

doi: 10.11720/wtyht.2019.1144

刘成功,金胜,魏文博,等.高密度电阻率法比值参数基于阻尼最小二乘反演[J].物探与化探,2019,43(2):351-358.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1144>

Liu C G, Jin S, Wei W B, et al. The least squares inversion of high-density resistivity method ratio parameter based on smooth constraint[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(2): 351-358. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1144>

# 高密度电阻率法比值参数基于阻尼最小二乘反演

刘成功<sup>1</sup>, 金胜<sup>1,2</sup>, 魏文博<sup>1,2</sup>, 景建恩<sup>1</sup>, 叶高峰<sup>1</sup>, 尹曜田<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 三电位电极系中装置的探测精度和数据处理方法的研究一直是地球物理工作者研究的一个热点, 同时也存在很大的争议。利用正演模拟结果讨论了岩溶地区几种可能存在的地质条件下三种装置的探测精度, 发现  $\beta$  装置和  $\gamma$  装置的探测效果明显优于  $\alpha$  装置; 然后利用正演计算得到的数据合成比值参数 ( $T$ ), 对合成数据  $T$  进行最小二乘反演, 发现  $T$  值反演结果和视电阻率反演结果一致, 并在噪声影响较大的区域,  $T$  值反演结果优于  $T$  值等值线图, 可作为判断异常体特征的一个依据, 也可验证视电阻率的反演结果, 弥补由于噪声对某种单一装置探测效果的影响。以义马某地的水文地质勘察为例,  $T$  值最小二乘反演结果表明, 在含水低阻区域  $T$  值也呈现小值异常, 且显示的异常体边界准确, 结构特征明显。利用  $T$  值反演对数据处理具有重要的意义, 应予以重视。

**关键词:** 三电位电极系; 正演; 最小二乘反演; 比值参数反演; 水文地质勘察

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2019)02-0351-08

## 0 引言

高密度电阻率法以电阻率差异为基础, 通过研究有源电流场在地下半空间的分布规律来解决地质问题<sup>[1-2]</sup>。随着近些年的发展, 探测装置不断增多, 仪器精度逐渐提高<sup>[3-4]</sup>, 已成为工程地质勘察、水环境监测、浅层矿产勘查、考古等领域较为有效、便捷的方法之一<sup>[5-8]</sup>。三电位电极系装置( $\alpha$  装置、 $\beta$  装置和  $\gamma$  装置)是目前使用最广泛的方法之一, 国内王兴泰等<sup>[9]</sup>对三电位电机系装置的研究较早, 并提出了比值的数据处理手段, 拓宽了数据处理的手段。但对三种装置的探测精度一直争论不一。雷宛认为温纳  $\alpha$  装置相比  $\beta$  装置和  $\gamma$  装置在地形起伏地区适应性强, 探测效果较好<sup>[10]</sup>; 阮百尧<sup>[11]</sup>、罗延钟<sup>[12]</sup>和 M.H.Loke 等<sup>[13]</sup>认为, 探测低阻异常体时运用偶极—偶极装置较好; 而郑冰等<sup>[14]</sup>则认为温纳  $\gamma$  装置优于  $\alpha$  装置和  $\beta$  装置。为了探究岩溶地区的三种装置的探测精度, 根据岩溶地区的实际地质特征, 建

立适当的地电模型, 通过模型的正演计算, 讨论三种装置在岩溶地区的探测精度, 并根据正演计算的结果合成比值参数。

根据高密度电阻率法的理论可知, 比值参数的定义为  $\beta$  装置和  $\gamma$  装置视电阻率的比值<sup>[9]</sup>, 实际反映了两种装置电位差的比值, 和倾子的特征类似。根据大地电磁测深理论可知, 视倾子异常可以反映地电构造的水平非均匀性, 能很好地反映异常体的位置、规模等边界特征<sup>[15-16]</sup>。如果在高密度电法中比值参数也能压制干扰, 反映异常体的边界特征, 对高密度电法勘探具有重要意义。

尽管比值参数提出较早, 但在以往的工作中不太重视, 仅作为一个辅助参数使用<sup>[17]</sup>。原因在于仪器的信噪比差, 计算得到的  $T$  值误差较大。随着数字电子技术的发展和仪器灵敏度的提高, 现代高密度电法野外工作可以获得质量较高的电场信号, 得到准确的电位差<sup>[3]</sup>, 比值参数的应用和研究也越来越多<sup>[18]</sup>。汤洪志等开发了 WGMD-1 型高密度电阻率测量系统比值参数软件<sup>[19]</sup>; 杨润海、郭秀军等人

的研究表明,比值参数不仅能突出低阻地质异常,且具有一定的复合异常分解能力,也能将异常结构直观的以比值参数的形式表现出来<sup>[20-21]</sup>。但以往他们的研究都是基于比值参数等值线图开展的,由电法勘探理论可知,高密度电阻率法实测的视电阻率值反映的并不是地下该位置处的真实电阻率值<sup>[22]</sup>,因此,计算得到的比值参数并不是该位置的真实  $T$  值。此时,再利用比值参数绘制等值线图,对反演结果进行辅助解释,解释成果的可靠性也大大较低。本文利用正演计算合成的比值参数做阻尼最小二乘反演,通过反演结果验证比值参数在地下的真实分布特征以及与异常体的分布关系。

## 1 基本原理

所谓三电位观测系统就是将温纳  $\alpha$  装置、 $\beta$  装置和  $\gamma$  装置按一定方式组合后构成的一种测量系统,通过一次布极,可得到三种装置的观测数据<sup>[1]</sup>。图 1 为观测装置观测系统装置示意。

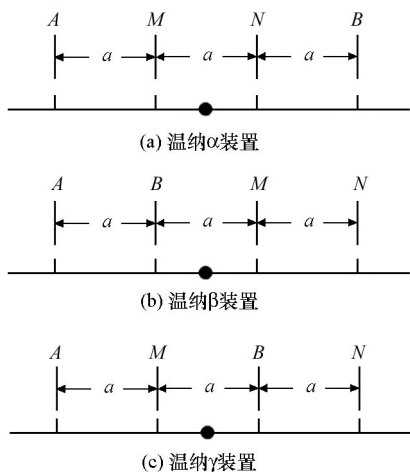


图 1 温纳  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  装置电极排列示意

Fig.1 Schematic diagram of the arrangement of the electrodes of the Winner  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  devices

通过对高密度电法公式的推导,得到比值参数 ( $T$ ) 的表达式:

$$\rho_s^\beta = 6\pi a \frac{\Delta u^\beta}{I}, \quad \rho_s^\gamma = 3\pi a \frac{\Delta u^\gamma}{I},$$

$$T(i) = \rho_s^\beta(i) / \rho_s^\gamma(i) = 2 \frac{\Delta u^\beta}{\Delta u^\gamma}.$$

式中:  $\rho_s^\beta$ 、 $\rho_s^\gamma$  为  $\beta$  装置和  $\gamma$  装置的视电阻率,  $\Delta u^\beta$ 、 $\Delta u^\gamma$  为  $\beta$  装置和  $\gamma$  装置测得的电位差,  $T$  为比值参数,  $I$  为供电电流,  $i$  为第  $i$  个观测点。

通过上式可知,比值参数是两种装置电位差的比值的二倍,当地下无异常体时,  $T$  值恒为 1;当存在

异常体时,  $T$  值改变,特征十分明显,尤其在管线探测中,在反映管线地电结构的分布形态方面,比值参数远比相应装置的视电阻率断面图清晰和明确。

高密度电法反演的目的是利用实测的视电阻率还原地下真实电性异常体的特征。  $T$  值反演利用光滑约束最小二乘反演方法可以计算每一体元的比值参数,通过不断的迭代和拟合使得计算的比值参数理论值与实测视电阻率计算得到的比值参数之残差达到最小,得到真实的比值参数模型。

阻尼最小二乘的公式为

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \mathbf{P} = \mathbf{J}^T \mathbf{g}.$$

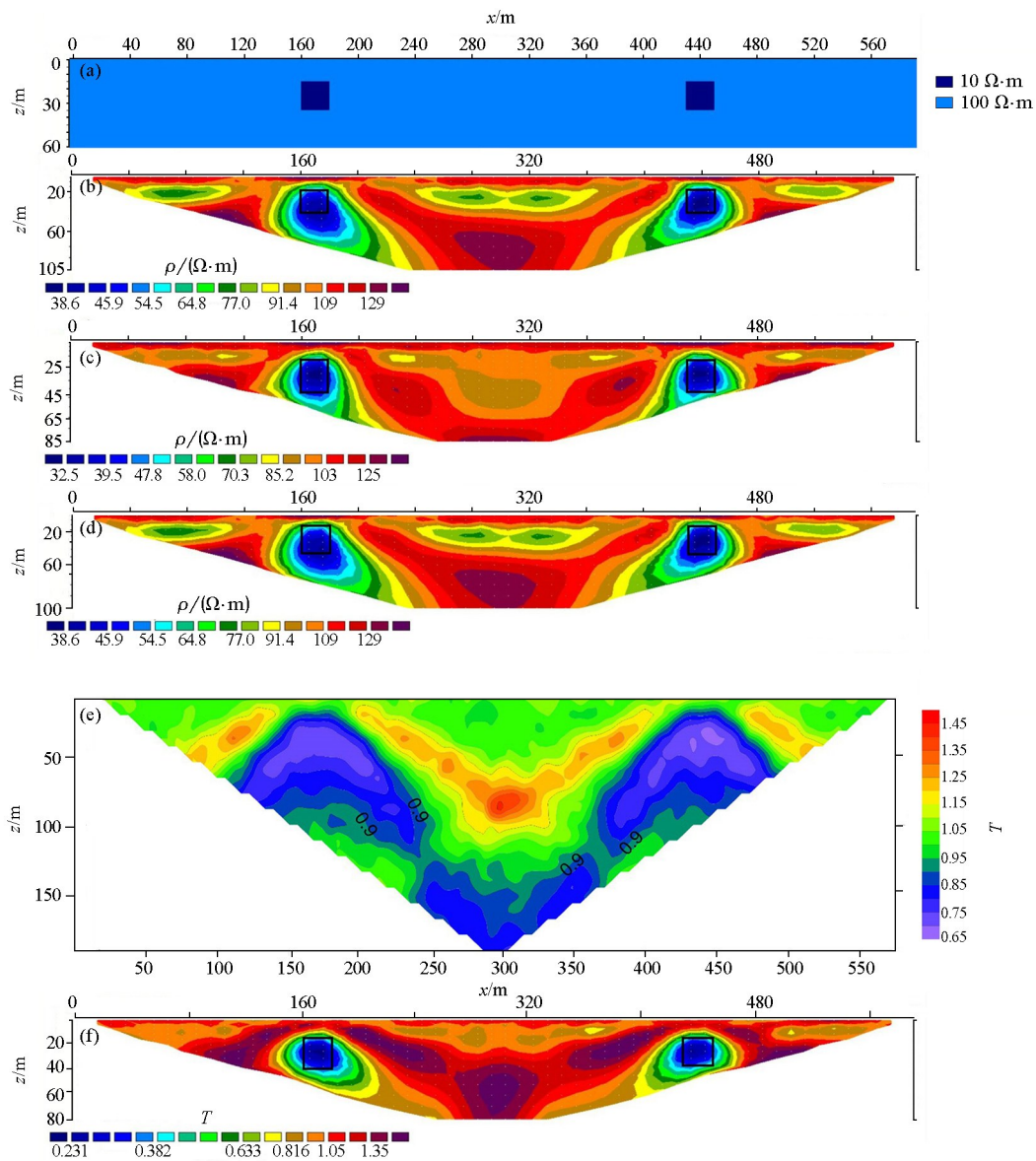
式中:  $\mathbf{J}$  是偏导数雅可比矩阵,  $\mathbf{J}^T$  是  $\mathbf{J}$  的转置,  $\lambda$  是阻尼因子,  $\mathbf{g}$  是计算的比值参数理论值 ( $T$ ) 与实测视电阻率值计算得到的比值参数 ( $T'$ ) 之差的矢量矩阵,  $\mathbf{P}$  是模型参数的校正矢量矩阵。二维光滑滤波系数  $\mathbf{C}$  可保持模型参数在其值连续变化时有一定的光滑度。

## 2 模型正演计算

在参考了李美梅、王恩德等<sup>[23-24]</sup>正演模拟的基础上,根据岩溶地区的电性特征,构建了一个电阻率为  $100 \Omega \cdot \text{m}$  的均匀半空间模型。模型中有 2 个异常体,其中,低阻模型中 2 个异常体为含水溶洞,电阻率为  $10 \Omega \cdot \text{m}$ ,高阻模型中为不含水溶洞,电阻率为  $1000 \Omega \cdot \text{m}$ 。为了更好地模拟野外采集环境,在理论模型的响应中加入一定的高斯误差<sup>[25]</sup>,设置阻尼系数大小为 0.15 (根据黄真萍等<sup>[26]</sup>的研究,在噪声较小时,采用 0.15 的阻尼因子反演效果较好),采用最小二乘法对电阻率模型进行反演计算 (图 2、图 3)。对比这两种简单地质模型的结果可知,比值参数的反演剖面对简单地质体的探测效果很好。

为了更真实地反映野外真实的地质条件,探究比值参数反演结果的使用效果,在上述两种简单的地质模型的基础之上,构造了一个同时包含高阻和低阻异常体的复杂地质模型 (图 4)。

根据对低阻异常体和高阻异常体数值正演模拟的结果可知,高密度电法对浅表异常体的反映特别灵敏,因此,该方法非常适用于水文地质勘察和岩溶区域的工程地质勘察。对比三种装置的反演结果得到:①偶极装置和微分装置数据反演的背景电阻率受到的影响较小,异常体的位置也比较准确,因此,计算得到的比值参数的精度也较高。②温纳装置对电阻率的垂向变化比较敏感,一般用来探测水平层状目标体。另外,温纳装置的装置系数相比于  $\beta$  装



a—模型断面;b— $\alpha$  装置电阻率断面;c— $\beta$  装置电阻率断面;d— $\gamma$  装置电阻率断面;e—比值参数 ( $T$ ) 拟断面;f—比值参数 ( $T$ ) 反演断面  
a—low-resistance geological model section; b—sectional view of resistivity of the alpha device; c—sectional view of the resistivity of the beta device;  
d—sectional view of the resistivity of the gamma device; e—ratio parameter ( $T$ ) pseudo sectional view; f—ratio parameter ( $T$ ) sectional view

图 2 低阻模型剖面及参数断面

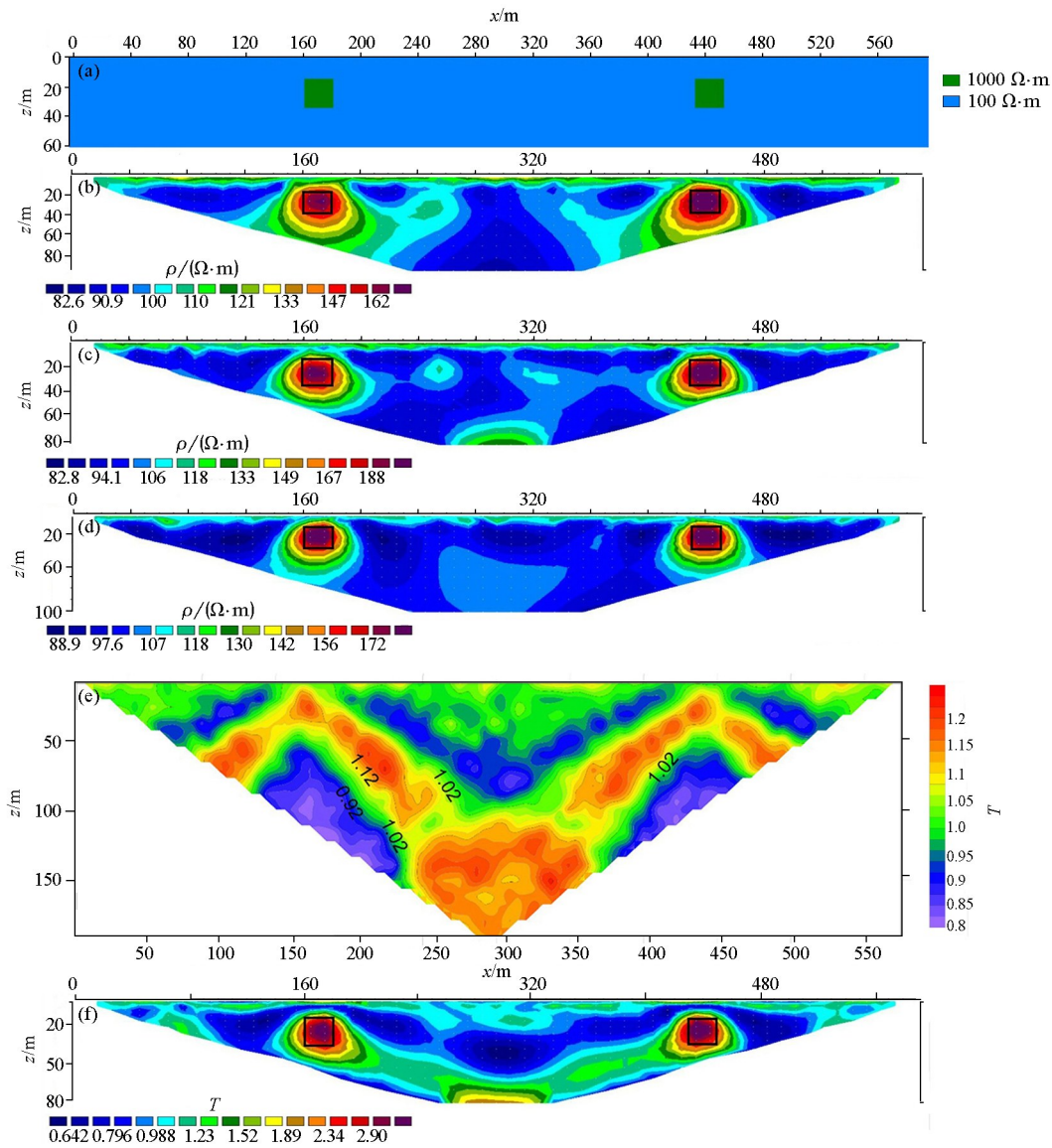
Fig.2 Low-resistance model profile and parametric profile

置和  $\gamma$  装置是最小的,因而在同样情况下可观测到较强的信号,可以在电磁噪声较大的地方使用。③  $\beta$  装置高灵敏度区域出现在发射偶极和接收偶极下方,并且装置的灵敏度等值线几乎是垂直变化的,用来探测向下有一定延伸的目标体比较明显。④  $\gamma$  装置相比其他两种装置,观测的电信号是最大的,对电性异常体的相应也很灵敏。正演结果表明,该装置对模型的探测效果较好。

根据模型生成的  $\beta$  装置和  $\gamma$  装置的数据合成比值参数 ( $T$ ),利用合成数据画出比值参数等值线图,利用最小二乘法对  $T$  值进行反演。通过对比发现,比值参数和倾子有相似的特征,在无背景电阻率

的情况下,倾子反演结果仅能还原目标体的大小、形状和位置,但不能反应围岩和异常体的电阻率特征<sup>[19]</sup>。因此, $T$  值反演也能很好地圈定异常体的大小、形状和位置;同时,比值参数等值线图圈闭的异常边界模糊,不易于对异常体进行分辨,容易造成误判,利用比值参数反演异常范围更精确,把比值参数 ( $T$ ) 反演结果作为电阻率反演的辅助解释,可得到更多有用的信息,使处理结果更加准确和多元化。值得注意的是,比值参数本身就是一个无量纲的数,因此,在数据处理和使用过程中,应避免对参数做过度的解释。比值参数异常能明显反应异常体位置和形态特征,为工程勘察提供资料和依据。





a—模型断面；b— $\alpha$  装置电阻率断面；c— $\beta$  装置电阻率断面；d— $\gamma$  装置电阻率断面；e—比值参数 ( $T$ ) 拟断面；f—比值参数 ( $T$ ) 反演断面  
a—high-resistance geological model section；b—sectional view of resistivity of the alpha device；c—sectional view of the resistivity of the beta device；  
d—sectional view of the resistivity of the gamma device ；e—ratio parameter ( $T$ ) pseudo sectional view；f—ratio parameter ( $T$ ) sectional view

图 3 高阻模型剖面及参数断面

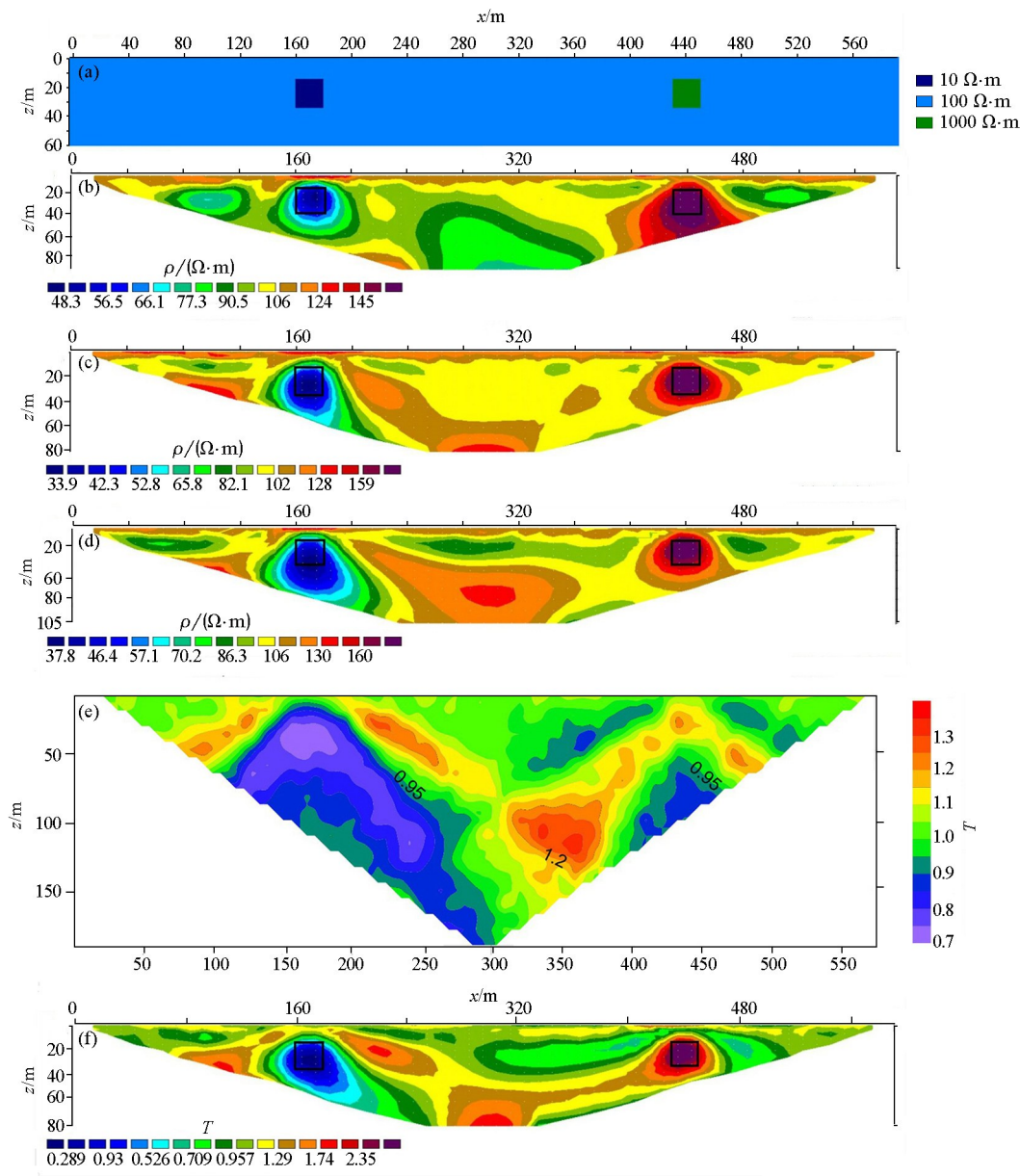
Fig.3 High-resistance model profile and parametric profile

3 工程实例分析

义马位于渑池向斜的核部,主要由中生界、新生界地层组成。地层内断裂构造发育,但含水性不强。含水层中新近系泥灰岩呈不连续分布,以角度不整合接触方式覆盖于下伏地层之上,溶洞溶隙相对发育,富水性中等,厚 0~50.8 m,第四系沙卵、砾石层孔隙潜水含水层富水性为弱到中等,其余含水层均富水性较弱。义马水文地质为简单到中等类型,属新安水文地质单元,岩层富水性微弱,地下水资源比较贫乏。在义马某灰岩地区,地表为厚层卵砾石层

覆盖地区,地表常见岩石裸露,水资源稀少,严重影响居民生活和工业的发展。为了探究当地的地下水资源赋存特征,水文地质工作者在当地布设了几条高密度测线,采用温纳  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  装置进行联合探测。对实测数据进行适当地编辑后运用最小二乘法反演,得到电阻率断面图。利用采集的实测数据计算比值参数,绘制比值参数拟断面图,并对比值参数进行最小二乘反演,得到比值参数断面图。

根据以上三种装置的电阻率反演结果可知,在地表 0~20 m 深度范围内,存在一层高阻区域,推测其为卵砾石层覆盖区。在地下 20~40 m 深度,灰岩内部沿测线方向存在一条串珠状的低阻异常区,结



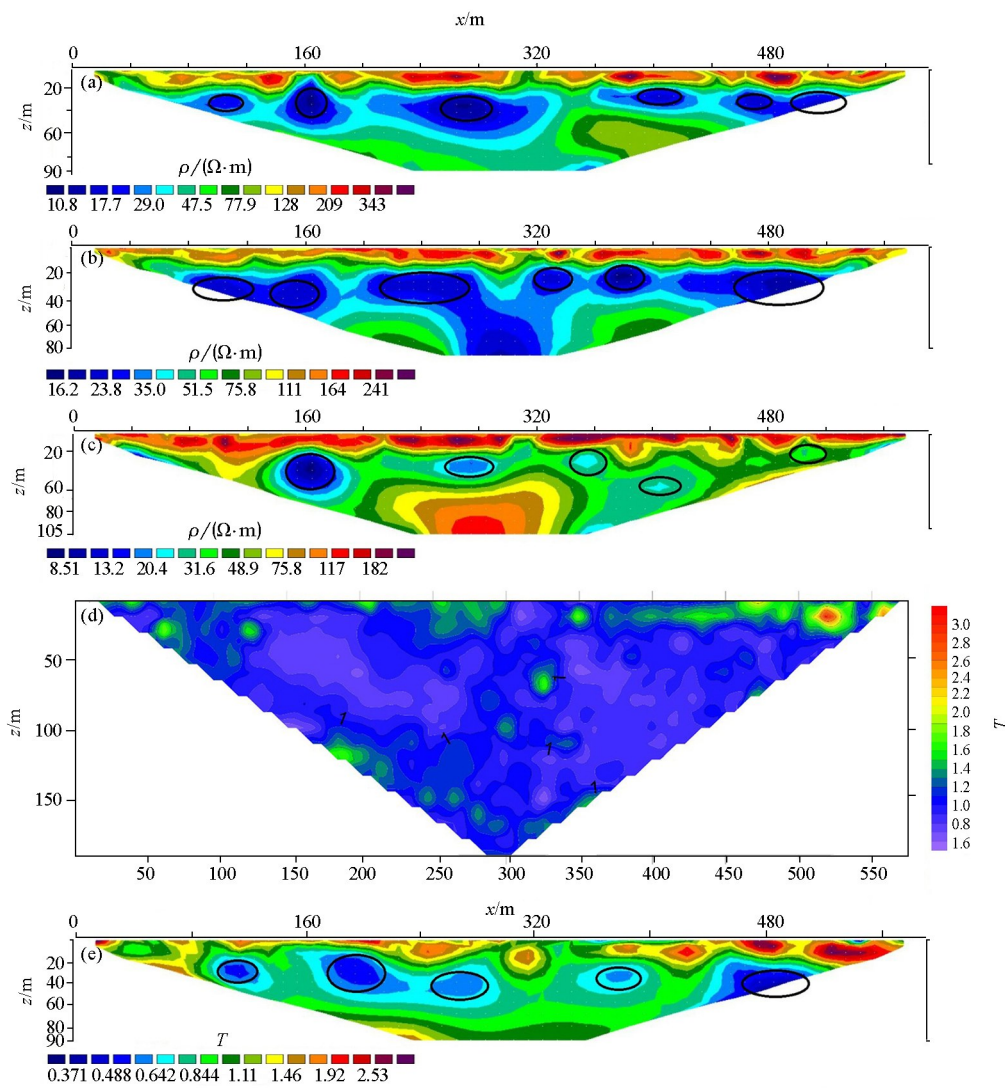
a—模型断面;b— $\alpha$  装置电阻率断面;c— $\beta$  装置电阻率断面;d— $\gamma$  装置电阻率断面;e—比值参数 ( $T$ ) 拟断面; f—比值参数 ( $T$ ) 反演断面  
a—complex electrical geological model section; b—sectional view of resistivity of the alpha device;  
c—sectional view of the resistivity of the beta device; d—sectional view of the resistivity of the gamma device;  
e—ratio parameter ( $T$ ) pseudo sectional view; f—ratio parameter ( $T$ ) sectional view

图 4 复杂模型剖面及参数断面

Fig.4 Complex model profile and parameter profile

合当地的水文地质特征,推测低阻异常区域为含水的溶洞,溶洞周围为岩溶破碎带或岩溶裂隙,导致整体电阻率都较低。对比图 5 的反演结果发现:温纳装置和偶极装置的探测效果较好;由于微分装置易受噪声的影响,部分区域异常特征较弱,并且比值参数等值线图异常特征模糊,根据等值线图也无法做出准确判断。但是,对比图 5e 发现,比值参数 ( $T$ ) 最小二乘的反演结果也呈现串珠状的小值异常,和电阻率反演结果的变化一致。因此,比值参数的反

演结果能准确圈闭出地下异常体的位置,使用效果明显优于比值参数等值线图。  
综上可知,使用比值参数 ( $T$ ) 最小二乘的反演结果比等值线图的异常更加直观明显,尤其在噪声干扰较大时,比值参数 ( $T$ ) 最小二乘反演的优势将更明显。同时, $T$  值最小二乘反演的反演结果还可以作为验证电阻率反演结果准确度的一个参考依据。比值参数反演结果与钻探结果的契合度较高,在今后实际工作中应对其应用予以重视。



a—α 装置电阻率断面; b—β 装置电阻率断面; c—γ 装置电阻率断面图; d—比值参数 ( $T$ ) 拟断面; e—比值参数 ( $T$ ) 反演断面  
a—sectional view of resistivity of the alpha device; b—sectional view of the resistivity of the beta device;  
c—sectional view of the resistivity of the gamma device; d—ratio parameter ( $T$ ) pseudo sectional view; e—ratio parameter ( $T$ ) sectional view

图 5 实测剖面参数断面

Fig.5 Sectional view of measured section parameters

4 结论

1) 在岩溶地区电性差异明显, 正演结果和实测资料的结果都表明 β 装置的探测效果较好, 在实际野外工作中应予以重视。

2) 比值参数 ( $T$ ) 最小二乘的反演结果与电阻率异常一致, 可以作为验证电阻率反演结果的一个参考依据。

当前, 三维高密度电法勘探在实际工程应用中还不够成熟, 且成本较高, 提高二维勘探成果的准确度是当前研究的重点。在实际工作中, 增加资料处理方法, 使处理结果更加丰富和多元化; 在成果解释

之前, 要充分搜集当地的地质、水文, 钻探、地球化学、前期物探等资料, 结合其他方法的成果进行解释, 则勘查的准确度将得到很大提升。

**致谢:** 本研究得到了国家重点研发计划课题《华南岩石圈三维结构与深部过程》(编号: 2016YFC0600201) 的资助, 在此表示感谢。同时, 感谢两位审稿专家提出的宝贵意见, 以及编辑部门的不懈努力。

参考文献:

[1] 李金铭, 罗延钟. 电法勘探新进展 [M]. 北京: 地质出版社, 1996.

Li J M, Luo Y Z. New progress in electrical exploration [M]. Beijing: Geological publishing house, 1996.



- [2] 雷宛,肖宏跃.地电场与电法勘探[M].北京:地质出版社,2008.
- Lei W, Xiao H Y. Geoelectric field and electric method exploration [M]. Beijing: Geological publishing house, 2008.
- [3] 严加永,孟贵祥,吕庆田.高密度电法的进展与展望[J].物探与化探,2012,36(4):576-584.
- Yan J Y, Meng G X, Luy Q T. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(4): 576-584.
- [4] 董浩斌,王传雷.高密度电法的发展与应用[J].地学前缘,2003,10(1):171-176.
- Dong H B, Wang C L. Development and application of high density electrical method[J]. Geoscience Frontiers, 2003, 10(1): 171-176.
- [5] 甘萍,薛建球,侯利朋,等.高密度电法在水文地质和工程地质勘查中的应用[J].青海大学学报,2017,35(3):46-51.
- Gan P, Xue J Q, Hou L P, et al. Application of high density electrical method in hydrogeology and engineering geological exploration[J]. Journal of Qinghai University, 2017, 35(3): 46-51.
- [6] 杨进,刘庆成,程业勋,等.水环境地球物理方法的应用综述[J].地质科技情报,2000,19(2):107-110.
- Yang J, Liu Q C, Cheng Y X, et al. A review of the application of geophysical methods in water environment [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(2): 107-110.
- [7] 张峰.高密度电法在工程地质勘察中的应用[J].陕西水利,2015(2):155-156.
- Zhang F. Application of high-density electrical method in engineering geological survey[J]. Shaanxi Water Conservancy, 2015(2): 155-156.
- [8] 贾同福,尹志勇,汤洪志.高密度电阻率法在岩溶探测中的应用[J].东华理工大学学报,2011,34(1):94-96.
- Jia T F, Yin Z Y, Tang H Z. Application of high-density resistivity method in karst exploration[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2011, 34(1): 94-96.
- [9] 王兴泰.高密度电阻率法及其应用技术研究[J].长春地质学院学报,1991,21(3):341-348.
- Wang X T. Research on high-density resistivity method and its application technology[J]. Journal of Changchun Institute of Geology, 1991, 21(3): 341-348.
- [10] 肖宏跃,雷宛,雷行健.高密度电阻率法中几种装置实测效果比较[J].工程勘察,2007(9):65-69.
- Xiao H Y, Lei W, Lei X J. Comparison of the measured results of several devices in high-density resistivity method [J]. Engineering Investigation, 2007(9): 65-69.
- [11] 吕玉增,阮百尧.高密度电法工作中的几个问题研究[J].工程地球物理学报,2005,2(4):264-269.
- Luy Y Z, Ruan B R. Study on several problems in the work of high-density electrical method[J]. Journal of Engineering Geophysics. 2005, 2(4): 264-269.
- [12] 罗延钟,王传雷,董浩斌.高密度电阻率法的电极装置选择[J].地质与勘探,2005,41(s):174-178.
- Luo Y Z, Wang C L, Dong H B. Electrode device selection by high-density resistivity method [J]. Geology and Prospecting, 2005, 41(s): 174-178.
- [13] Loke M H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies[C]//www.geoelectrical.com,1999.
- [14] 郑冰,李柳德.高密度电法不同装置的探测效果对比[J].工程地球物理学报,2015,12(1):33-39.
- Zheng B, Li L D. Comparison of detection effects of different devices with high-density electrical method[J]. Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(1): 33-39.
- [15] 林昌洪,谭捍东,佟拓.倾子资料三维共轭梯度反演研究[J].地球物理学报,2011,54(4):1106-1113.
- Lin C H, Tan H D, Tong T. Study on three-dimensional conjugate gradient inversion of dumper data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4): 1106-1113.
- [16] 胡文宝,苏朱刘,陈清礼,等.倾子资料的特征及应用[J].石油地球物理勘探,1997,32(2):202-212.
- Hu W B, Su Z L, Chen Q L, et al. Characteristics and application of dumping data [J]. Petroleum Geophysical Exploration, 1997, 32(2): 202-212.
- [17] 江玉乐,康万福,张楠,等.高密度电法在岩溶勘察中的应用[J].成都理工大学学报:自然科学版,2007,34(4):452-455.
- Jiang Y L, Kang W F, Zhang N, et al. Application of high-density electrical method in karst exploration[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 34(4): 452-455.
- [18] 蔡斌.高密度电法模拟研究与工程应用[D].吉林:吉林大学,2011.
- Cai B. High-density electrical simulation research and engineering application[D]. Jilin: Jilin University, 2011.
- [19] 汤洪志,易峰,何门贵,等.WGMD-1型高密度电阻率测量系统比值参数软件的开发与应用[J].华东地质学院学报,2000,23(3):242-247.
- Tang H Z, Yi F, He M G, et al. Development and application of ratio parameter software for WGMD-1 high-density resistivity measurement system [J]. Journal of East China Geological Institute, 2000, 23(3): 242-247.
- [20] 杨润海,赵晋明,王彬,等.比值参数在高密度电法中的应用[J].地震研究,2003,26(2):197-200.
- Yang R H, Zhao J M, Wang B, et al. Application of ratio parameter in high-density electrical method[J]. Journal of Seismological Research, 2003, 26(2): 197-200.
- [21] 郭秀军,王兴泰.用高密度电阻率法进行空洞探测的几个问题[J].物探与化探,2001,25(4):306-315.
- Guo X J, Wang X T. Some problems in the application of high density resistivity method to cavity exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25(4): 306-315.
- [22] 李金铭.地电场与电法勘探[M].北京:地质出版社,2005.
- Li J M. Geoelectric field and electrical method exploration [M]. Beijing: Geological publishing house, 2005.
- [23] 李美梅.高密度电阻率法正反演研究及其应用[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
- Li M M. Research on the forward and inversion of high-density resistivity method and its application[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.

[24] 王恩德,门业凯,张忠杰,等.基于高密度电阻率法的铁矿山采空区数值模拟[J].东北大学学报:自然科学版,2013,34(7):1022–1026.  
Wang E D, Men Y K, Zhang Z J, et al. Numerical simulation of goaf in iron mine based on high-density resistivity method [ J ]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2013, 34 ( 7 ):1022–1026.

[25] Feng D S, Dai Q W ,Xiao B. Contrast between 2D inversion and 3D inversion based on 2D high-density resistivity data[ J ].Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2014,24:224–232.

[26] 黄真萍,胡晓娟,孙艳坤.三维高密度电法正反演模拟阻尼系数最优设置研究[ J ].路基工程,2014,( 1 ):5–10.  
Huang Z P, Hu X J, Sun Y K. Study on optimal setting of simulated damping coefficient for forward and inverse of 3D high-density electrical method [ J ].Subgrade Engineering,2014,( 1 ):5–10.

The least squares inversion of high-density resistivity method  
ratio parameter based on smooth constraint

LIU Cheng-Gong<sup>1</sup>, JIN Sheng<sup>1,2</sup>, WEI Wen-Bo<sup>1,2</sup>, JING Jian-En<sup>1</sup>, YE Gao-Feng<sup>1</sup>, YIN Yao-Tian<sup>1</sup>  
( 1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Underground Information Detection Technology and Instruments, Ministry of Education, Beijing 100083,China )

**Abstract:** The detection accuracy of the array and the study of data processing methods about the three-potential observation system always constitute a hot spot for geophysicists, and there are also many controversies. In this paper, forward modeling results are used to discuss the detecting accuracy of three devices under several possible geological conditions in karst area. It is found that  $\beta$  array and  $\gamma$  array are significantly more precise than wenner  $\alpha$  array; then, the ratio parameter ( $T$ ) is composed of forward’s result. With least-squares inversion on the data of  $T$ , the authors found that the result of  $T$ ’s least-squares inversion is consistent with the inverse result of apparent resistivity, and the result of inversion result is better than the  $T$  contour map in an area where the noise is large. For the result of the  $T$ ’s least-squares inversion, it can be used as a basis for judging the anomalous body characteristics and the inverse result of apparent resistivity, and it can also be used to make up the effect of noise on a single device. Taking the hydrogeological survey of a certain place in Yima as an example, the authors found that the result of the  $T$ ’ least-squares inversion in the low-water-resistance region is small, the abnormal bodies’ boundaries are accurate, and the structural features are obvious. It is shown that the result of the  $T$  least-squares inversion is very useful for data processing and interpretation, and therefore researchers should pay attention to it in future.

**Key words:** three-potential electrode system; forward modeling; least square inversion; ratio parameter’s inversion; hydrogeological survey

( 本文编辑:沈效群)