

植物可穿戴传感器在园艺作物生理生化信息感知领域的研究进展

陈先圣^{1,2}, 王雨晨², 张洪亮², 彭博³, 王英力^{1*}, 黄远^{2*}

¹华中农业大学工学院, 武汉 430070; ²华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430070; ³湖北工业大学生命科学与健康工程学院, 武汉 430068

摘要 园艺植物在文化传承、经济发展及生态系统的可持续性发展中具有重要意义, 但其发展正面临气候变化、劳动力短缺和资源利用率低下等挑战。园艺作物信息感知技术为其提供了创新的解决方案。其中, 植物可穿戴传感器作为一种新兴的监测工具, 凭借其高延展性、高柔韧性、高时空分辨率和良好的生物相容性等特点, 正逐渐成为植物信息获取的重要技术手段。然而, 目前尚缺乏针对可穿戴传感器在园艺植物领域应用的系统性总结。因此, 本文围绕着园艺植物的信息检测, 综述了植物可穿戴传感器在植物生长监测、含水量检测、茎流量分析、电信号采集和化学物质检测的研究及应用现状。最后, 对植物可穿戴传感器的现状进行了总结和展望, 以为园艺植物信息检测做出参考。

关键词 园艺植物, 信息监测, 可穿戴传感器, 智慧园艺

园艺植物涵盖水果、蔬菜、观赏树木及花卉等类别, 兼具食用、药用与观赏等多重功能, 是全球农业经济体系的重要组成部分。然而, 园艺植物正日益面临环境胁迫和生物胁迫的影响(Chen et al., 2023; Zhang et al., 2023)。外界胁迫(如盐碱、干旱、病虫害等)会严重影响园艺植物的生长发育, 会导致植物光合作用效率下降、代谢平衡紊乱、自毒物质积累, 进而造成园艺植物出现生长迟缓、形态异常、果实品质降低, 对园艺植物的产量与品质造成显著影响(Giraldo et al., 2019)。通过监测园艺植物生长过程中生理信息, 可以获取真实且直观的数据反馈, 从而深化对植物生长、发育以及适应环境条件过程的理解, 为及时调控植物生长环境, 提升植物抗逆性提供科学依据(Lee et al., 2010)。

近年来, 光谱技术(Liew et al., 2008; 于海业等, 2021)、机器视觉技术(Shin et al., 2023)和遥感技术(赵春江, 2014; Khanal et al., 2020)等检测方法发展迅猛, 为植物生理信息获取提供了重要技术支撑, 然而这些技术仍存在信息采集维度有限、需依赖大量预训练数据及检测设备成本高且需要专业人士操作等多重局限性(Chen et al., 2023), 促使研究方向向更轻量化、智能化的监测手段转型, 为可穿戴传感技术等新型监测方案的发展提供了迫切的应用需求。

材料科学的快速发展以及物联网技术的广泛应用, 极大地推动了传感技术的进步。近年来, 研究者开始将可穿戴传感技术(Huang et al., 2023; Shin et al., 2025)应用于植物生理信息监测领域。植物可穿戴传感器可直接附着于植物体表或茎秆, 将植物生理信息转换为可读的信号, 实现植物生理参数的实时采集。凭借其优异的柔韧性、高时空分辨率以及良好的生物相容性, 可穿戴传感器在植物生理信息监测方面展现出独特的优势。此外, 该技术能够以非侵入式的方式进行检测, 有效避免对植物造成损害, 也支持对单株植物的个性化监测, 为园艺生产调控提供了更加准确和直观的数据反馈, 同时也为智慧农业(Maddikunta et al., 2021; 赵春江, 2021)和精准农业(金继运, 1998; 于丰华等, 2020)的发展提供了强有力的技术支撑(渠纯纯等, 2023)。

收稿日期: 2025-05-29; 接受日期: 2025-07-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(No.2662024JC004, No.2662023GXQD001, No.2662025GXPY010)、武汉市自然科学基金(No.2024040801020292)和国家自然科学基金(No.32172651)

* 通讯作者。yingliwang@mail.hzau.edu.cn; huangyuan@mail.hzau.edu.cn

本文重点围绕园艺植物生理生化状态信息监测展开综述, 系统分析可穿戴传感器在园艺植物生长信息监测、含水量检测、茎流量分析、电信号采集和化学物质检测中的应用, 并展望了未来植物可穿戴传感器的研究方向。

1 植物可穿戴传感器的应用

1.1 生长信息监测

植物的生长过程是一个连续且动态变化的过程。植物可穿戴传感器能够通过检测植物生理参数, 进而表征植物生长信息, 实现对园艺植物生长速率进行连续、动态监测(Wang et al., 2023)。同时, 植物可穿戴传感器能够针对园艺植物的不同类型器官(如茎、叶片、果实等)进行特异性、重点检测(表 1)。

表 1 植物生长传感器概述

Table 1 Overview of plant growth sensors

传感器	制备方法	感应机制	基底材料	检测范围	检测对象	适配器官	参考文献
基于 Ti/Au 的应变传感器	金属溅射沉积	电阻	PDMS	0%-22%	幸运竹	茎	Nassar et al., 2018
基于壳聚糖的传感器	墨水直写法	电阻	\	0%-60%	黄瓜	果实	Tang et al., 2019
FBG 传感器	模板法	布拉格波长偏移	Dragon Skin	0%-25%	番茄	茎	Lo Presti et al., 2021
聚苯胺弹性带传感器	化学聚合	电阻	弹性带	0%-100%	向日葵	茎	Borode et al., 2023
导电纺织传感器	裁剪	电阻	导电纺织片	茎: 0%-20% 果实: 0%-50%	甜瓜	茎 果实	Di Tocco et al., 2023
PET 银箔传感器	蒸镀	隧道效应和电阻	PET	0%-1%	竹子	茎	Huang et al., 2023
3D 折纸传感器	LIG	电阻	PI	0%-100%	南瓜	叶	Zhang et al., 2024
超级电容水凝胶传感器	交联	电阻	水凝胶	0%-200%	芦荟	叶	Hsu et al., 2021
低蠕变水凝胶传感器	交联	电阻	水凝胶	0%-140%	\	茎	Xu et al., 2024
高度可拉伸传感器	化学合成	电阻	混合材料	0%-400%	燕麦	叶	Wang et al., 2024
基于液态聚合物可拉伸应变传感器	模板法	电阻	PDMS 和 Ecoflex 混合物	\	柑橘	果实	Lee et al., 2022

在植物生长监测中, 电阻式传感器因其制造工艺简单、响应范围广以及信号处理便捷等优点被广泛应用。电阻式柔性传感器的工作机制基于压阻效应: 当外界应力作用于器件时, 其嵌入式导电网络结构因材料形变产生几何重组或接触点重排, 从而引发导电路径的微观变化, 使传感器的电阻值与外部的压力或应力之间呈现规律性变化。

为了实现对植物生长信息的动态监测, 研究人员(Nassar et al., 2018)在聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)表面沉积一层金纳米颗粒薄膜作为应变的敏感元件(图 1a)。通过预应变技术使金属薄膜形成皱褶结构, 克服了金膜在高应变下的断裂问题, 可拉伸性提高至 35%。该传感器还具有较高的灵敏度, 其灵敏系数(Gradient Factor, GF)为 3.9, 能够实现微米级的生长监测。传感器监测结果表明, 大麦(*Hordeum vulgare*)和幸运竹(*Dracaena sanderiana*)的生长速率分别为 2.7 cm(图 1b)和 904.9 μm 。

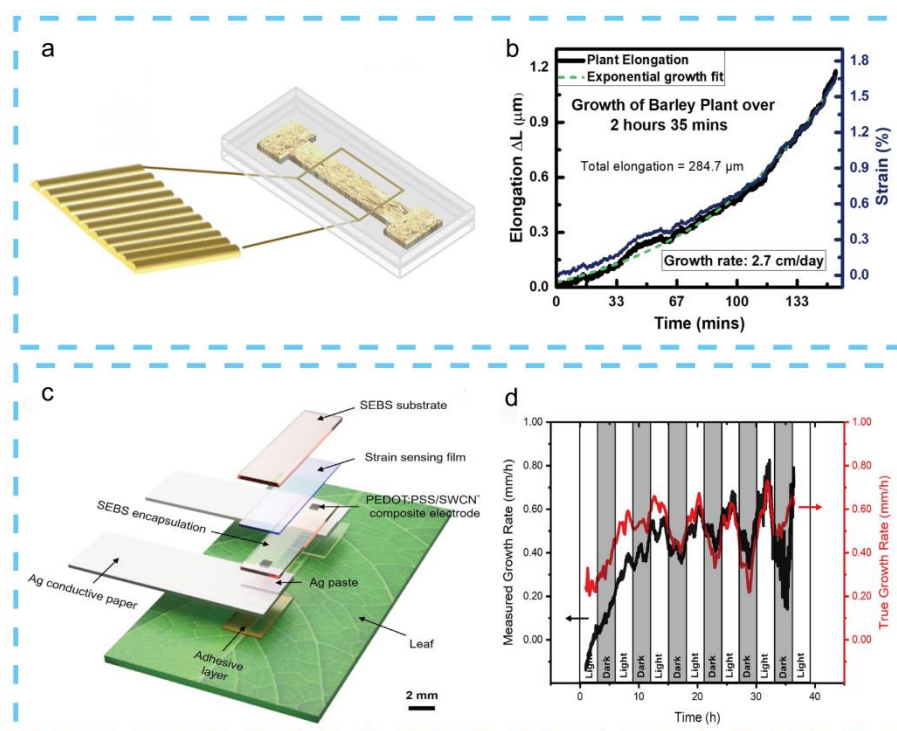


图 1 植物生长传感器应用示例(Nassar et al., 2018; Wang et al., 2024)

(a) 皱褶结构金属薄膜传感器; (b) 大麦实时生长情况; (c) 应变传感器在植物表面的逐层结构; (d) 通过应变传感器响应计算出的测量生长速率与从真实生长速率对比。

Figure 1 Application example of a plant growth sensor

(a) Corrugated structure metal thin-film sensor; (b) Real-time growth status of barley; (c) Layer-by-layer structure of strain sensor on plant surface; (d) Comparison between the measured growth rate calculated by strain sensor response and the real growth rate.

基底材料是实现可穿戴传感器可拉伸性能的核心要素, 水凝胶是一种由高分子网络与大量水组成的软质材料, 其独特的三维网状结构赋予了优异的柔韧性和可拉伸性。Hsu等(2021)利用水凝胶制备了植物可穿戴传感器, 并在 18 天内监测了芦荟(*Aloe vera*)叶片的生长, 显示出良好的线性关系和灵敏度, 应变传感范围达到 200%。然而, 传统水凝胶传感器虽具柔韧性, 但存在蠕变(长期应力下变形)和信号漂移问题。Xu等(2024)通过交联 PVA 和 AAm 网络, 构建了一种具有双网络结构的水凝胶应变传感器, 显著减少了应力期间的蠕变行为。通过长时间恒压测试(4 000 秒)证明, 该双网格水凝胶的漂移率较传统水凝胶降低 60%, 响应/恢复时间仅为 0.4 秒/0.3 秒, 线性度达 0.973, 成功解决了传统水凝胶的信号漂移和蠕变问题。

植物生长传感器的效能高度依赖于材料特性与工艺设计的协同优化,尤其是在保障高延展性响应与精密测量功能方面。现有研究(Wang et al., 2024)提出了一种基于 PEDOT:PSS 的应变传感器(图 1c),该传感器展现出卓越的可拉伸性能(720%应变范围),能够完美适配燕麦(*Avena sativa*)等快速生长植物的动态伸长需求(图 1d)。其 98.7%的可见光透过率与 45mg 的超低质量(仅为叶片重量的数百分之一)赋予了传感器优异的透明性和轻量化特性,显著降低了对植物生理活动的干扰。实验表明,该传感器在长期监测中未引起叶片细胞毒性或光合作用异常(叶绿素浓度保持稳定),且对植物整体生长速率无显著影响,充分验证了其优异的生物相容性。为提高传感器的高灵敏度,Huang 等(2023)开发了一种基于纳米级银膜的仿生可穿戴植物传感器,利用双 V 形凹槽结构设计放大了局部应变,使传感器对微小形变更敏感($Gf=182.02$)。

除了监测植物茎和叶片的生长外,植物可穿戴传感器还可用于果实的膨大过程。Tang 等(2019)开发了一种基于石墨和碳纳米管(Carbon Nanotube, CNT)的可穿戴应变传感器,能够以纳米级灵敏度(0.5%应变)和厘米级量程(0-150%应变)捕捉植物茎叶及果实的纳米级形变。在实际应用中,该传感器监测到茄子(*Solanum melongena*)的生长在秒级时间尺度上的振荡模式,揭示了果实的生长并非连续,而是在秒级时间尺度上呈现出快速生长和停滞交替的模式。

现有研究利用检测不同植物器官时,使用对应的特点的传感器(例如检测叶片时使用轻薄的传感器,检测茎时选用高灵敏度的传感器应对缓慢生长)在揭示园艺植物不同器官生长规律展现出独特优势。然而,该领域仍面临多重技术瓶颈亟待突破,当前研究中普遍采用的可拉伸基底材料,其对植物生长的潜在干扰效应仍需深入验证——材料与植物组织的生物相容性、长期接触是否会改变植物生理状态等问题尚未形成明确结论。此外,现有研究缺少在保证高拉伸性的同时具备高灵敏度,更难以精准定位植物体内发生生长变化的具体组织部位。更关键的是,当前研究虽能监测植物生长变化,却尚未建立这些生长数据与植物所受胁迫(如干旱、病害、营养缺乏等)之间的关联机制,难以通过生长信号反推胁迫发生类型与程度。上述问题的存在,在一定程度上制约了植物生长可穿戴传感器在精准园艺深度应用,未来需围绕材料生物相容性优化、多尺度感知性能提升及胁迫响应关联模型构建等方向开展系统研究。

1.2 植物水分信息检测

1.2.1 植物含水量检测

水在植物生命活动中意义重大,其生长发育各阶段都离不开水分。通常,植物组织含水量占鲜重的 80%-90% (Chen and Lu, 2005)。在现代农业生产中,精准掌握植物不同生育期的水分状况至关重要,这既能实现节水灌溉,又能保障作物稳产高产,是农业可持续发展的关键。通过开发实时监测系统与各类传感器(表 2)的结合,可以动态掌握植物体内水分分布与消耗规律,从而优化灌溉策略、提高水资源利用效率(Barbosa et al., 2022),为应对气候变化背景下的园艺生产韧性提供科学依据(Yin et al., 2021)。

为了避免传统机械的安装方式可能对植物造成的损伤(Lu et al., 2024),Im 等(2018)提出了一种基于聚酰亚胺(Polyimide, PI)薄膜的植物干旱传感器,用于监测烟草(*Nicotiana tabacum*)植株叶片含水量。该传感器以柔性 PI 薄膜为基底,通过单面粘性的聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene Terephthalate, PET)薄膜固定于叶片表面。这种设计使传感器更能够紧密贴合叶片,降低了两之间机械应力。之后的研究中(Peng et al., 2024)提出了一种基于金纳米粒子(AuNPs)修饰的叶片电容传感器(图 2a),实现了对绿萝(*Epipremnum aureum*)水分状态的实时监测。

表 2 植物含水量检测概述

Table 2 Overview of plant water content detection

传感器	制备方法	感应机制	基底材料	检测范围	作物	适配器官	参考文献
热传感器	溅射、光刻	温差	PI	75%–95%	白菜	叶	Atherton et al., 2012
自粘、防水和透气传感器	原位静电纺丝	电容	聚乳酸纳米纤维膜	40%-90%	绿萝	叶	Peng et al., 2023
透气纳米网湿度传感器	静电纺织、化学沉积	电阻	PVA	25%–98%	绿萝	叶	Jeong et al., 2019
电容式传感器	激光诱导石墨烯	电容	PI	10%-90%	绿萝	叶	Lan et al., 2020
气相打印聚合物传感器	气相沉积	电阻、电容	无	47%-93%	绿萝等	叶	Kim et al., 2019

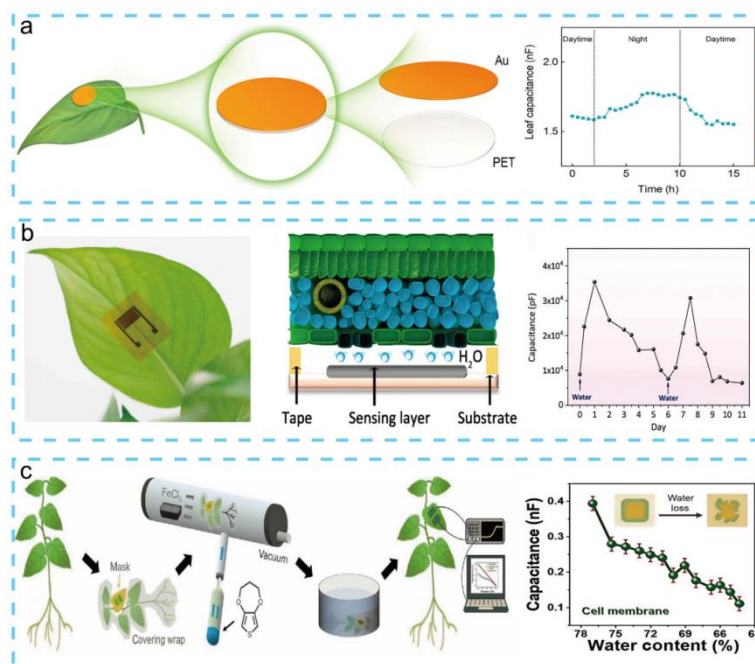


图 2 植物含水量检测示例(Jeong et al., 2019; Lan et al., 2020; Peng et al., 2024)

(a) 用于叶片电容监测的示意图和绿萝日夜的电容变化; (b) 叶片下表面附有湿度传感器的照片和传感器对于旱压力的电容响应随时间变化的实时监测; (c) 植物材料上进行打印聚合物薄膜和水分胁迫于电容的关系。

Fig.2 Example of plant water content detection

(a) Schematic diagram for leaf capacitance monitoring and the day-night capacitance changes of *Epipremnum aureum*; (b) Photo of a humidity sensor attached to the lower surface of a leaf, and real-time monitoring of the sensor's capacitive response to drought stress over time; (c) Printing of polymer films on plant materials and the relationship between water stress and capacitance.

上述传感器虽然能够获取含水量的变化信息,但其制备方法涉及光刻或磁控溅射技术,需要依赖昂贵的设备和材料,这阻碍了该类传感器的大批量生产与应用。激光诱导石墨烯技术(Laser induced graphene, LIG)能直接在基底上生成石墨烯薄膜或图案,具有高效、快速、

可定制化和低成本等优点。Lan 等采用激光诱导石墨烯技术结合聚酰亚胺(PI)柔性基底, 通过激光直写工艺制备出具有多级叉指结构的交叉电极阵列(Lan et al., 2020)。将氧化石墨烯(GO)水溶液通过滴铸法沉积于电极表面, 从而实现对湿度的高灵敏响应(图 2b)。该传感器成功应用于植物叶片的实时水分状态监测, 能够准确反映植物的蒸腾作用和气孔开闭情况。

然而, 由于 PET 薄膜的疏水特性, 该传感器虽能有效阻隔液态水渗透, 但其表面微纳结构可能导致空气中的水蒸气在传感器和叶片界面聚集。为解决上述问题, Jeong 等提出了一种基于透气纳米网状结构的湿度传感器, 通过使用生物相容性聚乙烯醇(PVA)纳米纤维材料和静电纺丝法, 解决了蒸汽聚集的问题, 实现了对皮肤及植物表面湿度的实时、长期监测(Jeong et al., 2019)。此外, Kim 等开发了一种基于气相沉积导电聚合物电极的长期健康监测技术(图 2c), 通过直接在活体植物表面打印聚(3, 4-丙烯二氧噻吩) (PProDOT-Cl) 电极, 实现了对植物水分胁迫的无损检测(Kim et al., 2019)。

1.2.1 植物茎流量检测

植物体内水分和溶解的养分通过木质部向上运输的生理过程称为茎流(又称植物茎流或液流)。茎流量是植物水分运输和利用的重要指标, 可以反映植物在根压和蒸腾作用共同驱动下, 根部吸收的水分通过茎部向上运输到叶片的能力。通过测定茎流指标, 可以评估土壤水分供应能力、植物蒸腾作用强度以及吸水效率。在园艺领域, 监测植物茎流能够间接反映根系活力、植物蒸腾作用、光合效率等多个生理过程(Kuruppuarachchi et al., 2025)。同时, 茎流量监测对于估算植物蒸腾速率、维持作物水分平衡、量化耕地作物的用水量从而提高作物生产力具有重要意义(Smith and Allen, 1996)。

Zhang 等(2022)展示了基于仿生自适应缠绕应变传感器的集成植物可穿戴系统, 其设计灵感来源于植物卷须的自适应缠绕结构。该传感器通过激光诱导石墨烯制成, 再将 LIG 转移到预拉伸的 Ecoflex (Ecological Flexibility)膜上, 通过调整预拉伸量调节传感器的应变范围, 释放预拉伸后形成自适应缠绕结构。检测茎流量的原理主要基于植物茎的物理变化: 植物的根部会根据蒸腾作用和水吸收的变化, 会发生膨胀和收缩, 这过程类似于人类脉搏的收缩和扩张, 通过检测这个脉冲可以有效地反映植物的水分状况。这项研究仿照自然界的卷须形状能够根据支撑物的形状和尺寸调整自身螺旋结构, 这种特性被转化为传感器的柔性自适应包裹能力, 可直接附着在具有腺毛和蜡质表面的植物上, 尤其适用于那些难以连接可穿戴植物传感器的植物表面。

Chai 等(2021)提出了一种可与植物共存的柔性电子传感器, 能够连续监测植物茎秆的水分运输情况。检测茎流量的原理是基于测量植物茎中汁液流动引起的热传输的空间各向异性。具体来说, 当热敏电阻工作时, 会导致局部温度的急剧上升; 如果有汁液流动, 热量会沿着流动方向更有效地传递, 从而在温度传感器之间产生明显的温度分布差异。在田间实验中, 该传感器成功实现了对西瓜(*Citrullus lanatus*)茎秆水分流动的实时监测, 并揭示了西瓜果实与枝条之间的昼夜水分分配规律。在此基础上, 之后的研究通过激光切割与 3D 打印技术开发了一种向日葵结构的植物可穿戴传感器, 用于监测南瓜(*Cucurbita moschata*)茎秆中水分运输(Wang et al., 2024)。其检测茎流量的原理与上述研究相同, 但创新性地引入了仿生向日葵结构的折叠式太阳能板, 有效地提高了能量收集效率。此外, 为应对太阳能中低能量密度的问题, 并实现能源自给自足, 研究人员受萤火虫信号行为启发, 开发了一种编码光信号传输协议, 结合无人机视觉, 实现了水分监测信息的获取与解析。

相较于刚性传感器与植物叶片表面的机械不相容性, 以及高成本光谱分析等技术局限, 植物可穿戴传感器在水分信息监测领域展现出显著潜力。此类传感器不仅能实时检测植物水分状态, 还能进一步检测到水分胁迫(Lazzoni et al., 2024; Huang et al., 2025), 为早期预警提供支持。然而仍存在挑战, 例如在面对雨天、高湿度或快速生长的植物时如何避免干扰以确

保传感器的准确性。未来的研究中应该多开发抗干扰的含水量传感器,以推动水分可穿戴传感器在园艺实践中的应用。

1.3 植物电信号检测

植物电信号是植物体内重要的信号传导途径之一,是植物对外界环境刺激做出的快速响应。植物电信号在植物细胞内、细胞间进行信息传递,进一步启动植物体内产生化学信号如过氧化氢、植物激素等,从而对植物生长发育、抗病抗逆反应进行调节(Shi et al., 2022)。此外,植物电信号不仅参与调控植物器官发育(如根系向水性生长、茎秆趋光性弯曲等),还能够对外部刺激做出迅速响应(Lew et al., 2020)。通过监测植物电信号(表 3),可以监测植物的生理状态及其对外界环境的反应,为园艺植物生长状态评估和生长环境调控提供依据(Xu et al., 2024)。

传统的植物电信号测量方法通常采用硬电极插入植物组织的方式,这可能会对植物造成损害(Mousavi et al., 2014)。因此,使用柔性的可穿戴传感器直接附着于植物表面进行电信号测量,不仅可以减小对植物的损害,还能实现连续监测。早期的研究中(Ochiai et al., 2015)提出了一种基于掺硼金刚石(Boron-Doped Diamond, BDD)电极的植物生物电位变化监测系统。在实验中,对于盆栽仙人掌(*Opuntia*),通过手指触摸诱导生物电位变化,监测短期响应(秒级),所有电极均检测到显著变化;对于地栽树木,BDD 和 Pt 电极都能对由环境因素变化引起的生物电位变化进行长期监测。

表 3 植物电信号检测概述

Table 3 Overview of plant electrical signal detection

传感器名称	制备方法	响应机制	基底材料	信号幅度	检测对象	适配器官	参考文献
硼掺杂金刚石(BDD)电极	商业电极	生物电势变化	BDD 电极	\	仙人掌	叶	Ochiai et al., 2015
热凝胶可变形离子电极	交联	溶胶-凝胶转变机制	热凝胶	41-73 mV	向日葵 烟草	茎 叶、 茎	Luo et al., 2021
舒适、自粘式电信号检测传感器	转印、丝网印刷	电阻	PVA 薄膜	0.208 ± 0.037 mV	捕蝇草	叶	Meder et al., 2021

尽管上述传感器对于具有光滑表面的植物表现出良好的附着性,但对于表面有毛的植物,传统电极可能难以有效地安装在其毛发状表面上,从而影响对植物生物电位检测的准确性。为此,Luo 等提出了一种基于热凝胶(PEG/PPG/PCL urethane, EPC)形态的可调离子电极,通过液-固相转变实现自适应贴合,解决了传统电极在复杂植物表面的贴合与信号稳定性问题(Luo et al., 2021)。实验表明中,传感器与植物具有高贴合度,并成功检测到了向日葵(*Helianthus annuus*)在受到非生物胁迫时(如火烧、机械损伤)时产生的电信号。但大部分凝胶电极在干燥的环境下容易脱水而失效(Wu et al., 2025),Meder 等开发了一种基于 PEDOT:PSS 导电聚合物的超薄、柔性、自粘附电极,通过纹身贴纸转移技术实现非侵入性贴合,用于多种植物的高保真、长期电信号监测(Meder et al., 2021)。值得注意的是,传感器厚度仅为数微米,重量轻(20 mg),且通过范德华力黏附于植物表面,无需粘合剂或固定装置即可实现稳定附着,从而避免对植物组织造成损伤。

植物可穿戴传感器利用通过优化设计以适配不同植物的特性,成功检测到植物非生物胁迫的电信号。然而,植物的电信号受到多种因素的影响(环境因素、土壤条件和外界干扰等)导致数据失真,当前核心挑战在于有效解耦复杂的电信号。

1.4 植物化学物质检测

植物激素是一类由植物自身合成的，在生长发育过程中起调控作用的有机化合物，能够通过复杂的信号网络精准调节植物生长发育各过程，具有微量高效的特点(Waadt et al., 2022)。同时，植物生长发育过程中，往往伴随着产生大量种类多样的次生代谢物，主要包括生物碱、萜类化合物、酚类化合物等。这些次生代谢物不仅参与植物抵御外界胁迫的防御反应，同时在植物与环境互作过程中发挥重要作用。对这些化学物质进行系统监测，有利于深入揭示植物生长、发育和胁迫响应的内在调控机制(Chu et al., 2024)，进而评估植物生长状态，并为诊断田间病害和制定病虫害防控策略，提供重要科学依据。

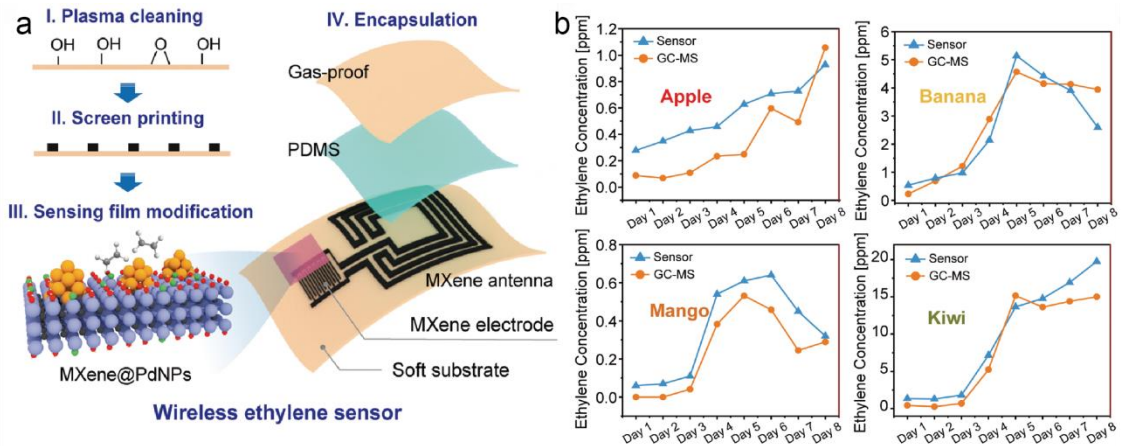


图3 植物激素检测示例(Li et al., 2023)

(a) 全MXene打印的植物可穿戴传感器制造过程与结构示意图; (b) 在八天内对苹果、香蕉、芒果和猕猴桃进行原位连续乙烯检测。

Figure 3 Example of phytohormone detection

(a) Schematic diagram of the manufacturing process and structure of fully MXene-printed plant-wearable sensors; (b) *In-situ* continuous ethylene detection on apples, bananas, mangoes and kiwifruits over eight days.

乙烯(C_2H_4)是一类典型的植物激素，在调控植物营养器官生长发育、影响植物开花结实、增强植物抗逆性及调节植株衰老过程中发挥作用(Xu et al., 2024)。在果实成熟过程中，乙烯能够通过诱导苹果酸/柠檬酸比值变化，促进果实内风味物质的积累(Huang et al., 2022)。Yan等(2024)提出了一种基于纳米复合材料的柔性可穿戴化学电阻型乙烯气体传感器，该传感器通过激光直写法印刷于柔性PET基底上，能够在室温下实现对猕猴桃(*Actinidia chinensis*)成熟与腐烂过程的实时动态监测。Li等(2023)开发了一种用于原位、连续分析植物乙烯排放的柔性射频谐振器(图3a)，通过在MXene中修饰钯纳米粒子(MXene@PdNPs)，提升了传感器对乙烯的响应能力和检测限。实验结果表明，该传感器能够准确监测苹果(*Malus pumila*)、香蕉(*Musa nana*)、芒果(*Mangifera indica*)和猕猴桃等水果的乙烯释放量，其结果与气相色谱-质谱联用方法测得的结果高度一致(图3b)。

活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)代表了一类在植物胁迫反应的初始阶段产生的信号分子(Seddaoui and Arduini, 2025)，在感知非生物和生物胁迫、整合不同的环境信号和激活胁迫反应网络方面起着至关重要的作用(胡海涛等, 2022)，从而有助于防御机制和植物恢复力(Zhou et al., 2024)。在ROS中， H_2O_2 是植物中的重要分子，能够快速地在植物中传导信号。为了检测植物中的 H_2O_2 ，最新的研究中将由天然生物聚合物壳聚糖和还原氧化石墨烯组成的生物水凝胶微针传感器贴附于植物叶片上(Singh et al., 2025)。该传感器表现出较宽的线性范围($0.1-4500 \mu mol \cdot L^{-1}$)、高灵敏度($14.7 \mu A \cdot \mu M^{-1}$)与低检测限($0.06 \mu mol \cdot L^{-1}$)。在植物叶

片内的原位在体检测时,其检测时间小于 1 分钟,此外,在病原体侵染模型验证中,该传感器成功监测到植物受细菌病原体侵染后 H_2O_2 浓度的显著升高。

α -萜烯是植物产生的挥发性有机化合物(VOCs)之一,参与植物的防御反应。Zheng 等(2023)提出了一种电阻型气体传感器,其敏感膜由聚乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(PEVA)/多壁碳纳米管(Multi-walled Carbon Nanotube, MWCNT)复合材料制成。研究还进行了植物胁迫监测应用测试,结果显示,当对 4mm 宽树皮造成损伤时,传感器电阻瞬时增加了 15%,随后因植物自愈逐渐恢复;而在水胁迫条件下, α -萜烯变化较小(约 2%电阻变化),这可能与胁迫类型及植物适应策略有关。上述结果表明,此类传感器在植物胁迫的早期诊断中展现出重要潜力,为实时监测植物健康状态及制定精准干预策略提供了创新得技术路径。

表 4 植物化学物质检测概述

Table 4 Overview of phytochemical detection

传感器	制备方法	检测对象	检测范围	检测精度	作物	适配器官	参考文献
基于复合材料的乙烯检测传感器	激光直写	乙烯	0.1—100 ppm	31 ppb	猕猴桃	果实	Yan et al., 2024
全 mxene 打印可穿戴传感器	丝网印刷	乙烯	0.5–20 ppm	0.084 ppm	苹果、香蕉、芒果、猕猴桃	果实	Li et al., 2023
没食子酸检测传感器	激光诱导石墨烯	没食子酸(GA)	1–1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.625 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	草莓	叶	Liu et al., 2024
测定活性氧的传感器	化学沉积	过氧化氢(H_2O_2)	0.05–3.15 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.01 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	芦荟	叶	Yao et al., 2020
监测活性氧水凝胶传感器	交联	过氧化氢(H_2O_2)	0.1–4500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.06 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	烟草	叶	Singh et al., 2025
农药检测传感器	激光诱导石墨烯	甲基对硫磷	20–500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	菠菜、苹果	叶、果实	Zhao et al., 2020
杀虫剂、水杨酸和 pH 检测可穿戴电化学传感器	激光诱导石墨烯	尼古丁类杀虫剂(IMD)、水杨酸(SA)和	IMD: 0–50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SA: 0–13.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ pH: 4.5–8.5	\	草莓	叶	Chu et al., 2024
多模态可穿戴传感器	化学合成	挥发性有机物(VOCs)	\	\	番茄	叶	Lee et al., 2023

在自然环境中,植物极少仅暴露于单一胁迫因子,通常需要同时应对多种复合胁迫。因此,将多种传感材料集成到一个传感器平台中具有重要意义。通过构建传感元件阵列,可以同时检测植物释放的多种挥发性有机化合物(VOCs),从而更全面地了解植物在不同条件下的生理状况。Lee 等提出了一个安装在植物叶片下表面的多模态可穿戴传感器平台,该平台集成了 VOC 传感器、湿度传感器、温度传感器(Lee et al., 2023)。通过番茄(*Solanum lycopersicum*)植株的在体实验证实,该传感器可以获取干旱、过量浇水、盐碱、黑暗等非生物胁迫信息。此外,研究还进行了生物胁迫实验,包括病毒接种(TSWV)和真菌接种(早疫病),结果表明该传感器能够比传统方法提前 2-3 天检测病毒和真菌感染。类似地,有研究开发了一种基于化学

电阻传感阵列的可穿戴贴片,该传感器阵列可区分 13 种 VOCs (包括醛类、酮类、醇类等),分类准确率达 97.6%,并成功应用于植物的早期疾病诊断和快速胁迫识别(Li et al., 2021)。

上述研究通过化学特异性传感与柔性电子技术的融合,制备了多种植物可穿戴传感器,成功实现了对植物中各种化学物质的检测。研究表明,该系统在精准园艺中具有显著的应用潜力,可为果实成熟度监测、病害防控、胁迫响应机制解析以及智能温室管理提供关键技术支撑。

2 总结与展望

植物可穿戴传感器因其高延展性、高柔韧性、高时空分辨率以及良好的生物相容性,能够实现植物的实时原位监测、连续动态检测以及病虫害早期预警诊断。因此,植物可穿戴传感器在园艺植物生长状态检测中具有广阔的应用前景。通过植物可穿戴传感器,可以实现实时、无损监测园艺植物在生长过程中发生的生理变化、有效反馈其受环境胁迫的影响程度,采集有价值的信息,为优化植物生长环境和提升农作物产量提供参考。然而,要充分挖掘植物可穿戴传感器在实际应用中的潜力,仍需克服若干挑战。

首先,植物可穿戴传感器的可靠性和稳定性是亟待解决的核心问题之一。尽管现有研究已成功实现了在实验室和温室等受控环境下的长期稳定性,但在田间复杂环境中(如暴晒、强光、潮湿、暴雨等苛刻条件),多数传感器仍难以正常工作。为应对这一挑战,可以从开发新型材料和改进制备工艺两个方面入手。例如,选择合适的封装材料(如硅胶或聚酰亚胺等)以增强传感器的防水性能和耐候性。其次,能源供给和功能系统的设计是植物可穿戴传感器面临的另一重要挑战。目前,大多数传感器依靠传统电池供电,但电池使用的寿命有限且在田间环境下回收和更换难,同时可能对环境造成污染。因此,未来的研究需要探索可持续的能源解决方案,例如能量收集技术(如太阳能、热能或振动能量收集)或低功耗设计策略。

为了更好的实现植物的智能化监测和调控,植物可穿戴传感器应该与基于物联网(Internet of Things, IOT)的设备集成,特别是制作的柔性电路与植物可穿戴传感器的连接(Ikram et al., 2024),能够采集数据并传输到智能终端。基于物联网的植物传感器的关键方面是数据收集和传输,为了应对园艺的生长环境采用无线通讯是最佳的选择,目前主流的无线通讯主要有蓝牙、射频识别(RFID)、Wi-Fi 和 ZigBee 等(Jin et al., 2020),但也存在传输距离和覆盖范围有限、能耗高以及不同通信技术之间的不兼容性,解决这些问题对未来发展也至关重要。目前柔性电路依旧依靠电池供电,后续的工作中可以将自供电技术和柔性电路相结合,组成自供给传感器数据采集系统。此外,该系统可与机器人等执行机构协同联动:传感器采集数据,物联网确保数据传输,而机器人等则执行浇水、施肥、施药等操作,实现集“感知-决策-执行”于一体的植物互联网架构。

植物释放的多维复杂生理信号难以通过单一传感器全面捕获,因此开发能同步检测多参数的多模态传感器成为未来技术突破的关键方向。当未来面对多个复杂信号时,人工智能是分析数据的解决方案(吕加一等, 2025),例如机器学习。机器学习可以在减少数据量,实现低功耗的传感器,此外,可以通过机器学习补偿传感器性能,利用解耦算法有效分离环境(如温湿度波动、光照强度变化)对输出数据的影响。同样可以利用人工智能算法对过去植物传感器采集的数据集资源进行训练(Shajari et al., 2023),以便实现植物胁迫或病害与之前处理方法的快速类比,也可对植物胁迫进行预测;另一种形式的反馈是营养水平,通过采用可穿戴传感器系统和先进的人工智能驱动的数据融合算法来管理营养失衡,以维持植物理想的营养水平。

综上所述,植物可穿戴传感器在园艺植物检测领域的广泛应用已为智慧农业感知层提供重要的技术支撑,但在实际生产应用中仍面临着诸多挑战。展望未来,随着新型传感材料、先进制造工艺以及集成组件的持续创新,植物可穿戴传感器在复杂环境中的鲁棒性将得到根本

性提升, 进一步赋能园艺产业。此类技术革新不仅有望破解传统监测手段的时空局限性, 还将通过数字化解析植物-环境互动机制, 为精准园艺调控提供新范式, 最终推动园艺产业向高效化、智能化与可持续化方向迈进。

作者贡献声明

陈先圣: 文献搜集整理、作图、撰写和修改论文; 王雨晨、彭博和张洪亮: 撰写和修改论文; 王英力和黄远: 选题、构思和修改文章, 资金支持。

参考文献

- Atherton JJ, Rosamond MC, Zeze DA (2012). A leaf-mounted thermal sensor for the measurement of water content. *Sens Actuators A Phys* **187**, 67-72.
- Borode T, Wang D, Prasad A (2023). Polyaniline-based sensor for real-time plant growth monitoring. *Sens Actuators A Phys* **355**, 114319.
- Barbosa JA, Freitas VMS, Vidotto LHB, Schleder GR, de Oliveira RAG, Da Rocha JF, Kubota LT, Vieira LCS, Tolentino HCN, Neckel IT, Gobbi AL, Santhiago M, Lima RS (2022). Biocompatible wearable electrodes on leaves toward the on-site monitoring of water loss from plants. *ACS Appl Mater Interfaces* **14**(20), 22989-23001.
- Chai Y, Chen C, Luo X, Zhan S, Kim J, Luo J, Wang X, Hu Z, Ying Y, Liu X (2021). Cohabiting plant-wearable sensor in situ monitors water transport in plant. *Adv Sci* **8**(10), 2003642.
- Chen R, Ren S, Li S, Han D, Qin K, Jia X, Zhou H, Gao Z (2023). Recent advances and prospects in wearable plant sensors. *Rev Environ Sci Biotechnol* **22**(4), 933-968.
- Chen S, Zhao C, Ren R, Jiang J (2023). Salicylic acid had the potential to enhance tolerance in horticultural crops against abiotic stress. *Front Plant Sci* **14**, 1141918.
- Chen Z, Lu C (2005). Humidity sensors: a review of materials and mechanisms. *Sens Lett.* **3**(4), 274-295.
- Chu G, Yu S, Wang Y, Zhang W, Xue B, Huang J, Wang Z, Luo J, Sun X, Li M (2024). A wearable electrochemical sensor for the monitoring of neonicotinoid insecticides, salicylic acid and the pH in plant guttation. *Chem Eng J* **498**, 155340.
- Di Tocco J, Lo Presti D, Massaroni C, Cinti S, Cimini S, De Gara L, Schena E (2023). Plant-wear: a multi-sensor plant wearable platform for growth and microclimate monitoring. *Sensors (Basel)* **23**(1), 549.
- Giraldo JP, Wu H, Newkirk GM, Kruss S (2019). Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors. *Nat Nanotechnol* **14**(6), 541-553.
- Hsu HH, Zhang X, Xu K, Wang Y, Wang Q, Luo G, Xing M, Zhong W (2021). Self-powered and plant-wearable hydrogel as led power supply and sensor for promoting and monitoring plant growth in smart farming. *Chem Eng J* **422**, 129499.
- Hu HT, Qian TT, Yang L (2022). Detection of reactive oxygen species using H₂DCFDA probe in plant. *Chin Bull Bot* **57**, 320-326. (in Chinese)
- 胡海涛, 钱婷婷, 杨玲 (2022). 基于 H₂DCFDA 荧光探针的植物活性氧检测方法. *植物学报* **57**, 320-326.
- Huang X, Liu L, Lin YH, Feng R, Shen Y, Chang Y, Zhao H (2023). High-stretchability and low-hysteresis strain sensors using origami-inspired 3d mesostructures. *Sci Adv* **9**(34), eadh9799.
- Huang Y, Huang Y, Gao M, Tian S, Xie S (2023). Wearable plant sensors based on nanometer-thick ag films on polyethylene glycol terephthalate substrates for real-time monitoring of plant growth. *ACS Appl Nano Mater* **6**(20), 19010-19017.
- Huang Y, Xiao M, Zhou X, Zhu J, Tian Y, Xie S, Gong Y, Zhong J (2025). A wearable and breathable sensor based on gradient porous electrodes for real-time leaf moisture monitoring. *Sens Actuators B Chem* **431**, 137461.
- Huang W, Hu N, Xiao Z, Qiu Y, Yang Y, Yang J, Mao X, Wang Y, Li Z, Guo H (2022). A molecular framework of ethylene-mediated fruit growth and ripening processes in tomato. *Plant Cell* **34**(9), 3280-3300.
- Im H, Lee S, Naqi M, Lee C, Kim S (2018). Flexible pi-based plant drought stress sensor for real-time monitoring system in smart farm. *Electronics* **7**(7), 114.
- Ikram M, Ameer S, Kulsoom F, Sher M, Ahmad A, Zahid A, Chang Y (2024). Flexible temperature and

- humidity sensors of plants for precision agriculture: current challenges and future roadmap. *Comput Electron Agric* **226**, 109449.
- Jeong W, Song J, Bae J, Nandanapalli KR, Lee S** (2019). Breathable nanomesh humidity sensor for real-time skin humidity monitoring. *ACS Appl Mater Interfaces* **11**(47), 44758-44763.
- Jin JY**(1998). Precision agriculture and its perspective in China. *J Plant Nutr Fert* **01**, 1-7. (in Chinese)
- 金继运** (1998). “精准农业”及其在我国的应用前景. *植物营养与肥料学报* **01**, 1-7.
- Jin X, Liu C, Xu T, Su L, Zhang X** (2020). Artificial intelligence biosensors: challenges and prospects. *Biosens Bioelectron* **165**, 112412.
- Khanal S, Kc K, Fulton JP, Shearer S, Ozkan E** (2020). Remote sensing in agriculture-accomplishments, limitations, and opportunities. *Remote Sens (Basel)* **12**(22), 3783.
- Kim JJ, Allison LK, Andrew TL** (2019). Vapor-printed polymer electrodes for long-term, on-demand health monitoring. *Sci Adv* **5**(3), eaaw463.
- Kurupparachchi C, Kulsoom F, Ibrahim H, Khan H, Zahid A, Sher M** (2025). Advancements in plant wearable sensors. *Comput Electron Agric* **229**, 109778.
- Lan L, Le X, Dong H, Xie J, Ying Y, Ping J** (2020). One-step and large-scale fabrication of flexible and wearable humidity sensor based on laser-induced graphene for real-time tracking of plant transpiration at bio-interface. *Biosens Bioelectron* **165**, 112360.
- Lazzoni V, Brizi D, Staglianò N, Giordano C, Pecoraro E, Anichini M, Ugolini F, Bindi M, Argenti G, Monorchio A, Rossi R** (2024). Development of a microwave sensor for the non-invasive detection of plant responses to water stress: a practical application on maize (*zea mays* l.). *Biosyst Eng* **246**, 191-203.
- Lee G, Hossain O, Jamalzadegan S, Liu Y, Wang H, Saville AC, Shymanovich T, Paul R, Rotenberg D, Whitfield AE, Ristaino JB, Zhu Y, Wei Q** (2023). Abaxial leaf surface-mounted multimodal wearable sensor for continuous plant physiology monitoring. *Adv Sci* **9**(15), eade2232.
- Lee HJ, Joyce R, Lee J** (2022). Liquid polymer/metallic salt-based stretchable strain sensor to evaluate fruit growth. *ACS Appl Mater Interfaces* **14**(4), 5983-5994.
- Lee WS, Alchanatis V, Yang C, Hirafuji M, Moshou D, Li C** (2010). Sensing technologies for precision specialty crop production. *Comput Electron Agric* **74**(1), 2-33.
- Lew TTS, Koman VB, Gordiichuk P, Park M, Strano MS** (2020). The emergence of plant nanobionics and living plants as technology. *Adv Mater Technol* **5**(3), 1900657.
- Lu JY, Li LG, Hou CC** (2025). *FRET-based biosensors: application of small molecule fluorescence probes in plants*. *Chin Bull Bot* **60**, 283-293. (in Chinese)
- 吕加一, 李乐攻, 侯聪聪** (2025). 基于 *FRET* 原理的生物传感器:小分子荧光探针在植物中的研究进展. *植物学报* **60**, 283-293.
- Liu K, Luo B, Zhang L, Hou P, Pan D, Liu T, Zhao C, Li A** (2024). *Flexible and wearable sensor* for in situ monitoring of gallic acid in plant leaves. *Food Chem* **460**, 140740.
- Li X, Sun R, Pan J, Shi Z, Lv J, An Z, He Y, Chen Q, Han RPS, Zhang F, Lu Y, Liang H, Liu Q** (2023). All-mxene-printed rf resonators as wireless plant wearable sensors for in situ ethylene detection. *Small* **19**(24), 2207889.
- Li Z, Liu Y, Hossain O, Paul R, Yao S, Wu S, Ristaino JB, Zhu Y, Wei Q** (2021). Real-time monitoring of plant stresses via chemiresistive profiling of leaf volatiles by a wearable sensor. *Matter* **4**(7), 2553-2570.
- Liew OW, Chong PCJ, Li B, Asundi AK** (2008). Signature optical cues: emerging technologies for monitoring plant health. *Sensors (Basel)* **8**(5), 3205-3239.
- Lo Presti D, Cimini S, Massaroni C, D Amato R, Caponero MA, De Gara L, Schena E** (2021). Plant wearable sensors based on fbg technology for growth and microclimate monitoring. *Sensors (Basel)* **21**(19), 6327.
- Lu Y, Yang G, Wang S, Zhang Y, Jian Y, He L, Yu T, Luo H, Kong D, Xianyu Y, Liang B, Liu T, Ouyang X, Yu J, Hu X, Yang H, Gu Z, Huang W, Xu K** (2024). Stretchable graphene-hydrogel interfaces for wearable and implantable bioelectronics. *Nat Electron* **7**(1), 51-65.
- Luo Y, Li W, Lin Q, Zhang F, He K, Yang D, Loh XJ, Chen X** (2021). A morphable ionic electrode based on thermogel for non-invasive hairy plant electrophysiology. *Adv Mater* **33**(14), 2007848.
- Maddikunta PKR, Saqib H, Mamoun A, Sweta B, Reddy GT, Khan WZ, Pham Q** (2021). Unmanned aerial vehicles in smart agriculture: applications, requirements and challenges. *IEEE Sens J* **21**(16), 17608-17619.
- Meder F, Saar S, Taccola S, Filippeschi C, Mattoli V, Mazzolai B** (2021). Ultraconformable, self-adhering surface electrodes for measuring electrical signals in plants. *Adv Mater Technol* **6**(4), 2001182.
- Mousavi SAR, Nguyen CT, Farmer EE, Kellenberger S** (2014). Measuring surface potential changes on

- leaves. *Nat Protoc* **9**(8), 1997-2004.
- Nassar JM, Khan SM, Villalva DR, Nour MM, Almuslem AS, Hussain MM** (2018). Compliant plant wearables for localized microclimate and plant growth monitoring. *npj Flex Electron* **2**(1), 1-12.
- Ochiai T, Tago S, Hayashi M, Fujishima A** (2015). Highly sensitive measurement of bio-electric potentials by boron-doped diamond (bdd) electrodes for plant monitoring. *Sensors (Basel)* **15**(10), 26921-26928.
- Peng B, Liu X, Yao Y, Ping J, Ying Y** (2024). A wearable and capacitive sensor for leaf moisture status monitoring. *Biosens Bioelectron* **245**, 115804.
- Peng B, Wu X, Zhang C, Zhang C, Lan L, Ping J, Ying Y** (2023). In-time detection of plant water status change by self-adhesive, water-proof, and gas-permeable electrodes. *ACS Appl Mater Interfaces* **15**(15), 19199-19208.
- Qu CC, Sun WX, Li Z, Wang XQ, He ZZ**(2023). Research progress and prospects of the plant flexible sensors. *Trans Chin Soc Agric Eng* **39**(8),32-43. (in Chinese)
渠纯纯, 孙文秀, 李臻, 王喜庆, 何志祝 (2023). 植物柔性传感器研究进展与展望. 农业工程学报 **39**(8), 32-43.
- Shin J, Mahmud MS, Rehman TU, Ravichandran P, Heung B, Chang YK** (2023). Trends and prospect of machine vision technology for stresses and diseases detection in precision agriculture. *AgriEngineering* **5**(1), 20-39.
- Shin J, Song JW, Flavin MT, Cho S, Li S, Tan A, Pyun KR, Huang AG, Wang H, Jeong S, Madsen KE, Trueb J, Kim M, Nguyen K, Yang A, Hsu Y, Sung W, Lee J, Phyo S, Kim J, Banks A, Chang J, Paller AS, Huang Y, Ameer GA, Rogers JA** (2025). A non-contact wearable device for monitoring epidermal molecular flux. *Nature* **640**(8058), 375-383.
- Shi GY, Sang YQ, ZhanG Js, Cai LL, Zhang JX, Meng P, Xue P, Qiao YS** (2022). Variation characteristics of plant electrical signal and their relationship with negative air ion under different light intensities. *Chin J Appl Ecol* **33**(2),439-447. (in Chinese)
施光耀, 桑玉强, 张劲松, 蔡露露, 张家兴, 孟平, 薛攀, 乔永胜 (2022). 不同光照强度下植物电信号变化特征及其与空气负离子的关系. 应用生态学报 **33**(2),439-447.
- Smith DM, Allen SJ** (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *J Exp Bot* **47**(12), 1833-1844.
- Shajari S, KuruvinaShetti K, Komeili A, Sundararaj U** (2023). The emergence of ai-based wearable sensors for digital health technology: a review. *Sensors (Basel)* **23**(23), 9498.
- Seddaoui N, Arduini F** (2025). Recent advances in wearable and implantable electrochemical (bio)sensors for plant health monitoring. *Trends Analyt Chem* **191**, 118336.
- Singh N, Zhang Q, Xu W, Whitham SA, Dong L** (2025). A biohydrogel-enabled microneedle sensor for in situ monitoring of reactive oxygen species in plants. *ACS Sens* **10**(3), 1797-1810.
- Tang W, Yan T, Wang F, Yang J, Wu J, Wang J, Yue T, Li Z** (2019). Rapid fabrication of wearable carbon nanotube/graphite strain sensor for real-time monitoring of plant growth. *Carbon N Y* **147**, 295-302.
- Wang L, Zhang Z, Cao J, Zheng W, Zhao Q, Chen W, Xu X, Luo X, Liu Q, Liu X, Xu J, Lu B** (2023). Low hysteresis and fatigue-resistant polyvinyl alcohol/activated charcoal hydrogel strain sensor for long-term stable plant growth monitoring. *Polymers (Basel)* **15**(1), 90.
- Wang S, Chai Y, Sa H, Ye W, Wang Q, Zou Y, Luo X, Xie L, Liu X** (2024). Sunflower-like self-sustainable plant-wearable sensing probe. *Sci Adv* **10**(49), eads1136.
- Wang S, Edupulapati B, Hagel JM, Kwok JJ, Quebedeaux JC, Khasbaatar A, Baek JM, Davies DW, Ella Elangovan K, Wheeler RM, Leahey ADB, Hill CW, Varnavas KA, Diao Y** (2024). Highly stretchable, robust, and resilient wearable electronics for remote, autonomous plant growth monitoring. *Device* **2**(4), 100322.
- Wu S, Li Y, Wang Q, Cai Y, Teng P, Li W, Zhang F, Xu L, Wang S** (2025). Wearable plant sensing devices for health monitoring. *Wearable Electron* **2**, 100-115.
- Waadt R, Seller CA, Hsu PK, Takahashi Y, Munemasa S, Schroeder JI** (2022). Plant hormone regulation of abiotic stress responses. *Nat Rev Mol Cell Biol* **23**(10), 680-694.
- Xu H, Zhang G, Wang W, Sun C, Wang H, Wu H, Sun Z** (2024). A highly sensitive, low creep hydrogel sensor for plant growth monitoring. *Sensors (Basel)* **24**(19), 6197.
- Xu W, Chen L, Hu X, Zhang L, Huang D, Li J, Xiong R, Huang C, Zhu M** (2024). Botanic signal monitor: advanced wearable sensor for plant health analysis. *Adv Mater Technol* **34**(51), 2410544.
- Yan H, Wang J, Shi N, Han Y, Zhang S, Zhao G** (2024). A flexible and wearable chemiresistive ethylene gas sensor modified with pdnps-swcnts@cu-mof-74 nanocomposite: a targeted strategy for the dynamic monitoring of fruit freshness. *Chem Eng J* **488**, 11.
- Yao Y, Liu X, Shao Y, Ying Y, Ping J** (2020). Noble metal alloy nanoparticles coated flexible mos₂ paper for the

- determination of reactive oxygen species. *Biosens Bioelectron* **166**, 112463.
- Yin S, Ibrahim H, Schnable PS, Castellano MJ, Dong L** (2021). A field-deployable, wearable leaf sensor for continuous monitoring of vapor-pressure deficit. *Adv Mater Technol* **6**(6), 2001246.
- Yu FH, Cao YL, Xu TY, Guo ZH, Wang DK**(2020). Precision fertilization by UAV for rice at tillering stage in cold region based on hyperspectral remote sensing prescription map. *Trans Chin Soc Agric Eng* **36**(15), 103-110. (in Chinese)
- 于丰华, 曹英丽, 许童羽, 郭忠辉, 王定康 (2020). 基于高光谱遥感处方图的寒地分蘖期水稻无人机精准施肥. *农业工程学报* **36**(15), 103-110.
- Yu HY, Li XK, Yu Y, Wang HJ, Zhang L, Zhang X, Sui YY**(2021). Research progress in the application of spectral technology in crop information perception. *J Jilin Agric Univ* **43**(02), 153-162. (in Chinese)
- 于海业, 李晓凯, 于跃, 王洪健, 张蕾, 张昕, 隋媛媛 (2021). 光谱技术在农作物信息感知中的应用研究进展. *吉林农业大学学报* **43**(02), 153-162.
- Zhang C, Kong J, Wang Z, Tu C, Li Y, Wu D, Song H, Zhao W, Feng S, Guan Z, Ding B, Chen F** (2024). Origami-inspired highly stretchable and breathable 3d wearable sensors for in-situ and online monitoring of plant growth and microclimate. *Biosens Bioelectron* **259**, 116379.
- Zhang C, Kong J, Wu D, Guan Z, Ding B, Chen F** (2023). Wearable sensor: an emerging data collection tool for plant phenotyping. *Plant Phenomics* **5**, 51.
- Zhang C, Zhang C, Wu X, Ping J, Ying Y** (2022). An integrated and robust plant pulse monitoring system based on biomimetic wearable sensor. *npj Flex Electron* **6**(1), 1-9.
- Zhao CJ**(2014). Advances of research and application in remote sensing for agriculture. *Trans Chin Soc Agric Mach* **45**(12), 277-293. (in Chinese)
- 赵春江 (2014). 农业遥感研究与应用进展. *农业机械学报* **45**(12), 277-293.
- Zhao CJ**(2021). Current situations and prospects of smart agriculture. *J South China Agric Univ* **42**(06), 1-7. (in Chinese)
- 赵春江 (2021). 智慧农业的发展现状与未来展望. *华南农业大学学报* **42**(06), 1-7.
- Zheng C, Zhou Q, Wang J, Du D** (2023). Wireless plant stresses monitoring with a wearable chemiresistor gas sensor at room temperature. *Sens Actuators B Chem* **381**, 133408.
- Zhao F, He J, Li X, Bai Y, Ying Y, Ping J** (2020). Smart plant-wearable biosensor for in-situ pesticide analysis. *Biosens Bioelectron* **170**, 112636.
- Zhou S, Zhou J, Pan Y, Wu Q, Ping J** (2024). Wearable electrochemical sensors for plant small-molecule detection. *Trends Plant Sci* **29**(2), 219-231.

Advances in Plant Wearable Sensors for the Physiological and Biochemical Information of Horticultural Crops

Xiansheng Chen^{1,2}, Yuchen Wang², Hongliang Zhang², Bo Peng³, Yingli Wang^{1*}, Yuan Huang^{2*}

¹College of Engineering, Huazhong Agricultural University, wuhan 430070, China; ²college of horticulture & forestry sciences of huazhong agricultural university, wuhan 430070, China; ³School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, wuhan 430068, China

Abstract Horticultural plants are of great significance in cultural inheritance, economic development, and ecosystem sustainability. However, the advancement of horticultural practices is hindered by challenges such as climate change, labor shortages, and inefficient resource utilization. Plant information sensing technology provides innovative solutions to these challenges. Among these technologies, plant wearable sensors have emerged as promising tools for monitoring due to their high flexibility, extensibility, spatiotemporal resolution, and biocompatibility, gradually becoming essential technologies for acquiring data on plant. Nevertheless, a systematic review of wearable sensor applications in horticultural plant research remains lacking. This paper focuses on horticultural plant information detection and comprehensively examines plant wearable sensors' research and application status in the following areas: growth monitoring, moisture content detection, stem sap flow analysis, electrical signal acquisition and chemical substance detection. Finally, we summarize the current status of plant wearable sensors and propose future development directions, aiming to provide valuable references for information detection in horticultural plants.

Keywords horticultural plants, information monitoring, wearable sensors, smart horticulture

* Author for correspondence. E-mail: yingliwang@mail.hzau.edu.cn; huangyuan@mail.hzau.edu.cn

通讯作者简介

王英力, 博士, 华中农业大学讲师, 硕士生导师, 主要从事柔性可穿戴传感器及农产品质量安全检测技术研究, 重点对拉曼光谱、太赫兹波谱、电化学传感器等无损检测技术开展深入研究。相关研究成果发表在 *Science Advances*、*Advanced Science*、*Biosensors and Bioelectronics* 及 *Trends in Analytical Chemistry* 等国际著名学术期刊上。

黄远, 教授, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事设施蔬菜嫁接生理、无损检测和工厂化育苗技术研究。重点研究番茄、甜瓜等果菜类蔬菜种苗质量无损检测技术。