

doi: 10.11720/wtyht.2021.1303

史朝洋,高维强,张利明,等.唐昭陵韦贵妃墓综合地球物理探测研究[J].物探与化探,2021,45(6):1617-1624.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1303

Shi Z Y, Gao W Q, Zhang L M, et al. Integrated geophysical exploration of the Wei concubine in the Tang-dynasty Zhao Mausoleum[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(6): 1617-1624. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1303

唐昭陵韦贵妃墓综合地球物理探测研究

史朝洋¹,高维强¹,张利明¹,张林¹,冯旭亮²,何滔³,郑有伟³

(1.陕西省矿产地质调查中心,陕西 西安 710068; 2.西安石油大学 地球科学与工程学院,陕西 西安 710065; 3.内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院,内蒙古 包头 014010)

摘要:韦贵妃墓是唐昭陵众多陪葬墓中距离主陵最近、形制级别最高的陪葬墓,也是唯一一座已经发掘清理的唐代“因山为陵”的墓葬,是研究昭陵形制的直接资料。本次在韦贵妃墓开展无人机激光雷达测绘、地面高精度重磁测量、高密度电法测量、地质雷达探测和土壤氦气测量等工作,旨在验证方法有效性,总结技术要点,为昭陵地宫探测积累技术资料和经验。韦贵妃墓对原始地层的扰动和破坏,形成了明显的物性差异和特殊工程地质结构;本次利用地面高精度重磁测量结合土壤测氦,较为有效地圈定了地下墓室平面位置,高密度电法准确圈定了韦贵妃墓地下空间位置,探地雷达清晰地探测到了韦贵妃墓的精细结构,分辨率达到亚米级,这些成果为下一步地球物理探测昭陵地宫提供了依据。

关键词:唐昭陵;因山为陵;综合地球物理探测;地质调查工程

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)06-1617-08

0 引言

唐昭陵是太宗李世民和文德皇后长孙氏的合葬陵,位于陕西省礼泉县东北约 22.5 km 的九峻山上,是唐代帝王以山为陵的首例,且因太宗制《九峻山卜陵诏》,号召功臣密戚陪葬,使昭陵形成了一个规模庞大且礼制严格的陪葬陵园,其规模在世界上首屈一指^[1],其形制反映了唐封建帝国严格的礼法制度^[2]。

李世民是我国封建社会杰出的政治家、军事家,开创了“贞观之治”,奠定了大唐帝国文明昌盛的基础。昭陵作为中国规模最大、陪葬墓最多的帝王陵园,是“贞观之治”的实物见证,是了解、研究唐代乃至中国君主立宪制社会政治、经济、文化难得的文物宝库;其墓葬礼制在中国历史长河中具有重要的地位,盗或被盗社会关注度极高,但目前昭陵景区的开发、旅游热度与其历史、文化价值极不匹配。本次将在韦贵妃墓开展综合地球物理方法试验的基础上,

有针对性地选择方法技术开展昭陵地宫精细探测工作,研究并再现地下遗址景观,结合景区旅游发展需求开发特色地学产品,以助推昭陵文化旅游事业发展。

目前已确定的昭陵陪葬墓有 200 余座,这些墓依构建形式可以分为五类:① 因山为墓;② 覆斗型封土墓;③ 山形封土墓;④ 圆锥型封土墓;⑤ 墓而不坟,无封土墓;其所代表的墓主地位和与太宗李世民的亲疏依次降低,其中与主陵一样因山为墓者,只有唐初名臣魏征之墓和太宗后期主掌后宫十余年的韦贵妃之墓,是最高等级的陪葬墓制,同时韦贵妃墓也是距离主陵九峻山最近一座的陪葬墓,属于九峻山余脉,距离昭陵仅一沟之隔,见图 1。

韦贵妃名珪,字泽,京兆杜陵(今陕西长安)人,出身贵族,唐麟德三年(666 年)陪葬昭陵冶姑岭^[3],此岭上覆黄土,下为砾岩,呈南北走向,梁顶北侧缓坡,南侧坡度较大,东西侧则为陡崖。20 世纪 80 年代末,韦贵妃墓多次被盗墓者挖开,其封土堆的南侧也多次发现盗墓痕迹^[1],为保护该墓文物,礼泉县

收稿日期:2021-02-09;修回日期:2021-05-19

基金项目:陕西省公益性地质调查项目“唐昭陵地下遗址精细探测与虚拟景观再现示范工程”(201920)

第一作者:史朝洋(1983-),男,主要从事区域地球物理调查与电磁法深部探测工作。Email:569364196@qq.com



图 1 唐昭陵主陵遗址分布

Fig.1 Distribution map of TangZhaoLing historic site

昭陵博物馆于 1990 年对该墓进行了抢救性发掘,是迄今为止发掘清理的唯一一座唐代“因山为墓”的墓葬,其墓葬形式对研究唐代王陵具有重要意义,也是本次昭陵地球物理精细探测工作理想的试验场所。

从韦贵妃墓的考古发掘过程看,除了进入墓室直接发掘外,常规文勘手段(即使用洛阳铲钻探)在此处非常受限:韦贵妃墓实际埋深超过 10 m,地宫开凿于奥陶系唐王陵组砾岩、含砾页岩山体中,洛阳铲无法进行全面探测;2006 年陕西省考古研究院和礼泉县昭陵博物馆在勘测和钻探工作中发现,墓室上方地表只有约 1 m 厚的夯土层,或出于防盗考虑,或为开挖后封填便利,其下便是夹杂岩块的土层,常规钻探工作只能到此为止。地球物理勘探是利用物理学的基本原理和参数,探测地下不均匀体的方法^[4]。多年来,在地质调查、矿产勘查等方面应用甚广,在工程勘察方面也取得非常多的成果,同样,地球物理探测方法也适用于文物勘察,地下文物遗存由于人工挖掘、修建、埋藏,破坏了原始地层的结构,与周围土层或岩石存产生了物理性质差异,成为地下的局部不均匀体^[5-7]。但是,相较传统的地质问题,地下文物遗址在规模、分布范围上往往比地质体、构造等空间规模小的多,而且文物勘测的对于分辨率和精度要求较地质问题更高,因此对于地球物理考古工作,既有其可行性,又具有非常大的挑战性^[8-9]。

本次在韦贵妃墓开展的综合地球物理探测工作旨在通过对已经清楚结构的墓室及甬道进行探测,验证各方法的有效性,为下一步探测昭陵地宫提供

技术积累。由于昭陵“因山为陵”的特殊性质,以往在秦始皇陵和汉武帝茂陵开展的地球物理考古工作虽然提供了非常宝贵的经验和资料^[10-13],但仍和昭陵的现实存在巨大的差异,利用在已经发掘完成的韦贵妃墓上开展试验性探测工作,总结技术方法,从而为下一步探测昭陵玄宫提供积累。

1 工作方法

1.1 韦贵妃墓形制及工作布置

韦贵妃墓凿山为陵,地宫由墓道、过洞、天井、前甬道、前墓室、后甬道和主墓室组成,见图 2,甬道和墓室地面、墙壁和顶壁均由条砖垒砌,墙壁和顶壁涂抹白灰并绘有壁画,壁龛中有陶俑等陪葬文物。

韦贵妃墓所处山梁近南北走向,东西跨度较窄(约 80 m),地宫南北向构建,平面长约 46 m,墓道宽约 2 m、甬道宽约 1.6 m,主墓室约 4.7 m×4.6 m,墓室为穹窿顶,最高处达 5.12 m,墓室地面距离地表约 15 m。回填地宫由下至上形成含砾杂填土和薄夯土层^[1]。

依据中国地质调查局 2002 年在秦始皇陵^[10-12]、2018 年在汉武帝茂陵探测投入的地球物理考古探测技术手段和取得的成功经验^[13],结合韦贵妃墓地宫的工程地质结构、规模及其埋深,选择地面高精度重磁与土壤测氦技术手段用于圈定地宫的平面范围,选择高密度电法测量与地质雷达用于探测地宫的纵向结构。

由于韦贵妃墓 SN 向展布,本次综合剖面穿过地宫顶部 EW 向或斜交布置。在主墓室和后甬道顶

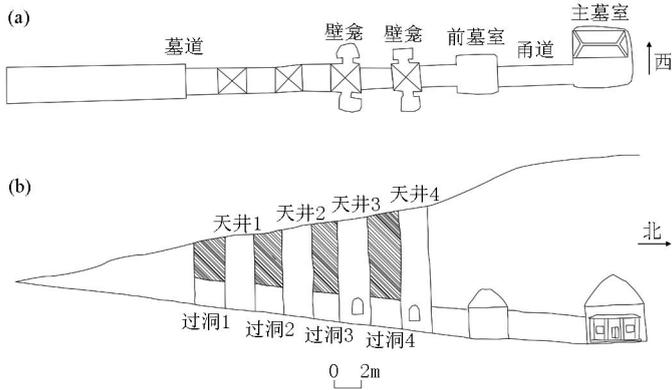


图 2 韦贵妃墓形制与结构

Fig.2 The shape and structure of Wei imperial concubine's mausoleum

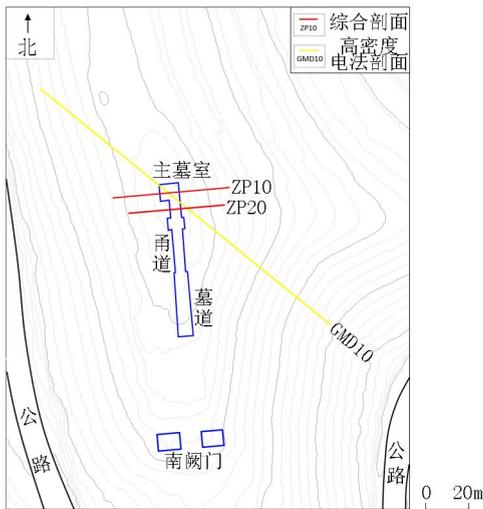


图 3 综合地球物理勘探工作布置

Fig.3 Layout of integrated geophysical prospecting work

部分别布置了两条综合剖面 ZP10 和 ZP20,开展重、磁、地质雷达和氦气测量工作;受地形限制,高密度电法剖面 GMD10 与主墓室斜交,方向 130° ,剖面中心位于主墓室上方,以期探测墓室完整结构,工作布置见图 3。

1.2 地面高精度重磁测量

从地球物理探测的角度看,发掘后的韦贵妃墓地宫为一个埋藏于砾岩中的规则空洞,内有条砖卷砌的内壁,上覆有含砾石的杂填土和厚约 1 m 的夯土层,反映在地表即可形成低重和高磁异常^[14]。本次工作使用加拿大 SCINTREX 公司 CG-5 型重力仪和美国玻璃球公司 EREV-1 型质子磁力仪,完成重磁 ZP10 剖面 17 m,点距 0.5~2 m 不等,测点 22 个,重磁 ZP20 剖面 14 m,点距 0.5~2 m,测点 17 个。

1.3 高密度电阻率法

高密度电阻率法是常规电阻率法在自动化采集上的一大进步,具有工作效率高、数据量大和成果直观等优势。韦贵妃墓地宫虽然规模不大,但是其内部为空洞,与基岩、回填土存在显著的电性差异,为高密度电法探测提供了良好的物性基础^[15-16],本次高密度电法工作使用重庆地质仪器厂 DZD-6A 型高密度电法仪,120 道采集,道间距 1 m,采用温施装置。

1.4 地质雷达

地质雷达探测是近年来迅速发展的工程物探方法,仪器向地下发射高频脉冲电磁波,通过反射波携带的地下地质信息进行地下空间成像,相较传统物探手段,具有无损探测和分辨率高等独有优势^[17-18]。韦贵妃墓主墓室与上部的回填土层是一个理想的电磁波反射界面,地面与墓室也是一个反射界面,这为本次地质雷达探测提供了探测基础。

本次工作使用加拿大凤凰公司的 pulse EKKO PRO 地质雷达系统在 ZP10 剖面完成探测,测线长度 25 m,使用 50 MHz 主频天线,0.2 m 点距。

1.5 氦气测量

氦及子体测量是常用于寻找断裂构造和地下热水^[19],在考古工作中可用于墓室的完整性探测,考察是否存在人为扰动^[10],一般墓室可成为氦及子体的富集空间,其上部的有人为扰动封土或裂隙可形成运移上升通道,可在墓室顶部附近形成氦气浓度正异常,从而间接指示墓室位置。

本次土壤氦浓度测量技术采用的仪器为石家庄核工业航测遥感中心研发的 HDC 型高灵敏度环境测氦仪,取气深度为 40~60 cm,采样和测量时间均为 2 min;采样点距为 0.5~2 m,其中 ZP10 剖面完成

测点 18 个,长度 35 m; ZP20 剖面完成测点 29 个,长度 24 m。

2 探测成果分析

2.1 地面高精度重磁测量结果分析

穿过主墓室顶部和后甬道顶部完成了两条重磁剖面 ZP10 和 ZP20,其中观测重力异常使用 1:1000 无人激光雷达测绘数据进行了三维地形影响校正,计算出了布格重力异常;磁测异常为进行各项改正后的总场异常。从图 4 可以看出,两条剖面中段皆呈现明显的重力低磁力高组合异常,且异常强度高;

由于地宫规模较小,为了研究与地宫有关的弱异常,采用平均场法求取了“西低东高的”磁异常斜背景,获得了剩余磁异常;对于布格重力异常减去剖面西侧背景区变化稳定幅值约为 $0.35 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的常数,获得了剩余重力异常,见图 5。

本次对地宫地表附近风积黄土、夯土、杂填土和地宫内部条砖进行了磁化率测量,风积黄土的磁化率在 $150 \times 10^{-5} \text{ SI}$ 左右,夯土的磁化率为 $(150 \sim 550) \times 10^{-5} \text{ SI}$,杂填土磁化率略低于夯土,而唐王组砾岩基本无磁性,低于 $10 \times 10^{-5} \text{ SI}$;地宫卷拱的条砖磁性变化大,表现为强磁性,但其规模小,埋深大,对地表磁异常的贡献可忽略不计。在借鉴秦皇陵物性资料

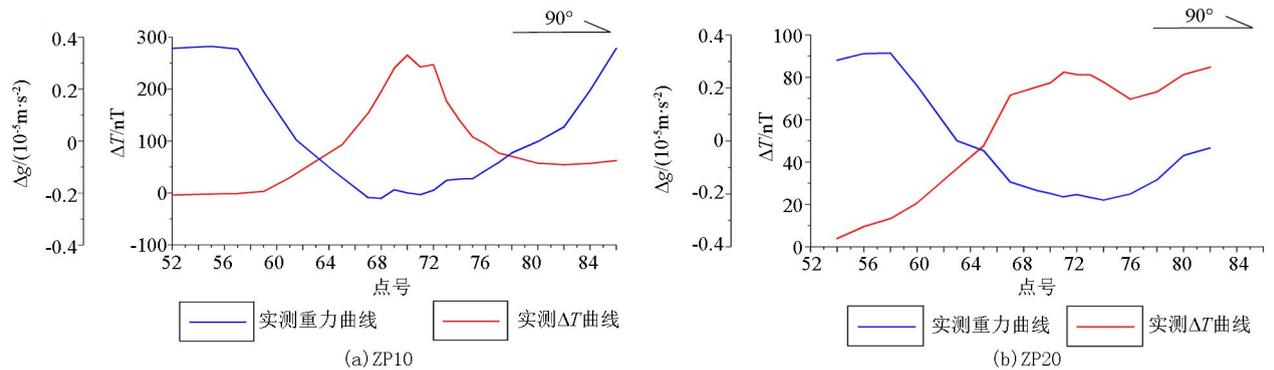


图 4 重磁实测异常曲线

Fig.4 The curves of measured gravity anomalies and magnetic anomalies

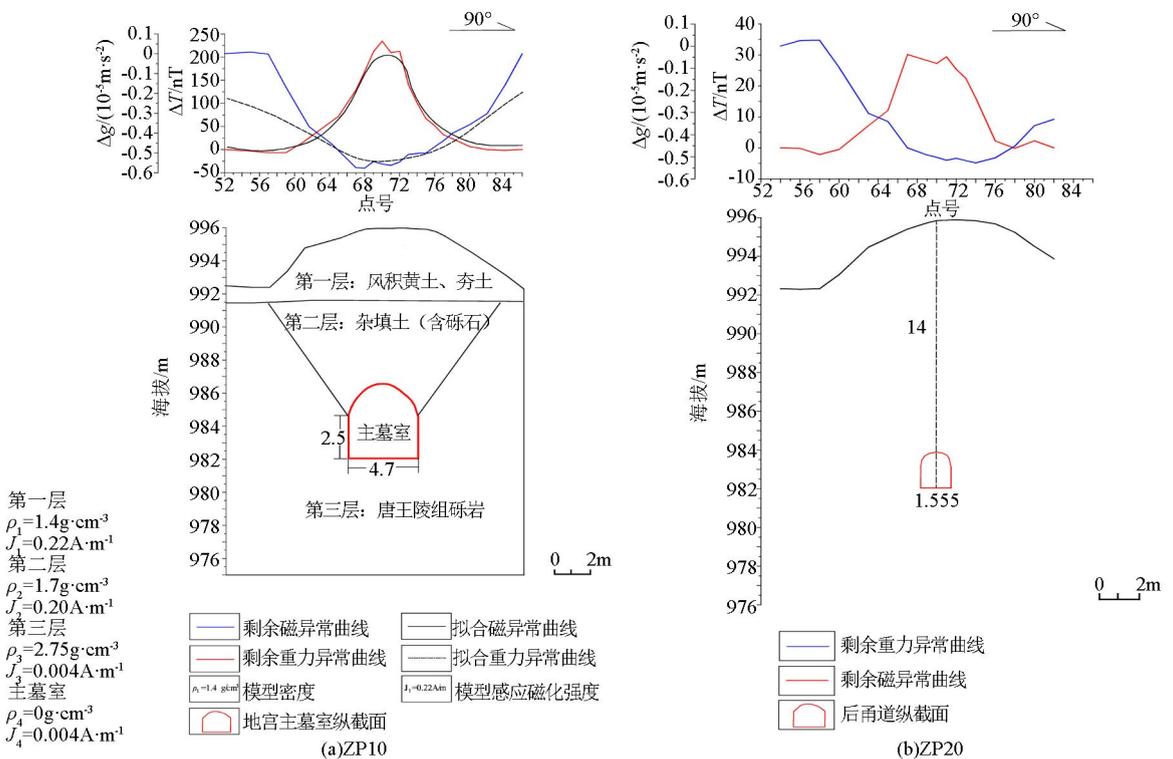


图 5 重磁异常推断解释

Fig.5 Results interpretation base on gravity anomalies and magnetic anomalies

的基础上,在韦贵妃墓顶部采用大样法测量了 3 个夯土标本,密度均值为 1.4 g/cm^3 ,唐王陵组砾岩工作区采集了近 200 块,统计均值为 2.75 g/cm^3 ,而杂填土未出露地表只在地宫甬道顶部盗洞中可见,没能测量其密度值。从以上物性资料可以看出,风积黄土、夯土和杂填土相对大范围分布的基岩表现为强磁、低密度特征。

基于上述物性资料,结合文物部门考古勘探资料和地宫形制实地调查结果,定性认为如此强度的重磁剩余异常具有“同源性”,与大规模的风积黄土、夯土和杂填土关系密切。利用 RGIS 软件进行了 2.5D 重磁联合正反演拟合,见图 5,把 ZP10 地下划分为三层工程地质结构,分别为:风积黄土、夯土层,杂填土层和唐王陵组砾岩,这三层工程地质层正演的重、磁异常强度与曲线异常强度基本吻合,只是由于剖面长度有限,两侧背景区拟合程度误差较大。地宫本身引起的重磁异常低于测量精度,可忽略不计。经过甬道的 ZP20 剖面剩余重力异常极值与 ZP10 基本相当,但磁异常极值明显减小为 29 nT ,与夯土层的不均匀分布有关。

2.2 土壤测氡结果分析

两条土壤测氡剖面与重磁剖面重合,从图 6 和图 7 可以看出,土壤氡浓度背景较低,在 $1\ 000 \text{ Bq/cm}^3$

cm^3 左右,两条剖面反映的墓室或后甬道顶部并没有出现异常,说明地宫结构是完整的。ZP10 剖面的异常极值点分别出现在 56 点和 84 点,幅值分别为 $5\ 200 \text{ Bq/cm}^3$ 和 $2\ 933 \text{ Bq/cm}^3$;ZP20 剖面的异常极值点分别出现在 56 点和 86 点,与 ZP10 基本南北对应,幅值分别为 $7\ 200 \text{ Bq/cm}^3$ 和 $2\ 600 \text{ Bq/cm}^3$ 。

从图 5 可以看出异常极值点对应地宫东西两侧的开挖边界,也就说明了地宫顶部的封土和唐王组砾岩的接触面为氦气上移的通道,在地表有夯土覆盖,储气条件好,进而形成了明显的氦浓度异常。需要说明的是,两条剖面西侧异常极值大于东侧,这与 54~56 点之间为现代通行小路有关,地表黄土固结程度高,储气条件相对好。

2.3 高密度电阻率法结果分析

由于地形限制,高密度剖面 GMD10 与墓室斜交,但剖面中心大致经过主墓室中心,剖面长度 120 m 也保证了可以完整探测到墓室底部(深约 15 m),电阻率反演结果如图 8 所示。

主墓室地面海拔约 982 m ,由于剖面与墓室斜交,墓室在剖面上的投影宽度约 $7\sim 8 \text{ m}$;上述墓室空间位置在 GMD10 剖面上对应电阻率断面图中段高阻中心,电阻率幅值大于 $16\times 10^3 \ \Omega \cdot \text{m}$,且该异常中心位置与墓室空间位置吻合度高,可见高密度电法

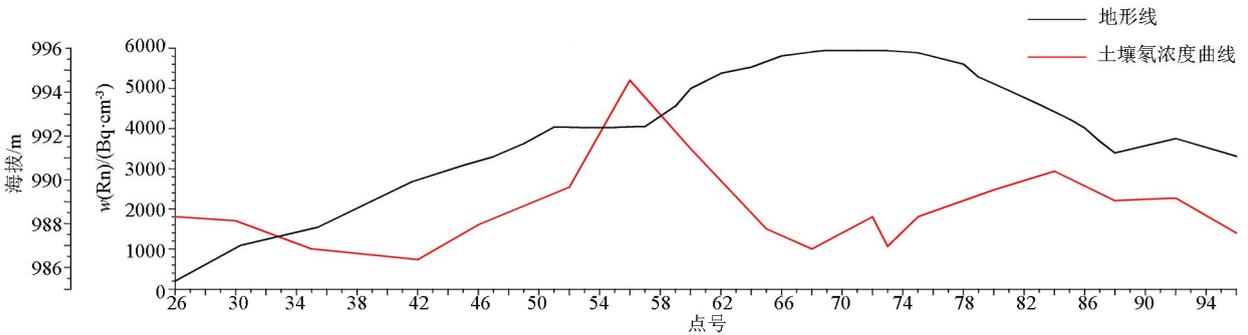


图 6 ZP10 土壤氡浓度曲线

Fig.6 The curves of radon content in soil at ZP10 line

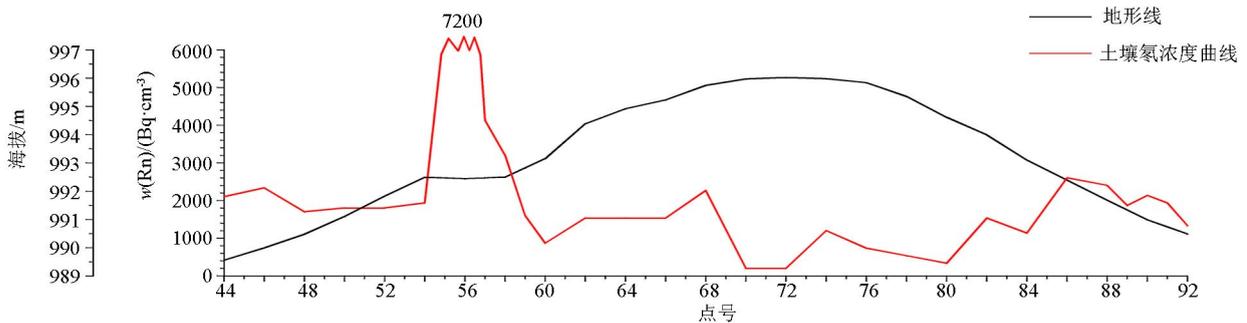


图 7 ZP20 土壤氡浓度曲线

Fig.7 The curves of radon content in soil at ZP20 line

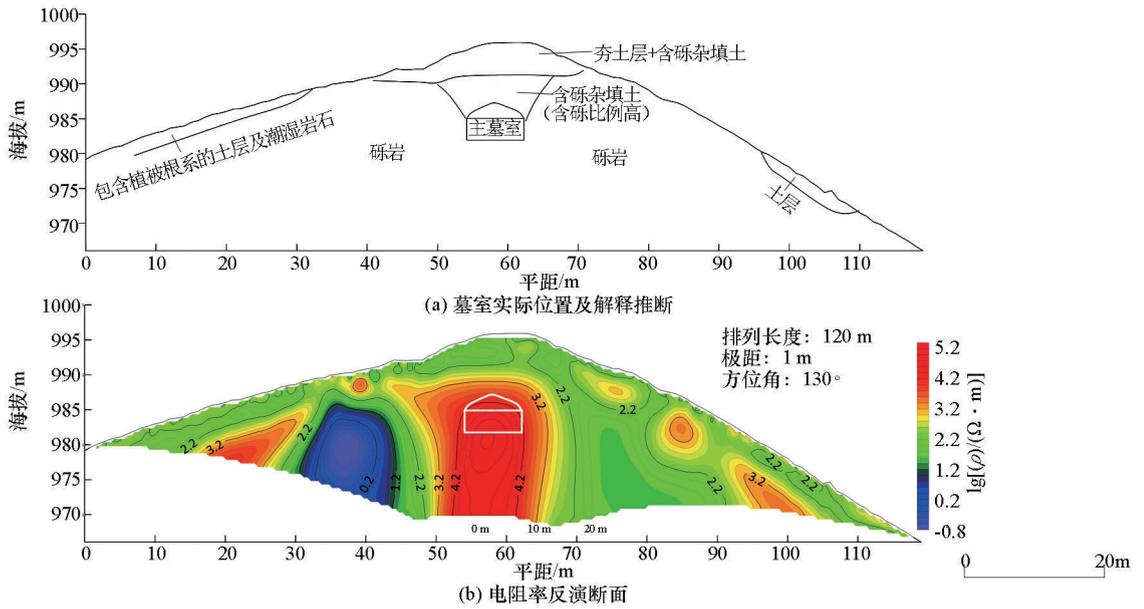


图 8 GMD10 电阻率反演断面解释推断

Fig.8 The inversioned resistivity profile and interpretation map

对主墓室结构反映明显。另据韦贵妃墓考古发掘与勘探资料,墓室上方夯土层厚约 1 m,其下开始出现砾石,且砾石与墓室内基岩岩性相同,极有可能为开凿墓室的砾石与素填土混合后回填形成(韦贵妃墓墓室、天井等结构均为从地面开挖后再回填的修建方式),因此,墓室顶部表层存在电阻率较小的夯土层,虽然较薄,但是其电阻率较含砾杂填土小的多,从而导致地表 0~5 m 电阻率偏小,其下随着杂填土中砾石越来越多,电阻率逐步增大。这些事实与高密度电阻率断面显示的信息相符。

2.4 地质雷达结果分析

ZP10 地质雷达剖面与墓道垂直,剖面中段高两侧低,对雷达数据进行叠加与地形校正后,获得雷达剖面见图 9,并提取瞬时振幅属性信息,见图 10。

从图 9 可以看到,在测线中部水平位置 12.5~17.4 m,海拔 982~987 m 区域,可见明显的强反射同相轴,有多次反射现象,且存在微弱绕射特征,其位置正对应墓室范围,可见雷达已明显探测到墓室结构。沿墓室东西两壁向地表追踪,将各同相轴上的强振幅点、错段点连接起来,形成一个近似“水桶状”的异常区,即水平位置 12~18 m,海拔 988~994 m 范围,该区域内反射同相轴振幅较两侧弱,可以推测此处即为封填墓室的杂填土,其中包含砾石,造成散射,叠加振幅减弱;在向地表靠近,水平 12~18 m,海拔 994~996 m 之间,反射同相轴又明显增强,但频率降低,结合地面钻探可知,此处即为地表夯土层,土质致密紧实,与周围素填土不同。

在瞬时振幅属性剖面(图 10)上,水平方向 12.2

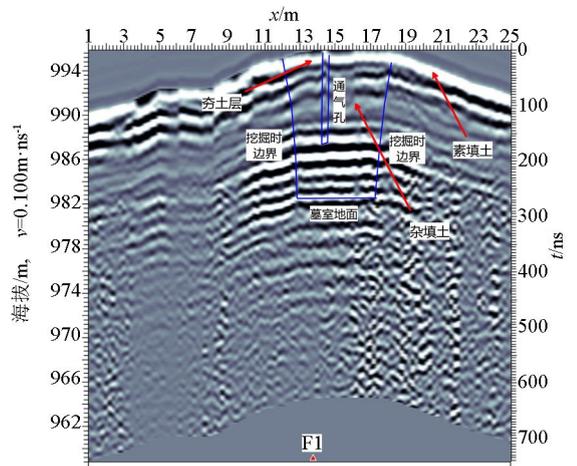


图 9 ZP10 剖面地质雷达解释推断

Fig.9 The inversion of GPR detecting result

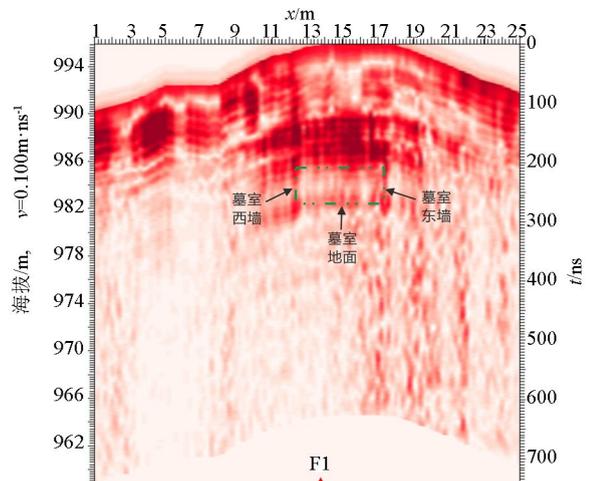


图 10 ZP10 剖面地质雷达瞬时振幅解释推断

Fig.10 The inversion of GPR instantaneous amplitude map

m、17.5 m处,海拔 982~985 m 之间,瞬时振幅属性相较周围明显增强,形成 2 段垂直的强能量线,推测其为主墓室的西、东两侧墙壁的反映;在两段强能量线之间还形成一个低能区域,规则如矩形,结合墓室为空洞的实际,推断电磁波在此处自由转播,不会形成强反射振幅造成;再向上,海拔 985~989 m 区间,瞬时振幅明显增强,此处对应墓室穹窿顶,在穹窿界面电磁波极易反射、绕射,造成瞬时振幅增大。

3 结论与讨论

综合在韦贵妃墓开展的地面高精度重磁测量、土壤氦气测量、高密度电法和探地雷达成果,可以有效地探测出地下墓室的位置和结构,但是各种方法各具特点,总结如下:

1) 韦贵妃墓地宫规模小,有一定埋深,引起的重磁异常非常弱,利用重磁方法直接探测地宫的结构显然是欠妥的,但是其能分辨修建韦贵妃墓回填的工程地质结构,进而可以粗略地圈定地宫平面范围。由于昭陵地宫的墓室埋深达 50 m 以上,规模有限,通过正反演计算,其引起的重磁异常接近 0;但是地宫墓道依山凿石而入,已回填,地表遗迹难觅,在墓道口开展重磁测量可取得几个纳特和几十微伽的剩余重磁异常。

2) 通过分析测氦工作的土壤浓度异常极值,可以确定出地宫的开挖边界,进而可间接且粗略地确定出地宫的边界,但是这种方法受季风、降雨、地形和地表黄土覆盖条件影响大,观测值极不稳定,对操作员的综合素质和施工周期要求严格,另外对于唐代“因山为陵”的帝陵,地表黄土覆盖厚度和范围有限,施工前提条件一般不具备,难以在这些帝陵考古工作中推广。

3) 高密度电法本次探测中取得了比较明显的效果,由于韦贵妃墓已经发掘清理,墓室完整无垮塌,内部也较为干燥,所以高阻特征明显。假设若在墓室处于未发掘清理的情况下,墓室内部可能存在积土甚至垮塌(韦贵妃墓发掘报告显示,在墓室清理之前,由于盗墓等活动骚扰,墓室内堆积的黄土、碎石厚度达到了 2 m),那么高阻特征就不会如此明显;更进一步假设,如果墓室充水,相较于九峻山一带高阻砾岩背景,墓室甚至会成为一个相对低阻体,这些情况在以后的勘探中,必须予以考虑分析。

4) 本次探地雷达工作探测到了韦贵妃墓亚米级的结构细节,是所有探测方法中精度最高的,而且,探地雷达的野外工作效率和成果处理速度也是

非常高的,再加上其无损探测的特点,可以认为其是目前较为理想的一种地球物理考古探测方法,但是,考虑到韦贵妃墓只是昭陵的一座陪葬墓,其埋深已经达到了 10 m 以上,若探测更大规模的帝王陵,比如昭陵玄宗,其探测深度估计难以达到,因此在布设雷达工作时,探测深度是最先需要考虑的问题。

5) 唐十八陵中有十四座是“因山为陵”的形式,地宫开凿于渭北奥陶纪砾岩或灰岩中,墓道有条石封堵或被盗后用碎石(土)回填,与韦贵妃墓的工程地质结构虽有一定差异,但是本次试验性探测工作仍有一定的借鉴意义。展望这些帝陵的地球物理考古探测工作,应首先开展面积性重磁测量工作,识别墓道口引起的弱异常;再依据这些弱异常,开展地质雷达、高密度电法纵向探测工作,识别墓道口引起的电(磁)场特征,圈定空间位置,进而向两侧去追索墓道延伸情况或地宫墓室的空间位置、结构等。

参考文献(References):

- [1] 陕西省考古研究院,昭陵博物馆.唐昭陵韦贵妃墓发掘报告[M].北京:科学出版社,2017.
Shaanxi Institute of Archaeology, Zhaoling Museum. Tomb of the Wei Concubine in the Tang-danasty Zhao mausoleum compound [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 沈睿文. 唐帝陵的布局:空间与秩序[M]. 北京:北京大学出版社,2009.
Shen R W. The arrangement of Tang Mausoleum: Space and order [M]. Beijing: Peking University Press, 2009.
- [3] 杨洪冰,贾嫚.唐墓壁画中的文化意蕴——以唐韦贵妃墓甬道伎图为中心[J].南京艺术学院学报:美术与设计,2017,2:58-63.
Yang H B, Jia M. The cultural implication in the fresco of Tang mausoleum — the center is the drama of Tomb of the Wei Concubine in the Tang-danasty [J]. Journal of Nanjing University of the Arts, Fine Arts and Design, 2017, 2: 58-63.
- [4] 张胜业,潘玉玲.应用地球物理学原理[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.
Zhang S Y, Pan Y L. The principles of apply geophysics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004.
- [5] 蒋宏耀,张立敏.考古地球物理学[M].北京:科学出版社,2000.
Jiang H Y, Zhang L M. Archaeological geophysics [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [6] 张寅生.物探在考古勘探中的应用初探[J].物探与化探,1990,14(6):444-451.
Zhang Y S. A preliminary study on the application of geophysical exploration in archaeology [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1990, 14(6): 444-451.
- [7] 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,2004,34(5):635-643.
Zhong S H. Application of geophysical technology in Archaeologi-

- cal and cultural Relic protection in China [J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 34(5): 635 - 643.
- [8] 高立兵,王斌,夏明军.GPR技术在考古勘探中的应用[J].*地球物理学进展*,2000,15(1):61 - 69.
Gao L B, Wang B, Xia M J. Application of GPR technology in archaeological exploration [J]. *Progress in Geophysics*, 2000, 15(1): 61 - 69.
- [9] 彭格林,杨宇仁,余仁富,等.物化探方法对古墓完整性的研究[J].*物探与化探*,2000,24(3):233 - 239.
Peng G L, Yang Y R, Yu R F, et al. The study of the integrity of ancient tombs by geophysical and geochemical exploration [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2000, 24(3): 233 - 239.
- [10] 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中的应用[J].*工程地球物理学报*,2004,1(3):213 - 219.
Liu S Y, Yuan B Q, Lyu G Y, et al. Research on the Integrity of ancient tombs by geophysical and geochemical exploration application of integrated geophysical methods in the exploration of emperor Qin Shi Huang's mausoleum [J]. *Journal of Engineering Geophysics*, 2004, 1(3): 213 - 219.
- [11] 袁炳强,杨明生,刘士毅,等.高精度重力测量秦始皇帝陵地宫[J].*地球科学:中国地质大学学报*,2005,30(4):498 - 502.
Yuan B Q, Yang M S, Liu S Y, et al. High precision gravity measurement of the underground palace of emperor Qin Shihuang's mausoleum [J]. *The Geoscience: Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(4): 498 - 502.
- [12] 周小虎,谭克龙,万余庆,等.现代遥感技术在秦始皇陵考古研究中的应用[J].*现代地质*,2007,21(1):157 - 162.
Zhou X H, Tan K L, Wan Y Q, et al. Application of remote sensing technology in archaeological research of Qin Shihuang's mausoleum [J]. *Modern Geology*, 2007, 21(1): 157 - 162.
- [13] 孙萍萍,余常华,田中英,等.关中盆地城市群地下文物遗迹精准探测——以茂陵为例[J].*西北地质*,2019,52(2):72 - 82.
Sun P P, Yu C H, Tian Z Y, et al. Accurate detection of underground cultural and historic in Guanzhong basin; Example from the Maoling mausoleum [J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 72 - 82.
- [14] 沈鸿雁,袁炳强,肖钟祥,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 H Y, Yuan B Q, Xiao Z X, et al. The geophysical characteristics of Jinyang ancient city with the archaeology works [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(4): 1291 - 1298.
- [15] 董浩斌,王传雷.高密度电法的发展与应用[J].*地学前沿*, 2003,10(1):171 - 176.
Dong H B, Wang C L. Development and application of high density electrical method [J]. *Geoscience Frontier*, 2003, 10(1): 171 - 176.
- [16] 苏勇军,王绪本,罗建群.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*,2007,22(1):268 - 272.
Su Y J, Wang X B, Luo J Q. The archaeological application of high density resistivity method to ditch exploration on Sanxingdui Site [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(1): 268 - 272.
- [17] 王亮,王绪本,李正文.探地雷达在金沙遗址考古探测中的应用研究[J].*物探与化探*,2008,32(4):401 - 403.
Wang L, Wang X B, Li Z W. Application of ground penetrating radar to archeological exploration in Jinsha ruins site [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2008, 32(4): 401 - 403.
- [18] 许新钢,李党民,周杰.地质雷达中干扰波的识别及处理对策[J].*工程地球物理学报*,2006,3(2):114 - 118.
Xu X G, Li D M, Zhou J. Identifying Interferential wave in GPR and its countermeasures [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2006, 3(2): 114 - 118.
- [19] 邵永新,任峰.沧东断裂天津段的土壤氡探测[J].*华北地震科学*,2019(1):34 - 38.
Shao Y X, Ren F. Soil radon detection in Tianjin Cangdong fault [J]. *North China Seismic Science*, 2019(1): 34 - 38.

Integrated geophysical exploration of the Wei concubine in the Tang-dynasty Zhao Mausoleum

SHI Zhao-Yang¹, GAO Wei-Qiang¹, ZHANG Li-Ming¹, ZHANG Lin¹,
FENG Xu-Liang², HE Tao³, ZHENG You-Wei³

(1. Shaanxi Mineral Geology Survey Center, Xi'an 710068, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 3. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Tomb of Wei Concubine is the nearest to Zhao mausoleum and the highest level in all the Tomb in Zhao Mausoleum, as also, it is the only construction tomb in Mountain of the Tang Dynasty that has been compounded, so, it is important to research and protect Tang-dynasty mausoleum. We survey the tomb of the Wei concubine with uav lidar survey, ground high-precision gravity and magnetic survey, high-density electrical survey, GPR and soil radon gas survey for evaluating the results. Ground high precision gravity and magnetic survey combined with soil radon measurement can effectively delineate the plane position of underground place. The high density electric method accurately delineates the space position under ground. The GPR has clearly detected the fine structure of the tomb with a resolution of up to sub-meter level, These results provide valuable information for exploration of Zhao Mausoleum's underground palace in the future.

Key words: the Tang-dynasty Zhao Mausoleum; construction the Mausoleum in Mountain; integrated geophysical prospecting technique; geological survey engineering

(本文编辑:王萌)