

# 基于热红外遥感影像的作物冠层温度提取

张宏鸣<sup>1,2</sup> 王佳佳<sup>1</sup> 韩文霆<sup>3</sup> 李书琴<sup>1,2</sup> 王红艳<sup>2,4</sup> 付振宇<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学信息工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 宁夏智慧农业产业技术协同创新中心, 银川 750004;

3. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 4. 西部电子商务股份有限公司, 银川 750004)

**摘要:** 热红外影像较难直接提取作物冠层区域,因而无法获得较精准的作物冠层温度。本文以拔节期的玉米为研究对象,利用六旋翼无人机搭载热红外成像仪和大疆精灵四 Pro 无人机,获得热红外影像及正射影像。基于高分辨率正射影像,采用改进的 Canny 边缘检测算子、支持向量机(Support vector machine,SVM)和小波变换3种方法提取玉米冠层区域,将提取结果进行二值化处理后,在热红外影像中以此生成掩膜并提取玉米冠层温度。应用提取的矢量面分析提取效果并对3种提取算法的精度进行评价。实验结果表明,改进的 Canny 边缘检测算子提取效果最优、SVM 算法次之、小波变换最差,提取精度分别为 87.3%、74.5%、68.2%。同时,将手持测温仪测得的玉米冠层温度与提取的冠层温度进行误差分析,结果表明,基于改进的 Canny 边缘检测算子提取的玉米冠层温度与地面实测值相关性最高,决定系数  $R^2 = 0.9295$ , SVM 算法决定系数  $R^2 = 0.8957$ , 小波变换决定系数  $R^2 = 0.8760$ 。改进的 Canny 边缘检测算子能够更好地提取玉米冠层区域,获取更加精确的玉米冠层温度,从而能够更有效地监测玉米生理状况,进行旱情预测,制定合理的灌溉、施肥措施以提高玉米产量。

**关键词:** 冠层温度; 热红外影像; 正射影像; 改进的 Canny; SVM; 小波变换

**中图分类号:** S157; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0203-08

## Crop Canopy Temperature Extraction Based on Thermal Infrared Remote Sensing Images

ZHANG Hongming<sup>1,2</sup> WANG Jiajia<sup>1</sup> HAN Wenting<sup>3</sup> LI Shuqin<sup>1,2</sup> WANG Hongyan<sup>2,4</sup> FU Zhenyu<sup>1</sup>

(1. College of Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Ningxia Smart Agricultural Industry Technology Collaborative Innovation Center, Yinchuan 750004, China

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. West Electronic Business Co., Ltd., Yinchuan 750004, China)

**Abstract:** For the low resolution of thermal infrared image, the crop canopy area can not be accurately extracted, and accurate canopy temperature can not be obtained. Maize in the jointing stage was taken as research object, and the thermal infrared image and orthophoto were obtained by using the UAV equipped with thermal infrared imager and the Dajiang Elf Pro UAV. Based on high-resolution orthophotos, the improved Canny edge detection operator, support vector machine (SVM) and wavelet transform were used to extract the maize canopy region, and the classification results were binarized in thermal infrared imaging. The maize canopy temperature was extracted by using the mask generated by the binarization result. The extracted vector surface analysis extraction effect was applied and the accuracy of the three extraction algorithms was evaluated. The experimental results showed that the effects of the three methods from strong to weak were as follows: improved Canny edge detection operator, SVM and wavelet transform; the extraction accuracy was 87.3%, 74.5% and 68.2%, respectively. At the same time, the error analysis of the maize canopy temperature measured by the hand-held thermometer and the extracted canopy temperature was performed. The experimental results showed that the correlation between the canopy temperature extracted by the three algorithms and the measured temperature of the ground from strong to weak was as follows: 0.9295, 0.8957 and 0.8760. The improved Canny edge detection

收稿日期: 2019-01-25 修回日期: 2019-02-20

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41771315、41371274)、国家重点研发计划项目(2017YFC0403200)、杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2018CXY-23)、宁夏自治区重点研发项目(2017BY067)和欧盟地平线 2020 研究与创新计划项目(GA:635750)

**作者简介:** 张宏鸣(1979—),男,教授,博士,主要从事空间大数据管理与区域土壤侵蚀评价研究,E-mail: zhm@nwsuaf.edu.cn

operator can better extract the maize canopy area and obtain more accurate maize canopy temperature, so as to more effectively monitor the physiological status of maize, predict drought, and formulate reasonable irrigation and fertilization measures to increase maize yield.

**Key words:** canopy temperature; thermal infrared image; orthophoto; improved Canny; support vector machine; wavelet transform

## 0 引言

作物冠层温度是大气-土壤-植被系统内物质和能量交换的结果。作物本身的遗传特性和其生长环境是影响作物冠层温度变化的主要原因<sup>[1-2]</sup>。而作物冠层温度通过影响叶片功能期、叶绿素含量、蒸腾、光合能力、蔗糖合成酶以及内部的抗衰老机制等来影响作物产量。因此,可利用作物冠层温度来监测作物是否受到干旱、病虫害等不利环境因素的影响,并判断作物的基因型状,进行合理的灌溉、施肥以提高作物产量<sup>[3]</sup>。

随着热成像仪越来越多地用于获取作物冠层温度<sup>[4-5]</sup>,国内外学者对此进行了深入探讨和研究<sup>[6-8]</sup>。目前,热成像仪以其精度较高、获取速度快、反应灵敏等特性成为作物温度获取的主流形式<sup>[9]</sup>。然而,冠层温度的获取多通过人工手持的方式,需要花费大量的时间和人员,且局限于小范围的应用,难以实现大范围内快速监测作物信息<sup>[10]</sup>。针对这一问题,许多研究应用遥感卫星获取热红外遥感图像。但获取的图像分辨率低,且遥感卫星费用昂贵,灵活性较差,不能应用于小范围田间尺度<sup>[11]</sup>。近几年,无人机以其分辨率高、周期短、灵活性高等特点,广泛应用于遥感图像获取。随着热红外图像获取量和维度的增加,且热红外图像自身分辨率较低,精确快速地从热红外图像中提取所需信息已成为当前研究的热点<sup>[12-14]</sup>。文献[15-18]虽然能够提取作物冠层区域,但精确度不高,导致提取的作物冠层温度精度低,难以满足精细研究的要求。

本文以拔节期的玉米为研究对象,利用无人机拍摄玉米热红外影像和正射影像,并将两者进行几何配准。采用改进的 Canny 边缘检测算子、支持向量机(Support vector machine, SVM)、小波变换等算法在高分辨率的正射影像上提取玉米冠层区域,将提取结果生成掩膜,以此在热红外影像中提取玉米冠层温度,并将其与地面实测值进行误差分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验区概况

研究区域位于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗昭君镇(40°26′0.29″N, 109°36′25.99″E, 海拔

1 010 m)。实验地种植作物为夏玉米,于 2018 年 5 月 20 日播种,行距 58 cm,株距 23 ~ 30 cm,采用中心轴式喷灌机进行灌溉,实验小区布置如图 1 所示。实验地划分为 5 个扇形区域,每个扇形区域划分有 3 个样方(长×宽为 6 m×6 m),在样方一条对角线上均匀画出 3 个数据采集区(长×宽为 2 m×2 m),并用蓝布标记测量植株。

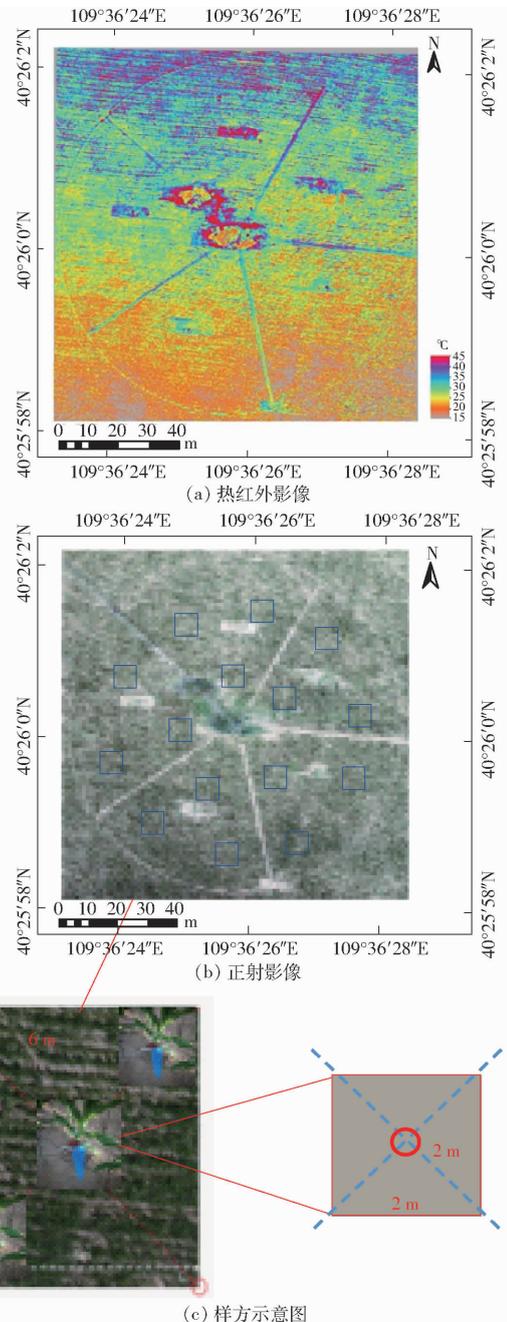


图 1 实验小区概况

Fig. 1 Overviews of experimental plot

### 1.2 地面数据和遥感数据获取

在玉米拔节期,分别于 2018 年 6 月 26 日和 7 月 4 日,天气晴朗,当地时间 12:00 进行地面数据的采集。利用 Raytek ST60 + 型手持测温仪(图 2a)(测温范围为  $-32 \sim 600^{\circ}\text{C}$ ,精度  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ),以图 2b 测量方式采集玉米冠层温度。为了避免非冠层物体的影响,面向南以与水平线  $15^{\circ}$  夹角扫射冠层(扫射范围为  $120^{\circ}$ )。为了得到更具代表性的冠层温度,选择标记植株前后左右各 1 m(长  $\times$  宽为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ )作为数据采集点,并以 3 次测量平均值作为玉米冠层温度。



图 2 玉米冠层温度测量示意图

Fig. 2 Schematics of maize canopy temperature measurement

遥感数据的采集包括热红外影像和正射影像的拍摄。在 6 月 26 日和 7 月 4 日,于当地时间 12:45 进行无人机数据采集。采用大疆 S1000 型六旋翼无人机(图 3a),无人机净质量 4.4 kg,有效载质量 6 kg,续航时间 15 min 左右。无人机搭载 FLIR Vue Pro 640R 型非制冷热像仪(图 2b)(质量 90 g,  $640 \text{ 像素} \times 512 \text{ 像素}$ ,测温范围  $-20 \sim 100^{\circ}\text{C}$ )拍摄热红外影像。飞行高度为 70 m,拍摄影像的重叠率为 85%,地面空间分辨率为 7.5 cm,同时采用大疆精灵四 Pro 无人机(图 2c)拍摄正射影像(约 2 020 万有效像素,最大分辨率为  $5 472 \text{ 像素} \times 3 648 \text{ 像素}$ ,质量 179 g),飞行高度为 50 m,拍摄的影像重叠率为 90%,地面空间分辨率为 1.25 cm。



图 3 无人机及相机

Fig. 3 UAV and camera

### 1.3 技术方法

提取玉米冠层温度技术流程如图 4 所示。正射

影像和热红外影像获取;正射影像和热红外影像拼接、几何校正和配准;热红外影像的辐射定标;正射影像中提取玉米冠层区域;热红外影像上提取玉米冠层温度;精度验证。

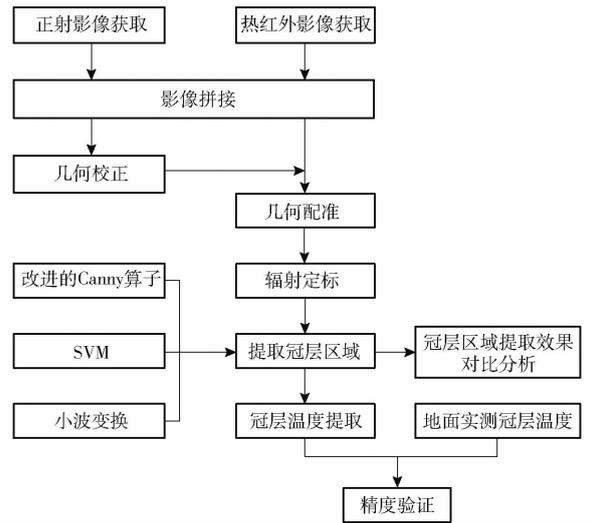


图 4 技术流程

Fig. 4 Flow chart of proposed method

#### 1.3.1 无人机影像拼接与校正

无人机共拍摄热红外影像 568 幅,正射影像 1 874 幅,采用 pix4d 进行拼接。采用 CGCS2000\_3\_Degree\_GK\_CM\_111E, D\_China\_2000 坐标系,根据地面 5 个像控点对影像进行几何校正。

#### 1.3.2 热红外影像辐射定标

由于存在系统误差和偶然误差,为评价热红外影像提取玉米冠层温度的效果,需进行飞行前、后的辐射定标。利用手持测温仪和热成像仪分别测得近地面(1 m 左右)15 种地物温度进行飞行前辐射定标,通过相关性分析,确定手持测温仪与热成像仪在不受距离影响下,所测温度具有一致性;利用几何校正和配准后的热红外影像和手持测温仪,测得地面放置的黑白辐射定标布、每个扇形实验区热传感器周围的玉米冠层、土壤和混合像元共 17 个温度,通过相关性分析确定辐射定标系数,得到热红外影像中提取的玉米冠层温度与实测温度的误差范围。

#### 1.3.3 作物冠层区域提取

正射影像中利用改进的 Canny 边缘检测算子、SVM、小波变换 3 种算法提取玉米冠层区域。再将提取结果进行二值化处理并生成矢量面文件,基于此矢量文件,生成玉米冠层区域掩膜并在热红外影像中提取玉米冠层温度。

##### 1.3.3.1 改进的 Canny 边缘检测算子

对传统的 Canny 边缘检测算子<sup>[19]</sup>进行如下改进<sup>[20-22]</sup>:

采用带有保留边缘功能的平滑方法,通过设定

阈值,让与中心像素灰度差值小于该阈值的像素参与计算,而与中心像素灰度差值相差过大的像素被认为带有有效信息,而非噪声,不参与平滑计算,从而保留有用的高频信号,边缘信号也在保留的范围。

以均值模糊为例,设置模糊阈值 30,保持传统 Canny 检测应用的高斯模糊高阈值 100,低阈值 50。应用高斯模糊时,较难识别弱边缘(图 5b,黄框),反而识别出较多伪边缘(图 5b,红框)。应用保留边

缘的选择性模糊时,能较好地识别出边缘(图 5c)。不同模糊领域的半径对 Canny 检测的结果影响不大,主要与选择模糊设定的阈值相关(图 5c,5d,5e)。

利用选择性中值模糊、表面模糊、均值模糊进行对比,效果如图 6 所示。选择性表面模糊,因为中心像素的权重大,在参数相同的情况下(半径为 5,阈值为 30),保留的边缘相对选择性均值模糊和中值模糊较多(图 6b,黄框、红框)。

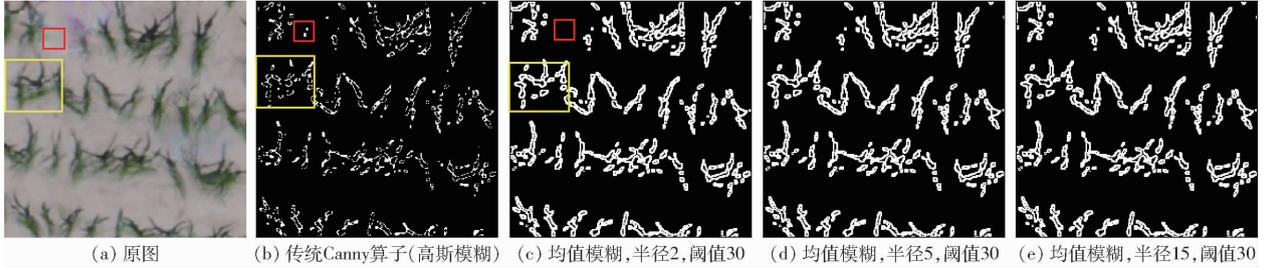


图 5 选择性均值模糊与高斯模糊效果对比

Fig. 5 Comparison of selective mean confusion and Gaussian blur effect

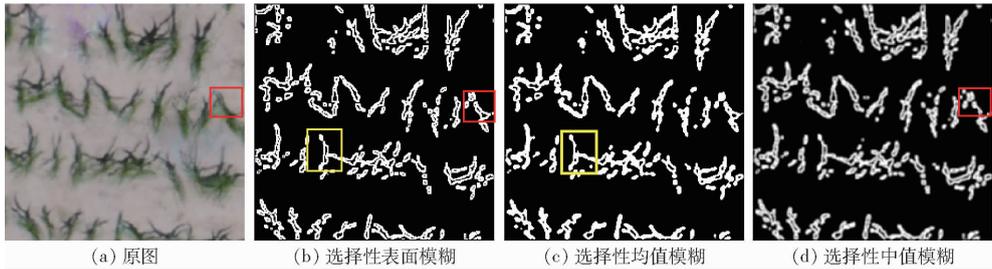


图 6 不同选择性模糊效果对比

Fig. 6 Comparison of different selective blur effects

本文选用  $3 \times 3$  的 Sobel 梯度算子。对于算法中梯度的计算,梯度算子可以有多种选择。以选择性表面模糊为例,保持模糊半径 5,阈值 30,分别采用一阶差分梯度、Robert 交叉等  $2 \times 2$  的算子和  $3 \times 3$  的 Sobel 算子来检测玉米边缘,效果对比如图 7 所示。由于一阶差分梯度算子和 Robert 算子都是  $2 \times$

2 的算子,它们计算的梯度在幅度上都小于 Sobel 算子,因此参照 Sobel 算子的幅度, $2 \times 2$  算子的  $x, y$  方向梯度都乘以相应的倍数(4 倍)来进行比较。一阶差分在边缘的连通性上最差,Robert 算子好一些, Sobel 算子效果最优,能够较好识别出弱边缘和孤立边缘信息。

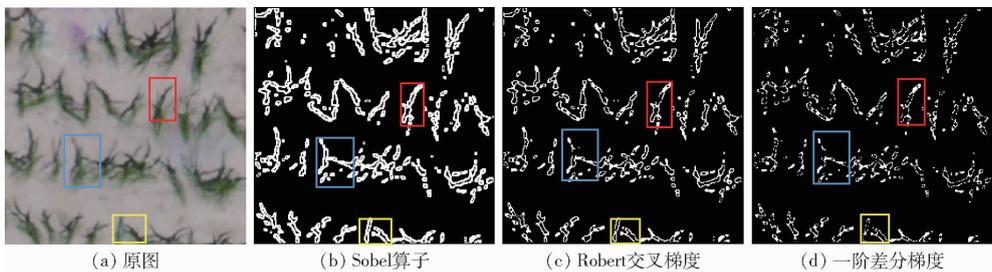


图 7 不同梯度算子效果对比

Fig. 7 Comparison of different gradient operators

本文以选择性表面模糊为例,保持模糊半径 5 不变,使用不同的阈值,识别效果如图 8 所示。阈值越大,参与模糊计算的领域像素越多,弱边缘和孤立边缘越不易识别,导致保留的边缘信息减少,作物的真实边缘信息较难识别出。

斯模糊,设置其阈值为 30,选用  $3 \times 3$  的 Sobel 算子作为梯度算子。改进的 Canny 边缘检测算子与传统的 Canny 算子效果对比如图 9 所示。由图 9 可知,传统的边缘检测算子识别的边缘连通性差,难以识别弱边缘和孤立边缘,导致漏掉许多真边缘(图 9,蓝框、红框);传统的边缘检测算子会识别出一些伪

通过上述实验,选用可选择性表面模糊代替高

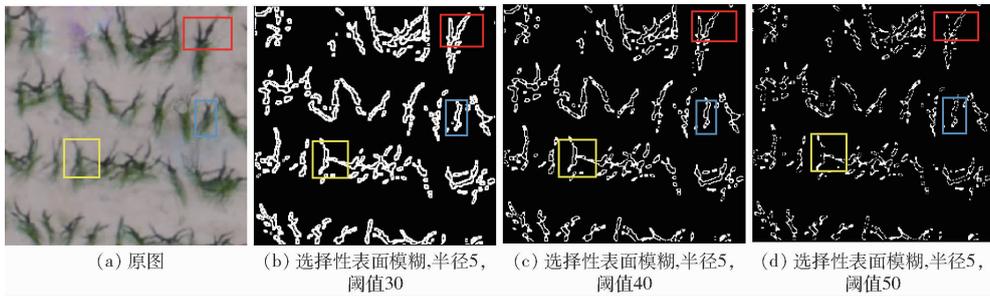


图 8 不同阈值门限效果对比

Fig. 8 Comparison of different threshold value effects

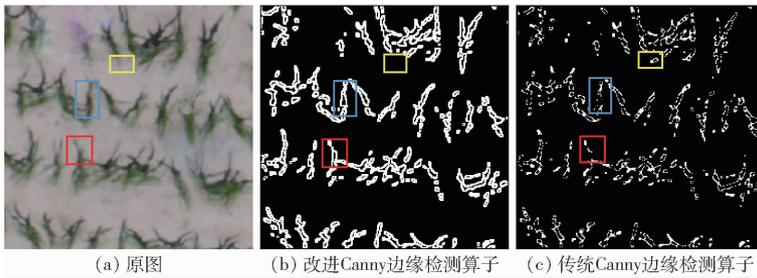


图 9 改进的 Canny 边缘检测算子与传统边缘检测算子效果对比

Fig. 9 Comparison of improved Canny edge detection and traditional edge detection

边缘(图 9,黄框)。而经过改进的 Canny 边缘检测算子能够更好地联通边缘信息,对于孤立边缘和弱边缘具有较好的辨识效果,能够更准确地识别作物的边缘信息。

### 1.3.3.2 SVM 图像分割

SVM 是二分类模型,是特征空间上最大的线性分类器,学习策略是间隔最大化,最终可转换为对一个凸二次规划问题的解决<sup>[23-26]</sup>。本实验读取经过校正、配准后的正射影像,利用 Surf 算法提取土壤和玉米的颜色、波段反射率以及纹理等特征,基于 Sigmoid 核函数,采用遗传算法(Genetic algorithms, GA)寻找最优参数(惩罚系数  $c$  与核函数半径  $g$ ),提取玉米冠层区域,流程如图 10 所示。



图 10 SVM 分割流程

Fig. 10 Flow chart of SVM split

### 1.3.3.3 小波变换图像分割

基于小波变换的阈值图像分割方法的基本思想是首先由二进小波变换将图像的直方图分解为不同层次的小波系数,然后依据给定的分割准则和小波系数选择阈值门限,最后利用阈值标出图像分割的区域<sup>[27-28]</sup>。本文采用 Haar 小波,Haar 函数是正交小波函数,是支撑域在范围内的单个矩形波<sup>[29-31]</sup>。

### 1.3.4 结果验证

(1)冠层区域提取结果分析及精度评价:以

7月4日样方 1-3-3 影像为例,用提取得到的矢量面对 3 种算法提取效果进行对比分析。用精确度 ( $S$ )对 3 种算法的准确性进行评价,越大表示提取算法精确度越高。在 WIEDEMANN 等<sup>[32]</sup>提出的方法基础上改进得到评估方法,计算公式如下

$$S = \frac{T_p}{T_p + F_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $S$ ——提取算法的精确度

$T_p$ ——预测为玉米的玉米样本

$F_p$ ——预测为玉米的非玉米样本

(2)冠层温度提取及辐射校正精度评价:采用均方根误差(Root mean square error, RMSE)进行辐射校正以及提取的冠层温度与实测温度的误差评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 热红外影像辐射校正分析

飞行前的辐射定标结果如图 11a 所示,手持测温仪与热红外成像仪在近地面(1 m 左右)所测得物体的温度具有很高的 consistency( $R^2 = 0.9864$ ),在不受距离影响下,可以用手持测温仪对热红外成像仪测得的温度进行校正,提高提取冠层温度的准确性。

飞行后的辐射定标结果如图 11b 所示。图像的拟合曲线斜率大于 1,热红外成像仪测取的温度低于手持测温仪测得的温度。在近距离情况下,两者测得的温度具有十分高的一致性,但距离影响结果的精度,飞行高度越高,温度衰减越明显,导致热红外影像的温度准确性越低。

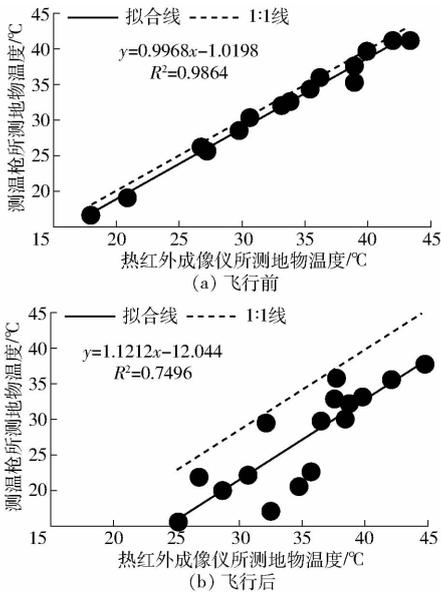


图 11 辐射定标

Fig. 11 Radiation calibration

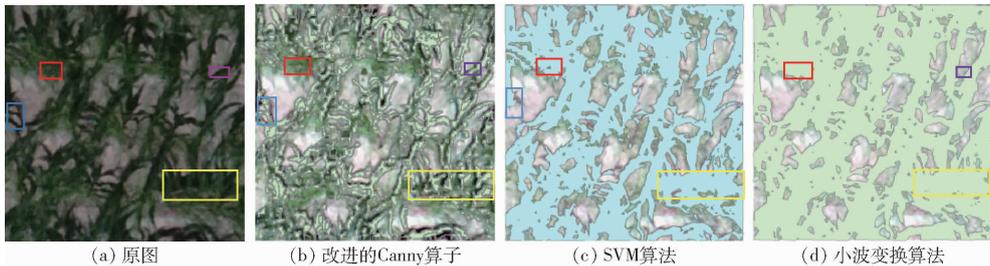


图 12 3种方法分割效果矢量面对比

Fig. 12 Comparison of segmentation effect vector face of three methods

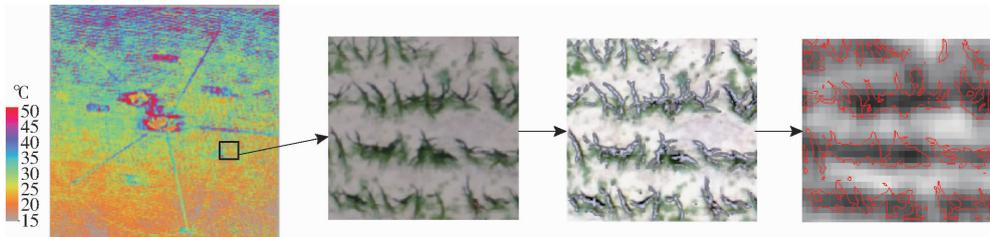


图 13 改进的 Canny 边缘检测算子提取冠层区域示意图

Fig. 13 Schematic of improved Canny extraction canopy area

边缘检测算子效果最优,平均精确度分别为 68.2%、74.5%、87.3%。

### 2.3 冠层温度提取结果分析与评价

为了验证从热红外影像中提取的玉米冠层温度的精确度,将提取的 90 个样本点的温度剔除无效值后与实测玉米冠层温度进行误差分析。剔除标准是提取温度的误差超过限差(2 倍的标准差)。应用改进的 Canny 边缘检测算子时,剔除 10 个无效值;应用 SVM 算法时,剔除 15 个无效值;应用小波变换时,剔除 19 个无效值。结果如图 14 所示。

从图 14 可以看到,基于改进的 Canny 边缘检测算子提取的玉米冠层温度与地面实测的相关性最高 ( $R^2 = 0.9295$ ),其次是 SVM 算法 ( $R^2 = 0.8957$ ),

### 2.2 冠层区域提取结果分析及评价

(1)提取矢量面结果对比分析:玉米枝叶交叉出现阴影部分,地面也存在杂草(图 12a)。SVM 和小波变换将部分杂草划分为玉米区域(图 12,红框),且将部分阴影也划分为玉米区域(图 12,黄框);SVM 和小波变换不易识别出弱边缘和孤立边缘玉米区域(图 12,蓝框、紫框)。而改进的 Canny 边缘检测算子能够较好地分割出杂草、阴影等非玉米区域,且对边缘玉米区域能够较好地识别(图 12b)。改进的 Canny 边缘检测算子提取结果如图 13 所示。

(2)提取算法精度评价:对 90 幅正射影像直方图进行分析,选择合适的阈值区分玉米和非玉米区域(阴影、土壤、杂草等),通过提取算法精确度( $S$ )对 3 种方法进行对比。通过小波变换算法提取玉米区域的精确度最低,SVM 算法次之,改进的 Canny

效果最差的为小波变换 ( $R^2 = 0.8760$ )。改进的 Canny 边缘检测算子能够较好地提取出玉米冠层区域,并获得更加精确的玉米冠层温度。

### 3 讨论

影像中提取的玉米冠层温度与地面实测值存在误差,产生这些误差的原因主要有:

(1)天气影响。由于热红外影像与正射影像获取时间不一致,天气(风、阳光等)会导致玉米性状发生改变。所以正射影像与热红外影像中的部分玉米冠层区域的形状有偏差,导致生成的掩膜不能精确地覆盖于热红外影像上。因此,需选择在晴朗无风的天气来拍摄遥感影像,并且尽可能缩短两个影

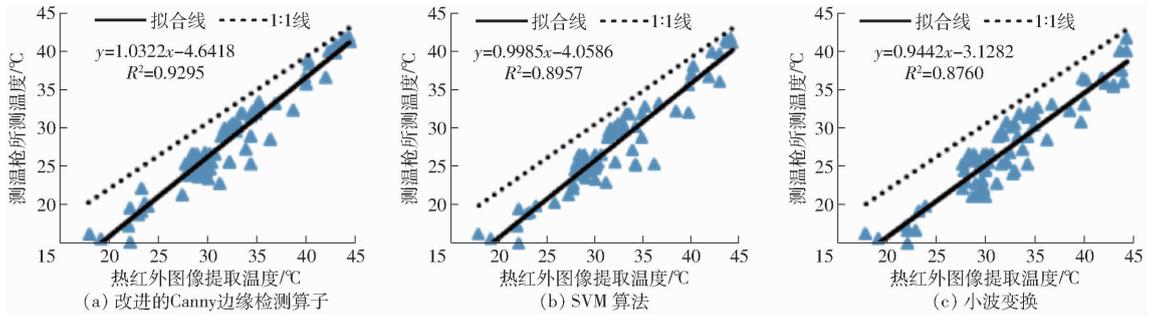


图 14 热红外提取温度与对应地面实测温度一致性分析

Fig. 14 Analysis of consistency between hot infrared extraction temperature and corresponding ground measured temperature

像获取的时间间隔。

(2) 高度影响。热红外自身的分辨率较低,而飞行高度越高,拍摄的热红外影像分辨率越低,影像越模糊,越难从混合像元中提取玉米冠层温度。因此在利用无人机拍摄热红外影像时,尽可能根据续航时间降低飞行高度。

(3) 仪器自身误差。由于仪器存在系统误差。因此,在飞行前需对仪器进行检查、校正和预热,进行飞行前后的辐射定标,尽可能减少系统误差的影响。

## 4 结束语

利用经过几何校正、配准后的正射影像和热红外影像,基于改进的 Canny 边缘检测算子、SVM、小波变换等方法在正射影像中提取玉米冠层区域,得到矢量文件并生成掩膜,以此在热红外影像中提取玉米冠层温度。结果表明,改进的 Canny 边缘检测算子能够更加精确地提取玉米冠层区域,得到更准确的玉米冠层温度,解决了热红外图像分辨率难以获取目标像元的问题。

## 参考文献

- [1] 张智韬,边江,韩文霆,等. 无人机热红外图像计算冠层温度特征数诊断棉花水分胁迫[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15):77-84.  
ZHANG Zhitao, BIAN Jiang, HAN Wenting, et al. Cotton moisture stress diagnosis based on canopy temperature characteristics calculated from UAV thermal infrared image[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(15):77-84. (in Chinese)
- [2] WEBBER H, WHITE J W, KIMBALL B A, et al. Physical robustness of canopy temperature models for crop heat stress simulation across environments and production conditions[J]. Field Crops Research, 2018, 216:75-88.
- [3] 史长丽,郭家选,梅旭荣,等. 夏玉米农田表面温度影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 48-56.  
SHI Changli, GUO Jiakuan, MEI Xurong. Analysis of the factors influencing surface temperature in summer maize field[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(1): 48-56. (in Chinese)
- [4] SADLER E J, CAMP C R, EVANS D E, et al. Maize canopy temperatures measured with a moving infrared thermometer array[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(3): 581-591.
- [5] 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: 22-32.
- [6] TANNER C B. Plant temperatures I[J]. Agronomy Journal, 1963, 55(2): 210-211.
- [7] MAHAN J R, BURKE J J, WANJURA D F, et al. Determination of temperature and time thresholds for BIOTIC irrigation of peanut on the Southern High Plains of Texas[J]. Irrigation Science, 2005, 23(4): 145-152.
- [8] HAM J M, HEILMAN J L, LASCANO R J. Determination of soil water evaporation and transpiration from energy balance and stem flow measurements[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1990, 52(3):287-301.
- [9] KUENZER C, DECH S K. Thermal infrared remote sensing: sensors, methods, applications[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2013, 81(5):359-360.
- [10] DEERY D M, REBETZKE G J, JIMENZE-BERNI J A, et al. Methodology for high-throughput field phenotyping of canopy temperature using airborne thermography[J]. Frontiers in Plant Science, 2016(7):1801-1814.
- [11] 侯英雨,孙林,何延波,等. 利用 EOS-MODIS 数据提取作物冠层温度研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 8-12.  
HOU Yingyu, SUN Lin, HE Yanbo, et al. Extraction of crop canopy temperature using EOS-MODIS data[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 8-12. (in Chinese)
- [12] 杨贵军,李长春,于海洋,等. 农用无人机多传感器遥感辅助小麦育种信息获取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 184-190.  
YANG Guijun, LI Changchun, YU Haiyang, et al. Multi-sensor remote sensing assisted wheat breeding information acquisition for agricultural drones[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 184-190. (in Chinese)

- [13] KATO A, OBANAWA H, HAYAKAWA Y, et al. Fusion between UAV - SFM and terrestrial laser scanner for field validation of satellite remote sensing [C] // 2015 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2015: 2642 - 2645.
- [14] MATESE A, TOSCANO P, GENNARO S F D, et al. Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision agriculture [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(3): 2971 - 2990.
- [15] POBLETE T, ORTEGAFARÍAS 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 - 414.
- [16] ORTEGA-FARÍAS S, ORTEGA-SALAZAR S, POBLETE T, et al. Estimation of energy balance components over a drip-irrigated olive orchard using thermal and multispectral cameras placed on a helicopter-based unmanned aerial vehicle (UAV) [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(8): 638 - 656.
- [17] CRAWFORD K E. Remote sensing of almond and walnut tree canopy temperatures using an inexpensive infrared sensor on a small unmanned aerial vehicle [J]. *Dissertations & Theses-Gradworks*, 2014, 54(3): 250 - 274.
- [18] LUDOVISI R, TAURO F, SALVATI R, et al. UAV-based thermal imaging for high-throughput field phenotyping of black poplar response to drought [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017(8): 1681 - 1699.
- [19] CANNY J. Collision detection for moving polyhedra [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1986, 8(2): 200 - 209.
- [20] 张问银, 金宁德. 基于改进 Canny 算子的气液两相泡状流图像分割算法 [J]. *计算机工程与科学*, 2009, 31(8): 137 - 139.  
ZHANG Wenyin, JIN Ningde. Image segmentation algorithm for gas-liquid two-phase bubble flow based on improved Canny operator [J]. *Computer Engineering and Science*, 2009, 31(8): 137 - 139. (in Chinese)
- [21] 凌凤彩, 康牧, 林晓. 改进的 Canny 边缘检测算法 [J]. *计算机科学*, 2016, 43(8): 309 - 312.  
LING Fengcai, KANG Mu, LIN Xiao. Improved Canny edge detection algorithm [J]. *Computer Science*, 2016, 43(8): 309 - 312. (in Chinese)
- [22] BISWAS R, SIL J. An improved Canny edge detection algorithm based on type - 2 fuzzy sets [J]. *Procedia Technology*, 2012, 4(11): 820 - 824.
- [23] PARK S, LEE H, KIM J. Seed growing for interactive image segmentation using SVM classification with geodesic distance [J]. *Electronics Letters*, 2016, 53(1): 22 - 24.
- [24] 张睿, 马建文. 改进的 P - SVM 支持向量机与遥感数据分类 [J]. *遥感学报*, 2009, 13(3): 437 - 452.  
ZHANG Rui, MA Jianwen. Improved P - SVM support vector machine and classification of remote sensing data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(3): 437 - 452. (in Chinese)
- [25] XIE X, WANG T. A projection twin SVM-based active contour model for image segmentation [C] // 2016 23rd International Conference on Mechatronics & Machine Vision in Practice, 2017: 1 - 4.
- [26] 邓晓飞, 徐蔚鸿. 一种结合多特征的 SVM 图像分割方法 [J]. *计算机工程与科学*, 2013, 35(2): 154 - 158.  
DENG Xiaofei, XU Weihong. A SVM image segmentation method combining multiple features [J]. *Computer Engineering and Science*, 2013, 35(2): 154 - 158. (in Chinese)
- [27] 丁永军, 张晶晶, SUK L W, 等. 小波变换与分水岭算法融合的番茄冠层叶片图像分割 [J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 32 - 37.  
DING Yongjun, ZHANG Jingjing, SUK L W, et al. Image segmentation of tomato canopy blades based on wavelet transform and watershed algorithm [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 32 - 37. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170904&flag=1](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170904&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.004. (in Chinese)
- [28] DA L, NIU D, HUI W, et al. Short-term wind speed forecasting using wavelet transform and support vector machines optimized by genetic algorithm [J]. *Renewable Energy*, 2014, 62(3): 592 - 597.
- [29] 刘洲峰, 徐庆伟, 李春雷. 基于小波变换的图像分割研究 [J]. *计算机应用与软件*, 2009, 26(4): 62 - 64.  
LIU Zhoufeng, XU Qingwei, LI Chunlei. Research on image segmentation based on wavelet transform [J]. *Journal of Computer Applications and Software*, 2009, 26(4): 62 - 64. (in Chinese)
- [30] SENTHILKANI A S, ANANTH C, CHAKKA R M, et al. Overlap wavelet transform for image segmentation [C] // Proceedings of the International Journal of Electronics Communication & Computer Technology, 2017.
- [31] THAKUR R, YADAV A. Hybrid segmentation approach and preprocessing of color image based on Haar wavelet transform [J]. *International Journal of Computer Applications*, 2012, 46(16): 1 - 5.
- [32] WIEDEMANN C, HEIPKE C, MAYER H. Empirical evaluation of automatically extracted road axes [J]. *Empirical Evaluation Techniques in Computer Vision*, 1998, 47(3): 172 - 187.