

基于无人机热红外遥感的玉米地土壤含水率诊断方法

张智韬^{1,2} 许崇豪^{1,2} 谭丞轩^{1,2} 李宇² 宁纪锋³

(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. 西北农林科技大学信息工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为使热红外遥感诊断土壤含水率更加准确、高效,以不同水分处理的大田玉米为研究对象,借助无人机可见光图像,对热红外图像进行植土分离,并提取玉米冠层温度和地表土壤温度。通过剔除温度直方图两端1%的温度像元对温度信息进行优化,进而计算作物水分胁迫指数(Crop water stress index, CWSI)、冠层相对温差(Canopy relative temperature difference, CRTD)、地表相对温差(Surface relative temperature difference, SRTD),利用三者之和求得水分-温度综合指数(Water-temperature composite index, WTCI),并用于诊断不同深度的土壤含水率。结果表明,剔除温度直方图两端1%温度像元的玉米冠层温度与实测冠层温度的相关性更高(4次试验的 R^2 由0.823、0.886、0.899、0.876提高至0.906、0.938、0.944、0.922),剔除温度直方图前端1%温度像元的地表土壤温度与实测地表温度的相关性也更高(2次试验的 R^2 由0.841、0.875提高至0.908、0.925),即通过直方图法优化的温度更接近实测温度;在拔节前期,CWSI、WTCI诊断0~20 cm土壤含水率效果较优,而拔节后期、抽雄吐丝期、乳熟期诊断0~40 cm土壤含水率效果较优;在半覆盖条件下,包含冠层温度信息(CWSI、CRTD)和土壤温度信息(SRTD)的WTCI₁与土壤含水率的相关性更高(0~40 cm:决定系数为0.500、0.821,高于0.463、0.748);在全覆盖状态下,包含冠层相对温差(CRTD)的WTCI₂与土壤含水率的相关性更高(0~40 cm:决定系数为0.809、0.729,高于0.721、0.656),表明WTCI是诊断土壤含水率效果较优的指标。

关键词: 玉米; 土壤含水率; 热红外遥感; 冠层温度; 作物水分胁迫指数; 水分-温度综合指数

中图分类号: S252; S127

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)03-0180-11

OSID:



Diagnosing Method of Soil Moisture Content in Corn Field Based on Thermal Infrared Remote Sensing of UAV

ZHANG Zhitao^{1,2} XU Chonghao^{1,2} TAN Chengxuan^{1,2} LI Yu² NING Jifeng³

(1. The Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, 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 Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to make the thermal infrared remote sensing diagnosis of soil moisture content more accurate and efficient, different water treatments of field corn were taken as the research object, the plant and soil separation of thermal infrared image was realized by the visible light image of UAV and corn canopy temperature and surface soil temperature were extracted. Optimization of temperature information by eliminating 1% of temperature pixels at both ends of the temperature histogram was made to calculate crop water stress index (CWSI), canopy relative temperature difference (CRTD) and surface relative temperature difference (SRTD). The sum of the above three indices led to a new indicator which can diagnose soil moisture content at different depths. The results showed that there were higher correlation between the corn canopy temperature which eliminated 1% of temperature pixels at both ends of the temperature histogram and the measured canopy temperature (R^2 was increased from 0.823, 0.886, 0.899 and 0.876 to 0.906, 0.938, 0.944 and 0.922 of four tests), and there were also higher

收稿日期: 2019-07-18 修回日期: 2019-09-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403203、2017YFC0403302)和陕西省自然科学基金研究计划项目(2019JM-066)

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

correlation between the soil temperature which eliminated the 1% temperature pixel at the front of the temperature histogram and the measured soil temperature (R^2 was increased from 0.841 and 0.875 to 0.908 and 0.925 of two tests), which indicated that the temperature optimized by the histogram method was closer to the measured temperature. In the early stage of jointing, CWSI and WTCI had better soil moisture content in the diagnosis of 0 ~ 20 cm, while the soil moisture content in the late stage of jointing, tasseling-silking and maturity was better than that of 0 ~ 40 cm. Under half coverage, WTCI₁ with canopy temperature information (CWSI, CRTD) and soil temperature information (SRTD) was more correlated with soil moisture (0 ~ 40 cm; R^2 was 0.500 and 0.821, which was higher than 0.463 and 0.748). Under full coverage, WTCI₂ with canopy relative temperature difference (CRTD) was more correlated with soil moisture (0 ~ 40 cm; R^2 was 0.809 and 0.729, which was higher than 0.721 and 0.656), it indicated that WTCI was a new indicator for better diagnosis of soil moisture content. The research result provided new methods and new ideas for accurate acquisition of crop canopy temperature and accurate diagnosis of soil moisture content.

Key words: corn; soil moisture content; thermal infrared remote sensing; canopy temperature; crop water stress index; water-temperature composite index

0 引言

土壤含水率决定了农作物的水分盈亏,准确高效地诊断土壤含水率对指导农业节水灌溉、预测产量等具有十分重要的作用^[1]。传统的水分诊断方法如干燥法、中子仪法、电阻法等,在测定范围及测定周期方面存在不足,并且耗费时力^[2]。自TANNER^[3]发现冠层温度能够指示作物水分后,利用热红外技术获取温度信息,进而诊断土壤含水率成为研究的热点^[4-6]。目前,对于植被覆盖下土壤含水率诊断效果较优的方法是作物水分胁迫指数法^[7]。IDSO等^[8-9]利用空气温度和冠层温度之差与上下基线,首先提出经验算法的作物水分胁迫指数CWSI。此后,JACKSON等^[10]根据冠层能量平衡推导出CWSI中上下基线的理论计算公式,但是理论公式所需参数较多,实际应用中较复杂。JONES等^[11]利用“干、湿参考面”确定CWSI计算式中的上下温度极限值,将CWSI计算方法进行了简化,使之更易于指导生产实践。国内外,利用CWSI诊断土壤含水率的研究从未间断^[12-15],近几年,随着机载热红外技术的发展,促使利用CWSI诊断土壤含水率的方法更加简便、高效^[16-18]。基于经验算法的CWSI仅适用于作物全覆盖条件下的土壤含水率诊断,裸露土壤的含水率诊断常用热惯量法^[19]。然而,作物半覆盖条件下的土壤含水率情况比较复杂^[20],将两者结合对土壤含水率进行诊断尚未见报道。

通过机载热红外成像仪获取作物的冠层温度时,在作物半覆盖条件下,剔除图像中的土壤背景是准确获取冠层温度的关键。目前,实现热红外图像的地物分类,并提取特定地物的温度通常有两种方式:一是直接在热红外图像中进行^[21-23],但此方法

对图像的分辨率要求较高^[16, 24];另一种是借助可见光图像实现热红外图像的地物分离,此方法对低分辨率的图像效果较优^[25]。在之前的研究中,借助第2种方法提取热红外图像的玉米冠层温度,并对比了几种方法的分类效果,发现GBRI植被指数法对于大田玉米的分类效果较好。虽然以上方法剔除了大部分土壤背景,提高了冠层温度的准确性,但任何分类方法均达不到完全精确^[26]。

本文以大田玉米为研究对象,在之前研究的基础上,利用GBRI植被指数分类法对可见光图像进行分类,经过掩膜处理提取热红外图像的玉米冠层温度和地表土壤温度。然后,对提取的温度数据进行统计,生成温度直方图,通过剔除温度直方图两端1%的温度像元,对提取的温度进行优化。基于此,计算作物水分胁迫指数(CWSI)、冠层相对温差(CRTD)、土壤相对温差(SRTD),通过三者之和得到水分-温度综合指数(WTCI),并用于诊断不同深度的土壤含水率。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

研究区域位于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗昭君镇(109°36'E,40°25'N,海拔1010m)。属于温带大陆性气候,气候干燥,降雨集中于7—8月,冬季寒冷,夏季炎热,昼夜温差大。试验地土壤为砂壤土,0~90cm深度平均田间持水率为11.86%(质量含水率),土壤容重为1.56g/cm³。玉米种植品种为“钧凯918”,播种时间为2018年5月11日,出苗时间为5月18日,收获时间为2018年9月8日,全生育期历经114d。玉米播种深度约5cm,种植行距50cm、株距25cm,行沿东西走向。

试验地为半径60m的圆形区域(图1),根据灌

水梯度不同划分为5个扇形区域(T1~T5,5个处理),每个扇形区域里面设置3个6 m×6 m的矩形采样小区(3个重复),每个矩形采样小区设置A、B、C 3个采样点。在T2、T3、T4、T5扇形区域中心以及喷灌机轴心设有地理位置几何控制板(三角形区域)。

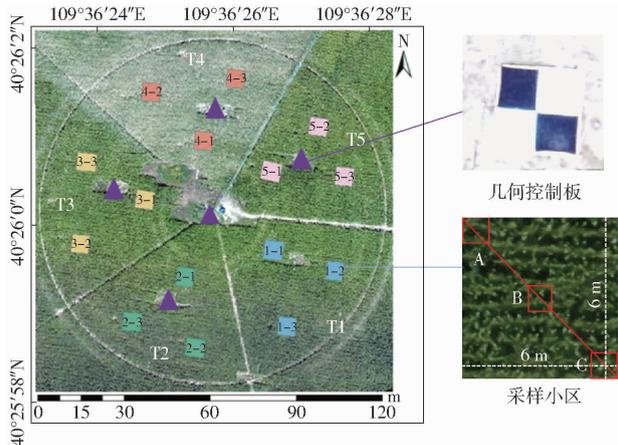


图1 试验区域设计

Fig. 1 Design of test area

本研究设置扇形区域 T1 为充分灌溉区(田间持水率的 95%),设置扇形区域 T4 为严重的水分胁迫区(田间持水率的 40%);T2、T3、T5 水分梯度分别为 80%、70%、60% 的田间持水率。灌溉方式采用中心轴式喷灌机,灌溉量通过安装在喷灌机上的流量计(MIK-2000H 型)控制。

1.2 数据采集

1.2.1 无人机图像的获取

在玉米拔节期、抽雄吐丝期和乳熟期选择晴朗无风的天气,拍摄试验区域的无人机热红外图像和可见光图像。由于玉米拔节期历时较长,因此在 2018 年 7 月 4 日(DOY185)和 7 月 12 日(DOY193)拍摄试验区域图像 2 次,抽雄吐丝期选择在 8 月 2 日(DOY214)拍摄,乳熟期选择在 8 月 23 日(DOY235)拍摄。

试验当天在 12:00—15:00 进行图像采集,按照事先规划的飞行航线,热红外图像采集时利用自主研发的六旋翼无人机,搭载 640 像素×512 像素的 VuePro 640R 型热成像仪获取热红外图像,飞行高度 60 m,重叠度 85%,对应地面分辨率 7.8 cm;可见光图像采集时利用大疆精灵 4Pro 型无人机,飞行高度 50 m,重叠度 90%,对应地面分辨率 1.25 cm。

1.2.2 实测冠层温度

为验证通过热红外图像提取冠层温度的精确度,本研究利用实测的冠层温度进行精度评价。在无人机拍摄热红外图像的同时,利用 RayTek ST60+ 型手持热红外测温仪测定冠层温度,为了避免土壤的

影响,面向南与水平线呈 15° 夹角扫描冠层(扫描范围为 120°)得到冠层平均温度(玉米种植行为从东向西)^[27],同时,在每个采样小区的 A、B、C 3 个采样点分别测定一次,再取平均值作为此采样小区冠层温度的平均值。

1.2.3 土壤含水率的采集

土壤含水率的测定采用传统的取土干燥法(精确度高),无人机图像采集完成后,在每个采样小区的中心进行土钻取土,取土深度为 10、20、30、45、60 cm,土样取出后迅速装入铝盒进行称量,放入烘箱在温度 105℃ 下干燥 8 h 后再称量,计算土壤质量含水率。

1.3 无人机图像处理

1.3.1 玉米半覆盖条件下热红外图像温度信息提取

拔节期 2 次试验(2018 年 7 月 4 日和 7 月 12 日)玉米地没有达到全覆盖,通过无人机拍摄的试验区域,其图像中主要包含玉米植株和土壤两种地物,因此为得到玉米冠层温度和地表土壤温度,需进行植土分离。本研究采用可见光(RGB)图像与热红外图像结合的方法进行植土分离,从而获取玉米冠层温度和地表土壤温度,具体包含以下步骤:

(1)图像的拼接、校准、配准以及热红外图像温度校准

利用 PIX4D mapper 软件对试验采集的图像进行拼接得到试验区域完整的图像,并通过几何控制板进行几何校准。利用 ENVI Classic 软件手动选取可见光图像与热红外图像中明显可见的地物进行图像配准。利用各个方向反射率相同的“黑布”“灰布”(标准反射板,尺寸为 3 m×3 m)及近似黑体的一盆水对热红外图像提取的温度进行校准。

(2)可见光图像中植土分离

可见光图像中绿(G)波段对植物的绿反射敏感,蓝(B)波段对叶绿素浓度反应敏感^[20],因此通过两者的比值构造 GBRI 植被指数,其对玉米植株和土壤的分类有较好的效果。

利用 ENVI 软件对可见光图像做波段运算得到 GBRI 指数图像(图 2),对照可见光图像,在 GBRI 指数图像中选取玉米植株样本 30 个,地表土壤样本 30 个进行 GBRI 值统计,通过直方图确定玉米植株和地表土壤的阈值。图 3、4 分别是拔节期 2 次试验(2018 年 7 月 4 日和 2018 年 7 月 12 日)选取 30 个土壤和玉米样本的 GBRI 直方图,从中看出,2 种地物的 GBRI 有明显的分界点(分界点左侧为土壤,右侧为玉米植株),由此可以确定土壤和玉米的阈值,7 月 4 日的阈值为 1.15,7 月 12 日的阈值为 1.1。

利用 ArcGIS 10.4.1 软件将数值大于阈值的定

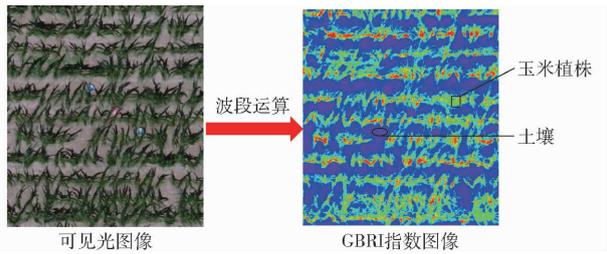


图 2 图像的波段运算

Fig. 2 Image band operation

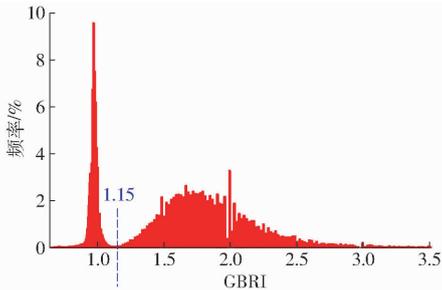


图 3 土壤与玉米植株 GBRI 直方图(2018-07-04)

Fig. 3 Histogram of GBRI values of soil and corn plants (2018-07-04)

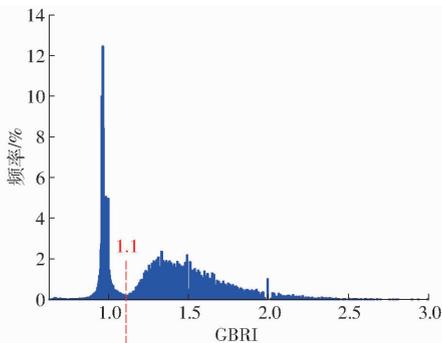


图 4 土壤与玉米植株 GBRI 直方图(2018-07-12)

Fig. 4 Histogram of GBRI values of soil and corn plants (2018-07-12)

义为 1(玉米), 小于阈值的定义为 0(地表土壤), 对 GBRI 指数图像进行二值化处理, 得到玉米植株和地表土壤的二值图像(图 5a), 之后对二值图像进行边缘特征提取, 提取玉米冠层(地表土壤)的矢量文件(图 5b), 由此可将玉米冠层与地表土壤分离。

(3) 温度信息提取

可见光图像中玉米冠层与地表土壤分离后, 提

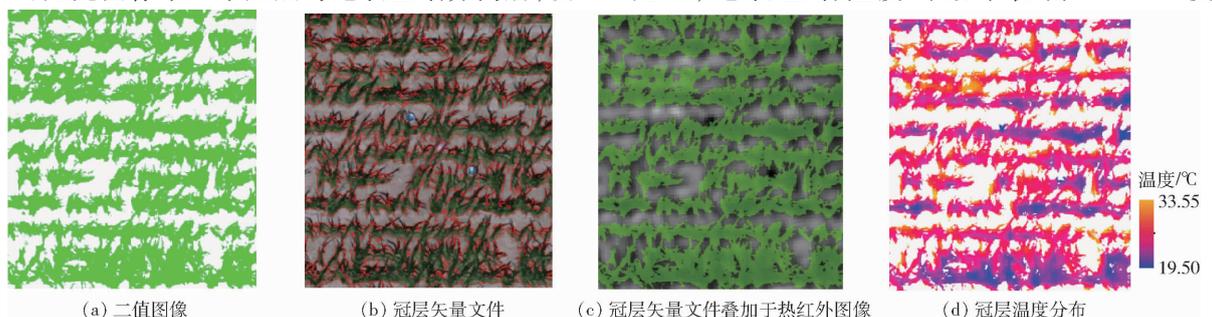


图 5 二值化处理提取的冠层温度

Fig. 5 Binary processing to extract canopy temperature

取的玉米冠层(地表土壤)矢量文件叠加于配准过的热红外图像中(图 5c), 对热红外图像做掩膜处理, 通过掩膜提取可得到玉米冠层(地表土壤)的温度(图 5d)。本研究分别对 15 个采样小区做掩膜处理, 得到每个采样小区每个像元对应的温度, 同时通过统计可得此小区温度的最大值、最小值以及平均值。

1.3.2 玉米全覆盖条件下热红外图像温度信息提取

抽雄吐丝期和乳熟期试验区域的玉米已经达到全覆盖, 因此不必考虑地表土壤的影响, 此时只需经过图像拼接、图像的温度转换与校正、图像温度信息提取即可获得玉米冠层温度。在热红外图像中对 15 个采样小区做掩膜处理并进行数据统计, 可得每个采样小区温度的最大值、最小值以及平均值。

1.4 温度信息的优化

通过 GBRI 植被指数对可见光图像进行分类时会有一部分地表土壤划归为玉米冠层区域, 若为阴影土壤, 则通过热红外图像提取的玉米冠层温度偏低, 若为阳光直射的土壤, 则通过热红外图像提取的玉米冠层温度偏高。为了减小此种情况带来的误差, 剔除了冠层温度直方图两端(温度最大、最小值)各 1% 的温度像元, 之后再统计冠层温度的最大值、最小值以及平均值。如图 6 所示, 以 2018 年 7 月 4 日“1-2”采样小区为例, 标出的椭圆形区域即剔除两端 1% 的温度像元, 经过此处理, 冠层温度的最大值、最小值由 35.92、23.69℃ 变为 32.95、26.38℃, 波动范围更小。

对于地表土壤温度, 可见光图像分类后获取的地表土壤区域内可能包含玉米植株, 这会导致热红外图像提取的地表土壤温度偏低, 与冠层温度不同, 地表土壤温度不会出现偏高的情况。因此为减小地表土壤温度偏低带来的误差, 本文剔除了地表土壤温度直方图前端(温度最小值)1% 的温度值。如图 7 所示, 仍以 2018 年 7 月 4 日“1-2”采样小区为例, 椭圆形区域即剔除前端 1% 的温度像元, 经过此处理, 地表土壤温度的最小值由 23.69℃ 变为

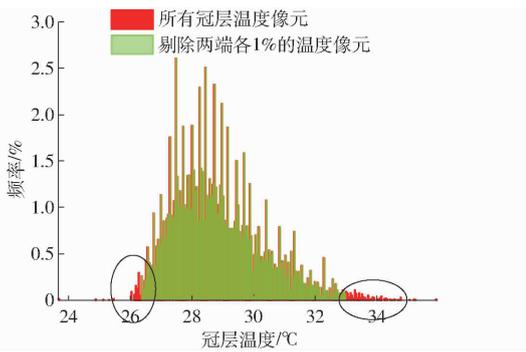


图6 冠层温度直方图

Fig. 6 Canopy temperature histogram

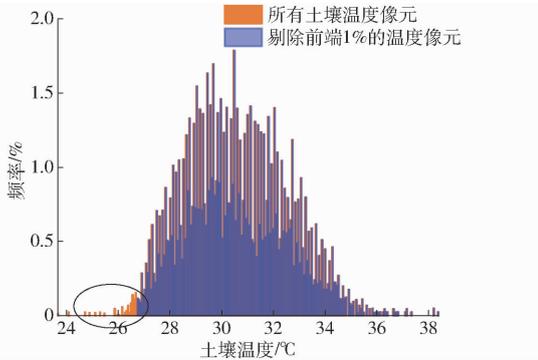


图7 土壤温度直方图

Fig. 7 Soil temperature histogram

26.74℃。

1.5 相关指数计算

1.5.1 作物水分胁迫指数(CWSI)

作物水分胁迫指数(CWSI)的计算采用 JONES 等^[11]的简化公式。在大田试验中,干湿参考面不易确定,本文选取采样小区冠层温度均值最小值 \hat{T}_{\min} 减去 2℃ 作为湿参考面;采样小区冠层温度均值最大值 \hat{T}_{\max} 加上 5℃ 作为干参考面。其计算式为

$$CWSI = \frac{T_c - (\hat{T}_{\min} - 2)}{\hat{T}_{\max} + 5 - (\hat{T}_{\min} - 2)} \quad (1)$$

式中 T_c ——作物冠层温度

T_c 、 \hat{T}_{\max} 和 \hat{T}_{\min} 均通过无人机热红外图像提取采样小区的玉米冠层温度均值获得。

1.5.2 冠层相对温差(CRTD)和地表相对温差(SRTD)

每个采样小区的热红外图像,经植土分离后分别提取玉米冠层温度和地表土壤温度。冠层相对温差(CRTD)和地表相对温差(SRTD)的计算式为

$$CRTD = \frac{T_{c\max} - T_{c\min}}{T_{c\max} + T_{c\min}} \quad (2)$$

$$SRTD = \frac{T_{s\max} - T_{s\min}}{T_{s\max} + T_{s\min}} \quad (3)$$

式中 $T_{c\max}$ ——每个采样小区中玉米冠层温度最大值

$T_{c\min}$ ——每个采样小区中玉米冠层温度最小值

$T_{s\max}$ ——每个采样小区中地表土壤温度最大值

$T_{s\min}$ ——每个采样小区中地表土壤温度最小值

1.5.3 水分-温度综合指数(WTCI)

拔节期的玉米没有达到完全覆盖,因此可以计算 CRTD 和 SRTD 两个指数。抽雄吐丝期和乳熟期的玉米达到全覆盖状态,此时无地表土壤,因此只计算 CRTD 一个指数。鉴于此,水分-温度综合指数 WTCI 分为两部分,拔节期为 $WTCI_1$,其值为 CWSI、CRTD 与 SRTD 之和;抽雄吐丝期和乳熟期为 $WTCI_2$,其值为 CWSI 与 CRTD 之和。

2 结果与分析

2.1 热红外图像提取的温度与实测温度相关性分析

为评价热红外图像提取的温度精确度,以及利用温度直方图优化后的温度效果,本文对图像温度与实测温度进行相关性分析,分别建立图像提取的原始温度、优化后温度与实测温度的线性模型。其中冠层温度 4 次试验数据的相关关系如图 8a~8d 所示,地表土壤温度 2 次试验数据的相关关系如图 8e、8f 所示。

对于冠层温度,由图 8a~8d 的纵轴看,红线位于黑线下方,这说明剔除冠层温度直方图两端各 1% 温度像元的冠层温度低于由图像直接提取的冠层温度;对比线性拟合的相关性,图像直接提取的冠层温度与实测冠层温度的决定系数 R^2 为 0.823、0.886、0.899、0.876,而经过剔除冠层温度直方图两端各 1% 温度像元的冠层温度与实测冠层温度的决定系数 R^2 为 0.906、0.938、0.944、0.922,均高于前者;对比均方根误差 RMSE:1.37℃ > 0.9℃、1.80℃ > 1.12℃、2.34℃ > 0.84℃、1.38℃ > 1.05℃,冠层温度经优化后 RMSE 更低,这也表明剔除冠层温度直方图两端各 1% 温度像元的冠层温度与实测冠层温度偏差更小。

对于地表土壤温度,由图 8e、8f 可知,剔除地表土壤温度直方图前端 1% 温度像元的温度高于由图像直接提取的地表土壤温度;2 次试验实测温度与优化后的温度线性决定系数 R^2 为 0.908、0.925,明显高于未优化的地表土壤温度 (R^2 为 0.841、0.875),并且均方根误差也更低 (RMSE:0.84℃ < 3.63℃,1.6℃ < 4.1℃)。通过以上分析可以说明热红外图像提取的冠层温度和地表土壤温度,利用温度直方图法优化后得到的温度精确度更高。

2.2 不同水分梯度的 CWSI、WTCI 变化趋势

为了对比作物水分胁迫指数(CWSI)和水分-温度综合指数(WTCI)的差异性,将每个扇形区域里 3 个采样小区的 CWSI 和 WTCI 取平均值作为此扇

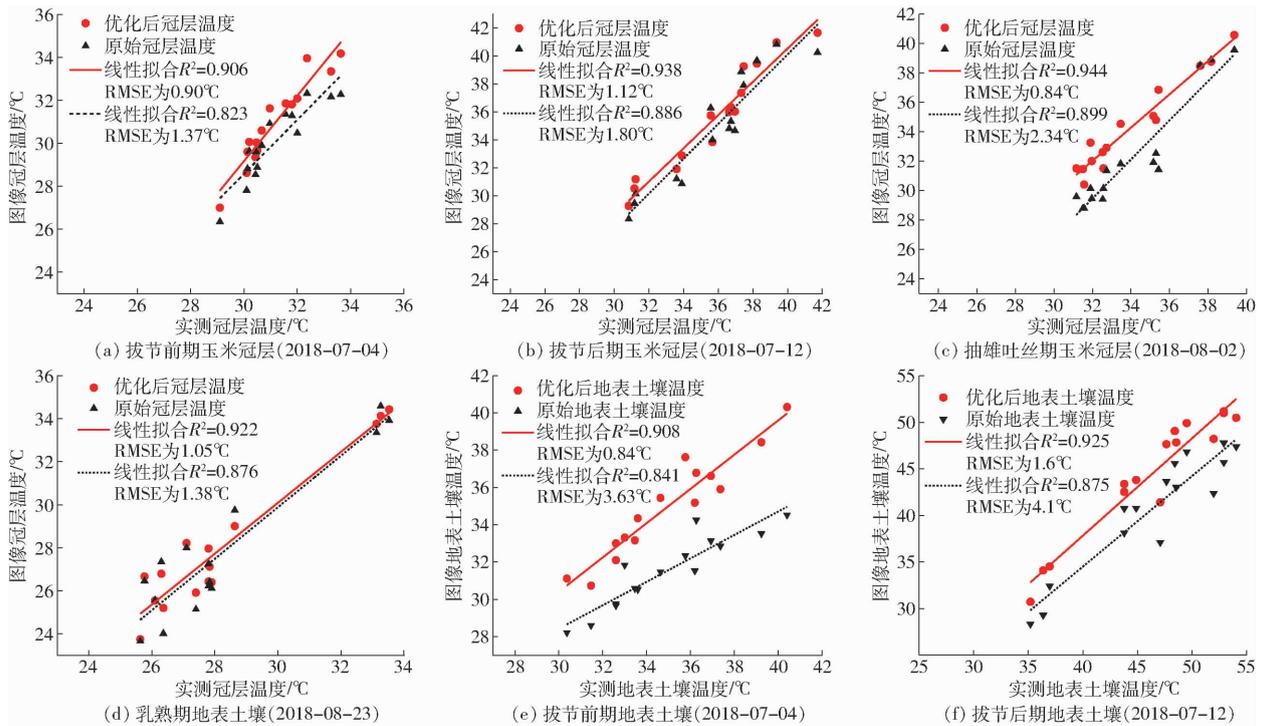


图8 图像温度与实测温度相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis between image temperature and measured temperature

形区域的CWSI和WTCl值,其拔节期、抽雄吐丝期和乳熟期不同水分梯度下的2种指数变化趋势见图9。

由图9看出,CWSI和WTCl 2种指数的变化趋势基本一致,拔节期2种指数变化趋势线间隔较大(图9a、9b),抽雄吐丝期和乳熟期2种指数变化趋势线间隔较小(图9c、9d),由定义可知,WTCl₁包含

土壤相对温差(SRTD),而WTCl₂不包含SRTD,这是导致不同生育期CWSI和WTCl值间隔不同的原因。整体来看,4次试验T1~T4区域的CWSI和WTCl值逐渐增加,对应T1~T4区域的水分梯度逐渐变小(95%、80%、60%、40%田间持水量),由此说明CWSI和WTCl能够指示土壤含水率,2种指数越大,土壤含水率越低;2种指数越小,土壤含水率

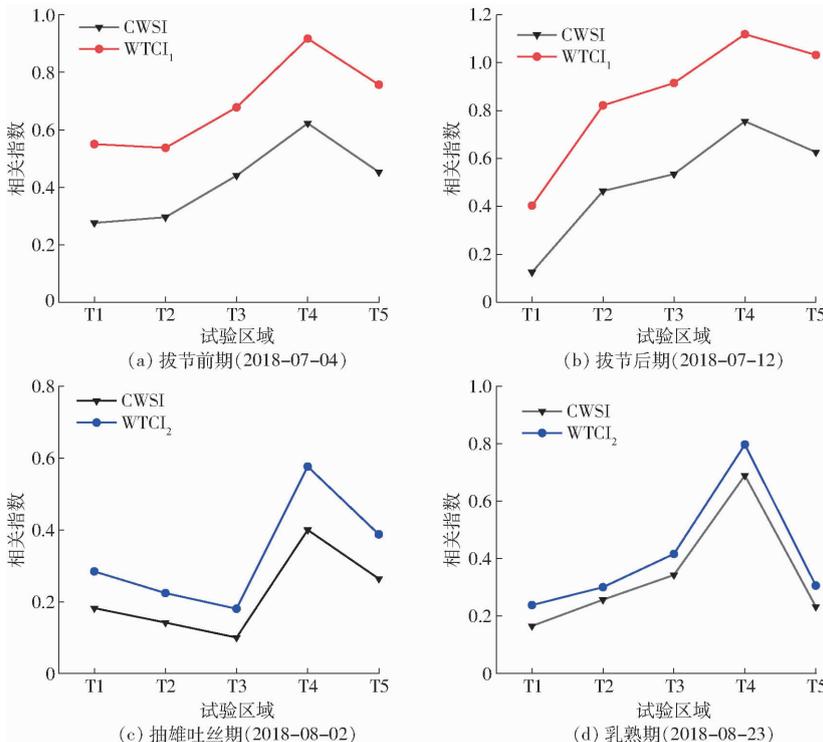


图9 CWSI和WTCl的变化趋势

Fig. 9 Trends in CWSI and WTCl

越高。

图9c抽雄吐丝期T3区域CWSI和WTCI 2种指数值小于T1区域的原因是,在试验前2d,对T3区域进行了施肥(尿素,水肥一体化)处理,因此土壤含水率较高,玉米长势较好。图9d乳熟期T5区域CWSI和WTCI值较低的原因是,经过拔节期的水分胁迫处理,T5区域的玉米长势太差,因此从抽雄吐丝期开始每隔几天对T5区灌水,导致T5区域

土壤含水率较高,从而使CWSI和WTCI较低。

2.3 CWSI与不同深度土壤含水率的相关关系

根据式(1)计算的作物水分胁迫指数(CWSI),对拔节期7月4日、7月12日,抽雄吐丝期8月2日,乳熟期8月23日4次试验的CWSI与土壤含水率分别进行相关性分析,并对比CWSI诊断不同深度土壤含水率的效果,其相关关系见表1(表中 x 为CWSI, y 为土壤含水率)。

表1 CWSI与土壤含水率的相关关系

Tab.1 Correlation between CWSI and soil moisture content

| 生育期 | 深度/cm | 拟合公式 | R^2 | F | P |
|-------------------|-------|-------------------------|-------|-------|--------|
| 拔节前期(2018-07-04) | 0~20 | $y = -0.0616x + 0.1014$ | 0.644 | 23.50 | <0.001 |
| | 0~40 | $y = -0.0474x + 0.0980$ | 0.463 | 11.19 | <0.05 |
| | 0~60 | $y = -0.0285x + 0.0886$ | 0.275 | 4.96 | <0.05 |
| 拔节后期(2018-07-12) | 0~20 | $y = -0.0538x + 0.0742$ | 0.616 | 20.84 | <0.001 |
| | 0~40 | $y = -0.0547x + 0.0776$ | 0.748 | 38.61 | <0.001 |
| | 0~60 | $y = -0.0321x + 0.0711$ | 0.387 | 8.22 | <0.05 |
| 抽雄吐丝期(2018-08-02) | 0~20 | $y = -0.1112x + 0.0683$ | 0.663 | 25.61 | <0.001 |
| | 0~40 | $y = -0.0895x + 0.0661$ | 0.721 | 33.56 | <0.001 |
| | 0~60 | $y = -0.0563x + 0.0654$ | 0.486 | 12.30 | <0.05 |
| 乳熟期(2018-08-23) | 0~20 | $y = -0.0957x + 0.0990$ | 0.605 | 19.94 | <0.001 |
| | 0~40 | $y = -0.0504x + 0.0764$ | 0.656 | 24.82 | <0.001 |
| | 0~60 | $y = -0.0460x + 0.0726$ | 0.483 | 12.13 | <0.05 |

由表1可知,拟合系数均为负数,说明CWSI与土壤含水率呈线性负相关,即CWSI值越大表明土壤含水率越低,但相关程度有差异。从不同的生育期看,仅在拔节前期(7月4日)的CWSI与0~20cm深度土壤含水率的 R^2 高于CWSI与0~40cm深度土壤含水率的 R^2 ,而拔节后期(7月12日)、抽雄吐丝期(8月2日)和乳熟期(8月23日)均是0~40cm深度的土壤含水率与CWSI相关程度最高(0~20cm; R^2 为0.616、0.663、0.605;0~40cm; R^2 为0.748、0.721、0.656)。这表明,随着玉米的生长,CWSI诊断最优土壤含水率的深度会有所变化。

从CWSI诊断土壤含水率的深度看,3个生育期的CWSI与0~20cm、0~40cm深度土壤含水率的相关性均达到极显著水平(R^2 均大于0.6, $P < 0.001$),而CWSI与0~60cm深度土壤含水率的相关性则有所降低(R^2 均小于0.5, $P < 0.05$)。从7月4日、7月12日到8月2日,随着玉米不断生长,0~60cm的土壤含水率与CWSI的决定系数 R^2 不断增加(0.275、0.387、0.486),而在8月23日达到平稳状态($R^2 = 0.483$),说明随着玉米的生长其根系逐渐往深处生长,最终会达到一个稳定深度。

通过以上分析可知,CWSI诊断土壤含水率深度的效果与玉米生长状态有关,在拔节前期(7月4日),玉米植株较小,其根系深度较浅,此时CWSI

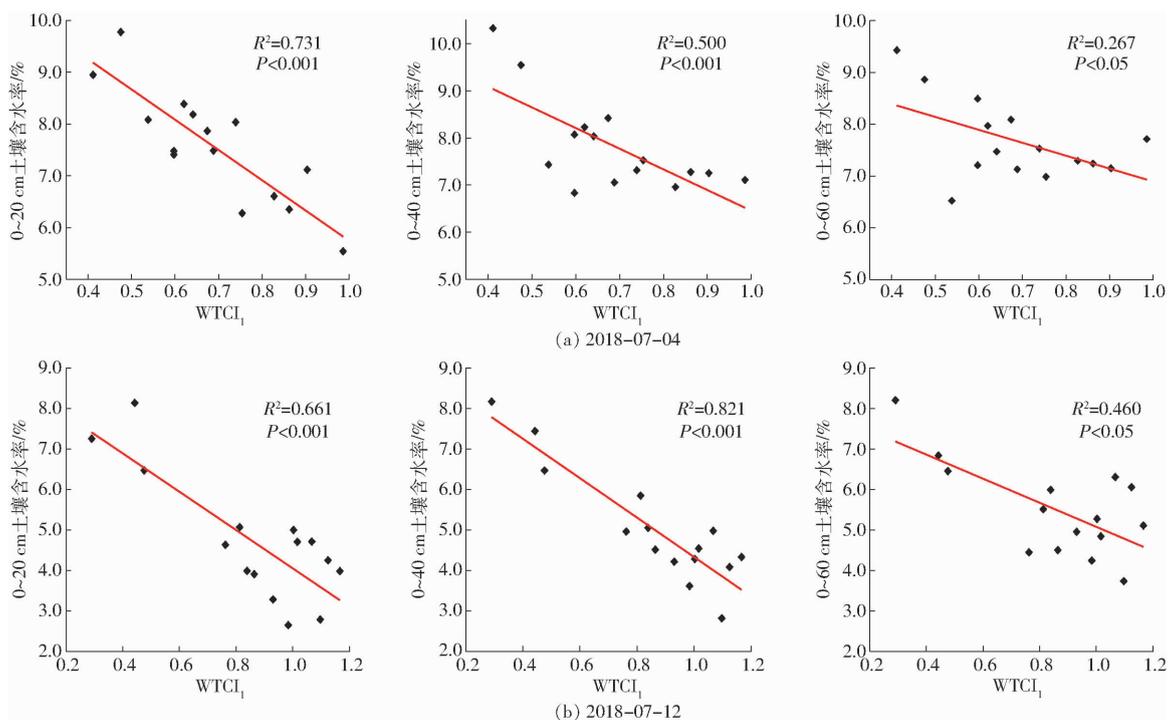
诊断浅层(0~20cm)土壤含水率效果较好;在拔节后期和抽雄吐丝期(7月12日,8月2日),玉米根系深度增加,此时CWSI诊断0~40cm土壤含水率效果较好;在乳熟期(8月23日),依然是0~40cm土壤含水率效果较好,说明玉米根系主要集中在0~40cm。

2.4 WTCI与不同深度土壤含水率的相关关系

2.4.1 半覆盖条件下 $WTCI_1$ 与土壤含水率的关系

玉米在拔节期没有达到全覆盖,此时热红外图像温度信息包括玉米冠层温度和地表土壤温度,提取热红外图像中的冠层温度和土壤温度并计算水分-温度综合指数($WTCI_1$),其包含了作物水分胁迫指数(CWSI)、冠层相对温差(CRTD)和土壤相对温差(SRTD)。拔节期2次试验的 $WTCI_1$ 与不同深度土壤含水率的相关关系见图10。

从图10可知, $WTCI_1$ 与土壤含水率呈线性负相关,拔节前期(7月4日)0~20cm土壤含水率与 $WTCI_1$ 的相关程度较高($R^2 = 0.731$),而拔节后期(7月12日)0~40cm土壤含水率与 $WTCI_1$ 的相关程度较高($R^2 = 0.821$);对比不同的深度, $WTCI_1$ 与0~60cm深度的土壤含水率相关性较差(R^2 为0.267、0.460, $P < 0.05$),而与0~20cm、0~40cm深度的土壤含水率相关性较好,说明玉米根系多集

图10 WTCl₁与不同深度土壤含水率的相关性Fig. 10 Correlation between WTCl₁ and soil moisture content at different depths

中于0~40 cm,这与2.3节中结论具有一致性。

对比2.3节中CWSI诊断土壤含水率的效果,WTCl₁诊断土壤含水率的效果更优。0~20 cm深度时,2次试验CWSI与土壤含水率线性拟合的决定系数 R^2 为0.644、0.616,WTCl₁与土壤含水率线性拟合的决定系数 R^2 为0.731、0.661;同理,0~40 cm时,CWSI与土壤含水率线性拟合的决定系数 R^2 为0.463、0.748,WTCl₁与土壤含水率线性拟合的决定系数 R^2 为0.500、0.821,后者远高于前者。这表明,与CWSI相比,WTCl₁与土壤含水率具有更高的线性相关性,利用WTCl₁诊断土壤含水率的效果更优。

通过以上分析可知,在玉米没有达到全覆盖时,结合了冠层温度信息(CWSI、CRTD)与土壤温度信息(SRTD)的WTCl₁与土壤含水率的相关性更高,即WTCl₁是诊断土壤含水率较优的新指标。

2.4.2 全覆盖条件下WTCl₂与土壤含水率的关系

抽雄吐丝期和乳熟期的玉米基本达到全覆盖状态,此时热红外图像中的温度信息只是玉米冠层温度,因此通过图像无法计算土壤相对温差(SRTD),由此提取的玉米冠层温度计算水分-温度综合指数(WTCl₂)仅包含作物水分胁迫指数(CWSI)和冠层相对温差(CRTD)。抽雄吐丝期和乳熟期的WTCl₂与不同深度土壤含水率的相关关系见图11。

从图11可知,WTCl₂与土壤含水率呈线性负相关,并且抽雄吐丝期和乳熟期均是0~40 cm土壤含水率与WTCl₂线性拟合相关程度最高(R^2 为0.809、

0.729),0~20 cm次之(R^2 为0.734、0.669),0~60 cm相关程度最低(R^2 为0.581、0.561),这与2.3节中CWSI与土壤含水率的相关性高低具有一致性,也印证抽雄吐丝期和乳熟期的玉米根系主要集中在0~40 cm。

同理,与2.3节中CWSI诊断土壤含水率效果对比,WTCl₂与土壤含水率的线性拟合度更高。0~20 cm深度时,决定系数 R^2 为0.734、0.669,高于0.663、0.605;0~40 cm深度时, R^2 为0.809、0.729,高于0.721、0.656;0~60 cm深度时, R^2 为0.581、0.561,高于0.486、0.483。由此可知,在玉米全覆盖状态下,包含冠层相对温差(CRTD)的WTCl₂诊断土壤含水率的效果更优。

3 讨论

本文借助于无人机可见光图像,实现了无人机热红外图像植土分离并提取玉米冠层温度和地表土壤温度,通过剔除直方图两端部分温度像元,对温度信息进行优化,使得图像中提取的温度更接近实测温度,并提出水分-温度综合指数这一新指标诊断土壤含水率,取得了更优的效果。本研究所采用的方法简单实用,仅需无人机可见光图像与热红外图像,为作物冠层温度的精确获取和土壤含水率的精确诊断提供了新方法。

但本文也存在诸多不确定因素。首先,在分类后提取温度信息时,GBRI指数分类效果整体较好但

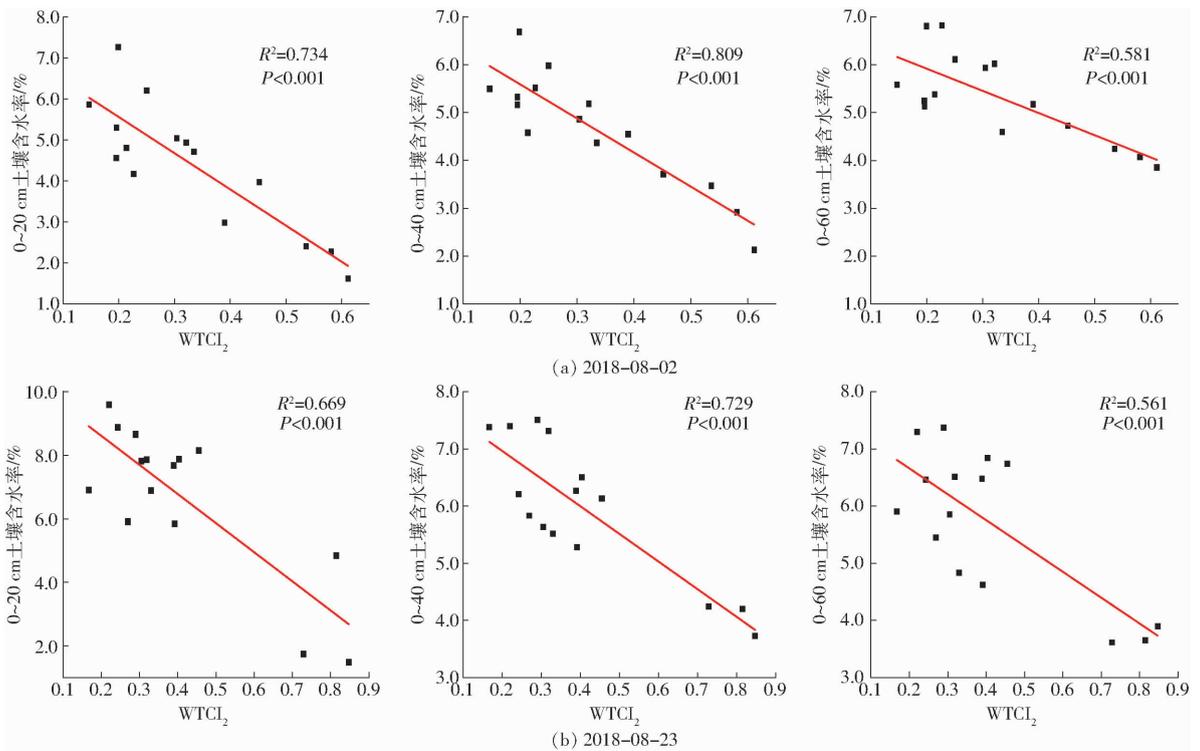


图 11 WTCl₂与不同深度土壤含水率的相关性

Fig. 11 Correlation between WTCl₂ and soil moisture content at different depths

精度依然有限,由此分类获得的玉米冠层区域依然包含多种地物,因此提取的冠层温度并不是纯冠层温度,利用温度直方图法剔除两端部分温度像元目的就是为了解决此问题,但剔除温度像元的数量还有待探究。本文中剔除了1%的温度像元,但这并不是固定值,是否剔除2%或5%或其他数量的温度像元效果更优,要根据实际情况而定。其次,在计算CWSI时,采样小区冠层温度均值最小的减去2℃作为“湿参考面”,冠层温度均值最大的加上5℃作为“干参考面”,这是在他人研究的基础上^[28-31],根据试验实际情况主观确定的,是否真正接近于“干、湿参考面”还具有不确定性。对于CRTD和SRTD,笔者是根据张仁华^[32]提出的相对温差模型计算得来,但不同的是,他的相对温差模型中 T_{\max} 、 T_{\min} 是一天中地表温度的最大、最小值,而本文中是指某一时刻获取的一定区域热红外图像中温度的最大、最小值。因此,本文计算的CRTD和SRTD在理论解释方面还需更深入研究。

由于试验数据量的限制,本文仅对WTCl与土壤含水率进行了相关性分析,确定了WTCl与土壤含水率具有较高的线性相关性,即WTCl是诊断土

壤含水率较优的指标,但是对于线性拟合模型没有做精度评定,即没有做到定量反演土壤含水率,这也是本文的不足以及后续研究要弥补的方面。

4 结论

(1)借助于可见光图像对热红外图像进行植土分离,并提取玉米冠层温度,利用直方图法剔除冠层温度直方图两端各1%的温度像元,经验证,此方法优化后的冠层温度精确度更高,更接近于实测温度。

(2)在半覆盖条件下,包含冠层温度信息和地表土壤温度信息的水分-温度综合指数(WTCl₁)与土壤含水率具有更高的线性相关性;在全覆盖条件下,水分-温度综合指数(WTCl₂)与土壤含水率也具有较高的线性相关性,即水分-温度综合指数(WTCl)是诊断土壤含水率较优的指标。

(3)玉米植株较小时,水分-温度综合指数(WTCl)诊断0~20 cm深度的土壤含水率效果较优;随着玉米的生长,水分-温度综合指数(WTCl)诊断0~40 cm深度的土壤含水率效果较优。这表明在不同的生育期WTCl诊断土壤含水率的最优深度会有所变化。

参 考 文 献

- [1] 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[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 748-767. (in Chinese)
- [2] 张智韬,王海峰,KARNIELI Arnon,等. 基于岭回归的土壤含水率高光谱反演研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):

240 - 248.

ZHANG Zhitao, WANG Haifeng, KARNIELI Arnon, et al. Inversion of soil moisture content from hyperspectra based on ridge regression[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 240 - 248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180528&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.028. (in Chinese)

- [3] TANNER C B. Plant temperatures [J]. Agronomy Journal, 1963, 55(2): 210 - 211.
- [4] PEÑA-ARANCIBIA J L, MAINUDDIN M, KIRBY J M, et al. Assessing irrigated agriculture's surface water and groundwater consumption by combining satellite remote sensing and hydrologic modelling[J]. Science of the Total Environment, 2016, 542: 372 - 382.
- [5] 张劲松, 孟平, 高峻, 等. 基于冠层叶气温差的苹果园土壤水分预报模型[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 17 - 20.
ZHANG Jinsong, MENG Ping, GAO Jun, et al. Model for predicting soil water status based on the canopy-air temperature differential in apple orchard [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 17 - 20. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] MORAN M S, CLARKE T R, INOUE Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 246 - 263.
- [8] IDSO S B, JACKSON R D, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability [J]. Agricultural Meteorology, 1981, 24(1): 45 - 55.
- [9] 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]. Agricultural and Forest Meteorology, 1990, 53(1): 73 - 80.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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(5): 44 - 49.
CAI Huanjie, KANG Shaozhong, XIONG Yunzhang. A simplified model for calculating crop water deficit using canopy temperature[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(5): 44 - 49. (in Chinese)
- [13] ALDERFASI A A, NIELSEN D C. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat [J]. Agricultural Water Management, 2001, 47(1): 69 - 75.
- [14] 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.
ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, YANG Runya. Estimation of soil water content in winter wheat field based on CWSI and soil moisture correction coefficient [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 373 - 378. (in Chinese)
- [15] GONTIA N K, TIWARI K N. Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(10): 1144 - 1152.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] BIAN J, ZHANG Z, CHEN J, et al. Simplified evaluation of cotton water stress using high resolution unmanned aerial vehicle thermal imagery[J]. Remote Sensing, 2019, 11(3): 267.
- [19] 赵英时, 陈冬梅, 杨立明, 等. 遥感应用分析原理与方法[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [20] 隋洪智, 田国良, 李付琴. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用[J]. 遥感学报, 1997, 1(3): 220 - 224.
SUI Hongzhi, TIAN Guoliang, LI Fuqin. Two-layer model for monitoring drought using remote sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(3): 220 - 224. (in Chinese)
- [21] 夏清, 张振鑫, 王婷婷, 等. 基于改进 Sobel 算子的红外图像边缘提取算法[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1158 - 1161.
XIA Qing, ZHANG Zhenxin, WANG Tingting, et al. Edge extraction algorithm of infrared thermal image based on improved Sobel operator[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(10): 1158 - 1161. (in Chinese)
- [22] POBLETE T, ORTEGAFARIAS 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.
- [23] 张智韬, 边江, 韩文霆, 等. 剔除土壤背景的棉花水分胁迫无人机热红外遥感诊断[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 250 - 260.
ZHANG Zhitao, BIAN Jiang, HAN Wenting, et al. Diagnosis of cotton water stress using unmanned aerial vehicle thermal infrared remote sensing after removing soil background[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 250 - 260. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181028&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.028. (in Chinese)

- [24] 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.
- [25] 杨文攀,李长春,杨浩,等. 基于无人机热红外与数码影像的玉米冠层温度监测[J]. *农业工程学报*,2018, 34(17): 68–75.
YANG Wenpan, LI Changchun, YANG Hao, et al. Monitoring of canopy temperature of maize based on UAV thermal infrared imagery and digital imagery [J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(17): 68–75. (in Chinese)
- [26] 李石华,王金亮,毕艳,等. 遥感图像分类方法研究综述[J]. *国土资源遥感*,2005, 17(2):1–6.
LI Shihua, WANG Jinliang, BI Yan, et al. A review of methods for classification of remote sensing images [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2005, 17(2):1–6. (in Chinese)
- [27] 张立元,牛亚晓,韩文霆,等. 大田玉米水分胁迫指数经验模型建立方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 233–239.
ZHANG Liyuan, NIU Yaxiao, HAN Wenting, et al. Establishing method of crop water stress index empirical model of field maize[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 233–239. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180527&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.027. (in Chinese)
- [28] KHORSANDI A, HEMMAT A, MIREEI S A, et al. Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 204: 222–233.
- [29] 张振华,蔡焕杰,杨润亚. 红外遥感估算春小麦农田土壤含水率的试验研究[J]. *农业工程学报*,2006,22(3): 84–87.
ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, YANG Runya. Experiment on estimating soil moisture content of spring wheat field with infrared remote sensing [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006,22(3): 84–87. (in Chinese)
- [30] 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.
- [31] 张小雨,孙宏勇,王艳哲,等. 应用基于红外热画像技术的CWSI简化算法判断作物水分状态[J]. *中国农业气象*,2013, 34(5): 569–575.
ZHANG Xiaoyu, SUN Hongyong, WANG Yanzhe, et al. Application of a simplified method for estimating CWSI with infrared thermography[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(5): 569–575. (in Chinese)
- [32] 张仁华. 定量热红外遥感模型及地面试验基础[M]. 北京:科学出版社,2009.

(上接第 163 页)

- [23] KNIPPER K R, KUSTAS W P, ANDERSON M C, et al. Evapotranspiration estimates derived using thermal-based satellite remote sensing and data fusion for irrigation management in California vineyards[J]. *Irrigation Science*, 2019, 37(3): 431–449.
- [24] KUSTAS W P, DAUGHTRY C S T. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 49(3): 205–223.
- [25] RIBEIRO-GOMES K, HERNÁNDEZ-LÓPEZ D, ORTEGA J, et al. Uncooled thermal camera calibration and optimization of the photogrammetry process for UAV applications in agriculture[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2173.
- [26] SAGAN V, MAIMAITIJANG M, SIDIKE P, et al. UAV-based high resolution thermal imaging for vegetation monitoring, and plant phenotyping using icl 8640 p, flir vue pro r 640, and thermomap cameras[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 330.
- [27] AASEN H, BURKART A, BOLTEN A, et al. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: from camera calibration to quality assurance [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 108: 245–259.
- [28] ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS [C]//FREDEN S C,MERCANTI E P, BECKER M A. Third Earth Resources Technology Satellite – 1 Symposium. Volume I: Technical Presentations. Section A. NASA SP–351,1973:309–317.
- [29] 林兰芬,王瑞松,于鹏华. 基于 GIS 的农田小气候环境可视监测系统[J/OL]. *农业机械学报*,2015,46(3):254–260.
LIN Lanfen, WANG Ruisong, YU Penghua. GIS based visual monitoring system of farmland microclimate environment [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(3):254–260. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150337&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.037. (in Chinese)
- [30] SOBRINO J A, COLL C, CASELLES V. Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA – 11 AVHRR channels 4 and 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 38(1): 19–34.
- [31] GOETZ S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site[J]. *International Journal of remote sensing*, 1997, 18(1): 71–94.
- [32] DENG Y, WANG S, BAI X, et al. Relationship among land surface temperature and LUCC, NDVI in typical karst area[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 641.