



张文旭, 祝丹凤, 崔静, 宋江辉, 史晓艳, 王金刚, 杨明凤, 王海江. 基于无人机热成像的棉花根域土壤水分含量估测研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(01): 40-52.

ZHANG Wenxu, ZHU Danfeng, CUI Jing, SONG Jianghui, SHI Xiaoyan, WANG Jingang, YANG Mingfeng, WANG Haijiang. Estimation of soil moisture content in cotton rhizosphere based on UAV thermal imaging[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(01): 40-52.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.01.04

基于无人机热成像的棉花根域土壤水分含量估测研究

张文旭¹ 祝丹凤¹ 崔静¹ 宋江辉¹ 史晓艳¹ 王金刚¹ 杨明凤² 王海江^{1*}

(1. 石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000;

2. 乌兰乌苏农业气象试验站, 新疆 石河子 832000)

摘要 为探究棉花冠层无人机热红外影像对根域土壤水分含量反演规律, 以棉花花铃期土壤水分作为研究对象, 利用小区水分胁迫控制试验和模型模拟的方法, 获取棉花花铃期在不同干旱胁迫天数下(灌水后第2、10和32天)的叶片含水量、根域各土层(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm)土壤相对含水量(Relative soil water content, RSWC), 同步获取无人机热红外影像数据, 通过将棉花冠层温度与叶片、大气温度结合构建差值温度指数(Difference temperature index, DTI), 比值温度指数(Ratio temperature index, RTI)和归一化差值温度指数(Normalized difference temperature index, NDTI), 选择与RSWC相关性在0.6以上的指标(冠层温度、冠-高温差、冠-均温差、DTI2、DTI3、NDTI2、NDTI3)构建不同土层水分含量估测模型, 并进行验证。结果表明: 1) 随干旱胁迫天数的增加, 棉花叶片含水量呈先升高后降低的趋势, 土壤相对含水量随干旱胁迫天数的增加逐渐降低; 2) 冠层温度协同叶片、大气温度构建的温度指数估测根域土壤水分含量精度要优于单一使用冠层温度, 具体表现为NDTI3>DTI3>DTI2>NDTI2>冠-均温差>冠-高温差>冠层温度; 3) 多元线性回归模型对棉花根域土壤含水量具有较高的估测精度, 其中干旱胁迫第2天对10~20 cm根域土层的估测精度最高, R^2 为0.600, RMSE为0.388; 第10天对20~30 cm根域土层的估测精度最高, R^2 为0.721, RMSE为0.267; 第32天对30~40 cm根域土层的估测精度最高, R^2 为0.918, RMSE为0.068。因此, 利用无人机热成像仪获取棉花冠层温度并结合叶片及大气温度, 可对作物根域土壤水分含量进行拟合估测, 对发展节水灌溉等土壤水分调控与管理技术具有现实意义。

关键词 棉花; 无人机; 冠层温度; 冠气温差; 土壤含水量

中图分类号 S153; S562

文章编号 1007-4333(2024)01-0040-13

文献标志码 A

Estimation of soil moisture content in cotton rhizosphere based on UAV thermal imaging

ZHANG Wenxu¹, ZHU Danfeng¹, CUI Jing¹, SONG Jianghui¹, SHI Xiaoyan¹,
WANG Jingang¹, YANG Mingfeng², WANG Haijiang^{1*}

(1. Agricultural College/ Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture, Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. Wulanwusu Agrometeorological Experiment Station, Shihezi 832000, China)

Abstract In order to explore the inversion law of soil moisture content in the cotton rhizosphere based on the thermal infrared UAV imaging, this study took cotton at the flowering and boll stage as research object, and used

收稿日期: 2023-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42161042); 石河子大学项目(RCZK20208)

第一作者: 张文旭(ORCID: 0009-0006-6550-4797), 硕士研究生, E-mail: 1598985046@qq.com

通讯作者: 王海江(ORCID: 0000-0003-1909-1865), 教授, 主要从事绿洲水土资源高效利用研究, E-mail: wanghaijiang@shzu.edu.cn

plot water stress control experiment and model simulation to obtain the leaf water content and the relative soil water content (RSWC) of each soil layer (0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50 cm) in the rhizosphere under different drought stress days (2nd, 10th and 32nd days after irrigation) at the flowering and boll stage of cotton, and thermal infrared image data of UAV on the 2nd, 10th and 32nd days of drought stress. The difference temperature index (DTI), ratio temperature index (RTI), normalized difference temperature index (NDTI) were constructed by combining cotton canopy temperature with leaf temperature and atmospheric temperature, and the indexes (canopy temperature, canopy-high temperature difference, canopy-average temperature difference, DTI2, DTI3, NDTI2, NDTI3) with a correlation of more than 0.6 with RSWC were selected to fit and verify the moisture content of different soil layers. The results showed that: 1) With the increase of drought stress days, the moisture content of cotton leaves showed a trend of first increasing and then decreasing, and the relative soil moisture content gradually decreased; 2) The precision of the temperature index constructed by canopy temperature with leaf temperature and atmospheric temperature to fit the rhizosphere soil water content was better than that of the single use of canopy temperature. The overall trend $NDTI3 > DTI3 > DTI2 > NDTI2 > \text{canopy-average temperature difference} > \text{canopy-high temperature difference} > \text{canopy temperature}$; 3) The multiple linear regression model had a high estimation accuracy for the soil moisture content of cotton rhizosphere, and the prediction accuracy of 10—20 cm rhizosphere soil layer on the 2nd day of drought stress was the highest (R^2 is 0.600, RMSE is 0.388); The prediction accuracy of 20—30 cm rhizosphere soil layer on the 10th day is the highest (R^2 is 0.721, RMSE is 0.267); and the prediction accuracy of 30—40 cm rhizosphere soil layer on the 32nd day is the highest (R^2 is 0.918, RMSE is 0.068). In conclusion, the cotton canopy temperature obtained by UAV thermal image combined with leaf temperature and atmospheric temperature can be used to fit and estimate soil moisture content in crop root domain, which has practical significance for the development of water-saving irrigation and other soil water regulation and management technologies.

Keywords cotton; UAV; canopy temperature; canopy-air temperature difference; soil moisture content

水分是土壤的重要组成部分,水分胁迫是限制作物生长发育、影响产量和品质最关键的非生物胁迫因素之一^[1]。新疆作为我国主要的棉产区,种植面积占全国总种植面积近90%^[2],由于棉花种植面积大,生育期用水时间集中,造成该地区生育期供水矛盾突出。因此,及时准确地获取棉花根域土壤水分含量对科学合理统筹水资源和作物高效灌溉具有重要意义^[3]。

传统的土壤水分测量方法如烘干法、中子仪法、电阻法等获取的数据样本代表范围有限,且实效性差。遥感技术则为大范围、实时测量土壤水分提供了新的解决方案^[4]。土壤水分通过影响蒸腾速率间接改变作物冠层温度,而冠层温度作为反映作物水分胁迫状况的重要指标,可以通过热红外遥感快速准确地获取^[5]。随着无人机遥感的快速发展,利用无人机平台搭载热红外成像仪快速获取作物冠层温度,进而判断作物水分胁迫状况逐渐成为热点^[6]。

在自然田间条件下,气温变化对作物蒸腾速率等生理活动有直接影响,仅考虑作物冠层信息的土

壤水分研究较为片面^[7]。为解决此问题,已有研究引入大气温度等参数对土壤水分状况进行估测。例如:徐烈辉等^[8]根据实测数据发现饱和水汽压差与冠气温差表现出较明显的负线性关系, $r=-0.727$;张智韬等^[9]利用冠气温差与覆盖度之比反演不同深度土壤含水率,验证集 R^2 最高达0.773;狄艳等^[10]用冠气温差作为判定小麦水分胁迫状况的指标较冠层温度和冠气温度比更显著;Liu等^[11]利用基于冠气温差的作物水分胁迫指数(Crop water stress index, CWSI)评估森林生态系统的水分状况,发现CWSI与根区土壤水分含量呈显著相关;Katimbo等^[12]研究表明CWSI因计算方法而异,每种方法所需阈值不同,因此结果存在较大差异。此外,由于难以精准获取CWSI中的干湿参考面,而且计算所需气象参数较为复杂,寻找其他反演土壤含水量的方法变得尤为重要^[5]。植被指数能够用来定性和定量评价植被覆盖及其生长活力,其中归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)和差值植被指数(Difference vegetation index, DVI)等在作

物生长状况的监测中表现较佳^[13],但在估测土壤水分含量时植被指数易受植被覆盖度影响,存在一定滞后性^[14]。近年来,通过植被指数和地表温度相结合来构建特征空间的方法,能够避免部分单独使用植被指数或地表温度的缺点,在土壤水分和干旱监测中被广泛使用^[15-16]。综上,作物冠层温度、叶片温度和大气温度与土壤-植物-大气连续体的水分循环过程密切相关,能否利用棉田温度指标结合植被指数构建新的土壤水分特征空间,对棉田根域不同土层深度水分的估测能力还有待进一步尝试。

花铃期作为棉花生长最旺盛的阶段,不仅是肥料和水分需求最多的时期,也是品质和产量形成的重要阶段^[17]。虽然冠气温差在估测作物水分胁迫状况方面已得到广泛应用,然而,目前利用作物冠层温度协同大气温度和叶片温度构建指数并与不同土层土壤相对含水量拟合的研究尚未见报道。因此,本研究拟以花铃期棉花为研究对象,利用无人机搭载热成像仪,对不同干旱胁迫程度棉花冠层温度进行快速估测,结合叶片、大气温度构建根域各土层相对含水量反演模型并进行验证,以期为棉花大面积覆盖条件下根域土壤含水量无损监测提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验田位于乌兰乌苏国家一级农业气象试验站(44°17'N,85°49'E),海拔468.5 m。该区域位于准噶尔盆地南缘,天山北坡中心位置,属温带大陆性气候,冬季长而严寒,夏季短而炎热,年平均气温7.4℃,日照时间约2 862.1 h,无霜期约180 d,年降水量125 mm,年蒸发量1 604.9 mm。试验站配备大型电动防雨棚用于遮雨,土壤类型为灰漠土,土壤质地为中壤土,有机质19.0 g/kg、全氮1.25 g/kg、全磷2.04 g/kg、碱解氮78.0 mg/kg、速效磷21.5 mg/kg、速效钾315 mg/kg。

1.2 试验设计

棉花品种选用当地大田种植品种新陆早78号,于2022年4月26日播种,5月2日出苗。试验小区面积5.0 m×2.5 m,小区周围采用浆砌砖墙与相邻小区隔离,以防止水分相互干扰。播种管理方式同大田模式如图1所示:采用膜下滴灌,一膜三管六行,膜宽215 cm,行距配置66 cm,株距10 cm,滴灌带间距76 cm。

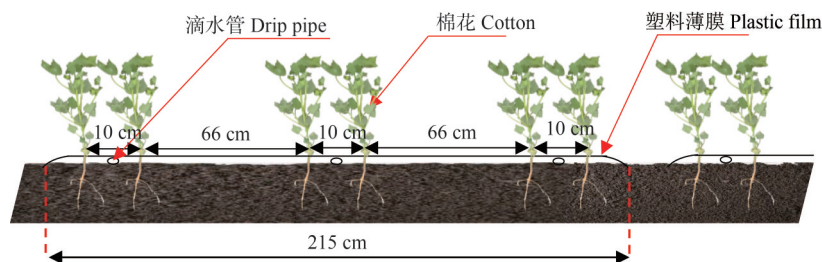


图1 试验小区株行距配置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plant and row spacing configuration in the experimental plot

在棉花生长需水关键生育期花铃期开展不同干旱胁迫田间控制试验。统计分析近10年(2011—2021年)当地棉花种植模式和灌溉量,确定棉花花铃期每次平均灌溉量为750 m³/hm²,设置5个水分梯度,分别为:T30(30%平均灌溉量,225 m³/hm²)、T50(50%平均灌溉量,375 m³/hm²)、T70(70%平均灌溉量,525 m³/hm²)、T90(90%平均灌溉量,675 m³/hm²)、CK(平均灌溉量,750 m³/hm²),每个处理重复3次。试验在花铃期7月14日进行灌溉,之后不再进行补充灌溉,利用遮雨棚防止自然降雨影响。分别在灌溉后第2天(7月16日)、第7天(7月21日)、第10天(7月24日)、第14天(7月28日)、第24

天(8月7日)、第32天(8月15日)采集棉花叶片和土壤样品。

1.3 样品采集及数据处理

1.3.1 土壤水分和叶片水分

土壤水分采用土钻获取0~10、10~20、20~30、30~40和40~50 cm共5个土层样品,每个小区采集3个样点,土壤去除石块等杂质后放入铝盒,带入室内测定鲜土重,在烘箱105℃下烘干24 h以上直至恒重,随后称其干重和铝盒重。在播种前采用环刀法进行田间持水量的测定,0~10、10~20、20~30、30~40和40~50 cm土层田间持水量分别为22.1%、24.8%、24.5%、27.8%、24.1%。土壤相对含水量

能表现出作物生长在土壤中有有效水分的含量,而绝对含水量只能表现出土壤中的水分是多少,故本试验土壤水分采用土壤相对含水量(Relative soil water content,RSWC)来衡量,计算公式如下:

土壤相对含水量=

$$\text{土壤含水量}/\text{田间持水量} \times 100\% \quad (1)$$

叶片含水量测定在每个小区采集3株长势均匀的代表性植株,称取叶片鲜重,然后置于烘箱杀青烘干至恒重称取叶片干重,叶片含水量(Leaf water content,LWC)计算公式如下:

$$\text{叶片含水量} = (\text{叶片鲜重} - \text{叶片干重}) / \text{叶片鲜重} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.2 描述性统计分析

运用Excel软件对研究区不同土层深度土壤相对含水量进行统计分析,结果见表1。采集干旱胁迫第2、10和32天共3次无人机影像数据,同步获取各处理小区土壤、植株样品,每次采集15个小区,每小区重复3次,总试验数据135个。利用间隔取值法从中选取2/3的样本($n=90$)作为建模集,1/3的样本($n=45$)作为验证集,最终建模集与验证集的样本比例为2:1,变异系数10%~100%,属于中等变异,说明数据离散程度较高,保证了建模集样本与验证集样本在一定范围内的均匀性,有利于评估模型的整体性能^[18]。

1.3.3 叶片温度(T_L)

叶片温度采用美国Licor公司生产的LI-6400便携式光合仪测定,于当日11:00—13:00待棉花叶片气孔打开后测定,每个小区随机选取10株长势基本一致的植株进行测量,取平均值作为该小区棉花叶片温度。

1.3.4 冠层温度(T_C)、冠-高温差($T_{C-\text{Max}}$)和冠-均温差($T_{C-\text{Mean}}$)

通过无人机搭载WIRIS 2nd 640型热成像仪与高分辨率可见光相机,在干旱胁迫第2、10和32天获取的棉田光谱数据,影像采集时间为13:00—14:00,天气晴朗无风,视野良好,无人机飞行高度为50 m,WIRIS 2nd 640型热成像仪测温精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。飞行前对传感器进行调校,飞行时在研究区放置了配套的黑白板,无人机获取后的单景数据通过辐射定标、正射校正和影像拼接。

1)图像的拼接、校准、配准以及热红外图像温度校准。采用Pix4D mapper对无人机获取的田间

小区图像进行拼接,获得试验小区完整图像,并利用几何控制板作为参照物进行几何校正;利用ENVI 5.3软件选取可见光图像和热红外影像中较明显地物进行图像配准;田间拍摄影像时,放置近似黑体的一盆 0°C 冰水混合物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及温度信息的获取。利用可见光阈值法对可见光图像中棉花植株冠层与土壤进行分类后,提取的棉花冠层矢量文件叠加于配准过的热红外图像中,对热红外图像做掩膜处理,通过掩膜提取可得到棉花冠层的温度^[20]。本研究分别对15个采样小区做掩膜处理,得到每个采样小区像元对应的温度,统计可得此小区冠层温度平均值。

3)冠-高温差及冠-均温差的计算。大气温度数据由气象站测定,与无人机飞行时间保持一致。结合气温数据,计算冠-高温差和冠-均温差,计算公式如下:

$$\text{冠-高温差} = \text{冠层温度} - \text{日最高温度} \quad (3)$$

$$\text{冠-均温差} = \text{冠层温度} - \text{日平均温度} \quad (4)$$

4)温度指数构建。参考遥感监测中常用的差值植被指数(Difference vegetation index,DVI)、比值植被指数(Ratio vegetation index,RVI)、归一化差值植被指数(Normalized difference vegetation index,NDVI)^[20],尝试将不同波段替换为温度,构建差值温度指数(Difference temperature index,DTI)、比值温度指数(Ratio temperature index,RTI)、归一化差值温度指数(Normalized difference temperature index,NDTI),计算公式如表2所示。

1.4 模型建立及验证

通过对叶片温度、冠层温度、冠-高温差、冠-均温差、DTI1、DTI2、DTI3、RTI1、RTI2、RTI3、NDTI1、NDTI2、NDTI3与土壤相对含水量进行相关性分析,筛选出显著和极显著相关的7个指标(冠层温度、冠-高温差、冠-均温差、DTI2、DTI3、NDTI2、NDTI3)分别建立根域各土层相对含水量的非线性模型,并进一步综合以上7个指数建立多元线性回归模型。模型精度采用决定系数(Coefficient of determination, R^2)和均方根误差(Root mean square error, RMSE)作为评价指标, R^2 越趋向1,说明模型的估测能力越稳定, RMSE可以反映模型的估测能力, RMSE越小,模型的估算能力越强。

表1 各土层土壤相对含水量的描述性统计分析
Table 1 Descriptive statistical analysis of soil relative water content of each soil layer

干旱胁迫天数/d	土层/cm	总样本												分样本																				
		Total sample						Modeling set						Validation set						Sub-sample														
		最小值			最大值			平均值			标准偏差			变异系数			样本数			最小值			最大值			平均值			标准偏差			变异系数		
		Min	Max	Mean	SD	CV	Number of sample	Min	Max	Mean	SD	CV	Number of sample	Min	Max	Mean	SD	CV	Number of sample	Min	Max	Mean	SD	CV	Number of sample	Min	Max	Mean	SD	CV	Number of sample			
Drought stress day	Soil layer	0~10	0.62	0.99	0.88	0.11	0.13	30	0.63	0.99	0.89	0.12	0.13	15	0.62	0.99	0.85	0.12	0.14	15	0.62	0.99	0.85	0.12	0.14	15	0.62	0.99	0.85	0.12	0.14			
		10~20	0.53	0.99	0.78	0.11	0.14	30	0.55	0.99	0.79	0.11	0.14	15	0.53	0.98	0.76	0.10	0.13	15	0.53	0.98	0.76	0.10	0.13	15	0.53	0.98	0.76	0.10	0.13			
		20~30	0.52	0.97	0.77	0.10	0.13	30	0.52	0.97	0.78	0.10	0.13	15	0.53	0.97	0.75	0.10	0.13	15	0.53	0.97	0.75	0.10	0.13	15	0.53	0.97	0.75	0.10	0.13			
		30~40	0.52	0.93	0.76	0.10	0.13	30	0.53	0.93	0.77	0.09	0.12	15	0.52	0.93	0.74	0.10	0.14	15	0.52	0.93	0.74	0.10	0.14	15	0.52	0.93	0.74	0.10	0.14			
		40~50	0.47	0.85	0.69	0.09	0.13	30	0.48	0.85	0.70	0.09	0.13	15	0.47	0.85	0.67	0.10	0.15	15	0.47	0.85	0.67	0.10	0.15	15	0.47	0.85	0.67	0.10	0.15			
2	0~50	0~10	0.55	0.93	0.77	0.10	0.13	30	0.55	0.92	0.79	0.09	0.11	15	0.55	0.93	0.75	0.09	0.12	15	0.55	0.93	0.75	0.09	0.12	15	0.55	0.93	0.75	0.09	0.12			
		10~20	0.29	0.72	0.51	0.14	0.27	30	0.30	0.72	0.52	0.14	0.27	15	0.29	0.70	0.50	0.13	0.26	15	0.29	0.70	0.50	0.13	0.26	15	0.29	0.70	0.50	0.13	0.26			
		20~30	0.31	0.77	0.52	0.13	0.25	30	0.32	0.77	0.52	0.13	0.25	15	0.31	0.76	0.51	0.13	0.25	15	0.31	0.76	0.51	0.13	0.25	15	0.31	0.76	0.51	0.13	0.25			
		30~40	0.28	0.75	0.50	0.12	0.24	30	0.29	0.75	0.50	0.12	0.24	15	0.28	0.77	0.50	0.12	0.24	15	0.28	0.77	0.50	0.12	0.24	15	0.28	0.77	0.50	0.12	0.24			
		40~50	0.43	0.82	0.58	0.10	0.17	30	0.44	0.82	0.59	0.10	0.17	15	0.43	0.80	0.57	0.10	0.18	15	0.43	0.80	0.57	0.10	0.18	15	0.43	0.80	0.57	0.10	0.18			
10	0~50	0~10	0.29	0.77	0.54	0.09	0.17	30	0.30	0.77	0.54	0.10	0.19	15	0.29	0.76	0.52	0.10	0.19	15	0.29	0.76	0.52	0.10	0.19	15	0.29	0.76	0.52	0.10	0.19			
		10~20	0.34	0.77	0.54	0.11	0.20	30	0.35	0.77	0.55	0.11	0.20	15	0.34	0.77	0.53	0.11	0.21	15	0.34	0.77	0.53	0.11	0.21	15	0.34	0.77	0.53	0.11	0.21			
		20~30	0.18	0.45	0.26	0.13	0.50	30	0.19	0.45	0.27	0.12	0.44	15	0.18	0.43	0.27	0.11	0.41	15	0.18	0.43	0.27	0.11	0.41	15	0.18	0.43	0.27	0.11	0.41			
		30~40	0.19	0.49	0.29	0.10	0.34	30	0.20	0.49	0.29	0.11	0.38	15	0.19	0.49	0.28	0.10	0.36	15	0.19	0.49	0.28	0.10	0.36	15	0.19	0.49	0.28	0.10	0.36			
		40~50	0.17	0.51	0.30	0.10	0.33	30	0.18	0.51	0.30	0.10	0.33	15	0.18	0.48	0.29	0.10	0.34	15	0.18	0.48	0.29	0.10	0.34	15	0.18	0.48	0.29	0.10	0.34			
32	0~50	0~10	0.17	0.53	0.28	0.10	0.36	30	0.17	0.53	0.28	0.09	0.32	15	0.18	0.53	0.28	0.08	0.29	15	0.18	0.53	0.28	0.08	0.29	15	0.18	0.53	0.28	0.08	0.29			
		10~20	0.13	0.53	0.31	0.08	0.26	30	0.13	0.53	0.31	0.08	0.26	15	0.13	0.53	0.31	0.08	0.26	15	0.13	0.53	0.31	0.08	0.26	15	0.13	0.53	0.31	0.08	0.26			
		20~30	0.18	0.54	0.29	0.10	0.34	30	0.18	0.54	0.29	0.09	0.31	15	0.19	0.43	0.29	0.09	0.31	15	0.19	0.43	0.29	0.09	0.31	15	0.19	0.43	0.29	0.09	0.31			
		30~40	0.18	0.99	0.41	0.21	0.51	90	0.19	0.99	0.40	0.23	0.58	45	0.18	0.99	0.41	0.22	0.54	45	0.18	0.99	0.41	0.22	0.54	45	0.18	0.99	0.41	0.22	0.54			
		40~50	0.19	0.99	0.43	0.19	0.44	90	0.20	0.99	0.44	0.21	0.48	45	0.19	0.98	0.43	0.21	0.49	45	0.19	0.98	0.43	0.21	0.49	45	0.19	0.98	0.43	0.21	0.49			
总计	Total	0~10	0.17	0.97	0.49	0.15	0.31	90	0.18	0.97	0.50	0.15	0.30	45	0.18	0.97	0.49	0.15	0.31	45	0.18	0.97	0.49	0.15	0.31	45	0.18	0.97	0.49	0.15	0.31			
		10~20	0.17	0.93	0.53	0.13	0.25	90	0.17	0.93	0.53	0.13	0.25	45	0.18	0.93	0.51	0.15	0.29	45	0.18	0.93	0.51	0.15	0.29	45	0.18	0.93	0.51	0.15	0.29			
		20~30	0.13	0.85	0.58	0.11	0.19	90	0.13	0.85	0.58	0.11	0.19	45	0.13	0.85	0.56	0.11	0.20	45	0.13	0.85	0.56	0.11	0.20	45	0.13	0.85	0.56	0.11	0.20			
		30~40	0.18	0.93	0.53	0.13	0.25	90	0.18	0.92	0.54	0.13	0.24	45	0.19	0.93	0.52	0.14	0.27	45	0.19	0.93	0.52	0.14	0.27	45	0.19	0.93	0.52	0.14	0.27			
		40~50	0.13	0.85	0.58	0.11	0.19	90	0.13	0.85	0.58	0.11	0.19	45	0.13	0.85	0.56	0.11	0.20	45	0.13	0.85	0.56	0.11	0.20	45	0.13	0.85	0.56	0.11	0.20			

表 2 温度指数及其计算公式

Table 2 Temperature index and its calculation formula

温度指数 Temperature index	计算公式 Calculation formula
差值温度指数 1 DTI1	叶片温度－冠层温度
差值温度指数 2 DTI2	叶片温度－(冠-高温差)
差值温度指数 3 DTI3	叶片温度－(冠-均温差)
比值温度指数 1 RTI1	叶片温度/冠层温度
比值温度指数 2 RTI2	叶片温度/(冠-高温差)
比值温度指数 3 RTI3	叶片温度/(冠-均温差)
归一化差值温度指数 1 NDTI1	(叶片温度－冠层温度)/(叶片温度＋冠层温度)
归一化差值温度指数 2 NDTI2	[叶片温度－(冠-高温差)]/[叶片温度＋(冠-高温差)]
归一化差值温度指数 3 NDTI3	[叶片温度－(冠-均温差)]/[叶片温度＋(冠-均温差)]

2 结果与分析

2.1 棉花叶片及根域土壤水分含量变化特征

2.1.1 棉花叶片含水量和叶片温度变化趋势

棉花花铃期叶片含水量和叶片温度随干旱胁迫天数变化趋势如图 2 所示。由图 2(a)可知：各处理

下叶片含水量(LWC)随干旱胁迫天数的增加均呈现先升高后降低的趋势,在第 7 天达到峰值,从第 14 天起,灌溉量越低,棉花 LWC 下降幅度越大,CK 和 T90 最大分别为 79.05% 和 79.31%。不同灌水处理下,LWC 随灌水量的减少而降低,即 CK>T90>T70>T50>T30,随干旱胁迫天数的增加,各处理间

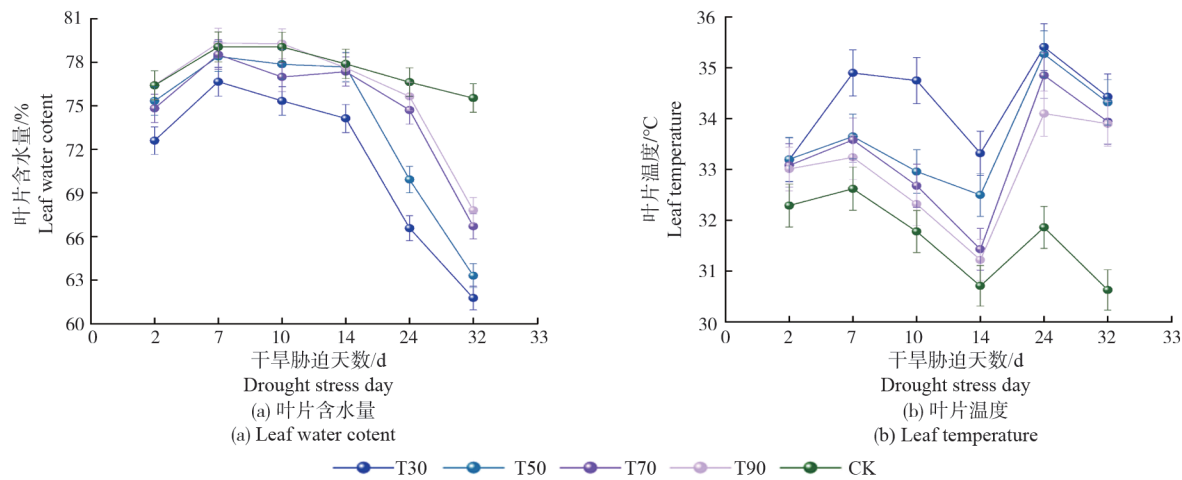


图 2 叶片含水量和叶片温度随干旱胁迫天数变化趋势图

Fig. 2 Trend chart of changes in leaf moisture content and leaf temperature with days of drought stress

的差异逐渐增大,最小值出现在干旱胁迫32天的T30,LWC仅为61.77%。由图2(b)可知:叶片温度随干旱胁迫天数的增加没有呈现很好的规律,第14天叶片温度降低与当日气温较低有关;各处理间以CK处理下的叶片温度最低,随灌溉量的减少而升高,即 $CK < T90 < T70 < T50 < T30$ 。图2(a)和图2(b)对照可以看出,叶片温度并没有随LWC的升高而降低,说明气温对叶片温度影响较大。

2.1.2 土壤各土层相对含水量变化趋势

各处理下0~50 cm不同土层土壤相对含水量随干旱胁迫天数的变化趋势如图3所示。可见:不同土层土壤相对含水量(RSWC)在灌水后第2天最高,随后逐渐降低,0~10 cm和10~20 cm土层在第2~14天下降幅度较大,20~30 cm和30~40 cm土层变化趋势相似,在干旱胁迫第7~10天下降幅度最大,14~32天下降幅度较缓。灌水后0~10 cm、10~20 cm土

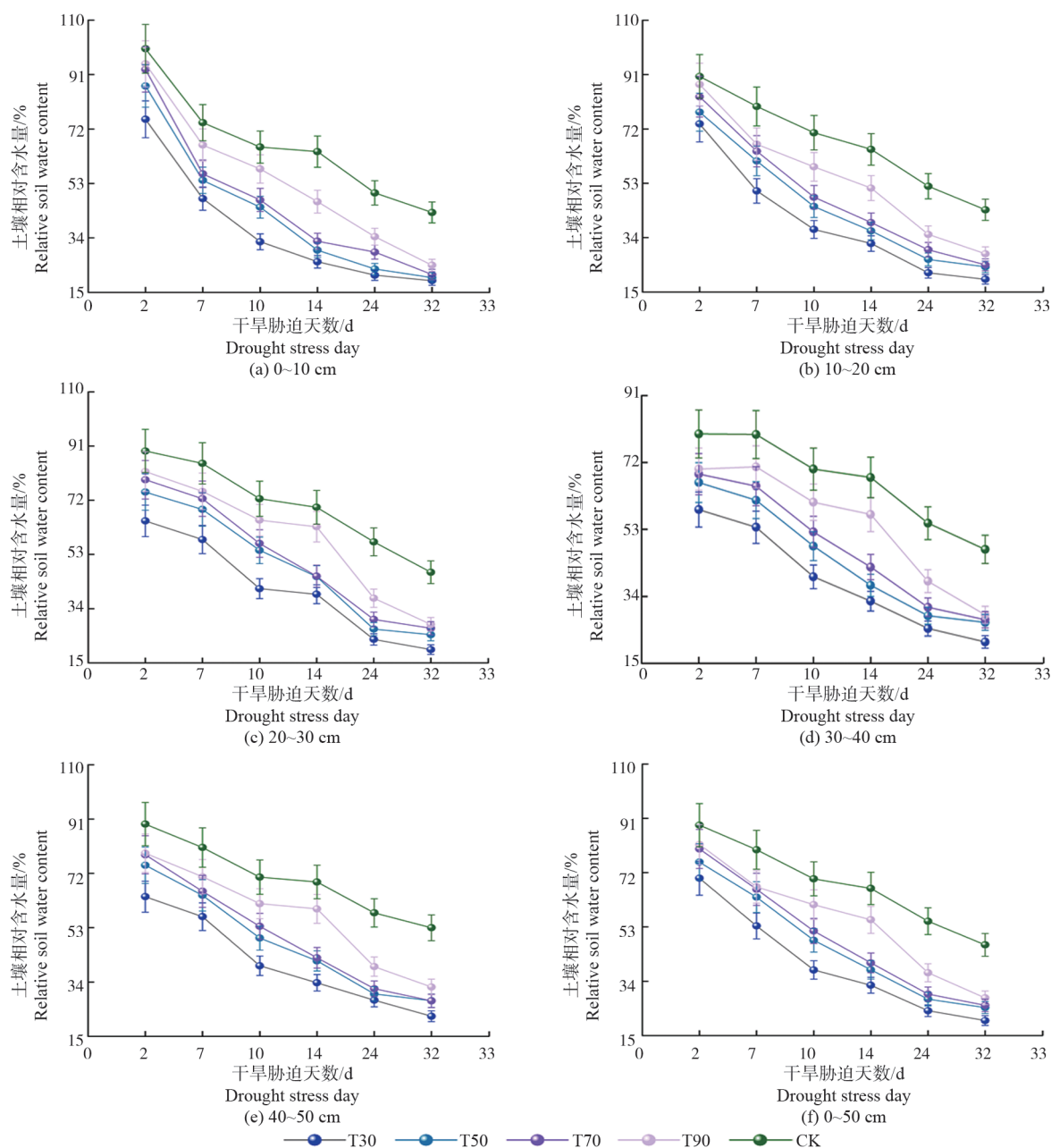


图3 各土层土壤相对含水量随生育期变化趋势

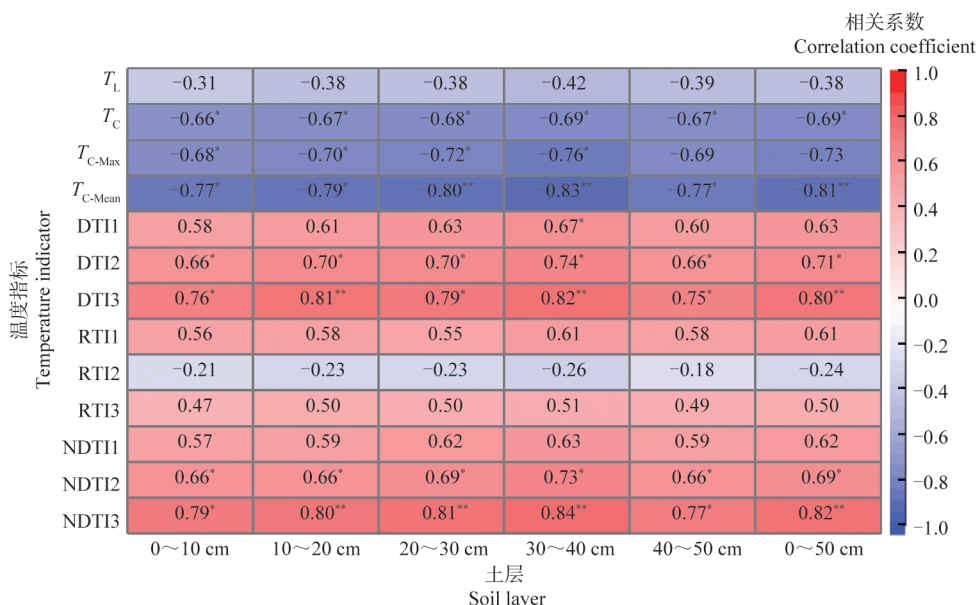
Fig. 3 Trend of relative soil moisture content of each soil layer changing with the growth period

层 RSWC 下降速率较深层土壤快。各处理间差异显著, $CK > T90 > T70 > T50 > T30$, $T70$ 和 $T50$ 处理下 RSWC 在各土层中差异均较小, 各处理间的水分差距随着土层深度的增加而逐渐缩小, $T30$ 处理下的 RSWC 与其他处理差距较大, 最小值出现在干旱胁迫第 32 天的 $0 \sim 10$ cm 土层, 为 19.09%。干旱胁迫第 32 天时, 各土层 RSWC 由高至低总体呈现 $40 \sim 50$ cm 土层 $> 20 \sim 30$ cm 土层 $> 10 \sim 20$ cm 土层 $> 30 \sim 40$ cm 土层的规律, $30 \sim 40$ cm 土层变异系数最大(表 1)。

2.1.3 各指标与土壤含水量相关性分析

本研究将各温度指标与不同土层土壤相对含水量进行相关性分析, 结果如图 4 所示。可知: 叶片温度、冠层温度、冠-高温差、冠-均温差、RVI2 与各层土

壤相对含水量均呈负相关, 其余各指标(DTI1、DTI2、DTI3、RTI1、RTI3、NDTI1、NDTI2、NDTI3)与含水量均呈正相关。不同土层相关性表现为 $30 \sim 40$ cm 土层最高, 其次是 $0 \sim 50$ 、 $20 \sim 30$ 、 $10 \sim 20$ 和 $40 \sim 50$ cm。不同温度指标相比, NDTI3 与含水量相关性最高, 均在 0.77 以上, 与 $30 \sim 40$ cm 土层相对含水量的相关性高达 0.84; RTI2 相关性最低, 与土壤的含水量相关性大小 $0.1 \sim 0.3$; 总体来看, $NDTI3 > T_{C-Mean} > DTI3 > T_{C-Max} > DTI2 > NDTI2 > T_C > DTI1 > NDTI1 > RTI1 > RTI3 > T_L > RTI2$, 筛选出与不同土层土壤相对含水量呈显著或极显著相关的温度指标有冠层温度、冠-高温差、冠-均温差、DTI2、DTI3、NDTI2、NDTI3, 可进行根域土壤水分含量估测模型的构建。



相关系数表示相关程度, 红色表示正相关, 蓝色表示负相关, 颜色越深相关性越强。*表示在 0.05 水平差异显著; **表示在 0.01 水平差异显著。

The correlation coefficient represents the degree of correlation, red represents positive correlation, blue represents negative correlation, and the darker the color, the stronger the correlation. * shows significant correlation at the level of 0.05; ** shows significant correlation at the level of 0.01.

图 4 各温度指标与不同土层土壤相对含水量的相关性热图

Fig. 4 Heat map of correlation between various temperature indicators and relative soil water content in different soil layers

2.3 土壤相对含水量估测模型精度

本研究分别利用各温度指标建立不同土层土壤相对含水量的非线性模型, 并综合这 7 个温度指标建立多元线性回归模型, 各胁迫阶段的模型精度如图 5 所示。可知: 干旱胁迫第 2 天的模型精度最低, R^2 低于 0.6, 精度最高的土层为 $10 \sim 20$ cm; 干旱胁迫第 10 天的模型精度有所提高, $20 \sim 30$ cm 土层含水量的估测模型精度最高, R^2 为 0.690, RMSE 为 0.298; 干旱

胁迫第 32 天的建模效果最优, R^2 在 $0.651 \sim 0.918$, RMSE 为 $0.068 \sim 0.338$, 对各土层含水量的估测精度表现为 $30 \sim 40 > 20 \sim 30 > 10 \sim 20 > 0 \sim 50 > 0 \sim 10 > 40 \sim 50$ cm; 全花铃期模型精度略有降低, $0 \sim 50$ cm 土层相对含水量的估测精度仅次于 $30 \sim 40$ cm, 整体规律和干旱胁迫第 32 天时基本一致。将不同温度指标所建模型精度进行对比, 4 种温度指数的模型精度均高于冠气温差和冠层温度, 具体表现为

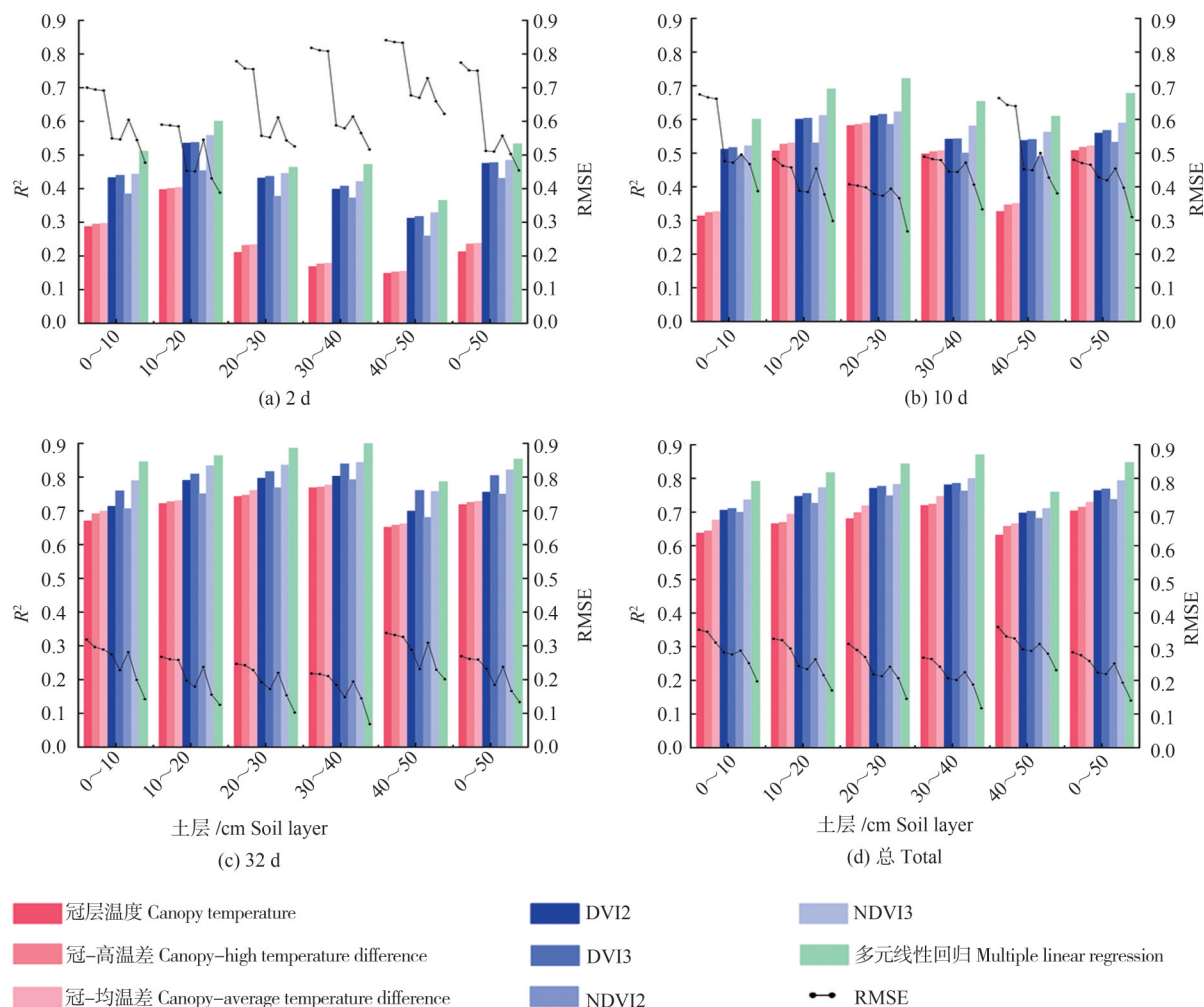


图5 不同干旱胁迫天数下根域各土层土壤相对含水量估测模型精度

Fig. 5 Accuracy of estimation model for relative soil water content in different soil layers in the rhizosphere under different drought stress days

NDTI3>DTI3>DTI2>NDTI2>冠-均温差>冠-高温差>冠层温度。多元线性回归模型在棉花各干旱胁迫阶段的估测精度均为最优。

2.4 土壤根域水分模型验证

分别利用同时期采集的不同土层土壤水分数据对建模效果最优的多元回归模型进行精度验证,结果表明第2、10、32天和全生育期模型验证精度较建模时均略有降低:干旱胁迫第2天的模型验证精度最低, R^2 最高为0.546;第10天有所升高, R^2 为0.560~0.691,第32天时验证精度最高。模型验证结果如图6所示。可知:全花铃期各土层土壤相对含水量模型验证精度略低于第32天:干旱胁迫第32天时0~50 cm各土层土壤相对含水量的 R^2 在0.712~0.888, RMSE在0.322~0.421,模型稳健性较好,其中,30~

40 cm土层验证精度最高, R^2 为0.888, RMSE为0.322。

3 讨论

土壤水是干旱、半干旱地区作物需水的主要来源,土壤水分含量的大面积、精准监测是制定农田灌溉制度和缓解作物干旱胁迫的必要前提^[4]。冠层温度作为表征作物生理生态过程及能量平衡状况的重要参数之一,是指示土壤水分状况的潜在指标^[20]。何莹莹等^[21]将3种植物的冠层温度与土壤含水量进行相关性分析,相关系数为0.39~0.50,本研究直接利用冠层温度进行土壤含水量估测时, R^2 为0.28~0.67,可以发现基于冠层温度对土壤含水量进行估测时模型精度较差,这可能是因为棉花冠层温度受

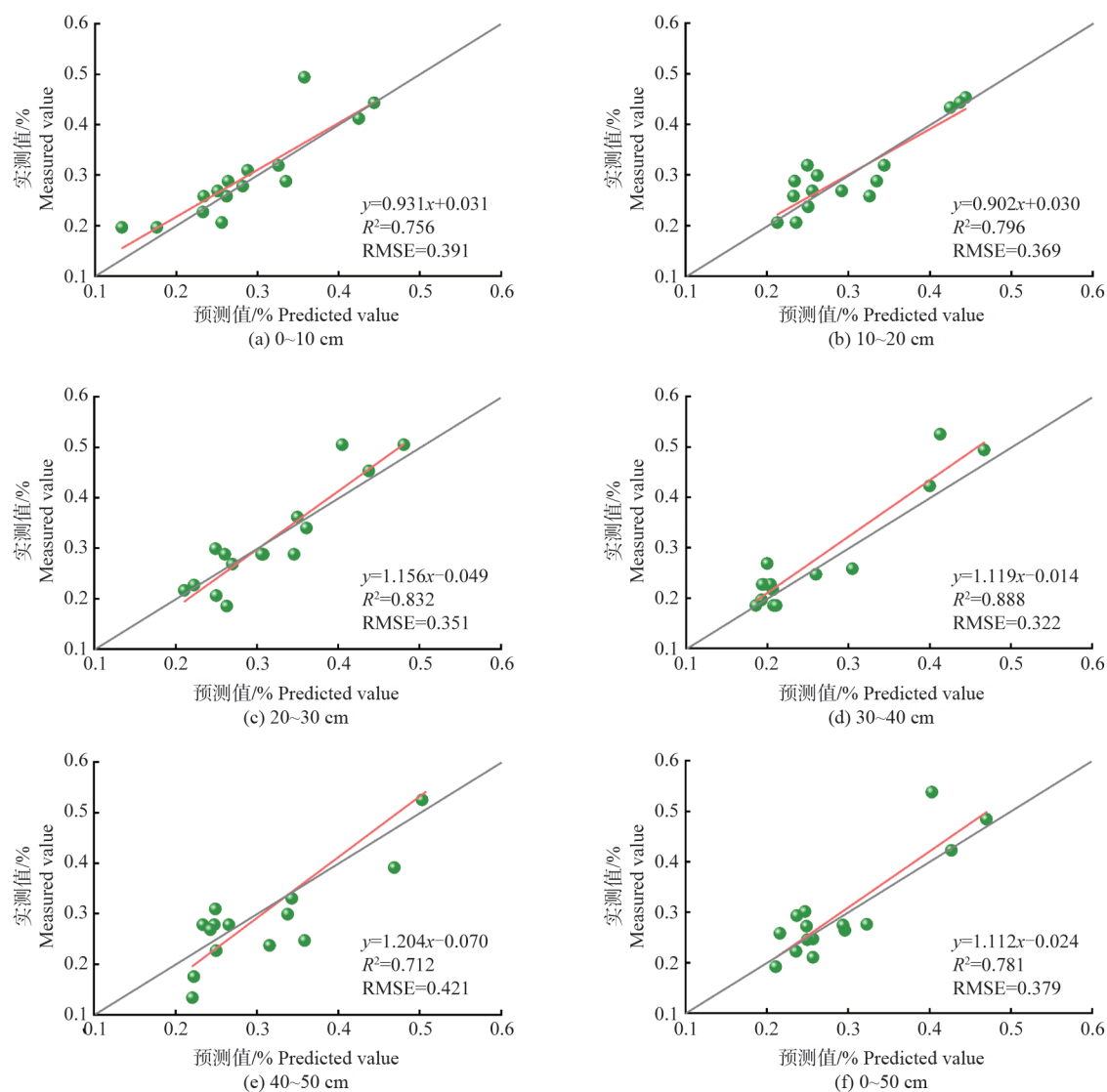


图 6 干旱胁迫第 32 天棉花根域土壤水分估测模型精度验证

Fig. 6 Verification of the accuracy of the cotton root soil moisture estimation model on the 32nd day of drought stress

太阳辐射、大气温度和土壤温度的综合作用,仅仅依靠冠层温度难以反映作物群体温度变化,对农田土壤水分的反演能力和模型稳定性有限^[22]。通过结合大气温度和冠层温度可以有效提高对土壤含水量的估测精度,刘婵等^[23]研究表明番茄 10~20 cm 土层土壤含水量与冠气温差的相关系数为 0.486, 20~30 cm 土层为 0.808, 10~30 cm 土层为 0.706。本研究利用冠-高温差和冠-均温差估测土壤水分含量,其精度相比冠层温度分别提高了 10.91% 和 11.86%。这是由于热量会随大气与作物发生热传递,冠层温度的变化与气温具有良好的线性关系,因此冠气温差对作物水分状况的变化反应更加灵敏^[24]。为进一步

探究叶片温度、冠层温度和大气温度对不同深度根域土壤含水量的反演效果,本研究基于以上三者建立温度指数模型,与冠气温差相比反演模型的 R^2 整体由 0.287~0.746 提高到 0.384~0.799, RMSE 由 0.240~0.700 降低到 0.187~0.604,显著提高了无人机热红外遥感对农田土壤水分的估测精度。这可能是由于新建温度指数通过不同的数值统计运算,可以综合分析土壤水分相关的叶片温度、大气温度、冠层温度信息,有效提高对根域土壤水分的估测精度^[22],其中部分指数(DTI1、RTI1、RTI2、RTI3、NDTI1)未能与土壤相对含水量表现出显著相关关系,可能是由于其计算过程中忽略了大气温度的影

响。由此可见,通过协同叶片温度、冠层温度和大气温度建立的温度指数能有效提高无人机热红外遥感对根域土壤含水量的估测精度,从而解决利用单一冠层温度监测农田土壤水分信息精度不高的问题。

不同深度土壤水分含量会存在一定差异,本研究发现,随干旱胁迫时间的延长,土壤水分最优估测模型精度提升,对应土层逐渐加深,且与干旱胁迫条件下水分含量相对较低的土层一致,即灌水后第2天为10~20 cm土层估测精度最高,第10天为20~30 cm,第32天为30~40 cm,其原因主要是膜下滴灌棉花根系主要分布在0~40 cm土层^[25],灌水后第2天时10~20 cm土层含水量较高,根系在该土层活动旺盛,对土壤含水量变化更敏感,从而表现出最佳的反演效果,此后,随干旱胁迫天数的增加,土壤水分含量表现出20~30、30~40 cm土层较低的趋势,作物根系吸收利用主要集中在该土层,因此该土层估测精度最高。杨帅^[6]和张智韬等^[26]分别在玉米拔节期和灌浆期反演根域土壤含水率,发现监测精度随土壤深度先增加后减小,在0~30 cm处监测精度最大,这可能因为玉米根系主要分布在0~30 cm土层深度处^[26],与本研究结果基本一致。值得注意的是,本研究中0~10和40~50 cm深度的土壤含水量与各指数的相关系数较小,可能是因为0~10 cm浅层土壤水分易受太阳辐射、气温、风速等外界环境条件变化影响,土壤水分变化快,不易监测^[27],40~50 cm土层吸水根系的根长密度和根表面积较小^[28],且土壤内部环境情况越发复杂,间接通过植物冠层解译土壤水分的能力逐渐下降^[27],导致40~50 cm土层RSWC的反演效果不佳。由此可见,通过新建温度指数,综合分析土壤水分相关的大气温度、叶片温度以及冠层温度信息,可以实现对棉田水分胁迫状况的快速、精准监测。本研究仅基于冠层温度、叶片温度和大气温度对棉花根域土壤水分状况进行估测,其他因素如光照、风速、冠层密度等与土壤含水量也密切相关,因此,后续的研究中,将在本研究的基础上逐步深入,进一步对棉花根域土壤水分胁迫状况进行探究,优化模型精度。

4 结 论

为研究棉花花铃期不同干旱胁迫天数根域土壤水分和叶片水分变化趋势,利用无人机热红外遥感影像结合大气温度、叶片温度估测构建温度指数,筛

选土壤水分敏感指标并构建不同土层反演模型,主要结论如下:

1)随棉花干旱胁迫天数的增加,棉花叶片含水量先升高后降低,且各处理间差距逐渐增大,土壤相对含水量逐渐下降,土层越深含水量变化幅度越小。

2)冠温协同叶温、气温建立的温度指数与土壤相对含水量显著相关。模型精度表现为NDTI3>DTI3>DTI2>NDTI2>冠-均温差>冠-高温差>冠层温度,多元线性回归模型可有效提高估测精度, R^2 在30~40 cm土层最高,为0.918, RMSE为0.068。

3)模型估测精度最高的土层随干旱胁迫天数的增加而逐渐加深。第2天为10~20 cm土层最高, R^2 为0.600, RMSE为0.388;第10天为20~30 cm土层最高, R^2 为0.721, RMSE为0.267;第32天为30~40 cm土层最高, R^2 为0.918, RMSE为0.068;全花铃期模型精度最高的土层为30~40 cm, R^2 为0.870, RMSE为0.117。

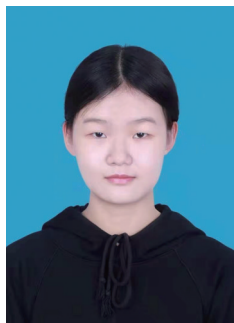
参考文献 References

- [1] Gerhards M, Schlerf M, Mallick K, Udelhoven T. Challenges and future perspectives of multi-/hyperspectral thermal infrared remote sensing for crop water-stress detection: A review[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1240
- [2] 国家统计局. 国家统计局关于2022年棉花产量的公告[N]. 中国信息报, 2022-12-27(1)
National Bureau of Statistics. Announcement of the National Bureau of Statistics on cotton production in 2022[N]. *China Information*, 2022-12-27(1) (in Chinese)
- [3] 王佳儿, 肖悦, 王志昊, 郑长娟, 王勇, 白旭乾, 于广多, 张智韬. 剔除土壤背景对反演玉米根域土壤含水率的影响研究[J]. 节水灌溉, 2021(12): 81-86, 93
Wang J E, Xiao Y, Wang Z H, Zheng C J, Wang Y, Bai X Q, Yu G D, Zhang Z T. Effect of removing soil background on inversion of soil moisture content in maize root zone[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(12): 81-86, 93 (in Chinese)
- [4] 张延成. 干旱半干旱地区植被覆盖地表土壤水分反演研究[D]. 西安: 长安大学, 2019
Zhang Y C. Study on inversion of soil moisture on vegetation covered surface in arid and semi-arid areas[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019 (in Chinese)
- [5] 徐洪刚, 陈震, 程千, 李鹏, 范永申. 无人机热红外反演土壤含水率的方法[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(11): 1181-1188
Xu H G, Chen Z, Cheng Q, Li P, Fan Y S. Inversion of soil moisture content based on UAV thermal infrared image[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(11): 1181-1188 (in Chinese)
- [6] 杨帅, 陈俊英, 周永财, 崔文轩, 杨宁. 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 S, Chen J Y, Zhou Y C, Cui W X, Yang N. 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 (in Chinese)
- [7] 于广多. 基于无人机遥感的夏玉米田间土壤含水率监测指数研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022
- Yu G D. Study on monitoring index of soil moisture content in summer maize field based on UAV remote sensing[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022 (in Chinese)
- [8] 徐烈辉, 牟汉书, 王景才, 周明耀. 基于冠气温差的淮北地区水稻日需水量估算模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 119-125
- Xu L H, Mou H S, Wang J C, Zhou M Y. Estimating daily water requirement of rice in Huaibei region using temperature difference between canopy and ambient air[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(3): 119-125 (in Chinese)
- [9] 张智韬, 许崇豪, 谭丞轩, 边江, 韩文霆. 覆盖度对无人机热红外遥感反演玉米土壤含水率的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 213-225
- Zhang Z T, Xu C H, Tan C X, Bian J, Han W T. Influence of coverage on soil moisture content of field corn inversed from thermal infrared remote sensing of UAV[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 213-225 (in Chinese)
- [10] 狄艳, 高懋芳, 李强, 游炯. 不同灌溉梯度下冬小麦冠层温度与土壤水分关系研究[J]. 中国农业信息, 2021, 33(2): 13-23
- Di Y, Gao M F, Li Q, You J. Study on the relationship between winter wheat canopy temperature and soil moisture under different irrigation gradients[J]. *China Agricultural Informatics*, 2021, 33(2): 13-23 (in Chinese)
- [11] Liu L Q, Gao X, Ren C H, Cheng X F, Zhou Y, Huang H, Zhang J S, Ba Y J. Applicability of the crop water stress index based on canopy-air temperature differences for monitoring water status in a cork oak plantation, Northern China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 327: 109226
- [12] Katimbo A, Rudnick D R, DeJonge K C, Lo T H, Qiao X, Franz T E, Nakabuye H N, Duan J M. Crop water stress index computation approaches and their sensitivity to soil water dynamics [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 266: 107575
- [13] 靳宁, 张东彦, 李振海, 何亮. 基于多光谱卫星模拟波段反射率的冬小麦水分状况评估[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 243-252
- Jin N, Zhang D Y, Li Z H, He L. Evaluation of water status of winter wheat based on simulated reflectance of multispectral satellites[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11): 243-252 (in Chinese)
- [14] 解毅, 王鹏新, 李俐, 苟兰, 张树誉. 应用粒子滤波同化条件植被温度指数的土壤水分估测[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 236-243
- Xie Y, Wang P X, Li L, Xun L, Zhang S Y. Soil moisture estimation by using particle filter assimilated conditional vegetation temperature index [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 236-243 (in Chinese)
- [15] 沙莎, 胡蝶, 王丽娟, 郭妮, 王小平, 王玮. 河南省土壤水分遥感监测方法研究[J]. 气象与环境科学, 2023, 46(1): 91-99
- Sha S, Hu D, Wang L J, Guo N, Wang X P, Wang W. Study on remote sensing monitoring method of soil moisture in Henan Province [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2023, 46(1): 91-99 (in Chinese)
- [16] Du L T, Song N P, Liu K, Hou J, Hu Y E, Zhu Y G, Wang X Y, Wang L, Guo Y G. Comparison of two simulation methods of the temperature vegetation dryness index (TVDI) for drought monitoring in semi-arid regions of China[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 177
- [17] 闫成川, 曾庆涛, 陈琴, 付锦程, 王婷伟, 陈全家, 曲延英. 陆地棉花铃期抗旱指标筛选及评价[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(7): 46-57
- Yan C C, Zeng Q T, Chen Q, Fu J C, Wang T W, Chen Q J, Qu Y Y. Screening and evaluation of drought resistance indicators at flowering and boll stage of upland cotton [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(7): 46-57 (in Chinese)
- [18] 姚志华, 陈俊英, 张智韬, 边江, 魏广飞, 许崇豪, 谭丞轩. 基于无人机热红外遥感的冬小麦水分胁迫研究[J]. 节水灌溉, 2019(3): 12-17
- Yao Z H, Chen J Y, Zhang Z T, Bian J, Wei G F, Xu C H, Tan C X. Winter wheat water stress research based on thermal infrared remote sensing of unmanned aerial vehicle (UAV) [J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(3): 12-17 (in Chinese)
- [19] 张智韬, 许崇豪, 谭丞轩, 李宇, 宁纪锋. 基于无人机热红外遥感的玉米地土壤含水率诊断方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 180-190
- Zhang Z T, Xu C H, Tan C X, Li Y, Ning J F. Diagnosing method of soil moisture content in corn field based on thermal infrared remote sensing of UAV [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(3): 180-190 (in Chinese)
- [20] 孙圣, 张劲松, 孟平, 汪贵斌, 黄辉, 尹昌君, 王鑫梅. 基于无人机热红外图像的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 S, Zhang J S, Meng P, Wang G B, Huang H, Yin C J, Wang X M. 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 (in Chinese)
- [21] 何莹莹, 于明含, 丁国栋, 高广磊, 赵媛媛, 赛克. 基于冠层温度的典型沙生植物土壤水分状况诊断[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 89-96
- He Y Y, Yu M H, Ding G D, Gao G L, Zhao Y Y, Sai K. Application of typical psammophytes canopy temperature in the diagnosis of soil moisture status [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(4): 89-96 (in Chinese)
- [22] Huang S A, Ding J L, Liu B H, Ge X Y, Wang J J, Zou J E, Zhang J Y. The capability of integrating optical and microwave data for detecting soil moisture in an oasis region [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1358
- [23] 刘婵, 范兴科. 利用作物冠层叶-气温差预报根系层土壤含水率的试验研究[J]. 节水灌溉, 2012(1): 1-3
- Liu C, Fan X K. Experimental research on soil volumetric water content forecast of root zone by using crop canopy leaf-air temperature difference [J]. *Water Saving Irrigation*, 2012(1): 1-3 (in Chinese)
- [24] 江陵杰, 范鹏, 郭柯凡, 金雨航, 周诚, 沈新平, 黄丽芬, 蒋敏. 水稻冠层温度研究进展[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 234-242
- Jiang L J, Fan P, Guo K F, Jin Y H, Zhou C, Shen X P, Huang L F, Jiang M. Research progress on the factors affecting canopy temperature of rice [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(1): 234-242 (in Chinese)
- [25] 赖善星, 张耀珑, 盛统民, 张茗惠, 陈文岭. 干旱区微咸水覆膜灌溉棉花根系生长分布与土壤水盐运移规律及其相互作用[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(6): 175-183
- Lai S X, Zhang Y L, Sheng T M, Zhang M H, Chen W L. Cotton root growth distribution and soil water-salt transport and their interaction under film-mulched irrigation with brackish water in arid region [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(6): 175-183 (in Chinese)
- [26] 张智韬, 吴天奎, 于广多, 白旭乾, 张誉馨, 黄嘉亮. 夏玉米冠层温度变化的时滞效应及其对土壤水分监测的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 117-124
- Zhang Z T, Wu T K, Yu G D, Bai X Q, Zhang Y X, Huang J L. Time delay effect of summer maize canopy temperature change and its influence on soil moisture content monitoring [J]. *Transactions of the Chinese*

- Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(1): 117-124 (in Chinese)
- [27] 马仪, 黄组桂, 贾江栋, 罗林育, 王爽, 姚一飞. 基于无人机-卫星遥感尺度度的土壤水分监测模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 307-318
Ma Y, Huang Z G, Jia J D, Wang S, Yao Y F. Soil Moisture Monitoring Model Based on UAV-Satellite Remote Sensing Scale-up[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(6): 307-318 (in Chinese)
- [28] 任小通, 马娟娟, 孙西欢, 郭向红, 郑利剑, 孙瑞峰, 郭佳昌. 根区灌溉下灌水上限对葡萄吸水根系和产量的影响[J]. 节水灌溉, 2022(6): 10-16
Ren X T, Ma J J, Sun X H, Guo X H, Zheng L J, Sun R F, Guo J C. Effects of upper irrigation limits on water-absorbing roots and yield of grape under root zone irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(6): 10-16 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 张文旭, 硕士研究生, 现就读于石河子大学农学院农业资源与环境专业, 研究方向为农业近地传感。在《沈阳农业大学学报》发表论文一篇, 题为“基于高光谱成像的棉花叶片氮素含量遥感估测”。



通讯作者简介: 王海江, 博士, 教授, 硕士生导师。主要从事绿洲水土资源高效利用研究。2016年入选兵团科技特派员团队, 入选石河子大学“263”优秀青年教师计划和“3152”优秀中青年骨干教师培养支持计划。积极指导学生参加各类大学生创新创业项目, 获得中国“互联网+”大学生创新创业大赛国家级铜奖1项, 兵团“互联网+”大学生创新创业大赛一等奖1项, 兵团第十届“挑战杯”大学生课外学术科技作品竞赛优秀奖1项, 获得校级优秀指导教师5项。科研和社会服务方面, 主持和参加国家级、省部级科研项目11项, 获得科研奖励6项, 其中全国农牧渔业丰收奖农业技术推广成果一等奖1项, 全国农牧渔业丰收奖合作奖1项, 兵团科学技术进步一等奖1项, 中国技术市场金桥奖(集体奖)1项, 中国产学研合作创新成果奖一等奖2项。获得国家发明专利3项, 实用新型专利4项, 软件登记6项, 副主编专著2部, 撰写科研论文40余篇, 其中SCI或EI收录论文4篇。