

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.028

# 剔除土壤背景的棉花水分胁迫无人机热红外遥感诊断

张智韬<sup>1,2</sup> 边江<sup>1,2</sup> 韩文霆<sup>2</sup> 付秋萍<sup>3</sup> 陈硕博<sup>1,2</sup> 崔婷<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 3. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 剔除无人机热红外影像中的土壤背景是提高作物水分诊断精度的有效途径,但也是热红外图像处理的难点问题。本文以不同水分处理的花铃期棉花为研究对象,分别在 09:00、13:00 和 17:00 等 3 个时刻,连续 5 d 采集无人机高分辨率热红外影像,并采用二值化 Ostu 算法和 Canny 边缘检测算法对热红外图像进行掩膜处理,实现对土壤背景的剔除,然后分别计算二值化 Ostu 算法、Canny 边缘检测算法和包含土壤背景下的 3 种棉花水分胁迫指数 (Crop water stress index, CWSI),最后建立不同时刻下 3 种 CWSI 与棉花叶片气孔导度  $G_s$  的关系模型。研究结果表明,应用 Canny 边缘检测算法可有效剔除热红外影像中的土壤背景,剔除土壤背景后的温度直方图呈单峰的偏态分布;3 种处理方法获得的作物水分胁迫指数 CWSI 中,Canny 边缘检测算法的 CWSI 最小,二值化 Ostu 算法的 CWSI 较高,包含土壤背景的 CWSI 最大;采用 Canny 边缘检测算法剔除土壤背景后的 CWSI 与棉花叶片气孔导度  $G_s$  的决定系数  $R^2$  达到 0.84,Ostu 算法的结果次之,包含土壤背景的最差。本研究可为无人机热红外遥感监测作物水分状况提供参考。

**关键词:** 棉花; 无人机; 热红外; Canny 边缘检测; 水分胁迫指数; 气孔导度

**中图分类号:** S252      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0250-11

## Diagnosis of Cotton Water Stress Using Unmanned Aerial Vehicle Thermal Infrared Remote Sensing after Removing Soil Background

ZHANG Zhitao<sup>1,2</sup> BIAN Jiang<sup>1,2</sup> HAN Wenting<sup>2</sup> FU Qiuping<sup>3</sup> CHEN Shuobo<sup>1,2</sup> CUI Ting<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** With the rapid development of remote sensing platform of low altitude unmanned aerial vehicle (UAV), the dynamic, fast and inexpensive features, the UAV remote sensing platform has more research in various fields, especially in the precision agriculture irrigation technology. The unmanned aerial vehicle thermal infrared low altitude remote sensing technology can quickly monitor the canopy temperature information of the crop, which can further use the canopy temperature information to diagnose the water stress condition of the crop. However, the processing of high resolution thermal infrared image of UAV is the key to the diagnosis of crop moisture, eliminating the soil background of UAV thermal infrared image is an effective way to improve the accuracy of crop water diagnosis. However, it is also a difficult problem in thermal infrared image processing. Different water treatments were carried out, including  $I_1$  (50% of field holding water),  $I_2$  (65% of field holding water),  $I_3$  (80% of field holding water) and  $I_4$  (control group 95% ~ 100% of field holding water), and each water treatment set three repeat tests, a total of 12 plots, each plot was 4 m × 5 m). Flower boll cotton was taken as study object at 09:00, 13:00 and 17:00 of day, respectively, and UAV high resolution thermal infrared images were obtained. Firstly, the two-valued Ostu algorithm and the Canny edge detection algorithm were used to deal with the thermal infrared image, and achieve the elimination of soil background, then, the two-valued Ostu algorithm and Canny edge detection algorithm contained soil background were used to

收稿日期: 2018-04-09 修回日期: 2018-06-27

**基金项目:** 新疆科技支疆项目(2016E02105)、国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)和陕西省水利科技项目(2017SLKJ-7)

**作者简介:** 张智韬(1976—),男,副教授,博士,主要从事遥感技术在节水灌溉及水资源中的应用研究,E-mail: zhitaozhang@126.com

calculate the crop water stress index, finally, the relationship models between three kinds of crop water stress index (CWSI) and cotton leaf stomatal conductance at different times was established. The research results showed that the application of Canny edge detection algorithm can effectively eliminate the soil background in thermal infrared image, and there was a single peak distribution of the temperature histogram after removing the soil background. Among the crop water stress index obtained from three kinds of treatment methods, the CWSI of Canny edge detection algorithm was the minimal, the CWSI of two-valued Ostu algorithm was higher, and the CWSI with soil background was the largest. The determination coefficient between CWSI and cotton leaf stomatal conductance by using Canny edge detection algorithm to remove the soil background was up to 0.84, and that by using two-valued Ostu algorithm resulted the second, and that got by containing soil background was the worst. The research result can provide a reference method for monitoring water condition of the plant by UAV thermal infrared technology.

**Key words:** cotton; unmanned aerial vehicle; thermal infrared; Canny edge detection; crop water stress index; stomatal conductance

0 引言

土壤水分是影响农作物生长的关键因素,也是指导灌溉的理论依据,利用热红外非接触性诊断作物水分状况成为当前热点<sup>[1-2]</sup>。1963 年,TANNER<sup>[3]</sup>首先研究发现冠层温度可以指示作物水分胁迫,随后,IDSO 等<sup>[4-6]</sup>利用空气温度  $T_a$  和冠层温度  $T_c$  之差与上下基线建立经验法水分胁迫指数 CWSI。但经验法 CWSI 上下基线存在误差和不确定性,所以 JACKSON 等<sup>[7]</sup>根据冠层能量平衡推导出 CWSI 中上下基线的理论计算公式,用于小麦的水分诊断研究,取得较好的诊断精度,并一直作为水分诊断的可行方法<sup>[8-10]</sup>。由于理论公式所需参数较多,JONES 等<sup>[11-12]</sup>将 CWSI 计算方法进行简化,利用干湿参考面确定上下温度极限值,使 CWSI 更加容易指导生产实践,而简化法 CWSI 评估棉花水分亏缺状况也取得了一定进展。MERON 等<sup>[13]</sup>研究了冠层阳光直接照射叶片温度、冠层阴影叶片温度、土壤温度对热红外诊断棉花水分状况的影响。XU 等<sup>[14]</sup>进一步将 CWSI 与蒸腾速率、净光合作用、气孔导度的关系作了深入的分析。近年来,作物水分胁迫指数 CWSI 在国内也逐渐成为研究的热点<sup>[15-18]</sup>,张立伟等<sup>[19]</sup>分析了冠层温度、冠气温度比、冠气温度差与玉米根系土壤含水率的相关关系,蔡甲冰等<sup>[20]</sup>将冠层温度作为自动灌溉决策系统的核心理论基础。

以上研究都是基于地面点测方式获取的冠层温度,然而将点状温度转为面状冠层温度具有一定误差和不确定性。随着低空无人机遥感平台的发展,快速获取高时间和空间分辨率的热红外图像成为可能,有效解决了面状冠层温度采集的问题。HOFFMANN 等<sup>[21]</sup>利用无人机热红外技术采集冠层温度信息,并且结合多种植被指数共同诊断大麦的

水分胁迫状况。BALUJA 等<sup>[22]</sup>利用无人机热红外图像计算 CWSI,用于评估葡萄园水分空间状况的差异性。RUD 等<sup>[23]</sup>研究发现,无人机热红外图像计算的 CWSI 与马铃薯土壤含水率具有显著的相关关系,EGEA 等<sup>[24]</sup>将 CWSI 应用在高密度的橄榄园及桃园的土壤水分监测中,并取得较好的研究成果。然而无人机热红外图像受到土壤背景的干扰,作物水分胁迫状况的监测精度普遍较低,HAN 等<sup>[25]</sup>利用 EM 算法研究冠层温度的分布及土壤背景的干扰情况,但并没有将土壤背景进行有效剔除。Canny 算子是一种图像边缘检测技术,可以提取不同物质类型的边界像元,PARK 等<sup>[26]</sup>应用 Canny 边缘检测技术优化了水分胁迫指数 CWSI 干湿参考温度的计算,但利用 Canny 边缘检测算法剔除热红外图像土壤背景的研究较少。

本文以 4 种不同水分处理的花铃期棉花为研究对象,采用无人机高分辨率热红外成像仪连续监测,并分别采用二值化 Ostu 算法和 Canny 边缘检测算法对热红外图像进行掩膜处理,实现对土壤背景的剔除,然后分别计算两种热图像处理算法和包含土壤背景的作物水分胁迫指数 CWSI,并研究 3 种方法计算的 CWSI 与棉花叶片气孔导度  $G_s$  的关系模型。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及试验设计

1.1.1 研究区概况

试验田位于陕西关中平原腹地,西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院(108°4'20"E,34°17'42.17"N),该地区平均年降雨量 640 mm,平均蒸发量为 993.2 mm,海拔 525 m,地下水埋藏较深,属于暖温带季风半湿润气候区,土壤质地为中壤,平均田间持水率 23%~26%,凋萎含水率 8.6%

(均为质量含水率),平均土壤干容重  $1.44\text{ g/cm}^3$ 。试验田开阔平坦配备遮雨架进行控水措施,并设有可移动式小型气象站,试验期间天气晴朗,总辐射较强,无阴雨天气干扰。

1.1.2 试验设计

试验设计4个水分梯度  $I_1$  (50%田间持水量)、 $I_2$  (65%田间持水量)、 $I_3$  (80%田间持水量)、 $I_4$  (对照组95%~100%田间持水量),每个水分处理设置3个重复试验,共12个小区,小区面积  $4\text{ m} \times 5\text{ m}$ 。小区配有水表,采用滴灌的方式进行灌溉,棉花每行放置一条滴灌带,滴头湿润半径20 cm,并且小区之间设有宽垄,以尽量避免各个小区土壤水分侧向入

渗的影响(图1,2017年7月11日13:00采集)。图中小区编号  $I_{11}$  代表1区的1个重复,其他编号类似。本研究选用西北农林科技大学农学院培育的新品种西农棉1008,于2017年4月19日人工覆膜播种,施用  $225\text{ kg/hm}^2$  磷肥和  $375\text{ kg/hm}^2$  尿素作为底肥,棉花苗期不做控水处理。试验时间为2017年7月11—15日,连续监测5 d,棉花处在花铃盛期,是棉花结铃生长发育的关键生育期。试验开始前棉花水分胁迫出现明显状态,参考设置合理的计划湿润层深度,严格按照4个水分处理进行灌溉,试验期间不进行任何灌水,每天于09:00、13:00、17:00进行无人机冠层温度采集。



图1 试验小区可见光影像

Fig.1 Visible light image of experimental area

1.2 无人机热红外系统

1.2.1 无人机系统

无人机系统采用大疆公司 Matrice600 搭载禅思 XT 热红外 (TIR) 相机 (FLIR 系统, Tau2 机芯) 获取棉花花铃期的冠层温度影像。Matrice600 六旋翼无人机具有飞行姿态稳定且续航能力长等特点,最大起飞质量  $15.1\text{ kg}$ ,最大可承受  $8\text{ m/s}$  风速(图2)。TIR 相机工作的波段为  $7.5 \sim 13.5\text{ }\mu\text{m}$ ,空间分辨率为  $640\text{ 像素} \times 512\text{ 像素}$ ,温度灵敏度  $0.05\text{ }^\circ\text{C}$ ,镜头焦距  $19\text{ mm}$ ,视场角  $32^\circ\text{H} \times 26^\circ\text{V}$  (图3)。为了拍摄分辨率较高且质量较好的热红外影像,无人机悬停  $15\text{ m}$  高度采集棉花冠层的热红外影像,图像分辨率为  $0.011\text{ m}$ 。

1.2.2 热红外图像的校准

热红外图像采用地面实测叶片温度与水温进行校准。无人机采集棉花冠层温度时,每个试验小区均匀选取阳光直接照射棉花叶片,地面同步利用手持热红外测温仪测量其叶片温度,最终取所测温度的平均值,并采集试验区放置的器皿中水的温度。将无人机采集的热红外图像输入 FLIR Tools (禅思 XT 热红外影像处理软件),设置辐射率为  $0.96$ ,将



图2 大疆 Matrice600 无人机

Fig.2 DJI M600 UAV



图3 大疆禅思 XT 热红外成像测温仪

Fig.3 DJI Zenmuse XT thermal infrared imaging thermometer

叶片平均温度和水温作为参考温度,通过对比参考温度和热红外图像上相应像元温度的方法进行红外温度图像的校准,即可得到温度较为准确的无人机热红外温度图像。

1.3 生理指标数据采集

棉花叶片的气孔导度 ( $G_s$ , mol/(m<sup>2</sup>·s)) 使用美国 Licor 公司 LI-6400 型便携式光合测定仪测定。气孔导度的测定与无人机采集热红外图像同步进行,每个小区选取 3 株棉花样本(倒三叶片)测量,每株重复 3 次。

1.4 气象数据采集

使用自行搭建的可移动式小型气象站自动收集气象数据,主要气象要素有:大气温度、相对湿度、风速、太阳净辐射、土壤热通量等,数据采集间隔为 30 min,试验期间(2017 年 7 月 11—15 日)的主要气象数据如表 1 所示。

表 1 主要日平均气象因子

Tab.1 Values of major daily average meteorological factors

| 日期   | 大气温度/<br>℃ | 相对湿度/<br>% | 风速/<br>(m·s <sup>-1</sup> ) | 太阳净辐射/<br>(W·m <sup>-2</sup> ) |
|------|------------|------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 11 日 | 36.32      | 35.46      | 0.86                        | 548.6                          |
| 12 日 | 36.58      | 34.18      | 0.64                        | 545.6                          |
| 13 日 | 35.88      | 37.58      | 0.68                        | 583.6                          |
| 14 日 | 36.40      | 37.88      | 0.80                        | 553.8                          |
| 15 日 | 31.32      | 48.62      | 0.56                        | 426.9                          |

1.5 热红外图像剔除土壤背景的方法

1.5.1 二值化 Otsu 算法

无人机热红外成像测温仪获取的图像具有两类特征像元,一类为目标冠层像元,另一类为土壤背景像元。二值化 Otsu 算法(最大类间方差法)是灰度图像阈值分割的经典自适应阈值算法,在图像处理领域得到广泛的应用<sup>[27]</sup>,其核心理论公式为

$$\sigma^2(k) = \omega_0(\mu - \mu_0)^2 + \omega_1(\mu - \mu_1)^2 \tag{1}$$

式中  $\omega_0$ —— $C_0$ 出现的概率

$\omega_1$ —— $C_1$ 出现的概率

$\mu_0$ —— $C_0$ 的灰度均值

$\mu$ ——图像总的灰度均值

$\mu_1$ —— $C_1$ 的灰度均值

该算法以像元类间方差为分割标准,类间方差越大,说明两种物质的差别越大,因此可以将图像的背景与目标分割。设图像的任意灰度  $k$ ,  $1 \leq k \leq L$  ( $L$  为图像总灰度级),将图像按灰度  $k$  分为  $C_0$  和  $C_1$  两类,  $\sigma^2(k)$  取最大值的  $k$  即为最佳阈值。

1.5.2 Canny 边缘检测算法

无人机采集的高分辨率热红外影像冠层边缘具

有明显的分界像元,因此可以对热红外图像进行边缘检测,得到棉花冠层边缘特征栅格图,将边缘特征栅格图进行重分类、线转面、裁剪等图像处理操作即可将冠层像元与土壤背景有效分离。边缘检测是图像预处理中的重要过程,其主要利用图像灰度阶跃变化的像素点集合,反映了图像  $DN$  值的突变性。传统的边缘检测算子有 Sobel、Robert、Prewitt 等<sup>[28]</sup>,但其都属于局部窗口的梯度算子,边缘检测效果并不理想<sup>[29]</sup>。Canny 边缘检测算法具有边缘检验的 3 个判定准则<sup>[30]</sup>,因此对图像进行边缘提取具有较好的应用效果,并且 Canny 边缘检测算法在水平与垂直方向上的梯度变化检测具有较大优势<sup>[31]</sup>。Canny 边缘检测算法借助高斯滤波器进行平滑处理,其高斯函数为

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \tag{2}$$

式中  $\sigma$ ——高斯滤波器参数

应用一阶微分算子处理平滑后的影像  $I$ ,并获得相应的梯度幅值  $G$  和梯度方向  $\theta$ ,点  $I(i,j)$  处  $x$  和  $y$  的偏导数分别为  $G_x(i,j)$  和  $G_y(i,j)$ <sup>[30]</sup>,即

$$G(i,j) = \sqrt{G_x^2(i,j) + G_y^2(i,j)} \tag{3}$$

$$\theta(i,j) = \arctan \frac{G_x(i,j)}{G_y(i,j)} \tag{4}$$

其中  $G_x(i,j) = (I(i,j+1) - I(i,j) +$

$I(i+1,j+1) - I(i+1,j))/2 \tag{5}$

$G_y(i,j) = (I(i,j) - I(i+1,j) + I(i,j+1) - I(i+1,j+1))/2 \tag{6}$

Canny 边缘检测算法提取的边缘特征图像,首先将边缘特征图像在 ArcGIS 和 ENVI 中进行重分类和配准,再使用 ArcToolbox 工具中的栅格转线,线转面,拓扑检查及高级编辑功能将边缘线状图像进行闭合处理;最后将提取的棉花冠层面状矢量图导入 ENVI 软件,裁剪并使用建立掩膜工具和掩膜统计功能导出纯冠层像元的温度直方图和统计特征值,取本研究区具有代表性的局部,应用 Canny 边缘检测算法提取纯冠层像元的具体流程及操作见图 4。

1.6 作物水分胁迫指数

冠层能量平衡公式<sup>[7]</sup>为

$$R_n = G + H + \lambda E \tag{7}$$

其中

$$H = \rho C_p (T_a - T_c)/r_a \tag{8}$$

$$\lambda E = \rho C_p (e_c^* - e_a)/[\gamma(r_a + r_c)] \tag{9}$$

式中  $R_n$ ——太阳净辐射, W/m<sup>2</sup>

$G$ ——土壤热通量, W/m<sup>2</sup>

$H$ ——显热通量, W/m<sup>2</sup>

$\lambda E$ ——潜热通量, W/m<sup>2</sup>

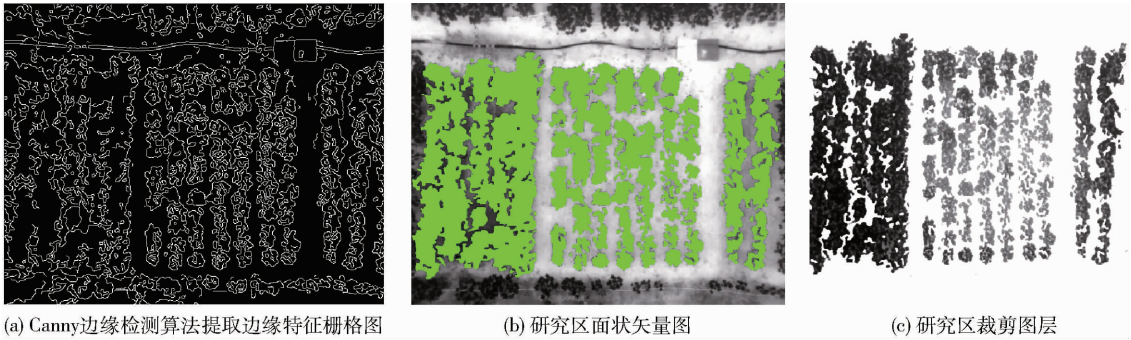


图4 Canny边缘检测算法操作图

Fig. 4 Operation diagram of Canny edge detection algorithm

$\rho$ ——空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $C_p$ ——空气热容量,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$   
 $T_a$ ——大气温度,  $^{\circ}\text{C}$   
 $T_c$ ——冠层温度,  $^{\circ}\text{C}$   
 $r_a$ ——空气动力学阻力,  $\text{s}/\text{m}$   
 $e_a^*$ —— $T_c$ 时的饱和水气压,  $\text{Pa}$   
 $e_a$ —— $T_a$ 时的水气压,  $\text{Pa}$   
 $r_c$ ——作物冠层阻力,  $\text{s}/\text{m}$   
 $\gamma$ ——湿度计常数,  $\text{Pa}/^{\circ}\text{C}$

理论模式下的水分胁迫指数的计算公式为

$$CWSI = \frac{\gamma \left( 1 + \frac{r_{cp}}{r_a} \right) - \gamma^*}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad (10)$$

其中  $\gamma^* = \gamma \left( 1 + \frac{r_{cp}}{r_a} \right) \quad (11)$

式中  $r_{cp}$ ——潜在蒸散发下作物冠层阻力<sup>[32]</sup>,  $\text{s}/\text{m}$   
 $\Delta$ ——饱和水汽压与温度曲线的斜率,  $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$

2 结果与分析

2.1 剔除土壤背景图像结果分析

应用二值化 Otsu 算法和 Canny 边缘检测算法分别对研究区的热红外影像进行土壤背景剔除(图5)。图5a为原始无人机热红外影像,图中包括4种水分处理( $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ ),每种处理3个重复,总共12个小区,并且4种水分处理的小区形成不同覆盖度的棉花冠层。图5b为二值化 Otsu 算法剔除土壤后的图像,从图中可以看出,二值化 Otsu 算法对于低覆盖度的棉花冠层( $I_{11}$ 、 $I_{12}$ 、 $I_{13}$ )剔除土壤背景效果较为理想,其中  $I_{11}$  小区的红外影像由于光线太弱的缘故,导致较多的冠层像元被剔除;然而,该算法不能较好地地区分高覆盖度作物冠层( $I_{41}$ 、 $I_{42}$ 、 $I_{43}$ )的棉花与土壤像元,而对于中等覆盖度的局部冠层分割效果也存在混合像元干扰问题,因此二值化 Otsu 算法的分割效果总体不理想。图5c为利用 Canny 边缘检测算法进行热红外图像边缘检测并利用本文的

图像处理操作后的分割效果,从图中可得,Canny 边缘检测算法可以精准地识别棉花冠层与土壤背景的边界像元,并能较好地提取棉花纯冠层像元,其分割效果优于二值化 Otsu 算法。

2.2 剔除土壤背景温度直方图分析

图6分别为图4d研究区(2017年7月13日13:00采集)的原始热红外图像、二值化 Otsu 算法剔除土壤背景、Canny 边缘检测算法剔除土壤背景后的温度直方图。

从图6a可知,包含土壤背景原始热红外图像温度直方图为双峰形状<sup>[24, 28]</sup>,研究表明,双峰形状的直方图代表两种不同的物质类型,第1个峰占据大多数的温度像元,其代表的物质类型为棉花冠层,第2个峰占据较少的像元,并且其像元温度高于第1个峰的冠层像元温度,因此代表的是土壤背景;本文的二值化 Otsu 算法与 Canny 边缘检测算法最终目的是将第2个峰消除,通过热红外图像温度直方图的双峰或单峰形状可以判断土壤背景是否剔除。图6b为二值化 Otsu 算法处理后的冠层温度直方图,它的直方图形状与原始温度直方图的前半部分相似,该温度直方图粗糙,噪声多,不符合自然界同种物质正态分布的规律。图6c为 Canny 边缘检测算法剔除土壤背景后的冠层温度直方图,可以看出使用 Canny 边缘检测算法剔除土壤背景后的直方图呈现明显的单峰形状,由于原始图像温度直方图冠层像元部分具有凸起形状,所以应用 Canny 边缘检测算法剔除土壤背景后的冠层温度直方图下侧有小的凸起峰;该直方图大致服从偏态分布,轮廓光滑平整,噪声较少,因此本文的 Canny 边缘检测算法相比二值化 Otsu 算法具有较大优势。

通过以上分析可知,Canny 边缘检测算法剔除热红外影像土壤背景干扰的效果较为理想,并且纯冠层温度直方图为单峰形状,为了进一步验证 Canny 边缘检测算法的背景剔除效果,本文绘制12个试验小区(2017年7月13日13:00采集)剔除土壤背景后的冠层温度直方图(图7)。

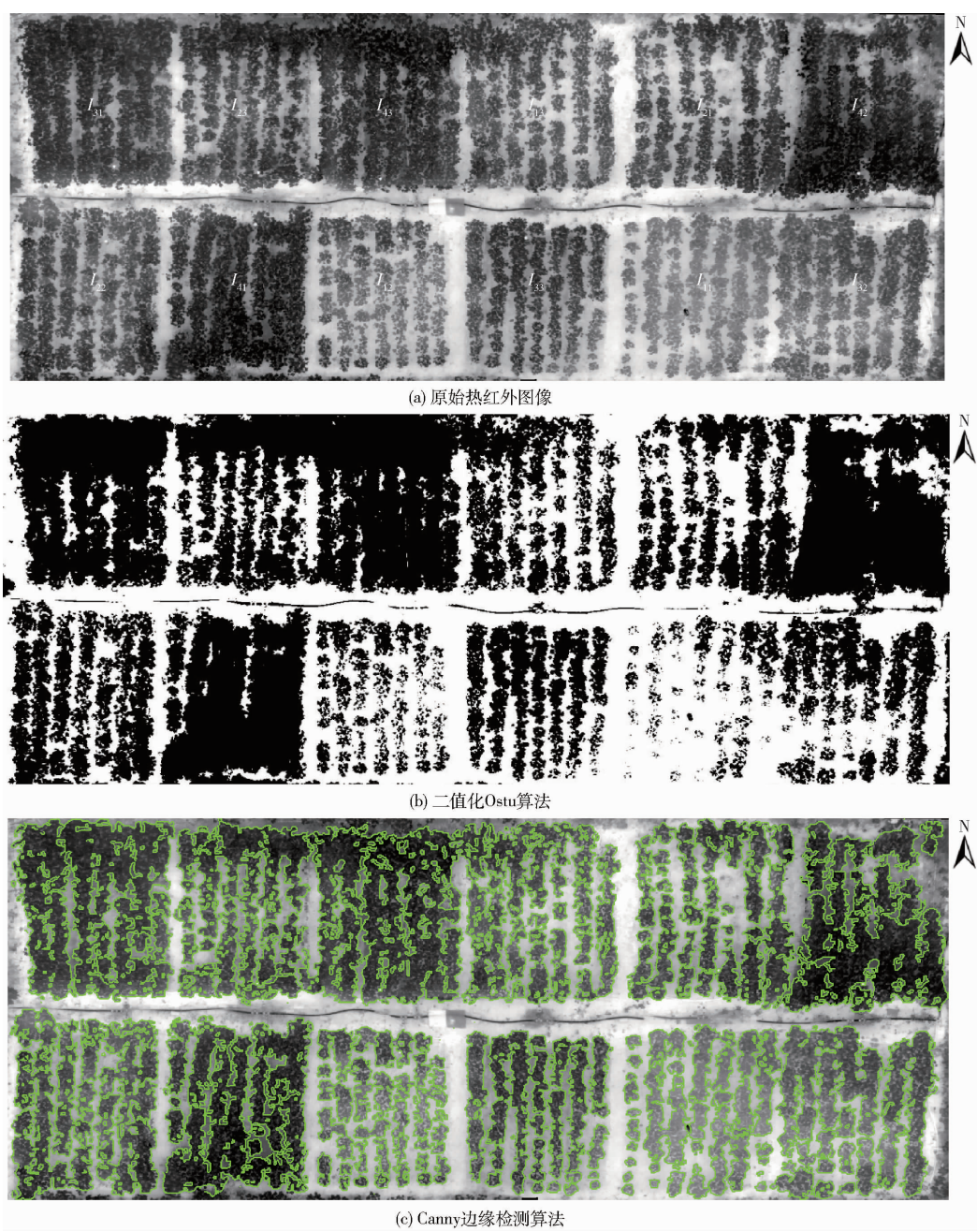


图 5 剔除热红外图像土壤背景的方法对比

Fig. 5 Comparison of different methods for removing soil pixels from thermal infrared images

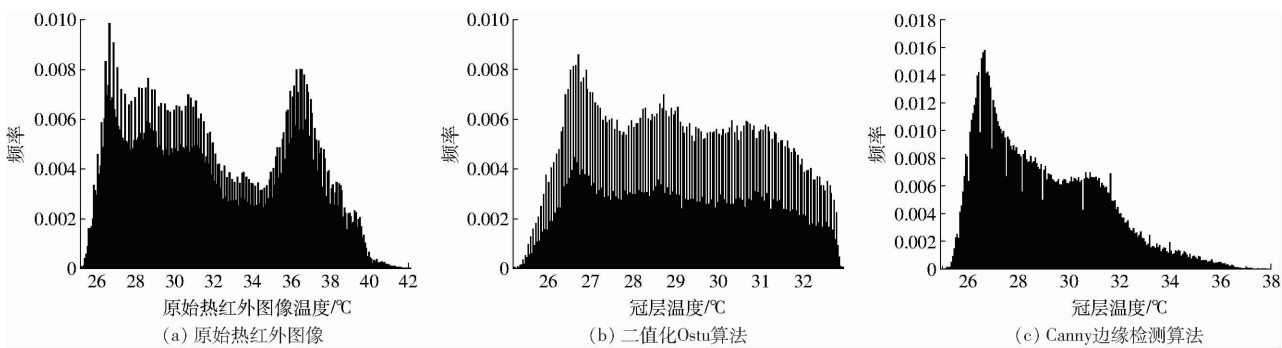


图 6 不同处理方法的温度直方图

Fig. 6 Temperature histograms for different treatment methods

从图 7 可以看出,利用 Canny 边缘检测算法剔除 12 个试验小区土壤背景后的冠层温度直方图都为单峰形状,轮廓光滑,效果较好。通过对比分析图 7 不同水分处理小区的冠层温度直方图可得,随

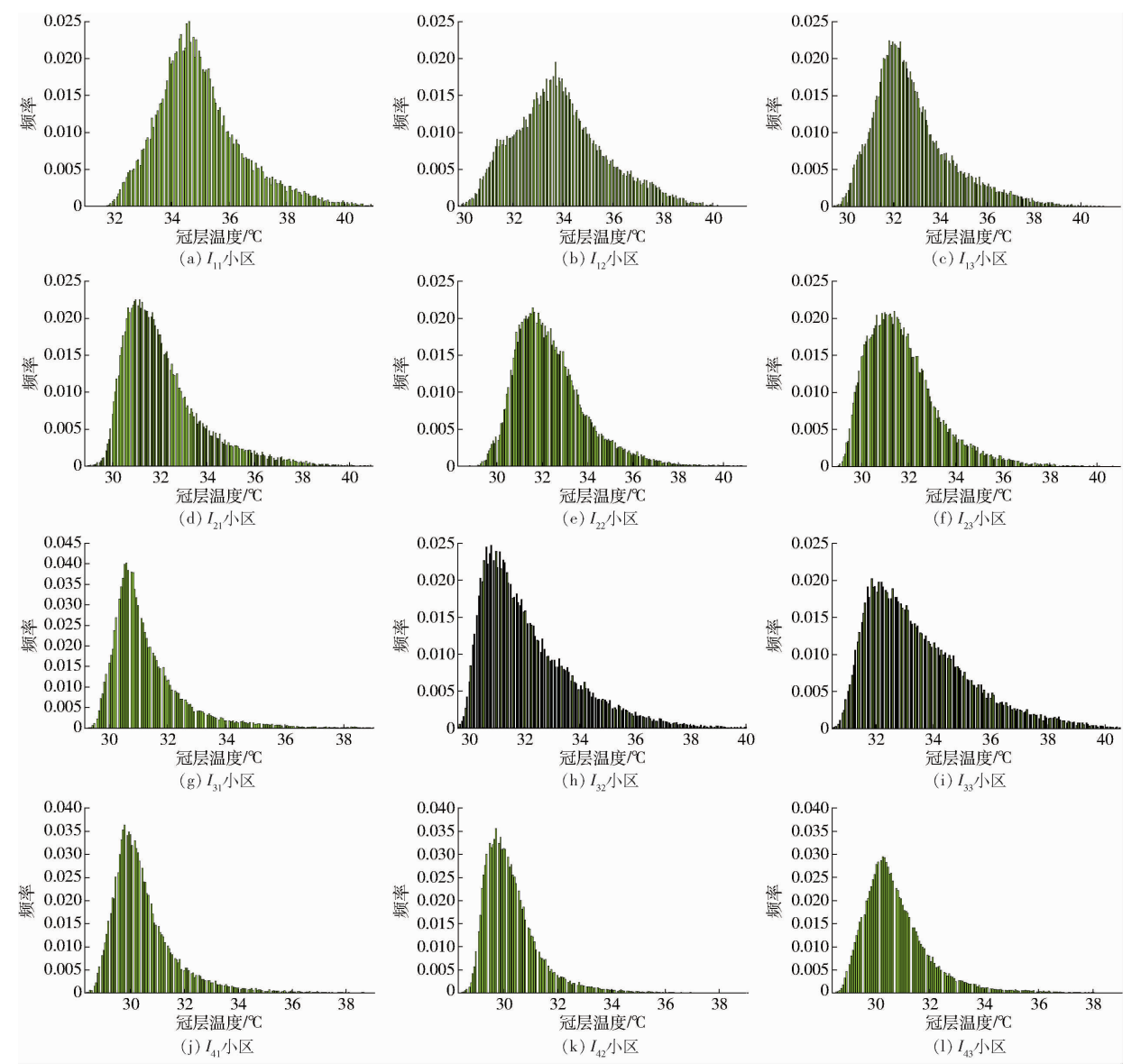


图 7 不同试验处理小区的冠层温度直方图

Fig. 7 Canopy temperature histograms of different treatment plots

着水分胁迫程度的递减,试验小区冠层温度逐渐降低,并且冠层温度的变化范围区间也随之减小,因此,Canny 边缘检测算法可以较好地剔除热红外土壤背景干扰,是提取无人机热红外纯冠层温度像元的可行方法。

2.3 CWSI 日平均变化趋势

利用式(10)分别计算 Canny 边缘检测算法与

Ostu 算法剔除土壤前后的水分胁迫指数 CWSI,并绘制不同试验处理小区日平均 CWSI 变化过程(图 8)。

图 8a 是包含土壤背景的热红外图像计算的水分胁迫指数 CWSI,从图 8a 可以看出,不同处理小区 CWSI 由大到小依次为:  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ ,4 种水分处理具有明显的差异性,并且随着灌水日期

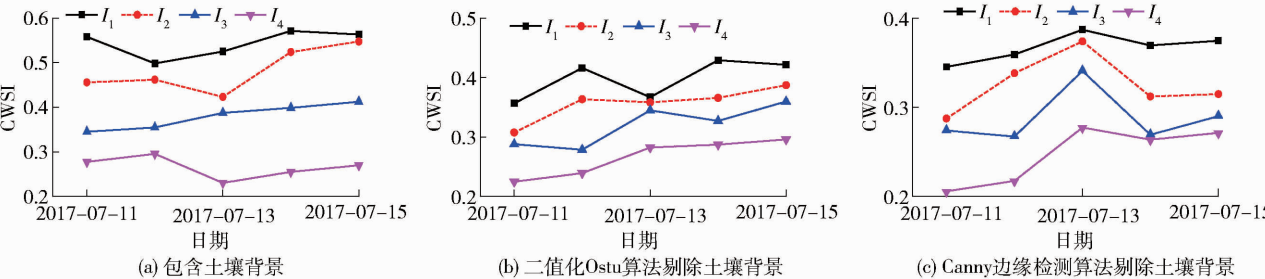


图 8 不同图像处理 CWSI 日平均变化趋势

Fig. 8 Daily average trends of CWSI by using different image processing methods

的推移土壤水分不断被作物消耗,CWSI 逐渐上升。图 8a 的水分胁迫指数 CWSI 明显高于图 8b 和图 8c 的 CWSI,因此无人机高分辨率热红外图像的土壤温度像元对 CWSI 计算具有极大的影响,图中对照组  $I_4$  小区的水分胁迫指数大约为 0.27, $I_1$  小区的水分胁迫指数高达 0.55。对比分析可知,土壤温度像元极大地高估了水分胁迫指数 CWSI,严重影响无人机热红外诊断作物水分状况的精度。

图 8b 为二值化 Ostu 算法剔除土壤背景后的 CWSI 日平均变化趋势。从 CWSI 的整体趋势来看,二值化 Ostu 算法的 CWSI 相对包含土壤的 CWSI 整体偏小,其最大值为 0.42,最小值为 0.22。图 8c 是利用 Canny 边缘检测算法剔除土壤背景后计算的水分胁迫指数 CWSI,图中对照组  $I_4$  小区 CWSI 的曲线从 0.2 增大至 0.25,其 CWSI 变化范围较小,说明作物充分供水时水分胁迫指数相对偏小, $I_1$  为缺水处

理小区,其 CWSI 最大值接近 0.4,并小于包含土壤背景的水分胁迫指数 CWSI。

Canny 边缘检测算法与二值化 Ostu 算法剔除土壤背景后,相对于包含土壤背景的水分胁迫指数 CWSI 都相应的减小,说明高分辨率无人机热红外图像的土壤背景对水分胁迫指数具有较大影响。然而,Canny 边缘检测算法小于二值化 Ostu 算法的 CWSI,对比两种算法可知,二值化 Ostu 算法剔除土壤背景局部效果较差,而 Canny 边缘检测算法可以完全剔除土壤背景,对于无人机热红外诊断棉花水分状况具有重要的意义。

2.4 CWSI 与棉花叶片气孔导度的关系

棉花叶片的气孔导度( $G_s, \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )反映了棉花水分的真实情况,可以作为棉花是否缺水的判定标准。为了验证剔除土壤背景后水分胁迫指数 CWSI 的准确性,本文利用棉花叶片的气孔导度  $G_s$  与 CWSI 建立关系模型(表 2)。

表 2 CWSI 与气孔导度的相关性  
Tab.2 Correlation between CWSI and stomatal conductance

| 无人机热红外图像处理方法       | 时刻    | 模型                    | $R^2$ | $F$    | $P$   |
|--------------------|-------|-----------------------|-------|--------|-------|
| 包含土壤背景             | 09:00 | $Y = -0.833X + 0.605$ | 0.646 | 20.055 | <0.01 |
|                    | 13:00 | $Y = -0.275X + 0.513$ | 0.697 | 22.988 | <0.01 |
|                    | 17:00 | $Y = -0.202X + 0.319$ | 0.504 | 10.123 | <0.05 |
| 二值化 Ostu 算法剔除土壤背景  | 09:00 | $Y = -0.759X + 0.549$ | 0.505 | 11.190 | <0.01 |
|                    | 13:00 | $Y = -0.260X + 0.469$ | 0.624 | 12.992 | <0.01 |
|                    | 17:00 | $Y = -0.386X + 0.349$ | 0.674 | 16.537 | <0.01 |
| Canny 边缘检测算法剔除土壤背景 | 09:00 | $Y = -0.826X + 0.539$ | 0.765 | 35.761 | <0.01 |
|                    | 13:00 | $Y = -0.716X + 0.576$ | 0.840 | 53.011 | <0.01 |
|                    | 17:00 | $Y = -0.427X + 0.339$ | 0.670 | 14.268 | <0.01 |

注:表中  $Y$  为气孔导度  $G_s$ , $X$  为水分胁迫指数 CWSI。下同。

从表 2 可得,水分胁迫指数 CWSI 与叶片气孔导度  $G_s$  具有极高的线性关系,在 13:00 时,包含土壤背景水分胁迫指数 CWSI 与气孔导度  $G_s$  的模型决定系数  $R^2$  为 0.697,达到显著相关,但 09:00 与 17:00 的模型相关性较低。二值化 Ostu 算法剔除土壤背景后的 CWSI 与气孔导度  $G_s$  相关关系并没有提高,可能由于 Ostu 算法对于低覆盖度的棉花冠层剔除土壤效果理想,而高覆盖度的棉花热红外冠层剔除土壤效果较差,因此最终计算的水分胁迫指数偏差更大,导致 CWSI 与气孔导度  $G_s$  的关系较差。Canny 边缘检测算法剔除土壤后的 CWSI 与气孔导度  $G_s$  模型关系在 13:00 时的决定系数高达 0.84,并且 09:00 与 17:00 的模型相关性也高于包含土壤背景处理。对比可知,土壤背景温度对水分胁迫的计算具有较大的干扰,应用 Canny 边缘检测算法剔除无人机高分辨率热红外影像的土壤背景可以有效提高水分胁迫指数 CWSI 的计算精度。

2.5 CWSI 与棉花叶片气孔导度的模型验证

利用棉花叶片实测气孔导度  $G_s$  数据,验证表 2 中的关系模型,均方根误差 RMSE 和决定系数  $R^2$  共同作为模型检验精度的评判标准(表 3)。

从表 3 可知,3 种热红外图像处理方法的模型验证精度均在 13:00 最高,并且包含土壤背景、二值化 Ostu 算法、Canny 边缘检测算法的水分胁迫指数 CWSI 与棉花叶片气孔导度  $G_s$  验证精度在 13:00 的决定系数  $R^2$  分别为 0.734、0.775、0.893,均方根误差 RMSE 分别为 0.086、0.065、0.041,可得 Canny 边缘检测算法的模型验证精度最高,二值化 Ostu 算法次之,包含土壤背景的验证精度最差;在 09:00 与 17:00 的模型验证精度,Canny 边缘检测算法同样高于包含土壤背景和二值化 Ostu 算法的模型验证精度;从模型验证的决定系数  $R^2$  与均方根误差 RMSE 来看,Canny 边缘检测算法提高了 CWSI 计算精度,

表 3 CWSI 与气孔导度关系的验证

Tab. 3 Verification of relationship between CWSI and stomatal conductance

| 无人机热红外图像处理方法       | 时刻    | 模型                    | $R^2$ | RMSE  |
|--------------------|-------|-----------------------|-------|-------|
| 包含土壤背景             | 09:00 | $Y = -0.833X + 0.605$ | 0.651 | 0.158 |
|                    | 13:00 | $Y = -0.275X + 0.513$ | 0.734 | 0.086 |
|                    | 17:00 | $Y = -0.202X + 0.319$ | 0.602 | 0.212 |
| 二值化 Ostu 算法剔除土壤背景  | 09:00 | $Y = -0.759X + 0.549$ | 0.698 | 0.121 |
|                    | 13:00 | $Y = -0.260X + 0.469$ | 0.775 | 0.065 |
|                    | 17:00 | $Y = -0.386X + 0.349$ | 0.681 | 0.138 |
| Canny 边缘检测算法剔除土壤背景 | 09:00 | $Y = -0.826X + 0.539$ | 0.755 | 0.082 |
|                    | 13:00 | $Y = -0.716X + 0.576$ | 0.893 | 0.041 |
|                    | 17:00 | $Y = -0.427X + 0.339$ | 0.787 | 0.068 |

可以更准确地诊断棉花水分状况。

3 讨论

本文选取二值化 Ostu 算法和 Canny 边缘检测算法分别对无人机热红外影像的土壤背景进行剔除。二值化 Ostu 作为一种优化的算法,其可以直接对图像进行阈值分割,而 Canny 边缘检测算法可以对图像的边缘特征栅格图像处理后间接实现图像分割处理,并且 Canny 边缘检测算法对无人机热红外图像的阈值分割鲜有报道。研究表明,Canny 边缘检测算法剔除无人机热红外图像的土壤背景效果较为理想,而二值化 Ostu 算法只适用于低覆盖度的棉花冠层。目前剔除土壤背景提取纯冠层温度像元的主要方法有:RGB 图像阈值法<sup>[33]</sup>、热红外图像直方图阈值法( $T_{air} - 10^{\circ}\text{C} < T_{canopy} < T_{air} + 7^{\circ}\text{C}$ )<sup>[34]</sup>、二值化阈值法<sup>[35]</sup>。RGB 图像阈值法利用可见光影像剔除土壤背景,但该方法存在较多缺点:首先,热红外和可见光影像的坐标不匹配,需要布置较多的地面控制点将两者进行配准;其次,两者影像的空间分辨率不一致,热红外影像的空间分辨率较低,需要将可见光影像重采样以降低其分辨率,但是,将可见光影像空间分辨率精准的匹配至热红外影像具有很大难度,因此,可见光阈值法操作复杂,成本高,引入较多的人为误差;热红外图像直方图阈值法采用经验公式( $T_{air} - 10^{\circ}\text{C} < T_{canopy} < T_{air} + 7^{\circ}\text{C}$ )提取冠层像元,并取温度直方图最低 33% 的温度像元平均值作为最终冠层温度,经验法将大气温度作为纯像元冠层温度的提取标准,然而,大气温度容易多变,该方法提取的冠层温度很难评估其误差大小。通过分析包含土壤背景、二值化 Ostu 算法、Canny 边缘检测算法分别处理热红外图像后的水分胁迫指数 CWSI,同样可以表明,Canny 边缘检测算法可以提高作物水分胁迫诊断的精度,它是提取纯冠层温度像元的一种优化方法,可以较好地识别无人机热红外影像的冠层边界像元,相比其他剔除土壤背景的方法<sup>[33-35]</sup>具有

较大的应用潜力和优势。

从无人机监测作物水分胁迫状况的最佳时间分析,本文研究了无人机监测棉花水分胁迫状况的 3 个时刻。通过对比分析可知,包含土壤背景、二值化 Ostu 算法和 Canny 边缘检测算法 3 种处理方法 13:00 的模型精度最高。并且,在 13:00 利用 Canny 边缘检测算法处理得到的水分胁迫指数 CWSI 与棉花叶片气孔导度  $G_s$  的决定系数  $R^2$  高达 0.84,无人机热红外监测棉花水分胁迫精度最高。棉花叶片气孔导度  $G_s$  是反映作物叶片蒸腾强度和水分消耗规律的指标,随着日出后太阳净辐射的增强,大气温度回升,冠层温度趋近于大气温度<sup>[36]</sup>,作物水分消耗速率和气孔导度  $G_s$  逐渐增大,土壤可提供作物根系一定量的水分,以保证作物的生理活动。到 13:00,如果土壤不能供给作物根系充足的水分,作物则表现出水分胁迫状态,气孔导度  $G_s$  变小,反之亦然。而此时,作物水分胁迫现象最为明显,不同水分处理小区水分胁迫差异性最大,是作物水分胁迫诊断的最佳时刻,该时刻大气温度较高,作物耗水多,比较符合作物的生理耗水规律,这为无人机监测作物水分状况提供了实践应用基础。因此,13:00 的作物水分胁迫指数 CWSI 与叶片气孔导度  $G_s$  的相关关系高于其他时刻。

然而,本研究也存在不足,棉花冠层理论上可以分为阳光直接照射叶片和阴影叶片,并且两种冠层叶片的温度差别较大,将两种冠层叶片分别进行分析,可以更深入地了解棉花不同冠层温度对水分响应的变化规律,并能进一步提高无人机热红外诊断作物水分的精度。但是,从热红外图像处理角度分析,区分两种冠层叶片成分具有较大的难度,需要研究更优化可行的图像分割算法;从无人机热红外技术角度分析,热红外图像空间分辨率较低仍是瓶颈问题。因此,无人机热红外诊断作物水分状况所面临的难点需要更深入的研究和探讨。

## 4 结论

(1) Canny 边缘检测算法剔除高分辨率热红外影像的土壤背景优于二值化 Ostu 算法, 对于不同覆盖度的作物冠层, Canny 边缘检测算法具有较大的适用性和理想的分割效果; 原始热红外影像的温度直方图为双峰形状, 其主峰为作物冠层, 占据大部分像元, 偏峰为土壤背景像元, 剔除土壤背景后的热红外图像冠层温度直方图呈单峰形状的偏态分布。

(2) Canny 边缘检测算法剔除土壤背景后的水分胁迫指数 CWSI 最小, 二值化 Ostu 算法次之, 包含土壤背景的最大, 土壤背景温度像元对水分胁迫指

数 CWSI 的影响较大, 因此应用无人机热红外技术诊断作物水分状况应该考虑土壤背景的影响。

(3) Canny 边缘检测算法剔除土壤背景的水分胁迫指数 CWSI 与棉花叶片气孔导度  $G_s$  的模型相关关系最高, 优于二值化 Ostu 算法和包含土壤背景的模型精度; 通过对无人机热红外 3 个时刻监测的水分胁迫指数 CWSI 分析可知, Canny 边缘检测算法、二值化 Ostu 算法、包含土壤背景 3 种处理均在 13:00 的模型精度最高, 09:00 与 17:00 的模型精度相近, 因此本研究的最佳无人机诊断作物水分状况的时间为 13:00, 并且 Canny 边缘检测算法明显提高棉花水分胁迫诊断的精度。

## 参 考 文 献

- 1 JORGE L P A. Assessing irrigated agriculture's surface water and groundwater consumption by combining satellite remote sensing and hydrologic modelling [J]. *The Science of the Total Environment*, 2016, 542(Part A): 372–382.
- 2 KHANAL S, FULTON J, SHEARER S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 139(Supp. C): 22–32.
- 3 TANNER C. Plant temperatures [J]. *Agronomy Journal*, 1963, 55(2): 210–211.
- 4 IDSO S B. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress [J]. *Agricultural Meteorology*, 1982, 27(1): 59–70.
- 5 IDSO S B, JACKSON R D, PINTER P J, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability [J]. *Agricultural Meteorology*, 1981, 24(Supp. C): 45–55.
- 6 IDSO S B, PINTER P J, REGINATO R J. Non-water-stressed baselines: the importance of site selection for air temperature and air vapour pressure deficit measurements [J]. *Agr Forest Meteorol*, 1990, 53(1): 73–80.
- 7 JACKSON R D, IDSO S, REGINATO R, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator [J]. *Water Resources Research*, 1981, 17(4): 1133–1138.
- 8 ALCHANATIS V. Estimation of crop water stress in cotton fields and in vineyards by thermal imagery for site-specific irrigation [C] // 2005 International Symposium on Beijing Urban Agricultural Engineering Science and Technology Innovation and Development, 2005.
- 9 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.
- 10 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, 56(417): 1843–1852.
- 11 JONES H G. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling [J]. *Agr Forest Meteorol*, 1999, 95(3): 139–149.
- 12 JONES H G, SERRAJ R, LOVEYS B R, et al. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field [J]. *Functional Plant Biology*, 2009, 36(11): 978–989.
- 13 MERON M, SPRINTSIN M, TSIPRIS J, et al. Foliage temperature extraction from thermal imagery for crop water stress determination [J]. *Precision Agriculture*, 2013, 14(5): 467–477.
- 14 XU J Z, LV Y P, LIU X Y, et al. Diagnosing crop water stress of rice using infra-red thermal imager under water deficit condition [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2016, 18(3): 565–572.
- 15 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚. 基于 CWSI 和土壤水分修正系数的冬小麦田土壤含水量估算 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(3): 373–378.
- 16 ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, YANG Runya. Estimation of soil moisture of winter wheat field based on cwsI and soil water correction coefficient [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 373–378. (in Chinese)
- 17 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.
- 18 YUAN Guofu, TANG Dengyin, LUO Yi, et al. Advances in canopy-temperature-based crop water stress research [J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(1): 49–54. (in chinese)
- 17 蔡焕杰, 康绍忠, 熊运章. 用冠层温度计算作物缺水指标的一种简化模式 [J]. *水利学报*, 1996, 27(5): 44–49.
- 18 CAI Huanjie, KANG Shaozhong, XIONG Yunzhang. A simplified model of using canopy temperature to calculate crop water stress index [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 27(5): 44–49. (in Chinese)
- 18 赵燕东, 高超, 张新, 等. 植物水分胁迫实时在线检测方法研究进展 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 290–300.

- [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160740&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160740&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.040.
- ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Review of real-time detecting methods of water stress for plants [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):290–300. (in Chinese)
- 19 张立伟, 张智郡, 刘海军, 等. 基于冠层温度的玉米缺水诊断研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 94–98.
- ZHANG Liwei, ZHANG Zhijun, LIU Haijun, et al. Research on water deficit diagnosis of maize based on canopy temperature [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 94–98. (in Chinese)
- 20 蔡甲冰, 许迪, 司南, 等. 基于冠层温度和土壤墒情的实时监测与灌溉决策系统 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 133–139. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151219&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151219&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.019.
- CAI Jiabing, XU Di, SI Nan, et al. Real-time monitoring system of crop canopy temperature and soil moisture for irrigation decision-making [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 133–139. (in Chinese)
- 21 HOFFMANN H, JENSEN R, THOMSEN A, et al. Crop water stress maps for entire growing seasons from visible and thermal UAV imagery [J]. Biogeosciences, 2016, 13:6545–6563.
- 22 BALUJA J, DIAGO M P, BALDA P, et al. Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV) [J]. Irrigation Science, 2012, 30(6): 511–522.
- 23 RUD R, COHEN Y, ALCHANATIS V, et al. Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status [J]. Precision Agriculture, 2014, 15(3): 273–289.
- 24 EGEA G, PADILLA-DIAZ C M, MARTINEZ-GUANter J, et al. Assessing a crop water stress index derived from aerial thermal imaging and infrared thermometry in super-high density olive orchards [J]. Agricultural Water Management, 2017, 187:210–221.
- 25 HAN M, ZHANG H, DEJONGE K C, et al. Estimating maize water stress by standard deviation of canopy temperature in thermal imagery [J]. Agricultural Water Management, 2016, 177:400–409.
- 26 PARK S, RYU D, FUENTES S, et al. Adaptive estimation of crop water stress in nectarine and peach orchards using high-resolution imagery from an unmanned aerial vehicle (UAV) [J]. Remote Sensing, 2017, 9(8):828.
- 27 OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62–66.
- 28 HEATH M, SARKAR S, SANOCKI T, et al. Comparison of edge detectors: a methodology and initial study [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 69(1): 38–54.
- 29 吕哲, 王福利, 常玉清. 一种改进的 Canny 边缘检测算法 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(12): 1681–1684.
- LÜ Zhe, WANG Fuli, CHANG Yuqing. An improved Canny algorithm for edge detection [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2007, 28(12):1681–1684. (in Chinese)
- 30 CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI–8(6): 679–698.
- 31 MAINI R, AGGARWAL H. Study and comparison of various image edge detection techniques [J]. International Journal of Image Processing, 2009, 3(1): 1–11.
- 32 袁国富, 罗毅, 唐登银, 等. 冬小麦不同生育期最小冠层阻力的估算 [J]. 生态学报, 2002, 22(6): 930–934.
- YUAN Guofu, LUO Yi, TANG Dengyin, et al. Estimating minimum canopy resistances of winter wheat at different development stages [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(6): 930–934. (in Chinese)
- 33 MÖLLER M, ALCHANATIS V, COHEN Y, et al. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine [J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(4):827.
- 34 MERON M, SPRINTSIN M, TSIPRIS J, et al. Foliage temperature extraction from thermal imagery for crop water stress determination [J]. Precision Agriculture, 2013, 14(5): 467–477.
- 35 POBLETE T, ORTEGA-FARÍAS S, RYU D. Automatic coregistration algorithm to remove canopy shaded pixels in uav-borne thermal images to improve the estimation of crop water stress index of a drip-irrigated cabernet sauvignon vineyard [J]. Sensors, 2018, 18(2): 397.
- 36 蔡焕杰, 康绍忠. 棉花冠层温度的变化规律及其用于缺水诊断研究 [J]. 灌溉排水, 1997, 16(1): 1–5.
- CAI Huanjie, KANG Shaozhong. The changing pattern of cotton crop canopy temperature and its application in detecting crop water stress [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1997, 16(1):1–5. (in Chinese)