

文章编号:1001-9014(2007)05-0349-04

地下煤层燃烧的高光谱及高分辨率遥感监测方法

谭克龙^{1,2}, 周日平², 万余庆², 李先华¹

(1. 上海大学遥感与空间信息科学研究中心, 上海 200436; 2. 中国煤田地质总局航测遥感局, 陕西 西安 710054)

摘要:煤田自燃是人类面临的又一重大自然灾害. 对地下煤层燃烧过去一直依靠钻孔进行监测, 未有有效的监测方法. 以内蒙古自治区古拉本矿火区为例, 探索了利用高光谱及高分辨率遥感技术进行地下煤层燃烧监测的方法. 采用中国科学院上海技术物理研究所研制的 OMIS 成像光谱仪, 获取航空高光谱遥感图像, 同时进行地面同步红外定标测温; 根据地表特征地物辐射温度与热红外波段 DN 值的关系, 进行图像信息处理、波谱特征分析, 建立地面温度反演模型; 通过高光谱图像辐射温度反演, 结合野外地质调查、地面测试, 实现火区燃烧强度定量分析和监测. 整个过程可使用 QUICKBIRD 图像进行区域定位, 查明煤田火区分布范围. 研究表明, 利用该方法能全面真实地监测地下煤层燃烧情况.

关键词:高光谱; 高分辨率; 煤层燃烧; 定量反演; 热红外
中图分类号:V19 **文献标识码:**A

REMOTE SENSING MONITORING METHOD OF HYPERSPETRAL AND HIGH-RESOLUTION FOR UNDERGROUND COAL BED COMBUSTION

TAN Ke-Long^{1,2}, ZHOU Ri-Ping², WAN Yu-Qing², LI Xian-Hua¹

(1. Remote Sensing and Space Information Research Center of Shanghai University, Shanghai 200436, China;
2. Aerophotogrammetry & Remote Sensing Bureau of China Coal, Xi'an 710054, China)

Abstract: Human beings are confronted with another grievous disaster——coal fire. The monitoring on underground coal bed combustion relied on drilling supervising in the past, but this method is not good. By taking the coal fire of Gulaben mine in Inner Mongolia Autonomous Region as an example, the monitoring methods of underground coal bed combustion were explored based on the hyperspectra and high-resolution remote sensing technology. By employing the OMIS imaging apparatus developed by Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, the airborne hyperspectral images and the characteristic spectra of different types were obtained and the temperature was measured synchronously on the ground. Then according to the correlation of DN value of the thermal infrared band and surface temperature, the image information was processed, the spectral features were analyzed, and the surface temperature retrieval model was built. Finally, by hyperspectral imagery radiation temperature retrieval combining with the field geological surveys and ground test, the quantitative analysis and monitoring on the fires burning intensity were realized. The QUICKBIRD can be used during the whole course, it helps to find out the coal field fire regions distribution. The research result proves that this method can make us monitor the underground coal combustion situation factually and comprehensively.

Key words: hyperspectral; high-resolution; coal bed combustion; quantitative retrieval; thermal infrared

引言

通过实验室研究, 归纳各种地物光谱特征发现: 如果能实现连续的窄波段成像, 波段分的越窄越多, 遥感图像上每一个象元对应一条较光滑的光谱曲线, 图像和光谱结合为一体, 研究地表物质的成分、含量、

存在状态和动态变化与光谱反射率之间的对应关系, 就可以实现地物的直接识别^[1]. 提高光谱分辨率是遥感技术发展的重要趋势, 高光谱遥感在找矿、水环境、生态、大气等定量研究中具有巨大潜力.

1983年美国喷气推进实验室研制成功世界上第一台成像光谱仪 AIS-1 后, 成像光谱仪的制造研究始

收稿日期: 2006-11-27, 修回日期: 2007-06-28

Received date: 2006-11-27, revised date: 2007-06-28

基金项目: 中国—德国政府科技合作项目“中国北方煤火探测、灭火与监测新技术研究”[国科外欧字(2002)103号]

作者简介: 谭克龙(1964-), 男, 湖南长沙人, 博士, 主要从事遥感、地理信息系统研究.

终处于国际遥感发展的前沿. 到目前为止, 世界上已有 10 多个国家先后制造出 60 多种成像光谱仪^[2]. 卫星光谱分辨率最高的是 EO-1 卫星上的 Hyperion 高光谱图像, 具有 220 个波段, 光谱分辨率为 10nm, 地面分辨率为 30m, 已经广泛应用于诸多领域.

目前, 国内高光谱遥感的主要应用研究领域有: 监测识别赤潮生物优势物种^[3]; 太湖、滇池水环境监测和动态跟踪研究^[4]; 区域性湿地植被生态监测^[5], 识别和提取矿化蚀变信息^[6]; 不同品种、肥水条件下的冬小麦专项研究^[7]; 环青海湖草场生态质量监测研究^[8]; 2001 年赵永超、童庆禧等还对日本东京湾电厂热排水分布探测进行了研究.

利用高光谱监测煤层自燃的研究还不多见. 李小文、Doizer(1982) 等研究表明, 地表热红外辐射具有方向性^[9]. 提高地表温度反演精度是热红外遥感的本质问题, 但是从几十米到几公里的遥感象元很难满足同温条件. 另外, 单通道遥感数据信息量明显不足, 有时难以支持有效的反演实现. 煤田火区通常由许多小火点组成, 以内蒙古自治区古拉本矿区为例, 小的煤火点不足 3m × 3m, 大的煤火区达到 500m × 30m, 用 Hyperion 高光谱图像研究煤火空间分辨率显然不够, 火区的温度和范围无法精确反映. 本文采用中科院上海技术物理研究所生产的 OMIS 光谱仪, 128 个波段, 其中热红外有 8 个波段, 像元亮度级差从 0 ~ 4095, 对古拉本矿区进行高光谱遥感飞行获取图象, 地面分辨率 3m, 在高光谱飞行的同时在地面对不同类型的特征地物进行辐射温度测量, 通过研究地物温度与光谱辐射值(DN)的关系,

建立温度反演模型, 结合快鸟卫星图像定位, 定量反演区域真实温度, 查明煤田火区分布范围, 综合分析煤田火区的燃烧发展趋势.

1 研究方法

1.1 实验区简介

内蒙古自治区古拉本矿区位于宁夏回族自治区石嘴山市西 20km, 地理坐标东经 106°04' ~ 106°10'、北纬 39°01' ~ 39°08'. 总体呈 NNE-SSW 长条形向斜展布, 侏罗系下统延安组可采煤层 7 层, 煤层平均总厚度 33.65m, 煤层露头分布在向斜四周. 煤质具低灰、低硫、低磷和高发热量、高比电阻、高块煤率、高化学活性、高精煤回收率、高机械强度的特点. 区内山峦起伏, 沟谷纵横, 地形复杂, 高差悬殊. 最高海拔 2451m, 最低 1720m. 岩层和煤层裸露地表, 地面植被稀疏. 属大陆性气候, 干旱少雨, 气候干燥.

研究区是我国北方煤层自燃最大火区之一, 煤层燃烧已有 100 多年历史. 近 20 年来, 由于小煤窑大量无序开采, 导致老火区迅速扩大, 新火区不断产生. 火情最严重时, 有火区 22 个, 活火区面积达到 2.64km², 几乎所有的煤层露头附近都发生过自燃或者正在自燃. 国家发展与改革委员会和自治区政府从 1985 年就开始灭火, 而对灭火效果和地下煤层燃烧状况依靠钻孔进行监测, 但由于上覆砂岩层厚、地形陡峭、施工困难、治理难度大, 监测效果一直不佳, 部分火区至今仍未得到完全查明.

1.2 工作方法

地物热辐射能量差异取决于地物的表面温度和

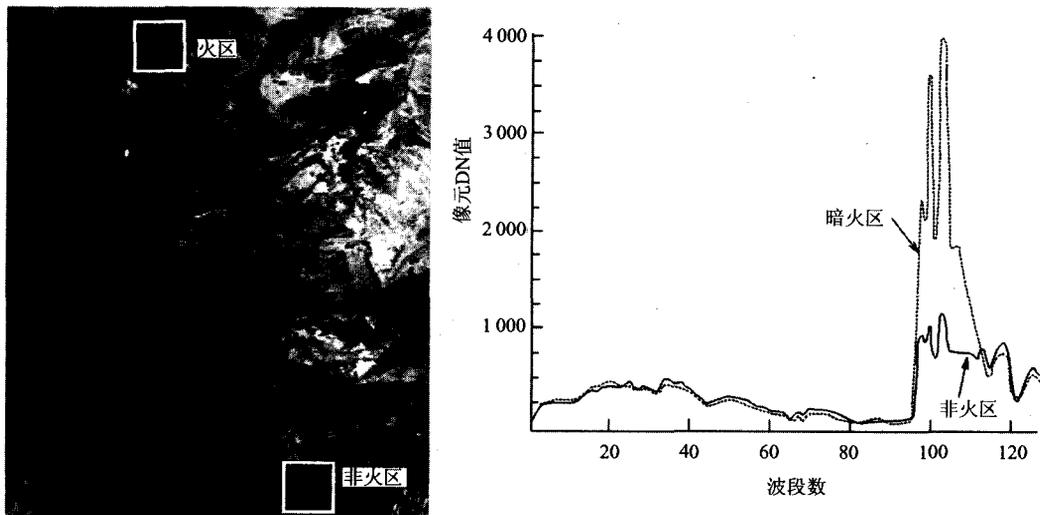


图 1 暗火区与非火区波谱曲线对比图

Fig 1 The comparison graph of spectrum between underground fire district and unfire district

发射率, 地物热辐射能量大小与地物表面温度的 4 次方成正比。地物表面温度的微小变化不能引起视觉差异, 但能引起辐射能量的明显差别^[1], 见图 1, 图中右图曲线是左图中暗火区与非火区高光谱图像光谱曲线。热红外波段像元值所反映的全部是热辐射能量信息, 水泥路面、煤堆、黑色剥离物等背景温度相对较低, 火区热异常明显。因此, 通过地物辐射值能够准确地实现火区温度的定量分析^[10]。

1.2.1 航空高光谱及地面温度定标数据获取

采用中国科学院上海技术物理研究所研制的 OMIS I 光谱仪在正午 11:00 至 14:00 扫描获取日航数据, 飞行时进行同步温度定标测试。正午时间地物所接受的太阳辐射是相同的, 阴影影响较小, 因此地物温度差异能很好地区分。

1.2.2 图像辐射校正

扫描图像从航带中心线向两侧, 地面面元的辐射能量及程辐射发生变化, 象元亮度逐渐变小, 影像逐渐变暗。相同的地物在图像边缘与中心的亮度明显不同, 可能导致解译结果出错, 这种现象是由扫描仪固有特性引起的^[11]。

采用基于统计特征的方法对每一航带的高光谱图像进行辐射校正:

① 各个波段逐列统计, 计算每列的均值 p_i (i 代表列数, 通常一个航带的图像有数千行, 每行 512 个象元);

② 分别计算各个波段的均值 p ;

③ 求取每列的调整系数 $p_k = p_i/p$;

④ 计算各个象元的校正结果 $p_{ij} = R_{ij}/p_k$ (p_{ij} 为校正结果, R_{ij} 为第 n 波段的 j 行、 i 列的象元值)。

1.2.3 图像几何校正和镶嵌

OMIS I 安装在陀螺仪平台上, 飞机俯仰、侧滚引起的几何畸变可以忽略, 主要畸变来自飞机偏航、

同一扫描行内的投影误差以及山区高差引起的几何误差。由于扫描带宽只有 512 个像元, 所以, 必须将各航带镶嵌才能实现区域定量分析, 而当时的 OMIS 传感器没有 POS 参数, 航带镶嵌十分困难。采用融合后分辨率为 0.61m 的 QUICKBIRD 正射卫星图像作为参考标准, 见图 2 左上, 选取相同地物点校正航空高光谱扫描图像, 完成几何校正镶嵌, 见图 2 右上, 或将成像光谱图像与高空间分辨率影像进行融合处理^[12], 以便进一步进行区域性温度异常研究。

1.2.4 波段选择与温度定标

飞行过程中, 利用红外测温仪对定标点同步测温。日航飞行温度定标测试选择了 14 个点, 相应的地面温度、以及各个热红外波段的遥感数据 (DN 值) 见表 1, 105 ~ 112 波段为 OMIS I 的 8 个热红外通道。

根据地面同步测试温度与 OMIS I 热红外波段图像上同名点的红外辐射值, 进行日航热红外波段温度定标和光谱定标。温度定标包括指数和线性拟合方式, 获取 2 者之间的相互关系式, 见表 2。从标准差和均值误差统计整体结果来看, 指数回归分析效果均比线性回归分析效果好, 经过指数转换后的火区图像上整体平均温度在 37.239 ~ 39.090°C, 相差 1.851°C。通过 105 ~ 112 波段 8 个热红外通道的相关性分析, 107 与其它热红外通道相关性最大且信噪比高。对比野外测试数据, 第 107 波段计算的红外辐射温度最接近于实测温度。因此, 选取 107 (中心波长 9236.7nm) 波段为热红外图象信息源。经指数转换的红外辐射温度图像, 见图 2 左下, 利用象元亮度分割技术, 生成红外辐射温度异常图像。为了保证火区温度异常不出现遗漏, 而且尽可能与背景差异区分开来, 必须确定煤层自燃温度异常最低值。根据野外测温与钻孔综合分析研究, 当地面辐射温度大于 70°C 时, 地下存在暗火区, 因而将辐射温度大

表 1 日航定标点温度与 OMIS I 热红外波段遥感数据 (DN 值)

Table 1 The temperature of the flagging sites and infrared remote sensing digital values of OMIS I in day flight

定标点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
位置	水泥广场	煤堆	污水池	砂土球场	水泥球场	水泥地面	选煤厂	烧变岩	燃烧的煤层					
温度/°C	45.0	36.5	48.5	23.0	49.0	40.0	45.5	41.0	57.5	41.0	56.0	300.0*	81.4	110.1
105 波段	824	690	1200	543	1175	935	830	844	1163	971	1244	4095*	1609	2157
106 波段	910	761	1407	533	1392	1044	911	937	1364	1107	1474	4095	1936	2621
107 波段	911	778	1379	549	1349	1019	895	916	1352	1136	1421	4095	1841	2459
108 波段	888	749	1204	568	1195	968	856	852	1188	1006	1223	4095	1557	2031
109 波段	873	745	1133	583	1121	949	850	838	1095	952	1166	4095	1441	1814
110 波段	835	733	1017	602	1012	888	807	805	988	890	1040	3773	1234	1520
111 波段	779	705	921	609	914	828	766	764	900	839	965	2825	1097	1270
112 波段	716	677	773	639	759	729	706	710	769	720	782	1623	845	928

* 仪器所能显示的最大值, 实际可能超出测试值

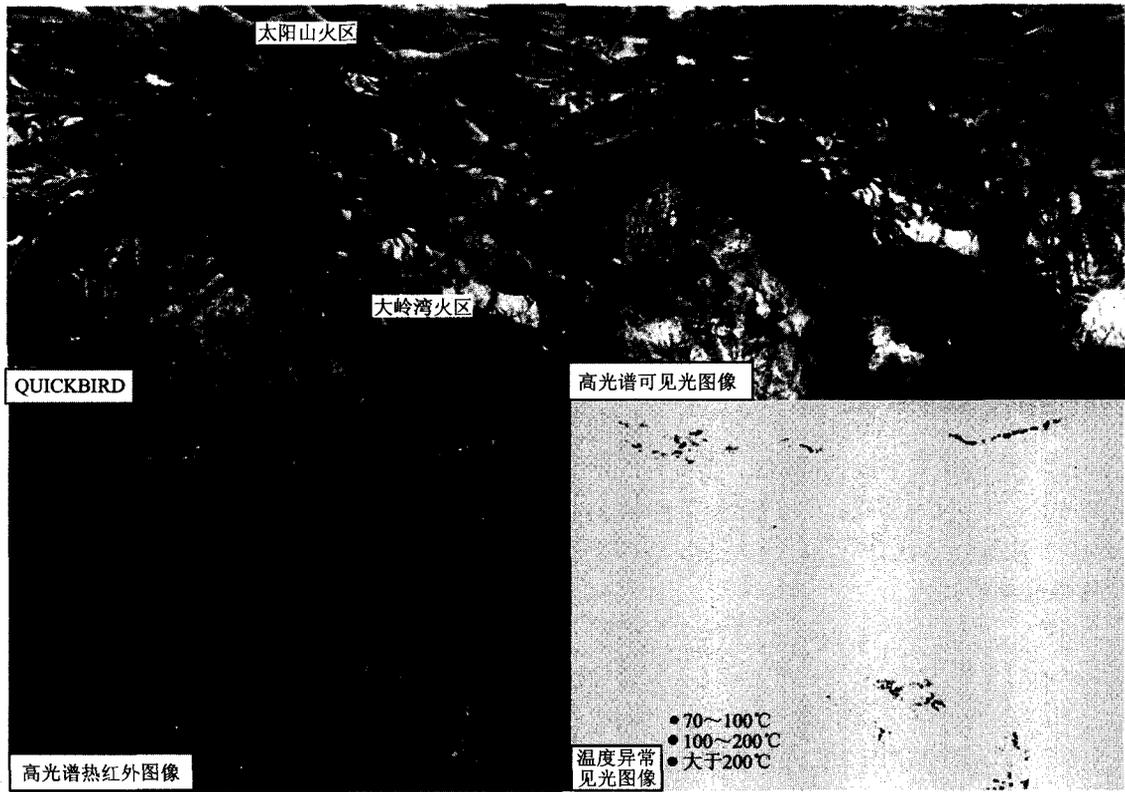


图2 大岭湾——太阳山火区图像及温度反演图
 Fig. 2 Images & temperature retrieved graph of Dayawan-Taiyangshan fire district

于70℃区域确定为温度异常区. 为了直观地显示温度异常等级, 选择70~100℃、100~200℃、200℃以上3个温度异常间隔, 将温度图像进行分类, 制作出温度分区图, 见图2右下.

表2 日航热红外波段拟合温度与定标点温度误差(℃)
 Table 2 Temperature difference between the thermal infrared band fitting and the flagging sites(℃)

波段	指数拟合和线性拟合公式	剩余标准差	均值误差
105	$Y = 85.20e^{0.00036x} - 76.67$	5.34	4.74
	$Y = -6.74 + 0.055x$	22.64	9.93
106	$Y = 24.53e^{0.00061x} - 4.83$	4.85	4.27
	$Y = 0.64 + 0.042x$	34.76	13.14
107	$Y = 35.22e^{0.00054x} - 19.39$	4.52	3.93
	$Y = -3.81 + 0.046x$	31.08	12.6
108	$Y = 119.74e^{0.00031x} - 117.23$	4.57	4.09
	$Y = -36.99 + 0.079x$	10.11	8.68
109	$Y = 189.16e^{0.00024x} - 191.69$	5.52	4.90
	$Y = -37.28 + 0.082x$	7.50	5.79
110	$Y = 215.07e^{0.00024x} - 220.86$	8.09	6.10
	$Y = -29.24 + 0.087x$	5.68	4.29
111	$Y = 130.88e^{0.00043x} - 143.52$	9.09	6.00
	$Y = -55.87 + 0.126x$	6.37	4.97
112	$Y = 66.26e^{0.00114x} - 107.12$	9.56	6.46
	$Y = -160.4 + 0.284x$	4.93	3.95

2 结论与讨论

1) 高光谱图像能够探测出所有火区热异常, 且圈定的热异常范围与地下热异常范围基本对应. 古拉本矿区煤田火区实际对比分析发现, 95%的温度异常孔都位于遥感图像上温度异常区范围内, 而所有温度正常孔都落在温度异常区之外. 钻探和物探方法在煤田火区监测中有明显的局限性, 而利用高光谱遥感手段可以经济、高效地探测出火区确切范围, 快速准确地掌握火区燃烧现状, 减少物探、钻探工程量, 特别在地形高差大, 地面坡度陡的情况下, 优势更为突出.

2) 遥感等温线图定义的温度异常区等级与实际测量温度等级存在一定差异, 因为遥感图像上测量的温度为辐射温度, 反映一个像元或几个像元范围内地表地物的平均辐射温度, 通常比火区地下实际温度要低.

3) 本次古拉本火区高光谱遥感图像的空间分辨率和光谱分辨率均比较高, 是到目前为止, 国内外在煤层自燃研究与监测中使用的最高分辨率图像.

(下转 358 页)

- [2] Chein-I Chang. Anomaly detection and classification for hyperspectral imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(6):1314—1325.
- [3] HE Lin, PAN Quan, ZHAO Yongqing, et al. Anomaly detection in hyperspectral imagery based on feature fusion of band subsets [J]. *Acta Photonica Sinica* (贺霖,潘泉,赵永强,等. 高光谱图像中基于波段子集特征的融合异常检测. *光子学报*), 2005, **34**(11):1752—1755.
- [4] HE Lin, PAN Quan, ZHAO Yongqiang, et al. CFAR target detection in unknown background based on subspace projection in aerial hyperspectral imagery [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* (贺霖,潘泉,赵永强,等. 基于子空间投影的未知背景航拍高光谱图像恒虚警目标检测. *航空学报*), 2006, **27**(4):657—662.
- [5] HE Lin, PAN Quan, ZHAO Yongqiang. Target detection in hyperspectral imagery based on linear mixing model reconstructed from measurements [J]. *Acta Electronica Sinica* (贺霖,潘泉,赵永强. 量测重构线性混合模型高光谱图像目标检测. *电子学报*), 2007, **35**(1):23—27.
- [6] Shawn Kraut, Louis L Scharf, Todd McWhorter L. Adaptive Subspace Detectors [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, **49**(1):1—16.
- [7] WU Chun-Fen, ZHANG Wei, CONG Ming-Yu, et al. An automatic target recognition algorithm based on correlation of infrared multispectral imagery [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (武春风,张伟,丛明煜,等. 基于红外多光谱图像相关性的自动目标识别算法. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(4):265—268.
- [8] Montserrat Fuentes. A formal test for nonstationarity of spatial stochastic processes [J]. *Journal of Multivariate Analysis*, 2005, **96**(1):30—54.
- [9] Anderson T W. *An introduction to multivariate statistical analysis (3rd Edition)* [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [10] WANG Dang-Wei, MA Xin-Yi, WANG Shao-Gang, et al. New approach to radar target identification using a generalized likelihood ratio test [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王党卫,马兴义,王少刚,等. 一种基于广义似然比检测的雷达目标识别新方法. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4):311—315.

(上接 352 页)

所有热红外波段温度图像的均值相差不超过 2℃, 温度误差小于 6%, 说明结果比较准确; 红外波段温度分辨率高, 可以区分到 0.1℃ 的温度差异, 利用高光谱热红外波段编制的火区等温线图, 取得了理想效果, 说明方法可行。但不能在所有情况下都用相同的系数来反演地表温度 (Dozier, 1996), 也就是说, 在古拉本矿区火区获得的煤火温度反演公式不能用于其他地区的温度反演。

4) 理论上来说, 夜航高光谱数据能更真实地反映地表温度变化, 但是夜航数据获取比较困难, 本次由于银川机场不能夜航而未能实施, 值得进一步深入研究。

REFERENCES

- [1] Clark R N, Roush T L. Reflectance spectroscopy. Quantitative analysis techniques for remote sensing applications [J]. *J. Geophys. Res.* 1984, **89**: 6329—6340.
- [2] www.natur.cuni.cz/IGP/hypertable.xls, http://www.ers.ac.cn/zsjs/eos_5.html.
- [3] SHU Rong, XUE Yongqi. Research of Airborne High Spectrum Sensor for Red Tide Monitoring [C]. Seminar of Spectrum Technology and Application of China Space Science Society (舒嵘,薛永棋. 赤潮监测机载高光谱成像仪的研制. 中国空间科学学会成像光谱技术与应用研讨会论文集), 2002, 4—6.
- [4] YIN Qiu, KUANG Dingbo. Remote Sensing Application Technical Research of Water Environment [C]. Seminar of Spectrum Technology and Application of China Space Science Society (尹球,匡定波. 水环境遥感应用技术研究, 中国空间科学学会成像光谱技术与应用研讨会论文集), 2002. 18—20.
- [5] Tong Qingxi, Zheng Lanfen, Wang Jinnian et al. Study on imaging spectrometer remote sensing information for wetland vegetation [J]. *Journal of Remote Sensing* (童庆禧,郑兰芬,王晋年等. 湿地植被成像光谱遥感研究. *遥感学报*), 1997, **1**(1):50—57.
- [6] GAN Fuping, WANG Runsheng, GUO Xiaofang, et al. Discrimination and extraction of altered minerals using imaging spectral remote sensing at Chicheng-Chongli area of Hebei province, China [J]. *Geoscience* (甘甫平,王润生,郭小方,等. 利用成像光谱遥感技术识别和提取矿化蚀变信息. *现代地质*), 2000, **14**(2):465—469.
- [7] Zhao Chunjiang; Huang Wenjiang; Wang Zhijie, et al. Relationship between canopy water content and temperature of winter wheat under different water and nitrogen treatments [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (赵春江,黄文江,王之杰,等. 不同水肥处理下冬小麦冠层含水量与温度关系的研究. *农业工程学报*), 2002, **18**(2):25—28.
- [8] ZHANG Fengli. Study of Multiphasic Spectrum Characteristic of Meadow [D]. MA. Thesis. (张凤丽. 草地多时相光谱特征研究-以环青海湖地区为例. 博士学位论文, 中科院上海技术物理研究所). 2005.
- [9] LI X. An Invertible Coniferous Canopy Reflectance Model [D]. MA. Thesis. University of California, Santa Barbara. 1981.
- [10] TONG Jin-Jun, QIU Kang-Mu, LI Xiao-Wen. New method of in-flight absolute calibration for thermal infrared channels of satellite sensors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (童进军,邱康睦,李小文. 一种卫星遥感仪器热红外通道在轨绝对辐射定标新方法. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(4):277—280.
- [11] ZHANG Bing. High Spectrum Data Excavation Assisted with Space-Time Information [D]. MA. Thesis. (张兵. 时空信息辅助下的高光谱数据挖掘. 博士学位论文, 中科院遥感应用研究所). 2005.
- [12] DONG Guang-Jun, ZHANG Yong-Sheng, FAN Yong-Hong. Image fusion for hyperspectral data of PHI and high-resolution aerial image [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (董广军,张永生,范永弘. PHI 高光谱数据和高空间分辨率遥感图像融合技术研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(2):123—126.