

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.02.008

关中盆地城市群地下文物遗迹精准探测 ——以茂陵为例

孙萍萍^{1,2}, 余常华³, 田中英², 李泽玺³, 马秋峰³, 张茂省^{2*}, 朵雪莲³

- (1. 西北大学地质系, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710054;
3. 陕西第二综合物探大队有限公司, 陕西 西安 710054)

摘 要: 关中盆地是华夏文明重要发祥地, 拥有厚重的历史文化底蕴, 留下灿烂的地下历史文化遗迹, 但因其隐藏于地下, 观赏性不强, 制约着具有世界影响力的历史文化旅游品牌的打造。以举世闻名的茂陵为探测区, 采用无人机航测、地面调查、高密度电法、地质雷达、高精度磁测及微重力等地面无损探测技术, 对帝陵进行了精准探测, 发现茂陵地宫位于封土堆之下距水平面约 30~40 m 深, 呈东西长约 100 m, 南北宽约 60 m 的矩形体; 地宫基本完整, 未坍塌; 探测出南墓道、东墓道和北墓道的位置和深度与考古钻探探测出的结果基本一致。在此基础上利用 3D Max 软件平台等, 可虚拟再现汉武帝茂陵辉煌规模及地宫形态。向游客展现汉武帝茂陵地宫的结构、景观以及时代与地域背景, 将大幅度提升旅游产品品质。

关键词: 地下空间; 文物遗迹; 无损探测; 关中盆地

中图分类号: P967

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2019)02-0072-11

Accurate Detection of Underground Cultural and Historic Relics in Guanzhong Basin: Example from the Maoling Mausoleum

SUN Pingping^{1,2}, YU Changhua³, TIAN Zhongying², LI Zexi³, MA Qiufeng³,
ZHANG Maosheng^{2*}, DUO Xuelian³

- (1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey/ Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Second Geophysical Exploration Team of Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Xi'an, 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Guanzhong Basin is the ancient birthplace of Chinese civilization, with a rich cultural heritage and brilliant ancient ruins, but these ancient ruins were buried underground mostly and

收稿日期: 2019-02-12; 修回日期: 2019-04-20

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1504700), 国家自然科学基金重点项目(41530640), 中国地质调查局项目(DD20160261、DD20189270)联合资助

作者简介: 孙萍萍(1983-), 女, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事黄土工程特性与黄土地质灾害研究。E-mail: sunpingping203@gmail.com

* 通讯作者: 张茂省(1962-), 男, 陕西咸阳人, 研究员, 博导, 主要从事水工环地质调查与研究。E-mail: xazms@126.com

have limited ornamental value and quality, restricting the creation of historical and cultural tourism brands with world influence. Taking the world-famous Maoling Mausoleum as a detection area, the drone aerial survey, ground survey, high-density electrical method, geological radar, high-precision magnetic survey and microgravity nondestructive detection were used to detect the Mausoleum accurately. The underground palace is about 30~40m deep from the horizontal plane and is shaped like a cuboid. It is about 100m long from east to west and about 60m wide from north to south. The underground palace is almost intact and has not collapsed yet. The location and depth of the South, East, and North Tomb passages are almost consistent with archaeological drilling detection. On this basis, using the 3D Max software platform, etc., the micro-movie of "Detecting the underground ruins Emperor Wu of Han at Xi'an -Maoling" has been produced, which virtually reproduced the majestic scale of Emperor's Mausoleum Palace and the shape of the underground palace. It introduces the structure, landscape and era and geographical background, which will greatly enhance the quality of tourism products.

Keywords: underground space; cultural relics; nondestructive detection; Guanzhong Basin

关中盆地是华夏文明的重要发祥地,长期以来承载着中华民族的历史荣耀和厚重记忆。西安市蓝田上陈遗址是目前已知非洲以外最老的古人类遗迹点之一,早在 212 万年之前,就已有类活动(ZHU et al., 2018)。6 000 年前,西安市灞桥区浐河东岸的半坡村出现了原始社会母系氏族部落。周朝兴起于西岐,定都丰镐(今西安市长安区),建成中国真正意义上的第一座城市,面积 21 km²。关中盆地最早被称为天府之国,秦、汉、隋、唐皆凭借渭河盆地“经济带”建立了强大帝国。唐长安城人口超过 100 万。张仪赞美关中盆地“田肥美,民殷富,战车万乘,奋击百贾,沃野千里,蓄积多饶”,“此所谓天府,天下之雄国也”。西安古称长安,是“世界四大古都”之一。先后在这里建都的有西周、秦、西汉、新、东汉(献帝初)、西晋(愍帝)、前赵、前秦、后秦、西魏、北周、隋、唐等 13 个王朝,历时长达 1 140 年之久,居中国古代六大古都之首。

关中盆地素有“八百里秦川”之美誉,拥有着厚重的历史文化底蕴,上至炎、黄,下至周、秦、汉、唐皆留下灿烂的文化遗迹。同时,也埋葬了历代帝王将相。“秦中自古帝王都”,共有历代帝王陵墓 72 座,西汉共有 11 个帝陵,其中 7 个在咸阳市秦都区,1 个在兴平市,3 个在西安市区。唐代在位皇帝 21 个,有陵寝 20 个,其中 18 个均在陕西境内。唐陵散布于渭北原区,至西向东,史称关中唐十八陵。其中著名的有秦代大将蒙恬墓(绥德)、秦二世胡亥墓(西安)、秦太子扶苏墓(绥德)、汉代霍去病墓(兴平)、苏

武墓(武功)、张骞墓(城固)、蔡伦墓(洋县)、武侯墓(勉县)、唐永泰公主墓、章怀太子墓、懿德太子墓(均为乾陵的陪葬墓)、杨贵妃墓(兴平马嵬坡)等。

关中平原城市群规划的战略定位是建设具有国际影响力的国家级城市群、内陆改革开放新高地,传承中华文化的世界级旅游目的地(陈华文,2010;张茂省等,2005;丁辉,2018)。虽然关中盆地是中外驰名的旅游胜地,文物古迹资源丰富,但大多隐藏于地下,观赏性不强。如何依托秦岭黄河自然山水、周秦汉唐历史遗存和文化资源多元富集等优势,打造一批具有世界影响力的历史文化旅游品牌,推动中华文化传承创新,提升中华文化的魅力和国际影响力,建设自然山水和历史人文交相辉映的世界级旅游目的地?进一步探索地下宫殿奥秘,开发三维旅游,打造精品,还原或虚拟再现古遗址风貌,成为有效的途径,也应相时而动(张茂省等,2014,2018;张茂省,2016;任保平,2007)。为此,以具有典型性和代表性的汉武帝茂陵作为示范点,开展了地下遗迹精准探测研究。

茂陵位于今陕西省兴平市南位镇策村南,其规模与秦始皇陵相媲美。据史书记载,茂陵曾遭受过 3 次大型的被盗活动,而且地宫也经历了上千年的时光,那么地宫是否完整,是否坍塌,这些仍然是个谜团;传统考古方式主要以洛阳铲为主,探测深度有限,且对帝陵具有破坏性;而帝陵的封土堆地面高度就达到 50 多米(张明惠,2011),传统的考古方式难以对地宫的结构和赋存状态进行勘探。基于此,运

用地面无损探测技术,利用无人机航测、地面调查、高密度电法、地质雷达、高精度磁测和微重力等综合地球物理方法在茂陵展开了一系列的古遗迹探测工作。

1 地下空间精准探测技术方法

本次工作收集了茂陵以往的考古成果、历史文献,并参考已开挖的广阳国寝王刘建(汉武帝的孙子)的墓室结构特征、中山靖王刘胜(汉武帝的庶兄)的墓室特征以及《秦始皇陵地球物理考古成果》等资料。通过对上述资料的分析研究和实地踏勘,选择无人机航测、三维激光地形扫描和高精度磁法、微重力、高密度电法、地质雷达等地面无损探测手段对茂陵进行了考古研究。

帝陵封土位于陵园中心,为夯土结构,现存形状呈覆斗形,底部边长东 243 m、南 238 m、西 243.2 m、北 240 m;顶部边长东 36 m、南 41.6 m、西 39.2 m、北 41.7 m;现距地表高度 48.5 m。帝陵形制为“亚”字形,由位于封土底部的墓室及 4 条斜坡墓道组成。4 条墓道位于封土四侧的中部,平面均呈梯形,靠近墓室一端较宽,外端较窄。帝陵墓室周围呈放射状分布有 150 座外藏坑,其中东侧 37 座、南侧 34 座、西侧 39 座、北侧 40 座(张明惠,2011)。

在茂陵地宫勘探中,首先使用无人机航测和三维激光扫描,对帝陵进行了全方位的整体观测和地形测量,并在帝陵封土堆上布设了 3 条综合剖面(图 1),编号为 100 线、200 线、300 线。结合高精度磁法、微重力、高密度电法和地质雷达等地球物理综合手段对帝陵进行了探测。在南墓道(布设 400 线)、东墓道(布设 500 线)和北墓道(布设 600 线)地段采用高密度电法和地质雷达进行了探测。

1.1 高精度磁法

秦始皇陵采用磁法,勘探出了封土堆中存在多层结构的细夯土层,存在明显的磁性特征,而茂陵帝陵的封土堆与秦始皇陵一致,均为土夯结合,为磁法勘探提供了参考(刘士毅等,2005)。本次高精度磁测使用 2 台美国 Geometric 公司所生产的 G858 铯光泵高精度磁力仪,探测了 100 线(长 442 m)、200 线(长 410 m)、300 线(516 m),点距为 1 m,实测磁力异常精度(均方相对误差)为±0.50 nT。

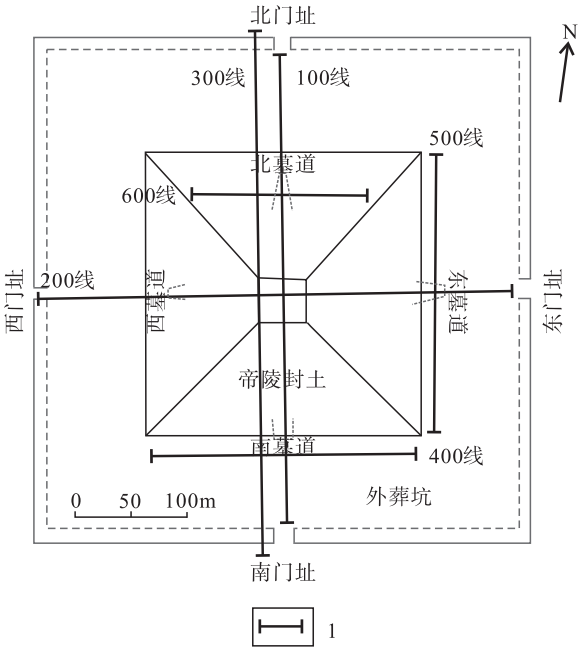


图 1 测线布置图

Fig. 1 Sketch map of line layout

1.2 微重力

地宫(或墓室)常为空洞形,其密度与周围土层会存在明显的差异,为微重力勘探提供了的前提条件。本次微重力测量使用 CG-5 型微重力仪,探测剖面为 100 线和 200 线,点距为 2 m,完成重力值观测质量检查点 42 个,检查比例 10%,观测均方误差为±0.009×10⁻⁵ m/s²。完成近区地形改正(0~5 m)观测质量检查点 42 个,检查比例 10%,观测均方误差为±0.001×10⁻⁵ m/s²。中区地形改正(5~2 000 m)地改精度为±0.004×10⁻⁵ m/s²(表 1)。

1.3 高密度电法

地宫在未坍塌的情况下,近似于土层中的一个空洞或木质结构体,电阻率会明显高于土层(刘士毅等,2005)。如果地宫坍塌,那么上方封土一定会存在裂隙,地宫会充水,形成低电阻区;如果存在大型盗掘活动,对地宫进行了破坏,那么地表水也会沿着破坏处浸入地宫,形成低电阻区。这为高密度电法探测地宫完整性提供了物性前提条件。墓道一般为后期填土,其与周围原始土层或封土层常存在电性差异,为高密度电法探测也提供了物性前提条件。

高密度电法使用的是重庆地质仪器厂高密度电法仪 WGMD-3A,数据处理软件采用瑞典的 RES2DINV

表 1 布格重力异常均方误差及误差 (10^{-5} m/s^2)

Tab. 1 Mean square error and error of bouguer gravity anomaly (10^{-5} m/s^2)

均方差	布格重力异常均方误差	测点观测均方误差	布格改正均方误差	纬度改正均方误差	近区地形改正(0~5 m)均方误差	中区地形改正(0~2 000 m)均方误差
设计精度	± 0.020	± 0.014	± 0.010	± 0.001	± 0.009	± 0.008
实达精度	± 0.014	± 0.009	± 0.010	± 0.000	± 0.001	± 0.004

软件,野外使用温纳、偶极和微分装置测量。对野外采集的原始数据进行剔除坏点,校正畸变数据,建立地形模型,采用圆滑约束最小二乘法进行反演计算,形成二维反演电阻率断面图。

在 100 线、200 线先布设 2 m 点距,探测浅表电

性特征,再加大极距至 6 m,探测深部电性特征。通过 100 线和 200 线的温纳装置探测对比试验,2 m 点距和 6 m 点距在浅表反应的电性特征相似,6 m 点距在探测地宫的空间位置方面反应较好,因此本次地宫高密度探测使用 6 m 点距进行探测(图 2)。

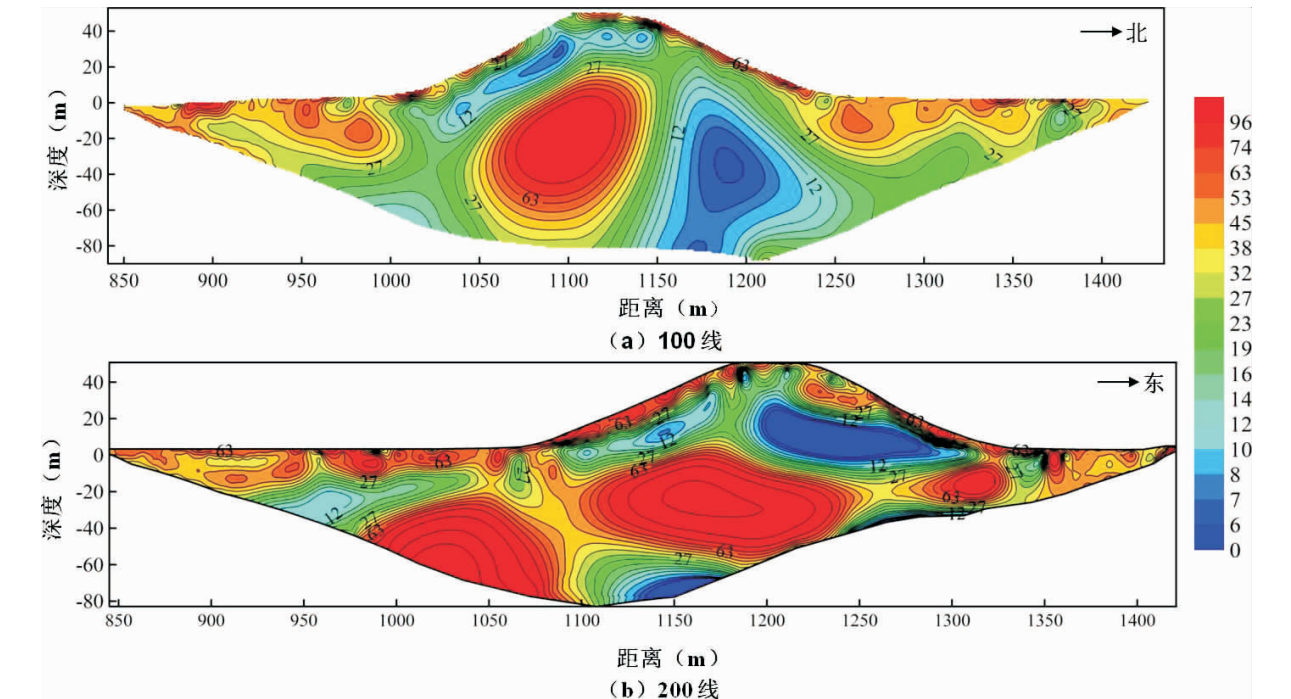


图 2 高密度电法二维反演电阻率断面图(电极距 6 m)

Fig. 2 Two-dimensional inversion section with the electric resistivity tomography technique (Distance of 6 m)

本次对地宫的探测布设了 100 线、200 线和 300 线,各条剖面长 600 m,探测点距为 6 m,使用了温纳、偶极和微分装置测量;由于该场地存在干扰游散电流,而偶极装置探测的信号相对较弱,导致测得的数据质量差,未使用;微分装置和温纳装置探测的数据质量相对较好,其中温纳装置采集的信号最好。对 3 条剖面使用温纳装置和微分装置采集的数据,进行二维反演,得到二维反演电阻率断面图(图 3),通过对 3 条剖面不同装置的二维反演断面图的分析,结果表

明,各条剖面上的微分装置和温纳装置得到的电阻率断面图显示地下电性特征基本一致,其封土堆下均有高电阻异常特征;微分装置反演的电阻率断面图电性分布相对较凌乱,不如温纳装置的规律性强;故对地宫分析时,用温纳装置探测的结果进行分析。

在墓道上探测由于探测深度相对较浅,且探测的目标体规模较小,高密度电法点距设置为 2 m,探测了 400 线、500 线、600 线,各条剖面长为 200 m,使用使用温纳、偶极和微分装置测量。

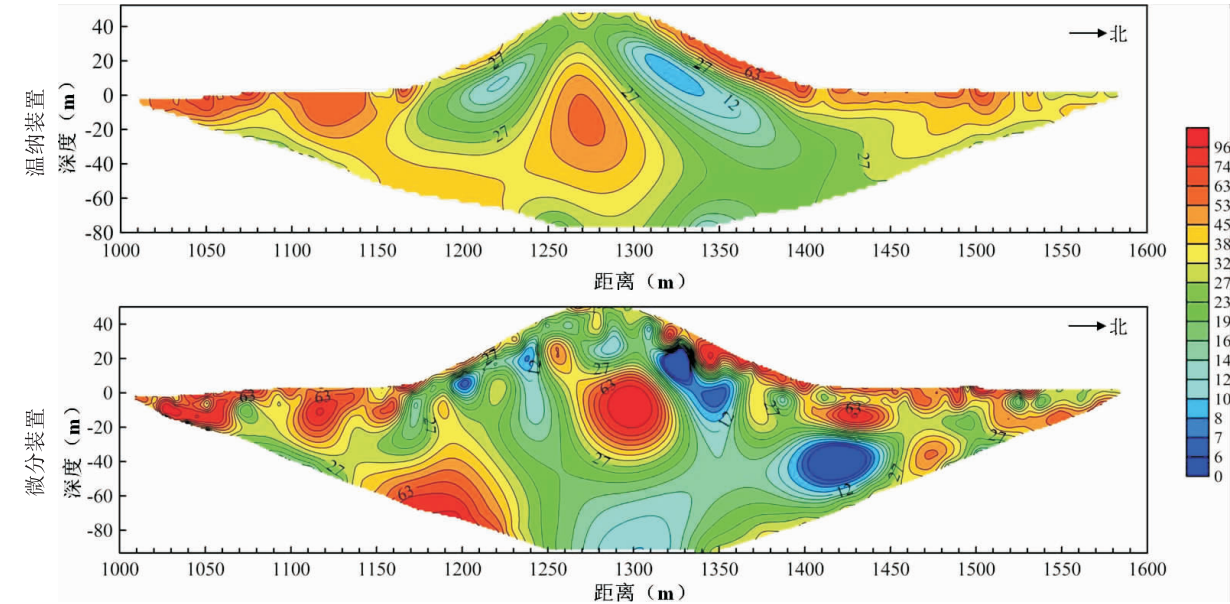


图 3 300 线温纳装置与微分装置反演结果对比图

Fig. 3 Comparison results between wenner and differential device at the 300 line

1.4 地质雷达

正常土层呈层状展布,如果地宫坍塌,或被大型盗掘,其形成的裂隙和盗掘位置会与原始土层存在结构面,介电常数和电阻率会有显著变化,这为地质雷达探测提供了前提条件(刘士毅等,2005)。

地质雷达测量使用的是瑞典马拉 MALA 地质雷达探测仪,天线为 50 MHz,采用点测量方式,探测了 100 线、200 线、300 线、400 线、500 线、600 线,100~300 线剖面长度与磁法剖面的一致,400 线~

600 线剖面长 100 m,点距为 0.2 m。通过分析地面无损探测技术综合应用的成果,归纳出一套墓道、地宫探测的组合方法(表 2)。

2 地下空间精准探测成果分析

2.1 地宫精准探测成果分析

2.1.1 高精度磁法成果分析

经过数据处理,剔除明显浅表干扰、数据圆滑等工作后,利用中国国土资源航空物探遥感中心研发

表 2 地面无损探测方法组合应用表

Tab. 2 Combined application of ground nondestructive detection methods

探测目标	方法组合	应 用	参数选择
墓道	高精度磁法	确定墓道的初步范围	点距 0.5~1m
	高密度电法	进行剖面探测,确定墓道的位置、深度和规模	点距 1~2m
	地质雷达	在推测的墓道位置,进行地质雷达剖面测量,探测结果与高密度电法进行对比分析,精准确定墓道位置和深度规模等	100M 天线,点距 0.2m
地宫	高精度磁法	确定地宫的初步范围、封土堆内部细夯土结构等	点距 0.5~1 m
	高密度电法	进行剖面探测,大致确定地宫的位置、深度和规模	根据地宫深度调整,宜为 2~6 m
	微重力	以航测、和地形三维激光扫描,为重力的近区、中区地形改正提供地形数据,探测出地宫的位置和大致规模。再对比三种方法,进行综合分析和联合反演,精确确定地宫的位置和深度及规模等	近区地形网度宜≤ 0.5 m,微重力点距 1~2 m

的重磁处理软件(GeoProbe2.0)对部分测线进行二维拟合(图4)。磁法拟合的背景主要为人工粗夯土层,参考秦始皇陵的物性资料,《秦始皇陵地宫-地球物理探测成果与技术》中记录,背景场粗夯土的磁化强度为 $154.546\times10^{-3}\text{A/m}$;细夯土层磁性采用岩石的剩磁,磁化率为 $468.5\times10^{-3}\text{A/m}$ (刘士毅等,2005);本次地宫中石材磁化率取 $600\times10^{-3}\text{A/m}$ 。通过对100线和300线磁法剖面的对比,在封土堆附近存在一高磁性异常,拟合后显示该异常主要由封土堆下的细夯土层引起,细夯土层呈三层阶梯状。磁异常特征与秦始皇陵的基本相似。

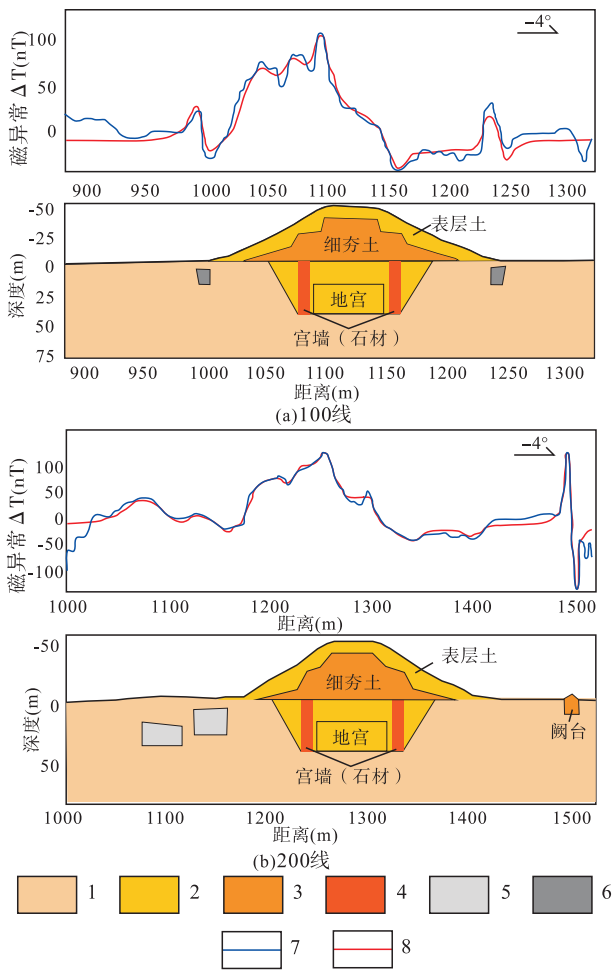


图 4 高精度磁测拟合图

Fig. 4 Fitting results of high-precision magnetic survey

2.1.2 微重力成果分析

本次布设的路经封土堆的2条剖面,在地宫开

挖后,回填土经过夯实,夯土的密度比正常土大,可以引起重力异常。为了消除地表以上封土堆人造地形引起的重力异常,利用采集的高精度三维坐标正演出其引起的重力异常,以地表为起算面的实测自由空间重力异常,减去封土堆人造地形引起的异常,最终得到以地表为参考面的重力异常(刘士毅等,2005;袁炳强等,2005)。

消除地表以上封土堆人造地形影响后,由于地宫的开挖回填夯土,夯土的密度高于原土,因此剩余重力异常由封土堆下方开挖后回填夯土引起。依据剩余重力异常可确定地宫的初始开挖范围、地宫大小、形状和埋藏深度的半定量解释。微重力异常定量反演采用二度半体人机联作迭代拟合反演方法(图5),根据反演成图显示,地宫开挖范围东西约170 m,南北约160 m,深约55 m。地宫位于底部,近矩形形状分布,东西长约100 m,南北长约70 m,高约15 m。

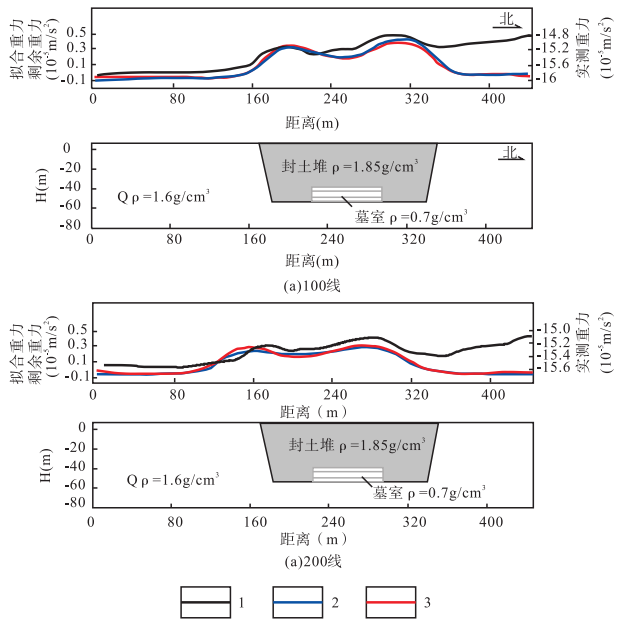


图 5 微重力反演成果图

Fig. 5 Inversion results based on high-precision gravity survey

2.1.3 高密度电法分析

根据100线、200线、300线3条二维反演电阻率断面图的电性分布特征,划分出各条剖面的异常推断图(图6),再结合其空间对应关系,做成三维空间对应关系图(图7)。由图可知,浅表为一层厚约

5 m 的高阻层,为浅表封土层引起;在封土堆顶部下方均存在一个高阻异常区(图 6)。异常区呈东西长 100~120 m,南北长约 60~70 m,深度为-20~-50 m,高阻异常区与微重力勘探推测的地宫位置相符,又结合地宫的电性特征(地宫内部一般呈空洞状,在未充水的情况下,填充的是空气,呈高阻特征)推测该异常为地宫引起,同时根据地宫呈高电阻特征证明地宫未坍塌,基本完好,再结合高阻异常区的位置和范围,推测地宫呈东西长,约 100 m,南北短,约 60 m,深度在-30~-40 m 范围内的矩形体;浅表高阻层和封土堆深部高阻区间分布有与地形近似平行的低阻层(图 6),据史料记载,地宫四周充沙以防潮防盗,流沙的毛细现象吸水能力较强,如果流沙含水量高会形成一层低阻层,故推测该低阻体可能为流沙。

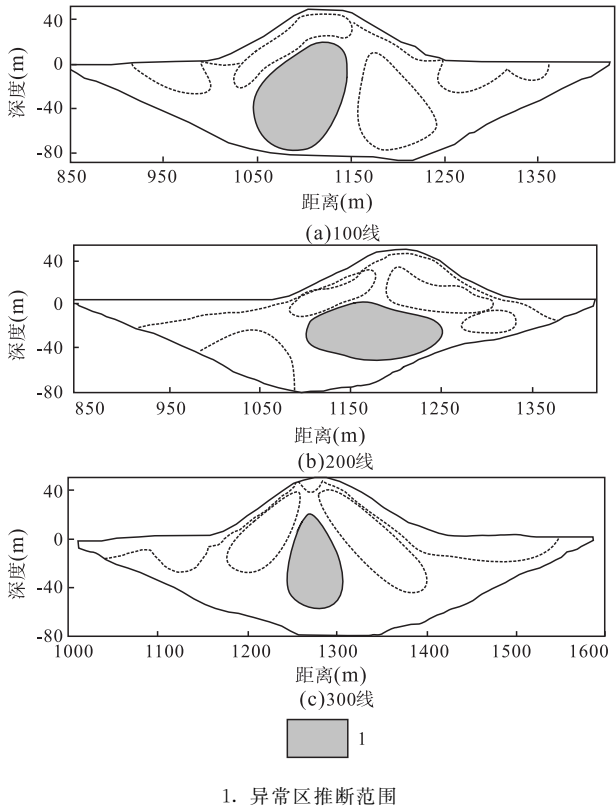


图 6 高密度电阻率断面推断异常区分布图

Fig. 6 Distribution of anomalous areas based on the two-dimensional inversion results of ERT technique

2.1.4 地质雷达成果分析

地质雷达的数据处理流程经过数据编辑、常规处理和剖面修饰处理的相干加强等。从横穿封土堆

3 条剖面的地质雷达成果(图 8)可知,地表 0~4 m 封土堆上的地层很相对较均匀,未发现有明显凹陷特征,且封土堆顶部下方约十米深处地质雷达同轴线很连续,近乎与地形平行,亦未发现明显坍塌的迹象。与高密度电法推测的结果一致,相互验证了地宫的完整性。

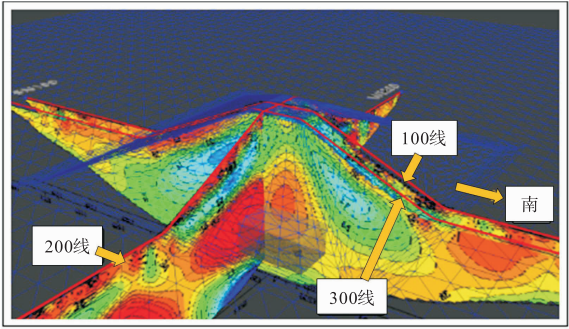


图 7 高密度电法反演电阻率断面空间分布图

Fig. 7 Spatial map of correspondence of different resistivity sections

2.1.5 地宫综合成果分析

结合高精度磁法、微重力、高密度电法和地质雷达的探测成果分析,微重力和高密度电法在封土堆下部均有空洞异常特征显示,其规模和深度及位置均相近,故推测地宫位于封土堆之下距水平面约 30~40 m 深,呈东西长约 100 m,南北宽约 60 m 的矩形体;结合高密度电法、地质雷达的探测成果分析,地宫基本完整,未坍塌;高精度磁法探测出封土堆跟秦始皇陵相似,存在一个三层的阶梯状细夯土层。

2.2 墓道精准探测成果分析

2.2.1 高密度电法成果分析

本次勘探在封土堆下南(400 线)、东(500 线)、北(600 线)三面的墓道上布设了 3 条垂直的高密度、地质雷达剖面,勘探结果如下(图 9)。

通过对 400 线、500 线、600 线 3 条垂直穿过南、东、北墓道的高密度电法探测结果分析,有如下规律:3 条剖面的 3 种装置在地表均呈现高阻异常特征;在地下均出现一个低阻异常区,似椭圆状,南墓道和东墓道的低阻异常区分别位于 4190 点和 5200 点附近,深度在 15~20 m;北墓道低阻异常位于 6050 点附近,距地表相对较深约 20~30 m。推测 3 条剖面中心下方的似椭圆状低阻异常区由墓道引起,即墓道位于该异常区。

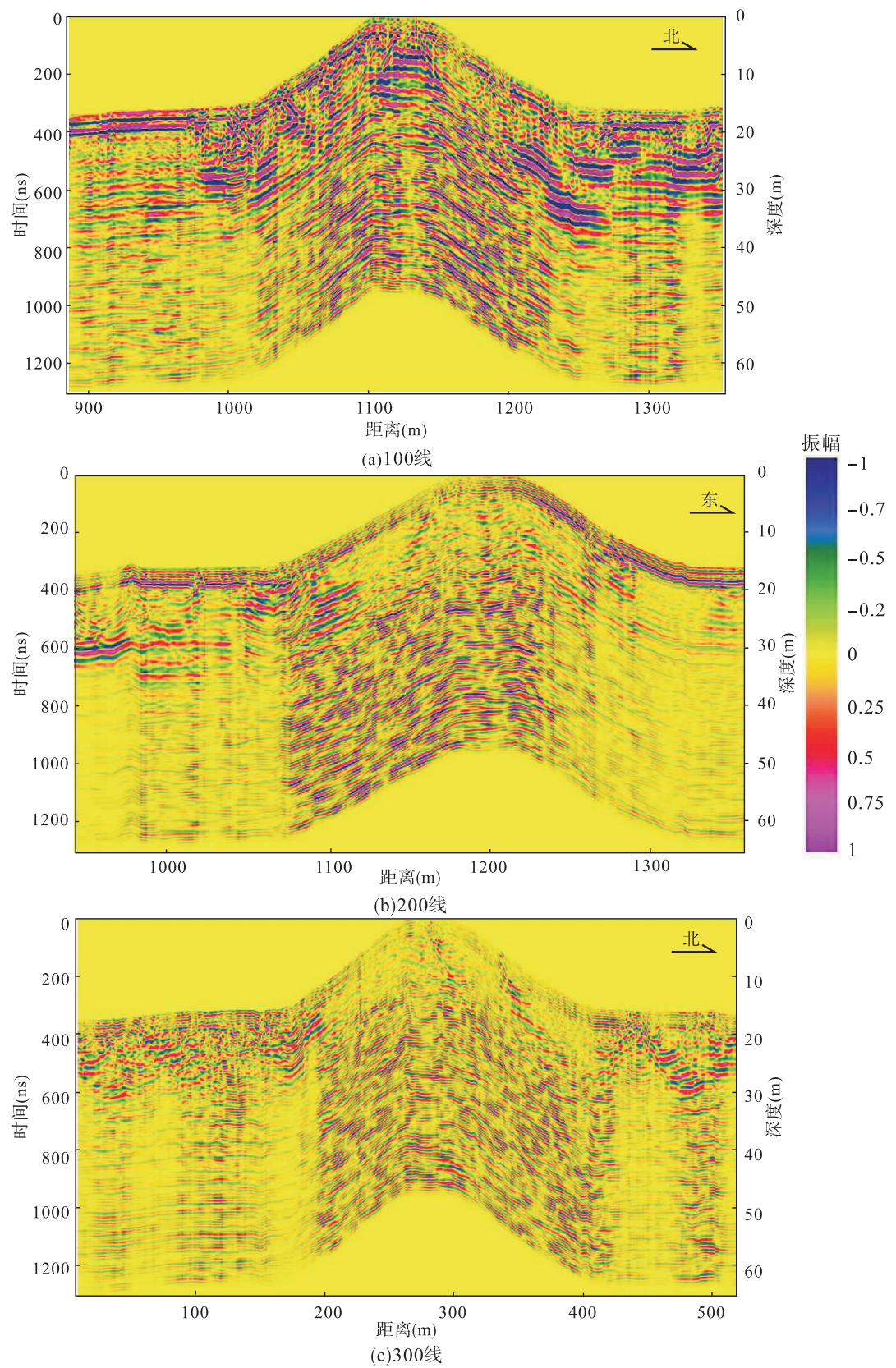


图 8 地质雷达成果图

Fig. 8 Results based on the geological radar survey

2.2.2 地质雷达成果分析

对垂直穿过南、东、北 3 条墓道的地质雷达进行了滤波处理(图 10),400 线和 500 线结果显示地表 0~2 m 为一个层位,主要为后期土层,2~5 m 为一个层位,5~12 m 为一个土层,12 m 以下为一个层位,为原始土层,600 线位于封土堆北面坡上,浅表后期土层厚约 4 m,4~17 m 为一个层位,应该是封土层,17 m 处刚好位于地平面,17~28 m 为一个层位,28 m 处于 400 线和 500 线的 12 m 处水平位置基本差不多,及 28 m 以下为原始土层。3 条线区曲

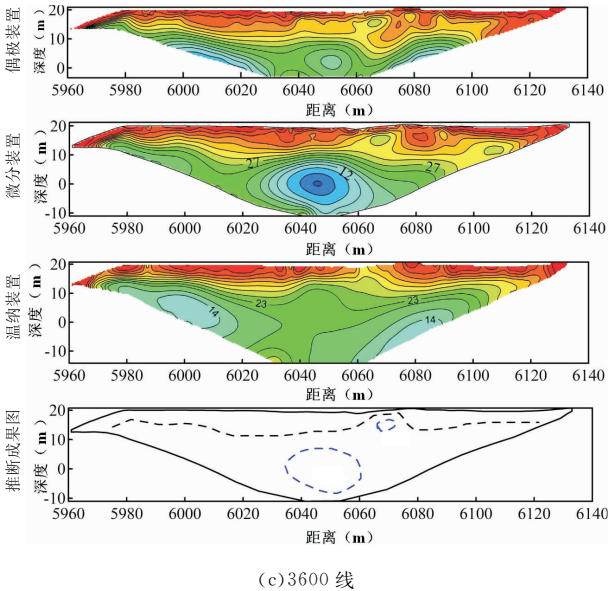
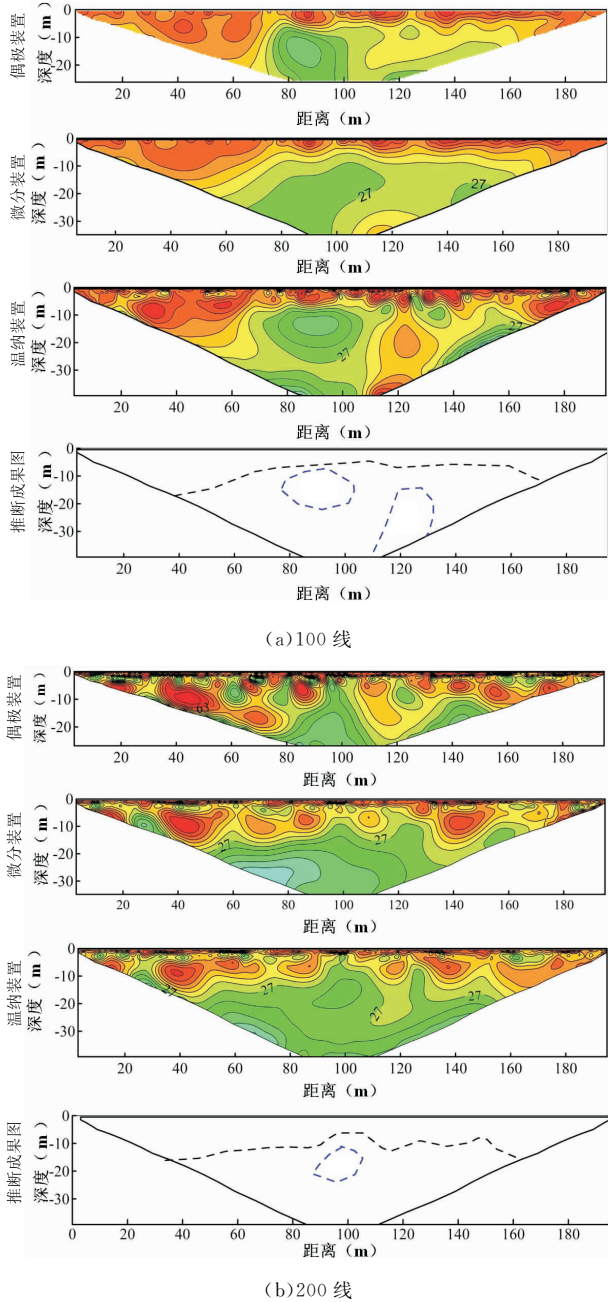


图 9 墓道高密度电阻率断面图(电极距 2 m)

Fig. 9 Results of tomb passage based on the high density resistivity measurement (Distance of 2 m)

图 10 地质雷达探测结果图

Fig. 10 Results of geological radar

线部分表示是墓道开挖时的范围,400 线显示南墓道开挖范围为 4180~4200 点,深约 13 m;500 线显示东墓道开挖范围为 5 185~5 210 点间,深约 12 m;600 线显示北墓道开挖范围为 6 035~6 055 深度约 28 m。这与高密度电法推测的位置和深度近似。

通过对墓道上高密度电法和地质雷达的探测结果分析,两者探测出的墓道位置基本一致,深度相近;南墓道位于 400 线的 4 190 点附近,深约 15~20 m;东墓道位于 500 线 5 200 点附近,深约 15~20 m;北墓道位于 600 线 6045 点附近,深约 25~30 m。地面无损探测技术在墓道上探测的结果与考古钻探探测的基本一致。

3 结论与展望

(1)通过茂陵无损伤地球物理方法,探测出地宫位于封土堆之下距水平面约 30~40 m 深,呈东西长约 100 m,南北宽约 60 m 的矩形体;地宫基本完整,未坍塌;封土堆跟秦始皇陵相似,存在一个 3 层的阶梯状细夯土层;探测出了南墓道、东墓道和北墓道的位置和深度,其探测结果与考古钻探探测出的结果基本一致。

(2)通过分析地面无损探测技术综合应用成果,归纳出一套墓道、地宫探测的组合方法。地面无损探测技术充分弥补了传统考古技术的不足,从深度、范围等反映了茂陵深部地宫的特征,为考古勘探提供了新方法。

(3)关中盆地拥有厚重的历史文化底蕴,留下灿烂的地下历史文化遗迹,但因其隐藏于地下,观赏性不强,进一步探索地下宫殿奥秘,开发三维旅游,打造精品,还原或虚拟再现古遗址风貌,成为打造具有世界影响力的历史文化旅游品牌,推动中华文化传播创新,提升中华文化的魅力和国际影响力的地有效的途径。

参考文献(References):

张茂省,董英,刘洁.论新型城镇化中的城市地质工作[J].兰州大学学报(自然科学版),2014,50(5):581-587.
ZHANG Maosheng,DONG Ying,LIU Jie. Discussion of urban geological work in newurbanization [J]. Journal of

Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(5): 581-587.
张茂省.大西安城市地质调查与地下空间应用实施方案[R].西安:中国地质调查局西安地质调查中心,2016.
ZHANG Maosheng. Geological survey and utilization of underground space in Xi'an city [R]. Xi'an: Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, 2016.
任保平.以西安为中心的关中城市群的结构优化及其方略[J].人文地理,2007,22(5):38-42.
REN Baoping. Strategy and structural optimization of Guanzhong City Group, the center of Xi'an city [J]. Human Geography, 2007, 22(5):38-42.
张茂省,王化齐,王尧,等.中国城市地质调查进展与展望[J].西北地质,2018,51(04):1-9.
ZHANG Maosheng, WANG Huaqi, WANG Yao, et al. Progress and prospect of urban geological survey in China [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(04):1-9.
张明惠,杨武站,葛西军,等.汉武帝茂陵考古调查、勘探简报[J].考古与文物,2011,2:3-13.
ZHANG Minghui, YANG Wuzhan, GE Xijun, et al. The brief report on archaeological investigation and exploration of the Maoling Mausoleum [J]. Archaeology and Cultural Relics, 2011, 2:3-13.
刘士毅,吕国印,段清波,等.秦始皇陵地宫地球物理探测成果与技术[M].北京:地质出版社,2005.
LIU Shiyi, LÜ Guoyin, DUAN Qinbo, et al. Achievements and techniques of geophysical exploration on the underground palace of Qinshihuang's mausoleum [M]. Beijing: Geological Press. 2005.
袁炳强,杨明生,刘士毅,等.高精度重力测量探测秦始皇帝陵地宫[J].地球科学,2005,30(4):498-502.
YUAN Bingqiang, YANG Mingsheng, LIU Shiyi, et al. Exploring the underground palace of the emperor Qinshihuang Mausoleum with high precision gravity survey [J]. Earth Science, Journal of China University of Geoscience, 2005, 30(4):498-502.
焦南峰.西汉帝陵形制要素的分析与推定[J].考古与文物,2013,5:72-81.
JIAO Nanfeng. The analysis and identification of morphological components of the Western Han Mausoleums [J]. Archaeology and Cultural Relics, 2013, 5:72-81.
陈华文.上海城市地质工作服务经济社会发展机制与模式探索[J].上海地质,2010,31(3):9-15.
CHEN Wenhua. Mechanism and pattern of Shanghai urban geology in serving economic and social development [J]. Shanghai Geology, 2010, 31(3):9-15.

张茂省, 朱立峰, 王晓勇. 关中盆地地下水系统分析与地下水资源可持续开发利用对策 [J]. 第四纪研究, 2005, 23(1):15-22.

ZHANG Maosheng, ZHU Lifeng, WANG Xiaoyong. Ground-water systems and sustainable development countermeasures of groundwater resources in the Guanzhong Basin [J]. Quaternary Sciences, 2005, 23(1):15-22.

丁辉, 张茂省, 王佳运, 等. 遥感技术在地质遗迹调查评价中的应用——以陕西华县莲花寺滑坡为例[J]. 地球学报, 2018, 39(2):233-240.

DING Hui, ZHANG Maosheng, WANG Jiayun, et al. The application of remote sensing to investigation and assessment of geological relics: a case study of Lianhuasi landslides in Huaxian county, Shaanxi province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(2):233-240.

ZHU Zhaoyu, ROBON Dennell, HUANG Weiwen, et al. Human occupation of the Chinese Loess Plateau since about 2.1 million years ago [J]. Nature, 2018, 559 (7715).



牛鼻子梁式基性-超基性岩同生铜镍矿床

成矿区带:柴达木北缘成矿带(Ⅲ-24)。

建造构造:基性-超基性层状杂岩体,Ⅰ号岩体出露岩性以层状淡色辉长岩、闪长岩为主,局部夹超基性岩,代表层状杂岩体上部层序。Ⅱ、Ⅲ岩体以超基性岩石为主,代表层状杂岩体下部层序,是主要的含矿层位。岩石 m/f 值为 1.24~5.06(凌锦兰等,2014)。岩体侵入古元古代沉积变质岩系。牛鼻子梁岩体中辉长岩锆石 U-Pb 年龄(367.0 ± 2.0) Ma(凌锦兰等,2014),(361.5 ± 1.2) Ma(刘会文等,2014)。

成矿时代:晚泥盆世。

成矿组分:Cu,Ni,(Co)。

矿床(点)实例:(青)格尔木市牛鼻子梁铜镍矿床,盐场北山、呼德森、南北沟、尕秀雅萍东铜镍矿点。

简要特征:牛鼻子梁在Ⅱ、Ⅲ号岩体中发现铜镍矿体,主要赋存于二辉橄榄岩或橄榄二辉岩。矿石硫化物分布主要呈浸染状,局部为团块状。矿石金属矿物有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿等;非金属矿物有橄榄石、辉石、角闪石、蛇纹石、绿帘石。矿石品位:Ni 0.23%~2.43%,Cu 0.1%~0.79%,Co 0.017%~0.097%。

成因认识:晚泥盆世,在深部地幔热柱上涌和上部柴达木地块覆盖保温的耦合条件下,地幔岩部分熔融的镁铁质岩浆侵入地壳,沿地块北缘薄弱地带侵入地壳,分异形成铜镍硫化物矿床(点)。

(中国地质调查局西安地质调查中心 杨合群)