

文章编号: 1672-8785(2012)06-0017-05

基于红外热图像的棉花水分胁迫指数 高光谱遥感估算研究

黄春燕 赵鹏举 王登伟 刘雅辉 程 麒 肖莉娟

(石河子大学新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室;

石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003)

摘 要: 分别用 Fluke 公司生产的红外热像仪和 ASD 公司生产的非成像高光谱仪获取了棉花在 5 个生育时期的冠层的红外热图像和反射光谱。对红外热图像进行了技术处理, 并根据 Jones 定义的作物水分胁迫指数 CWSI 计算了 CWSI; 利用光谱分析技术确定了反射光谱 654 nm 和一阶微分光谱 738 nm 处为 CWSI 的敏感波段; 分别建立了它们与 CWSI 的线性相关模型方程。经检验, CWSI 定量模型方程的估算精度分别为 72.4 % 和 80.5 %。研究结果表明, 用红外热图像技术作为获取作物冠层高分辨率空间信息的手段, 可以消除背景干扰因素的影响, 从而更精确地计算棉花冠层的 CWSI。而与反射光谱相比, 棉花冠层一阶微分光谱更适用于对棉花水分胁迫指数 CWSI 进行实时、动态估算。

关键词: 棉花; 红外热图像; 高光谱; CWSI; 估算研究

中图分类号: TP722.5; S562.01 **文献标识码:** A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.06.004

Estimation of Cotton Canopy Crop Water Stress Index (CWSI) Based on Hyperspectral Remote Sensing Infrared Images

HUANG Chun-yan, ZHAO Peng-ju, WANG Deng-wei, LIU Ya-hui, CHENG Qi, XIAO Li-juan

(Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture, Xinjiang Production and Construction

Group; College of Agronomy, Shi Hezi University, Shi Hezi 832003, China)

Abstract: Thermal images and reflectance spectra of cotton canopy were acquired by using a radiometric video camera from Fluke company and a portable non-imaging hyperspectral spectrometer from ASD company in five growth stages of cotton respectively. The thermal images were processed and the crop water stress index (CWSI) was calculated according to Jones' definition. Through spectrum analysis, both the reflectance spectrum at the wavelength of 654 nm and the first derivative spectrum at the wavelength of 738 nm were considered as the sensitive wavebands of the CWSI. The linear correlation model equations were established. The regression function accuracy values were 72.4 % and 80.5 % respectively. The research result showed that by using infrared thermal imaging technology to acquire h-

收稿日期: 2012-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30960185); 人力资源和社会保障部留学回国人员科技活动项目 (2009XL003); 石河子大学高层次人才启动项目 (RCZX200813)

作者简介: 黄春燕 (1966-), 女, 广东兴宁人, 副教授, 博士, 主要从事红外热图像的农业应用基础研究。

E-mail: wdw37660279@sina.com

high spatial resolution information of crop canopy, the effects of background interference factors could be eliminated and the CWSI of cotton canopy could be calculated more accurately. Compared with the reflectance spectra, the first derivative spectra was more suitable for the real-time and dynamic calculation of the CWSI of cotton.

Key words: cotton; infrared thermal image; hyperspectral; CWSI; estimation

0 引言

20 世纪 80 年代初, Idso S B 等人^[1]采用红外温度测定法 (Infrared Thermometry, IRT) 定义了作物水分胁迫指数 (Crop Water Stress Index, CWSI) 和“非水分胁迫基线”, 使基于冠层温度的作物水分胁迫的研究方法得以扩展。Tanner C B^[2]首先采用红外测温仪研究作物冠层温度, 并指出作物冠层温度是一个十分有价值的指标; Jackson R D^[3]指出, 通过监测作物冠层的水分状况来改进灌溉水的分配, 比测试土壤的水分含量更加直接; Meron M 等人^[4]提出将人工参考表面 (Artificial Reference Surface, ARS) 的温度运用到 CWSI 计算当中; Cohen Y 等人^[5]利用湿人工参考表面 (Wet Artificial Reference Surface, WARS) 和红外热图像估算了不同灌水量的棉花叶片水势, 并使叶片水势成图。在国内, 根据冠层温度的作物水分状况诊断研究起步于 20 世纪 80 年代^[6-7]。目前, 利用红外热图像和高光谱联合进行作物水分诊断的研究较少。

为此, 本文采用 WARS 方法, 用红外热图像和可视 RGB 数字图像的融合技术获取 CWSI, 并建立 CWSI 与高光谱数据的定量关系, 从而为利用高光谱估算棉花的 CWSI 和实时、精准地监测作物水分胁迫状况提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2008 ~ 2010 年在新疆石河子大学农学院试验站 (44°20'N, 88°03'E) 进行。小区面积为 30 m², 土壤质地为壤土, 土壤肥力为中等。试验采用裂区设计, 重复 3 次, 将水分处理列为主区, 设置 4 水平灌水量处理: W1 (105 mm)、W2 (210 mm)、W3 (420 mm) 和 W4 (630 mm), 水表控制灌水量; 品种为副区, 供试品种为新陆早 13 号和新陆早 33 号, 两品种属于不同基因型。种植密度为 22.5×10⁴ 株/hm²。采用宽窄行的 (30 cm + 60 cm) 种植方式。膜下滴灌, 灌水周期为 8 ~ 10 d, 随水施肥。全生育期化控 4 次, 7 月中旬打顶, 其余管理同大田管理。

1.2 红外热图像的采集

在晴朗无云且无风的 12:00 ~ 15:00 时间段, 采用美国 FLUKE 公司生产的 TiR3FT IR FlexCam 热像仪分别在棉花的开花期、花铃期、盛铃期、盛铃末期和吐絮初期进行 5 次图像采集。从三角梯上向下拍摄, 镜头距棉花冠层的高度为 3.0 m。每次拍摄时, WARS 的高度与棉花冠层的高

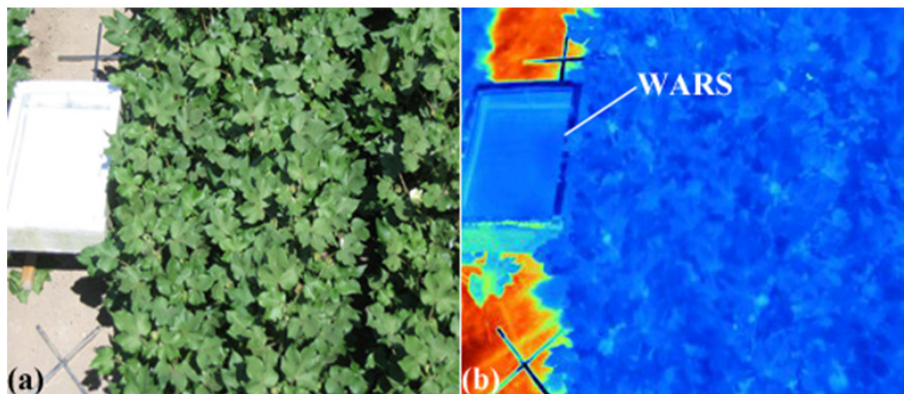


图 1 (a) 棉花冠层的彩色 (RGB) 图像, (b) 红外热图像

度基本一致(见图 1)。与此同时,采用德国西门子公司生产的 Testo-401-1 便携式测温仪测试空气温度。

图 1 所示为 WARS 的构造^[4]。制作一个用于盛水的大小为 40 cm×30 cm×12 cm 的金属盒子,并在其周围设 2 cm 厚的苯板隔热层;然后取一块 5 cm 厚、35 cm×25 cm 大小的苯板,并在其表面覆盖一层 0.5 mm 厚的吸水聚酯粘胶纤维混合布;接着覆盖 2 mm 厚的聚酯高吸水性无纺布,然后再将苯板连同覆盖物一同浸入水中;最终,整个装置被构造成一个表面温度相对稳定的 WARS。

1.3 基于红外热图像与可视 (RGB) 数字图像获得棉花冠层受光叶片温度

在棉花冠层的热图像中,除了受光叶片之外,还有土壤、地膜和叶片地面投影的阴影等(见图 2(a))。我们需要消除这些非叶片物质部分的影响。用 Fluke 热像仪获取棉花冠层的红外热图像与可视 (RGB) 数字图像的融合图像(见图 2(a)),并将其转换为 TIFF 格式存储。通过 Adobe Photoshop 7.5 软件将图 2(a) 的颜色模式由 RGB

转换为 HSI,再用 Matlab 7.5 软件将受光叶片切割下来,从而产生一幅像元值为 0 和 1 的 8-bit 320×240 黑白 2 值蒙版图像(见图 2(c))。其中,0 (黑色) 代表非叶部分,1 (白色) 代表受光叶片。在 Photoshop 中,将图 2(a) 作为背景图层,将图 2(c) 作为蒙板图层,遮罩非叶部分,显露出棉花冠层的受光叶片(见图 2(d));接下来求取图 2(d) 中棉花受光叶片的温度,应用 IR FlexCam 系统自带的 SmartView 3.0 软件将红外热图像(图 2(b)) 的温度跨度设定为 25.5 ℃,并将图像转换为 TIFF 格式存储。以下过程用 Matlab 7.5 软件编程实现。先将 TIFF 格式的图像转换为非压缩的 8-bit TIFF 格式的 320×240 灰度图像。此时,对应于灰度图像的 255 个灰度水平,每个灰度像元代表的温度水平为 0.1 ℃。然后对图 2(c) 与非压缩的 8-bit TIFF 格式的 320×240 灰度图像进行并列分析。图 2(c) 中像元值为 1 的所有像元均代表棉花受光叶片。在灰度图像中可以找到对应于相同坐标位置的像元,其像元值的大小代表受光叶片温度的高低。通过将该值代入式 (1),

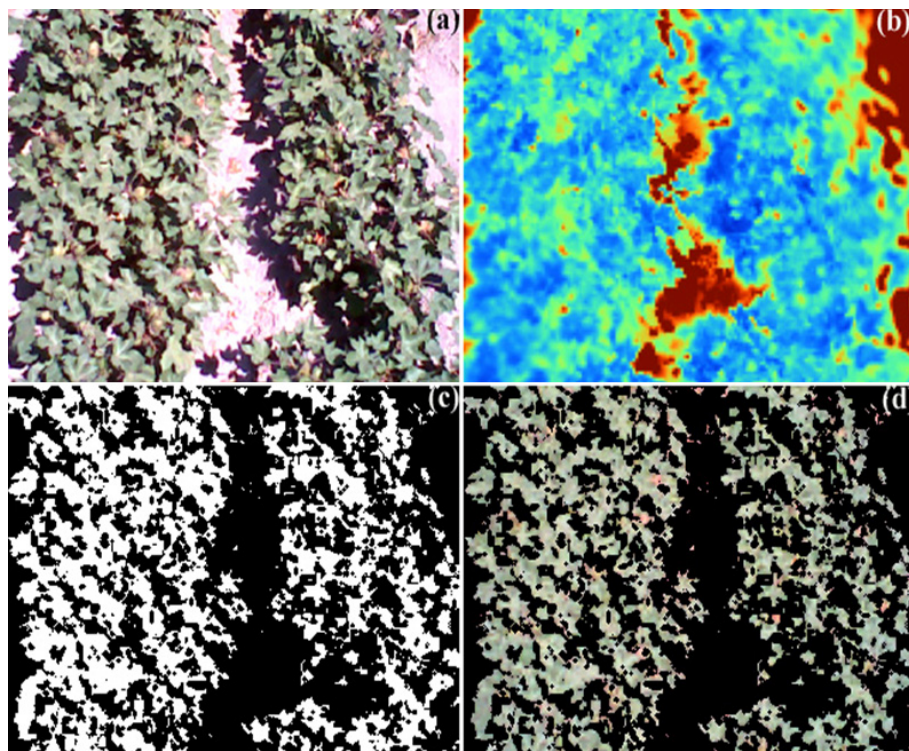


图 2 棉花冠层的红外热图像和可视 (RGB) 数字图像

可以求出所有灰度像元的温度值。最后取平均值,即可得到冠层受光叶片的温度。

$$T_{(x,y)} = T_{min} + \frac{T_{span}}{255} GL_{(x,y)} \quad (1)$$

式中, $T_{(x,y)}$ 为非压缩的 8-bit TIFF 格式的灰度图像中像元坐标为 (x, y) 的像元温度; $GL_{(x,y)}$ 为同一像元的灰度值; T_{span} 为红外热图像的温度跨度(设定为 25.5 °C); T_{min} 为红外热图像的最低温度值,在灰度图中代表像元值为 0 的像元温度, 255 是 8-bit TIFF 格式灰度图像中最大的像元值(见图 2(c))。

1.4 棉花高光谱数据的采集

采用美国 ASD Fieldspec FR 2500 型地物光谱仪在红外热像仪采集的棉花样本区进行高光谱数据采集,时间为 11:30 ~ 14:00。测试时,传感器探头选用 25° 视场角,距棉花冠层的高度为 1 m。每次采集 15 条反射光谱曲线,对其取平均值作为样点光谱的反射值。

1.5 数据计算

1.5.1 棉花冠层 CWSI 的计算方法

冠层水分胁迫指数 CWSI 可根据 Jones H G [8] 的经验公式来定义:

$$CWSI = \frac{T_{canopy} - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}} \quad (2)$$

式中, T_{canopy} 为冠层受光叶片的温度; T_{dry} 的估算采用 Irmak S 等人 [9] 定义的将测得的干球温度加上 5 °C 的方法进行; T_{wet} 取自于 WARS 的平均温度。

1.5.2 反射光谱一阶微分光谱的计算

$$\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})] / 2\Delta\lambda \quad (3)$$

式中, λ_i 为每个波段的波长; $\rho'(\lambda_i)$ 为波长 λ_i 的一阶微分光谱; $\rho(\lambda_{i+1})$ 和 $\rho(\lambda_{i-1})$ 分别为波长 λ_{i+1} 和 λ_{i-1} 的反射率; $\Delta\lambda$ 为波长 λ_{i-1} 到 λ_i 的间隔。

1.6 估算模型均方根误差 (RMSE) 的计算

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

式中, y_i 和 $\hat{y}_i$ 分别为实测值和估计值; n 为样本数(包括建模样本和检验样本)。

2 结果与分析

2.1 棉花反射光谱及其一阶微分光谱与水分胁迫指数 CWSI 的相关分析

将采集的 30 组棉花样本中的一半作建模样本,另一半作检验样本。用棉花建模样本的冠层反射光谱及其一阶微分光谱分别对其冠层的 CWSI 进行逐步回归分析。由图 3 和图 4 可知,反射光谱、微分光谱与 CWSI 的最大敏感波段分别在 654 nm 和 738 nm 处 ($r_{\text{反射光谱}} = 0.6946^{**}$, $r_{\text{一阶微分光谱}} = -0.8247^{**}$, $n = 15$), 棉花冠层的反射光谱与冠层的 CWSI 达 1 % 极显著的负相关主要发生在 585 ~ 697 nm 和 742 ~ 952 nm 波段范围内;而棉花冠层的一阶微分光谱与其冠层的 CWSI 在 716 ~ 760 nm、1024 ~ 1027 nm、1031 ~ 1038 nm 和 1564 ~ 1560 nm 波段范围内达 1 % 的极显著的负相关。

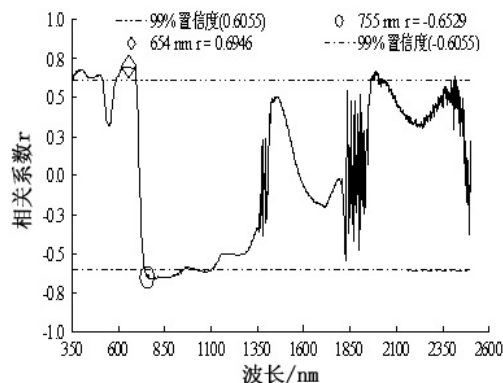


图 3 棉花冠层的反射光谱与 CWSI 的相关分析

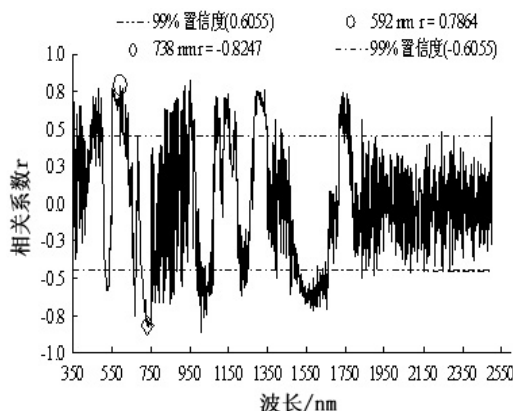


图 4 棉花冠层的一阶微分光谱与 CWSI 的相关分析

2.2 基于棉花冠层高光谱数据的 CWSI 估算

利用上述确立的建模样本中 CWSI 相关性最大的反射光谱 654 nm 波段的反射率 (ρ_{654}) 以及一阶微分光谱 738 nm 波段的数值 (ρ'_{738}) 分别与 CWSI 建立线性模型方程。经检验, 二者模型方程的估算精度分别为 72.4 % 和 80.5 % (见图 5 和图 6)。

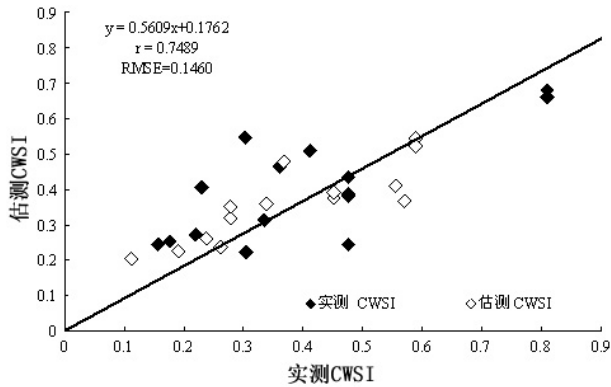


图 5 棉花实测 CWSI 与 654 nm 波段反射率估算 CWSI 的相关分析

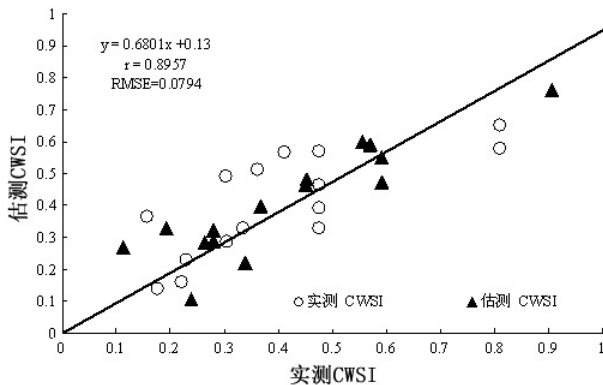


图 6 棉花实测 CWSI 与一阶微分光谱 738 nm 波段的数值估算 CWSI 的相关分析

3 讨论

冠层温度一直以来都被认为是一个用于表征作物水分状况的参数。在早期获取作物冠层温度时, 人们大多是采用手持温度计对目标观测面求取样点的平均温度的。这种温度测量方法容易受作物的茎秆、死亡组织和土壤背景的影响, 导致测量作物冠层温度的误差加大, 尤其是在植被稀疏时, 更容易产生错误^[10-11]。20 世纪 70 年代起, 红外温度测定方法开始被人们广泛

应用^[12], 这在很大程度上提高了试验结果的准确性, 但仍然无法摆脱求取样点平均温度的缺陷。近年来, 利用先进的红外热图像测试技术可以在空间和时间范围内获取作物冠层的表面温度。该方法更加方便、快捷和准确, 其光谱范围包括可见光和近红外两部分。在测量作物冠层温度时, 这种方法能够剔除非叶片物质的影响, 并可挑选冠层的任一具体部分用于估算作物冠层的水分状况^[13], 弥补了传统的作物冠层温度获取方法的不足之处。

4 结论

本文用棉花冠层受光叶片的红外热图像计算了 CWSI, 并用棉花冠层一阶微分光谱 ρ'_{738} 的数值对 CWSI 进行了估算。估算精度为 80.5 %, 比用棉花冠层 654 nm 波段反射率估算的 CWSI 的精度高, 说明一阶微分光谱比反射光谱更适用于棉花冠层的 CWSI 估算研究。这也为探索作物冠层水分胁迫状况的快速、便捷、有效的诊断方法提供了依据。

参考文献

- [1] Idso S B, Jackson R D, Pinter J P J, et al. Normalizing the Stress-degree-day Parameter for Environmental Variability [J]. *Agricultural Meteorology*, 1981, **24**(2): 45-55.
- [2] Tanner C B. Plant Temperatures [J]. *Agronomy Journal*, 1963, **55**(1): 210-211.
- [3] Jackson R D. Canopy Temperature and Crop Water Stress [J]. *Advanced Irrigation*, 1982, **25**(1): 43-85.
- [4] Meron M, Tsipris J, Charitt D. Remote Mapping of Crop Water Status to Assess Spatial Variability of Crop Stress [C]. Academic Publishers: Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture, 2003.
- [5] Cohen Y, Alchanatis V, Meron M, et al. Estimation of Leaf Water Potential by Thermal Imagery and Spatial Analysis [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, **417**(56): 1843-1852.
- [6] 康绍忠. 西北地区农业节水与水资源持续利用 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [7] 袁国富, 唐登银, 罗毅, 等. 基于冠层温度的作物缺水研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2001, **16**(1): 49-54.

(下转第 45 页)