探窗口 450~ 2550 m。

4 资料处理及解释

#### 4.1 数据处理过程

将研究区野外采集的资料转录后,用 V8 配套 软件进行预处理,如果发现当天曲线有畸变,则第二 天重新野外采集;统计各测点、剖面及全区的观测质量;剔除不合格曲线<sup>[30]</sup>,然后开展谱曲线反演工作。 数据处理流程图如图5所示。



图 5 CR 法数据处理流程

#### Fig.5 Complex resistivity method data processing process

应用 Cole-Cole 模型拟合激电谱<sup>[21]</sup>,用 Brown 模型拟合电磁谱<sup>[31]</sup>,二者相乘为总谱的表达式<sup>[13]</sup>:

$$\rho_{s}(\omega) = \rho_{0}(1 - mF_{1})(1 - m_{2}F_{2} + j\omega\tau_{3}) ,$$

$$F_{1} = 1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau)^{c}} ,$$

$$F_{2} = 1 - \frac{1}{1 + j\omega\tau_{2}} \circ$$

式中: $\rho_s(\omega)$ 是既包括激电效应又包括电磁效应的 复视电阻率; $\rho_0$ 是角频率  $\omega$  趋于 0 时的直流电阻 率;m 为充电率;j 为单位复数; $\tau$  为时间常数;c 为频 率相关系数; $\rho_0(1-mF_1)$ 表示激电效应的 Cole-Cole 模型; $1-m_2F_2+j\omega\tau_3$ 表示电磁效应的 Brown 模型。

通过上述模型对实测频谱进行反演拟合,分离 电磁谱(SEM)和激电谱(SIP),求取相应的谱参数, 使用的数学计算方法是高斯—牛顿最小二乘法,目 标函数的迭代收敛精度为 1%。用求解出的谱参数 绘制各参数断面图。本次研究选取成图的谱参数主 要为近区场电磁电阻率 $\rho_{\omega}$ 和视充电率 $m_s$ ,编制出 综合谱参数的拟剖面图。反演软件采用 Phoenix Geophysics Limited 的 SFIPX-SW V2.0 软件系统,适 用于 V8 仪器系统以偶极—偶极剖面测深装置的反 演。

#### 4.2 剖面电性与地质特征

从电磁电阻率ρ<sub>ω</sub>反演结果(图 6)来看,将属于 盆外基岩区的孤峰向斜和南陵盆地内部相比,二者 反演特征有较大的差异,大致以分隔南陵盆地和孤 峰向斜的周王断裂(F<sub>2</sub>)为界,反演剖面上整体呈现 出电磁电阻率"北西低、南东高"的特征。周王断裂 本身为规模最显著的高角度低阻带。剖面线左端即 断层 F<sub>3</sub> 以北西的高阻部分与航磁资料中的强磁场 一致,该强磁场与盆地西侧的丫山推覆体强磁场区 连片并呈半岛状伸入盆地内,推测为受岩体扰动的 地层,与本次研究无关,故不予进一步解释。

对于测线右侧的孤峰向斜,根据"从已知到未 知"的原则,本次工作部署经过中国地质调查局油 气资源调查中心实施的泾页1井。该井于三叠系南 陵湖组开孔,钻遇三叠系南陵湖组、龙山组、殷坑组 和二叠系大隆组、龙潭组,井口处海拔100m,井深 1247.30m,钻遇大隆组和龙潭组泥页岩含气性较 好<sup>[26]</sup>。泾页1井周边反演电阻率曲线从上到下呈

"高—低—高"特征(图 7a)。埋深 450 m 以浅位于 探测窗口外,埋深 450~1 200 m 范围内电阻率大于 600 Ω·m,为高阻层,对应三叠系灰岩,其中于殷坑 组顶部位置附近电阻率达到最高值,往下降低,反映 了灰岩中随着泥质含量的增高电阻率减低。-1200 m 以深为低阻区,为本区勘探目标地层二叠系富有 机质泥页岩的反映:该低阻区总体为向斜形态,很好 地对应于地质图上的孤峰向斜<sup>[32-33]</sup>。285 点处推测 为向斜的轴部(见图 6a),核部地层为三叠系,三叠 系灰岩之下的低阻层总体厚度超过 200 m,与二叠 系中---上统泥页岩厚度相当。孤峰向斜左窄右宽, 右侧明显电阻率偏低且厚度偏大,结合地质图推测 为右翼存在复杂断块。泾页1井下方存在一高角度 低阻层带,结合实钻龙潭组地层倾角极大、近垂直产 状、地层破碎,推测为底部构造因素导致,可能发育 揉皱甚至断层。258~270点处存在一个正断层带 (F<sub>1</sub>),经实地踏勘,认为因测线走向与正断层走向 夹角较小,导致该正断层对测线影响较大。



图 6 CR 法反演电磁电阻率(a)、充电率(b)断面及地质解释



从充电率断面(图 7b)上看,孤峰向斜 m<sub>s</sub>>6% 的高极化率分布与低电磁电阻率分布一致,符合低 阻、高极化率异常组合特征(图 6b 中 1#区),且埋深 1 200 m 以深的高充电率范围与泾页 1 井全烃高值 区对应。此外,泾页 1 井左下部的高阻、高充电率异 常推测为岩体影响。测线北西侧南陵盆地总体从上 到下呈"上低—中高—下次低"三层电阻率结构,分 别对应上部的白垩系砂泥岩低阻层、中部的三叠系 灰岩高阻地层和下部的二叠系碎屑岩次低阻地层, 同时,剖面左侧 135~170 点处埋深约 2 100~2 300 m 存在一显著高 m<sub>s</sub> 值区(图 6b 中 2#区),与低阻区分 布基本一致。该低阻、高 m<sub>s</sub> 值异常相对孤峰向斜内 异常,幅度相对较弱,但需考虑有上覆巨厚低阻地层 屏蔽因素对异常幅值的压制因素。该异常分布范围



## 图 7 泾页 1 井周边反演电阻率剖面(a)及反演充电率剖面(b) Fig.7 Inversion characteristics of electromagnetic resistivity(a) and apparent charge rate(b) around well Jingye 1

大、产状平缓、顶板条件好、位于逆断层下盘,具有较好的保存条件,推测为页岩气有利区。此外,位于 F<sub>1</sub>和F<sub>2</sub>之间反演剖面底部存在大面积高m<sub>s</sub>区(图 6b中3#区),结合地层解释,推断为高家边组底部一五峰组富有机质泥页岩异常。

海相复杂构造区海相页岩气勘探对地球物理 勘探提出的要求,首先是寻找具有大面积的、保存 条件较好,特别是构造条件较好的富有机质泥页 岩<sup>[34-35]</sup>,此类区域可推断为有利的页岩气预测区。 在页岩气地质综合研究基础上<sup>[23]</sup>,以本次工作解 释结果为主要井位部署依据,以在泾页1井取得 页岩气发现的二叠系富有机质泥页岩为目标层 位,对盆地内有利预测区实施了地质调查井—— 皖南地2井。该井揭示:在1550m以浅为白垩系 地层,1550m钻遇到三叠系灰岩,至井底2011.52 m处层位为三叠系和龙山组灰岩,钻遇情况与物探 推测基本一致。该井因工程原因在三叠系灰岩地 层即提前终止。

皖南地2井为南陵盆地内第一口以海相页岩气 勘探为目标的钻井,揭露了上古生界海相页岩气地 层组合的上部地层,验证了 CR 法在巨厚红盆下探 测海相地层的有效性,在探索南陵盆地内二叠系页 岩气资源潜力工作中起到了先导作用。

## 5 问题与讨论

从测线反演结果与已有钻井、区域地质图对比 发现,反演剖面总体上很好地显示了地层、构造情 况,实现了页岩气有利区预测的基本目标,但仍存在 一些值得探讨的问题。

#### 5.1 盆内外探测效果对比

孤峰向斜内碳酸盐岩反演电阻率范围为 600 ~1400 Ω · m, 泥页岩反演电阻率中心低值约在 150 Ω · m, 二者接触面位于等值线变化梯度带。 泾页 1 井处钻遇地层、含气性显示和反演剖面基 本一致, 证实了 CR 法在基岩山区具有较高的分辨 率, 反演电阻率与地层真电阻率也一致。南陵盆 地内皖南地 2 井所揭示的碳酸盐岩地层 CR 法反 演电磁电阻率仅为 100 Ω · m,其与上部红盆的不 整合面位于反演电阻率增加的梯度带上,与富有 机质泥页岩的岩性分界面位于反演电阻率减少的 梯度带上, 说明上部巨厚的红盆低阻层整体拉低 了灰岩地层的反演电阻率。

但是,从上到下"低一高一低"电阻率特征依 然比较显著,符合物性特征研究中的红盆—三叠 系灰岩—二叠系富有机质页岩地层组合的总体变 化特征。皖南地2井证实了红盆底界位于由低值 向高值转换的梯度带位置,并可进一步推测更深 部的由高值向低值的梯度带位置即为富有机质页 岩地层。同时,反演充电率剖面则在对应深度对 富有机质泥页岩地层有指示性反应,增加了这一 推断的可靠程度。可见本次研究因盆地内外同步 采集采用2种不同的窗口造成了分辨率差异,有 待进一步加强定量反演、解释配套技术,为后期进 行精准井位部署、层位预测服务。

#### 5.2 关于周王断裂的认识

区域地质资料上认为周王断裂(F<sub>2</sub>)为南陵盆 地的南部边界断裂,同时也是分隔下扬子前陆带和 江南隆起带的大型断裂<sup>[33]</sup>,为一个大型、较宽的构 造角砾岩带,可能为一条隐伏的壳深断裂<sup>[36]</sup>。

n

500

m/ 1000

1500

本次工作中对分割南陵盆地和孤峰向斜的区域 主要隐伏断裂周王断裂(F<sub>2</sub>)有较好的反映,揭示了 周王断裂两侧断距极大,两侧海相地层存在巨大的 剥蚀差异,其深部断裂带影响宽度约为1km,断层 主倾向为NW向。这一认识可以深化本区区域地质 研究中对周王断裂的深部研究。

#### 5.3 CR 法的独特性

南方海相地区,特别是下扬子地区,常发育低 角度滑脱断层,导致勘探主要目标泥页岩地层缺 失,这种情况在地震剖面上常常因滑脱层为低频 强振幅反射而被误判为泥页岩地层的反射,此外, 在地层组合方面,同为碎屑岩沉积的含水砂砾岩 地层为低阻且呈层状分布。以上2种情况常常给 地震、MT、CSMT、广域电磁法等普遍运用于油气、 页岩气勘探的地球物理方法解释带来多解性,为 油气、页岩气井部署带来了非常大的风险。而基 于富有机质泥页岩中极化物质的极化率异常探 测,可以降低以上地球物理资料的多解性乃至直 接用于判断页岩气藏。CR 法是解决以上多解问 题的有效地球物理勘探手段,为降低井位部署风 险提供了可选的地球物理方法。

#### 6 结论

1) 在安徽南陵盆地周边地区开展二叠系页岩 气 CR 法探测研究,揭示了研究区二叠系海相富有 机质泥页岩碳质含量高、富含黄铁矿颗粒,具有明显 的"低电阻率、高极化率"特征,可以有效与其围岩 区分,有利于采用 CR 法进行勘探。

2) 探索了安徽南陵地区不同覆盖条件下的 CR 法采集、处理和综合解释方法,发现红盆下海相地层 反演电磁电阻率和视充电率与出露区相比均整体降 低,但其变化规律一致,仍可以识别有效异常。总体 而言,CR 法探测深度大、空间分辨率高,可以获取复 杂构造区富有机质泥页岩分布范围、埋深,且其激发 极化参数直接和页岩气藏关联,是电磁法勘探中唯 一能直接指示页岩气藏的方法。

3)根据本次研究结果,实施了南陵盆地内第一口以探索盆下海相页岩气为目标的地质调查井皖南地2井,首次揭露了南陵盆地红盆下存在对海相页岩气勘探有利的地层组合,为该区二叠系页岩气资源评价和页岩气井位部署提供了重要依据,也进一步为我国南方海相地区页岩气地球物理勘探提供了参考。

#### 参考文献(References):

- [1] 滕龙,徐振宇,黄正清,等.页岩气勘探中的地球物理方法综述及展望[J].资源调查与环境,2014,35(1):61-66.
  Teng L, Xu Z Y, Huang Z Q, et al. Summary and prospect of geophysical methods for the shale gas exploration [J]. Resources Survey and Environment, 2014, 35(1):61-66.
- [2] 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 J S, Li D Q, Dai S K. Shale gas detection with wide field electromagnetic method in North-western Hunan [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(5): 1006-1012.
- Yang X L, Li B, Peng C S, et al. Application of a wide-field electromagnetic method to shale gas exploration in South China [J].
   Applied Geophysics: Bulletin of Chinese Geophysical Society, 2017, 14(3): 441 448.
- [4] 孟凡洋,包书景,陈科,等.基于广域电磁法的页岩气有利区预测——以渝东北巫山地区为例[J].物探与化探,2018,42(1): 68-74.

Meng F Y, Bao S J, Chen K, et al. The prediction of shale gas favorable area based on wide area electromagnetic method: A case study of Wushan area in northeast Chongqing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(1): 68 – 74.

- [5] 何继善.广域电磁法理论及应用研究的新进展[J].物探与化 探,2020,44(5):985-990.
   He J S. New research progress in theory and application of wide field electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical
- Exploration, 2020, 44(5): 985-990.
  [6] 李帝铨,汪振兴,胡艳芳,等.广域电磁法在武陵山区页岩气勘 探中的探索应用——以黔北桐梓地区为例[J].物探与化探, 2020,44(5):991-998.

Li D Q, Wang Z X, Hu Y F, et al. The application of wide field electromagnetic method to shale gas exploration in Wuling Mountain area: A case study of Tongzi area in northern Guizhou [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 991 – 998.

[7] 傅良魁.复电阻率法异常的频谱及空间分布规律[J].地质与勘 探,1981,15(2):48-55.

Fu L K. Spectrum and spatial distribution pattern of anomalies of the complex resistivity method [J]. Geology and Exploration, 1981, 15(2): 48-55.

- [8] 罗延钟,吴之训.谱激电法中频率相关系数的应用[J].地球物 理学报,1992,35(4):490-500.
  Luo Y Z, Wu Z X. The application of frequency dependent factor in spectral induced polarization method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1992, 35(4): 490-500.
- [9] 李汝传,王书民,雷达.复电阻率法和 CSAMT 法在土屋铜矿区 的勘查效果[J].地质与勘探,2004,38(s1):32-36.
  Li R C, Wang S M, Lei D. The results of complex resistivity (CR) and controlled source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT) survey in Tuwu copper mining area [J]. Geology and Exploration, 2004, 38(s1): 32-36.
- [10] 张焱孙,张虎生,邢应太,等.江西北武夷某多金属矿区复电阻 率法勘查效果[J].物探与化探,2010,34(5):587-589.

Zhang Y S, Zhang H S, Xing Y T, et al. The effect of applying complex resistivity method to the exploration of a certain polymetallic deposit in Wuyi northern Jiangxi Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(5): 587 – 589.

- [11] 徐自生,张丽,唐伟,等.复电阻率法(CR)在内蒙古那吉河铅锌 矿探测中的应用[J].矿产勘查,2015,6(2):165-170.
  Xu Z S, Zhang L, Tang W, et al. Application of complex resistivity method (CR) in prospecting lead-zinc deposit in Inner Mongolia [J]. Mineral Exploration, 2015, 6(2): 165-170.
- [12] 许传建,徐自生,杨自成,等.复电阻率(CR)法探测油气藏的应用效果[J].石油地球物理勘探,2004,39(S):31-35.
  Xu C J, Xu Z S, Yang Z C, et al. Application of the complex resistivity (CR) method to detect oil and gas reservoirs [J]. Oil Geo physical Prospecting, 2004, 39(S): 31-35.
- [13] 苏朱刘,吴信全,胡文宝,等.复视电阻率(CR)法在油气预测中的应用[J].石油地球物理勘探,2005,40(4):467-471.
  Su Z L, Wu X Q, Hu W B, et al. Application of complex apparent resistivity (CR) method in prediction of oil/gas [J]. Oil Geophy sical Prospecting, 2005, 40(4): 467-471.
- [14] 苏朱刘,胡文宝,颜泽江,等.油气藏上方激电谱的野外观测试 验结果及分析[J].石油天然气学报,2009,31(6):59-64.
  Su Z L, Hu W B, Yan Z J, et al. Field test result and analysis on induced-polarization spectrum of oil-gas reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(6): 59-64.
- [15] 赵迪斐,郭英海,朱炎铭,等.龙马溪组页岩气复电阻率勘探的 理论依据[J].非常规油气,2016,3(3):15-20.
  Zhao D F, Guo Y H, Zhu Y M, et al. The theoretical basis of shale gas exploration with complex resistivity in Longmaxi formation [J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(3): 15-20.
- [16] 雷闯.复电阻率法在涪陵地区页岩气勘探中的试验[C]// 中 国石油学会 2015 年物探技术研讨会论文集,2015.
  Lei C. Experimentation of the complex resistivity method in shale gas exploration in the Fuling area [C]// Proceedings of the 2015 Geophysical Exploration Technology Symposium of the Chinese Petroleum Society, 2015.
- [17] 刘东鹰,苏皖下扬子区中古生界油气勘探方向[J].石油天然气 学报,2003,25(s2):46-47.
   Liu D Y. Target of Meso-Paleozoic hydrocarbon exploration in Jian-

gsu-Anhui Lower Yangtze region [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25(s2): 46-47.

- [18] 赵牧华,石刚,张安徽,等.安徽皖江地区页岩气地质调查地震勘探数据采集技术研究[J].华东地质,2017,38(3):203-209.
  Zhao M H, Shi G, Zhang A H, et al. Acquisition technology study of shale gas seismic prospecting data in the Wanjiang region, Anhui Province [J]. East China Geology, 2017, 38(3): 203-209.
- [19] 宋桂桥,杨振升,薛野.中石化下扬子地区油气地震勘探攻关进 展及方向[J].石油物探,2019,58(2):303-312.
  Song G Q, Yang Z S, Xue Y. Progress and direction of seismic exploration in the SINOPEC Lower Yangtze area, China [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(2): 153-162.
- [20] 殷启春,郑红军,蒲可瑜,等.安徽巢湖—含山地区页岩气二维 地震勘探研究[J].安徽地质,2019,29(1):49-54.
   Yin Q C, Zheng H J, Pu K Y, et al. Two-dimensional seismic ex-

ploration of shale gas in the Chaohu-Hanshan area, Anhui Province [J]. Geology of Anhui, 2019, 29(1): 49-54.

- [21] 刘崧.谱激电法[M].武汉:中国地质大学出版社,1998. Liu S. SIP method [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1998.
- [22] 潘磊,陈桂华,徐强,等.下扬子地区二叠系富有机质泥页岩孔 隙结构特征[J].煤炭学报,2013,38(5):787-793.
  Pan L, Chen G H, Xu Q, et al. Pore structure characteristics of Permian organic-rich shale in Lower Yangtze area [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 787-793.
- [23] 郑红军,殷启春,滕龙,等.下扬子地区古生界页岩气基础地质 调查[R].中国地质调查局南京地质调查中心,2018.
  Zheng H J, Yin Q C, Teng L, et al. Fundamental Geological Investigation of Paleozoic Shale Gas in the Lower Yangzi Region [R]. Nanjing Center, China Geological Survey, 2018.
- [24] 赵志义,王帅,刘昊,等.基于模糊综合评价法优选安徽省页岩
   气潜力区[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(18):155
   -156.

Zhao Z Y, Wang S, Liu H, et al. Fuzzy integrated evaluation method for the selection of shale gas potential areas in Anhui Province [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(18): 155 – 156.

[25] 徐菲菲,张训华,黄正清,等.下扬子地区宁国凹陷大隆组--孤峰 组泥页岩储层特征[J].成都理工大学学报:自然科学版,2019, 46(2):54-64.

Xu F F, Zhang X H, Huang Z Q, et al. Characteristics of the Dalong and Gufeng Formation shale reservoirs in Ningguo depression, Lower Yangtze Region, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology:Science & Technology Edition, 2019, 46(2): 54 – 64.

- [26] 宋腾,林拓,陈科,等.下扬子皖南地区上二叠统(泾页1井)发现海陆过渡相页岩气[J].中国地质,2017,44(3):606-607.
  Song T, Lin T, Chen K, et al. The discovery of shale gas in Upper Permian transitional facies at Jinye-1 well in Lower Yangtze region
  [J]. Geology in China, 2017,44(3): 606-607.
- [27] 石刚,滕龙,王佳龙,等.下扬子地区二叠系"三气一油"钻探发现[J].中国地质,2018,45(2):416-417.
  Shi G, Teng L, Wang J L, et al. Drilling discovery of "Three Gas One Oil" in the Permian strata of Lower Yangtze area [J]. Geology in China, 2018, 45(2): 416-417.
- [28] 王俊涛,徐锦龙,沈仕豪.安徽无为—南陵—宣城地区基础地质 调查与综合编图(2019 年度)[R].安徽省地质调查院,2019.
  Wang J T, Xu J L, Sheng S H. Fundamental Geological Survey and Integrated Mapping in Wuwei-Nanling-Xuancheng area, Anhui Province (2019) [R]. Geological Survey of Anhui Province, 2019.
- [29] 向葵,胡文宝,严良俊,等.川黔地区页岩复电阻率的频散特性
  [J].石油地球物理勘探,2014,49(5):1013-1019.
  Xiang K, Hu W B, Yan L J, et al. Complex resistivity dispersion characteristics of shale samples in Sichuan and Guizhou area [J].
  Oil Geophysical Prospection, 2014, 49(5): 1013-1019.
- [30] 张丽,吴凯,王秋璇,等.复电阻率(CR)法在江苏某地金属矿上的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2017,37(16):90-

91.

3期

Zhang L, Wu K, Wang Q X, et al. Application of the complex resistivity (CR) method on a metal mine in Jiangsu Province [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37 (16): 90–91.

- [31] Brown R J. EM coupling in multifrequency IP and a generalization of the Cole-Cole impedance model [J]. Geophysical Prospecting, 1985, 33(2): 282-302.
- [32] 安徽省地质局区域地质调查队.中华人民共和国区域地质调查 报告宣城幅广德幅(1:20万)[R].安徽省地质局区域地质调 查队,1974.

Anhui Provincial Geological Bureau Regional Geological Survey Team. Report of the regional geological survey of the People's Republic of China, Xuancheng Section & Guangde Section (1:200 000) [R]. Anhui Provincial Geological Bureau Regional Geological Survey Team, 1974.

[33] 杜建国,许卫,孙乘云.中华人民共和国区域地质调查报告安庆 市幅(1:25万)[R].安徽省地质调查院,2005.

Du J G, Xu W, Sun C Y. Report of the regional geological survey of the People's Republic of China, Anqing Section[R]. Geological Survey of Anhui Province, 2005.

 [34] 郭旭升.南方海相页岩气"二元富集"规律——四川盆地及周 缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J].地质学报,2014,88(7):
 1209-1218.

Guo X S. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China; Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209–1218.

- [35] 翟刚毅,王玉芳,包书景,等.我国南方海相页岩气富集高产主 控因素及前景预测[J].地球科学,2017,42(7):1057-1068.
  Zhai G Y, Wang Y F, Bao S J, et al. Major factors controlling the accumulation and high productivity of marine shale gas and prospect forecast in southern China [J]. Earth Science, 2017, 42 (7): 1057-1068.
- [36] 王钢金.从重磁场特征探讨江南断裂和周王断裂的性质[J].安 徽地质,1993,3(1):71-76.

Wang G J. Study on properties of the Jiangnan and Zhouwang Faults through characteristic analysis of their gravity and magnetic fields [J]. Geology of Anhui, 1993, 3(1): 71-76.

# Application of complex resistivity method to the exploration of marine shale gas in the Nanling Basin, Anhui Province

YIN Qi-Chun<sup>1,2</sup>, WANG Yuan-Jun<sup>1</sup>, ZHOU Dao-Rong<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>3</sup>, SUN Tong<sup>2</sup>

 Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China; 2. Harbin Comprehensive Survey Center of Natural Resources, China Geological Survey, Harbin 150081, China; 3 Geological Exploration Technology Institute of Anhui Province, Hefei 230041, China)

Abstract: The main part of the Nanling Basin in Anhui Province is a red Mesozoic continental basin, under which the distribution of marine strata is still undetermined and the potential of shale gas resources is unidentified. Based on the physical property characteristics that the Permian organic-rich shale reservoirs around the study area contain pyrite, this study carried out a geological survey of shale gas using the complex resistivity method. Specifically, this study designed an observation system suitable for the different geological characteristics inside and outside the basin, conducted fitting and inversion using Cole-Brown and Cole-Cole models, and plotted maps of near-field parameters electromagnetic resistivity and apparent charging rate. The results show that: (1) The Permian organic-rich shale contains high carbonaceous content and rich pyrite particles and has distinct characteristics of low resistivity and high polarizability. Therefore, it can be effectively distinguished from its surrounding rocks, which is favorable for the shale gas exploration using the complex resistivity method; (2) Polarizability is an effective parameter that can be used to identify deep organic-rich shale strata and even shale gas reservoirs; (3) Drilling tests were carried out based on the exploration results obtained using the complex resistivity method, successfully discovering the Triassic carbonate strata and predicting that below the red basin in the Nanling Basin is the favorable area of Permian shale gas reservoirs. This study demonstrates that the complex resistivity method can detect pyrite-bearing shale strata with a depth of greater than 2,000 m and a cumulative thickness of about 200 m in the Nanling Basin and is the only method that can directly indicate shale gas reservoirs in electromagnetic exploration. Therefore, the complex resistivity method can be applied to the geophysical prospecting of the marine shale gas in the Nanling Basin with complex geological conditions and even Southern China. The results of this exploration also provide a basis for the further exploration of the marine shale gas in the Nanling Basin.

Key words: complex resistivity method; Nanling Basin; marine shale in South China; organic-rich shale; shale gas geophysical prospecting