

文章编号: 1672-8785(2013)08-0044-05

## 基于红外热图像的水分胁迫指数与叶片水势的关系研究

黄春燕 王登伟 肖莉娟 王雅芳

(新疆石河子大学农学院, 新疆石河子 832003)

**摘要:** 分别获取了棉花新陆早 33 号、13 号 2 个品种在 5 个关键生育时期经 5 种水分处理后的冠层红外热图像和叶片水势 ( $\psi_L$ )。从红外热图像中提取了棉花冠层受光叶片的温度, 计算了棉花的作物水分胁迫指数 (Crop Water Stress Index, CWSI)。分析表明, 2 个品种的棉花经 5 种水分处理后冠层的 CWSI 和  $\psi_L$  随生育进程的变化趋势相反,  $\psi_L$  与棉花的生育进程趋势一致, 变化顺序均为  $W_5 > W_4 > W_3 > W_2 > W_1$ 。利用棉花建模样本的 CWSI 与  $\psi_L$  的线性相关函数方程 ( $r = -0.8903^{**}$ ,  $n = 24$ ,  $\alpha = 1\%$ ) 对检验样本的  $\psi_L$  进行了估测。实测的  $\psi_L$  与估测的  $\psi_L$  呈极显著线性关系 ( $r = 0.8971^{**}$ ,  $RMSE = 0.1223$ ,  $n = 24$ ,  $\alpha = 1\%$ ), 估测的  $\psi_L$  的相对误差为 0.0981, 估计精度为 90.2%。结果表明, 由红外热图像提取的 CWSI 能够实时、快速、非破坏性地估算棉花叶片的水势, 较精确地预测棉花的水势。

**关键词:** 棉花; 红外热图像; 水分胁迫指数; 叶片水势; 相关分析

**中图分类号:** S562.01      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.05.009

## Study of Relationship between Water Stress Index and Leaf Water Potential Based on Infrared Thermography

HUANG Chun-yan, WANG Deng-wei, XIAO Li-juan, WANG Ya-fang

(The Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture, College of Agronomy, Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** The infrared thermal images and leaf water potential ( $\psi_L$ ) of two cotton cultivars named Xinluzao-33 and -13 were obtained at five growth stages after five different irrigation processes. The temperature values of the canopy sunlit leaves were extracted from the thermal images and the crop water stress indexes (CWSI) were calculated. The analysis result showed that the canopy CWSI and  $\psi_L$  of two cotton cultivars at five different irrigation levels changed inversely with the growth stage, and the  $\psi_L$  was consistent with the growth of cotton. Their change orders were all  $W_5 > W_4 > W_3 > W_2 > W_1$ . The  $\psi_L$  of the tested samples was estimated by using the linear regression function between the CWSI and  $\psi_L$  of the modeled samples ( $r = 0.8903^{**}$ ,  $n = 24$ ,  $\alpha = 1\%$ ). The measured  $\psi_L$  had a significant linear correlation with the estimated  $\psi_L$  ( $r = 0.8971^{**}$ ,  $RMSE = 0.1223$ ,  $n = 24$ ,  $\alpha = 1\%$ ). The estimated  $\psi_L$  had a relative error of 0.0981. Its estimation accuracy was 90.2%. The result showed that the CWSI based on the infrared thermography could be used to estimate the leaf water potential of cotton rapidly and

收稿日期: 2013-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30960185)

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:hcyaxx@163.com

nondestructively in real time and could be used to predict the water potential accurately.

**Key words:** infrared thermography; crop water stress index; leaf water potential; correlation analysis

## 0 引言

植物的叶片水势是植物组织水分状况的直接表现, 是作物水分生理研究的重要指标<sup>[1,2]</sup>。Atkinson 等<sup>[3]</sup>的研究表明, 叶片水势的减小与叶片气孔导度的下降是相关联的, 叶片水势和土壤的水分状况关系紧密。Zhu 等<sup>[4]</sup>的研究表明, 苹果在干旱胁迫环境下的叶片水势是反映其水分状况最敏感的指标。佟长福等<sup>[5]</sup>的研究表明, 紫花苜蓿在灌溉和干旱胁迫处理两种条件下, 叶片水势值的日变化均以黎明前为最高, 中午时分为最低。然而, 传统的获取叶片水势的方法是采用定点和定叶片对每一片叶进行接触式测量的, 容易对叶片造成损伤和产生测量误差, 且测试的样本数也有限。

CWSI 是监测作物是否遭受水分胁迫的有效指标, 应用较为广泛<sup>[6]</sup>。但 CWSI 只能确定灌溉时间, 而不能解决灌溉量的问题<sup>[7]</sup>, 在反映干旱区作物干旱状况时不及叶片水势<sup>[8]</sup>。目前利用红外热成像建立与叶片水势的模型并进行叶片水势估测是研究大面积作物干旱状况的重点。本文通过从棉花红外热图像提取受光叶片的温度, 计算棉花的 CWSI, 建立与叶片水势的相关模型, 精确、快速、有效、非接触性地估算棉花叶片水势, 为监测棉花的水分状况和指导大面积的棉花科学灌溉提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2012 年在新疆石河子大学农学院试验站(44°20'N, 88°03'E) 进行。前茬为棉花, 小区面积为 30 m<sup>2</sup>, 种植面积为 0.1 hm<sup>2</sup>, 土壤肥力中等。试验采用裂区设计, 3 次重复, 水分处理为主区, 设置严重缺水灌溉 W<sub>1</sub>(1050 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、缺水灌溉 W<sub>2</sub>(2100 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、适量灌溉 W<sub>3</sub>(4200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、充分灌溉 W<sub>4</sub>(5300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>) 和超额灌溉 W<sub>5</sub>(6000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>) 5 个灌水处理区,

并用水表记载灌水量。设品种为副区, 分别为株型紧凑的新陆早 13 号(以下简称 13 号)和株型松散的新陆早 33 号(以下简称 33 号), 种植密度为 22.5×104 株/公顷, 采用宽膜覆盖, 膜下铺设滴灌带, 30 cm+60 cm 的宽窄行配置种植方式, 肥随水滴施。共化控 4 次, 7 月 15 日打顶, 其余田间措施与大田措施相同。

### 1.2 棉花叶片水势测量

分别在棉花的开花期、盛花期、开花结铃期、盛铃期和吐絮初期的 5 个关键生育时期, 在北京时间早晨 7:00 点从棉花定点区取样。打顶前取主茎的倒四叶, 打顶后取倒二叶, 每次处理取 3 片叶, 装入塑料袋内。然后立刻将它们带到实验室内用 SKPM1400 压力室水势仪测定水势, 叶片水势为 3 片叶的水势平均值。

### 1.3 棉花红外热图像采集

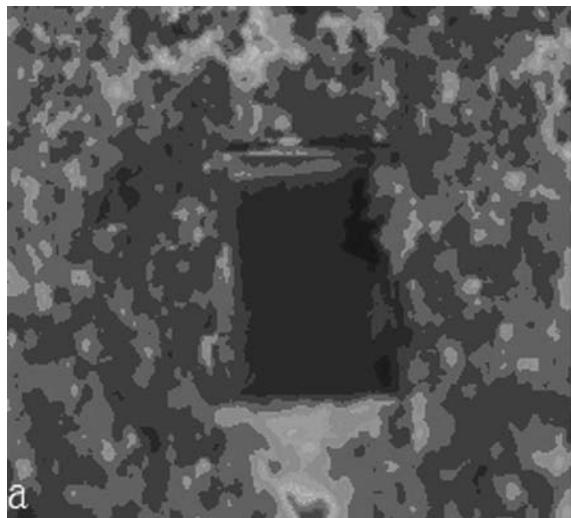
棉花的红外热图像采集与棉花叶片水势测定同期进行。选择在晴朗无云的日子, 从 12:00 到 14:00, 利用美国 FLUKE 公司生产的 TiR3FT IR FlexCam 热像仪在棉花叶片水势测定取样区, 从长势均匀一致、无病虫危害的样本区中采集 5 个时期的冠层红外热图像(图 1a), 方法与程麒<sup>[9]</sup>所用方法相同。同时, 用德国西门子公司生产的 Testo-4011 便携式测温仪测定每个处理样本区上方的空气温度 3 次, 并将其平均值作为干球温度。用 WARS 获取湿人工参考表面的平均温度, 构造参见 Meron 等<sup>[10]</sup>方法。

### 1.4 棉花冠层受光叶片温度的提取

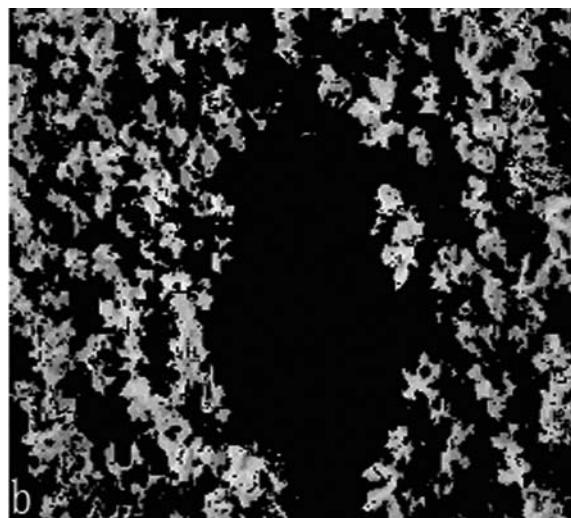
用 Photoshop7.5(Adobe Inc.) 和 Matlab 7.5(Matworks Inc.) 软件将受光叶片切割下来, 如图 1(b), 并利用公式(1)计算代表棉花冠层受光叶片的像元温度。

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

式中,  $T_{(x,y)}$  代表像元坐标为 x 和 y 的像元温度;  $GL_{(x,y)}$  是同一像元的灰度值,  $T_{span}$  是红外热图像的温度跨度, 设定为 25 °C;  $T_{min}$  是红外热图像中的最低温度值。



(a) 棉花冠层红外热图像



(b) 棉花冠层受光叶片

图 1 棉花冠层的红外热图像和冠层受光叶片

### 1.5 棉花 CWSI 的计算方法

CWSI 可根据 Jones<sup>[11]</sup> 的经验公式定义:

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

式中,  $T_{canopy}$  指冠层受光叶片的温度,  $T_{dry}$  的值为测试的干球温度再加  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{wet}$  取自于湿人工参考表面的平均温度。

### 1.6 相关模型的 RMSE 计算

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

式中,  $y_i$  和  $\hat{y}_i$  分别为实测值和估计值,  $n$  为样本数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分处理的棉花 CWSI 随生育期的变化特征

CWSI 是反映作物水分状况和指示作物干旱胁迫程度的重要参数<sup>[9,12]</sup>。由图 1 可知, 棉花新陆早 33 号的 CWSI 呈开口向上的单峰曲线, 5 种水分处理的 CWSI 差异明显。除开花期的 W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 处理及吐絮期的 W<sub>4</sub> 和 W<sub>5</sub> 处理的 CWSI 差异不是很明显外, 其它生育时期冠层的 CWSI 差异都极为显著。5 种水分处理的 CWSI 最低峰值均出现在盛花期。W<sub>2-33</sub> 的 CWSI 在吐絮期达到最高值, 其它 4 种水分处理的 CWSI 的最高值均出现在开花结铃期。棉花 33 号 5 种水分处理的 CWSI 随生育期的变化与随棉花生长期程的变化趋势相反。严重干旱的 W<sub>1</sub> 处理的 CWSI 除在盛花期降为最低外, 其它四个时期由于严重干旱胁迫导致棉花的 CWSI 都达到了最大值 1, 明显高于其它 4 种水分处理情况。充分灌溉的 W<sub>4</sub> 和超额灌溉的 W<sub>5</sub> 处理的棉花在生育期生长繁茂冠层郁闭, 其 CWSI 较其它 3 种水分处理的低。这表明棉花冠层的 CWSI 在生育期的变化可以反映棉花的水分状况, 棉花 13 号 5 种水分处理的 CWSI 随生育期的变化与 33 号类似。

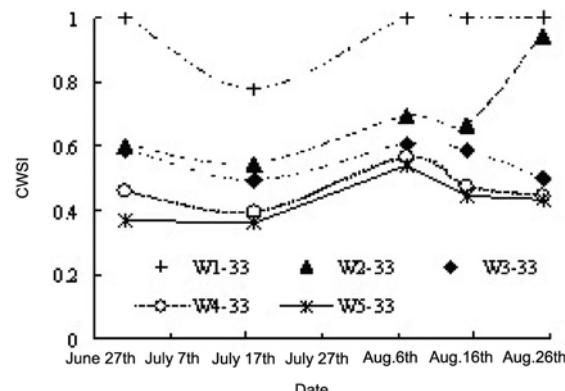


图 2 棉花新陆早 33 号 5 种水分处理的冠层 CWSI 随生育期的变化

## 2.2 不同水分条件下棉花叶片水势 $\psi_L$ 随生育期的变化特征

叶片水势能反映植物生长期水分条件对生理活动的制约程度, 是测量植被水分胁迫状况的有用指标, 可作为调整作物灌溉周期的参数<sup>[4,13-14]</sup>。通过方差分析, 棉花新陆早 33 号、13 号除了 W<sub>2</sub> 处理和 W<sub>3</sub> 处理的  $\psi_L$  差异在开花期、盛花期和开花结铃期  $\psi_L$  差异不明显以及 W<sub>3</sub> 处理和 W<sub>4</sub> 处理的  $\psi_L$  在盛铃期和吐絮期不明显外, 在其它生育时期都很大。由图 3 可知, 33 号 5 种水分处理的  $\psi_L$  均在开花结铃期达到最大, 在开花期和吐絮期较低。 $\psi_L$  随生育期呈抛物线曲线变化, 与棉花的生长进程一致, 与 CWSI 的变化趋势相反。严重干旱胁迫的 W<sub>1</sub> 处理的  $\psi_L$  明显低于其它 4 种水分处理情况。经充分灌溉 W<sub>4</sub> 和超额灌溉 W<sub>5</sub> 处理的棉花, 在生育期生长繁茂冠层郁闭,  $\psi_L$  较高。这表明棉花的  $\psi_L$  随生育期的变化可以反映棉花的水分状况, 经 5 种水分处理的 13 号的  $\psi_L$  在生育期也有类似的变化。

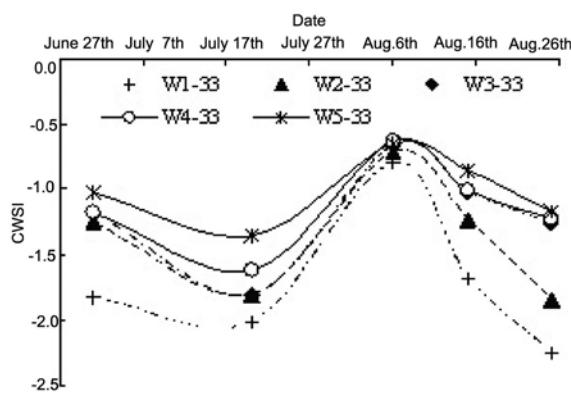


图 3 棉花新陆早 33 号 5 种水分处理的叶片水势  $\psi_L$  随生育期的变化曲线

## 2.3 棉花冠层 CWSI 与 $\psi_L$ 的相关分析

作物 CWSI 与叶片水势、叶片气孔阻力和土壤水分关系紧密, 是反映作物冠层水分状况的重要参数, 对制定作物灌溉方案具有重要的参考价值<sup>[3,15]</sup>。测量叶片水势费时耗力且不方便, 而先进的红外热图像可以快速、非破坏性地精确提取作物冠层受光叶片的温度, 计算得到 CWSI, 弥补测试叶片水势的不足, 能够稳定地获取作物

冠层的水分信息<sup>[13,16]</sup>。本研究中把获取的棉花生育期冠层 CWSI 和实测  $\psi_L$  的成对数据分为两组, 一组作为建模样本, 另一组作为检验样本, 以便利用建模样本的 CWSI 与  $\psi_L$  的相关函数模型预测检验样本的  $\psi_L$ 。图 4 表明, 棉花建模样本的 CWSI 与  $\psi_L$  呈 1% 极显著的线性负相关关系 ( $r = -0.8903^{**}$ ,  $n=24$ )。

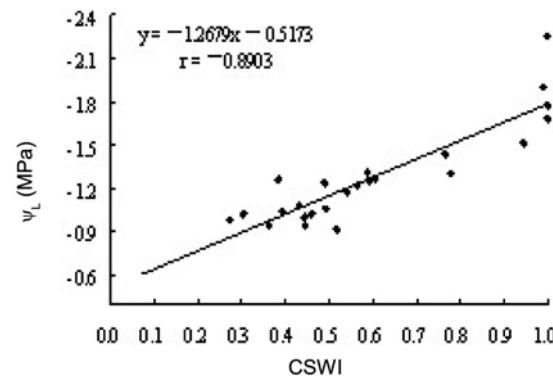


图 4 棉花冠层 CWSI 和叶片水势的  $\psi_L$  的关系

## 2.4 基于棉花冠层 CWSI 的 $\psi_L$ 估算

把棉花检验样本的实测 CWSI 代入图 4 中的线性相关方程  $y = -1.2679x - 0.5173$ , 估算  $\psi_L$ 。棉花检验样本的实测  $\psi_L$  与估测  $\psi_L$  呈极显著线性相关关系 ( $r=0.8971^{**}$ ,  $n=24$ ), RMSE 为 0.1233, 相对误差为 0.0981, 模型方程的估算精度为 90.2% (图 5)。这表明用棉花冠层的 CWSI 估测棉花叶片水势  $\psi_L$  具有较高的精度, 可以通过棉花冠层的 CWSI 与  $\psi_L$  的相关模型得到  $\psi_L$ , 进而预测棉花的水分状况。

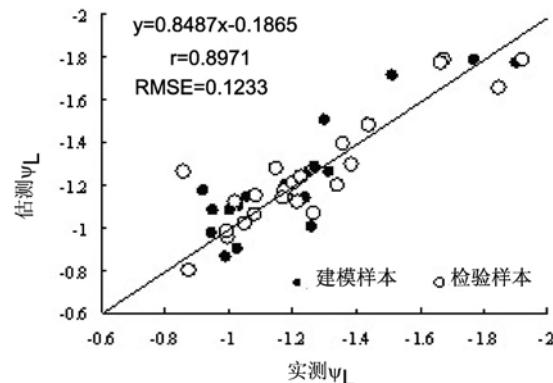


图 5 利用棉花 CWSI 与  $\psi_L$  的相关模型估测  $\psi_L$  与实测  $\psi_L$  比较

### 3 结论

研究了 2 个棉花品种经 5 种水分处理后形成的 CWSI 和  $\psi_L$  值。在严重干旱的胁迫条件下, 棉花的 CWSI 在生育期逐渐上升, 在开花结铃期后均达到了 1, 显著高于其它 4 种水分处理的 CWSI。充分灌溉条件下的 CWSI 在整个生育期都较低。不同水分条件下的  $\psi_L$  与 CWSI 随生育期的变化趋势相反, 表明作物冠层的 CWSI 和叶片水势  $\psi_L$  与作物的水分状况密切相关。利用建模样本的 CWSI 与叶片水势的相关函数模型方程对检验样本的叶片水势进行了估算, 实测的  $\psi_L$  与估测的  $\psi_L$  呈极显著线性相关关系 ( $r=0.8971^{**}$ ,  $RMSE=0.1233$ ,  $n=24$ ), 模型方程的估算精度为 90.2%。结果表明, 从棉花的红外热图像中获取受光叶片的温度, 计算冠层的 CWSI, 间接地获取叶片水势  $\psi_L$ , 可克服叶片水势测定的局限, 为精确、实时、无损地预测棉花的干旱胁迫程度提供了理论依据。

### 参考文献

- [1] Turner N C. Techniques and Experimental Approaches for the Measurement of Plant Water Status [J]. *Plant Soil*, 1981, **58**(1-3): 339-366.
- [2] Kramer PJ .Water Relations of Plants. [M]. New York : Academic Press,1983: 58-63.
- [3] Atkinson C J, Pollicarpo M, Webster A D, et al. Drought Tolerance of Clonal Malus Determined from Measurements of Stomatal Conductance and Leaf Water Potential [J]. *Tree Physiol*,2000,**20**(8): 557-563.
- [4] Zhu L H , Peppel A V D , Li X Y, et al . Changes of Leaf Water Potential and Endogenous Cytokinins in Young Apple Trees Treated with or without Pacllobutrazol under Drought Conditions [J].*Scientia Horticulturae*,2004,**99**(2): 133-141.
- [5] 佟长福, 郭克贞, 史海滨, 等. 环境因素对紫花苜蓿叶水势与蒸腾速率影响的初步研究 [J].*农业工程学报*,2005,**21**(12): 152-155.
- [6] 刘晓莫, 郝卫平, 张健. 农田尺度下干旱指标及应用 [J].*中国农业气象*,2005,**26**(2):99-105.
- [7] 李韵珠, 陆棉文, 吕梅, 等. 作物干旱指数 (CWSI) 和土壤干旱指数 (SWSI) [J].*土壤学报*,1995,**32**(2):202-209.
- [8] 张杰, 张强, 赵宏, 等. 定量遥感反演作物水势的原理及其应用 [J].*生态学报*, 2008,**27**(6):916-923.
- [9] 程麒, 黄春燕, 王登伟, 等. 基于红外热图像的棉花冠层水分胁迫指数与光合特性的关系 [J].*棉花学报*,2012,**24**(4): 341-347.
- [10] Meron, M., Tsipris, J., Charitt. D. Remote Mapping of Crop Water Status to Assess Spatial Variability of Crop Stress.[C] Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture, 2003:405-410.
- [11] Jones HG. Plants and microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology [M]. London: Cambridge University Press,1992.
- [12] Alchanatis V, Cohen Y, Cohen S, et al. Evaluation of Different Approaches for Estimating and Mapping Crop Water Status in Cotton with Thermal Imaging [J].*Precision Agriculture*, 2010,**11**(1): 27-41.
- [13] Ben-Asher J, Phene C J , Kinarti A. Canopy Temperature to Assess Daily Evapotranspiration and Management of High Frequency Drip Irrigation Systems [J]. *Agricultural Water Management*, 1992,**22**(4): 379-390.
- [14] 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.
- [15] Hutmache B, Steiner J J, Vail S S. Crop Water Stress Index for Seed Alfalfa: Influences of within-season Changes in Plant Morphology [J].*Agricultural Water Management*, 1991,**19**(2): 135-149.
- [16] 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.