

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2020.01.010

引用格式:王佳龙,张宝松,陈基炜,等. 大地电磁测深不同反演方法的应用效果对比——以安徽皖江地区页岩气调查为例[J]. 华东地质,2020,41(1):79-87.

# 大地电磁测深不同反演方法的应用效果对比 ——以安徽皖江地区页岩气调查为例

王佳龙,张宝松,陈基炜,石 刚

(中国地质调查局南京地质调查中心,南京 210016)

**摘要:**在安徽皖江地区页岩气地质调查中,开展了大地电磁测深(magnetotelluric sounding, MT)剖面研究,通过对比4种不同反演方法和不同极化模式的反演结果,分析各方法的优缺点。4种反演方法各有特点,不同极化模式也具有不同的反演效果。地质与钻孔资料表明,二维带地形共轭梯度反演TM极化模式的电性特征清晰,迭代收敛效果最佳,与地质资料吻合较好,可成功识别二叠纪泥页岩低阻异常。初步推断皖江地区断裂空间展布特征及页岩气目标层分布,可为其他类似地区大地电磁测深勘探反演方法的选取提供参考。

**关键词:**页岩气调查;大地电磁测深;反演效果;二叠系;安徽皖江地区

**中图分类号:**P618.13;P631.3<sup>+</sup>25

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-1871(2020)01-079-09

安徽皖江地区是近年来下扬子页岩气基础地质调查的主要区域,泾县—水东地区二叠纪孤峰组、大隆组 and 龙潭组黑色泥页岩是页岩气调查的主要目标层系,其中龙潭组泥页岩埋深500~2 500 m,主体埋深1 000~2 500 m,具有较好的页岩气存储条件<sup>[1-3]</sup>。前人曾在泾县—水东地区开展重力和高精度磁法勘探工作<sup>[4]</sup>,但传统的重磁勘探很难识别深部页岩油气异常区。页岩油气储藏受构造、地层、岩性等因素控制,受起伏状层面、构造面及其他因素干扰,很难直接获取微弱的页岩油气重磁异常信息。大地电磁测深(magnetotelluric sounding, MT)可穿透地表高阻层的屏蔽,具有勘探深度大、地形影响小、分辨率高、对低阻层及低阻体反应灵敏等优点,是深部页岩油气勘探的重要方法之一<sup>[5-9]</sup>。

以“安徽皖江地区1:5万页岩气地质调查”项目为依托,为进一步深化对安徽皖江地区深部地质构造的认识,查明二叠系目标层系埋深情况,中国地质调查局南京地质调查中心在安徽皖江地区布置

了9条MT测线,共400个测点。本文以安徽宣城水东地区1条MT测线为研究对象,通过对比分析不同反演方法、不同极化模式的反演结果,总结了各反演方法的优缺点,结合电性、钻井资料选取最优的反演方法,推测断裂和页岩气目标层分布情况,并进行综合地质解释。

## 1 地质概况

研究区位于安徽省宣城市水东地区,该区出露的地层由老至新依次为志留纪唐家坞组,泥盆纪五通组,石炭纪王胡村组,二叠纪栖霞组、孤峰组、龙潭组、大隆组,三叠纪殷坑组,白垩纪赤山组和第四系(图1)。二叠纪大隆组、龙潭组、孤峰组页岩是本次地质调查的主要目标层,具备页岩气储藏的地质条件,是较好的生烃层。区内主要褶皱为王胡村向斜和水东向斜,二者均形成于印支期。控制该区构造格架的是周王断裂、江南断裂和旌德—休宁西断裂<sup>[10-11]</sup>。

\* 收稿日期:2018-11-08 修订日期:2019-04-04 责任编辑:谭桂丽

**基金项目:**中国地质调查局“下扬子地区古生界页岩气基础地质调查(编号:DD20160180)”和“安徽皖江地区1:5万页岩气地质调查(编号:12120115100801)”项目联合资助。

**第一作者简介:**王佳龙,1991年生,男,助理工程师,主要从事物探专业电磁法的应用研究工作。



1.第四系;2.中白垩世赤山组;3.早三叠世殷坑组;4.晚二叠世大隆组;5.中二叠世栖霞组;6.晚泥盆世老虎洞组、晚石炭世黄龙组、早二叠世船山组互层;7.早石炭世王胡村组;8.晚泥盆世五通组;9.中志留世唐家坞组;10. MT 测点及编号;11. MT 测线 LAB;12. 实测断层;13. 钻井;14. 花岗闪长斑岩;15. 河流

图1 安徽宣城水东地区地质简图<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Geological sketch of Shuidong area of Xuancheng City, Anhui Province<sup>[11]</sup>

## 2 电性特征

研究区地层电性特征见表1和表2。大隆组和龙潭组以泥岩、泥页岩为主,夹砂岩、碳质页岩及煤

层,视电阻率( $\rho_s$ )为66.83~3 639.94  $\Omega \cdot m$ ,港地1井 $\rho_s$ 为57.34~203.70  $\Omega \cdot m$ ;早三叠世殷坑组以灰岩和泥质灰岩为主, $\rho_s$ 为228.99~2 213.05  $\Omega \cdot m$ ;晚石炭世黄龙组以灰岩为主, $\rho_s$ 为1 039.70~

表1 宣城地区岩石电性参数统计<sup>[12]</sup>

Table 1 Statistical results of petroelectric parameters of rocks in the Xuancheng area<sup>[12]</sup>

地层	岩性	视电阻率 $\rho_s / (\Omega \cdot m)$	
		变化范围	平均值
早三叠世殷坑组	灰色薄层泥灰岩	228.99~2 213.05	938.07
晚二叠世大隆组	灰色泥灰岩	333.65~3 639.94	916.89
中二叠世龙潭组	灰黄色中厚层细砂岩	66.83~634.64	214.83
早二叠世孤峰组	黑色含碳硅质岩	252.94~1 215.31	598.12
晚石炭世黄龙组	灰白色块状细晶白云岩	1 039.70~5 120.40	1 761.00
晚泥盆世观山组—老虎洞组	黄白色石英砂岩	815.31~6 330.03	2 353.78
晚志留世茅山组	灰白色块状泥质粉砂岩	26.40~167.76	88.34
中志留世坟头组	灰绿色粉砂岩	119.28~1 060.65	321.84
中志留世康山组	泥岩、细砂岩	99.40~826.59	274.58
早志留世河沥溪组	黄绿色中层细砂岩	49.09~153.35	78.82
早志留世高家边组	灰绿色页岩、含泥页岩	28.93~525.52	160.60

5 120.40  $\Omega\cdot\text{m}$ 。目标层位与上下地层具有明显的电阻率差异,为低阻异常。

表 2 港地 1 井含页岩气层视电阻率测试结果<sup>[12]</sup>

Table 2 The apparent resistivity logging results of Well 1 shale gas layer in Gangkou Town<sup>[12]</sup>

地层	井段/m	厚度/ m	深侧向 视电阻率/ ( $\Omega\cdot\text{m}$ )	浅侧向 视电阻率/ ( $\Omega\cdot\text{m}$ )
大隆组	915.2~944.7	29.5	57.34	66.57
大隆组	970.2~986.9	16.7	165.52	203.70
龙潭组	1 111.0~1 129.3	18.3	170.23	153.20
龙潭组	1 168.3~1 189.7	21.4	87.62	78.34
孤峰组	1 214.7~1 228.2	13.5	117.48	132.92

### 3 资料与反演数据处理

大地电磁测深(MT)测量采用加拿大 V5-2000 型大地电磁仪,单点观测 7 h 以上,有效观测频率为 320~0.001 Hz,有效探测深度 $>5\text{ km}$ 。在水东地区布设了 1 条 MT 测线 LAB,方向为 NE 向,长约 16.2 km,点距 500 m,有效测点 32 个(图 1)。

大地电磁测量原始数据使用 SSMT2000 和 MTeditor 进行数据预处理、编辑,生成反演格式点文件(edi)。利用 MTPioneer 软件进行反演,MT

数据处理步骤主要包括异常数据剔除、圆滑、静校正、一维反演、网格建立和二维反演。

浅层电性不均匀或三维状态高频反应强烈造成静位移现象严重,使 MT 视电阻率曲线高频端发生移动,静位移严重的测点与相邻测点高频端视电阻率相差 10 倍甚至更高。因此,需要根据剖面视电阻率变化趋势和前后视电阻率曲线类型进行手工校正。根据实际情况,采用手工圆滑和数值处理相结合的方法实现数据圆滑。反演数据处理主要采用一维博斯蒂克(Bostick)反演、奥克姆(Occam)反演和自适应正则化反演,二维反演采用带地形非线性共轭梯度(non-linear conjugate gradient, NLCG)反演。

#### 3.1 博斯蒂克(Bostick)反演

Bostick 反演是一种代表性的近似反演方法,以低频区视电阻率曲线尾支渐近线变化特征为基础进行运算,实质是将视电阻率随周期变化的曲线转换成电阻率随深度变化的曲线。Bostick 反演速度快,可现场实时处理,快速查看测线及测点视电阻率分布情况<sup>[13-14]</sup>。利用 MTPioneer 软件获得的研究区 LAB 测线 Bostick 反演结果(图 2)表明,“挂面”特征明显,分辨率低,无法划分或不能准确划分电性层,难以满足实际需要。

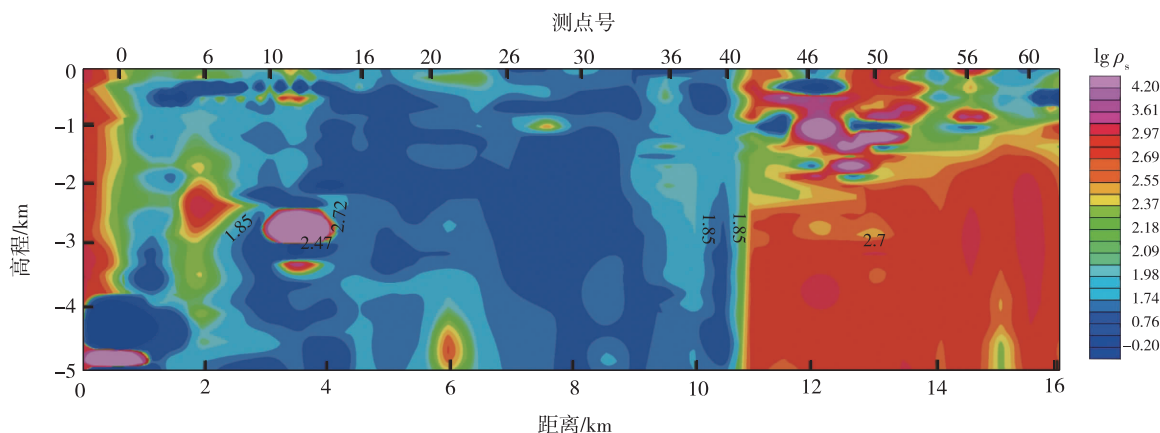


图 2 LAB 测线一维 Bostick 反演视电阻率断面图

Fig. 2 One-dimensional Bostick inversion resistivity section of LAB exploration line

#### 3.2 奥克姆(Occam)反演

Occam 反演是一种正则化光滑模型反演方法,在寻找最小拟合差的同时追求最光滑模型,以稳定收敛及不依赖于初始模型等优势获得广泛应用。Occam 反演迭代过程稳定,一般只需几次迭代即可

获得较理想的反演结果<sup>[14-15]</sup>。利用 MTPioneer 软件获得的 LAB 测线一维 Occam 反演结果如图 3 所示,反演剖面横向分辨率较好,电性分层较明显,但也存在一些难以解释的垂向异常,对页岩气目标层位识别不利。

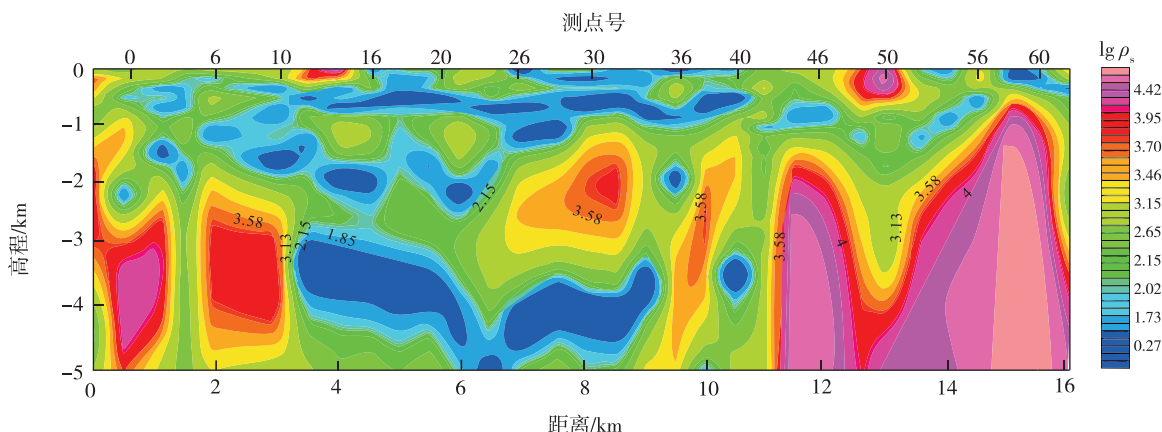


图3 LAB测线一维 Occam 反演视电阻率剖面图

Fig. 3 One-dimensional Occam inversion resistivity section of LAB exploration line

### 3.3 自适应正则化反演

自适应正则化反演是陈小斌等<sup>[16]</sup>提出的一种反演算法,该算法对初始模型要求较低,可直接对瞬变电磁响应数据进行反演,快速获得地下地质体电性结构特征。反演计算中,正则化因子 $\lambda$ 是主要的拟合对象, $\lambda$ 的不同取值对反演结果具有重要影响,常规反演方法中 $\lambda$ 大多数选择经验值。通过迭代选取数据拟合函数与模型约束函数的比值获得自适应正则化

因子 $\lambda$ ,是完全自适应。该方法优点是每次迭代的正则化因子均可调节数据拟合和模型约束的平衡,具有较高的精度和稳定性。利用 MTPioneer 软件获得的 LAB 测线一维自适应正则化反演结果如图 4 所示,反演剖面横、纵向分辨率较高,电性分层现象明显。相对于一维 Bostick 反演和 Occam 反演,自适应正则化反演横、纵向电性分层细节更清楚,反演剖面更光滑,但仍存在“挂面”现象。

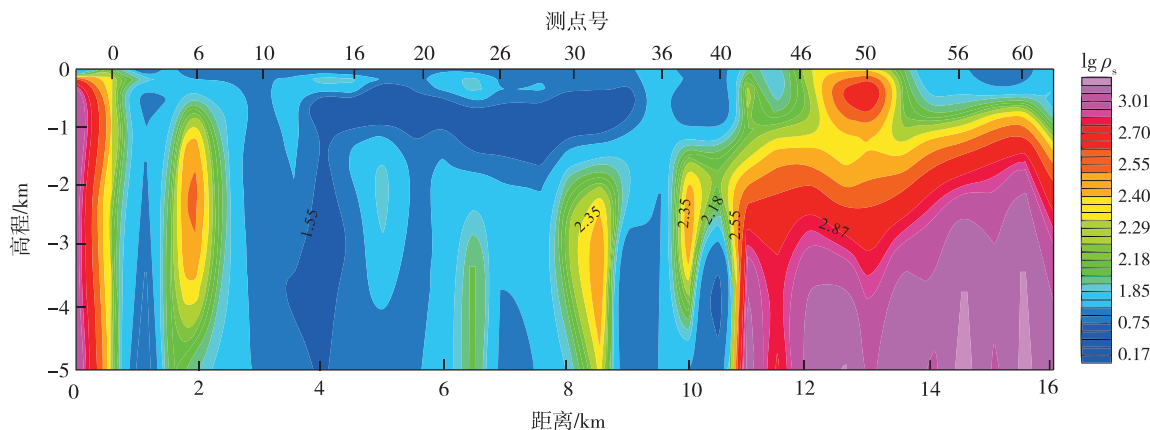


图4 LAB测线一维自适应正则化反演视电阻率剖面图

Fig. 4 One-dimensional adaptive regularization inversion of apparent resistivity profile for LAB exploration line

### 3.4 非线性共轭梯度(NLCG)反演

非线性共轭梯度(NLCG)反演根据已知先验信息设置一个新的模型目标函数,给予一定的权重系数和约束矩阵后与目标函数结合,再创建一个新的目标函数,最后依据实际模型需要设置初始模型背景值及约束类型,通过迭代完成非线性

反演。NLCG 反演具有计算效率高、稳定性好和内存需求不高等优点,已广泛应用于电磁法勘探中。但目标函数具有多极值,反演迭代易陷入局部极小,所以,NLCG 反演的缺点是对初始模型依赖性较大<sup>[17-19]</sup>。利用 MTPioneer 软件获得的 LAB 测线以一维自适应正则化反演为初始模型

的二维带地形 NLCG 反演结果如图 5 所示,TE、TM 和混合极化模式下的反演剖面均较光滑,连续性良好,横、纵向分辨率高,电性层清楚,“挂面”

现象消失,冗余构造少。相对于一维反演及二维非线性共轭梯度反演,可更真实、更有效地反应实际地电模型。

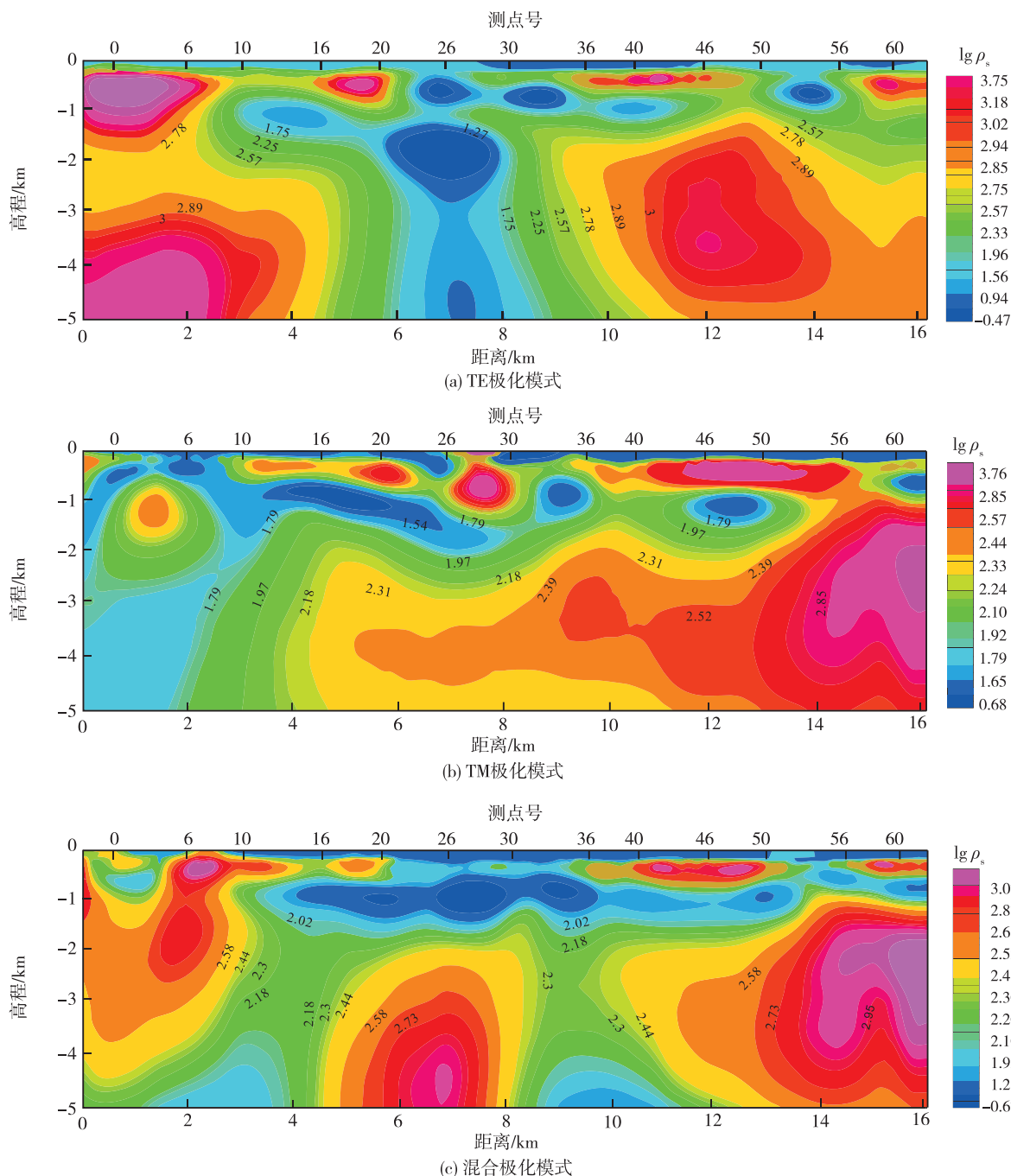


图 5 LAB 勘探线不同极化模式下的二维反演剖面图

Fig. 5 Two-dimensional inversion profiles of LAB exploration line under different polarization modes

#### 4 几种反演结果对比

(1)从反演速度看,一维 Bostick 反演、Occam 反演和自适应正则化反演时长约 1 min,二维带地

形 NLCG 反演 TE、TM 及混合极化模式均需几十分钟。相比而言,TE 极化模式时长最短,混合极化模式时长次之,TM 极化模式时长最长。

(2)从反演剖面看,一维 Bostick 反演呈现的整



体视电阻率值杂乱无章,“挂面”现象严重,横向分辨率低,无明显的电性分层效果。一维 Occam 反演整体视电阻率值高低分布不均,纵向视电阻率深部两侧高中间低,“挂面”现象不再显著,横向分辨率较高,电性分层较清晰,可初步判断剖面电性分层情况。一维自适应正则化反演视电阻率值高低分布不均,纵向视电阻率大号点呈现高阻区,“挂面”现象仍存在,但横向分辨率较高,电性分层清晰,可清楚判断测线中段低阻异常特征。TE、TM 和混合极化模式下的二维带地形 NLCG 反演剖面,横、纵向分辨率高,电性层连续性好,“挂面”现象消失,电性分层效果好,可清晰判断剖面的电性分层情况。

(3)一维 Bostick 反演、Occam 反演和自适应正则化反演中段深部均为超低阻,与研究区地质资料存在偏差。二维反演 TE 极化模式,剖面中段出现直立的低阻带,一直延伸至基底,与泥盆系—石炭系(灰岩)、志留系(石英砂岩)等高电阻岩性不符。TM 极化模式可清晰判断剖面呈低阻层—高阻层—低阻层—次高阻层—高阻层,岩性的电性特征与电性参数对应。混合极化模式可清晰判断剖面的电性分层情况,但在反演图前段由浅至深均表现高电阻特征。二叠纪泥页岩低阻层未能较好显示,中段基底出现了超低阻带,与研究区地质资料存在偏差。MTPioneer 软件下 TE 极化模式迭代 25 次,收敛闭合差最大,迭代收敛较差;TM 极化模式迭代 44 次,闭合差最小,迭代收敛优良;混合极化模式迭代 46 次,迭代收敛一般(图 6)。

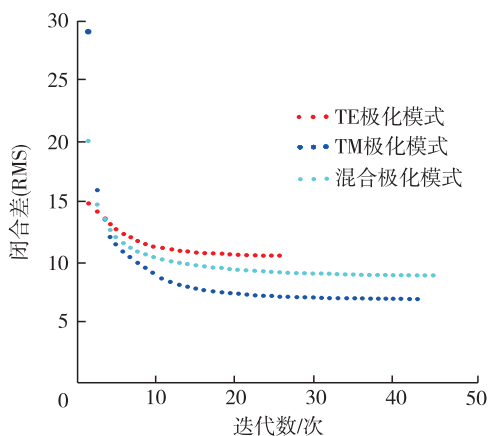


图 6 TE、TM 及混合极化模式收敛对比图

Fig. 6 Convergence comparison chart of TE, TM and mixing polarization modes

综合分析认为, TM 极化模式的反演结果优于 TE 和混合极化模式,原因可能是研究区地下结构三维性较强,而 TE 极化模式要求模型的二维近似程度远高于 TM 极化模式,因此 TM 极化模式数据能更好地反映与二维区域构造走向近平行的三维异常体。所以, TM 极化模式的反演结果更适合研究区的地质解释。

## 5 综合地质解释与验证

由于研究区构造复杂,断裂及褶皱发育,断裂破碎带引起地层的电阻率降低,电性层的横向连续性不佳,不能完全根据电阻率追层解释。为保证解释结果的准确性,结合研究区地质钻井资料进行地层厚度统计,再结合地质资料进行解释。以研究区电性层模型为基础,以大地电磁法二维反演电阻率反映的电性层分布为主要依据,对研究区大地电磁测深剖面(测点号:2~62)进行综合地质解释(图 7)。

### 5.1 断裂

电磁法二维反演电阻率剖面、电性结构及同测线地震资料说明,研究区存在多条断裂。根据剖面反演结果,初步推测了 4 条断裂,由西向东分别编号为 F5、F7、F8 和 F9。

(1)F5 断裂。正断层,走向 NW,倾向 SW,倾角  $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ,切割贯穿三叠系—志留系。断层两侧地层变化较平缓,赋存最深位于测线 SW 向端点处。

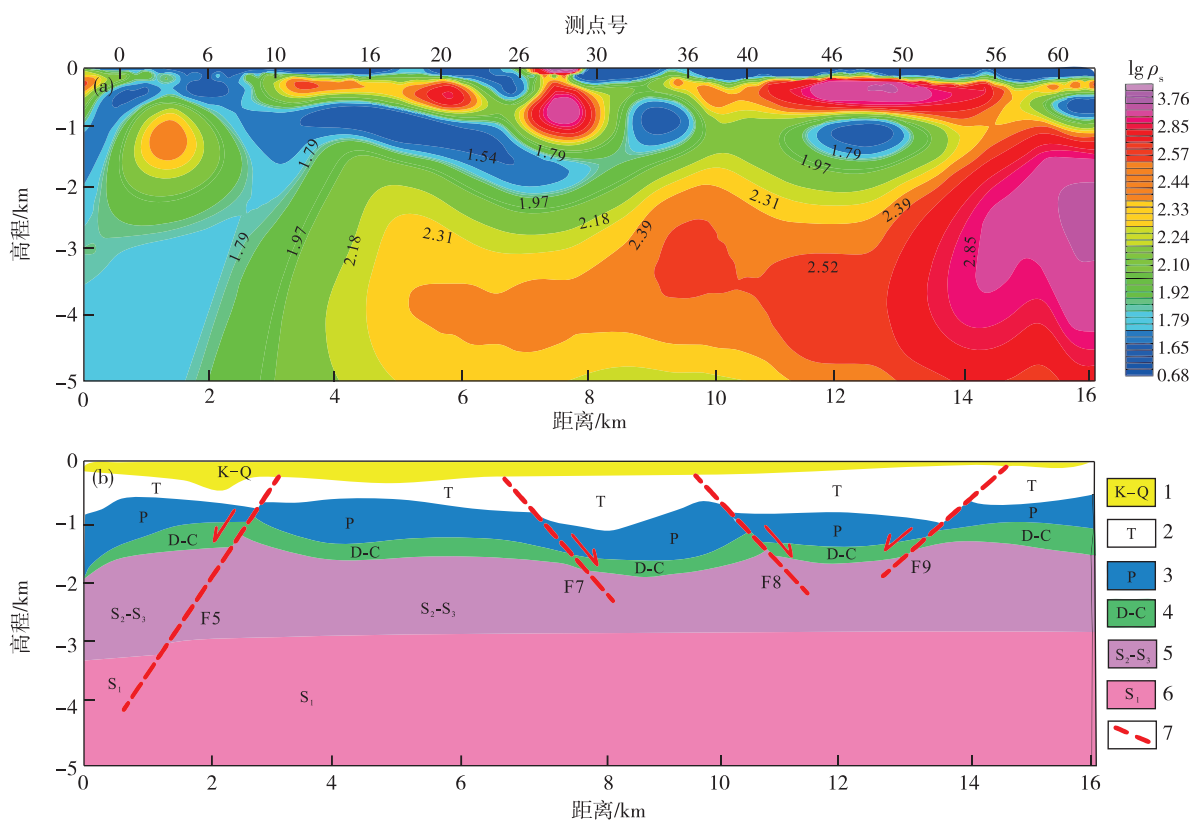
(2)F7 断裂。正断层,走向 NW,倾向 NE,断层倾角  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ,切割三叠系—泥盆系。断层两侧地层变化较平缓,赋存最深位于测线 SE 方向端点处。

(3)F8 断裂。正断层,倾向 SE,倾角  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ,切割三叠系—泥盆系。断层两侧地层底界较平缓,赋存最深位于测线 SE 向端点处。

(4)F9 断裂。正断层,倾向 SW,倾角  $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ,切割三叠系—泥盆系。赋存最深位于测线 SW 向端点处。

### 5.2 地层展布

以 TM 极化模式二维反演剖面为依据,结合研究区电性特征及地质资料分析电性异常与地层的对应关系。推断剖面最上部显示的层状低阻体应属白垩系—第四系,主要岩性为粉砂岩和细粒砂岩,电阻率为  $n \times 10 \Omega \cdot m$ ,为第 1 层。其下的似层状高阻体应属三叠系,主要岩性为灰岩,电阻率可达  $n \times 1000 \Omega \cdot m$ ,为第 2 层。中部显示的层状低阻



1. 白垩系—第四系;2. 三叠系;3. 二叠系;4. 泥盆系—石炭系;5. 中—上志留统;6. 下志留统;7. 推测断层

图 7 LAB 测线 TM 极化模式二维连续介质反演剖面图(a)及地质推断解释图(b)

Fig. 7 LAB Line TM mode two-dimensional continuous medium inversion section (a) and geological interpretation diagram (b)

异常应属二叠系,上二叠系统岩性主要为泥页岩、泥岩和粉砂岩,电阻率为  $n \times 10 \Omega \cdot m$ ,为第 3 层。中下部过渡带的中低阻层应属泥盆系—石炭系,岩性为灰岩夹少量泥岩,电阻率为  $n \times 100 \Omega \cdot m$ ,为第 4 层。剖面下部显示的脉状高阻体应属志留系,岩性为灰白色细粒石英砂岩,电阻率为  $n \times 1\,000 \Omega \cdot m$ ,为第 5 层。

根据以上地质特征,推断该区地表及其浅部 0~200 m 为白垩系—第四系,200~900 m 为三叠系,900~1 400 m 为二叠系,1 400~1 900 m 为泥盆系—石炭系,1 900 m 以下为志留系。

### 5.3 钻孔验证

港地 1 井位于 LAB 测线东南侧,距 20 号测点约 1.7 km 处(图 1),井深 1 502.02 m。钻遇地层中,早三叠世扁担山组(约 389.9 m)以灰岩为主,夹 1 层泥质灰岩;和龙山组(389.9~661.8 m)以灰岩和泥质灰岩互层为主;殷坑组(661.8~915.2 m)上

部为灰岩,下部为砂岩;二叠纪大隆组(915.2~986.9 m)为页岩气目的层位,上部为泥页岩,中部为泥岩,下部为泥页岩;龙潭组(986.9~1 189.7 m)主要由砂岩、泥岩、碳质泥岩、煤层和泥页岩构成;孤峰组(1 189.7~1 228.2 m)主要为砂岩、泥岩和泥页岩;栖霞组(1 228.2~1 413.4 m)以灰岩为主;船山组(1 413.4~1 450.3 m)以灰岩为主;石炭纪黄龙组(1 450.3~1 498 m)以灰岩为主<sup>[1]</sup>。对比可知,目标层二叠纪大隆组和孤峰组顶、底埋深(915.2~1 228.2 m)与 MT 反演资料推断的深度(900~1 400 m)较吻合。

综上所述,采用非线性共轭梯度(NLCG)法 TM 极化模式反演的大地电磁测深剖面地质解释结果与钻井资料较吻合,准确圈定了该区目的层二叠纪泥页岩低电阻层,地层展布清晰,且地层埋深与钻井资料也较吻合。

## 6 结论

(1)一维 Bostick 反演、Occam 反演和自适应正则化反演运行速度快,但反演精度低,冗余构造较多,很难真实、有效地反应实际地电模型。二维非线性共轭梯度反演 TM 极化模式剖面收敛稳定,电性层清楚,连续性好,分辨率高,与电性和地质资料吻合最优,是研究区最优的反演方法。

(2)安徽宣城水东地区地下 900~1 400 m 地层与周围地层存在明显的电性差异,表现为低电阻率异常特征,与地质和钻井资料相吻合。大地电磁测深方法是寻找深部页岩油气的一种重要而有效的方法。

## 参考文献

- [1] 石刚,赵牧华,邵威,等.安徽皖江地区 1:5 万页岩气地质调查成果报告[R].南京:中国地质调查局南京地质调查中心,2015:21-32.
- [2] 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.
- [3] 赵胜,程海生,郑团结,等.下扬子北部 YF 地区 MT 资料综合解释研究[J].安徽地质,2013,23(3):216-219.
- [4] 张宝松,邸兵叶,王佳龙,等.安徽 1:5 万水东幅重力调查报告[R].南京:中国地质调查局南京地质调查中心,2018:119-120.
- [5] 艾斯卡尔,张建龙,谭钦银,等.大地电磁测深在中上扬子地区油气调查中的作用[J].物探与化探,2015,39(1):48-53.
- [6] 李爱勇,柳建新,朱春生,等.大地电磁测深在桂中坳陷油气勘探中的应用[J].物探与化探,2012,36(1):8-12.
- [7] 吴浩,姚素平,焦堃,等.下扬子区上二叠统龙潭组页岩气勘探前景[J].煤炭学报,2013,38(5):870-876.
- [8] 陈乐寿.大地电磁测深-探测地球深部电性和物质状态的一种有效手段[J].科技进展,2009,31(1):39-46.
- [9] 曾庆猛,刘成林,马寅生,等.电磁资料在柴达木盆地东部地区石炭系勘探中的应用[J].地质力学学报,2017,23(1):125-134.
- [10] 安徽省地质矿产局.安徽省区域地质志[M].北京:地质出版社,1987.
- [11] 戴圣潜,周存亭,储东如,等.宣城市幅 H50C002004 1:25 万区域地质调查报告[R].合肥:安徽省地质调查院,2004:188-197.
- [12] 肖晔,陈奎.港地 1 井测井解释报告[R].龙岩:福建省 121 地质大队,2016:31.
- [13] 周东霞.几种反演方法在 CSAMT 资料处理中的应用[J].企业技术开发,2011,30(3):96-99.
- [14] 梁宏达.大地电磁反演方法对比研究[J].工程地球物理学报,2012,9(5):537-543.
- [15] 杨长福,林长佑,陈军营,等.用 Occam 法及广义逆法对兰州地区 MT 资料的一维反演解释[J].西北地震学报,2002,24(4):289-294.
- [16] 陈小斌,赵国泽,汤吉,等.大地电磁自适应正则化反演算法[J].地球物理学报,2005,48(4):937-946.
- [17] 熊彬,罗天涯,蔡红柱,等.起伏地形大地电磁二维反演[J].物探与化探,2016,40(3):587-593.
- [18] 朱培民,王家映.共轭梯度法[J].工程地球物理学报,2008,5(4):382-386.
- [19] 张凯飞.基于电性约束的 NLCG 反演在 CSAMT 资料中的应用[J].物探与化探,2016,40(3):629-634.



## Comparison of application effect of magnetotelluric sounding using different inversion methods in shale gas investigation in Wanjiang area of Anhui Province

WANG Jia-long,ZHANG Bao-song,CHEN Ji-wei,SHI Gang  
(*Nanjing Center,China Geological Survey,Nanjing 210016,China*)

**Abstract:** Magnetotelluric sounding (MT) section investigation was carried out during geological survey for shale gas in Wanjiang area of Anhui Province. Based on inversion results of four different inversion methods and different polarization modes, this study analyzed their advantages and disadvantages. The results show that the four inversion methods have their own characteristics and different polarization modes also have different inversion effects. Geological and drilling data also shows that 2D conjugate gradient inversion in TM mode inversions present distinct electrical characteristics and best effect of iterative convergence. Their coupling well with geological data can successfully identify low resistivity anomaly of Permian shale. Therefore, this study preliminarily infers the spatial distribution characteristics of faults and the target strata of shale gas in Wanjiang area, which will provide thinking way for selecting inversion methods of MT exploration in other similar areas.

**Key words:** shale gas survey;magnetotelluric sounding;inversion effect;Permian;Wanjiang area of Anhui Province