

# 综合地球物理方法在晋阳古城墙遗址 勘测中的应用研究

王天意, 杨进, 刘明, 闫天龙, 贾忠媛

(中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 为探明晋阳古城不同赋存类型城墙遗址的地球物理特征及遗存状态, 研究综合地球物理方法勘查古城墙的有效性及其最优组合方案, 为此采用磁法、高密度电阻率法、探地雷达法、 $\gamma$ 能谱法对晋阳古城三种不同类型的古城墙进行了勘查; 结合二维及三维的数据处理方法及显示手段对城墙遗址进行定性及定量描述; 探讨多方法勘查成果的集成解释方案, 并在此基础上总结出了不同类型城墙遗址的地球物理模型及相应的最优勘查方法组合: 对西城墙, 采用高密度电阻率法和探地雷达法; 对东南城墙, 采用磁法和高密度电阻率法; 对北城墙, 采用高密度电阻率法和探地雷达法。本研究结果可为晋阳古城遗址下一步的开发保护工作提供技术依据, 也可为同类探测工作的开展提供指导作用。

**关键词:** 综合地球物理方法; 考古勘查; 晋阳古城墙

**中图分类号:** P631; K854 **文献标识码:** A

DOI: 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2016.01.011

## 0 引言

地球物理方法因其无损、高效、可重复观测等优点在考古勘探工作中得到越来越广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。近年来, 为了满足考古工作日益科学化、系统化、精细化的要求, 考古地球物理已将常规的地球物理方法与一些高分辨率的地球物理方法如探地雷达、电阻率成像和地震折射等方法进行有机结合<sup>[3-8]</sup>。另外, 通过多学科交叉融合, 将地球物理学与土壤学、第四纪地质学、航空影像及地理信息等多学科进行集成, 充分利用多属性方法间相互补充、相互验证的关系, 系统研究地下埋藏物也是当前探测地下埋藏物的主要手段<sup>[9-10]</sup>。对勘查成果的解译也从传统的二维剖面、离散数据域, 逐渐发展到三维空间、连续数据域解释, 并将布尔运算、主因子分析、回归分析、属性分析等多种新的数学工具及技术手段引入其中, 结合三维显示技术, 大大提升了解译精度<sup>[11-12]</sup>。此次研究工作利用多地球物理方法对晋阳古城不同赋存类型的城墙遗址进行了精细探测, 在探测古城墙遗址分布的同时深入研究了不同类型城墙遗址的地球物理特征及相应的最优勘查方案组合。

## 1 研究背景

晋阳古城遗址位于山西省太原市晋源镇古城营村附近, 西依龙山和蒙山, 东傍汾河(图1)。始建于春秋中晚期(公元前497年), 毁于宋太平兴国四年(公元979年), 历经秦汉、三国、南北朝、隋唐、五代等, 距今已有2500多年的历史。晋阳城遗址层位叠压、遗存丰富, 具有十分重要的文物和历史价值<sup>[13-15]</sup>。对晋阳古城遗址进行的勘察、挖掘、研究工作自1961年开始, 至今已基本查明了城池遗址的四周范围、城建大致格局, 并从一定程度上证实了晋阳城被水淹火焚的历史。

出于科技考古的考虑, 沈鸿雁等于2007年采用高密度电阻率法与探地雷达相结合的手段对晋阳古城几处典型古文化层、古遗迹靶区进行地球物理试验性探测, 在晋阳古城部分遗址开展了试验剖面工作, 取得了较为丰富地球物理特征认识<sup>[16]</sup>。

在以上研究成果的基础上, 此次研究工作针对晋阳古城不同类型的古城墙进行了专门性的综合地球物理方法探测试验研究。

收稿日期: 2014-04-12; 修回日期: 2014-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助(41374133), 国家科技支撑计划资助(2009BAK53B01)

作者简介: 王天意(1982—), 男, 2011年毕业于石家庄经济学院, 矿产普查与勘探专业, 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院在读博士研究生, 研究方向为地球探测与信息技术, E-mail: sjzwty@hotmail.com

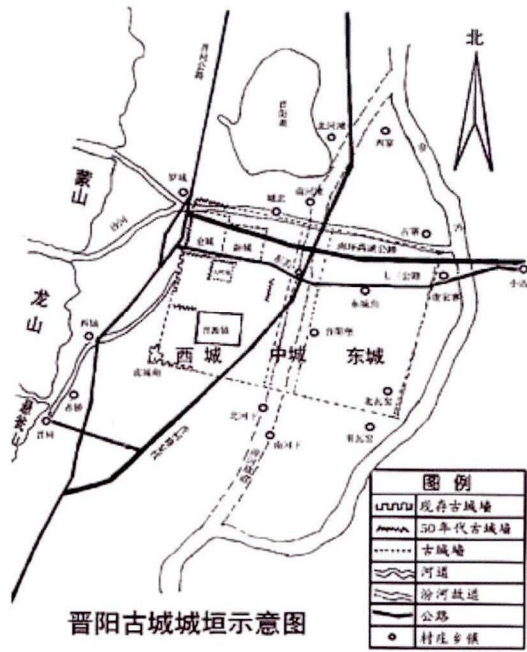


图 1 晋阳古城城垣示意图(据晋阳文史资料)

Fig. 1 Schematic diagram showing the ancient city walls of Jinyang (According to the cultural and historical data)

2 研究方案

晋阳古城墙遗址多数被毁、少量遗存、部分进入地下。结合相关文献及洛阳铲取样的分析结果,晋阳古城城墙在营造过程中,为当地取土并掺杂陶片、烧土颗粒等经多层夯实而成<sup>[17]</sup>,并在后期历经大火的高温煅烧及洪水的浸渍作用,以上原因使得古城墙遗址与周围介质存在着物性方面的差异,为综合地球物理方法的开展提供了物性前提。

根据城墙遗址的赋存形态不同,将研究的城墙遗

址分为三类(图 2),第一为西城墙研究区,赋存特点为埋深较浅,位于地下水位面之上,属于地表遗址向地下的延伸部分,保存较完整,该区布置了一条综合研究验证剖面;第二为东南城墙研究区,埋藏相对较深,且位于地下水位面之下,为兼顾研究城墙的延展性,在该区布置了两条对比研究剖面;第三为北城墙研究区,埋藏深度为中等,位于地下水位以下,且已为后期的河道所掩埋,河道人工挖掘现象较为严重,鉴于该段城墙可能呈断续存在,为防止单一剖面勘察的片面性,在该区处布置了 20m × 1m 网度面积性探测。

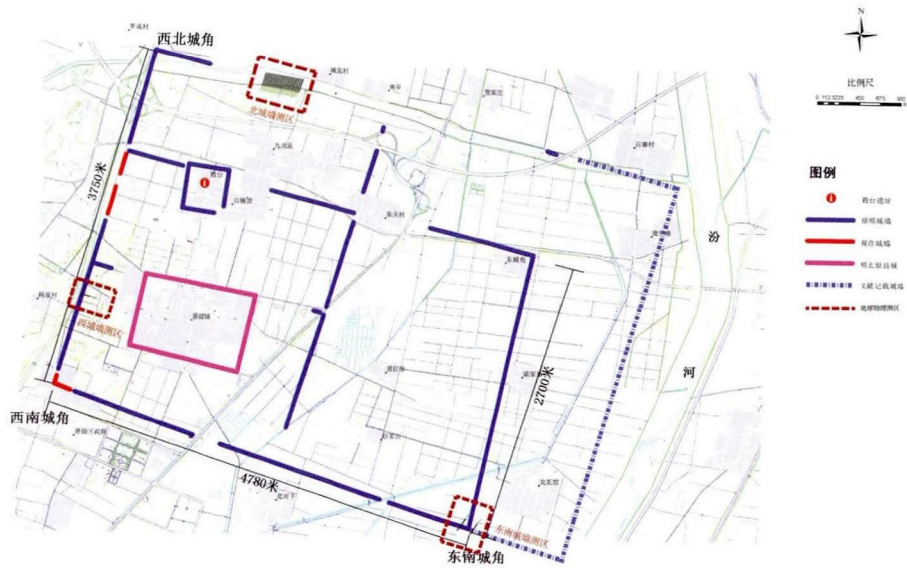


图 2 晋阳古城墙遗址研究区及研究剖面布设位置图

Fig. 2 Schematic diagram showing the study area and the research section at ancient city, Jinyang

3 地球物理方法与数据采集处理

磁法测量利用地下遗址与其周围介质存在磁性上的差异,在测点处观测地下总磁场,再通过计算分离出由地下古遗址引起的磁异常场<sup>[18~19]</sup>;高密度电阻率法基于地下介质电性特征不同,将直流电阻率剖面法与测深法相融合,通过电极自动转换器控制来获取二维垂向断面的电性信息,当地下有城墙或其它遗址存在时,会在电性断面图中反映出来<sup>[20]</sup>;探地雷达法通过向地下发射电磁波脉冲信号(10MHz~1.5GHz)在遇到介电常数及电导率不连续界面时发生反射,来达到探明地下介质构造的目的。其一般由主机,发射、接收天线三部分组成,当主机通过发射天线向地下发射电磁脉冲时,接收天

线即可接收到地下反射回来的电磁信号并将其传回到主机。此时,沿地表设计剖面天线,即可得到剖面下方  $X$ (天线拖动的距离)和双程走时(电磁脉冲经由发射天线/反射界面/接收天线的时)的二维时距断面,在断面图上可清晰地分辨古文化层、城墙、墓穴或其它古遗迹等<sup>[21]</sup>;  $\gamma$  能谱测量是一种天然放射性测量,主要依据天然放射性元素铀系、钍系和<sup>40</sup>K的  $\gamma$  射线能谱存在着一定的差异,选择不同的谱段进行能谱测量,从而推算出土壤中的 U,Th,K 含量,由于古城墙以与其上覆沉积地层的存在着放射性元素的差异,故可达到对古城墙的空间水平位置进行探查的目的<sup>[22]</sup>。在研究区开展多方法地球物理探测时,应用每种地球物理方法的具体采集参数及数据处理流程见表 1。

表 1 各类地球物理方法,仪器,采集参数,处理过程对比表  
Table 1 A comparison of the different methods, used equipment, specific parameters of the field survey, applied software and data process sequences of the multi-method survey

	磁法	高密度电阻率法	探地雷达	$\gamma$ 能谱
仪器型号	GSM-19T	E60M	SIR-3000	HD2002
采样间隔	西城墙	1m	0.02m	2m
	东南城墙	1m	0.02m	2m
采样网度	北城墙	20m×1m	20m×1m	40m×2m
处理软件	Encom MV	Res2DINV	ReflexW	Surfer
处理流程	日变改正;正常场改正;TO 改正;磁异常计算;突变点剔除;数据网格化;滤波;磁异常化极;磁异常上延。	突变点剔除;曲线圆滑;地形数据预编辑;视电阻率断面;最小二乘反演;色谱图绘制。	去零点漂移;初至去除;去道头增益;能量衰减增益;SSA 滤波;带通滤波;背景去除;偏移;函数增益;滤波。	突变点剔除;曲线圆滑;U,Th,K 计数率曲线及平面等值线图绘制。

4 解译成果

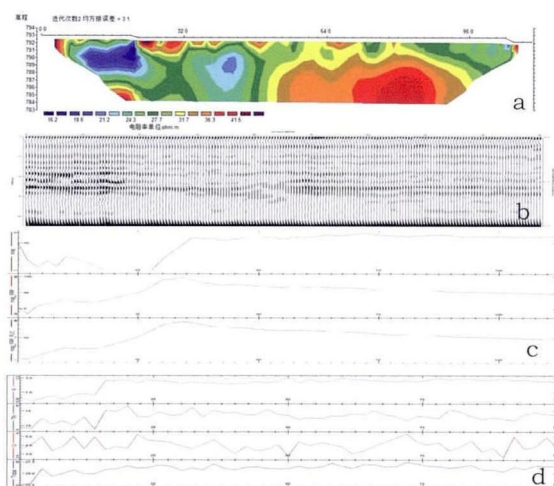
综合地球物理勘查通过不同方法探测成果间相互补充、互相验证,达到抑制单一方法多解性,提高解释精度的目的。如何将这些成果进行有效的整合对最终成果的准确性及可靠性非常重要。目前常用的集成解释方法主要有图像法、地理信息系统、数理统计方法等<sup>[23]</sup>。在充分研究试验不同集成方法的基础上,结合此次勘查目标的特点,此次采用图像法,即通过多种成果图件综合比对分析,排除单方法的多目标异常干扰,对三类研究区内古城墙遗址探测做出定性及定量解释。

4.1 西城墙研究区

该城墙遗址在地下水位以上,位于人工培育苗木的园林区内,结合现场调查,其浅层土多为后期公路修筑回填土,夹杂大量的石料,废渣,具有高磁性,高电阻率,高放射性的地球物理背景。由综合成果

可以看出,在高密度电阻率断面图(图 3(a))上,剖面 0~25m 范围内反应为一似矩形低阻体,电阻率值小于 $15\Omega\cdot m$ ;探地雷达图像(图 3(b))在对对应位置处反映为多层强能量反射的同相轴,且存在局部分叉的现象;磁测曲线(图 3(c))在该处为一明显的低缓磁异常,磁异常值最低为 6nT 左右;在 K,Th 元素的计数率曲线上(图 3(d))可见该段也反映为一低计数率异常,异常值范围为 5~15。综合分析后,认为该异常即为城墙分布,其顶深距地面大约 2m,厚度大约为 2.3m。并总结西城墙的地球物理特征为:相对低磁性,高导电性,高介电性,低放射性。推测结果得到了洛阳铲开挖证实(图 4)。由于各种方法的分辨率及工作原理不同,使得城墙异常在每种方法成果图上的反映略有差别。值得注意的是,在剖面的 40~46m 处,高密度断面图上另发现一处相对低阻体存在,呈扩散状分布,在探地雷达图像上的相对应处表现为严重的电磁波信号衰减,后

经查证为园林区浇灌向地下中细砂层渗水所致。此外,在剖面水平位置46~100m处,垂向深度2~5m处,高密度电阻率断面图反映为高阻体,探地雷达成果图表现为46m处发生明显的错动并在其后同相轴明显能量变强,磁测曲线无明显变化,放射性计算率曲线跳动相对剧烈,综合推断其为砂砾石层反映。



(a) 高密度电阻率法反演断面图, (b) 探地雷达剖面,  
(c) 磁法  $\Delta T$  磁异常及化极、延拓曲线,  
(d) K, Th, U 及总量元素计算率曲线

图3 西城墙综合地球物理方法探测成果图

Fig.3 Results of the different geophysical methods  
at the west wall



图4 西城墙开挖验证图

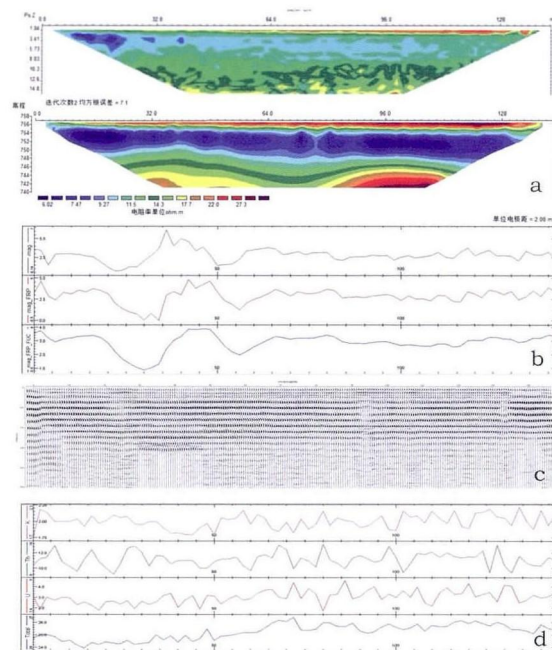
Fig.4 The excavation results of the west wall

#### 4.2 东南城墙研究区

东南城墙遗址位于该区的地下水位以下,区内地表浅层土为普通耕植土,周围无电性、磁性干扰,地表植被发育,可能会对放射性测量形成干扰。该区布设的两条对比剖面,ESW01 剖面为查证城墙遗址

的存在性,由综合成果图(图5)可见,在 ESW01 剖面水平位置30~50m,距地表深度7m左右处,高密度电阻率断面图上明显存在一高阻等值线凸起,电阻率值为  $12\Omega \cdot m$  左右,探地雷达图像上表现为强反射且分布不连续的同相轴存在,磁测曲线在该段表现为明显的台阶状异常,异常最大值为5nT, K 元素及 Th 元素计数率曲线在此处有明显的下凹异常出现。综合分析,认为该异常为地下城墙的反应,顶深距地面大约7.5m,厚度大约为2~3m。城墙的地球物理特征为相对高磁性,高电性,高介电性,低放射性。

此外,为验证该城墙是否向东延伸,又在 ESW01 剖面东侧100m处布置了平行等距的 ESW02 剖面,并在剖面上布置了磁测及高密度电阻率法两种方法。通过综合成果图(图6)可知,在 ESW01 剖面中城墙的高阻,高磁异常并没有在 ESW02 的综合成果图中出现,在 ESW02 剖面的成果图中其表现的更近似于背景场,由此推断城墙没有向东延伸。



(a) 高密度电阻率法反演断面图, (b) 磁法  $\Delta T$  磁  
异常及化极、延拓曲线, (c) 探地雷达剖面,  
(d) K, Th, U 及总量元素计算率曲线

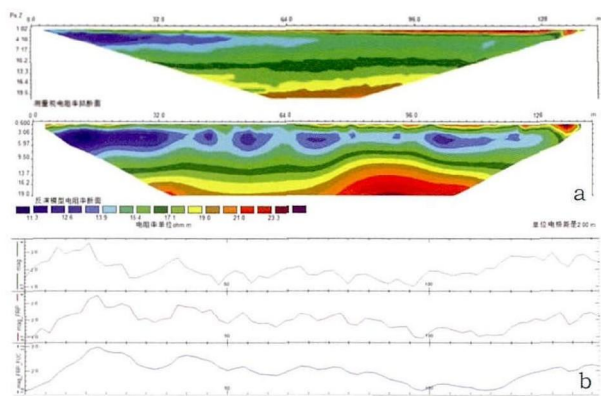
图5 东南城墙 ESW01 线综合地球物理方法探测成果图

Fig.5 Results of the different geophysical methods  
along the profile ESW01 of the southeast wall

#### 4.3 北城墙研究区

北城墙遗址位于丰峪沙河河道内,研究工作开展时正好为枯水期,有利于综合地球物理方法的开





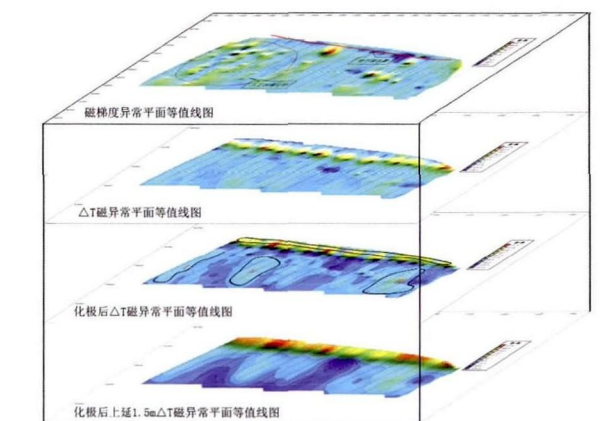
(a) 高密度电阻率法, (b) 磁法  $\Delta T$  磁异常及化极、极拓曲线  
图 6 东南城墙 ESW02 线综合地球物理方法探测成果图

Fig. 6 Results of the different geophysical methods along the profile ESW02 of the southeast wall

展。区内为低磁性,低电阻率,低放射性的地球物理背景。由于河道历经多次修整及清淤等人为工程,城墙遗址的存在性很难由单一剖面说明,因此在该研究区内开展面积性测量。鉴于磁测及放射性测量的成果为二维平面图,雷达及高密度电阻率为二维断面图,为了便于结果比对,采用三维数据处理技术对雷达及高密度数据进行时间及深度切片提取,这样就可以与磁测及放射性测量的成果对应起来。

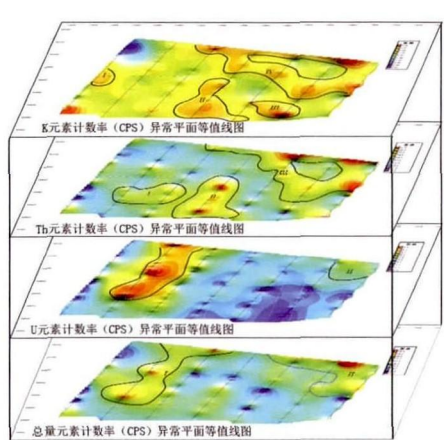
通过对该区平面成果分析,高精度磁测与多道  $\gamma$  能谱测量成果图上未发现北城墙测区内城墙的存在,无论是高精磁测的磁梯度异常、 $\Delta T$  磁异常(见图 7),还是多道  $\gamma$  能谱测量的 K、Th、U 及总量元素

的计数率异常(图 8)均未发现有与城墙对应的地球物理特征条带状及断续条带状异常的反应。同样地,在电阻率深度切片图(图 9)及探地雷达振幅深度切片图(图 10)上也未发现有相对应的异常分布。此外,高密度电阻率法(图 11)与探地雷达法(图 12)结合起到了较好的垂向探测效果,二者成果互为验证。依据测量成果对该区地下情况做出的综合地质推断,该区大至可分为三层,从上而下依次为松散砂土夹砂卵石层,厚度为 0 ~ 5m 不等,在测区内呈现由西到东由厚变薄的均势;中粗砂层,厚度为 8 ~ 15m 左右,主要表现为中阻,在测区内大体呈现两边厚,中边薄的趋势,其中在中粗砂层中存在着局部砂夹粘土互层,厚度为 1 ~ 6m,其主要分布在测区南北两侧;砂砾石层,厚度为 0 ~ 4m,主要在测区中部有部分体现。从定性分析的角度考虑,在该区低磁、低电阻率的地球物理背景上,如果存在古城墙的分布,其在高密度地电断面图上表现就为高阻特征,在探地雷达图像上反映反射界面清晰且呈多层分布的同相轴,但结合测量成果,只有 8 线和 20 线上存在两个局部高阻,强反射同相轴界面,但是详细分析其地球物理特征,推断其为剖面深部的砂砾石层反应,这也得到了典型钻探剖面(图 13)的证实。最终,在古城墙存在的深度范围内并未发现古城墙对应的有意异常,推断可能由于在河道处由于长期受到冲积,加之河道修复、挖沙等人为破坏,造成古城墙在此研究区内已完全损毁。



(a) 磁梯度异常平面等值线图, (b) 磁异常平面等值线图,  
(c) 磁异常化极图, (d) 磁异常化极后上延 1.5m

图 7 北城墙磁测数据成果图  
Fig. 7 Interpretation of the magnetometry data



(a) K 元素异常平面等值线图, (b) Th 元素异常平面等值线图,  
(c) U 元素异常平面等值线图, (d) 总量元素异常平面等值线图

图 8 北城墙放射性能谱测量成果图  
Fig. 8 Interpretation of the  $\gamma$ -ray spectrometry

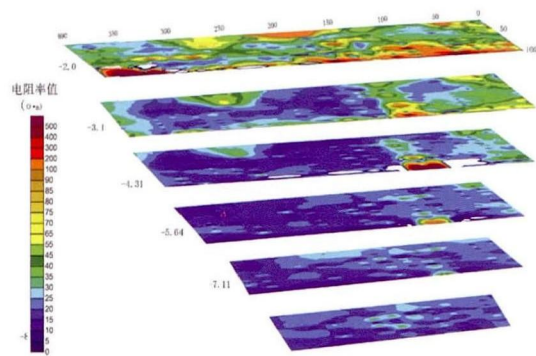


图 9 北城墙电阻率深度切片图  
Fig. 9 The resistivity horizontal slice of different deep of the north wall

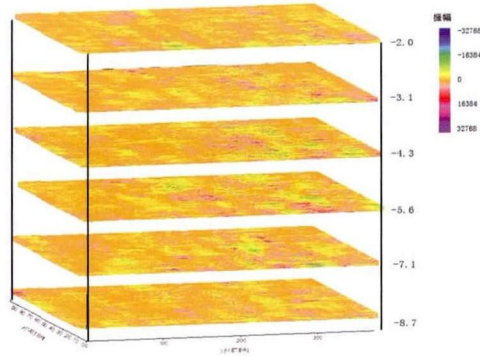


图 10 北城墙探地雷达深度切片图  
Fig. 10 The GPR horizontal slice of different deep of the north wall

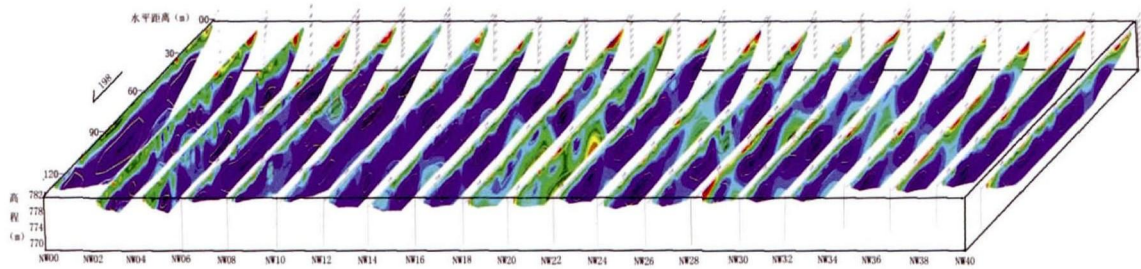


图 11 北城墙研究区高密度电阻率法综合垂向断面图  
Fig. 11 The integrated resistivity vertical profile of the north wall

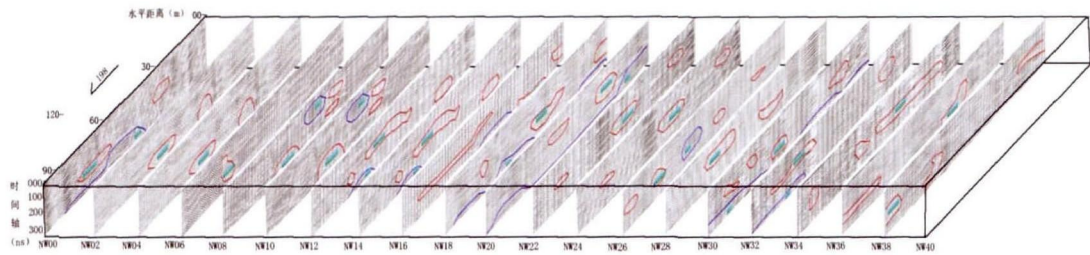


图 12 北城墙研究区探地雷达综合推断断面图  
Fig. 12 The integrated GRP vertical profile of the north wall

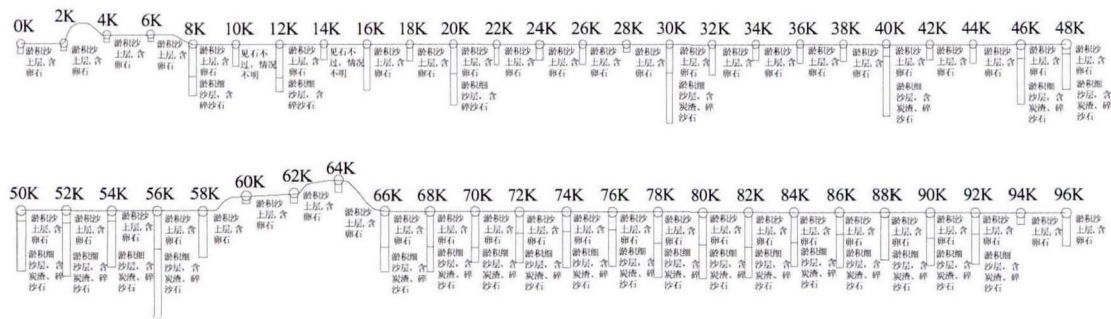


图 13 北城墙测区 NW38 测线钻孔柱状图 (据山西文物勘测中心)  
Fig. 13 The borehole diagram along the profile NW38 at north wall (According to the Shanxi cultural relics bureau survey center)

5 地球物理方法探测效果分析

在此次古城墙遗址的综合地球理勘探中,对于地下不同类型的古城墙遗迹,各种地球物理方法都有相应的异常反映,不同的地球物理方法反映异常的特征、强度亦不同。探地雷达方法在城墙异常区雷达反射波同相轴出现振幅和相位变化现象;非异常区雷达反射波同相轴出现规整、平直、连续等现象,说明了探地雷达在探测地下古城墙中的可行性,但其分辨率会受到地下水位及探测深度的影响;高密度电阻率对地下有无夯土墙有相应的电阻率异常反映明显,但由于受到体积效应及边界效应的影响,使得其对目标体的识别精度相较探地雷达法而言略逊一筹。磁法测量采集速度快、装备简便,易进行大面积测量,但由于城墙与其周围的磁性差异较小,加之古城遗址多为人文活动区,区内的磁性干扰问题值得注意,同时,磁法测量属于平面测量,若要得到城墙更为详尽的几何参数,需对测量数据进行正反演计算,这也要求提供更为丰富的考古背景知识。 $\gamma$ 能谱测量从不同元素间能谱差异的角度进行城墙识别,如果想获得较为稳定的结果,需要进行较长时间的测量,工作效率较低,其也属平面测量,只能提供城墙体的水平位置信息。

然而,对于具体的考古任务而言,在要求精度的同时还要考虑到施工周期,经济效益,投入工作量等诸多因素,因此,结合此次综合勘查工作,针对不同赋存类型城墙每种地球物理方法的适用性及最优勘查方案做出了总结(表 2)。

表 2 不同类型城墙综合地球物理方法有效性统计及最优组合方案表

Table 2 Overview of the ability of the different geophysical methods and the optimal combination

	磁法(M)	高密度电阻率法(E)	探地雷达法(G)	$\gamma$ 能谱测量( $\gamma$ )	最优方法组合
西城墙	A	A	A	B	E + G
东南城墙	A	A	B	B	M + E
北城墙	B	A	A	B	E + G

注:A 为勘查效果较好,B 为勘查效果一般。

6 结 论

1) 应用综合地球物理方法(磁法、高密度电阻率法、探地雷达法、 $\gamma$ 能谱测量法)勘查晋阳古城墙取得了较好的效果,充分利用了不同地球物理方法间相互约束、相互对比、相互验证的作用,发挥了每种地球物理方法的优势。

2) 鉴于探测目标体与周围介质的物性差异较小,在研究工作的数据采集,处理,解释阶段均应保证较高的精度;在数据采集时,严格控制数据的采集质量;在数据处理过程中,引入了多种数据处理及显示技术进行反复处理,如在磁法及放射性数据处理中,采用了格鲁布斯检验法;在雷达数据处理中,针对噪声压制处理时,利用奇异谱分析技术对数据进行了滤波处理,并结合三维数据分析与成像技术对古城墙遗址进行特征分析;在综合地球物理方法集成解释时,仔细分析了当前国内外主要应用的集成方案,并结合此次城墙遗址的特点进行综合解释。

3) 在各个环节的质量控制保证了资料的解释精度的基础上,对不同类型古城墙遗址探测的最优勘查方法组合如下:对西城墙,采用高密度电阻率法和探地雷达法;对东南城墙,采用磁法和高密度电阻率法;对北城墙,采用高密度电阻率法和探地雷达法。

4) 从成果看,将综合地球物理方法应用到考古勘查中,并配合专业考古和钻孔验证进行综合考古是古城勘查首选的技术手段。

5) 在考古地球物理中,夯土类城墙与其周围介质的物性差异较小,对地球物理仪器探测灵敏度及资料处理解释精度的要求较高,此次能成功探测到地下古城墙的分布,表明该探测模式可进一步推广到物性差异相对较大的如砖石结构的古城墙,水门,门楼,城殿遗址及其它建筑地基的考古勘查任务中。

致谢:在课题设计规划中,得到了山西省文物局领导黄继忠总工、山西省文物勘测中心王主任,石主任等的大力支持和精心指导。在课题实施过程中,得到山西省文物勘测中心李少英同志、张欣同志、李栋同志;山西省考古研究所韩炳华队长、吕金才同志;太原市文物考古研究所常一民所长、石力同志、裴静荣同志;晋源区文物旅游局杨秀生局长、赵成科长、李爱民同志;云冈石窟研究院任建光主任及山西文物勘测中心勘探队马队长等同志的对我们工作的支持和帮助,为项目的顺利完成提供了坚强的保障,在此表示衷心感谢!感谢审稿人提出的宝贵意见!感谢编辑为本文提供版面校正方面的帮助!

参考文献:

[1] 蒋宏耀,张立敏.我国考古地球物理学的发展[J].地球物理学报,1997,40(S1):379-385.  
JIANG Hong - yao, ZHANG Li - min. Development of archaeogeophysics in China[J]. Acta Geophys Sin, 1997, 40(S1):379-385.  
[2] 钟世航.地球物理技术在我国考古和文物保护工作中的应用



- [J]. 地球物理学进展, 2002, 17(3):498-506.
- ZHONG Shi-hang. Application of geophysical technology for archeology and preservation of cultural relics in China[J]. Prog Geophys, 2002, 17(3):498-506.
- [3] 黄继忠, 任建光. 地球物理勘探方法在云冈石窟保护中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 2011, 23(2):87-95.
- HUANG Ji-zhong, REN Jian-guang. Geophysical prospecting method applied in the preservation of Yungang Grottoes[J]. Sci Conserv Archaeol, 2011, 23(2):87-95.
- [4] 刘士毅, 袁炳强, 吕国印, 等. 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, 2004, 1(3):213-219.
- LIU Shi-yi, YUAN Bing-qiang, LV Guo-yin, et al. Application of the integrated geophysical methods in exploration of the underground place of Emperor Qinshihuang Mausoleum[J]. Chin J Eng Geophys, 2004, 1(3):213-219.
- [5] 钟世航. 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, 2004, 16(3):58-64.
- ZHONG Shi-hang. Application of geophysical technology for archaeology and preservation of cultural relics [J]. Sci Conserv Archaeol, 2004, 16(3):58-64.
- [6] Mahfooz A hafez, Magdy A Atya, Azza M Hassan, et al. Shallow geophysical investigations at the Akhmim archaeological site, Suhag, Egypt[J]. Appl Geophys, 2008, 5(2):136-143.
- [7] 周春林, 袁林旺, 张惠. 岩溶洞穴地球物理考古方法集成研究——以南京汤山直立人洞穴为例[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2005, 28(3):102-105.
- ZHOU Chun-lin, YUAN Lin-wang, ZHANG Hui. Study on integration of geophysical technology for archeology in karst area - A case study on the Homo Erectus Cave in Tangshan[J]. Nanjing J Nanjing Normal Univ (Nat Sci), 2005, 28(3):102-105.
- [8] 吴文贤, 王传雷, 喻忠鸿. 地球物理方法在盘龙城(府河工区)考古调查中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(S1):32-34.
- WU Wen-xian, WANG Chuan-lei, YU Zhong-hong. The application of geophysical methods to the archaeological survey of Panlonghe City[J]. Geophys Geochem Expl, 2007, 31(S1):32-34.
- [9] Salvatore Piro, Roberto Gabrielli. Multimethodological approach to investigate chamber tombs in the sabine necropolis at Colle del Forno(CNR, Rome, Italy)[J]. Archaeol Prospect, 2009, 16:111-124.
- [10] Matthias L, Thomas P, Gunter F, et al. Integrating pedological and geophysical methods to enhance the informative value of an archaeological prospection - The example of a Roman villa rustica near Regensburg, Germany [J]. J Archaeol Sci, 2010, 37:1731-1741.
- [11] Bavusi M, Giocoli A, Rizzo E, et al. Geophysical characterisation of Carlo's V castle (Crotone, Italy)[J]. J Appl Geophys, 2009, 67:386-401.
- [12] 林金鑫, 田钢, 王帮兵, 等. 良渚遗址古水系调查中的综合地球物理方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(5):954-960.
- LIN Jin-xin, TIAN Gang, WANG Bang-bing, et al. Integrated geophysical survey for palaeo-drainage system at Liangzhu sites [J]. J Zhejiang Univ (Eng Sci), 2011, 45(5):954-960.
- [13] 李钢. 从考古发现追溯晋阳文化渊源[J]. 晋阳学刊, 2001, (6):76-81.
- LI Gang. Tracking Jinyang culture origin from archeology[J]. J Jinyang, 2001, (6):76-81.
- [14] 张德一. 晋阳城的创建时间及其都城周回[J]. 山西社会主义学院学报, 2003, (9):46-47.
- ZHANG De-yi. The time to begin building Jinyang city and its encircling [J]. J School Soc Shanxi, 2003, (9):46-47.
- [15] 常一民. 晋阳宫城址浅探[J]. 大同高专学报, 1998, 12(2):53-56.
- CHANG Yi-min. Discourse on Jinyang palace site [J]. J Datong Coll, 1998, 12(2):53-56.
- [16] 沈鸿雁, 袁炳强, 肖忠祥, 等. 晋阳古城遗址考古地球物理特征[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4):1291-1298.
- SHEN Hong-yan, YUAN Bing-qiang, XIAO Zhong-xiang, et al. Geophysical exploration for archaeology in the ancient city of Jinyang, China[J]. Prog Geophys, 2008, 23(4):1291-1298.
- [17] 靳生禾, 康玉庆. 晋阳古城之文化积淀及其历史地位[J]. 山西大学师范学院学报, 2002, (2):14-17.
- JIN Sheng-he, KANG Yu-qing. Cultural deposit of the ancient city of Jinyang and its historical stand [J]. J Teach Coll Shanxi Univ, 2002, (2):14-17.
- [18] 张寅生. 磁法考古探测应用机制及其应用效果[J]. 物探与化探, 1999, 23(2):138-145.
- ZHANG Yin-sheng. The mechanism and effects of applying magnetic method to archeological exploration [J]. Geophys Geochem Expl, 1999, 23(2):138-145.
- [19] Fiore B Di, Chianese D. Electric and magnetic tomographic approach for the geophysical investigation of an unexplored area in the archaeological site of Pompeii (Southern Italy) [J]. J Archaeol Sci, 2008, (35):14-25.
- [20] Cardarelli E, Filippo C Di. Integrated geophysical methods for the characterisation of an archaeological site (Massenzio Basilica - Roman forum, Rome, Italy)[J]. J Appl Geophys. 2009, 68:508-521.
- [21] Domenico D De. Integrated geophysical surveys at the archaeological site of Tindari (Sicily, Italy) [J]. J Archaeol Sci, 2006, 33:961-970.
- [22] 王祝文, 丁阳, 刘菁华, 等.  $\gamma$ 能谱测量探测良渚古遗址的影响因素分析及数据处理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(2):439-446.
- WANG Zhu-wen, DING Yang, LIU Jing-hua, et al. Influence factors analyzing and data processing of  $\gamma$ -Ray spectrometry for Liangzhu Ancient Ruins detection [J]. J Jilin Univ (Earth Sci Ed), 2010, 40(2):439-446.
- [23] Kenneth L Kvamme. Integrating multidimensional geophysical Data [J]. Archaeol Prospect, 2006, (13):57-72.



## Integrated geophysical surveys at the Jinyang archaeological site

WANG Tian – yi, YANG Jin, LIU Ming, YAN Tian – long, JIA Zhong – yuan

(School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to determine the geophysical characteristics and physical state of the ancient city walls, which are under different conditions, and to explore the effectiveness of an integrated method to visualize ancient city walls, a survey using a variety of methods was conducted. It included, primarily, electric resistivity tomography (ERT), magnetometry (MAG), ground penetrating radar (GPR) and  $\gamma$  – rayspectrometry. Combining these geophysical method results with 2D and 3D data processing and display technology, the location and the geophysical characteristics of the ancient city walls were successfully detected. To reduce ambiguity in interpretation, approaches to integrating multidimensional geophysical data were also examined. Finally, the geophysical models of the different walls were summarized, and optimal combination methods for further study were proposed. These include ERT and GPR for the west wall, MAG and ERT for the southeast wall and ERT and GPR for the north wall. The results show that application of integrated geophysical methods is the preferred technology for the archaeological exploration of the ancient city walls.

**Key words:** Integrated geophysical methods; Archaeological prospecting; Ancient city walls of Jinyang

(责任编辑 马江丽)