



戴田宇, 谢尚平. 2015. 高密度电阻率法在墓葬考古的应用. 地球物理学进展, 30(6): 2885-2891, doi:10.6038/pg20150657.

DAI Tian-yu, XIE Shang-ping. 2015. Application of resistivity technique in the relic archaeology. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 30(6): 2885-2891, doi:10.6038/pg20150657.

高密度电阻率法在墓葬考古的应用

Application of resistivity technique in the relic archaeology

戴田宇, 谢尚平*

DAI Tian-yu, XIE Shang-ping*

东华理工大学核工程与地球物理学院, 南昌 330013

East China Institute Of Technology College, Nanchang 330013, China

摘 要 出于对文物保护的需要, 野外考古需要使用不损害文物的探测技术, 因此不会使地下文物受损的地球物理考古是考古调查的一个必然发展方向. 本文以江西某墓区为研究对象, 运用高密度电阻率法重点探测墓区的古遗址和古文物的分布和赋存区域, 介绍了高密度电阻率法的方法原理、方法特点、数据采集和数据处理, 并对数据进行了解释. 通过这次探测研究, 得到了一些重要考古成果, 查明了墓葬封土分布区域和墓葬的结构与墓道分布, 并且调查出了可能出现的陪葬墓、陪葬坑、墓园建筑、陵寝设施及其位置, 为进一步的考古探测和发掘提供了重要依据.

关键词 高密度电阻率法; 考古; 反演; 文物保护

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg20150657

Abstract For the need of protection cultural relics, the archaeological on the field investigation nondestructive detection technology. The geophysics archaeological will not make the underground cultural relics damage which archaeology survey a inevitably development direction. This thesis is based on one relic in Jiangxi, it used the high-density resistivity technique. The emphases is on the archaeology field which is located in the region of ancient cultural relic. This thesis introduced the high-density resistivity method principle, method features, data acquisition and data processing, and the data was explained. It had received a set of archaeology importance exploration results through the research on this application of exploration in its site, and marked the regional distribution and the structure of burial and the distribution of the pyramid-shaped mound, and to investigate the possible kinds of the tomb, located, cemetery architecture, the catacombs facilities and its place, which provide important gist to the more archaeology exploration and digging.

Keywords high-density resistivity technique; archaeology; inversion; cultural relic protection

0 引 言

出于对文物保护的需要, 野外考古要求无损的调查探测技术, 因此不会使地下文物受到损害的地球物理考古是考古调查的一个必然发展方向. 地下的考古遗存通常与其周围介质存在一定的物性差异, 这就为应用地球物理方法进行考古调查奠定了基础. 如夯土的密度、电导率、介电常数、及磁导率等和周围的介质存在差异. 根据考古遗存和周围介质在电性、磁性、放射性元素含量、地震波阻抗等方面的差异, 可使用高密度电阻率法、磁法、地震勘探、探地雷达、放射性勘探等多种地球物理方法进行探测(钟世航, 2004). 其中高密度电阻率法是勘探此类遗迹的有效方法之一.

1 国内外研究现状与趋势

地球物理考古起源于欧洲, 第二次世界大战后广泛得到应用, 逐渐成为考古的有效手段, 并且收到考古学家的关注. 目前, 地球物理考古已被世界各国使用, 特别是德国、英国、法国、意大利等欧洲国家, 美国其历史较短, 虽然起步较晚, 但发展较快, 并且具有相对其他国家更加精良的探测设备. 由近几年国外文献来看, 地球物理考古的主要方向是综合地球物理和三维地球物理考古.

我国在地球物理考古方面并不相对较晚, 从发表的文献来看, 大多为缺乏系统的理论研究的简单应用. 自 20 世纪 80 年代起, 地球物理技术才在我国考古领域得到重视. 2002 年, 中国地质调查局主持, 利用地球物理和遥感技术对秦始

收稿日期 2014-12-18; 修回日期 2015-05-26.

投稿网址 <http://www.progeophysics.cn>

基金项目 国家自然科学基金项目(41104073、41364004)、江西省自然科学基金项目(2010GQS0002)和国家高技术研究发展计划(863)(2012AA09A404)联合资助.

作者简介 戴田宇, 男, 1989 年生, 江西九江人, 东华理工大学在读研究生, 主要从事固体地球物理研究. (E-mail: daitianyu@163.com)

*通讯作者 谢尚平, 男, 讲师, 1975 年生, 主要从事勘查地球物理专业方面的教学和科研工作. (E-mail: 272488973@qq.com)

皇陵地下文物的调查,是我国首次纳入国家“863 项目”的地球物理考古工作(刘士毅等,2004;段清波,2005).它集中了电法、磁法、地震、重力及探地雷达等地球物理方法,取得了一批有价值的成果.

地球物理考古具有远大的前景和应用价值,但还不能完全达到考古需求,如多解性、环境干扰等.这就需要对地球物理考古从事更多的调查实践及理论研究.

2 高密度电阻率法的基本原理

2.1 方法原理

高密度电阻率法是通过地下半空间中传导电流的分布规律进行研究,获取地下介质电阻率,从而进行勘探的,许多的考古目标和周围介质都存在着电阻率差异,如古城墙、古河道、墓室、墓道,根据不同的电阻率值判断不同的考古目标.

高密度电法数据采集时,通过程序的控制,每次选择电极阵中四个电极作为 A 、 B 供电电极和 M 、 N 测量电极,仪器自动测量 AB 间的供电电流 I 和 MN 间的测量电位 ΔV . 根据下列公式计算出视电阻率为

$$\rho_s = k \frac{\Delta V}{I}, \quad (1)$$

其中 k 为装置系数,由 A 、 B 、 M 、 N 电极的位置和装置类型所决定.高密度电阻率法用于考古时,根据地表和探测目标的深度、大小、产状等因素,选取最适合的电极排列的类型探测,主要的野外考古时比较常用的有,温纳 α 排列、温纳 β 排列和温纳 γ 排列(林金鑫,2011).图 1 为三种排列示意图,温纳 α 排列即普通的温纳排列,两个测量电极 M 、 N 位于两个供电电极 A 、 B 之间,并且 $AM=MN=NB$.温纳 β 排列又叫双偶极排列,事实是轴向偶极排列即四个电极按 A 、 B 、 M 、 N 的顺序排列,且 $AB=BM=MN$,温纳 γ 排列中的电位电极 A 、 B 和测量电极 M 、 N 交替排列,且 $AM=MB=BN$.从而得出视电阻率关系式,即

$$\rho_s^\gamma = \frac{1}{3} \rho_s^\alpha + \frac{2}{3} \rho_s^\beta, \quad (2)$$

式中 ρ_s^α 、 ρ_s^β 、 ρ_s^γ 分别为 α 、 β 、 γ 三种电极排列测量所得的视电阻率,当已知其中任意两种排列的视电阻率值时,通过式 2.2 便可计算第三种排列的视电阻率值.

2.2 数据采集

高密度电阻率法在野外数据采集时方式有两种,一种是地表剖面数据采集,另一种是井中电阻率成像数据采集,后者又包含有单孔和跨孔两种方式.高密度电阻率法采用的主要电极排列方式有温纳四极排列、联合三极排列、偶极排列和微分排列.高密度电阻率法基本以这四种排列方式为主,但也各有特点,电极排列即可联合使用,也可根据需要单独使用.

野外数据采集是在确定排列方式与采集参数后通过高密度电阻率主机控制多路电极转换器通过电极系完整断面数据自动采集(图 2).数据采集完成后,通过通讯程序将原始数据转入计算机进行数据处理、二维反演后输出二维地电断面(于维刚等,2009).

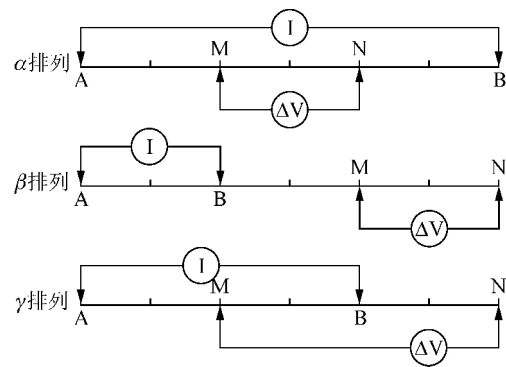


图 1 三种排列示意图

Fig. 1 There kinds of schematic diagram

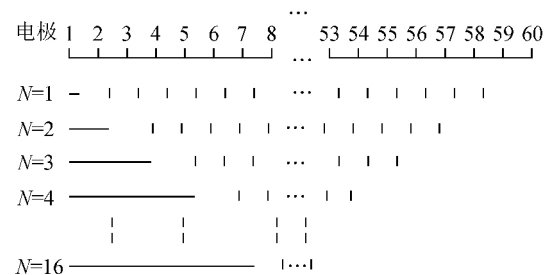


图 2 高密度电阻率测量系统断面扫描测点示意图

Fig. 2 The schematic diagram of high-density resistivity system section scanning survey point

2.3 数据处理技术

高密度电法资料处理采用 RES2DINV 高密度电阻率数据二维反演软件反演数据,反演采用最小二乘反演技术,对于地质情况较复杂区域,使用二维图像进行勘探.此软件是用地面上测得的电阻率数据绘制地下的二维模型,它的处理过程是全自动化的,不需要提供初始模型.该软件通过对原始数据进行多次地形改正,最大程度降低了地形的影响.迭代次数 3~5 次, $RMS < 10$. 其大致处理流程为三步:第一步,原始数据编辑和整理;第二步,选取合理的反演参数进行反演;第三步,提取反演数据进行地形改正,最终得到反演电阻率剖面图(王广仓和董延朋,2008).

3 墓葬区概况及地球物理特性

3.1 项目概况

该墓葬区位于江西,雨水充沛、光照充足,气温变化较大,降水分布不均.属于低矮丘陵区,通过相关资料的查阅,并结合实际的工作情况,分析得到该工区的主要介质为第四系松散堆积层、封土、建造墓葬建筑材料、陵寝及陵园建筑倒塌所形成的堆积物、近现代墓葬等.

使用高密度电阻率法进行探测工作,高密度电法采用偶极-偶极装置,26 个排列,剖面长度 3274.5 m,60 个电极,电极距 2 m,测线距 5 m.如图 3 所示.

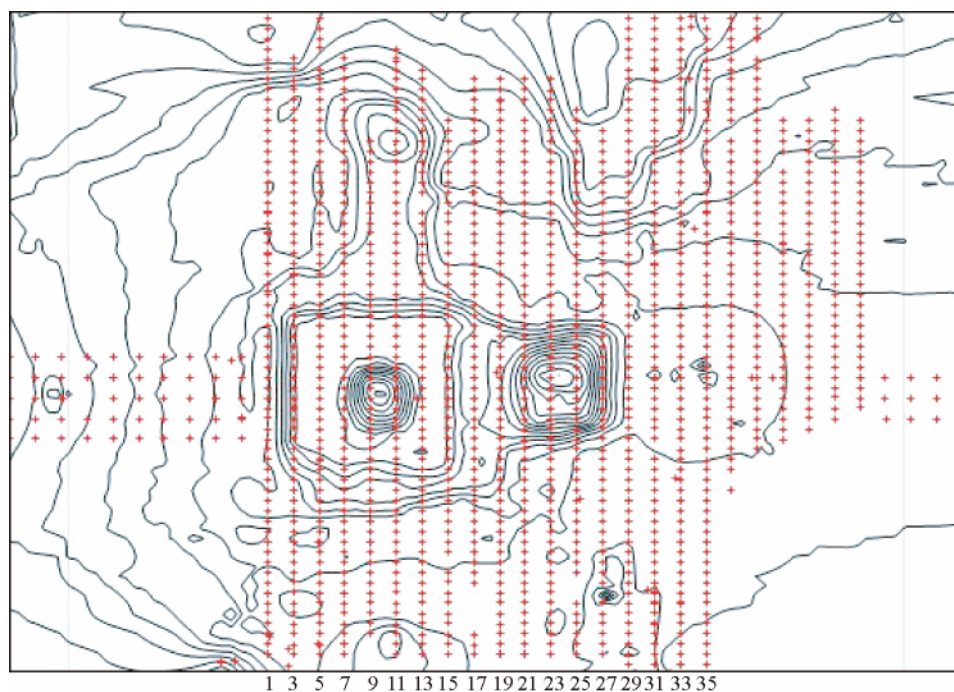


图 3 探测工区测线布置图

Fig. 3 The survey line map of the work area

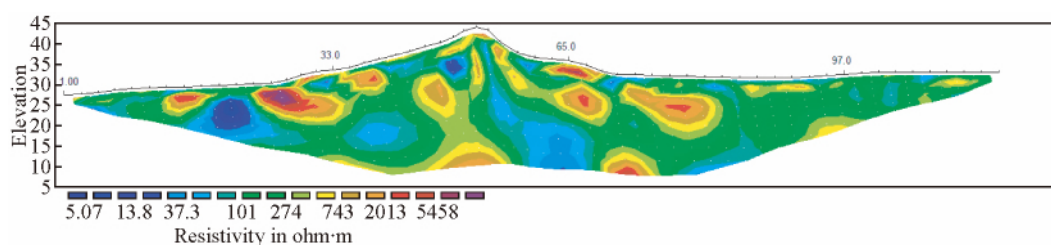


图 4 9 号测线高密度电阻率反演结果剖面图

Fig. 4 The high-density resistivity inversion results section of No. 9 survey line

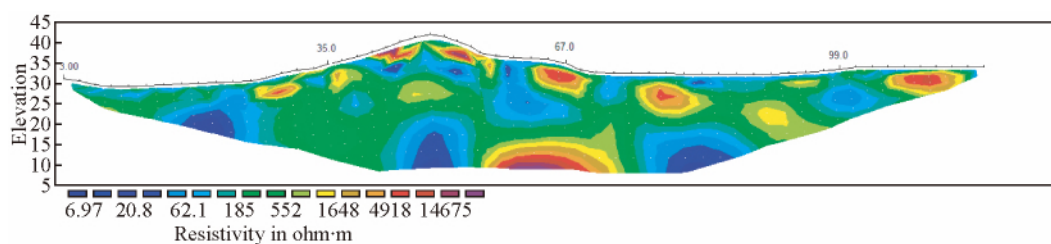


图 5 11 号测线高密度电阻率反演结果剖面图

Fig. 5 The high-density resistivity inversion results section of No. 11 survey line

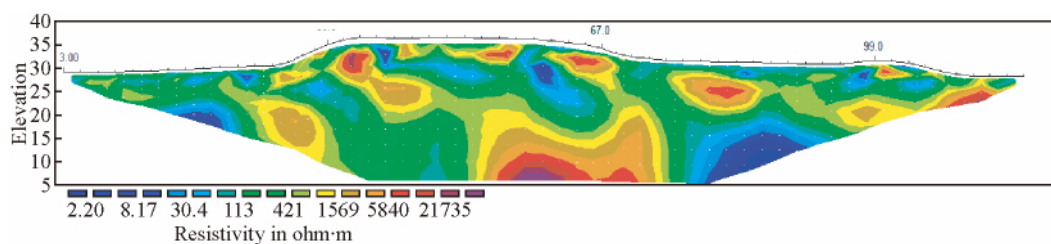


图 6 13 号测线高密度电阻率反演结果剖面图

Fig. 6 The high-density resistivity inversion results section of No. 13 survey line

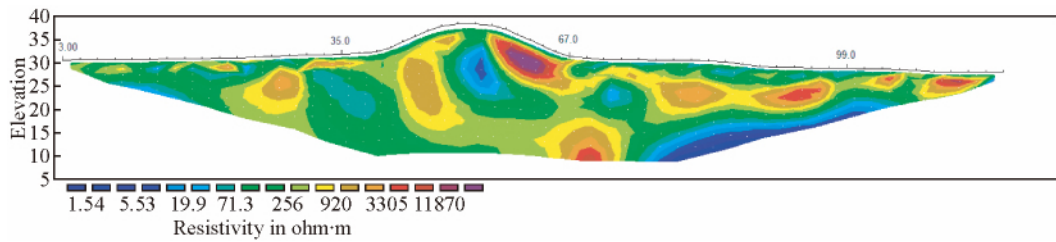


图 7 21 号测线高密度电阻率反演结果剖面图

Fig. 7 The high-density resistivity inversion results section of No. 21 survey line

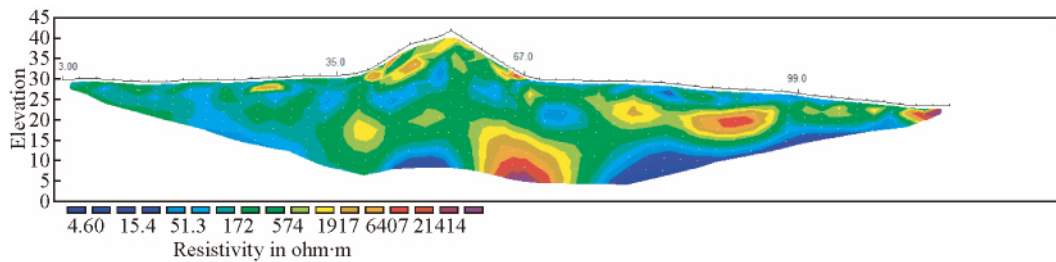


图 8 23 号测线高密度电阻率反演结果剖面图

Fig. 8 The high-density resistivity inversion results section of No. 23 survey line

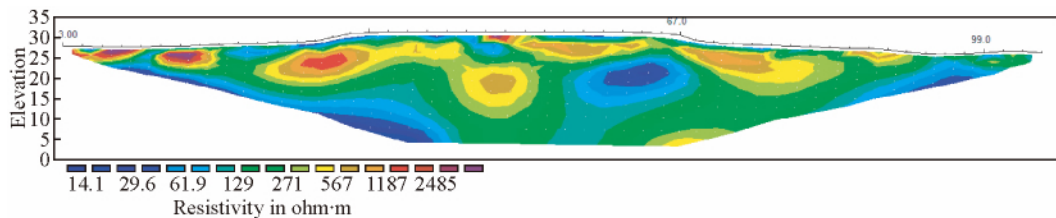


图 9 17 号测线高密度电阻率反演结果剖面图

Fig. 9 The high-density resistivity inversion results section of No. 17 survey line

3.2 地球物理场特征分析

人工建造的墓道、墓葬、封土,和建造过程中对原生土(地层)产生的扰动引起的地下介质物理性质的变化是开展考古地球物理勘探的物理基础。

工作区内有效深度范围内的介质,电阻率均不高。介质的电阻率性质与含水量、孔隙度相关,一般含水量高、孔隙度大的电阻率相对较小。如果墓室与墓道充水,其电阻率应该相对于周围介质较小;坍塌的陵园建筑,经过长期风化与堆积压实,其电阻率性质可能与周围介质相差不大;陵园中夯土施工遗迹及陪葬坑,由于其密实程度较高,将形成较高电阻率(高立兵等,2004;杨宏智和吕小红,2008)。

4 高密度电法在该墓葬区的探测分析

4.1 探测结果分析

从图 4 中,由测线中间地形隆起处向下,呈现中间低阻,两边电阻率较高。如果墓道充水,应具有相对周围介质较小的电阻率。此墓葬可能曾经被挖掘过,因此中间低阻带推断

为墓葬的墓室或盗洞。而上半段低阻区宽度较窄,下半段低阻区宽度较宽,因此判断为墓室。墓室左侧测小块圆形低阻区推断为盗墓坑洞。

图 4、图 5、图 6 中,9 号测线、11 号测线、13 号测线,地下浅部均具有 4 处高阻带,分别大致分布在测线的 33 m、53 m、67 m、79 m 处。陵园内夯土施工遗迹,包括陪葬坑,墓道中的阶梯围墙倒塌,使其密实程度较高,相对周围区域呈现较高的电阻率。并且由于其延伸较长,形状类似墓道,因此 4 处高阻带推断为 4 个宽约 5 m 的墓道。

图 5 和图 6 中,地下深部 15 m 以下出现中间高阻,两旁电阻率较低,范围较大,并且分布范围处于地形凸起区域的下面,因此判断为墓葬的主墓室,从图中估算出其墓室宽约 12 m。两图中地表附近均存在多个小低阻区域,推测是墓葬的盗墓坑洞。

在图 7 中,21 号测线 40 至 67 m 处有一高阻带,位于该条测线的凸起处,推测为墓葬封土。中间被一个小低阻区断开,此小低阻区推测为盗洞。

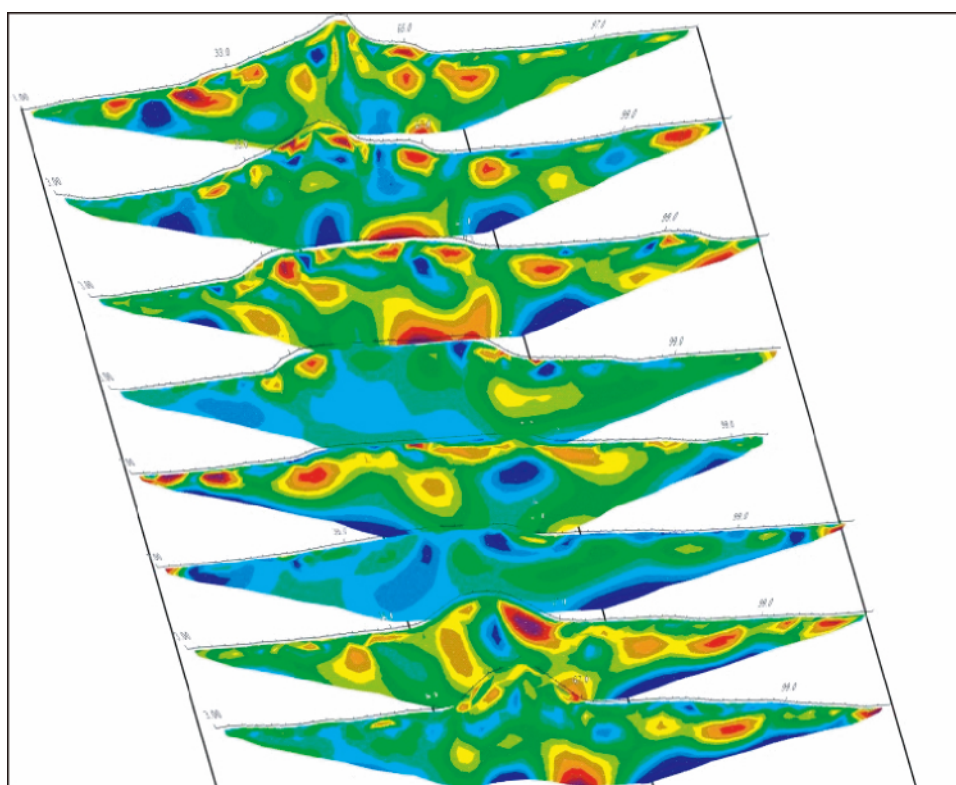


图 10 9~23 号测线三维空间示意图

Fig. 10 The 3d schematic diagram of No. 9~23 survey line

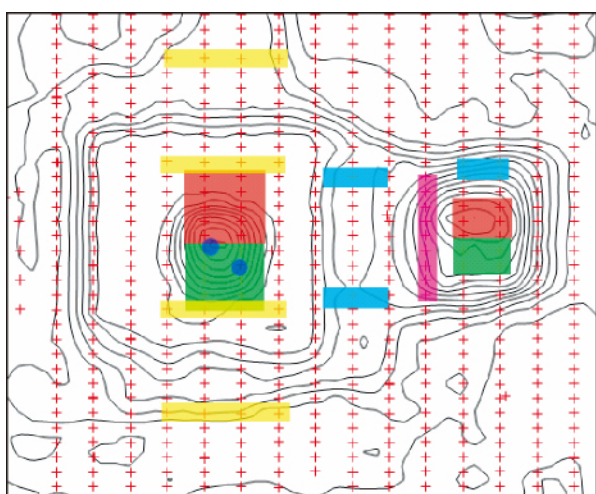


图 11 墓葬结构平面示意图

Fig. 11 The plane sketch of relic

图 7 和图 8 中,地下深部 15 m 以下均呈现两边低阻,中间高阻,范围较小,再根据地形也处于一凸起部位,因此分析判断为墓葬的陪葬墓。陪葬墓相对于主墓室的规模较小,宽约 8 m。右侧 77 至 95 m 均存在一高阻区域,根据一般墓葬结构推测为陪葬坑。

15 号至 19 号测线整体电阻率较平均,坍塌的陵园建筑

经过长期风化与堆积压实,所以其电阻率性质与周围介质相差不大。根据地形发现,15、17、19 测线位于地形两隆起处之间,地面较为平坦。图 9 中,17 号测线 55 至 67 m 处存在一低阻区,左侧存在一高阻区,两处形状相似,并且对称分布,又在两墓室之间,因此判断左右两侧为陪葬坑,左侧陪葬坑保存较为完整,产生相对高阻异常;而右侧陪葬坑有水充填,显示相对周围介质较小的电阻率。

4.2 墓葬结构的确定

通过对各测线的探测结果综合分析,可以比较准确地确定墓葬的结构位置。

将 9、11、13、15、17、19、21、23 测线探测结果剖面图处理为三维图像。如图 10 所示。

在图 10 中,可以很直观的看出主墓室的位置在 11~13 号测线范围内 59~71 m 处,同样直观的看出陪葬墓位于 21~23 号测线 61~69 m 处,封土位置为 21 号测线 40~67 m,主墓室与陪葬墓之间有两处陪葬坑,并以东西向延伸至封土位置,更证明了推测的可靠性。

经过综合测线解释,并结合地形以及一般墓葬特征,得到测区内墓葬结构平面示意图。如图 11 所示。

图 11 中,蓝色圆形表示两处盗墓坑洞;四块黄色区域表示主要墓道;三块浅蓝色区域表示三处陪葬坑;左边红色区域表示主墓室,右边红色区域表示陪葬墓;紫色区域表示墓葬封土。由于墓葬多以对称结构为主,并结合地形,推测左边绿色区域可能为已经坍塌的主墓室,右边绿色区域可能为已经坍塌的陪葬墓。

5 结 论

本文通过使用高密度电阻率法对该墓葬区进行探测, 出了一批重要的探测成果, 成功地查明了墓葬封土的分布区域、墓葬的结构与墓道分布及可能出现的陪葬墓、陪葬坑及其位置, 为进一步的考古探测和发掘提供了重要的依据. 通过本次考古探测, 得出了以下结论:

(1) 通过探测和资料处理分析, 查明了该墓葬结构以及墓道分布.

(2) 高密度电阻率法是勘探这类遗迹的有效方法之一, 这个方法的显著优点是它不会对古墓葬造成任何损坏.

(3) 墓室和墓道在高密度电法勘测中体现为高阻反映, 但是其间也由于地表干扰因素的影响, 形成个别的假异常. 因此, 如何在现场排除干扰和在数据处理中提取有效信息十分关键.

(4) 由于各种地球物理考古方法的应用效果不仅受到物性差异的大小及考古目标的规模限制, 还同样受到遗址所处环境, 如土壤类型、含水量、地质条件和现代人工建筑的影响, 使得同一种地球物理方法在某同一目标显示不同的异常, 如上面分析的 17 号测线两处陪葬坑, 所以要具体问题要具体分析.

致 谢 感谢审稿专家和编辑部的支持和帮助.

References

- Di Q Y, Wang M Y, Yan S M, *et al.* 1997. The Application of the high density resistivity method for the seawave-proof dam in Zhuhai-harbour [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 12 (2): 79-88.
- Duan Q B. 2005. The geophysical exploration on the Mausoleum of emperor Qin Shihuang—The new archaeological discovery of the national 863 Hi-tech project [J]. *Journal of Northwest University (Philosophy and Social Sciences Edition) (in Chinese)*, 35(1): 80-86.
- Feng D S, Dai Q W, He J S, *et al.* 2006. Finite difference time domain method of GPR forward simulation [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 21(2): 630-636.
- Gao L B, Yan Y L, Di Q Y, *et al.* 2004. Application of ERS in the archaeological prospecting of the Eastern Zhou City-site at Shangqiu [J]. *Archaeology (in Chinese)*, 23(7): 72-78.
- Jiang H Y, Zhang L M. 2000. *Archaeogeophysics [M]* (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Lin J X. 2011. The feasibility study of comprehensive archaeogeophysics [D] (in Chinese). Hangzhou: Zhejiang University, 57-58.
- Lin J X, Tian G, Shi Z J. 2014. Geophysical prospecting study of the satellite tomb in Xixia mausoleum site [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying (in Chinese)*, 42(7): 87-93.
- Liu G X. 2005. *Electrical Prospecting Principle and Method (in Chinese)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 63-74.
- Liu S Y, Yuan B Q, Lv G Y, *et al.* 2004. Application of the integrated geophysical methods in exploration of the underground palace of emperor Qinshihuang mausoleum [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese)*, 1(3): 213-219.
- Lü H J, Liu S H, Liu B G. 2005. Application of resistivity tomography survey method in detecting ground subsidence [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 20(2): 381-386.
- San D. 2011. Application of ground penetrating radar and surface

wave exploration technology to archaeological survey [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese)*, 8(3): 339-343.

- Shen H Y, Yuan B Q, Xiao Z X, *et al.* 2008. Geophysical exploration for archaeology in the ancient city of Jinyang, China [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 23(4): 1291-1298.
- Su Y J, Wang X B, Luo J Q. 2007. The archaeological application of high-density resistivity method to ditch exploration on Sanxingdui site [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 22 (1): 268-272.
- Wang C L, Chen S X, Li Z F, *et al.* 2013. Magnetic surveying experiment of ancient smelting relics in Tonglushan [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese)*, 10(3): 320-326.
- Wang G C, Dong Y P. 2008. Topographic correction of high density resistivity data [J]. *Equipment for Geotechnical Engineering (in Chinese)*, 9(3): 35-38.
- Wang Q S, Zhou W H, Wu C Z, *et al.* 1995. The application of microgravimetry in archaeological engineering — prospecting of underground palace of Mao Ling mausoleum of Ming dynasty [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 10(2): 85-94.
- Wei Q Y, Li D J, Cao G Y, *et al.* 1980. Archaeomagnetic research of Jiangzhai relic, neolithic epoch [J]. *Acta Geophysica Sinica (in Chinese)*, 23(4): 403-414.
- Yang H Z, Lv X G. 2008. Application of high density electrical and high precision magnetic method in archaeological field [J]. *North China Earthquake Sciences (in Chinese)*, 26(3): 57-59.
- Yang L R. 2005. The application of high-density resistivity technique to archaeological [D] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology, 2-3.
- Yao D Q, Shao J, Chen A G, *et al.* 2012. Vestige of prehistoric earthquake to be found in Yangshao site of Xinjie, Lantian County, Shanxi Province [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 27(2): 804-808, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.02.049.
- Yu W G, Liao Y K, He F L. 2009. High-density resistivity method in the application of cultural relics and archeology [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese)*, 6(S1): 92-93.
- Zhang L M. 1996. Investigation on the Chu-state tomb of Guling in the reservoir region of three-gorges project [J]. *Acta Geophysica Sinica (in Chinese)*, 39(5): 718-719.
- Zhang L Y, Yun H F. 2011. The application of ABP method in high-density resistivity method inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 54(1): 227-233, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.024.
- Zhang Y S. 1990. A preliminary discussion on the application of geophysical prospecting to archaeological exploration [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese)*, 14(6): 447-448.
- Zhong S H. 1991. New progress in applying geophysical exploration methods to protecting historical relics and to archeology [J]. *Acta Geophysica Sinica (in Chinese)*, 34(5): 635-643.
- Zhong S H. 2004. Application of geophysical technology for archaeology and preservation of cultural relics [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology (in Chinese)*, 16(3): 59-63.

附中文参考文献

- 底青云, 王妙月, 严寿民, 等. 1997. 高密度电阻率法在珠海某防波堤工程中的应用 [J]. *地球物理学进展*, 12(2): 79-88.
- 段清波. 2005. 秦始皇帝陵的物探考古调查——“863”计划秦始皇陵物探考古进展情况的报告 [J]. *西北大学学报 (哲学社会科学版)*, 35(1): 80-86.
- 冯德山, 戴前伟, 何继善, 等. 2006. 探地雷达 GPR 正演模拟的时域有限差分实现 [J]. *地球物理学进展*, 21(2): 630-636.
- 高立兵, 阎永利, 底青云, 等. 2004. 高密度电阻率法在商丘东周城

- 址考古勘探中的应用[J]. 考古, 23(7): 72-78.
- 蒋宏耀, 张立敏. 2000. 考古地球物理学[M]. 北京: 科学出版社.
- 林金鑫. 2011. 综合地球物理考古方法的应用可行性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 57-58.
- 林金鑫, 田钢, 石战结. 2014. 西夏陵陪葬墓的地球物理考古勘探研究[J]. 工程勘察, 42(7): 87-93.
- 刘国兴. 2005. 电法勘探原理与方法[M]. 北京: 地质出版社, 63-74.
- 刘士毅, 袁炳强, 吕国印, 等. 2004. 综合地球物理方法在探测秦始皇帝陵地宫中的应用[J]. 工程地球物理学报, 1(3): 213-219.
- 吕惠进, 刘少华, 刘伯根. 2005. 高密度电阻率法在地面塌陷调查中的应用[J]. 地球物理学进展, 20(2): 381-386.
- 闪迪. 2011. 探地雷达与面波勘探技术在考古调查中的综合应用[J]. 工程地球物理学报, 8(3): 339-343.
- 沈鸿雁, 袁炳强, 肖忠祥, 等. 2008. 晋阳古城遗址考古地球物理特征[J]. 地球物理学进展, 23(4): 1291-1298.
- 苏永军, 王绪本, 罗建群. 2007. 高密度电阻率法在三星堆壕沟考古勘探中应用研究[J]. 地球物理学进展, 22(1): 268-272.
- 王传雷, 陈树祥, 李兆锋, 等. 2013. 铜录山古冶炼遗址的磁法探测试验[J]. 工程地球物理学报, 10(3): 320-326.
- 王广仓, 董延朋. 2008. 高密度电阻率法数据的地形改正[J]. 地质装备, 9(3): 35-38.
- 王谦身, 周文虎, 武传真, 等. 1995. 微重力方法在考古工程中的应用——明茂陵地下陵殿探查[J]. 地球物理学进展, 10(2): 85-94.
- 魏青云, 李东节, 曹冠宇, 等. 1980. 新石器时代姜寨遗址的考古地磁研究[J]. 地球物理学报, 23(4): 403-414.
- 杨宏智, 吕小红. 2008. 高密度电法结合高精度磁法在洛庄汉墓考古中的应用[J]. 华北地震科学, 26(3): 57-59.
- 杨利荣. 2005. 高密度电阻率法在考古探测中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2-3.
- 姚大全, 邵晶, 陈安国, 等. 2012. 陕西蓝田新街仰韶遗址史前地震遗迹的发现和初析[J]. 地球物理学进展, 27(2): 804-808, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.02.049.
- 于维刚, 廖烟开, 何发亮. 2009. 高密度电阻率法在沉银考古中的应用[J]. 工程地球物理学报, 6(S1): 92-93.
- 张立敏. 1996. 三峡库区故陵楚墓探测[J]. 地球物理学报, 39(5): 718-719.
- 张凌云, 刘鸿福. 2011. ABP 法在高密度电阻率法反演中的应用[J]. 地球物理学报, 54(1): 227-233, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.024.
- 张寅生. 1990. 物探在考古勘探中的应用初探[J]. 物探与化探, 14(6): 447-448.
- 钟世航. 1991. 用物探方法解决文物保护和考古中的某些难题[J]. 地球物理学报, 34(5): 635-643.
- 钟世航. 2004. 我国考古和文物保护工作中物探技术的应用[J]. 文物保护与考古科学, 16(3): 59-63.