

# Bottleneck in In-situ Monitoring Technology for Facility Melon Plants and Prospects for Low-cost Solutions

Yongyan Chen Xiaoqing Zhong Jingyue Zhao Zhongyi Zhang

Guangzhou Nansha Modern Agricultural Industry Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 511458, China

## Abstract

High-quality production of facility-grown melon relies on accurate perception of plant growth and stress signals, yet the large-scale, in-situ acquisition of plant physiological, morphological, and quality information remains a bottleneck. Based on practical production experience, this paper analyzes three systemic gaps hindering technology adoption: hardware compatibility, data value, and intelligent accessibility. The solution requires shifting from a technology-driven to a demand-led paradigm and establishing an agriculture-engineering integrated “clinical agronomy” platform. It further explores an AI agent approach centered on “lightweight front-end sensing + cloud-based large model cognition,” offering a forward-looking solution for low-cost, replicable, and accessible intelligent decision-making. This perspective provides a valuable reference for advancing facility horticulture from “environment sensing” to “life sensing.”

## Keywords

facility melon; in situ monitoring; technological bottleneck; artificial intelligence; smart agriculture

## 设施甜瓜植株原位监测关键瓶颈分析

陈泳妍 仲晓晴 赵景岳 张钟艺

广州南沙现代农业产业集团有限公司，中国·广东 广州 511458

## 摘要

设施甜瓜高品质生产依赖对植株生长与胁迫的精准感知，而植株本体信息的规模化原位获取仍是瓶颈。本文基于生产实践，剖析三大断层：硬件适配、数据价值与智能普惠。解决路径在于转向需求牵引，构建农工融合的“临床农学”平台，并发展“前端轻量化感知+云端大模型认知”的AI智能体，以实现低成本、可复制的智能决策。该思路为设施园艺从“感知环境”迈向“感知生命”提供参考。

## 关键词

设施甜瓜；原位监测；技术瓶颈；人工智能；智能农业

## 1 引言

设施栽培为甜瓜等高效园艺作物提供了可控生长环境，是实现反季节与高品质生产的重要方式。随着产业升级，对甜瓜品质一致性、产量预测准确性及病虫害防控时效性的要求不断提高，传统依赖经验与人工巡查的管理方式已难以满足需求。尽管环境因子的实时监测已较为普及，但其最终目的仍在于推断植株自身的健康与营养状态。环境适宜并不必然意味着植株生理状态良好，精准管理亟需直接获取植株本体信息<sup>[1]</sup>。然而，在实际生产中，植株本体信息的原位、连

续和规模化获取仍面临多重系统性障碍。本文结合甜瓜生产实践，对相关关键瓶颈进行系统分析，并探讨可行的发展路径。

## 2 设施甜瓜关键监测参数与技术现状分析

### 2.1 关键监测参数及其量化困境

实现精准管理，需聚焦三类关键参数，后两类尤其体现了从“环境数据”到“本体信息”的深化与挑战：

**生长与胁迫生理参数：**此为传统监测重点。包括株高、茎粗、叶面积指数、果实体积等生长指标，以及叶片温度、叶绿素含量等胁迫信号。然而，即使是基础参数，在田间也面临特殊挑战。例如，对于吊蔓栽培的甜瓜，其“株高”实为藤蔓的曲线长度，而非垂直高度，精确测量操作繁琐。对于叶片含水率等参数，虽已有基于高光谱的监测方法<sup>[2]</sup>，但其标准化与实用化仍面临挑战。

**复杂形态与架构参数：**包括叶片的倾角、卷曲度、叶形指数，果实的果形指数、色泽均匀度等。这些特征是农技人员判断长势、健康状况的直观依据，但传统上描述模糊

【基金项目】广州南沙现代农业产业集团有限公司 2024 科研项目“蜜玉甜瓜雾培营养液配方优化及品质提升技术开发”专项资金（项目编号：2024NSNYRD001）。

【作者简介】陈泳妍（1995-），女，中国广东阳江人，博士，从事智慧农业研究。

（如”叶片稍萎蔫”、”瓜形周正”）。将其转化为可自动化测量的客观标准，本身就是一个巨大的认知与技术鸿沟。

品质与风味参数：尤其是糖、香气组分及其平衡构成的风味。这是评价甜瓜价值的核心，但其检测目前主要依赖破坏性取样和实验室分析或消费者的主观品尝，无法实现生产过程中的实时、无损、原位评估。

2.2 现有技术手段及其田间应用局限性

当前技术在上述需求面前，均暴露显著短板，其对比分析如表 1 所示：

实验室精密仪器法（如高光谱仪、气相、液相等）：精度高，但价格昂贵、操作专业，仅适用于点状抽样研究，无法实现原位连续监测，与生产场景脱节。

商用农业传感器：

环境传感器：相对成熟，但仅止步于”光温水气”。

本体传感器（如果实生长传感器、可穿戴式作物叶绿素检测仪）：单价过高，难以在数千株规模的大棚中部署；且安装可能干扰植株正常生长。

养分传感器：离子选择电极易受干扰，测量单一离子

误差大；便携式检测仪准确性、稳定性不足。土壤、基质或营养液的养分的实时监测仍是行业短板。

基于机器视觉的非接触方法：

RGB/ 多光谱 / 热成像相机：虽能部分替代人工观察，但在田间面临根本性挑战：（1）代表性难题：甜瓜哪片叶、哪个部位最能代表整株状态？固定监测点是否具代表性；（2）干扰效应：为连续监测固定传感器或标记部位，其装置可能约束生长、损伤组织，导致数据反映”受干扰状态”（3）环境干扰：叶片遮挡、光照剧变严重影响图像质量与算法稳定性。（4）复杂特征提取难：从图像中自动量化”萎蔫程度”、“果形优劣”等，需大量精准人工标注，而标注标准本身难以统一，成本极高。尽管已有研究针对温室复杂背景下的甜瓜叶部病害<sup>[3]</sup>或果实成熟度<sup>[4,5]</sup>开发了实时目标检测算法，但其在多变生产环境中的泛化能力与鲁棒性仍需长期验证。

传统人工测量与经验判断：虽直接灵活，但主观性强、效率低、无法连续、难以量化传承，正是智慧农业旨在替代的环节。

表 1 设施甜瓜植株主要监测技术路径对比及其田间应用局限

| 技术路径    | 优点             | 田间应用核心局限                   | 成本与可扩展性          |
|---------|----------------|----------------------------|------------------|
| 实验室精密仪器 | 精度高、指标全        | 非原位、非实时、专业要求高              | 极差，无法扩展          |
| 商用专用传感器 | 原位连续、数据直接      | 单价极高、安装干扰、环境耐久性差           | 差，大规模部署不经济       |
| 基于机器视觉  | 非接触、信息丰富、成本相对低 | 代表性 / 遮挡问题、环境影响大、复杂特征算法开发难 | 中等，硬件可控但算法与稳定性存疑 |
| 人工经验判断  | 灵活、综合          | 主观、低效、不可量化、难以传承            | 人力成本高，扩展性为零      |

现有技术或在精度、或在原理上各有侧重，但无一能同时满足低成本、高鲁棒性、真正原位无损、数据易解析且田间操作可行这五项规模化应用的核心要求。对植株本体的监测，仍停留在”望闻问切”的初级阶段。值得关注的是，面向植株本体的新型传感技术正在涌现，例如可贴附式叶绿素反射计<sup>[6]</sup>、自供能可穿戴叶绿素传感贴片<sup>[7]</sup>等，展现了实现低成本、原位连续监测的潜力。同时，“植物智能电子器件”作为一个新兴交叉方向，正致力于实现从监测到调控

的闭环<sup>[8]</sup>。然而，这些技术大多处于实验室原型阶段，其田间适应性、长期稳定性及成本控制，距离大规模农业应用仍有相当距离。

3 三大系统性瓶颈分析

综合生产实践与现有研究，设施甜瓜植株原位监测难以规模化应用，主要源于硬件、数据与决策层面的三大系统性瓶颈，这些问题相互耦合，共同制约了技术落地效果，见表 2。

表 2 设施甜瓜植株原位监测的核心挑战与一线生产困境对应

| 系统性断层  | 具体表现与一线困境                                             | 对研究与应用的直接影响                    |
|--------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 硬件适配断层 | 高精度传感器与农业场景在成本、鲁棒性、易用性上不匹配；缺乏针对农业“农化改造”的跨学科团队。        | 硬件要么太贵，要么太脆，无法在田间稳定工作。         |
| 数据价值断层 | 数据采集后缺乏数据敏感型农学家进行解读；数据分析与生产决策脱节，数据仅被视为“历史记录”且不支持未来决策。 | 导致大量数据沉睡，无法转化为可行动的农事建议，投资回报率低。 |
| 智能普惠断层 | 高度依赖个体专家经验，无法将最优决策模型规模化、自动化复制到每个生产单元；                 | 无法惠及广大生产者，制约产业整体升级。            |

3.1 硬件适配断层：从实验室到田间的”农化”缺失

此断层源于工程学逻辑与农学生物学场景的根本性差异。大量现成的微型、高精度传感器存在于工业与消费领域，但其设计未考虑农业的终极约束：极致的成本控制、长期暴露于高温高湿腐蚀性环境的可靠性、以及对植株生长近乎零干扰的安装方式。跨越这一断层，亟需既懂微电子、材料封

装，又深刻理解农业现场需求的跨学科工程团队，专注于完成技术的”农化”适配与产品化，而非原理验证。

3.2 数据价值断层：从数据流到农事决策的”翻译”失效

此断层是传统农学与数据科学之间的认知隔阂。许多种植基地已布设传感器，但产生的时序数据往往无人问津。

究其原因,传统农艺师习惯于处理静态的“样本”和定性的“经验”,面对海量、连续、多源的“数据流”感到无从下手,难以信任并挖掘其预警与优化价值。因此,迫切需要培养和涌现一批数据敏感型农学家或懂农业的数据分析师,他们能充当“翻译”,将数据异常关联到具体的生理胁迫或管理漏洞,并转化为如“未来三天控温”或“叶面补镁”的可执行指令,让数据真正驱动生产闭环。植物工厂中关于长势监测与管理系统<sup>[9,10]</sup>的研究,正体现了向系统化、数据化决策迈进的趋势。

### 3.3 智能普惠断层: 从专家经验到可大量落地复制、推广的技术

此断层是智慧农业规模化应用的最后一道壁垒。即便前两个断层在某个示范点被攻克(如有好用的传感器和有数据分析师的数据解读),其成功模式也因高度依赖特定专家而无法复制。将少数专家的敏锐直觉和决策逻辑提炼、标准化并封装成可大规模部署的软件模型,是打破瓶颈的关键。这要求技术路径必须支持低成本的决策自动化与普惠化。

## 4 发展路径与技术展望

### 4.1 研究范式转变: 构建以需求为牵引的“临床农学”平台

必须从“技术能做什么”转向“生产需要什么”。建议建立实体化的“临床农学”研发平台,将农学家、工程师、数据科学家长期置于同一田间场景。在此平台上,共同定义并迭代“技术需求任务书”,并以田间效用、成本与可扩展性作为衡量技术成功与否的终极标尺,而非实验室论文指标。

### 4.2 技术路径融合: 迈向“感知-认知-决策”一体化的AI智能体

为系统性地破解上述三大断层,尤其是“数据价值断层”与“智能普惠断层”,未来的技术架构必须向具备自主认知与决策能力的AI智能体演进<sup>[11]</sup>。其核心是构建一个分层协同的智能系统:

边缘感知层(解决“硬件适配”与“看”的问题): 部署极度轻量、低功耗、高鲁棒性的专用算法模型(如轻量化YOLO)<sup>[4,5]</sup>,负责执行核心的异常侦测与关键数据采集任务。其对硬件算力要求低,利于降低成本与功耗。

云端认知与决策层(解决“数据价值”与“分析决策”的问题): 当边缘层触发预警时,自动唤起云端集成了海量植物学知识、病理图谱与农事案例的多模态农业大模型。该模型充当“超级专家系统”,能对前端信息进行综合诊断、因果推理与方案生成(例如:结合图像特征、历史环境数据,推断“缺素可能性高于病害,建议优先进行叶片营养诊断”),并以自然语言报告形式输出。

智能体工作流的价值: 这一架构的本质,是将稀缺的专家知识编码进可复制的软件中。它允许每个农场以极低的边缘成本,享受云端集中化的“专家脑”服务,从而大幅降低对现场高级人才的依赖,实现智能决策的普惠化。同时,它反向定义了边缘硬件的需求: 只需可靠地完成特定感知任

务,复杂分析交由云端,从而降低了硬件适配难度。

### 4.3 协同生态建设: 推动开源标准与社区创新

鼓励形成开源硬件设计、开源算法模型和开源标注数据集的社区生态。通过制定统一的设施农业作物表型数据采集与标注标准,降低创新门槛,吸引更多跨领域开发者参与,从开放协作中加速实用解决方案的涌现。

## 5 总结

设施甜瓜植株原位监测的困境反映智慧农业系统性断层。单项技术优化无法带来整体突破,需在系统架构和研发范式上重构。未来解决方案可能呈现“边缘感知终端+云端农业大模型”的AI智能体形态,实现硬件适配、数据翻译与决策普惠。农学家、工程师和数据科学家需深度介入,结合生长仿真等模型,从“感知生命”迈向“理解与优化生命”,推动技术普惠到每个生产单元<sup>[12,13]</sup>

### 参考文献

- [1] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 1-11.
- [2] 向佳琳, 姚鑫锋, 刘倩, 等. 基于高光谱的温室网纹甜瓜不同叶位叶片含水率监测[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4): 105-109.
- [3] XU Y L, CHEN Q Y, KONG S L, et al. Real-time object detection method of melon leaf diseases under complex background in greenhouse[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2022, 19(4): 985-995.
- [4] CHEN G, HOU Y, CUI T, et al. YOLOv8-CML: a lightweight target detection method for color-changing melon ripening in intelligent agriculture[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 14400.
- [5] JING X, WANG Y, LI D, et al. Melon ripeness detection by an improved object detection algorithm for resource constrained environments[J]. Plant Methods, 2024, 20(1): 96.
- [6] ZHANG K Y, LI W L, LI H C, et al. A Leaf-Patchable Reflectance Meter for In Situ Continuous Monitoring of Chlorophyll Content[J]. Advanced Science, 2023, 10(32): 2305552.
- [7] CHEN X, MA L, ZHANG J, et al. Self-powered Wearable Plant Chlorophyll Sensing Patch[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2025, 261: 118225.
- [8] 狄思宇, 张学锋, 刘国, 等. 植物智能电子器件: 从生长监测到功能调控[J]. 中国科学: 化学, 2025, 55(6): 待查.
- [9] 马丽丹, 王英龙, 梁海斌, 等. 大型植物工厂叶菜长势监测方法[J]. 农机化研究, 2026, 48(2): 124-131.
- [10] 祝悦. 植物工厂育苗生长监测与管理系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [11] 李道亮, 赵晔, 杜壮壮. 农业领域多模态融合技术方法与应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 1-15.
- [12] 林智贤. 植物工厂生菜智能监测与生长仿真模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [13] 卢宇琪. 自然果园环境下基于深度学习的目标果实生长监测研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2024.