doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.009

原位可穿戴柔性茎流传感器设计与试验

郭俊先[1,2]　李玲玉[1]　李龙杰[1]　霍彦君[1]　刘　亚[3]

(1.新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830052;2.新疆智能农业装备重点实验室,乌鲁木齐 830052;
3.新疆维吾尔自治区农业科学院乌鲁木齐综合试验站,乌鲁木齐 830013)

摘要:农作物茎流监测是精准农业管理的重要依据。针对传统监测方法存在损伤作物、操作烦琐和精度不足等问题,设计了一种原位可穿戴轻量化柔性茎流传感器。基于温度传感器与加热电阻结合的热脉冲法,采用 T 形结构与半包裹式柔性外壳,传感器质量仅 2.359 g。通过对比 5 种间距、2 种加热时间的结构与参数,确定最优方案后,经微量注射泵标定校准,温差曲线与茎流速率动态响应高度同步(R^2 =0.883)。在温室系统中开展测试,搭配通讯模块,完成与高精度商业传感器的哈密瓜茎流性能对比,及光照环境因子对监测的影响研究。分析表明,该传感器与商业流量传感器相关系数达 0.906,契合度较高。茎流受光合有效辐射、温湿度等环境因子显著影响,建模需引入环境因子以提高精度。结果表明,研发的柔性茎流传感器可实现哈密瓜茎流长期原位监测,具有高精度、轻量化和易安装等特点。

关键词:茎流传感器;热脉冲法;哈密瓜;原位监测

中图分类号:S126　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)23-0099-09　　**OSID**:

Design and Experiment of In-situ Wearable Flexible Stem Flow Sensor

Guo Junxian[1,2]　Li Lingyu[1]　Li Longjie[1]　Huo Yanjun[1]　Liu Ya[3]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*
2. *Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi* 830052, *China*
3. *Urumqi Comprehensive Experimental Station, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi* 830013, *China*)

Abstract: Crop sap flow monitoring is an important basis for precision agricultural management. Traditional monitoring methods suffer from problems such as crop damage, cumbersome operation, and insufficient accuracy. It designed an in situ wearable, lightweight, flexible sap flow sensor. Based on the heat pulse method combining temperature sensors and heating resistors, the sensor adopted a T-shaped structure and a semi-wrapped flexible shell, with a mass of only 2.359 g. By comparing the structures and parameters of five spacings and two heating durations, the optimal scheme was determined. After calibration using a micro-syringe pump, the temperature difference curve was highly synchronized with the dynamic response of the sap flow rate (R^2 =0.883). Tests were conducted in a greenhouse system. Equipped with a communication module, the sensor was used to compare its sap flow performance with that of a high-precision commercial sensor in Hami melon and to investigate the influence of light environmental factors on monitoring. The analysis showed that the correlation between the proposed sensor and the commercial sap flow sensor reached 0.906, indicating a high degree of agreement. Sap flow was significantly affected by environmental factors such as photosynthetically active radiation, temperature, and humidity; therefore, environmental factors needed to be incorporated into modeling to improve accuracy. The results demonstrated that the developed flexible sap flow sensor can achieve long-term in situ monitoring of Hami melon sap flow and featured high precision, lightweight design, and easy installation.

Key words: stem flow sensor; thermal pulse method; Hami melon; in situ monitoring

收稿日期:2025-12-31　修回日期:2026-01-08

基金项目:科技创新团队(天山创新团队)项目和新疆智慧农业信息感知技术创新项目(2022TSYCTD0011)

作者简介:郭俊先(1975—),男,教授,博士,主要从事农业信息智能感知技术与装备研究,E-mail:junxianguo@163.com

0 引言

茎流是作物水分与养分运输的核心，其监测对作物表型分析和精细化管理至关重要[1-2]。茎流研究不仅有助于优化精准灌溉策略，对深化生态系统水文过程的认知也具有重要作用[3]。

目前，植物茎流的检测方法主要分为 3 种，分别为热脉冲法、热平衡法和热扩散法[3-4]。作物茎流传感器的研究，正朝着无损实时监测发展，向更高灵敏度和精度，及微型化、智能化迈进[5]。例如胡瑾等[6]为解决传感器低温测量问题，设计热源自适应茎流检测调控系统，并构建融合外界温度、茎流速率等多环境因子的茎流标定嵌套试验；Chao 等[7]受藤蔓卷须启发，开发含 AWS 传感器的 IPWS 用于作物脉冲监测，用蛇形激光诱导石墨烯，AWS 抗温干扰强；Lo 等[8]提出可拉伸多传感器系统，适配树叶、水果曲面监测，由光纤布拉格光栅构成，装于仿生柔性基底，用花朵形设计，体积小、复用性强；李顺澳等[9]利用热比率法茎流仪监测北疆绿洲棉区花铃盛期棉花茎流速率，探究其蒸腾耗水规律及与气象因子的相关关系，据此建议制定灌溉策略考虑相关规律以提高水资源利用效率。黄雅茹等[10]监测乌兰布和沙漠不同平茬梭梭液流与气象因子，明确液流特征及主影响因子，建议留茬 25% 为最佳，供生态需水估算与抚育参考。以上茎流监测中，存在传感器与作物茎秆的贴合密封性不足，长期田间试验可能因环境恶劣导致传感器材质损耗；封装防护性不足，易造成部件故障；由于茎秆结构差异，探头安装位置不当，影响数据准确性等问题。

为此，本文借鉴现有作物茎流传感器研究的优点，采用柔性监测创新方法，设计一种新型可穿戴柔性茎流传感器，采取非插入式监测且与作物贴合面均采用弹性胶封装，使传感器与茎秆贴合密封性强；传感器采用 T 形结构，工作面积小，减少对作物的损伤；柔性可穿戴式设计监测精准且连续，适配性与实操性强。基于热脉冲法、电路设计、标定建模、物联网开发、数据采集分析处理等主要技术，设计和开发适应不同生长阶段作物茎流监测的可穿戴柔性传感器，以及作物生长茎流信息自动化感知控制系统，完成系统测试。设计选用具有弹性的材料，制成薄型柔性可穿戴电路板，电路板工作尺寸设计足够小，能减少与作物的接触面积，确保对作物生长状态准确监测并减少监测中对作物的影响。同时，通过使用商业流量传感器进行哈密瓜茎流监测对比，分析环境因子（包括空气温湿度、光照强度、土壤含水率）对传感器监测精度的影响。旨在实现对作物生长过程中茎流生理信息的长期原位监测，为作物的水肥调控和环境因子控制提供科学依据[11-13]。

1 传感器设计方法

1.1 研究过程和方法概述

研究可归纳为 5 个主要步骤，如图 1 方案流程所示。包括：监测对象选择和制备、传感器设计与开发、茎流标定校准、数据建模和茎流监测测试与分析。

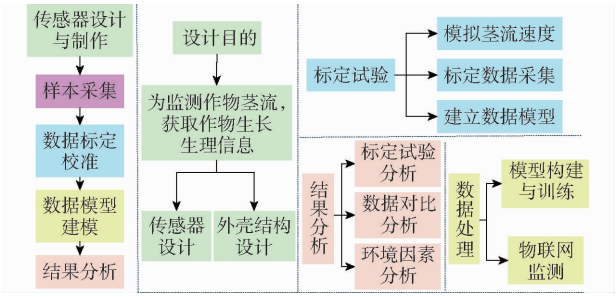


图 1 方案流程图

Fig. 1 Solution process

在传感器设计与制作过程结合样本采集工作，鉴于哈密瓜在甜瓜中具有代表性，且对环境因子敏感度高，选择其作为研究对象，采用热脉冲法检测茎流量。

选用热脉冲法的核心依据是适配哈密瓜等草本作物特性：其茎秆纤细柔软（直径 5 ~ 10 mm），热平衡法需多层包裹，易损伤茎秆、贴合度差且难适应茎秆生长膨粗；热扩散法需 10 ~ 15 cm 布点间隔，受限于茎秆长度，探针插入还易致其折断[1]。而热脉冲法传感器可减少作物损伤，适配形态特点并兼容茎秆动态生长。同时，安装相关的环境因子监测设备，综合监测茎流生理指标[14-15]。

基于热脉冲法对传感器进行设计与开发，传感器电路原理设计如图 2a ~ 2d 所示。选择轻量耐用的材料，实现超薄柔性的 FPC 茎流传感器设计，提高传感器的穿戴舒适性和长期稳定性。FPC 茎流传感器融合加热电阻的加热元件和左右两侧的温度传感器，获取 2 个测点的温度变化或差异。

在数据标定校准环节，为保证数据的准确性，采用微量注射泵模拟开展茎流数据校准。设计不同直径的哈密瓜茎秆、不同推送速度，开展茎流传感器的温度差曲线和称量茎流量的数据校准标定试验[16-18]。

数据模型建模中，基于时序数据对模型开展训练，预测茎流值。采用孤立森林剔除异常值，计算统计特征并标准化；通过添加噪声和缩放增强数据；构建双向 GRU 与全连接的混合模型，使用 Huber 损失

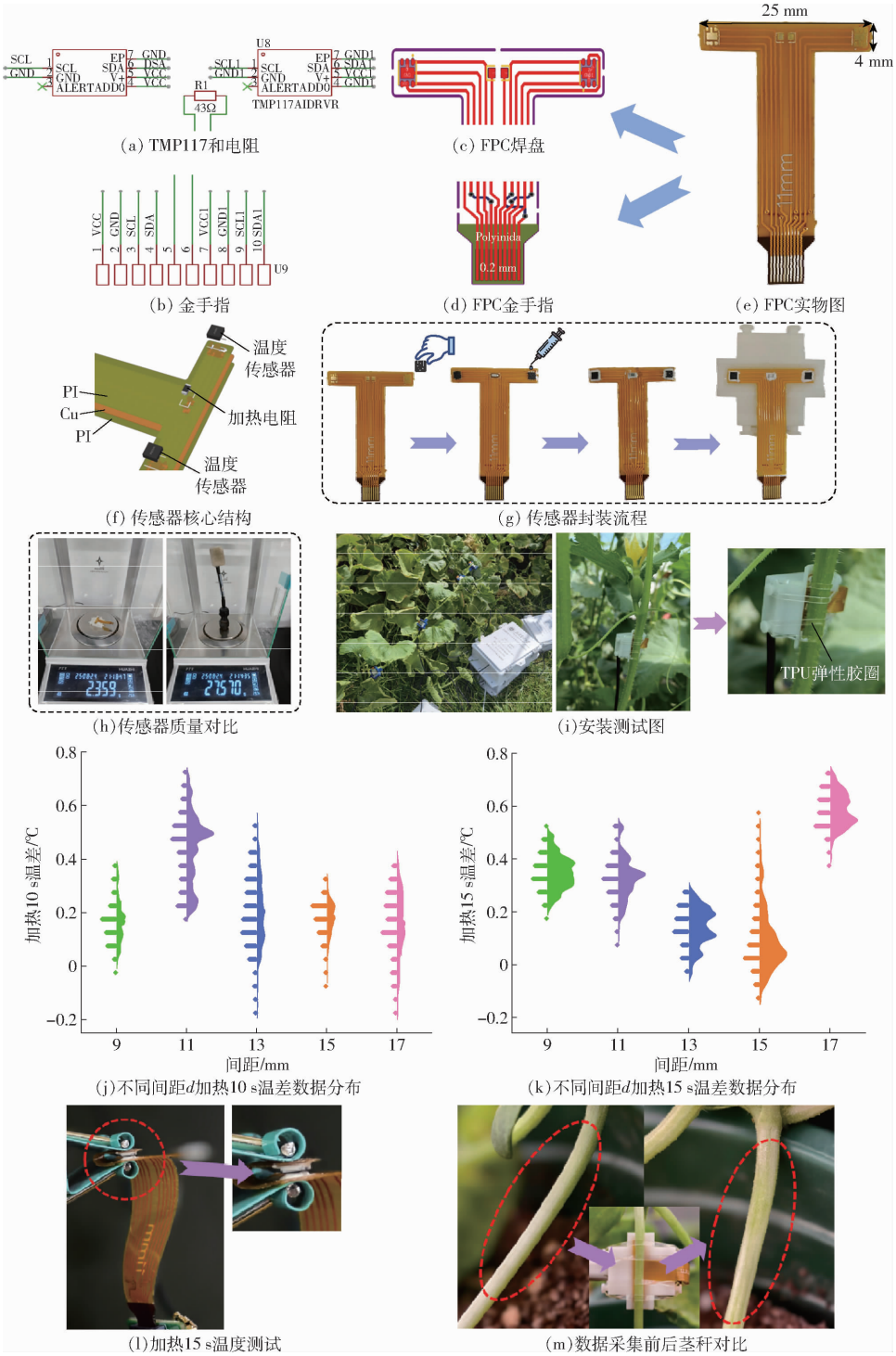


图 2　茎流传感器设计与参数优化

Fig. 2　Stem flow sensor design and parameter optimization

训练[19]；评估并可视化模型，预测茎流值后保存结果。

最后，监测结果分析环节，结合模型表现开展哈密瓜生育期茎流监测，测试传感器性能并实施全面评估。依据评估结果持续优化数据处理流程，并与树液流传感器对比分析，开展环境因子相关分析，为精准预测作物生长监测提供理论依据。

1.2　茎流传感器设计与制作

所设计原位可穿戴柔性茎流传感器的设计目标在于降低对作物生长的干扰，同时保障其长期原位监测精度和稳定性。图 2f 是设计茎流传感器的核心结构，设计采用两层柔性聚酰亚胺(PI)作为基底材料，实现基底材料与铜(Cu)导线紧密结合，有效保护线路，制成一种超薄的单层柔性电路板(FPC)。如图 2e 所示，电路板厚度仅 0.11 mm，工作区域尺寸为 4 mm×25 mm。该设计能够适配多种尺寸的作物茎秆，满足作物在不同生长阶段的监测需求。使用 43 Ω 加热电阻加热，与相隔一定距离的 TMP117

温度传感器协同工作,实现温差数据的采集。作物茎秆中茎液(或水分)流动会带走热量,形成上下 2 个不同的温度和温度差[16-17]。所呈现的温度和温度差值曲线变化,能直接反映出水分在茎秆中的流动情况[20]。43 Ω 加热电阻选取型号为 FRH0603D43R0TSV,精度为 ±0.5% 的贴片式电阻;TMP117 温度传感器选取型号为 TMP117AIDRVR,且在 -20℃ 至 50℃ 温度范围内具有 ±0.1℃ 的监测精度,确保能够有效捕捉茎秆温度信息。如图 2g 所示,焊接完电子元件,再对茎流传感器封装,选用卡夫特有机硅密封胶(K-704)对电子元件实施封装。同时,选取了热塑性聚氨酯弹性体(TPU)材质、弧形设计的柔性半包裹外壳,以及采用 TPU 弹性胶圈与作物茎秆的固定,适配不同直径的茎秆,达成一种传感器广泛应用的目标,解决不同直径需搭配不同传感器的传统局限。茎流传感器与外壳之间采用卫力固硅橡胶(V-705C)固化处理,固化后形成弹性保护层,使可穿戴柔性茎流传感器能够与茎秆实现弹性接触,降低对作物茎秆的损伤。如图 2h 所示,使用电子天平测量,传感器的整体质量仅为 2.359 g,轻量化设计降低对作物生长的干扰。如图 2i 所示,凭借其非侵入性的特点,为实时、动态的生理特征监测提供了可靠的解决方案。

茎流传感器设计为 T 形结构,为了适配测试哈密瓜茎秆尺寸,确保用于监测的温度不会烫伤茎秆表皮,通过测试确定较好的加热时间 t 分别为 10 s 和 15 s;设定加热电阻至温度传感器的间距 d 分别为 9、11、13、15、17 mm。针对同一批次种植、同一环境生长且茎秆几乎相同的哈密瓜,开展了 5 种间距 d、2 种加热时间 t 的监测精度对比试验。如图 2j、2k 所示,在加热 10 s 的条件下,各传感器间距 d 对应的温度差分布较为分散,且不同间距 d 间的差异呈现出多样态势。在加热 15 s 的条件下,当传感器间距 d 为 11 mm 时,温度差分布相对更为集中且处于较优的区间范围,相比其他间距 d(9、13、15、17 mm),其温度差的分布形态更能体现出稳定性与合理性,在温度差相关的试验表现上更具优势。综上,加热 15 s、间距 11 mm 的传感器更具有优势,因此选取加热15 s、间距为 11 mm 的传感器,开展后续试验。

如图 2l 所示,对加热电阻加热 15 s 时,进行温度测试可得,在无外界干扰的情况下,加热电阻从初始温度(环境正常温度)增高 22℃ 至 22.5℃,随即观察传感器数据采集工作后对茎秆的影响,如图 2m 所示,对哈密瓜茎秆损伤较小。

1.3 试验场地与设备

哈密瓜茎流测试选择新疆玉维鲜农业科技中心大棚移栽覆膜种植的哈密瓜植株。设备使用自制可穿戴柔性茎流传感器、Dynamax 公司的商业 Dynagage 树液流量传感器、METER 公司的 ECH2O-10HS 型土壤水分传感器、SQ-521 型光合有效辐射传感器,以及 Onset 公司 HOBO 系列 MX1101 型无线温湿度记录仪,详情见表 1。

表 1 试验仪器相关参数

Tab.1 Relevant parameters of test instruments

仪器/工具	型号	测量范围	精度	分辨率
土壤水分传感器	ECH2O-10HS	0% ~57% VWC	±2%	0.08% VWC
光合有效辐射传感器	SQ-521	0 ~4 000 μmol/(m²·s) 389 ~692 nm ±5 nm	<1%	
无线温湿度记录仪	MX1101	温度:-20 ~70℃ 相对湿度:1% ~90%	温度:±0.21℃ 相对湿度:±2%	温度:0.024℃ 湿度:0.01%
Dynagage 树液流量传感器	SGA3-WS	2.75 ~4.0 mm	±10%	
	SGA5-WS	5 ~7 mm		
	SGB9-WS	8 ~10 mm		
	SGA10-WS	9.5 ~13 mm		
电子天平	PTY-A220	0 ~220 g	0.001 g	
微量注射泵	LSP01-1A	0.001 μL/min ~86.699 mL/min	0.001 μL/min	

1.4 茎流标定校准

可穿戴柔性茎流传感器的标定试验使用微量注射泵进行模拟[1,16,21]。如图 3 所示,首先,采用商业树液流量传感器测定不同生育期和时段的哈密瓜茎流特性,确定模拟茎流的推送速度范围。第 2 步,挑选处于不同生长期的哈密瓜植株,切取长度足够的鲜切茎用于茎流监测,同时测量哈密瓜测试切茎的长度和直径(长约 70 mm,直径 3 ~12 mm)。第 3 步,将生料带缠绕在哈密瓜测试切茎的一端,然后连接橡胶软管,确保连接部位无泄漏。同时,在哈密瓜测试切茎的中部安装自研茎流传感器。第 4 步,依据商用传感器实测的茎流特性,设定微量注射泵的

推送速度为 11 个梯度水平速度推动注射器，通过连接的橡胶软管将配制好的 Hoagland 溶液（为作物提供适宜的营养成分，模拟茎液环境）定速注入哈密瓜测试鲜切茎[21]。采用水平注入的方式推送注射溶液测试，在出口段使用电子天平收集滴落的溶液，测量溶液滴落的时间和质量，推算出模拟茎流量。同时，采集频率为 10 min 一次，重复 3 次，采集自研茎流传感器所测的温度差值。第 5 步，根据不同的模拟茎流量与自研茎流传感器所测的温度差值建立茎流数据模型，并开展验证测试。



图 3　茎流数据标定试验示意图

Fig. 3　Calibration of sap flow data

1.5　数据处理方法

基于数据分析可建立茎流值预测模型流程，可提升预测精度与泛化能力。首先用孤立森林剔除异常值；然后提取均值、峰值等统计特征，标准化和分布变换后保留时序曲线动态信息，并通过数据增强扩充样本量，划分训练集和验证集缓解过拟合。模型结合双向 GRU 时序分支和全连接特征分支，利用卷积层、注意力机制和残差块学习动态与静态特征，采用 Huber 损失和 AdamW 优化器增强稳定性[22-23]。最后用 R^2 指标评估性能，通过多次预测降低误差，生成可视化结果和带置信区间的预测值，确保结果可靠。

预测模型的性能评估对预测模型性能的好坏以及预测结果的精准度起着决定性作用[24]。通常使用训练集决定系数（R_c^2）、预测集决定系数（R_p^2）作为评估模型性能的依据。决定系数的值越高，表明预测建模的效果越好[25]。

1.6　茎流传感器与监测系统安装与调试

1.6.1　监测系统安装

哈密瓜植株茎流测试选择于 2025 年 4 月 22 日在新疆玉维鲜农业科技中心（43.95°N，87.48°E）大棚移栽覆膜种植的哈密瓜。在 2025 年 6 月 1 日至 2025 年 7 月 20 日的开花期，随机选取 40 株哈密瓜植株，进行为期 50 d 茎流数据的采集工作。在采样过程中，安装自制可穿戴柔性茎流传感器和 Dynagage 树液流量传感器、ECH2O－10HS 型土壤水分传感器、SQ－521 型光合有效辐射传感器，以及 MX1101 型无线温湿度记录仪，开展茎流和环境等因素的数据采集工作，获取茎流数据和相关的环境因子数据。安装现场如图 4 所示。集成以上传感器，构建“作物生理—环境因子”的立体监测网络，通过多源数据的相互验证与关联分析，验证传感器的性能和可靠性，以及环境因子对其的影响。

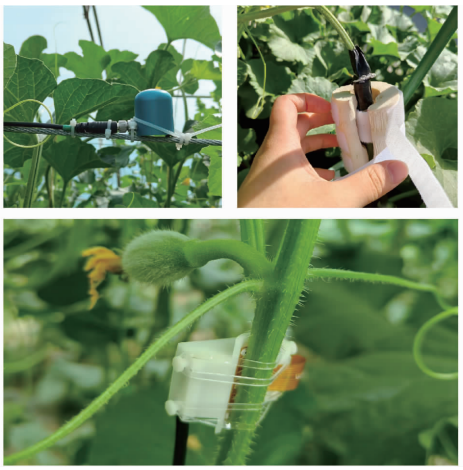


图 4　测试安装监测图

Fig. 4　Test installation monitoring diagram

1.6.2　物联网监测与调试

数据采集过程中，控制端通过预设指令序列主动发起采集信号，精准调度各传感器模块按设定频率与精度完成数据捕获。同时，搭建具备高稳定性与扩展性的物联网数据记录服务器；采用轻量高效的 MQTT 消息传输协议实现设备与服务器的双向通信；使用 Node－RED 可视化编程工具，灵活配置数据主题的订阅与发布规则，实现对不同类型传感数据的分类处理与传输[26]。数据传输环节依托 WiFi 无线网络，通过动态信号强度监测与自动重连机制保障通信连续性，服务器端则实时接收并解析数据，同步生成传输状态日志与异常警告，达成对数据传输全流程的实时监控、异常溯源与高效管理[27]。

2　试验

2.1　茎流数据标定校准分析

在作物茎流监测中，可穿戴柔性茎流传感器的性能标定是关键环节。基于微量注射泵建模模拟，建立传感器测得的温度差与茎流速率的关系，是精准监测作物茎流的基础。如表 2 所示，以直径为 4.82 mm 的茎秆为例展示梯度测试数据。

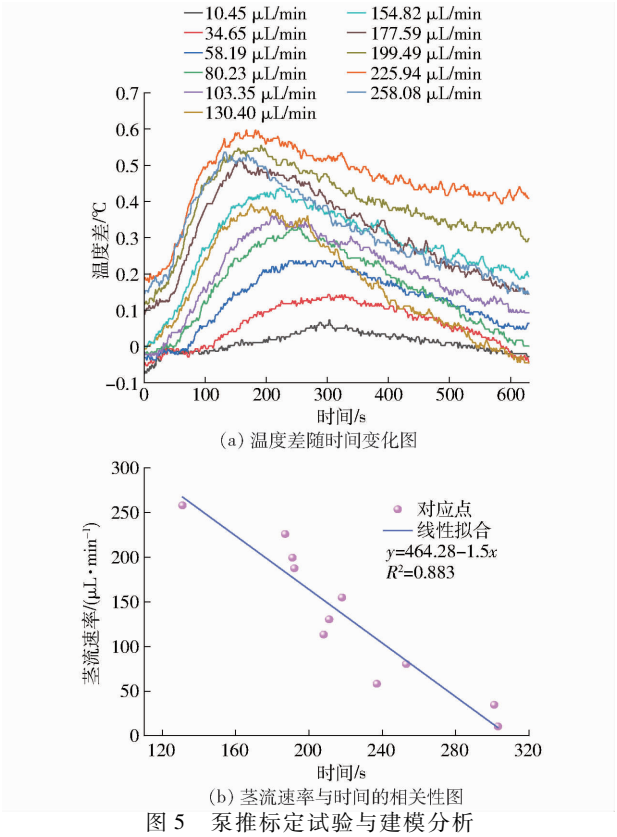
如图 5a 所示，不同茎流速率随时间的变化，温度差呈现出显著的动态变化规律。在试验初始阶段（0～100 s），各曲线均呈现快速上升趋势。这表明随着时间推移，传感器所感知到的温度差因茎流作用而迅速改变。当时间超过 100 s 后，温度差的增

表 2 梯度测试数据

Tab. 2 Gradient test data

梯度号	推送速度/(μL·min⁻¹)	温度差范围/℃	茎流速率/(μL·min⁻¹)
1	10	-0.075 ~ 0.074	10.45
2	30	-0.053 ~ 0.143	34.65
3	50	-0.038 ~ 0.236	58.19
4	70	-0.023 ~ 0.337	80.23
5	90	-0.031 ~ 0.359	103.35
6	110	-0.045 ~ 0.393	130.40
7	130	-0.002 ~ 0.436	154.82
8	150	0.089 ~ 0.518	177.59
9	170	0.117 ~ 0.555	199.49
10	190	0.175 ~ 0.597	225.94
11	220	0.145 ~ 0.536	258.08

长逐渐趋于平缓,部分曲线出现波动下降。随着注射泵推送速度的提高,实际茎流速率也随之增加。可以观察到,随着流速的增大,温差曲线达到峰值的时间也在缩短。图示表明,不同流速下温差曲线的变化幅度和趋势存在较为明显的差异,有利于建立茎流预测模型。



(a) 温度差随时间变化图

(b) 茎流速率与时间的相关性图

图 5 泵推标定试验与建模分析

Fig. 5 Pump calibration testing and modeling analysis

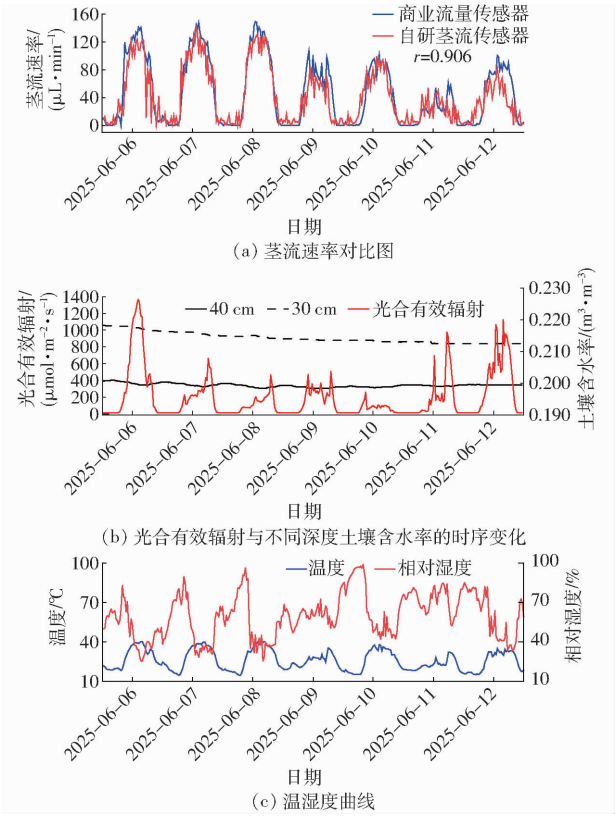
如图 5b 所示,对温差曲线达到峰值的时间线性拟合分析,得到的方程为 $y = 464.28 - 1.5x$,决定系数 $R^2 = 0.883$。较高的 R^2 表明茎流速率与温差曲线达到峰值的时间之间存在较佳的线性负相关关系,随着达到峰值时间的延长,茎流速率呈现出较为明显的下降趋势。证实了温度差与茎流速率之间存在紧密的内在关联,也为利用温差曲线反推茎流速率提供了可靠的数学依据;同时,表明自研可穿戴柔性茎流传感器在茎流监测方面具备良好的有效性和稳定性,能够较为精准地反映茎流的动态变化情况。但从客观角度分析,哈密瓜茎秆纤细柔软,传感器贴合度、水分分布的微小变化都会导致温差信号波动,无法完全消除,客观上会降低拟合优度,并且试验装置的环境稳定性不足(如温湿度波动、机械振动)对温差信号造成噪声干扰,也会降低拟合优度。

2.2 茎流传感器与监测系统测试与分析

为验证自研茎流传感器的性能,开展了对比试验,将自研传感器与商业流量传感器放置在同一株哈密瓜植株茎秆同一位置,对哈密瓜茎流速率选取连续监测数据对比分析。

自研茎流传感器曲线与商业流量传感器曲线整体变化趋势高度一致,如图 6a 所示。自研茎流传感器与商业流量传感器的相关系数 r 高达 0.906,均呈现出明显的周期性波动特征,能同步捕捉到茎流速率的峰值与谷值变化,且由图 6a 分析可知,自研茎流传感器监测曲线没有持续偏高或偏低,表明传感器无单向漂移,无需中途重新校准,反映出二者对哈密瓜茎流动态的感知具有良好的同步性,自研传感器能够达到商业流量传感器检测效果。

综合曲线趋势与相关性分析结果,自研茎流传



(a) 茎流速率对比图

(b) 光合有效辐射与不同深度土壤含水率的时序变化

(c) 温湿度曲线

图 6 综合监测曲线

Fig. 6 Comprehensive monitoring curve graphs

感器在对哈密瓜茎流速率的监测中，能够精准且稳定地复现商业流量传感器的测量效果，在动态响应与数据一致性方面表现较好，可作为可靠的茎流监测工具，为后续作物茎流相关研究与应用提供有力支持。

2.3　环境因子数据分析

为探究环境因子对茎流速率的影响，使用自研茎流传感器和商业流量传感器，同步监测了茎流速率、光合有效辐射、土壤含水率、环境温度以及环境相对湿度等指标，选取连续监测数据对比分析。

如图 6b、6c 所示，光合有效辐射呈现出明显的周期性波动，且与自研茎流传感器的变化趋势具有较高的同步性。当光合有效辐射处于峰值时，茎流速率也达到峰值；2 种不同深度土壤含水率整体较为稳定，为哈密瓜生长提供了水分基础，确保茎流能够持续发生；相较于光合有效辐射，环境温度对茎流速率的影响相对间接。温度升高时，加速作物蒸腾，使茎流速率上升；环境相对湿度较高时，蒸腾作用受到抑制，茎流速率相应降低。温度峰值与茎流速率峰值有一定对应关系，相对湿度曲线的低值与茎流速率高值对应，进一步印证了温湿度对茎流速率的调控作用。

为明确自研茎流传感器与环境因子的关联性，对光合有效辐射、环境相对湿度、环境温度、土壤含水率等因子与自研茎流传感器监测茎流的相关性开展了分析。如图 7 所示，自研茎流传感器与环境温度（相关系数为 0.816）、光合有效辐射（相关系数为 0.462）正相关明显，表明温度、光合有效强度对茎流有重要影响；与相对湿度（相关系数为 −0.510）负相关较强。光合有效辐射、温度、相对湿度等环境因子均对茎流速率产生显著影响，其中环境温度和光照强度的影响最大且同步性强，环境相对湿度通过影响蒸腾作用间接作用于茎流速率，土壤含水率则为茎流提供水分条件，自研茎流传感器能有效监测到茎流速率随这些环境因子的动态变化，为深入研究作物与环境的相互作用提供了数据支撑。

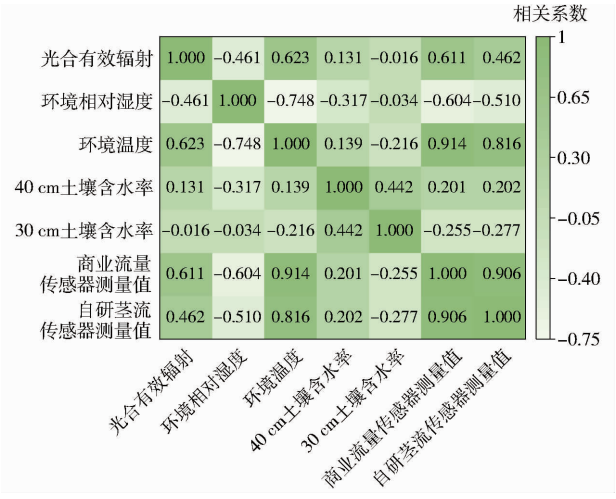


图 7　茎流与环境因子相关性分析

Fig. 7　Correlation analysis between sap flow and environmental factors

3　结论

（1）在开花期持续 50 d 的哈密瓜茎流监测中，本研究采用的 FPC 超薄柔性传感器具备轻量贴合特性，提高了传感器的穿戴舒适性和长期稳定性。试验过程中未出现明显外壳老化现象；通过定期检查传感器与茎秆的接触状态，结合茎秆生长膨粗的自适应预留空间，监测周期内未发生接触稳定性失效的情况。

（2）设计茎流传感器采用 T 形结构，并通过比较不同加热电阻加热时间和不同加热电阻至温度传感器的间距下的泵推模拟茎流试验，确定传感器主要结构和工作参数：茎流传感器中加热电阻加热时间为 15 s，加热电阻至温度传感器的间距为 11 mm。此时，校准标定中温差曲线与茎流速率的动态响应高度同步（$R^2 = 0.883$），建立了温度差值与茎流速率的可靠关联模型方程（$y = 464.28 - 1.5x$）。

（3）茎流传感器测试试验表明自研茎流传感器与商业流量传感器采集的茎流速率相关系数达到 0.906，说明该传感器能精准复现茎流的昼夜周期性波动特征，且无单向漂移，无需中途重新校准；同时，该传感器的无损监测特性、长期稳定性得到了验证。分析监测环境因子对茎流速率的影响，茎流速率与环境温度、光合有效强度有较高正相关，与环境相对湿度呈较高负相关，后续可在茎流预测分析中引入环境因子，为哈密瓜实时生理监测和精准管理，提供实时性、关联性、可靠性的茎流和环境监测。

参　考　文　献

[1]　陈楚奕. 非侵入式植物可穿戴茎流传感器研究[D]. 杭州：浙江大学，2020.
Chen Chuyi. Research on non-invasive plant wearable sap flow sensors[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)

[2]　Zhang C, Kong J, Wu D, et al. Wearable sensor: an emerging data collection tool for plant phenotyping[J]. Plant Phenomics, 2023, 5: 0051.

[3]　Wu X, Zhao Y. A novel heat pulse method in determining "effective" thermal properties in frozen soil[J]. Water Resources

Research, 2024, 60(12): e2024WR037537.

[4] 冯倩,尹义蕾,王柳,等. 基于作物表型的温室精准灌溉策略研究进展[J]. 节水灌溉, 2023(6): 34 - 40.
Feng Qian, Yin Yilei, Wang Liu, et al. Research progress on greenhouse precision irrigation strategies based on crop phenomics [J]. Water Saving Irrigation, 2023(6): 34 - 40. (in Chinese)

[5] 叶伟康. 植物可穿戴式光电器件用于农作物茎流动态调控和变化规律研究[D]. 杭州:浙江大学, 2024.
Ye Weikang. Research on plant wearable optoelectronic devices for dynamic regulation and variation law of crop sap flow [D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2024. (in Chinese)

[6] 胡瑾,孙章彤,冯盼,等. 基于 GA - SVR 的热源自适应茎流检测与调控系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54: 290 - 299.
Hu Jin, Sun Zhangtong, Feng Pan, et al. Research on heat source adaptive sap flow detection and regulation system based on GA - SVR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 290 - 299. (in Chinese)

[7] Zhang C, Zhang C, Wu X, et al. An integrated and robust plant pulse monitoring system based on biomimetic wearable sensor [J]. npj Flexible Electronics,2022,6(1): 1937.

[8] Lo Presti D, Massaroni C, Bianchi D, et al. A wearable flower-shaped sensor based on fiber bragg grating technology for in-vivo plant growth monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23: 8416 - 8425.

[9] 李顺澳,王雪姣,黄彬香,等. 膜下滴灌棉花花铃盛期茎流变化及其对气象因子的响应[J]. 沙漠与绿洲气象,2025, 19(6):63 - 70.
Li Shun'ao, Wang Xuejiao, Huang Binxiang, et al. Stem flow variations during the peak flowering and boll formation stage of cotton under drip irrigation and their response to meteorological factors [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2025,19(6):63 - 70. (in Chinese)

[10] 黄雅茹,马迎宾,郝需婷,等. 典型固沙植物梭梭平茬后茎干液流的变化特征[J]. 草业科学,2024,41(12):2809 - 2822.
Huang Yaru, Ma Yingbin, Hao Xuting, et al. Changes in stem sap flow in faxaul, a typical sand-fixing plant, following pruning[J]. Grassland Science, 2024, 41(12): 2809 - 2822. (in Chinese)

[11] 员玉良,盛文溢,孙宇瑞. 基于茎流传感器的茎秆储水动态观测方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 247 - 252.
Yuan Yuliang, Sheng Wenyi, Sun Yurui. Dynamic observation method of stem water storage based on sap flow sensors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 247 - 252. (in Chinese)

[12] 王志军,于海云,勾芒芒. 基于响应曲面法的毛乌素沙地柠条茎流速率与环境因子的关系[J]. 中国水土保持, 2025 (4): 80 - 85.
Wang Zhijun, Yu Haiyun, Gou Mangmang. Relationship between stem sap flow rate of *Caragana korshinskii* in Mu Us sandy land and environmental factors based on response surface methodology [J]. Soil and Water Conservation in China, 2025(4): 80 - 85. (in Chinese)

[13] 牛敏,刘娜,杨文忠,等. 葡萄茎流速率变化规律及其影响因素研究[J]. 江苏农业科学, 2025, 53: 200 - 208.
Niu Min, Liu Na, Yang Wenzhong, et al. Study on variation law of grape stem sap flow rate and its influencing factors [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53: 200 - 208. (in Chinese)

[14] 李莉婕,赵泽英,岳延滨,等. 火龙果周年液流特征及其对环境因子的响应[J]. 农业工程学报,2021,37(8):242 - 250.
Li Lijie, Zhao Zeying, Yue Yanbin, et al. Annual liquid flow characteristics of dragon fruit and their response to environmental factors[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 242 - 250. (in Chinese)

[15] 朱向明,彭伟,冉恩华,等. 典型黑土区春玉米茎流特征及其环境影响因素[J]. 应用生态学报,2023,34:921 - 927.
Zhu Xiangming, Peng Wei, Ran Enhua, et al. Stem sap flow characteristics of spring maize in typical black soil regions and their environmental influencing factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 34: 921 - 927. (in Chinese)

[16] Chai Y, Chen C, Luo X, et al. Cohabiting plant-wearable sensor in situ monitors water transport in plant[J]. Advanced Science, 2021,8(10): 2003642.

[17] Wang S, Chai Y, Sa H, et al. Sunflower-like self-sustainable plant-wearable sensing probe[J]. Science Advances, 2024, 10(49):eads1136.

[18] Gigyu K, Junghoon L . Micromachined needle-like calorimetric flow sensor for sap flux density measurement in the xylem of plants[J]. Scientific Reports,2024,14(1):14838.

[19] Kozlov S V, Sedenkov S A. LSTM and GRU model analysis for time series forecasting[J]. International Journal of Open Information Technologies, 2024, 12(7): 43 - 50.

[20] 张静,郭俊先,刘湘江,等. 柔性可穿戴茎流传感器的外型改进分析[J]. 传感器与微系统,2025,44:101 - 104,109.
Zhang Jing, Guo Junxian, Liu Xiangjiang, et al. Analysis of design improvements for flexible wearable stem flow sensors [J]. Sensors and Microsystems, 2025, 44: 101 - 104,109. (in Chinese)

[21] 刘安,刘旭,黄岚,等. 基于热平衡法检测植物茎流传感器的标定[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊 1):6 - 10.
Liu An, Liu Xu, Huang Lan, et al. Calibration of plant stem flow sensors based on the thermal equilibrium method [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(S1): 6 - 10. (in Chinese)

[22] 李哲. 基于机务大数据的机车运行数据智能化挖掘与应用研究[J]. 中国战略新兴产业,2025(21):32 - 34.
Li Zhe. Research on intelligent mining and application of locomotive operation data based on machinery maintenance big data

[J]. China Strategic Emerging Industries, 2025(21): 32 – 34. (in Chinese)

[23] 陈凯鹏,回丙伟,张会强,等.基于多尺度特征对齐的小样本目标检测方法[J].计算机技术与发展,2026,36(2):30 – 37.
Chen Kaipeng, Hui Bingwei, Zhang Huiqiang, et al. A few-shot object detection method based on multi-scale feature alignment[J]. Computer Technology and Development, 2026,36(2):30 – 37. (in Chinese)

[24] 刘潭,朱洪锐,袁青云,等.基于多模型融合策略的温室番茄光合速率预测方法[J].农业机械学报,2024,55(4):337 – 345.
Liu Tan, Zhu Hongrui, Yuan Qingyun, et al. A prediction method for photosynthetic rate of greenhouse tomatoes based on multi-model fusion strategy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 337 – 345. (in Chinese)

[25] 李龙杰,史勇,郭俊先.基于分光测色反演哈密瓜叶片叶绿素与含水率研究[J].光谱学与光谱分析,2024,44:2296 – 2302.
Li Longjie, Shi Yong, Guo Junxian. Study on inversion of chlorophyll and moisture content in hami melon leaves based on spectrophotometric color measurement[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44: 2296 – 2302. (in Chinese)

[26] 张振亚,石玉,娄士龙.基于树莓派驱动的物联网灌溉系统的设计与实现[J].电脑知识与技术,2024,20(20):104 – 106.
Zhang Zhenya, Shi Yu, Lou Shilong. Design and implementation of an IoT irrigation system based on Raspberry Pi drivers [J]. Computer Knowledge and Technology, 2024, 20(20): 104 – 106. (in Chinese)

[27] 孙黎君,刘新宇,朱越,等.电力设备智能测厚系统设计与实现[J].电力设备管理,2025(18):183 – 185.
Sun Lijun, Liu Xinyu, Zhu Yue, et al. Design and implementation of an intelligent thickness measurement system for power equipment[J]. Power Equipment Management, 2025(18): 183 – 185. (in Chinese)

(上接第 98 页)

[21] 王继英,韩丽娟,王诚,等.大约克体型性状的相关、聚类与主成分分析[J].养猪,2019(1):65 – 67.
Wang Jiying, Han Lijuan, Wang Cheng, et al. Correlation, clustering and principal component analysis of body type traits in Large Yorkshire pigs[J]. Swine Production,2019(1):65 – 67. (in Chinese)

[22] 胡宝玖.基于三维点云的母猪背膘厚测量方法研究[D].武汉:华中农业大学,2025.
Hu Baojiu. Research on sow backfat thickness measurement method based on three-dimensional point cloud[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2025. (in Chinese)

[23] 刘正旭.基于多视角三维点云融合的猪表型测定与屠宰性能预测[D].武汉:华中农业大学,2024.
Liu Zhengxu. Pig phenotype measurement and slaughter performance prediction based on multi-view three-dimensional point cloud fusion[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2024. (in Chinese)

[24] 何威,米阳,刘刚,等.基于双流跨模态特征融合模型的群养生猪体质量测定[J].农业机械学报,2023,54(增刊 1):275 – 282,329.
He Wei, Mi Yang, Liu Gang, et al. Body weight measurement of group-raised pigs based on two-stream cross-modal feature fusion model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(S1):275 – 282,329. (in Chinese)

[25] 张稳,张鑫哲,张在莹,等.基于 EL – YOLO v8n 的轻量化群养猪只姿态识别与跟踪方法[J].农业机械学报,2026,57(14):298 – 306.
Zhang Wen, Zhang Xinzhe, Zhang Zaiying, et al. Lightweight method for group-housed pig pose recognition and tracking based on EL – YOLO v8n[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(14): 298 – 306. (in Chinese)

[26] 杨盼盼.鄂通两头乌猪背膘厚、眼肌面积育种值估计与分子标记检测[D].武汉:华中农业大学,2023.
Yang Panpan. Breeding value estimation and molecular marker detection of backfat thickness and loin eye area in Etong two-end black pigs[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2023. (in Chinese)

[27] Chen Y Z, Gao C, Wang J X, et al. Pork backfat thickness detection based on complex background[C]// The 2nd International Conference on Machine Learning and Computer Application. Shenyang: China,2021.

[28] 刘刚,曾雪婷,刘晓文,等.基于改进 YOLO v5 – pose 的群养生猪体尺自动测量方法[J].农业机械学报,2025,56(5):455 – 465.
Liu Gang, Zeng Xueting, Liu Xiaowen, et al. Automatic measurement method of body size of group-raised pigs based on improved YOLO v5 – pose[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(5):455 – 465. (in Chinese)

[29] Tan M, Le Q V. EfficientNet: rethinking model scaling for convolutional neural networks[C]// Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning. Long Beach,2019:6105 – 6114.