

高精度重力测量探测秦始皇帝陵地宫

袁炳强¹, 杨明生², 刘士毅¹, 段清波³, 苑守成^{1,4}, 何贤明¹, 徐国忠¹, 于国明¹

1. 西安石油大学资源工程系, 陕西西安 710065
2. 区域重力调查方法技术中心, 陕西西安 710016
3. 陕西省考古研究所, 陕西西安 710054
4. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083

摘要: 秦始皇帝陵是中国历史上第一个皇帝陵, 秦始皇帝陵考古已经取得许多重大发现, 但至今秦始皇帝陵地宫是否位于现存封土堆之下等问题尚不清楚, 因此, 利用先进技术探测秦始皇帝陵地宫对于科学保护这一重要文物资源具有重要意义. 应用高精度重力测量, 确定了秦始皇帝陵地宫的东西、南北开挖范围约 170 m×145 m, 发现了地宫的西向墓道. 通过对重力异常的定量拟合计算, 推测了秦始皇帝陵地宫可能存在墓室, 墓室东西长约 50 m, 南北宽约 40 m, 埋深约 43 m, 高约 10 m; 地宫四周可能存在石质宫墙, 宫墙的中心线范围为 145 m×125 m, 墙体宽 8 m, 高约 14 m; 宫墙上部有一细夯土墙, 墙宽约 15 m, 高约 30 m. 认为秦始皇帝陵封土堆之下经过大规模开挖存在墓室、宫墙、墓道等配套的地下古墓建筑群. 从一个侧面为证实秦始皇帝陵地宫位于现存封土堆之下提供了证据.

关键词: 地宫; 秦始皇帝陵; 探测; 高精度重力.

中图分类号: P312

文章编号: 1000-2383(2005)04-0498-05

收稿日期: 2004-11-05

Exploring the Underground Palace of the Emperor Qinshihuang Mausoleum with High Precision Gravity Survey

YUAN Bing-qiang¹, YANG Ming-sheng², LIU Shi-yi¹, DUAN Qing-bo³,
YUAN Shou-cheng^{1,4}, HE Xian-ming¹, XU Guo-zhong¹, YU Guo-ming¹

1. Department of Resource and Engineering, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China
2. Center of Method and Technology for Regional Gravity Survey, Xi'an 710016, China
3. The Shaanxi Archaeology Institute, Xi'an 710054, China
4. School of Geophysics and Geoinformation Systems, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Emperor Qinshihuang mausoleum is the first emperor mausoleum in Chinese history. Although archaeologists have made many great discoveries in the mausoleum archaeology, whether the underground palace of Emperor Qinshihuang mausoleum lied under the burial tamped mound and other problems remain not really clear by now. Therefore, it is of great significance to explore the underground palace using advanced technologies in order to protect such an important cultural relic resources in science. It has been explored that digging area of the underground palace in the EW and SN directions is about 170 m×145 m and the western grave path has been discovered by high precision gravity survey. There would be a coffin chamber in the underground palace which is about 50 m long from the east to the west and about 40 m wide from the south to the north, the height of the coffin chamber is about 10 m and the buried depth is about 43 m; also there would be stone-made palace-wall in the surrounding of the underground palace, the central area of the palace-wall would be 145 m×125 m, the width of the palace-wall is about 8 m, the height of the palace-wall is about 14 m; and there is a thin tamped soil wall whose width is about 15 m, height is about 30 m on the top of stone-made palace-wall inferred from gravity anomaly definite quantity modelling. We thus consider that there exist complete set underground paleotomb architecture groups containing the coffin

基金项目: 国家“863”计划课题(No. 2002AA132012).

作者简介: 袁炳强(1957—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事地球物理资料应用研究. E-mail: yuanbq@pub. xonline.com

chamber, palace-walls, grave paths, etc. after large scale excavation under the burial tamped mound of Emperor Qinshihuang mausoleum, which provides the proof, from another side, that the underground palace lies beneath the burial tamped mound existing now.

Key words: underground palace; mausoleum of Emperor Qinshihuang; exploring; high precision gravity.

秦始皇帝陵是中国历史上最大的陵墓之一,同时又是中国历史上第一个皇帝陵。秦始皇帝陵地区地下文物遗存极其丰富,文物遗址种类繁多。自1974年秦兵马俑发现以来,这里的文物考古发现屡屡成为国际媒体关注的焦点。秦始皇帝陵考古已经取得许多重大发现,发现了众多陪葬坑、陪葬墓、地面建筑遗址等。但是,秦始皇帝陵地宫是否位于现存封土堆之下等一些人们更为关注的问题尚不清楚,因此,探测秦始皇帝陵地宫存在与否并弄清其内涵,对于科学保护、合理建设与利用这一重要的文物资源具有重要意义。

国家科学技术部于2002年将“考古遥感与综合地球物理探测技术”列入国家“863”计划课题,随后,中国地质调查局在秦始皇帝陵园进行了综合地球物理探测,所采用的方法主要为高精度磁法测量、高精度重力测量、综合电(磁)法测量等,这些方法在最近几年已广泛应用于考古调查中(Bevan, 1998; Hargrave *et al.*, 2002; Hargrave, 2004)。高精度重力测量作为本次所采用的主要方法之一,在探测秦始皇帝陵地宫取得了较为显著的成果。以往的考古调查和发掘研究成果表明:秦始皇帝陵园文物遗址分布区总面积超过60 km²,其中,文物遗址密集区达19.63 km²。秦始皇帝陵坐落在骊山北麓的山前冲洪积扇上,帝陵陵园整体布局以封土堆为中心,封土堆呈覆斗形,现南北长355 m,东西宽345 m,高约76 m。封土堆南坡、东坡、西坡3面有防水进入地宫的阻排水渠,四周有内、外两重城垣,城垣基础宽约8 m,均夯筑而成(陕西省考古研究所和秦始皇兵马俑博物馆, 2000, 2002)。过去在秦始皇帝陵封土堆上已进行了一些地球物理、地球化学测量。1981年,地质矿产部物探化探研究所开展过土壤汞量测量,在封土堆上发现明显汞异常(常勇和李同, 1987)。1987年,西安地质学院周绵远等在封土堆上开展了1:1 000磁法和电法剖面面积测量^①,在封土堆中部磁法测量发现了明显异常,电法测量异常低弱。当时他们认为封土堆中部的磁、电异常均由秦始皇帝陵地宫内宫、石质或砖质宫

墙、角楼及灵柩等引起。

1 方法技术

1.1 工作布置

高精度重力测量工作共布设6条剖面(图1),穿过封土堆中心布设十字剖面1、2,穿过封土堆半腰布置井字型剖面3~6。

1剖面长约1 100 m(南端延伸出外城墙,北端至临马公路南侧建筑障碍物止)。2剖面长约1 100 m(西端延伸出外城墙约100 m,东端至外城墙东侧障碍物止)。3~6剖面通过以往周绵远等发现的磁异常中心和常勇等发现的汞量高值区。3剖面长约600 m,南侧延伸至内城墙以外;4剖面长约400 m,两端跨出封土堆;5剖面长约500 m,东端跨出阻排水渠,西端至铜车马陪葬坑;6剖面两端跨出内城墙。这6条剖面主要探测目标是秦始皇帝陵地宫,兼顾了阻排水渠等目标物。

1.2 重力测量

在秦始皇帝陵园内城内选一重力基点(图1),利用Lacoste-D型高精度重力仪实施测点观测。为提高重力观测精度,有效控制重力仪零点位移非线性部分给观测带来的误差,每一测段观测闭合时间控制在4 h内。重力剖面测量的基本点距为5 m,异常地段加密至点距为2.5 m。

秦始皇帝陵封土堆相对于所探测的目标物(地宫)而言地形起伏大,而且其结构复杂、密度变化也较大。为了提高地形改正精度,采用实测(近区,0~5 m)与设计实际封土堆地形模型(中区,5~2 000 m)正演计算重力地形改正值。根据陵园内实际地形,主要采用台阶形地形、单一斜面地形、锥形地形等3种模型公式实测计算近区地形改正值。中区地改是把研究区(包括封土堆)高程数据网格化成5 m×5 m的网格数据,采用直立方柱体模型,选择研究区内海拔高程最低点高程作为计算基准面,在2 km的改正半径范围内计算各测点的重力地形改正值。高程数据来源于:(1)封土堆及其附近1:1 000的数字地形图高程数据;(2)封土堆外围

^①周绵远,牛建建,1997.秦始皇陵高精度磁测效果.陕西地球物理文集.

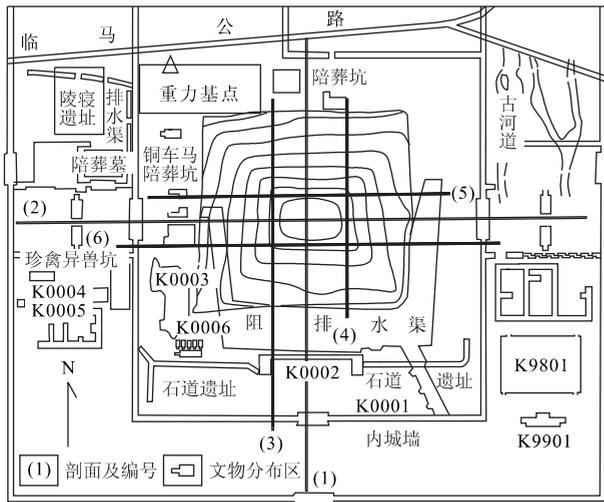


图 1 工作布置

Fig. 1 Working plan

1: 10 000 地形图数字化高程数据; (3) 研究区内全部重力剖面测量、磁法面积及剖面测量放样点实测高程数据。

地形改正封土堆密度模型的设计是根据封土堆上洛阳铲钻孔结果和封土堆上磁力异常解释和验证的结果。本次同时实测的高精度磁力测量发现封土堆中部有一东西 120 m 宽、南北 140 m 长、四周为正异常、中间为负异常、呈近似矩形的对称异常区。利用多种模型反复对该磁力异常进行三维正反演解释计算和洛阳铲钻孔验证工作,证实了封土堆的结构大体为圈层结构,封土堆中部为粗夯土,紧挨往外为一圈宽度约 15 m 的细夯土墙,再向外为粗夯土,封土堆上的磁异常是由封土堆中部的矩形细夯土墙引起^②。根据这种模式设计模型正演计算重力地形改正值。

地形改正分常密度(不变密度)和变密度地形改正。常密度地形改正为正演地形改正值时封土堆上的粗夯土、细夯土,封土堆外围生土的密度均采用生土的实测密度,变密度地形改正为封土堆上的粗夯土、细夯土、封土堆外围生土的密度分别采用它们各自的实测密度正演重力地形改正值。

重力资料的其他整理计算按有关规定执行。实测布格重力异常总精度为 $\pm 0.014 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

1.3 密度测量

秦始皇帝陵封土堆是由人工夯筑而成的夯土构成,按夯层的薄厚及致密程度,夯土又可分为粗夯土(夯层厚 30~50 cm)和细夯土(夯层厚 6~8 cm)。测

定了封土堆上和在封土堆上所实施的洛阳铲探孔中的粗夯土、细夯土样和封土堆周围的生土样密度,统计结果显示粗夯土、细夯土、生土样密度值分别为 1.85, 1.95, 1.60 t/m³, 该结果既表明粗夯土和细夯土以及生土之间有明显的密度差异,也为重力异常定量解释提供了物性依据。

2 重力资料的处理及解释

2.1 重力资料处理

本次工作测线长度虽然不大,但重力场明显存在南高北低的区域场趋势。因此对局部异常进行定量解释时必须消除区域场影响。求取区域异常采用了趋势分析法,为了避免对秦始皇帝陵封土堆所产生的剩余重力异常产生压制作用,在计算区域场时没有考虑封土堆范围内的重力点,即封土堆范围内的重力点不参与区域重力异常的计算,用封土堆外的重力点计算出区域重力异常,然后用布格重力异常减去区域重力异常即得到剩余重力异常。

重力测量定量反演采用二度半体人机联作迭代拟合反演方法,对实测的 6 条剖面进行了定量反演。

2.2 重力异常解释

为正确分析重力异常的成因,对实测重力异常分别进行了常密度地形改正和变密度地形改正。经 2 种地形改正后,全部 6 条剖面布格重力异常曲线在封土堆中部均显示为局部重力高,而且 1~6 剖面常密度与变密度地形改正后的剩余重力异常特征基本相同。常密度地形改正后的剩余重力异常在封土堆上出现强度达 $(0.53 \sim 0.63) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的重力高,变密度地形改正后的剩余重力异常在封土堆上仍有强度约为 $(0.25 \sim 0.35) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的重力高。在封土堆半腰,在重力高的背景上又分别叠加一次级重力高(图 2,以 1 剖面为例)。对这些异常特征分析认为:(1)以常密度进行地形改正后,封土堆上出现强度达 $(0.53 \sim 0.63) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的剩余异常包含了封土堆夯土的影响。可能当时修建秦始皇帝陵地宫时开挖地宫后回填,对回填土按一定的构架进行粗夯和细夯,夯土的密度大于生土的密度,故在封土堆上出现重力高。在粗夯土重力高的背景上,如果存在细夯土墙,也会有叠加的次级重力高显示;(2)以变密度进行地形改正后理论上消除了封土堆上夯土层高密度体的影响,但在封土堆上仍出现强度达 $(0.25 \sim 0.35) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的剩余异常,说明

^②于国明,袁炳强,姚长利,等,2003. 秦始皇陵高精度磁力测量成果报告. 中国地质调查局发展研究中心。

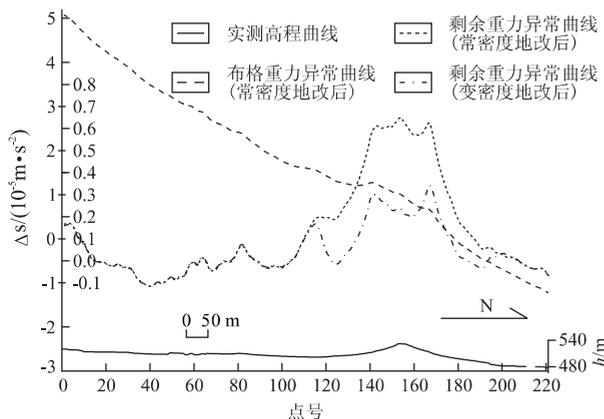


图 2 1 剖面重力异常

Fig. 2 Gravity anomaly on profile 1

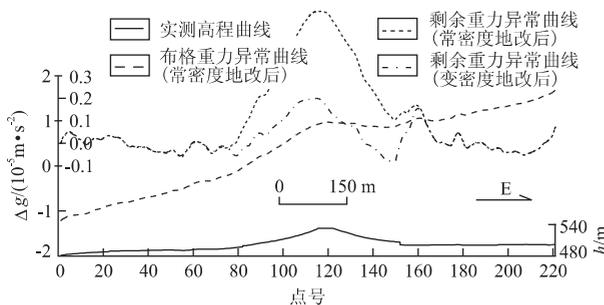


图 3 2 剖面剩余重力异常

Fig. 3 Residual gravity anomaly on profile 2

在具有相对较大密度的夯土层之下可能还有高密度体存在,推测秦始皇帝陵地宫建有石质宫墙,宫墙之上为夯土;(3)利用这些剩余重力高异常特征可以追踪原地表以下地宫的开挖范围、夯土的分布以及定量计算细夯土墙的规模。

2 剖面剩余重力异常在封土堆上也出现类似重力高,但在封土堆东、西半腰没有叠加的次级重力高(图 3)。东侧半腰没有出现次级重力高,该现象应与已知的东向墓道有关(细夯土墙在墓道处断开,故不会引起次级重力高);西侧半腰没有出现次级重力高,推测可能是封土堆西侧与东侧对应,也存在一西向墓道。

为准确解释秦始皇帝陵地宫的结构,包括地宫的开挖范围、粗夯土的分布、细夯土墙的规模等,选择经常密度改正后的剩余重力异常进行定量拟合计算。定量拟合计算地宫初始模型设计根据上述对剩余重力异常成因的分析,并综合本次同时实施的磁法测量成果以及部分电法测量成果^③。6 条剖面的剩

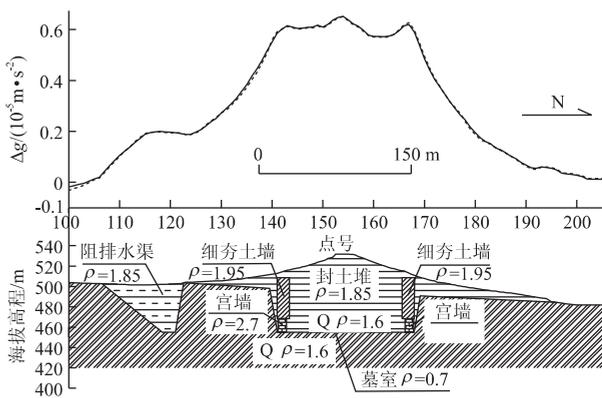


图 4 1 剖面剩余重力异常解释断面

Fig. 4 Interpretation section for the residual gravity anomaly of profile 1

密度 ρ 单位为 $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

余重力异常定量拟合计算结果表明:(1)秦始皇帝陵地宫东、西方向各有一墓道;(2)秦始皇帝陵地宫东、西、南北的开挖范围约 $170 \text{ m} \times 145 \text{ m}$;秦始皇帝陵封土堆下可能有一墓室,墓室东西长约 50 m ,南北宽约 40 m ,埋深约 43 m ,高约 10 m ;秦始皇帝陵地宫四周可能存在石质宫墙,宫墙的中心线范围为 $145 \text{ m} \times 125 \text{ m}$,墙体宽 8 m ,高约 14 m ;宫墙上部有一细夯土墙,墙宽约 15 m ,高约 30 m (图 4,仅以 1 剖面为例)。因此认为,秦始皇帝陵封土堆之下经过大规模开挖,存在墓室、宫墙、墓道等配套的地下古墓建筑群,地宫就在现存的封土堆之下。另外,以往考古所发现的秦皇陵地宫东、西、南坡 3 面阻排水渠也有明显的重力异常反应。

3 验证结果

用洛阳铲对部分拟合解释结果进行了验证,结果证实了秦始皇帝陵地宫墓室周围建有一细夯土墙,墙东西长约 168 m ,南北宽约 141 m ,南墙顶宽 16 m ,北墙顶宽 18.5 m ,东西墙顶宽 22 m ,墙高约 30 m 。验证结果也发现、证实了西向墓道的存在。洛阳铲验证的结果与解释结果大体一致。

4 结论

(1)秦始皇帝陵封土堆虽然高大,结构复杂,但应用高精度重力测量,经过精心施工,采用有效的资料处理技术(如正演计算重力地形改正值等),能够发现

③王书民,2003.高密度电法秦皇陵地宫探测试验工作报告.中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所。

封土堆不均匀密度体的特征及推测地宫的结构;(2) 本次测量所发现的秦始皇帝陵地宫的开挖范围、地宫的西向墓道,以及与磁力资料相互印证的封土堆中的细夯土墙是近期秦始皇帝陵考古的重要发现,对于研究中国古代墓陵的建筑特征具有重要意义。

本文得到国土资源部咨询中心孙文珂教授、区域重力调查方法技术中心左愚教授、中国地质大学管志宁教授的悉心指导,在此一并表示衷心的感谢!

References

Bevan, B. W. , 1998. Geophysical exploration for archaeology: An introduction to geophysical exploration. Special report No. 1. U. S. Department of the Interior, National Park Service, Midwest Archeological Center, Lincoln, Nebraska.

Chang, Y. , Li , T. , 1987. Application of the geochemical exploration hydrargyrum measurement in archeology. *Chinese Geology* , 7: 21—22 (in Chinese with English abstract).

Hargrave, M. L. , 2004. Geophysical investigations at the New Philadelphia Site Pike County, Illinois, U. S. . Army Engineering Research and Development Center, Construction Engineering Research Laboratory, Campaign, IL. , 61826—9005.

Hargrave, M. L. , Somers, L. , Larson, T. , et al. , 2002. The role of resistance survey in historic site assessment and management: An example from Fort Riley, Kansas. *Historical Archaeology* , 36(4).

The Shaanxi Archeology Institute, Emper or Qin's Terra-Cotta Museum, 2000. The archeology report on Emper or Qin's mausoleum (1999). Science Press, Beijing (in Chinese).

The Shaanxi Archeology Institute, Emper or Qin's Terra-Cotta Museum, 2002. 2000 annual exploration brief report on Emper or Qin's mausoleum. *Archeology and Cultural Relic* , 2: 89—110 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

常勇,李同,1987. 化探汞量测量在考古中的应用. *中国地质* , 7: 21—22.

陕西省考古研究所,秦始皇兵马俑博物馆,2000. 秦始皇帝陵园考古报告(1999). 北京:科学出版社.

陕西省考古研究所,秦始皇兵马俑博物馆,2002. 秦始皇陵园 2000 年度勘探简报. *考古与文物* , 2: 89—110.

(上接 492 页)

陶志平,周德培,王亨林,2003. 三峡库区巨鱼沱滑坡地质特征及防治研究. *工程地质学报* , 11(4): 406—410.

张天贵,张映泉,徐贵侯,等,2001. 重庆市万州区沙河子滑坡群农机技校滑坡治理工程地质详细勘查报告. 重庆:重

庆市地质矿产勘查开发总公司 107 地质队.

张天友,戴经明,刘向阳,等,2001. 重庆市三峡库区万州区安乐寺滑坡工程地质详勘报告. 重庆:重庆 607 勘察实业总公司.