

与热红外图像相比, 相对应的 RGB 图像中核桃树冠层部分与土壤部分颜色区分更加明显, 图 9 为 RGB 图像直接分割结果。由图 9 可知, 分割 RGB 图像效果要优于直接分割热红外图像, 且 K-means 算法与 Otsus 算法分割结果最佳, 说明这 2 种算法在分割

具有突出特征的图像时具有良好的分割效果。但是从对核桃冠层 RGB 图像分割情况来看, 仍然会有部分土壤像元与冠层像元交叉在一起, 影响后续获取冠层温度的精度。

(a) RGB 图像 (b) K-means (c) Otsu (d) EXG (e) Canny

图 9 RGB 图像直接分割效果

Fig.9 RGB image direct segmentation effect

综上所述 K-means 算法无论是分割冠层区域明显的热红外图像, 还是对 RGB 图像直接分割都表现出良好的分割性能, 但是单一地针对可见光或者热红外图像利用 K-means 算法并不能获得想要的结果。可见增强图像中前景与后景之间的颜色差异程度会有利于图像的分割。

针对传统K-means算法的不足之处, 本试验利用 HSV颜色空间可以突出某一颜色特征的特点, 将图 10 (a) RGB图像转化为图10 (c) HSV图像并分离图 10 (d) H通道图像, 利用K-means算法分割获得图10 (e) 掩膜图像, 利用掩膜图像对热红外图像进行冠层特征区域提取, 利用提取图像计算核桃树冠层温度值。

(a) 原始热红外图像 (b) 原始RGB图像 (c) HSV颜色空间图像 (d) H通道图像 (e) H通道掩膜图像 (f) 分割后冠层图像

图 10 改进 K-means 算法分割结果

Fig.10 The segmentation results of K-means algorithm are improved

由表2可知, 本文改进K-means算法分割核桃树冠层热红外图像的分割准确率和平均分割时间分别为 94.55%和6.32 s, 与传统K-means算法相比, 分割精度提高, 分割时间减少。与传统方法随机选择聚类初始点不同, 本文改进算法确定了初始聚类中心点的位置与数量, 达到准确快速分割的效果。

由图11可知, 原始热红外图像背景像素占据绝大多数区域, 且温度差异较小的核桃冠层与土壤区域之间像素混杂, 不能被清晰的分辨。上述问题使得原始

热红外图像不能被直接分割处理, 且对温度获取影响较为严重。经上述方法提取后的热红外冠层, 土壤及其背景已被有效剔除, 充分保留了核桃树冠层图像。

表 2 2 种算法分割结果比较

Tab.2 Comparison of the segmentation results of the two algorithms

分割方法	分割准确率/%	平均分割时间/s
传统K-means算法	82.34	18.63
改进K-means算法	94.55	6.32

(a) 原始热红外图像三维图 (b) 分割后热红外图像三维图

图 11 热红外图像分割前后三维图

Fig.11 Thermal infrared image segmentation before and after three-dimensional map

2.2 核桃树冠层温度及变化特征

由图12 (a) 可知，在观测时间段中， T_c 与 T_{ci} 较为接近，二者误差值为[0, 1]，说明本文所提出的冠层温度具有良好的准确性。由图12 (b) 可知，核桃树冠层温度在一天之中呈单峰变化趋势，从清晨逐渐增大直到14:00左右开始减缓，于16:00前后冠层温度升至最大值并保持相对稳定，并在19:00前后开始下降。

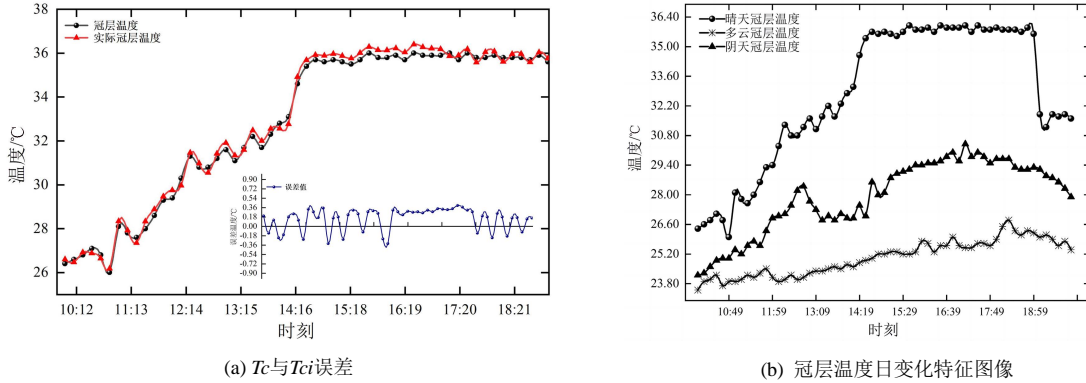


图 12 冠层温度值与冠层温度日变化特征

Fig.12 Canopy temperature values and characteristics of daily changes in canopy temperature

2.3 不同土层土壤含水率

2023年7月中上旬为园区核桃树灌溉时期，充分灌溉前测定35、45、55、65、75 cm土层土壤含水率，并观察各处不同土层土壤含水率在充分灌溉后一周内的变化情况，详见图13，灌溉前距树35 cm处35、45、55、65、75 cm土层土壤含水率均值分别为10.38%、12.50%、13.71%、16.54%、17.34%；距树55 cm处35、45、55、65、75 cm土层土壤含水率均值分别为7.82%、19.22%、19.59%、19.80%、21.34%；距树75 cm处35、45、55、65、75 cm土层土壤含水率均值分别为8.66%、9.45%、13.32%、15.53%、18.21%；距

对比晴天、多云、阴天3组不同天气状况下的核桃树冠层温度日变化特征可知，上述结论适用于不同天气下的核桃林冠层温度变化，且3组天气状况下的最高冠层温度 T_c 表现为晴天>多云>阴天。故新疆核桃树冠层温度日变化特征符合当地天气温度变化情况，与内地最高温度在14:00前后不同，新疆核桃树冠层温度在16:00前后达到最大值，最佳观测时间为14:00—16:00。

树95 cm处35、45、55、65、75 cm土层土壤含水率均值分别为2.92%、4.48%、7.49%、11.78%、12.37%，故土壤含水率随土层深度增加呈增加趋势且变化较为均匀。距树35、95 cm处各土层土壤含水率整体变化较为平缓；距树55、75 cm处各土层土壤含水率整体呈下降趋势，浅层土壤含水率变化较为平稳，45 cm土层以下土壤含水率下降速率随土层深度增加逐渐降低。与距树75 cm处相比，距树55 cm处40~60 cm土层土壤含水率下降率最大为97%。故水平方向50~60 cm、垂直方向40~60 cm处为核桃树主要的吸水区间，其土壤含水率更能反映土壤干旱程度。

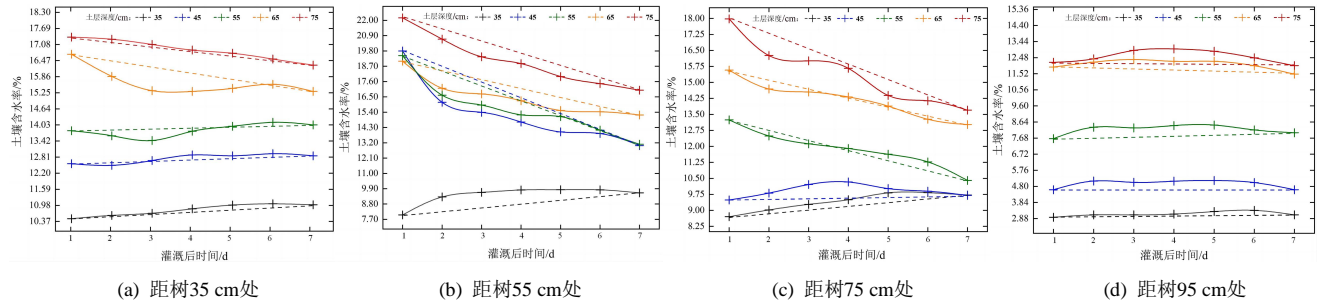


图 13 不同土层土壤含水率

Fig.13 Soil water content in different soil layers

2.4 水分预测模型建立

利用搭建的自动气象观测系统获取园区中影响冠层温度以及土壤含水率的相关因素，包括 T_a 、 RH 、 V 、 lux 、 CD ，并将冠层温度 T_c 作为输入变量。剔除采集数据集中有与土壤含水率不相关或者相关性极小的因素，提高预测精度。采用多元线性回归法对上述变量进行综合评价，筛选出显著性变量作为预测模

型的输入因素，结果见表 3。

由表 3 可知， T_c 、 T_a 、 RH 、 CD 与 SWC 显著线性相关。将不显著变量剔除之后再次分析，结果证明将 T_c 、 T_a 、 RH 、 CD 作为预测模型的输入变量更能保证结果的精确性，建立的回归方程如下：

$$SWC=11.686-0.107T_c+0.208T_a+0.049RH-0.014CD \quad (R^2=0.86, p<0.01). \quad (5)$$

表 3 输入变量相关性评价

Tab.3 Input variable relevance evaluation

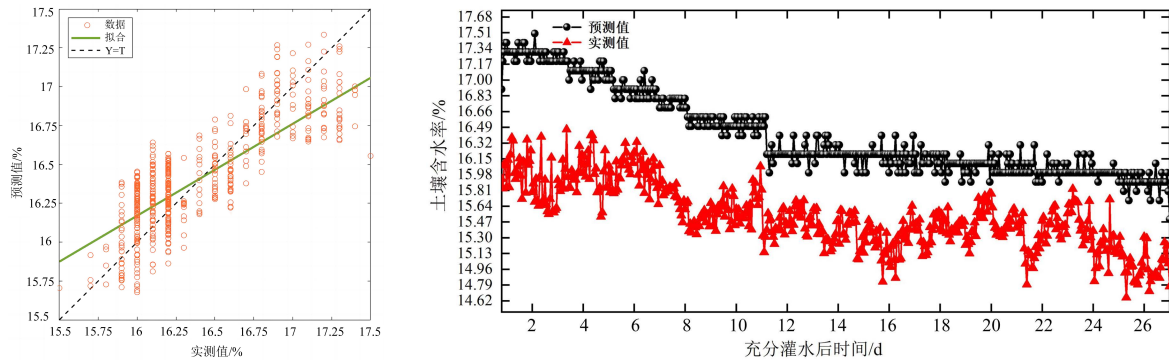
指标	模型常量	T_c	T_a	RH	lux	V	CD
系数	11.686	-0.107**	0.208**	0.049**	2.015×10^{-5}	0.028	-0.014**

注 **表示在 $p < 0.01$ 水平极显著相关。

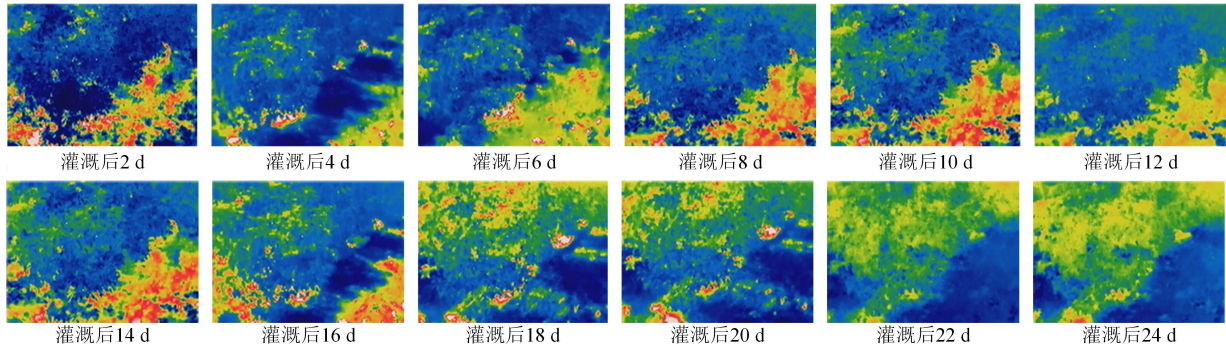
为验证土壤水分预测模型的可靠性,本研究采用 2023 年 8 月份晴朗天气条件下 14:00—16:00 的 SWC 和 T_c 、 T_a 、 RH 、 CD 数据进行验证,详见图 14 (a)。由图 14 (a) 可知, SWC 的预测值与实测值吻合效果较好, R^2 为 0.76, $p < 0.001$ 。

图 14 (c) 为试验园区核桃树充分灌溉后 24 d 内核桃树冠层在午间的热红外图像变化情况,图 14 (b) 为充分灌水后利用水分预测模型获取的土壤含水率与利用传统土壤墒情传感器采集的土壤含水率。在灌溉后 2~8 d 内核桃树冠层颜色较深,呈现蓝色低温状态,说明此时叶片具有充足的水分,间接说明土壤含水率较为充足;随着时间的推移,在灌溉后 10~16 d

内,土壤含水率逐渐减少,热红外图像中冠层部分区域颜色逐渐向浅色变化,说明此时冠层部分区域温度上升。在试验阶段后期土壤含水率变化较为平稳,但相比前期土壤含水率仍呈下降趋势,与灌溉前期冠层低温蓝色相比,后期冠层区域整体表现为浅黄与浅绿色,部分边缘区域呈现高温红色状态,由此可知,冠层热红外图像可以较好地反映园区核桃树土壤含水率的变化状态。与传统土壤含水率测量方式相比,利用冠层温度及其他相关环境变量间接预测的土壤含水率数据整体变化趋势相同,预测的数据更为稳定,整体变化趋势没有较大的波动。

(a) 预测模型 SWC 预测值与实测值的比较

(b) 预测结果与传感器检测结果比较



(c) 充分灌溉后核桃树冠层热红外图像变化情况

图 14 模型预测结果验证

Fig.14 Validation of model prediction results

3 讨论

研究表明,通过将 RGB 图像转化为 HSV 颜色空间更有利于核桃冠层的分割。这是由于 HSV 颜色空间能够非常直观地表达颜色的色调、鲜艳程度和明暗程度,方便进行对比^[29-30]。在 HSV 颜色空间下,比 RGR 更容易跟踪某种颜色的物体,易于分割指定颜色的物体。本文利用改进 K -means 算法得到冠层温度与实际冠层温度的误差在 $0 \sim 1$ $^{\circ}C$, 效果较好。其次冠层温度作为指示土壤水分状态的潜在指标,易受外界因素的

影响。本研究表明,新疆当地核桃树冠层温度在晴天、阴天及多云情况下,都呈单峰增长趋势,这与孙圣等^[20] 研究结果一致。但是与其在 14:00 左右观察结果不同,受新疆当地气候影响,冠层温度在 14:00—16:00 达到最高并逐渐稳定,在 19:00 左右开始降低。因此可以看出冠层温度在农作物上的应用,地域、气候差异都会造成结果差异。将热红外图像拍摄时间定于晴朗天气 14:00—16:00,正是由于该时间段内在新疆地区太阳处于核桃树正上方,可以减少因斜射且产生树荫,

消除大部分干扰因素,且冠层温度达到最高。此外考虑到不同土层深度的土壤含水率存在一定差异,通过挖掘土层,推断出核桃根系密集分布区域,这与Wu等^[31]研究得出核桃根系大部分位于0~60 cm土层中结果一致。本研究发现,在水平方向55 cm,垂直方向40~60 cm土层土壤含水率下降最多为97%。而Patel等^[32]认为冠层气温差取决于土壤水分情况,而30~60 cm土层土壤含水率与其存在较高的相关性。因此利用40~60 cm土层土壤含水率构建土壤水分预测模型更能反映土壤水分状况。经过实际验证,土壤预测模型具有较好的预测结果,该模型可有效诊断核桃园水分状况,为园区水资源的合理配置提供了重要的指导。

该模型虽然具有较小的标准误差,但是仍存在一些问题:①本文对根系分布研究以挖掘观察为主,最佳吸水区间的选取缺乏其他方法对照验证,可以利用土壤水分测定法以及地下水位检测等方式相互印证,结果会更加准确。②本文研究中缺少变量对模型影响的分析,且仅研究了土壤水分与环境因子的关系,对其他相关的影响因子如:蒸散量、田间持水率、植被指数、土壤性质等对土壤水分的影响需进一步分析。

4 结论

1) 改进的 H-Kmeans 分割算法能够有效地去除土壤背景的干扰,提高了分割速度与分割精度。并利用40~60 cm 土层土壤含水率进行模型构建。

2) 建立以土壤含水率为因变量,冠层温度、空气温度、空气湿度与二氧化碳摩尔分数为自变量的土壤水分预测模型,具有较好的拟合精度和预测的可靠性。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 胡劲红,何迅,谢军,等.我国农业用水与粮食安全[J].湖北农业科学,2013,52(21):5174-5177.
HU Jinhong, HE Xun, XIE Jun, et al. Water use in agriculture and food security of China[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(21): 5174-5177.
- [2] 陈仲新,任建强,唐华俊,等.农业遥感研究应用进展与展望[J].遥感学报,2016,20(5):748-767.
CHEN Zhongxin, REN Jianqiang, TANG Huajun, et al. Progress and perspectives on agricultural remote sensing research and applications in China[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 748-767.
- [3] HUANG Jialiang, WANG Shuang, GUO Yuhong, et al. Hysteresis between winter wheat canopy temperature and atmospheric temperature and its driving factors[J]. Plant and Soil, 2022: s11104-022-05509-y.
- [4] TANNER C B. Plant temperatures[J]. Agronomy Journal, 1963, 55(2): 210-211.
- [5] 张文忠,韩亚东,杜宏绢,等.水稻开花期冠层温度与土壤水分及产量结构的关系[J].中国水稻科学,2007,21(1):99-102.
ZHANG Wenzhong, HAN Yadong, DU Hongjuan, et al. Relationship between canopy temperature and soil water content, yield components at flowering stage in rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007,

- 21(1): 99-102.
- [6] GIMÉNEZ-GALLEGO J, GONZÁLEZ-TERUEL J D, BLAYA-ROS P J, et al. Automatic crop canopy temperature measurement using a low-cost image-based thermal sensor: Application in a pomegranate orchard under a permanent shade net house[J]. Sensors, 2023, 23(6): 2915.
- [7] DUTTA K, TALUKDAR D, BORA S S. Segmentation of unhealthy leaves in cruciferous crops for early disease detection using vegetative indices and Otsu thresholding of aerial images[J]. Measurement, 2022, 189: 110478.
- [8] SOETEDJO A, HENDRIARIANTI E. A comparative study of *Vetiveria zizanioides* leaf segmentation techniques using visible, infrared, and thermal camera sensors in an outdoor environment[J]. Applied System Innovation, 2022, 6(1): 1.
- [9] 陈韵宇,王鑫,杨万能,等.干旱处理条件下水稻冠层温度的变化规律探究[J].上海农业学报,2022,38(4):114-121.
CHEN Yunyu, WANG Xin, YANG Wanneng, et al. Study on the variation law of rice canopy temperature under drought treatment[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2022, 38(4): 114-121.
- [10] WEN Dongmei, REN Aixin, JI Tao, et al. Segmentation of thermal infrared images of cucumber leaves using K-means clustering for estimating leaf wetness duration[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(3): 161-167.
- [11] 杨帅,陈俊英,周永财,等.无人机热红外遥感反演玉米根域土壤含水率方法研究[J].节水灌溉,2021(3):12-18.
YANG Shuai, CHEN Junying, ZHOU Yongcai, et al. A study on the method of UAV thermal infrared remote sensing to retrieve soil moisture content in corn root zone[J]. Water Saving Irrigation, 2021(3): 12-18.
- [12] ZHAO Wenyi, DONG Xiaohua, WU Zhengping, et al. Using infrared thermal imaging technology to estimate the transpiration rate of citrus trees and evaluate plant water status[J]. Journal of Hydrology, 2022, 615: 128671.
- [13] SHARMA N, BANERJEE B P, HAYDEN M, et al. An open-source package for thermal and multispectral image analysis for plants in glasshouse[J]. Plants, 2023, 12(2): 317.
- [14] 张智韬,于广多,吴天奎,等.基于无人机遥感影像的玉米冠层温度提取及作物水分胁迫监测[J].农业工程学报,2021,37(23):82-89.
ZHANG Zhitao, YU Guangduo, WU Tiankui, et al. Temperature extraction of maize canopy and crop water stress monitoring based on UAV remote sensing images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(23): 82-89.
- [15] 何婷婷,黄媛,高海荣,等.基于热红外与可见光图像融合的生菜水分胁迫指数模型研究[J].节水灌溉,2023(3):116-122.
HE Tingting, HUANG Yuan, GAO Hairong, et al. Study on water stress index model of lettuce based on fusion of thermal infrared and visible light images[J]. Water Saving Irrigation, 2023(3): 116-122.
- [16] LIU Meng, GUAN Haiou, MA Xiaodan, et al. Recognition method of thermal infrared images of plant canopies based on the characteristic registration of heterogeneous images[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177: 105678.
- [17] ZHOU Z, MAJEED Y, DIVERRES NARANJO G, et al. Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106019.
- [18] LUAN Yajun, XU Junzeng, LYU Yuping, et al. Improving the performance in crop water deficit diagnosis with canopy temperature spatial distribution information measured by thermal imaging[J]. Agricultural Water Management, 2021, 246: 106699.
- [19] LACERDA L N, SNIDER J L, COHEN Y, et al. Using UAV-based thermal imagery to detect crop water status variability in cotton[J]. 2022, 2: 100029.
- [20] 孙圣,张劲松,孟平,等.基于无人机热红外图像的核桃园土壤水分

- 预测模型建立与应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 89-95.
- SUN Sheng, ZHANG Jinsong, MENG Ping, et al. Establishment and application of prediction model of soil water in walnut orchard based on unmanned aerial vehicle thermal infrared imagery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(16): 89-95.
- [21] TAHERI-GARAVAND A, MEDA V, NADERLOO L. Artificial neural Network-Genetic algorithm modeling for moisture content prediction of savory leaves drying process in different drying conditions[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2018, 11(4): 232-238.
- [22] HUMMEL J W, SUDDUTH K A, HOLLINGER S E. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 32(2): 149-165.
- [23] BERTALAN L, HOLB I, PATAKI A, et al. UAV-based multispectral and thermal cameras to predict soil water content: A machine learning approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200: 107-262.
- [24] 周美玲, 张德宁, 王浩, 等. 光学和微波遥感数据联合反演植被覆盖表层土壤含水率[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(1): 45-51.
- ZHOU Meiling, ZHANG Dening, WANG Hao, et al. Inversion of surface soil moisture under vegetated areas based on optical and microwave remote sensing data[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(1): 45-51.
- [25] 王科, 李银坤, 郑文刚, 等. 基于主成分分析的温室内水面蒸发量估算模型构建及验证[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 60-66.
- WANG Ke, LI Yinkun, ZHENG Wengang, et al. Construction and validation of a model for estimating surface water evaporation in greenhouse based on principal component analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(5): 60-66.
- [26] 林人财, 陈鹤, 张德宁, 等. 基于作物水分胁迫指数的表层土壤含水率遥感估算[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 1-7.
- LIN Rencai, CHEN He, ZHANG Dening, et al. Estimating topsoil water content using crop water stress index and remote sensing technologies[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 1-7.
- [27] 李潘, 高敏华, 马利刚. 基于生态优先的干旱区县域国土空间开发适宜性评价: 以新疆叶城县为例[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(3): 96-103, 115.
- LI Pan, GAO Minhua, MA Ligang. Suitability evaluation of land space development in arid counties based on ecological priority: Taking Yecheng County in Xinjiang as an example[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2023, 62(3): 96-103, 115.
- [28] 迈尔丹江·米吉提. 叶城县水资源开发现状与存在问题分析[J]. 地下水, 2022, 44(5): 227-229.
- [29] 吴焕丽, 崔可旺, 张馨, 等. 基于改进 K-means 图像分割算法的细叶作物覆盖度提取[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 42-50.
- WU Huanli, CUI Kewang, ZHANG Xin, et al. Improving accuracy of fine leaf crop coverage by improved K-means algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 42-50.
- [30] 董芙楠, 郭辉, 潘江如, 等. 基于改进的 Otsu 法对红花图像分割的研究[J]. 林业机械与木工设备, 2023, 51(8): 68-74.
- DONG Funan, GUO Hui, PAN Jiangru, et al. Study on safflower image segmentation based on an improved color difference model[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2023, 51(8): 68-74.
- [31] WU Wenjie, TAO Ze, CHEN Guangjie, et al. Phenology determines water use strategies of three economic tree species in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 312: 108-116.
- [32] PATEL N R, MEHTA A N, SHEKH A M. Canopy temperature and water stress quantification in rainfed pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.)[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 109(3): 223-232.

Using thermal infrared imaging to estimate soil moisture dynamics

QIN Chunyu¹, ZHOU Jianping^{1,2*}, XU Yan^{1,2}, DUAN Chunxu¹, CUI Chao¹, ZHANG Huiqi¹

(1. College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000, China; 2. Agriculture and Animal Husbandry Robot and Intelligent Equipment Engineering Research Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, China)

Abstract: **【Objective】** Change in soil water content is not only an indicator of water stresses used for irrigation management but also controls biogeochemical processes in soil. In this paper, we study the feasibility of using thermal infrared imaging to estimate soil moisture dynamics. **【Method】** The experiment was conducted in July-August 2023 in a walnut orchard in Xinjiang. Thermal infrared images of the walnut canopy were measured continuously using a thermal infrared camera. Based on the HSV color space of the images, an improved K-means segmentation algorithm was proposed to analyze the change in canopy temperature. We also measured air temperature and humidity, illuminance, wind speed, atmospheric CO₂, and soil water content in the 0-80 cm soil layer, from which we proposed an inversion model to estimate soil water dynamics. **【Result】** The improved K-means algorithm increased the accuracy from 82.34% to 94.55%, and the errors between the canopy temperature acquired from the images and the measured canopy temperature were in the range of 0 to 1.0. The infrared imaging method was most accurate between 14:00 pm to 16:00 pm. Our results showed that the walnut roots were most active in taking up water from the 40-60 cm soil layer 50-60 cm away horizons from the tree trunk. Canopy temperature, air temperature and relative humidity, and atmospheric CO₂ concentration were correlated with soil water content at significant levels; they can thus be used to estimate soil water dynamics, with a coefficient of determination of $R^2=0.86$ and $p<0.01$. **【Conclusion】** The temperature acquired from the infrared images of the walnut canopy can be used with other meteorological data and atmospheric CO₂ concentration to estimate soil water dynamics in the root zone of the walnut. It provides a new method for improving soil water management in walnut orchards in Xinjiang.

Key words: moisture; walnut; canopy temperature; algorithm; soil; model

责任编辑: 白芳芳