



节水灌溉

Water Saving Irrigation

ISSN 1007-4929, CN 42-1420/TV

《节水灌溉》网络首发论文

题目：融合无人机多光谱和热红外影像的蔗田土壤含水率监测研究
作者：吴卫熊，金向丹，李浩翔，陈垒宇，王硕
收稿日期：2023-09-25
网络首发日期：2024-01-26
引用格式：吴卫熊，金向丹，李浩翔，陈垒宇，王硕. 融合无人机多光谱和热红外影像的蔗田土壤含水率监测研究[J/OL]. 节水灌溉.
<https://link.cnki.net/urlid/42.1420.TV.20240125.1724.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

融合无人机多光谱和热红外影像的蔗田土壤含水率监测研究

吴卫熊^{1,2}, 金向丹³, 李浩翔⁴, 陈垒宇⁵, 王硕^{1,2}

(1.广西壮族自治区水利科学研究院, 南宁 530023; 2.广西壮族自治区水工程材料与结构重点实验室, 南宁 530023; 3.广西水利电力职业技术学院, 南宁 530023; 4.华中农业大学, 武汉 430070; 5.河海大学, 南京 210024)

摘要：甘蔗作为广西、云南等地的主要农作物，极易受到干旱的影响。土壤含水率是评估甘蔗是否受到干旱影响的重要指标。以蔗田土壤含水率为研究对象，利用无人机搭载的热红外和多光谱传感器数据计算出甘蔗冠层的温度、重归一化植被指数 RDVI 等植被指数，采用人工测定的方法对无人机监测数据进行校正和率定，构建了甘蔗的温度植被干旱指数 (TVDI) 模型。结果表明，利用多光谱和热红外传感器计算的 TVDI 与蔗田苗期、分蘖期、伸长期和成熟期土壤含水率均具有高度相关性，决定系数 R^2 分别为 0.906 6、0.819 0、0.852 9 和 0.916 0。因此，TVDI 模型最适合用于监测甘蔗苗期和成熟期的受旱情况。

关键词：无人机；多光谱；热红外；蔗田；土壤含水率监测；温度植被干旱指数 (TVDI)

中图分类号：S252

文献标识码：A

收稿日期：2023-09-25

接受日期：2023-12-18

基金项目：广西重点研发项目（桂科 AB21220044）。

作者简介：吴卫熊（1982-），男，博士，正高级工程师，主要从事智慧水利研究。Email: 99677226@qq.com。

通讯作者：金向丹（1979-），女，副教授，主要从事农田水利研究。Email: 253539448@qq.com。

Research on Monitoring Soil Moisture Content in Sugarcane Fields by Integrating Drone Multispectral and Thermal Infrared Images

WU Wei-xiong^{1,2}, JIN Xiang-dan³, LI Hao-xiang⁴, CHEN Lei-yu⁵, WANG Shuo^{1,2}

(1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Water Conservancy Research Institute, Nanning 530023, China; 2. Key Laboratory of Water Engineering Materials and Structures in Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530023, China; 3. Guangxi Vocational and Technical College of Water Resources and Electric Power, Nanning 530023, China; 4. Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 5. Hehai University, Nanjing 210024,

Abstract: Sugarcane, a major crop in Guangxi and Yunnan, is highly susceptible to drought. Soil moisture content is an important indicator for assessing the impact of drought on sugarcane. In this study, the focus of the research was the soil moisture content in sugarcane fields, and unmanned aerial vehicle (UAV) thermal infrared and multispectral sensor data were used to calculate temperature and RDVI vegetation indices for the sugarcane canopy. The UAV monitoring data were calibrated and validated using a method of manual measurement, and a temperature vegetation drought index (TVDI) model for sugarcane was developed. The results showed that TVDI calculated using multispectral and thermal infrared sensors had a high correlation with soil moisture content during the seedling, tillering, elongation, and mature stages of sugarcane, with determination coefficients (R^2) of 0.906 6, 0.819 0, 0.852 9, and 0.916 0, respectively. Therefore, the TVDI model proves to be the most suitable for monitoring drought in both seedlings and mature stages of sugarcane.

Key words: unmannde aerial vehicle(UVA); multispectral; thermal infrared; sugarcane field; soil moisture content monitoring; temperature vegetation drought index (TVDI)

0 引言

甘蔗是一种温带和热带农作物，是制造蔗糖的原料^[1]，且可提炼乙醇作为能源替代品。目前，甘蔗主要种植在广西、云南等旱坡地^[2]，大部分蔗田缺乏灌溉设施，容易受到干旱的影响。试验证明，甘蔗全生育期需水量 1 200~1 600 mm，遇到干旱会导致大幅减产。蔗田土壤含水率是表征甘蔗是否受旱的一个重要指标^[3]，对蔗田土壤含水率监测是甘蔗种植的一项重要技术手段^[4]。

由于常规的取土烘干、安装墒情站监测土壤含水率等手段受到点位限制，不能很好地反映大田整体土壤含水率情况，迫切需要采用无人机搭载相关传感器，获取影像来监测土壤含水率。试验证明，热红外遥感能快速获取作物冠层温度，用来反映土壤含水率状况^[5]。PAGAY 等^[6]利用热红外影像计算了水分亏缺指数（CWSI）以及冠气温差等指标，通过比较指标与传统水分状况评价指标的相关性判断其反演土壤含水率的精准度，结果表明冠气温差在潮湿的季节具有更强的相关性。孙圣等^[7]通过无人机热红外影像建立了核桃园土壤水分预测模型，实现了从理论模型到实际应用，从单株水平到区域尺度的转换。利用无人机搭载多光谱传感器可以高效获取作物遥感影像，高精度地完成田间作业和实时监测，对土壤含水率进行监测和分析^[8]。张军等^[9]基于无人机搭载多光谱提取植被指数，包括重归一化植被指数（RDVI）、改良土壤调整植被指数（MSAVI）、绿色归一化差异植被指数（GNDVI）等 8 个植被指数，并分析与猕猴桃根域土壤水分的关系，结果表明 RDVI 与根域土壤水分具有最高的相关性与显著

性,相关系数为 0.744。另外,由多光谱遥感和热红外遥感共同提取的温度植被干旱指数(TVDI)被应用在作物土壤含水率和干旱监测等方面,取得了较好的效果^[10]。因此,基于无人机搭载多光谱和热红外遥感器构建温度植被干旱指数(TVDI)来开展蔗田土壤含水率监测研究是合适的。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于广西崇左市江州区太平街道驮逐村陇铎屯,东经 107.39°,北纬 22.52°,位置见图 1。江州区地处亚热带湿润季风气候区,春暖易旱,夏热易涝,年均降雨量 1 246 mm,年均气温 22 °C。试验区面积 1.33 hm²,甘蔗品种为“柳城 05136”,土壤类型为赤红壤,pH 值呈弱酸性,土壤容重为 1.3 g/cm³,田间持水率为 38%。

该试验区共有 75 块试验田,通过租赁方式向附近村民提供种植和培育的机会,以确保试验田的条件与周边农田的条件保持一致,从而使试验结果更具有代表性和实用价值。

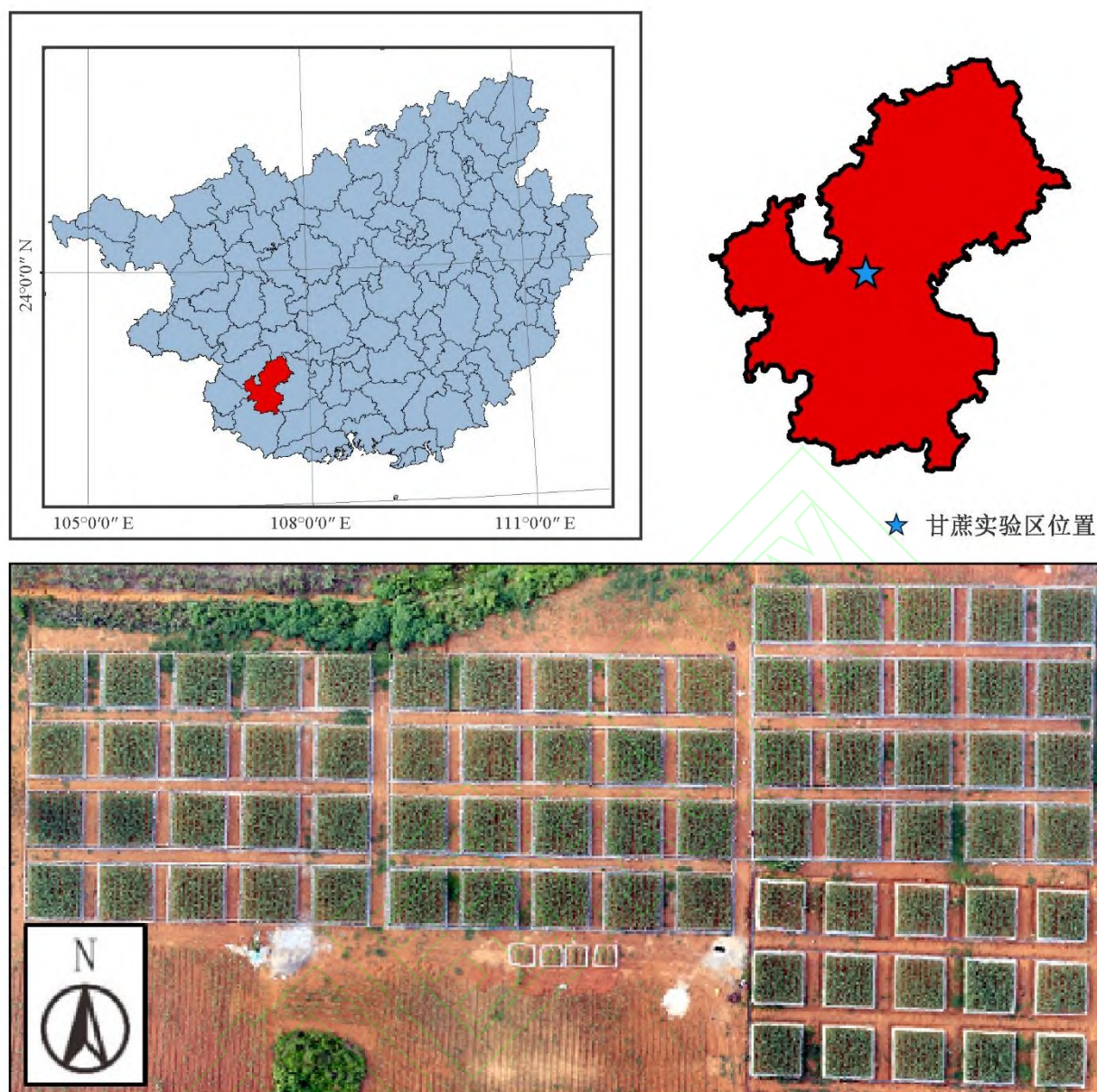


图 1 试验区位置
Fig.1 Location of the study site

1.2 数据获取

(1) 土壤含水率获取^[4]。在甘蔗的生长过程中，分别在苗期、分蘖期、伸长期和成熟期这 4 个关键时期内进行 3 次土壤含水率的获取。并在 75 块试验甘蔗田中，利用随机采样法在每个田块中选择 5 个点位。每个点位使用 TDR 土壤水分仪测量 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 4 个不同深度的土壤体积含水率。同时，为了进行率定，我们在每块试验田和每个深度都使用环刀取出原状土，并采用烘干法计算了其体积含水率，以确保试验数据具有更高的准确性和代表性。

(2) 甘蔗冠层温度获取^[4]。在苗期、分蘖期、伸长期和成熟期这 4 个时期内，均开展 3

次甘蔗冠层温度获取。同样采用随机采样法在每个田块中选择 5 个点位，每个点位均使用 FS-3205 高精度植物冠层测温仪测定的甘蔗冠层温度，以确保实验数据具有更高的准确性和代表性。

(3) 无人机遥感影像获取^[4]。采用大疆 M600 PRO 无人机搭载多光谱传感器和热红外传感器采集蔗田数据。多光谱传感器为美国派诺特公司生产的红杉多光谱，主要由相机传感器、日光照度计、GPS 系统构成。热红外传感器为欧洲 TeAX 公司生产的 Thermal Capture 2.0，自带定位系统，可在蔗田正射影像中测量每个像素点的温度。

为了确保实验数据的准确性和代表性，避免不同光照条件的影响，选择晴朗无云、风速较小的时间段（11:00-14:00）。分别在甘蔗的苗期、分蘖期、伸长期和成熟期 4 个生育期分 3 次（与土壤含水量、甘蔗冠层温度获取时间保持一致）开展多光谱影像和热红外影像采集，飞行高度设置为 5 m，影像分辨率为 0.001 m。

1.3 研究方法

(1) 基于热红外影像提取甘蔗冠层温度。对经过校准的热红外影像按小区进行裁剪，将裁剪后的各小区热红外影像导入 MATLAB 软件中，基于最大类间方差法(Otsu)原理通过编程实现甘蔗像素与土壤像素的分割，得到甘蔗像素温度矩阵^[11, 12]。为减少阈值分割过程中图像阴影部分的干扰，提高分割精度，对于获得的甘蔗温度采取剔除最大 1%温度的处理，由此得到的平均温度作为小区甘蔗冠层平均温度^[4]。

(2) 基于多光谱影像提取甘蔗植被指数。基于多光谱的植被指数由多个波段反射率的比值、差值或其他运算方式计算得到。选择与土壤含水率相关的 10 个参数，具体详见表 1^[4]。

表 1 植被指数种类及计算公式

Tab.1 Vegetation index type and calculation formula

提取参数	计算方法
归一化植被指数 NDVI	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$
叶绿素吸收比值指数 CARI	$CARI = (\rho_{rededge} - \rho_{red}) - 0.2 * (\rho_{rededge} + \rho_{red})$
宽动态范围植被指数 WDRVI	$WDRVI = (aPNR - PG) / (aPNR + PG)$
修正叶绿素吸收指数 MCARI	$MCARI = [(RE - R) - 0.2(RE - G)](RE / R)$
重归一化植被指数 RDVI	$RDVI = (NIR - R) / \sqrt{NIR + R}$

转换叶绿素吸收指数 TCARI	$TCARI = 3[(RE - R) - 0.2(RE - G)(RE / R)]$
优化土壤调节植被指数 OSAVI	$OSAVI = 1.16(NIR - R) / (NIR + R + 0.16)$
TCARI/OSAVI 指数	$TCARI / OSAVI = TCARI / OSAVI$
绿红指数 GRVI	$GRVI = (G - R) / (G + R)$
红边重归一植被指数 RERDVI	$RERDVI = (\rho_{nir} - \rho_{rededge}) / (\rho_{nir} + \rho_{rededge})$

(3) 温度植被干旱指数 TVDI 的构建^[1]。将甘蔗冠层温度和甘蔗植被指数放在同一个直接坐标系上，植被指数表示横轴，冠层温度表示纵轴，所有植被指数数值对应的最大甘蔗冠层温度可拟合成一条直线，称为干边，按照式 (2) 进行计算^[13]；所有植被指数数值对应的最低甘蔗冠层温度也可拟合成一条直线，称为湿边，按照式 (3) 进行计算^[14]。TVDI 根据公式 (1) 进行计算。计算公式如下：

$$TVDI = \frac{LST - LST_{\min}}{LST_{\max} - LST_{\min}} \quad (1)$$

$$LST_{\max} = a_1 \times VI + b_1 \quad (2)$$

$$LST_{\min} = a_2 \times VI + b_2 \quad (3)$$

式中： LST_{\max} 为植被指数为某值时在三角形空间中所对应的最高甘蔗冠层温度，℃； LST_{\min} 为植被指数为某值时在三角形空间中所对应的最低甘蔗冠层温度，℃； VI 为基于多光谱遥感提取的植被指数，可选择 RDVI、NDVI、DVI 等指数； a_1 、 b_1 为干边方程中拟合出的系数； a_2 、 b_2 为湿边方程中拟合出的系数。

2 结果与分析

2.1 基于无人机热红外的甘蔗冠层温度分析

提取各小区不同时段的冠层温度，并以手持温枪测量值作为甘蔗冠层温度参考值开展提取精度分析、结果率定，结果详见表 2。由表 2 可知，甘蔗全生育期提取的冠层温度与实测温度均呈线性关系，基于 Otsu 阈值算法剔除土壤背景提取的精度较高，其中苗期、分蘖期、伸长期和成熟期的决定系数 R^2 和 $RMSE$ 分别为 0.859 3、0.393 9，0.833 6、0.426 5，0.826 8、0.425 4 和 0.830 1、0.400 1。

表 2 各生育期甘蔗冠层温度提取的回归模型

Tab.2 Regression model of canopy temperature extraction in sugarcane

生育期	线性回归模型	R^2	RMSE
苗期	$y=0.958\ 7\ x+1.833\ 7$	0.859\ 3	0.393\ 9
分蘖期	$y=0.973\ 5\ x+1.116\ 7$	0.833\ 6	0.406\ 5
伸长期	$y=0.758\ 2\ x+3.857\ 6$	0.826\ 8	0.425\ 4
成熟期	$y=0.830\ 0\ x+3.571\ 9$	0.830\ 1	0.410\ 1

2.2 基于无人机多光谱的甘蔗植被指数与土壤含水率相关性分析

分析 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 土壤含水率与 CARI、WDRVI、MCARI 等多光谱植被指数之间的 spearman 相关系数，绘制相关性热图，如图 2 所示。图 2 中的结果表明，不同深度土壤含水率均与 RDVI、MCARI 和 GRVI 的相关性最强，其中，RDVI 与 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 土壤含水率的相关系数分别为-0.56、-0.42、-0.48 和-0.38，呈现负相关关系，MCARI 的 spearman 相关系数分别为 0.51、0.23、0.33 和 0.27，呈现正相关关系；GRVI 的 spearman 相关系数分别为 0.32、0.16、0.29 和 0.22，呈现正相关关系。因此，选择 RDVI 指数，并与对应的甘蔗冠层温度构建甘蔗各生育期的干边方程和湿边方程。

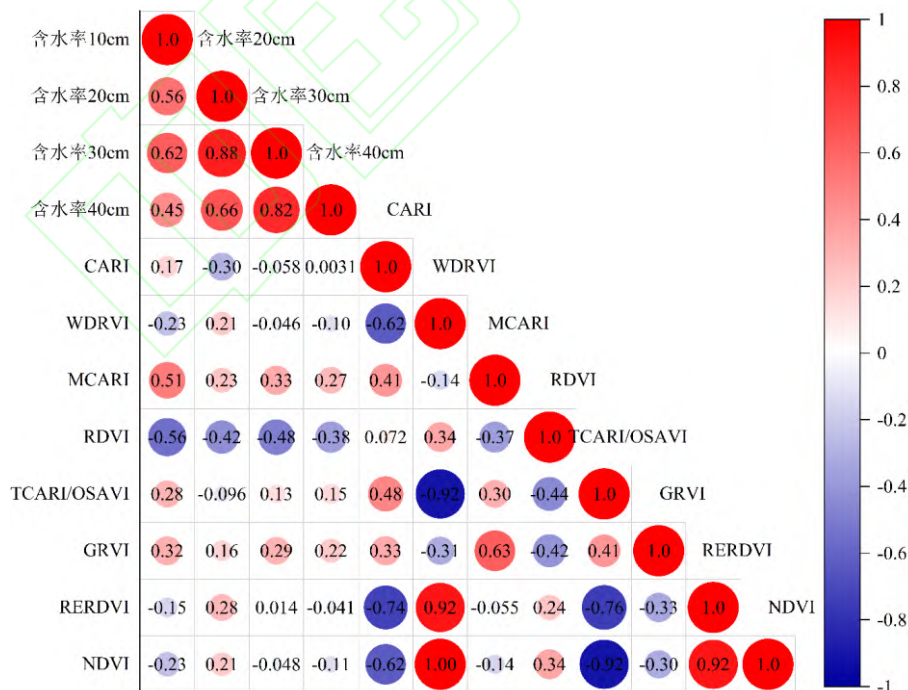


图 2 不同深度土壤含水率与多光谱指标相关性

Fig.2 Correlation between soil moisture content and multi-spectral indexes at different depths

2.3 温度植被指数 TVDI 的分析

将甘蔗冠层温度和对应的 RDVI 作为参数共同作图，得到甘蔗各生育期的干边方程和湿边方程，详见图 3。图 3 是 4 个生育期时相下蔗田 TVDI 特征空间拟合的干湿边状况，可以看出 4 个时相的干湿边斜率都为负数，这表明随着甘蔗 RDVI 的增大，蔗田冠层最大温度和最小温度都随之下降。

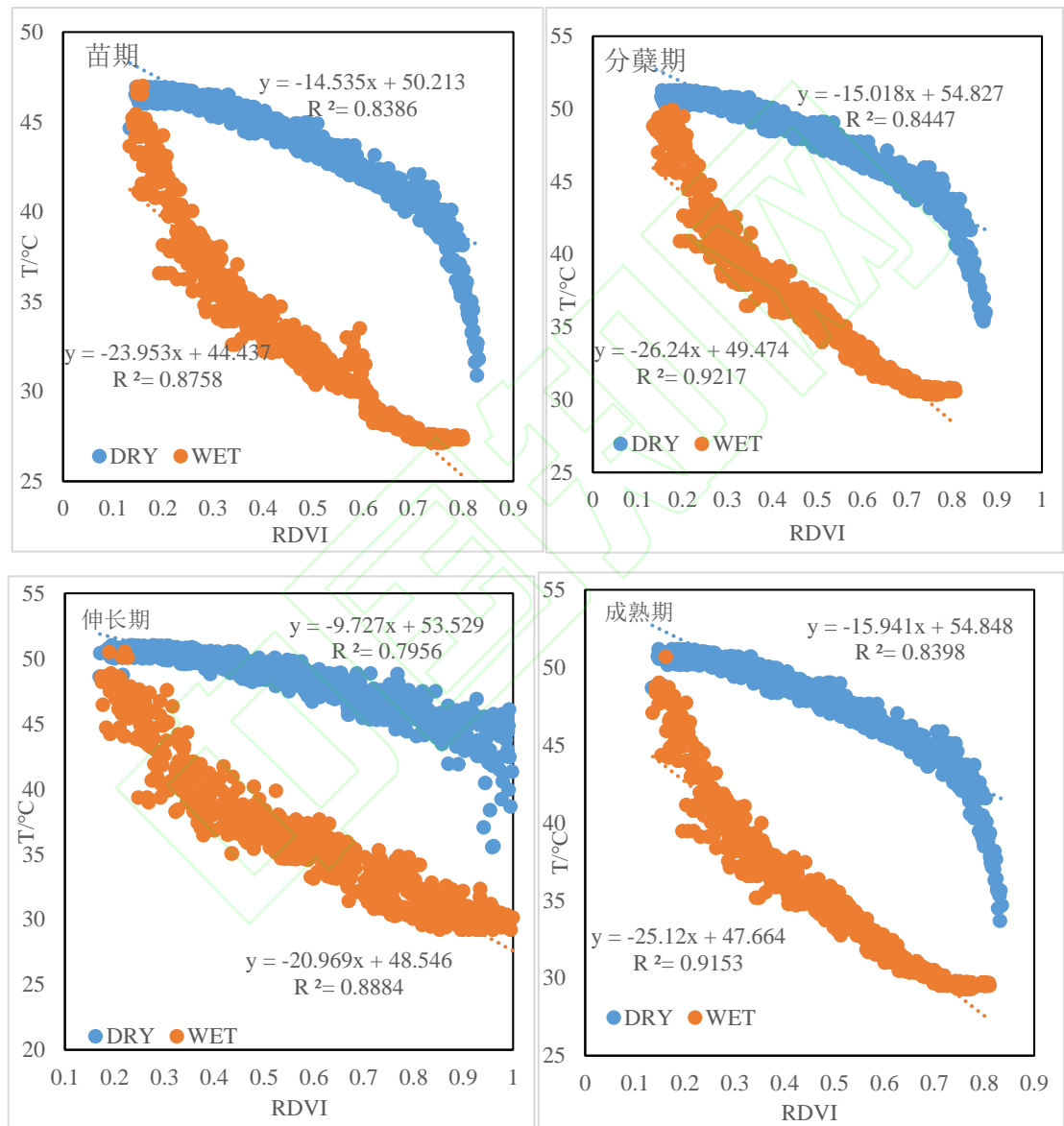


图 3 TVDI 干边方程和湿边方程

Fig.3 Schematic diagram of TVDI triangle feature space

2.4 温度植被指数 TVDI 与土壤含水率相关分析

图 4 是甘蔗 4 个生育期 TVDI 和蔗田土壤含水率的拟合状况。可以看出，甘蔗 4 个生育期 TVDI 和蔗田土壤含水率的相关性都比较高，决定系数 R^2 都达到 0.8 以上。其中，苗期决定系数 R^2 为 0.906 6、分蘖期决定系数 R^2 为 0.819 0、伸长期决定系数 R^2 为 0.852 9、成熟期决定系数 R^2 为 0.916 0。

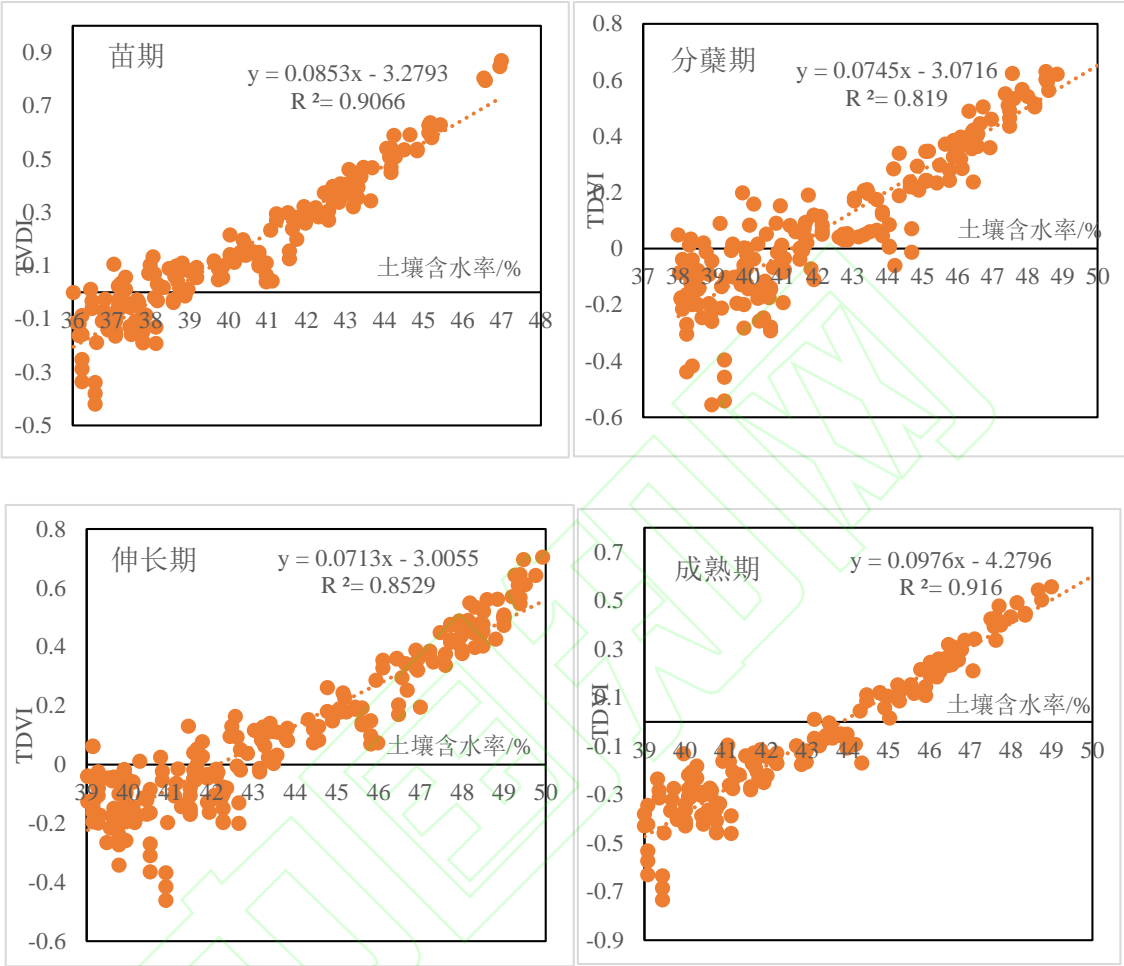


图 4 甘蔗不同生育期 TVDI 和土壤含水率关系图

Fig.4 Relationship between TVDI and soil moisture content in different growth stages of sugarcane

3 结论

本文以蔗田土壤含水率监测为研究对象，利用无人机热红外和多光谱影像分别获取了甘蔗冠层温度、RDVI 等植被指数，构建了甘蔗的温度植被干旱指数 (TVDI)，并分析了 TVDI 与蔗田土壤含水率的相关性，主要结论如下。

- (1) 由多光谱遥感和热红外遥感共同提取的温度植被干旱指数 (TVDI)，甘蔗 4 个生育期 TVDI 和蔗田土壤含水率的相关性都比较高，全生育期决定系数 R^2 都在 0.8 以上。
- (2) 利用 TVDI 监测蔗田土壤含水率，成熟期决定系数 R^2 最高，苗期次之，分蘖期和

伸长期最小。

参考文献：

- [1] 韦尚纯.广西丘陵山区甘蔗机械化收获存在问题及对策[J].河北农机,2023(5):22-24. WEI S C. Problems and countermeasures of sugarcane mechanized harvesting in hilly areas of Guangxi [J]. Hebei Agricultural Machinery, 2023(5): 22-24.
- [2] 王闰. 生物质炭对水中氨氮、磷的吸附研究[D]. 浙江舟山: 浙江海洋大学,2020. WANG R. Study on the adsorption of biomass carbon on ammonia nitrogen and phosphorus in water [D]. Zhoushan, Zhejiang: Zhejiang Ocean University, 2020.
- [3] 毕黎明,刘伟丽,李杨瑞.甘蔗抗旱性研究进展与展望[J].广西农业科学,2006(5):522-527. BI L M, LIU W L, LI Y R. Advances and prospects in research on drought resistance in sugarcane [J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2006(5):522-527.
- [4] 吴卫熊.甘蔗水肥效应及其生长参数的无人机光谱监测模型研究[D]. 河北邯郸: 河北工程大学, 2023. WU W X. Study on the unmanned aerial vehicle spectral monitoring model for the water and fertilizer effects and growth parameters of sugarcane [D]. Handan, Hubei: Hebei University of Engineering, 2023.
- [5] 徐洪刚,陈震,程千,等. 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): 1 181-1 188. XU H G, CHEN Z, CHENG Q, et al. Method for retrieving soil moisture content using unmanned aerial vehicle thermal infrared [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40 (11): 1 181-1 188.
- [6] PAGAY V, KIDMAN C M. Evaluating remotely-sensed grapevine (*Vitis vinifera* L.) water stress responses across a viticultural region[J]. Agronomy-basel, 2019, 9: 9 110 682.
- [7] 孙圣, 张劲松, 孟平, 等.基于无人机热红外影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 S, ZHANG J S, MENG P, et al. Establishment and application of a soil moisture prediction model for walnut orchards based on unmanned aerial vehicle thermal infrared images [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(16): 89-95.
- [8] 罗亚东, 许齐, 郭宇宏, 等.尺度效应对多光谱遥感监测土壤水分影响研究[J].节水灌溉, 2023(2): 20-27. LUO Y D, XU Q, GUO Y H, et al. Study on the impact of scale effect on multispectral remote sensing monitoring of soil moisture [J]. Water Saving Irrigation, 2023(2): 20-27.
- [9] 张军, 邓俊涛, 倪国威, 等. 基于植被指数的猕猴桃根域土壤水分反演影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 223-230. ZHANG J, DENG J T, NI G W, et al. Study on the influencing factors of soil moisture retrieval in kiwifruit root domain based on vegetation index [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2022, 53 (12): 223-230.
- [10] 张彦, 刘婷, 郭燕, 等. 基于高分六号卫星数据的花生干旱监测研究[J].节水灌溉, 2022(7): 1-6. ZHANG Y, LIU T, GUO Y, et al. Research on peanut drought monitoring based on Gaofen-6 satellite data [J]. Water-

saving Irrigation, 2022(7): 1-6.

- [11] LIANG Y L, YU S F, ZHEN Z, et al. Climatic change impacts on Chinese sugarcane planting: Benefits and risks[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2019, (116): 1-12.
- [12] THENMOZHI S, THIYAGARAJAN G, NATARAJAN S K, et al. Study on the effect of different irrigation and fertilizer application methods on yield and water use efficiency in sugarcane[J]. International Journal of Farm Sciences, 2022, 12(4): 18-23.
- [13] WU W X, FU W X, ALATALO J M, et al. Effects of coupling water and fertilizer on agronomic traits, sugar content and yield of sugarcane in Guangxi, China[J]. Agronomy. 2022, 12(2): 321-332.
- [14] SUMESH K C, NINSAWAT S, SOM-ARD J. Integration of RGB: based vegetation index, crop surface model and object-based image analysis approach for sugarcane yield estimation using unmanned aerial vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 180: 1-19.