

频率域高密度电法在秦始皇陵地宫探测中的试验效果

王书民^{1,2}, 孟小红¹, 李汝传^{1,2}, 雷达^{1,2}, 方慧^{1,2}, 孙鸿雁^{1,2}, 赵富刚²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 物化探所 勘查地球物理开放实验室, 河北 廊坊 065000)

摘 要: 频率域高密度电法在秦始皇陵地宫探测试验中取得了明显的探测效果, 探测结果不仅证实了地宫真实存在, 也初步确定了地宫墓室的位置、大小、埋深及其完好性。

关键词: 频率域高密度电法; 秦始皇陵; 电阻率

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2004)04-0327-03

自物探方法技术进入工程探测领域以来, 高密度电法一直是该领域浅部探测的主要方法之一, 并取得了较好的探测效果。近几年, 物化探所激电组研发了一种在频率域观测的频率域高密度电法, 又称高密度相位激电法。该法基于高密度电法和复电阻率法, 与常规高密度电法相比, 除了具有同样的高分辨率等特点外, 还具有探测深度大(300 m)、参数多(可同时采集复电阻率和激电相位参数)等优点, 并成功地将其应用于金属矿勘查领域, 取得了可喜的勘查效果。然而, 将该方法应用于考古探测尚属首次。

国家 863 计划课题“考古遥感与地球物理综合探测技术”, 首期在秦始皇陵(下简称秦陵)开展考古物探方法技术试验。频率域高密度电法是本期参加试验的物探方法之一, 该方法的主要任务为: 通过对秦陵封土堆下地宫的探测试验, 确认该方法在地宫探测中的有效性; 初步确定地宫存在与否及其位置、大小、埋深(要求探测深度大于 100 m, 这是常规高密度电法无法达到的)。试验结果表明, 频率域高密度电法在秦陵地宫探测试验中取得了明显的探测效果, 为这次秦陵考古试验能够取得突破性成果发挥了重要的作用, 得到了专家们的一致好评。

1 方法原理

本次试验采用的高密度电法是一种频率域激发极化法, 是采用三极装置与多道采集技术相结合的一种高密度相位激电法。它与常规的高密度电法不同之处在于采用频率域稳流发射装置、在频率域观测, 因而, 其探测深度较大, 可以同时采集电阻率

和激电相位 2 种参数。频率域激发极化法是在频率域中观测测量电极间的电位差 $\Delta \bar{U}$ 及其相对于供电电流 \bar{I} 的相位移, 视复电阻率的公式为

$$\rho_s(i\omega) = K \cdot \Delta \bar{U}(i\omega) / \bar{I}(i\omega),$$

式中 K 为装置系数。观测的振幅为视复电阻率, 观测的相位移是视复电阻率的相位角(称视相位), 其中视相位与频率和激电效应有关, 复电阻率类似于直流电法中的等效电阻率。对于相位, 一定的频率, 激电效应越强, 相位移(绝对值)越大; 反之, 激电效应越弱, 相位移越小。因此, 在一个适当的频率上做复电阻率和相位观测, 就能反映观测范围内的电阻率和激电变化。

2 野外工作方法

野外工作采用三极观测装置, 其方法为: 在剖面的中心沿垂直测线的方向布置无穷远极 B ($BO > 5AO$), 在测量剖面上逐次移动供电电极 A ; 测量时, 供电电极 A 每移动一次, 所有接收电极 MN (除靠近供电点处的两道) 都观测一遍, 要保证每一个接收点处的最大 AO 均大于 1.5 倍的探测深度。图 1 为工作方法示意。

由于本次工作要求在封土堆上的探测深度较大(大于 100 m), 而常规高密度电法的探测深度无法达到。为满足探测深度大、分辨率高的试验要求, 采用了频率域的供电系统和三极测量装置观测系统, 且在测量过程中, 接收极距 MN 大小始终固定不变(而常规高密度电法温纳和四极装置, 由于 MN 随供电电极距 AB 的增大而增大, 使得深部分辨率变低)。

收稿日期: 2004-03-14

基金项目: 国家 863 项目资助(2002AA132012)

为获得大的供电电流,供电电极采用人工跑极,虽降低了工作效率,但保证了深部测量数据的质量。

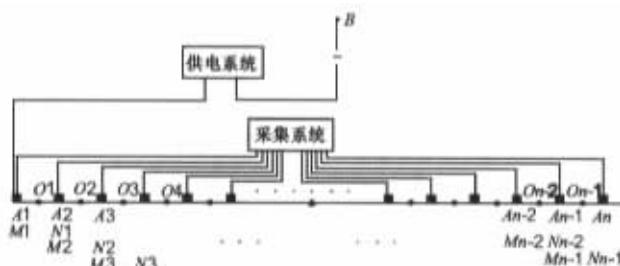


图1 高密度相位激电法工作方式示意

3 方法试验和试验效果^①

3.1 工区环境与物性前提

测区位于秦陵园内封土堆上。陵园座落在骊山北麓斜坡上,临马公路穿过陵园区。封土堆为典型的三维山地地形。现存封土堆高出地面 40 多米,南北长 350 m,东西宽 345 m。封土堆基本由夯土构成,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,导致了封土堆电阻率的不均匀。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)。最主要的是,土中的空洞(或石质墓室)与土的电阻率存在巨大差异,为使用电阻率法勘查未坍塌墓室提供了良好的物性前提。

3.2 工作布置和技术参数

本次高密度电法试验工作共安排 6 条剖面,这

些剖面均穿越秦陵封土堆,其中 1-2、2-2 剖面为穿过封土堆中心区的 2 条正交剖面。野外工作采用三极装置,技术参数为:无穷远极距离为 1 500 m,供电点间距均选用 10 m,接收极距 MN 均为 10 m,工作频率为 0.125 Hz,发射波形为方波。

3.3 试验结果

图 2、图 3 分别为 1-2、2-2 剖面的频率域高密度电法地宫探测的试验结果,其中的正演拟合断面是在有深度约束条件下的拟合结果。由于本次工作需要较小接收极距 MN,以提高分辨率,而较小的 MN 会使测量结果受到地表不均匀体的影响,加之地形影响及三极装置视电阻率断面本身的复杂性,使实测视电阻率断面异常很不直观。但是,在二维反演电阻率断面和二维正演拟合模型电阻率断面中,封土堆下的电性特征层次分明,地宫异常清晰可见。

从 2 条二维反演电阻率断面上看,各剖面在封土堆表层均有一层 5~10 m 厚的相对高阻层,其电阻率均在 55 Ω·m 以上,且表现为电阻率值南高北低、东高西低的特点,其原因为封土堆表层土(或夯土)所含的砂砾成分不同和其干湿程度不同所致。剖面下部在高程为 440~400 m 层段,电阻率值基本在 40 Ω·m 以下,电阻率变化平稳,无明显异常,依据岩芯样品采集结果,该层为原生(亚)砂土层。而在剖面中部层段均有明显的异常显示。

从图 2 中二维反演电阻率断面可看出,1-2 剖面

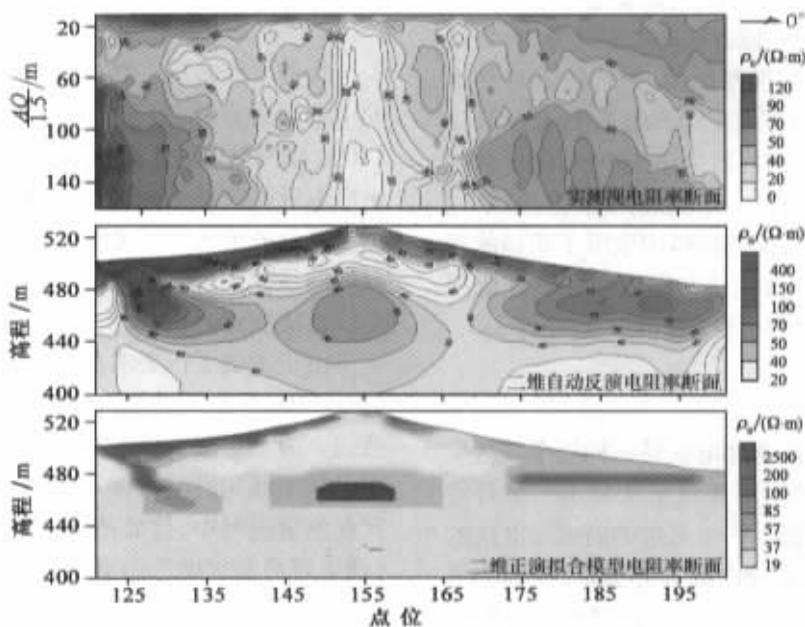


图2 1-2 剖面高密度电法二维解释成果

① 刘士毅. 国家 863 项目“考古地球物理综合探测技术”第一期工程总报告. 2003.

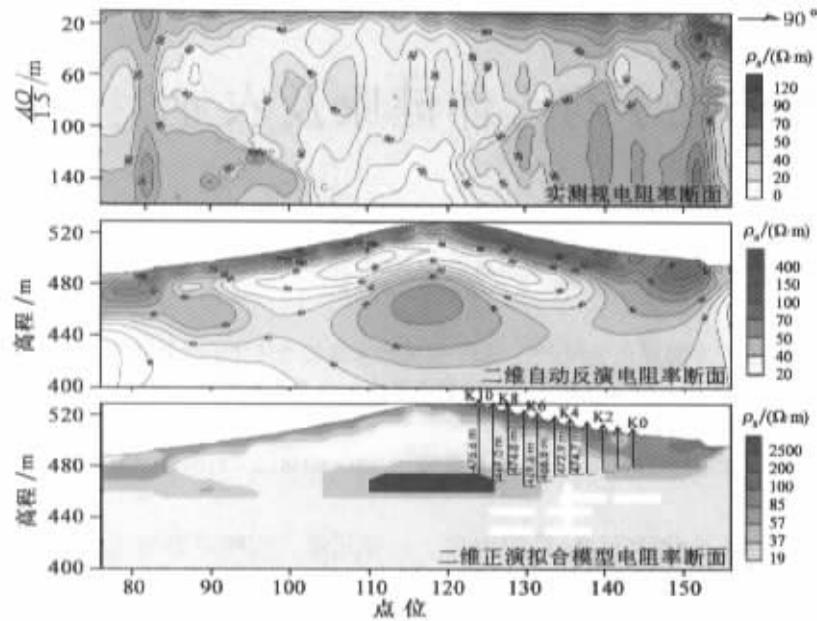


图3 2-2剖面高密度电法二维解释成果

在149~159点、高程440~485 m部位上地宫墓室明显表现为宽约50 m、高约45 m的高阻异常;在其上部和两边的低阻为夯土反应;南端124~130点高阻异常为砂砾石反应(根据该结果在127点布孔验证,结果得到证实),北端172~201点的高阻异常为火烧陪葬坑群引起。从图2的二维正演拟合模型电阻率断面可看出,在1-2剖面,地宫墓室范围为149~159点,中心位于154点,宽约50 m;墓室顶位于高程475 m,底位于高程460 m,墓室高约15 m。

从图3的二维反演电阻率断面可看出,2-2剖面在109~127点、高程430~485 m的部位,地宫墓室明显表现为宽约90 m、高约55 m的高阻异常;在其上部和两边的低阻为夯土反应。从图3的二维正演拟合模型电阻率断面可看出,地宫墓室范围为110~126点,中心位于118点,宽约80 m;墓室顶位于高程475 m,底位于高程460 m,墓室高约15 m。

2个剖面的高阻异常说明地宫不仅存在,且没有坍塌、充水。这是因为坍塌和充水的地宫应呈现出弱电阻率异常或低阻异常,空心的地宫才会呈现出明显的高阻异常。反演电阻率断面中地宫墓室部位呈现的高阻异常并不像人们想象的那样大,一是由于二维技术解释三维问题会弱化异常,二是由于反演过程中模型参数的圆滑处理所致。

为证实本次试验结果,秦陵考古队在封土堆东坡沿2-1剖面(由于2-1剖面穿过障碍物,在实施物探测量时对其进行平移至2-2剖面)进行了洛阳铲孔探工作(图3),第8、9、10号孔(推断地宫墓室处)先后在

475 m和469 m海拔高程附近见到了青石板,初步证实了墓室为石质结构的推断。墓室为石质结构,不易坍塌,因而间接证实了墓室完好性的推断。

根据1-2、2-2剖面的试验结果,得出初步结论:秦始皇陵地宫存在,地宫墓室未坍塌、未进水,基本可确定墓室为石质结构,在其四周和上部为夯实的夯土掩埋;初步确定地宫墓室位于封土堆中心的下方,埋深位于高程460~475 m,其规模为:东西宽约80 m,南北宽约50 m,高约15 m。初步验证了人们对地宫墓室的存在性、埋深、大小等的推测。

然而,由于本结果为试验性的初步结果,试验工作量小(仅为剖面测量),数据量不满足三维解释技术的要求。采用的二维解释技术,一方面无法完全消除封土堆—典型三维地形的影响,另一方面弱化了三维目标体—地宫墓室的异常,会使定量解释结果产生一定的解释误差,因此,本次试验结果肯定会存在一定误差,仅供参考。

4 结语

频率域高密度电法是探测秦始皇陵地宫的一种有效方法,具有分辨率高、探测深度大、参数多等特点,在未来的金属矿勘查、考古等领域中会大有作为。作为新方法技术,该方法在许多方面尚需完善,特别是激电相位解释技术缺乏合适的反演软件是一个遗憾,需要进一步研发;另外,尚需要改进和完善野外方法技术,提高工作效率。

下转 332 页

Mo、B、Zn 对农作物生长有促进作用,在 Mo、B、Zn 贫乏区适当施用钼、硼和锌肥,是提高农作物产量的有利措施。如钼肥主要用于豆科植物,能促进根瘤菌的生长,把空气中的氮固定下来。硼肥对油菜生长有利,可促使开花结果。锌肥可促使水稻生长,增加果实的饱满度。

在缺钙区多施石灰可改变土壤结构,提高农作物产量。铅对农作物有害,含铅过高的食物对人体有害,在铅过剩区应注意改良土壤,降低铅含量。

4 结语

必须深入研究元素分布特征和规律,以及环境地球化学特征与人体健康及农业生产有密切的关系,才能提出有效的对策,创造一个有益于人类生存的良好环境。

文中资料引自河南省地质矿产勘查开发局韩存强高级工程师等《1: 20 万河南省桐柏—信阳一带区域地球化学调查报告(1988)》,在此致谢。

THE RELATIONSHIP OF ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY TO HUMAN HEALTH AND AGRICULTURAL PRODUCTION

JIANG Jian-qiang

(No. 3 Geological Party, Henan Bureau of Geology and Mineral Exploration, Xinyang 464000, China)

Abstract: Through regional geochemical survey in Xinyang-Tongbai area, geochemical data of more than 40 elements were obtained. The report of geochemical survey extensively includes characteristics and distribution and concentration regularities of these elements. The relationship of environmental geochemistry to human health and agricultural production is also discussed in this paper.

Key words: environmental geochemistry; human health; agricultural production

作者简介: 蒋建强(1956 -)男,湖南茶陵人,1980年毕业于武汉地质学院区域地质专业,工程师,从事一线地质工作及研究。

上接 329 页

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.
- [2] 罗延钟, 张桂青. 频率域激电法原理[M]. 北京: 地质出版社, 1988.

THE TENTATIVE APPLICATION OF THE FREQUENCY DOMAIN HIGH DENSITY ELECTRIC METHOD TO THE DETECTION OF THE UNDERGROUND PALACE UNDER QIN SHI HUANG'S TOMB

WANG Shu-min^{1,2}, MENG Xiao-hong¹, LI Ru-chuan^{1,2}, LEI Da^{1,2}, FANG Hui^{1,2}, SUN Hong-yan^{1,2}, ZHAO Fu-gang²
(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Exploration Geophysics Open Laboratory of Institute of Geophysical and Geochemical Exploration CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: The tentative application of the frequency domain high density electric method to the detection of the underground palace under Qin Shi Huang's tomb turns out very effective. The work has not only proved the existence of the underground palace but also detected its location, size and buried depth. In addition, its completeness has been demonstrated.

Key words: frequency domain high density electric method; Qin Shi Huang's tomb; electric resistivity

作者简介: 王书民(1963 -),男,中国地质科学院物化探所高级工程师,多年来一直从事电磁法方法技术研究和应用工作。