

# 可控源音频大地电磁考古资料的地形校正、解释方法效果对比

李淑玲<sup>1</sup>, 孙鸿雁<sup>2</sup>, 林天亮<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000)

**摘要:** 介绍了秦始皇陵考古探测 CSAMT 视电阻率数据中的地形影响和采用不同校正方法进行校正的对比研究结果。这些结果说明, 采用不同的地形校正方法, 其解释结果会有很大区别, 以此提醒人们对起伏地形资料进行解释时, 应小心使用各种地形校正方法; 同时展示出采用合适的校正方法对地形进行校正, 可以明显压制 CSAMT 考古资料中地形影响, 改进数据解释质量, 说明地形校正是非常必要的。

**关键词:** CSAMT; 秦始皇陵; 考古探测; 地形校正

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2005)06-0541-04

秦始皇陵是世界闻名的历史古迹, 有关秦始皇陵封土堆下地宫的存在与否及地宫的埋深、大小、形状、结构、位置等, 是人们多年来一直想解开的谜。对于充满神秘色彩的秦陵地宫, 科技部 863 计划“考古遥感与地球物理综合探测技术”课题的第二子课题的研究人员利用综合地球物理探测技术进行了勘探。

利用秦皇陵考古得到的数据资料, 我们对 CSAMT 视电阻率数据进行了地形校正, 对不同地形校正方法的使用效果进行了对比研究。

## 1 研究区概况

秦始皇陵座落在骊山北麓, 西距临潼县城 5 km, 距西安市约 20 余公里。据已有考古资料(图 1), 秦始皇陵园以封土堆为中心分为 4 个层次, 核心是秦始皇陵墓室——地宫, 其他依次为内城、外城和外城以外。秦始皇陵占地面积达 56.25 km<sup>2</sup>, 其内城面积约 2.13 km<sup>2</sup>。地宫之上有巨大的封土堆, 它占据着内城南区 2/3 的面积。

至今秦始皇陵的地面建筑早已荡然无存, 只有陵丘——封土堆高耸如小山包。封土堆高约 76 m, 南北长 350 m, 东西宽 345 m, 主要是由夯土构成, 由于其表层与深部含水量不同, 加上粗夯与细夯的夯法不同, 导致封土堆电阻率的非均匀性: 砂砾石层的电阻率明显高于黄土, 火烧过的陪葬坑电阻率略高于一般黄土(生土)。特别是土中的空洞(或石质地

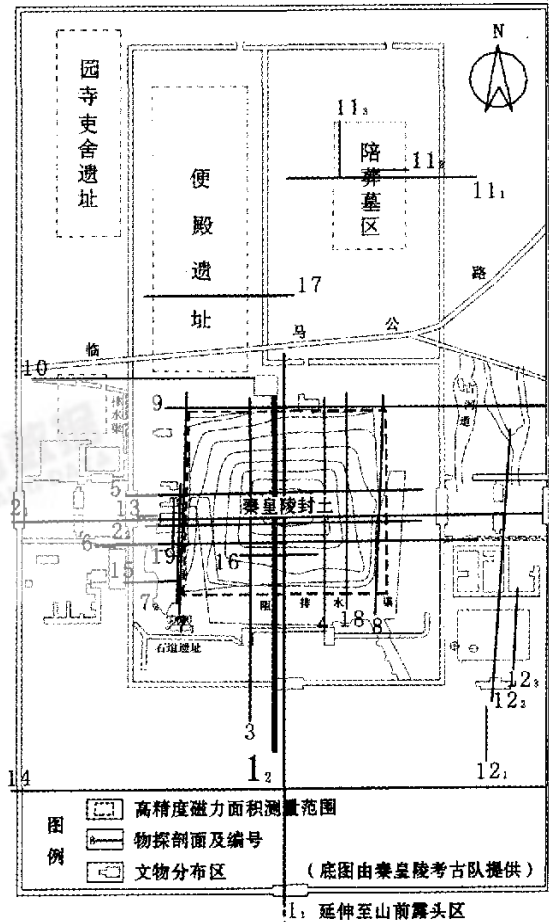


图 1 研究区概况和 CSAMT 测线 L<sub>2</sub> 位置示意

宫)与土的电阻率存在较大差异,为 CSAMT 电阻率法勘探提供了良好的物性前提。封土堆为典型的 3D 山地地形,且四周埋有金属管线和电缆等,陵园周围建有围墙,墙外不均匀地分布着许多建筑物,这些设施都给 CSAMT 测量造成一定的困难,特别是封土堆较强的地形起伏给 CSAMT 探测和定量解释带来困扰。

## 2 试验方法

CSAMT 法是诸多综合地球物理试验方法中的一种,属人工源频率域测深方法。布设的 CSAMT 南北向试验剖面(图 1 中的  $1_2$  线)穿越秦皇陵封土堆,这是典型的山脊地形下含高阻异常体(背景电阻率很低,石质地宫电阻率较高,而且山脊地形低阻异常与地宫高阻异常有互相“消减”作用)且地表附近有非均匀体干扰的情况。CSAMT 法与其他电阻率法一样,视电阻率会受到地形和地表非均匀体的影响。那么地形对探测结果的影响大小如何?如何消除地形影响突出秦皇陵地宫的异常响应?各种地形校正、解释方法效果究竟如何?笔者试图通过数值模拟封土堆实际地形的影响,通过对各种地形校正、解释方法的比较,即通过做不进行地形校正的 1D 反演和 2D 平地地形反演、比值法校正地形影响后

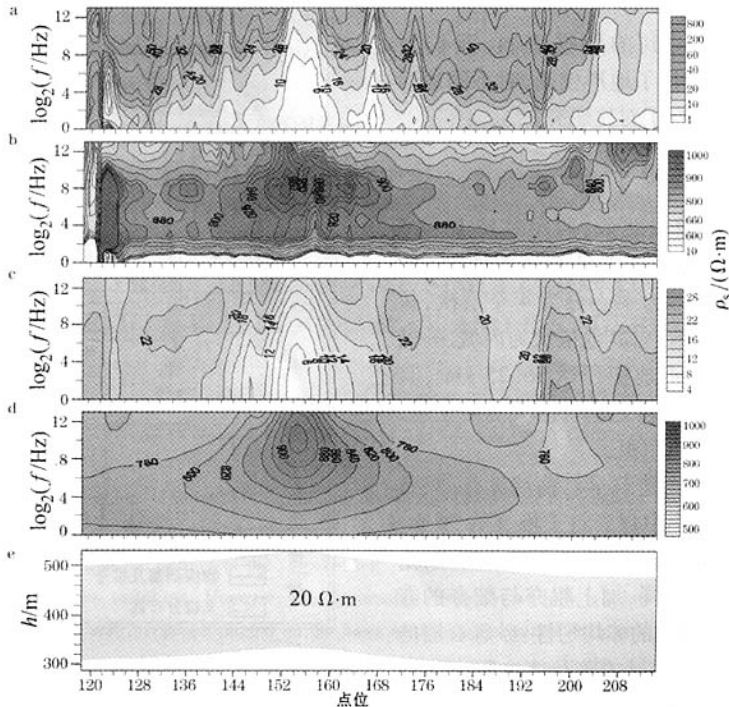
做 2D 反演、直接做 2D 带地形反演等,来定性了解封土堆地形影响程度,定性了解各种地形校正、解释方法的应用效果,从而指导、用好现有各种地形校正、解释方法。

研究表明:在有封土堆地形存在情况下,CSAMT 数据中的地形影响是严重的,消除地形的影响非常必要;各种地形校正、解释效果各异,比值法校正后 2D 反演、直接带地形 2D 反演可明显压制地形影响,改善数据解释的质量,突出地宫引起的异常。不考虑地形影响,简单运用 1D 反演、2D 平地地形反演方法解释效果不佳,因为这样做不能有效压制地形影响,恢复地宫引起的异常,很可能会引起错误的解释结果。

## 3 各种地形校正、解释方法对比

### 3.1 地形对 CSAMT 视电阻率的影响

观察对比图 2 中秦皇陵封土堆上实测的视电阻率(a)、视相位(b)和数值模拟封土堆纯地形(e)引起的视电阻率(c)、视相位(d)响应断面特征,可以看出二者非常相似。起伏的地形对 CSAMT 试验结果的影响是严重的,地形的低阻、高相位响应已经全部将 154 号点附近地宫的高阻、低相位异常特征掩盖,从视电阻率、视相位断面图直观看来,封土堆下



a—实测视电阻率;b—实测视相位;c—纯地形视电阻率;d—纯地形视相位;e—纯地形模型

图 2 秦皇陵  $1_2$  线 CSAMT 实测和纯地形的视电阻率、视相位响应剖面

似乎不存在高阻(低相位)异常体。反之,好象封土堆下应该存在一个较大的低阻(高相位)异常体。可见封土堆地形的影响在实测 CSAMT 视电阻率、视相位剖面中非常明显,特别在封土堆顶部附近,已经掩盖了封土堆下的地宫。

再观察对比图 3 中 149~158 点的 CSAMT 视电阻率测深曲线的总体特征还发现:在靠近秦皇陵封土堆顶部附近的 152~158 点的视电阻率、视相位曲线受到严重畸变(在各频点不同程度地下移)。分析原因,认为这种畸变主要是由浅部的低阻非均匀体静态效应和地形影响综合引起。如果对受到严重地形影响而畸变的数据,不进行地形校正处理就简

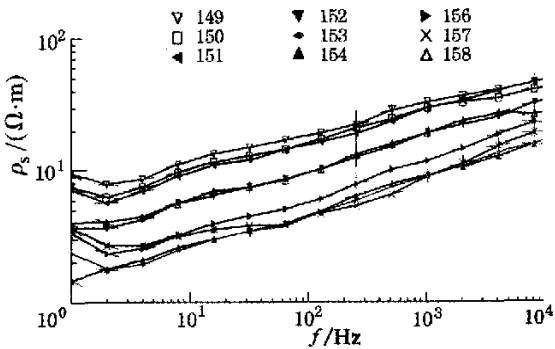


图 3 畸变的 CSAMT 视电阻率测深曲线

单使用,必然会导致错误的解释结果。

3.2 各种地形校正、解释方法对比

比值法公式为

$$D(f,x) = \rho_D(f,x) / \rho_N(f,x),$$

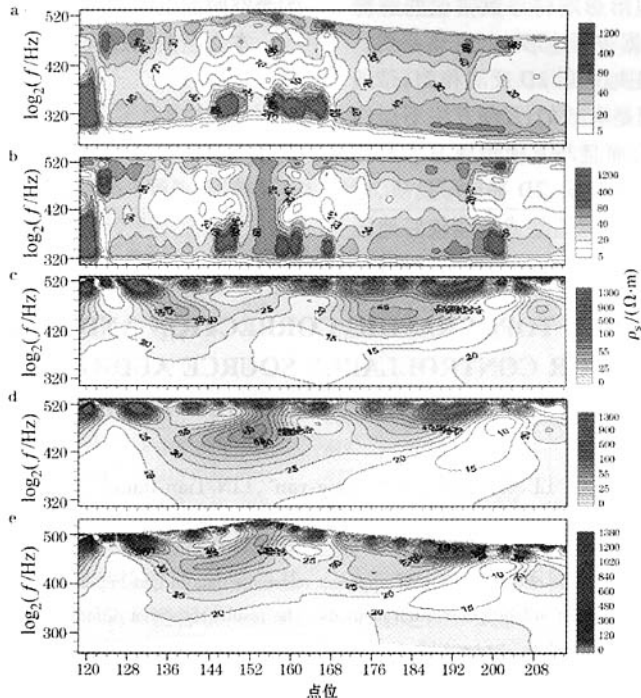
$$\rho_{aC}(f,x) = \rho_F(f,x) / D(f,x),$$

$$\varphi_{aC}(f,x) = \varphi_F(f,x) - [\varphi_D(f,x) - \varphi_N(f,x)],$$

式中,  $D(f,x)$  为视电阻率校正因子,  $\rho$  为视电阻率,  $\varphi$  为视相位;下标 D、F、N、aC 分别表示畸变数据、实测数据、未畸变数据和地形校正数据。

在消除静态效应后,首先计算出地形的视电阻率和视相位校正因子(山脊引起低阻高相位,好象是“低阻体”的异常响应),用校正因子对数据进行比值法地形校正并对校正后的数据分别进行 1D 反演和 2D 平地地形反演解释;其次对不做任何地形校正的数据进行 1D 反演、2D 平地地形反演解释;再次用带地形 2D 反演程序对不做任何地形校正的数据进行 2D 带地形直接反演;最后将各种校正、解释结果绘在一张图上,分析评价各种校正、反演解释方法的差异。

从秦皇陵 1<sub>2</sub> 线 CSAMT 数据 2D 山脊地形各种校正、解释方法效果对比(图 4)可以看出:地形校正前 1D 反演电阻率断面(图 4a)封土堆之下基本为地形引起的低阻异常,地宫的高阻异常隐约显示;比值



a—1D 圆滑反演电阻率断面;b—比值法校正后 1D 圆滑反演电阻率断面;c—平地地形 2D 圆滑反演电阻率断面;d—比值法校正后 2D 圆滑反演电阻率断面;e—带地形 2D 圆滑反演电阻率断面

图 4 秦皇陵 1<sub>2</sub> 线 CSAMT 数据 2D 山脊地形各种校正、解释方法效果对比

法校正后的 1D 反演电阻率断面(图 4b)显示出地宫的高阻异常,但异常被拉长严重变形;2D 平地地形反演电阻率断面(图 4c)没有显示出地宫的高阻异常;比值法校正后的 2D 反演的电阻率断面(图 4d)则较好地压制了地形的低阻异常影响,能够正确地反映出地宫引起的高阻异常,虽然异常位置稍稍向左偏离,但基本正确,而且异常形态清晰可见;2D 带地形直接反演的电阻率断面(图 4e)也能够比较正确地反映出地宫引起的高阻异常,其异常的位置也基本正确,但异常形态相对图 4d 有些变形。

#### 4 讨论

对秦陵地宫实测 CSAMT 资料 2D 山脊地形影响分析及各种校正、解释结果中可以得出以下结论。

(1)秦皇陵 1<sub>2</sub> 线 CSAMT 数据做过地形校正的解释结果明显优于没做地形校正的解释结果。经过地形校正,不但从低阻背景中突出了地宫的高阻异常,而且高阻异常的形态和深度位置比较接近人们以往的推测,即用比值法校正后的 CSAMT 数据反演解释的秦皇陵地宫的中心深度约在 450 ~ 470 m 左右,南北向长度 50 ~ 70 m,高约 20 ~ 30 m;同时也证明了地形对 CSAMT 视电阻率的严重影响(实际上对视相位的影响也是很严重的),如果不考虑 CSAMT 勘探数据中的地形影响将导致错误的解释结果,说明对 CSAMT 数据进行地形校正非常必要。

(2)采用比值法校正地形后 2D 反演和 2D 带地形直接反演校正地形都是有效的,2 种方法不但能正确指示异常体的位置,而且与其他物探方法解释结果有很好的 consistency。1D 反演、2D 平地地形反演、比值法校正后 1D 反演基本不能消除或不能较好地压

制地形影响,特别在地形起伏较大的地区应慎用。

(3)CSAMT 反演解释的秦陵地宫的高阻异常与封土堆不太对称。这有几种可能:一是地宫位置和封土堆实际上就不是正好对称的关系;二是位置对称但电性在南北向有差异;三是静态校正或地形校正不彻底,或数据中可能还有其他的干扰因素存在。

(4)秦皇陵地宫本身为 3D 异常体,地形为 3D 地形,3D 异常体不同于 2D 异常体,3D 地形不同于 2D 地形,3D 问题用 2D 解释必然存在差异。笔者所用的反演解释方法是 2D 的,对秦皇陵地宫大小和深度的解释会存在一定的误差。

(5)在用比值法做 CSAMT 地形校正时,应当通过正演计算分别求出纯地形和水平地形均匀半空间的视响应来求取校正因子,再分别对实测视电阻率或视相位进行校正以减少误差,即电阻率校正因子 = 纯地形模型视电阻率/水平地形模型视电阻率,相位校正因子 = 纯地形模型视相位 - 水平地形模型视相位。实践表明,这样做不但可以定性分析地形影响大小,而且可以减少比值法校正带来的误差。因为在计算中发现,用来做正反、演的计算程序在较高和较低频率时存在计算误差,这种误差在本次测量使用的频率范围内可达 3%。为减少这种误差传递,在用比值法求取校正因子时,不能简单地使用均匀半空间的电阻率和相位进行归一。

本文在撰写过程中得到了刘士毅专家的热情指导,谨表谢意!

#### 参考文献:

[1] 刘士毅,吕国印,段清波,等.秦始皇陵地宫地球物理探测成果与技术[M].北京:地质出版社,2005.

### A COMPARISON OF TOPOGRAPHIC CORRECTION AND INTERPRETATION METHODS FOR CONTROLLABLE SOURCE AUDIO FREQUENCY MAGNETOTELLURIC ARCHEOLOGICAL DATA

LI Shu-ling<sup>1</sup>, SUN Hong-yan<sup>2</sup>, LIN Tian-liang<sup>2</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

**Abstract:** In this paper, the topographic effects on CSAMT apparent resistivity data in Qin Imperial Mausoleum's archeological exploration are described, with a comparison of different correction methods. The results show that different correction methods would yield remarkably different interpretations. Therefore, topographic correction methods should be chosen and used with sufficient care in data interpretation of rolling topography. If we adopt suitable correction methods to make topographic correction, the topographic effects on CSAMT archeological data can be obviously suppressed, and the data interpretation quality can be improved. It is concluded that topographic correction is very important.

Set surferapp = CreateObject(" surfer. application")' 创建一个 Surfer 应用程序对象

surferapp. Visible = True' 显示 Surfer 应用程序主窗口

surferapp. WindowState = srfWindowStateMaximized' 窗口最大化

Set plot = surferapp. Documents. Add ( srfDocPlot)' 创建 Plot 文档对象

Set shapes = plot. shapes' 获取 Plot 文档对象的绘图元素对象集合。

同理调用 Grapher 应用程序的主要实现代码如下:

Dim Grapher As Object, G As Object, DOC1 As Object

Set Grapher = CreateObject(" Grapher. Application")' 创建一个 Grapher 应用程序对象

Grapher. Visible (1)' 显示 Grapher 应用程序主窗口

' Creates a reference to the application

Set G = Grapher. Application()

Set DOC1 = G. Documents. Add()' 创建 Plot 文档对象。

利用 VB 与 Surfer、Grapher 的接口, 有效地将 VB 的数据库功能与二者的绘图功能结合在一起, 可以在 VB 下将 Surfer 和 Grapher 应用程序主窗口调入, 使数据处理和作图在一个系统中完成。

### 4 结论

笔者结合实际应用情况, 采用关系数据库存储大量的测氡数据, 用面向对象编程语言实现对数据处理方法的程序化, 最后用 Visual Basic 和 Surfer、Grapher 的接口技术调用应用程序来作图, 开发设计了具有实际应用价值的测氡数据处理软件, 在实际应用中取得了良好效果。

本系统在用户需求和功能模块设计方面, 还有许多工作需要做:

- (1) 根据实际需要数据库结构进一步完善。
- (2) 笔者只设计了一次、二次、三次趋势面分析的数据处理, 还有待于实现任意趋势面的分析。
- (3) 在实际工作中经常将测氡法和其他物探方法相结合解决问题, 因此有待于扩充并完善, 使其成为一套专业化的数据处理软件。
- (4) 笔者作图过程是用现有软件完成的, 可结合测氡数据处理的特点和实际需要开发作图功能。

### 参考文献:

- [1] 丁绪荣. 普通物探教程—电法及放射性[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- [2] 刘鸿福, 白春明, 程小平. 浅部土壤中的氡气测量[J]. 核技术, 1997, 20(6).
- [3] 方方, 贾文懿. 杯法测氡原理及应用[J]. 物探与化探, 1998, 22(3).
- [4] 毛兴华, 胡方西. 将 Mapinfo 和 Surfer 结合绘制等值线[J]. 测绘通报, 2001, (10).

## THE DESIGNING OF SOFTWARE FOR RADON-SURVEYING DATA

GUO Jun-li, YANG Hao

(Institute of Air Arm for Ground Force, Beijing 101114, China)

**Abstract:** This paper discusses basic principle, working method and data processing of radon surveying. Considering radioactive decay of radon surveying data and many disturbing factors in actual work, we require analysis, emendation and processing of actual data. For the purpose of practical application, the authors have designed a visual and integrated radon data processing system, whose software can realize preprocessing, emendation and plotting of radon data.

**Key words:** radon surveying technique; data processing; Access database; Visual Basic6.0

**作者简介:** 郭俊丽(1977 -), 女, 助理工程师。毕业于太原理工大学, 获得工学硕士学位。在北京陆军航空学院模拟训练中心工作, 从事三维建模及模拟仿真工作, 发表论文多篇。

上接 544 页

**Key words:** CSAMT; Qin Shi Huang's mausoleum; archeological exploration; topographic correction

**作者简介:** 李淑玲(1973 -), 女。1993 年毕业于中国地质大学(北京)应用地球物理系, 任职于中国地质大学(北京), 主要从事物探数据处理工作。现为中国地质大学(北京)博士研究生。