

文章编号: 1001 - 9014(2005)06 - 0437 - 04

## 高光谱遥感考古探索研究

谭克龙<sup>1,2</sup>, 万余庆<sup>2</sup>, 杨一德<sup>3</sup>, 段清波<sup>4</sup>

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安, 710062;

2. 中国煤炭地质总局航测遥感局, 陕西 西安, 710054;

3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083;

4. 陕西省考古研究所, 陕西 西安, 710054)

**摘要:** 高光谱遥感与以往遥感技术相比, 具有图谱合一的特征和从可见光到热红外的一系列波段, 是一种综合性的遥感技术手段. 文物遗存在地面的信息一般比较微弱, 高光谱遥感具有识别微弱信息和定量探测的优势, 但高光谱遥感目前在考古中却未得到有效的应用. 本文以秦始皇陵区为研究区, 较系统地阐述了高光谱遥感在考古中的创新应用研究, 以及所取得的考古成果. 表明高光谱遥感技术在考古中的应用有广阔的前景.

**关键词:** 高光谱遥感; 遥感考古; 秦始皇陵考古

中图分类号: K854.1 文献标识码: A

## STUDY OF HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING FOR ARCHAEOLOGY

TAN Ke-Long<sup>1,2</sup>, WAN Yu-Qing<sup>2</sup>, YANG Yi-De<sup>3</sup>, DUAN Qing-Bo<sup>4</sup>

(1. College of Tourism & Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2. Aerophotogrammetry & Remote Sensing of China Coal, Xi'an 710054, China;

3. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

4. Shaanxi Archeological Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Compared with traditional remote sensing technologies, hyperspectral remote sensing has a great number of bands from visible to thermal infrared range, it presents a combination of image and spectrum. Normally, ground information of historical relics is not distinct. Contrasted to traditional remote sensing, hyperspectral remote sensing has more advantages in identifying the unclear ground information of historical relics and quantitative research. But at present, hyperspectral remote sensing still has not got effective utilization in archaeology according to our literature review. Taking Qinshuhuang's Mausoleum as an example, this study systematically explains these innovative application research results of hyperspectral remote sensing technology in archaeology. These results can be as a successful trial research achievement of hyperspectral remote sensing in archaeology and other new breakthroughs in Archaeology of Qinshuhuang's Mausoleum area by remote sensing such as the discoveries of high thermal anomalies of the Pyramid-shaped Mound, westward mausoleum passage under the Pyramid-shaped Mound, and the function of the Drainage Ditch. A set of effective archaeological remote sensing methodology is explored in this study, which will be beneficial to the application of hyperspectral remote sensing technology in archaeology.

**Key words:** hyperspectral remote sensing; remote sensing for archaeology; archaeology of Qinshuhuang's mausoleum area

### 引言

遥感作为一种快速、有效的无损探测方法, 在探测、编录、区分地表和浅表文物考古信息中已显示了突出的作用. 目前在考古中普遍使用的遥感图像主要有: 全色航空摄影、彩红外摄影、可见光、热红外和

雷达图像等. 高光谱遥感是遥感科学技术前沿之一. 和以往遥感技术比较, 它具有图谱合一的特征和从可见光到热红外的一系列波段, 是一种综合性的遥感技术手段. 文物遗存的地面信息一般比较微弱, 高光谱遥感具有识别微弱信息和定量探测的优势, 能更好地反映文物遗存的地表特征, 帮助研究人员从

不同的环境和背景中提取微弱的变化信息<sup>[1]</sup>。但高光谱遥感目前在考古中却未得到有效的应用。国际上只有美国波士顿大学与意大利的考古人员 2000 年联合在罗马遗址开展过一次高光谱遥感考古实验,而且只局限在一个点上,没有代表性和可比性。

秦始皇陵园位于西安市临潼区骊山北麓的冲积扇上,南依骊山,北瞰渭河。陵园有内外南北向长方形城垣,占地面积 2.13km<sup>2</sup>,陵墓位于内城南部。陵园外还分布有如兵马俑、鱼池等大量文物遗存,称为秦始皇陵区。陵区正南北向分布,占地面积 60km<sup>2</sup>。整个陵区内古代地面建筑早已荡然无存,只有封土堆残留地表,在封土堆四周建有现代围墙,墙外为农田和现代民居<sup>[2,3]</sup>。

## 1 遥感考古机理研究

人类活动(包括大规模的墓葬、地面建筑、大规模的灰坑和人文活动的垃圾),改变了土壤的密度、导水性和导热性,使地表出现温度、湿度和植被发育差异,为遥感探测文物遗存提供了标志<sup>[4,5]</sup>。

陵区封土堆东北约 3.5km 的戏水河西岸,有一条长 40m、宽 20m、深 2.5m 的取土坑,见图 1。地面以下 0.30~2.0m 范围内分布有大量仰韶文化时期的生活垃圾灰坑,堆积厚度在 0.1~1.5m 之间,色调和成分迥异于黄土。灰坑内堆积物呈浅灰色,成分包括草木灰、彩陶片、夹砂陶和动物头骨等。图 1 中向上的箭头代表未经扰动的土壤部位,向下的箭头代表有坑灰部位。灰坑上小麦长势明显优于未扰动区,成熟期晚于未扰动区。地面上,该区域内同一地块上的冬小麦在相同的耕种和施肥管理条件下,长势差异很大,青黄不一,见图 2。

野外调查中还发现多处文物遗存对地面温度和上覆植物的影响。



图 1 秦陵区仰韶时期人类灰坑导致的小麦长势差异  
Fig 1 Wheat growing difference of Qinshihuang's Mausoleum caused by human ash pits in Yangshao period. Upward arrows point to non-disturbed soil parts, downward arrows point to ash pit part



图 2 秦陵区仰韶时期人类灰坑分布区小麦成熟时期长势差异  
Fig 2 Ripe differences of wheat in distributed area of human ash pits of Qinshihuang's mausoleum, Yangshao period

## 2 高光谱遥感考古技术方法

高光谱数据获取系统空中集成中国科学院上海技术物理研究所 OMIS 成像光谱仪、德国 MU/DGPS 高精度航空导航定位姿态测量系统;地面集成 Field Pro FR 分光辐射光谱仪、SMS2 土壤水分测量仪、ER-2008 红外测温仪、KCW-1 浅层测温仪;形成空—地同步观测系统。2003 年 3 月 19~20 日完成陵区 60 km<sup>2</sup> 高光谱日、夜航飞行,获得日航 64 个波段、夜航 1 个热红外波段共 7G 数据量。

进行温度-湿度、温度-光谱、地表温度-浅层温度等定量分析,拟合数学模型<sup>[6]</sup>。

在对高光谱遥感图像实行一系列的光谱定标和温度定标之后,利用常规图像处理方法和高光谱图像处理提取文物遗存信息。

对获取的异常信息,开展反复多次野外调查。

结合地面物探资料,进行综合分析。

进行考古洛阳铲验证。

## 3 秦始皇陵区遥感考古发现与分析验证

### 3.1 封土堆热异常区

图 3 为 2003 年 3 月 20 日凌晨 4:00 h 获得的封土堆附近热红外图像,浅色区域为高温异常区,数字为所在点温度。图 4 为利用单波段热红外图像分别作低通和高通滤波再与原图像进行假彩色合成形成的图像,色彩变化代表了温度的变化,红色代表高温区,暗橙色、黄色代表低温区。从图 3 和图 4 中看到,封土堆上存在比较高的热异常,尤其是封土堆中心大约 180m × 140m 区域,温度更高。根据当时同步地面温度测量,封土堆中心区域温度在 11.5~12.6,其它农田在 7.1~11.2。

地面钻探发现封土堆地表向下 1m 出现粗夯土,约 2m 出现致密的细夯土层从地宫四周往上夯

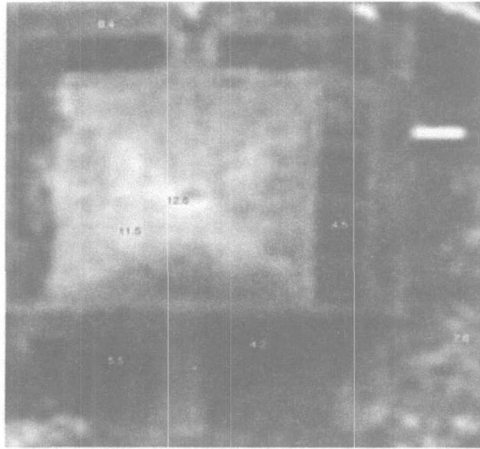


图 3 封土堆夜航热红外图像  
Fig 3 A nighttime thermal infrared image of the Pyramid-shaped Mound

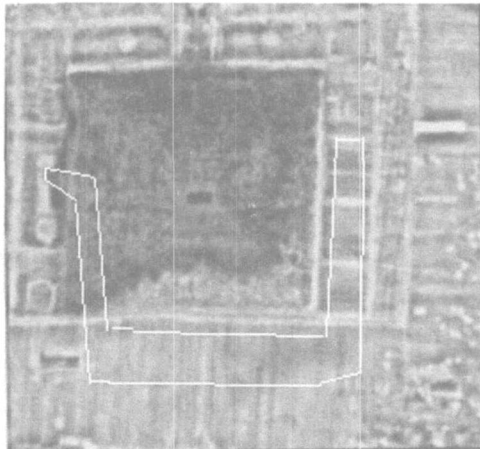


图 4 夜航热红外假彩色合成图像  
Fig 4 Pseudo color composite of nighttime aero photo  
筑的细夯墙范围与封土中心区域矩形高温异常区一致.据测定,细夯土层的密度为  $1.95\text{g}/\text{cm}^3$ ,原始土壤为  $1.59\text{g}/\text{cm}^3$ .细夯土墙建筑结构的保温性和细夯土层比其它土壤更好的热传导性导致出现封土堆热异常.

根据地球物理勘探,细夯土的土壤磁性比原始土壤大为增强,见图 5.其中部红色矩形磁异常的分布形态与图 4 温度异常形态一致.封土堆中心区域出现的高温异常和高磁异常成为证明封土堆下存在地宫的一个重要证据,见图 6.

### 3.2 阻排水渠的作用

据史书记载,为了抵御地下水对地宫的渗透和破坏,在封土堆东、南、西侧修建了地下阻排水渠.阻排水渠是已经探明的地下遗迹,地表上已没有任何遗迹和差异.但在 OMIS 热红外波段图像上(见图 3和图 4,白线范围为地下阻排水渠),阻排水渠及

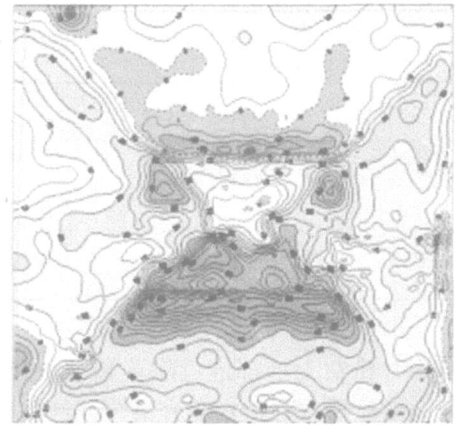


图 5 封土堆高密度磁异常分布图(中国地质调查局提供)

Fig 5 High-density magnetism anomaly map of the Pyramid-shaped Mound in 2003 (from China Geological Survey Bureau)

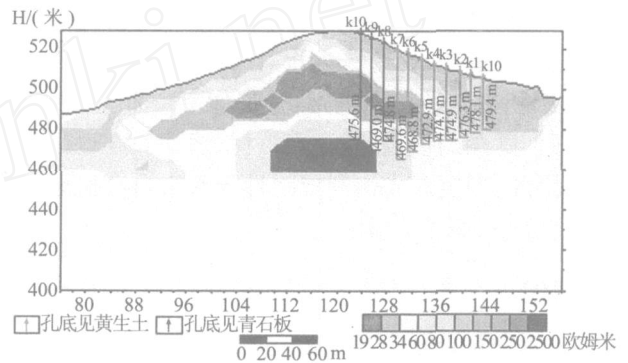


图 6 封土堆及地宫反演模型与洛阳铲探孔综合图“ (陕西考古研究所提供)

Fig 6 Integrate map of simulation model of Pyramid-shaped Mound and underground palace and detection hole of Luoyang shovel in 2003 (from Shaanxi Archaeological Research Institute)

其东侧、南侧呈现暗橙色显著低温区和黄色低温区,温度  $4.2 \sim 6.5$ ,而其它区域在  $6 \sim 10$  之间.

这些影像特征说明阻排水渠的作用依然存在.它把来自东南部山坡的地表和地下水强制改道,使其沿着阻排水渠东侧向北或从南侧向西,绕过地宫运移,这样在东侧和南侧就形成了相对地下富水区.这些区域野外实测的地表湿度也相对较大,高出  $5\% \sim 10\%$ .表 1 列出了 2003 年航空遥感飞行期间测得的一系列地表温度、地面以下  $0 \sim 4\text{cm}$  深湿度数据的相关系数,野外地表温度与湿度的负相关性比较显著.

### 3.3 西向墓道

到 2003 年初,秦始皇陵经过考古勘探确认的还只有一条东墓道.

表 1 相关系数总体分析结果

Table 1 Coefficients between ground temperature and ground humidity

序号	测试地点	测试时间 (h)	地表温度与地表湿度相关系数
1	鱼池北麦地	13:10~14:00	-0.328
2	第二陪葬墓裸地	15:45~16:10	-0.319
3	鱼池北麦地	3:10~4:00	-0.306
4	第二陪葬墓裸地	5:10~5:50	-0.413
5	第二陪葬墓附件裸地	1:05~1:55	-0.204
6	鱼池北麦地	13:50~14:20	-0.612

每年 3 月份封土堆都进行除草和翻土,从而使土壤成分全面显露.据此,对高光谱短波红外以及热红外波段进行光谱角填图、导数运算、匹配滤波等一系列处理<sup>[7]</sup>.

导数图像显示,从封土堆顶到西边缘有一条长约 160m、宽约 18m 的线性影像,光谱角填图、假彩色合成、KL 变换等也获得同样的结果.在已经探明的东墓道位置上,也有一条相对模糊的线性影像,见图 7.实地调查,在影像显示的西墓道位置上,没有发现任何踩踏的痕迹,其上石榴树、地面坡度也没有异常.因此,判定高光谱图像线性异常来自墓道地表土壤成分和温度的差异.

#### 4 结论

高光谱遥感用于考古是可行的,具有比以往遥感技术手段更大的优势.OMIS 的热红外波段对提取文物遗存温度异常信息有良好的效果;其短波红外波段配合光谱资料,对获取地表土壤矿物组份信息,识别与古墓葬有关的火烧土效果显著.本次高光谱图像分辨率较低(大于 3.6m),对考古信息提取

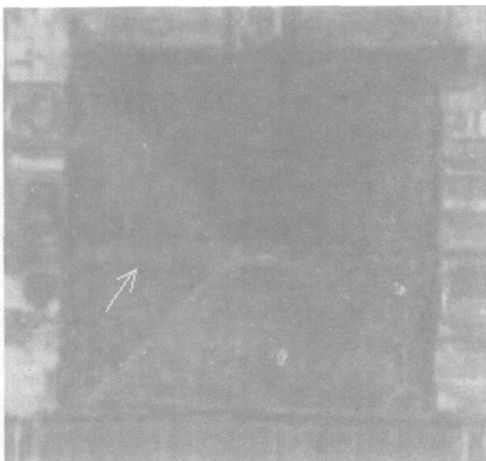


图 7 高光谱 64、63、62 波段线性增强合成图像

Fig 7 Linear enhancement composite imagery of band 64, 63, 62 of hyperspectral imagery, the arrow points to the location of westward mausoleum passage

有一定影响.

常规图像处理和信息提取方法如:假彩色合成与增强处理、单波段图像合成伪彩色图像、K-L 与 MNF 变换等,同样适用于高光谱遥感图像.高光谱遥感图像处理与波谱分析中,比较有效的方法有:光谱角填图、线性波谱解混、匹配滤波、导数运算等.

本次高光谱遥感考古取得的主要成果有:

1. 探测到封土堆中部高热异常区,为封土堆内部结构和地宫建筑的推断提供了证据.陕西省考古研究所已对秦陵地宫的存在与位置、封土堆下细夯土墙的存在、地宫中石质板材进行了洛阳铲验证.

2. 封土堆下存在西向墓道.已得到中国地质调查局和陕西省考古研究所秦始皇陵考古队的勘探验证.

3. 阻排水渠的作用依然存在,确保了地宫免受水淹.已得到中国地质调查局物探资料和陕西省考古研究所秦始皇陵考古队的勘探验证.

另外 13 处异常区,由于秦陵遗址公园土地拆迁纠纷,未能完成验证,待进一步勘查.

#### REFERENCES

- [1] Belvedere O, Burgio A, Cirio G. Hyperspectral remote sensing data analysis: archaeological application [C]. The Fifth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition. San Francisco: California, 2001.
- [2] WANG Xue-Li. *Research of Qinshihuang's Mausoleum* [M]. Shanghai: Shanghai People Publishing House (王学理. 秦始皇陵研究. 上海: 上海人民出版社), 1994, 41, 33.
- [3] Archaeological Institute of Shaanxi Province. *Archaeological Report of Qinshihuang's Mausoleum* (1999) [M]. Beijing: Science Press (陕西省考古研究所. 秦始皇帝陵园考古报告 (1999). 北京: 科学出版社), 2000, 6—20.
- [4] SONG Bao-Quan, SHAO Xi-Hui. *Remote Sensing Archaeology* [M]. Zhengzhou: Zhongzhou Ancient Book Publishing House (宋宝泉, 邵锡惠. 遥感考古学. 郑州: 中州古籍出版社), 2000, 10—25.
- [5] Remote Sensing and Aerophotogrammetry Archaeological Center of China History Museum, Archaeological Institute of Inner Mongolia. *Aerophotogrammetry Archaeological Report in the Southeast of Inner Mongolia* [M]. Beijing: Science Press (中国历史博物馆遥感与航空摄影考古中心. 内蒙古自治区文物考古研究所. 内蒙古东南部航空摄影考古报告. 北京: 科学出版社), 2002, 3—9.
- [6] XIAO Qing, LIU Qin-Huo, LI Xiao-Wen, et al. A field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves* (肖青, 柳钦火, 李小文, 等. 热红外发射率光谱的野外测量方法与土壤热红外发射率特性研究. 红外与毫米波学报), 2003, 22(5): 373—378.
- [7] ZHANG Chang-Jiang, FU Meng-Yin, JIN Mei, et al. Approach to enhance contrast of infrared image based on wavelet transform [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves* (张长江, 付梦印, 金梅, 等. 一种红外图像对比度增强的小波变换法. 红外与毫米波学报), 2004, 23(2): 119—124.