

# 利用温度和植被指数进行地物分类和土壤水分反演\*

刘良云<sup>1)</sup> 张兵<sup>1)</sup> 郑兰芬<sup>1)</sup> 童庆禧<sup>1)</sup>  
刘银年<sup>2)</sup> 薛永祺<sup>2)</sup> 杨敏华<sup>3)</sup> 赵春江<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院遥感应用研究所,北京,100101;<sup>2)</sup>中国科学院上海技术物理研究所,上海,200083;

<sup>3)</sup>北京农业信息技术研究中心,北京,100089)

**摘要** 首先利用地物表面温度和植被指数,成功地对北京精准农业示范区内生长旺盛小麦、稀疏小麦、池塘水体、水草、淤泥和裸露土壤等 6 种地物进行了分类。其次,利用地物表面温度(LST)和归一化植被指数(NDVI)作为坐标系,建立 LST—NDVI 三角形分布的散点图,分析了散点图的地物特征分布及其物理意义。与植被的红外和近红外两个特征波段构造的散射图相比,同类样本的离散度更小,不同类别样本之间的距离更大。最后,提出了植被指数—表面温度的土壤水分反演模型,结合地面采样数据,成功地反演了实验区内作物地块的土壤水分。

**关键词** 植被指数,陆地表面温度,实用模块化成像光谱仪,土壤水分。

## TARGET CLASSIFICATION AND SOIL WATER CONTENT REGRESSION USING LAND SURFACE TEMPERATURE(LST) AND VEGETATION INDEX(VI) \*

LIU Liang-Yun<sup>1)</sup> ZHANG Bing<sup>1)</sup> ZHENG Lan-Fen<sup>1)</sup> TONG Qing-Xi<sup>1)</sup>  
LIU Yin-Nian<sup>2)</sup> XUE Yong-Qi<sup>2)</sup> YANG Min-Hua<sup>3)</sup> ZHAO Chun-Jiang<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

<sup>2)</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>3)</sup> Beijing Agriculture Information Technology Research Center, Beijing 100089, China)

**Abstract** Land surface temperature(LST) and NDVI were used for classification and soil water content(SWC) regression. Firstly, the 6 kinds of targets, dense wheat, sparse wheat, naked soil, water in ponds, silt and aquatic plants, were well classified using LST and NDVI channels. Secondly, the triangle-shaped scatter-plot was built and analyzed using LST and NDVI channels. Compared with the scatter-plot built by red and near-infrared bands, the spectral distances between different classifications are larger, and the samples in the same classification are more convergent. Finally, a VIT model was presented to extract SWC using LST and NDVI channel, which predicts the moisture well. The mapping of soil's moisture in the wheat area was calculated and illustrated for scientific irrigation and precise agriculture.

**Key words** vegetation index, land surface temperature, operation modular imaging spectrometer, soil water content.

### 引言

地物在不同波段的辐射或反射特性各不相同。在可见/近红外波段,主要通过地物的反射率特征来进行分类和分析。其中,植被由于叶绿素的吸收和反射以及植物叶子内部组织结构的多次反射散射,形成了其独特的蓝边、绿峰、黄边、红谷、和红边特征<sup>[1]</sup>。在短波红外波段,特征光谱主要表现为 O-H、

C-O、C-H 等分子键及其它矿物的化学键的振动、弯曲和电子跃迁所形成的吸收特征。在热红外波段,地物差异主要表现在温度和发射率的大小。其中温度主要取决于地物热惯量、可见光波段的反射率和地物发射率;而发射率由地物性质所决定<sup>[1]</sup>。所以,根据遥感地物的辐射特性,选择合适的波段,进行分类和分析,即可得到很好的结果。

本文利用可见/近红外的植被指数和热红外遥

\* 国家 973 计划(批准号 G2000077900)和北京精准农业示范资助项目  
稿件收到日期 2001-08-13,修改稿收到日期 2002-04-22

\* The project Supported by the 973 Program of China (No. G2000077900) and Beijing Precision Agriculture demonstration  
Received 2001-08-13, revised 2002-04-22

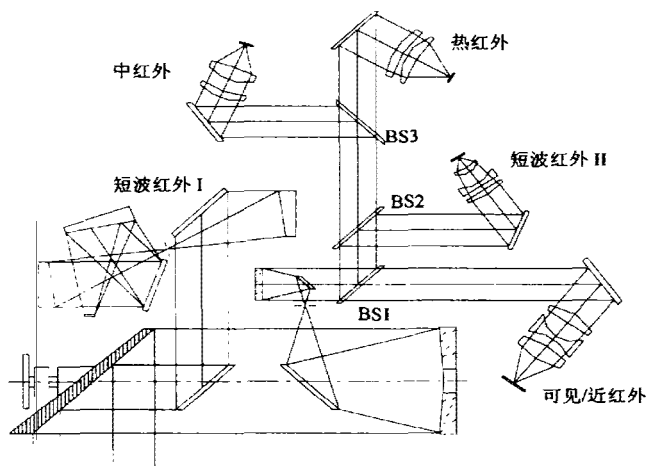


图1 OMIS光学系统

Fig. 1 The optical system of operation modular imaging spectrometer(OMIS)

感的温度两个“波段”的信息,对北京小汤山精细农业示范区的小麦、土壤、水体等目标进行了分析和分类。飞行试验数据是在2001年4月26日上午10:30获取的,数据获取仪器是由中国科学院上海技术物理研究所研制的实用模块化成像光谱仪OMIS<sup>[2]</sup>。OMIS仪器采用光机扫描方式成像,扫描部件为一45°旋转反射镜。其光学系统如图1所示,成像子系统采用特别的双光学通道设计,即使用成像主镜的中心遮光区,形成两个独立的光学通道—主通道和辅助通道。由辅助通道承担短波红外I光谱区(1.2μm~1.9μm),而主通道承担其他四个光谱区,既使得困难的光谱分离得以实现,又提高了光学效率。该成像光谱仪瞬时视场3mrad,总视场70°,覆盖了可见近红外、中短波红外和热红外波段。其中可见近红外64个波段(0.064~1.1μm),短波红外I 32个波段(1.2~1.9μm),短波红外II个波段(2~2.5μm),中波红外8个(3~5μm),热红外8个波段(8~12.5μm)。

## 1 热红外遥感的基本原理

黑体普朗克辐射方程为

$$L_{\lambda}^{BB} = \frac{C_1}{\pi\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad (1)$$

式(1)中  $T$  为黑体温度,以  $K$  为单位,  $\lambda$  为波长,以  $\mu\text{m}$  为单位,  $C_1 = 3.74151 \times 10^8 \text{ w}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^4$ ,  $C_2 = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{k}$ ,  $L_{\lambda}^{BB}$  为黑体的光谱辐亮度,单位为  $\text{w}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。

大多数物质的辐射特性并不是理想的黑体,其

发射率定义是:同样温度条件下该物质的辐亮度与黑体辐亮度的比值,即

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}}{L_{\lambda}^{BB}}, \quad (2)$$

或

$$L_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} L_{\lambda}^{BB}. \quad (3)$$

式中  $\epsilon_{\lambda}$  是发射率,  $L_{\lambda}$  是物体的辐亮度。

光谱发射率的差异能够解释地物的性质和组成,但通过航空遥感手段直接获取地物发射率是十分困难的。从式(1)和式(3)可以发现,尽管可以获得地物  $N$  个光谱通道的辐亮度,但有  $N+1$  个未知量待求,即  $N$  个未知发射率和1个未知温度。所以,需要设计温度和发射率反演方法来提取地物的温度和发射率信息<sup>[3,4]</sup>。

参考通道法挑选某个光谱通道并为其设定一恒定的发射率值,该发射率的取值和波段挑选与遥感地物的类型有关。而一旦地物某个波段的发射率已知,便可以利用式(1)和式(3)计算地物表面温度

$$T_R = \frac{C_2}{\lambda_R \ln \left[ \frac{\epsilon_R C_1}{L_R \lambda_R^5 \pi} + 1 \right]}. \quad (4)$$

式中下标  $R$  表示参考光谱通道,  $L_R$  为参考通道的辐亮度,其它变量定义与式(1)相同。利用该光谱通道的温度,就可以计算和反演其它通道的发射率值。

归一化发射率方法<sup>[5]</sup>和参考通道方法类似,它利用一个设定的参考发射率来计算所有光谱通道的地物表面温度,挑选最高的温度作为该象元地物的实际温度。若计算了象元地物的温度,便可以结合该象元地物的热辐射光谱曲线,计算所有光谱通道的发射率,本文采用归一化发射率方法计算了地物表面温度。

## 2 地物植被指数和地物表面温度特性

植被地物在可见/近红外波段有其独特红边特性,利用该特性能够有效探测和提取地物的植被生长、覆盖等生物物理参量,回归和反演植被色素(叶绿素、叶黄素、类胡萝卜素等)、营养成分(氮、磷、钾等)、纤维素、木质素、糖、蛋白质等生物化学参量。

植被指数是评价植被覆盖状况的主要参数,并发展了多种形式,如归一化植被指数、比值植被指数、土壤植被指数和导数植被指数等。其中归一化植被指数已经得到了广泛的应用,其定义是

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + R}, \quad (5)$$

式中  $\text{NIR}$  和  $R$  是植被近红外(红肩)和可见红外

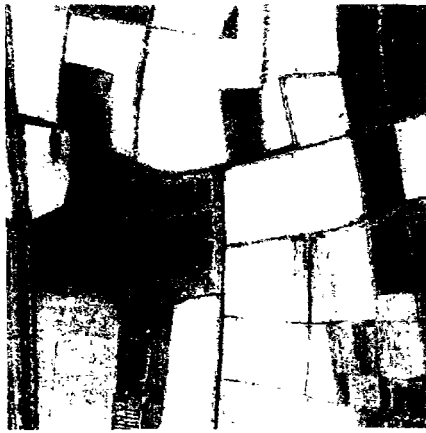


图 2 归一化植被指数和地物表面温度合成的假彩色图

Fig.2 The pseudo-color image using the NDVI and LST bands

(红谷)波段的光谱反射率,基本对应 OMIS 仪器的 20 通道(687nm)和 35 通道(853nm)。

本文利用式(5)计算了北京小汤山精细农业示范区内高光谱遥感图像的归一化植被指数 NDVI;利用归一化发射率方法对 MOIS 的 8 个热红外光谱通道(8.08、8.27、9.23、9.79、10.44、10.92、11.48、11.98 $\mu\text{m}$ )反演和计算了实验区内地物表面温度 LST。图 2 为植被指数和地物表面温度两个波段合成的假彩色图案,利用地物表面温度作为 R 和 B 基色、植被指数作为 G 基色。

利用植被指数和地物表面温度两个波段,对北京农业示范区内生长旺盛的小麦、较稀疏小麦、池塘水体、淤泥湿地、水草、裸露土壤等 6 种地物的样本的二维散点图,如图 3 所示。其中,生长旺盛的小麦已进入孕穗期,而长势较弱、较稀疏的小麦尚处于拔

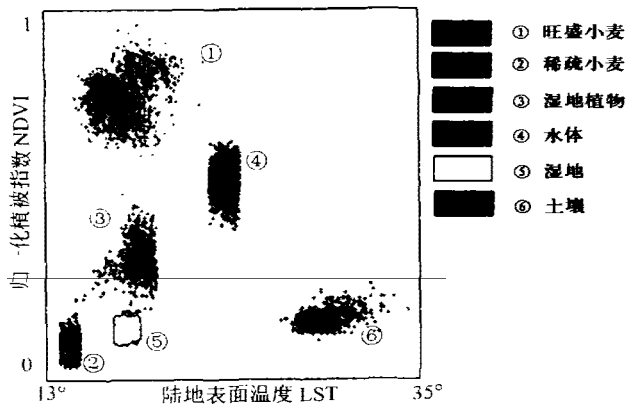


图 3 6 类地物的 NDVI 和温度二维散点图

Fig.3 2-D scatter-plots of the 6 kinds of targets using the NDVI and LST bands

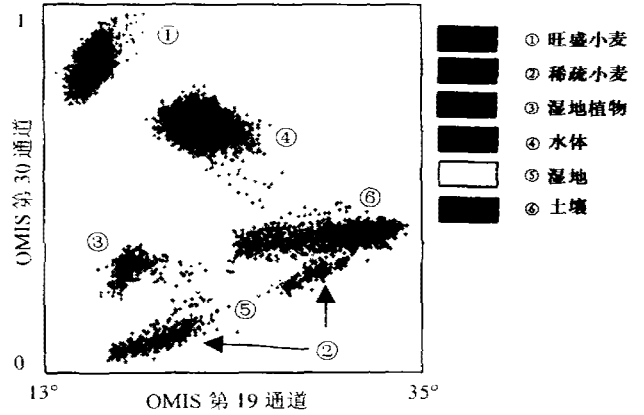


图 4 6 类地物的植被两个特征波段二维散点图

Fig.4 2-D scatter-plots of the 6 kinds of targets using the two characteristic bands of vegetation

节期。6 类样本的采样点数分别为:旺盛小麦 3870 个,稀疏小麦 4375 个,池塘水体 659 个,淤泥湿地 1450,水草 379 个,裸露土壤 2212 个。

从图 3 的散点图可以发现,6 类植被和非植被地物类别之间的距离较大,且同类样本的分布集中、方差较小,因此,利用这两个波段能够较好地实验区内的地物进行分类,并能很好地提取植被覆盖和土壤水分信息等。

利用植被红光和近红外两个特征波段同样也能够做土壤植被散点图,图 4 为同样 6 种地物样本的二维散点图,横坐标为 OMIS 第 20 光谱通道(687nm),纵坐标为 OMIS 第 35 光谱通道(853nm)。从该 6 类样本的散点图可以发现,植被地物,如旺盛小麦、稀疏小麦及水草,它们散点图的分布较集中,同类样本之间的方差较小,且不同类别样本之间距离较大,特别是与裸露土壤类别之间的距离较大,利用这两个波段就能够很好地进行分类。但低植被覆盖地物,如淤泥湿地、裸露土壤、池塘水体等

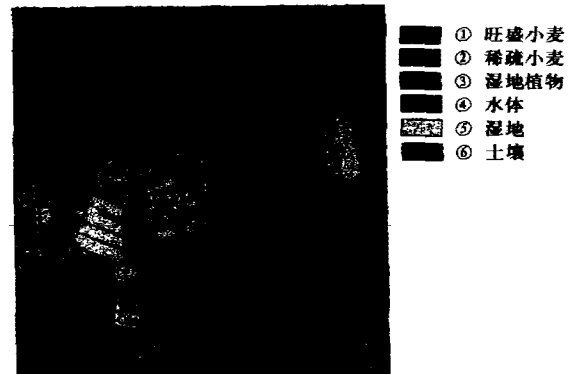


图 5 地物表面温度和 NDVI 分类图

Fig.5 Classification map based on LST and NDVI

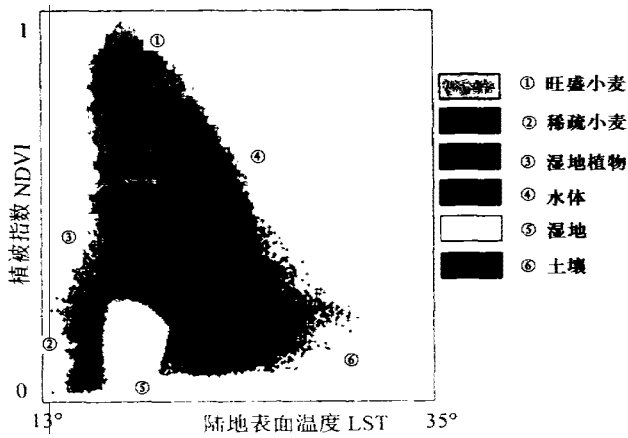


图6 6类地物在LST—NDVI散点图中的映射  
Fig.6 Classification map in LST-NDVI 2-D scatter-plots of the 6 kinds of targets

样本,由于地物的混杂性,它们的散点分布较离散,同类样本之间的方差较大,且不同样本之间的距离较小,甚至存在重叠现象,所以利用植被红边的这两个特征波段对这些地物进行分类时便存在较大的困难,这是因为低植被覆盖的地物在植被红边的两个特征波段之间的类别差异较小,而地物的混杂现象又比较严重.

### 3 利用地物表面温度和植被指数分类

遥感图像的分类方法很多,如最小距离分类、平行六面体法、最大似然法、神经网络法等,其最基本的思想是按照若干分类准则对分类对象进行特征分割,并把其中具有相同或相近特征的对象进行聚类组合<sup>[7]</sup>.

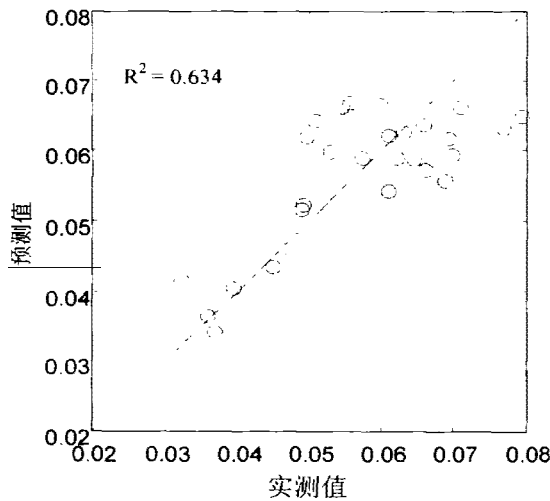


图7 土壤水分的取样值与预测值的比较  
Fig.7 Measured soil's humidity compared with predicted value using T&VI model

本文采用最大似然分类算法,根据地物表面温度和归一化植被指数,利用前面的6类地物的样本,对北京小汤山精细农业示范区的OMIS遥感图像进行了分类,取得了非常好的分类结果,如图5所示.遥感图像的大小为512个采样点,共560个扫描线,图象对应的地面分辨率为3米.

### 4 植被指数、地物表面温度与土壤水分的关系

植被和土壤等地物在地物表面温度和植被指数坐标系中有其特征位置,且各种植被和非植被地物样本可组成LST—NDVI三角形.若把所有分类后的地物映射显示在LST—NDVI的二维散点图上,得到如图6所示的6类地物的散点图分布.散点图中类别边界由分类算法和训练样本共同决定.

由图6所示的映射图中发现,生长旺盛的小麦地物的植被指数最高,但温度相对较低;池塘水体温度最低,植被指数也最低;裸露土壤的温度最高,但植被指数较低;稀疏小麦的植被指数和温度都较高;水草等湿地植被的温度和植被指数都较低;淤泥湿地的植被指数与水体相近,温度也只是略高一点.

该映射图对精细农业来说是非常有意义的,它为精细农业提供了一种直观、科学的方法.我们不仅能够利用它对地物进行分类,更重要的是,通过该映射图可以更精细、直观地挑选感兴趣的地物,了解这些地物的植被覆盖和水分含量情况.如:土壤水分含量较低,需要灌溉的旺盛小麦地和稀疏小麦地位于LST—NDVI三角形上端右侧部分,而水分充足、生长旺盛的小麦位于LST—NDVI三角形上端左侧<sup>[7]</sup>.

为了定量分析土壤水分与植被指数、表面温度

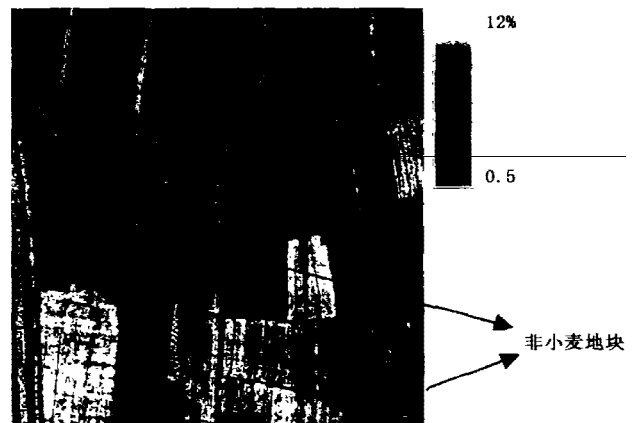


图8 反演小麦地块的表面土壤水分分布图  
Fig.8 Mapping of soil water content in the wheat area

之间的关系,本文提出了土壤水分与植被指数、表面温度相关模型,如下

$$f(VI, T) = x_1 + x_2 \exp(VI) + x_3 \left( \frac{T - T_{air}}{T_{soil} - T_{air}} \right), \quad (7)$$

式中  $VI$  为植被指数,  $T$  为植被表面温度,  $T_{air}$  和  $T_{soil}$  为地表空气温度和干燥土壤的表面温度;  $x_1$ 、 $x_2$  和  $x_3$  为待回归的参数.  $T_{air}$  和  $T_{soil}$  为环境参数,与地域气象参数有关,主要受到气象温度和风速的影响.在本次飞行实验中,  $T_{air}$  和  $T_{soil}$  为 20℃ 和 35℃.

在飞行实验时,也对小麦地块同步进行了地面采样,土壤取样深度为 5 cm,共采样了 30 个地面点,得到的回归模型如下

$$f(VI, T) = -0.0092 + 0.0277 \exp(VI) - 0.0235 \left( \frac{T - T_{air}}{T_{soil} - T_{air}} \right). \quad (8)$$

从式(8)中可以发现,植被指数与土壤水分间存在正相关关系,这是因为植物覆盖度较高时,能够保护和减少表面土壤水分的蒸发;亮温与土壤水分间有负相关关系,这是因为湿度较大的土壤的热惯量大,且水分蒸发作用也降低了表面温度.

利用该回归模型,对所有采样的土壤水分进行了预测,预测结果与实际采样值的关系如图 7 所示,可以发现土壤水分的实测值与利用式(8)所示模型的预测值是比较吻合的.利用上面回归的土壤水分模型,反演小麦地块的土壤水分分布如图 8 所示.

#### 4 结论

(1) 可见/近红外波段与热红外波段的组合运用能够提供更丰富的信息,且利用植被指数  $VI$  和热红外遥感的陆地表面温度  $LST$  两个波段的信息进行地物分类是可行的;

(2) 地物的陆地表面温度  $LST$  和植被覆盖指

的三角形散点图在精细农业中有非常重要的意义,利用它不仅能够对地物进行很好的分类,还能够直观地提供地物的植被生长和土壤含水量信息及其实际地块的分布图.

(3) 本文提出的三角形散点图和土壤水分模型不仅能够较好地反演小麦作物地块的土壤水分,它还能够广泛应用于其它农作物、森林和草场等.

#### REFERENCES

- [1] CHEN Shu-Peng, TONG Qing-Xi, GUO Hua-Dong. *Mechanism of remote sensing information*. Beijing: Science Press(陈述彭,童庆禧,郭华东. 遥感信息机理研究. 北京:科学出版社)1998,139—230
- [2] YANG Chun-Wu, XIAO Jin-Cai, FANG Kang-Mei. Development of the optical system of Operation Modular Imaging Spectrometer. *Proc. Chinese 12th Remote Sensing Communication Meeting*(CDROM)(杨存武,肖金才,方抗美. 实用型模块化成像光谱仪光学系统的研制. 第十二届全国遥感学术交流会论文集(光盘版)),2000
- [3] Kahle A B, Palluconi F D, Soha J M. Middle infrared multispectral aircraft scanner data analysis for geological applications. *Appl. Opt.*, 1985, **19**:2279—2290
- [4] Kealy P S, Hook S J. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: implications for recovering land surface temperatures. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1993, **31**:1155—1164
- [5] Gamon J A. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sens. Environ.*, 1992, **41**:35—44
- [6] XIONG Zhen. Research on classification techniques for hyperspectral remote sensing image data. Ph. D Dissertation of Institute of Remote sensing Application, CAS(熊桢. 高光谱遥感图像分类技术研究. 中国科学院遥感应用研究所博士学位论文),2000:38—63
- [7] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.*, 1994, **49**:246—263