叶婷,罗真,徐雯颖,等.面向植物生长监测的纳米传感器:工作机制与系统集成应用示例[J].华中农业大学学报,2026,45(3):18-33.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.03.002

面向植物生长监测的纳米传感器:工作机制与系统集成应用示例

叶婷[1,2],罗真[2],徐雯颖[2],李家其[2],张友昌[3],王孝刚[3],宋智勇[2,4]

1.武汉船舶职业技术学院计算机信息技术学院,武汉 430050;
2.华中农业大学作物纳米生物学与技术中心,武汉 430070;
3.湖北省农业科学院经济作物研究所,武汉 430064;
4.华中农业大学化学学院,武汉430070

摘要 智慧农业的发展亟须超越传统环境监测,实现对植物内在生理状态的精准、实时感知。纳米传感器凭借其纳米尺度效应所带来的超高灵敏度、卓越特异性及与生物体系的良好相容性,为原位、无损、动态解析植物生理过程提供了前所未有的技术工具。本文系统综述了面向植物生长监测的纳米传感器的设计原理、材料体系与应用前沿,重点剖析了纳米传感器在植物体内关键生理信号分子(如H_2O_2、Ca^{2+}、植物激素等)动态检测中的机制与效能。探讨了纳米传感数据(如近红外荧光影像、高频电化学信号)的特有属性对农业物联网、数据挖掘与智能建模提出的新挑战与新兴解决方案;通过结合一个集成多源纳米传感数据的"智慧种植分析系统"实例,详细阐述了从数据采集、智能处理到决策支持的全链条集成路径。从材料创新、智能抗干扰、系统集成与风险评估4个维度,对纳米传感器在迈向规模化田间应用中所面临的瓶颈问题与未来发展方向进行了系统性展望。

关键词 纳米传感器;智慧农业;植物生理监测;信号处理;数据融合;生物相容性;精准农业
中图分类号 S24;TP212 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)03-0018-16

农业是人类社会赖以生存和发展的基础产业。随着全球人口的持续增长和气候变化的影响,农业生产面临着前所未有的压力。据联合国粮农组织(FAO)预测,到2050年全球粮食需求将增加60%以上,而可耕地面积却因城市化、土壤退化等因素不断减少[1]。在这一背景下,提高农业生产效率、实现资源可持续利用成为当务之急。智慧农业(smart agriculture),作为农业信息化演进的高级阶段,即"农业4.0"的核心形态,正深刻重塑传统的农业生产方式[2]。它不再依赖于模糊的经验判断,而是以"数据"为核心生产要素,通过现代信息技术(如物联网、大数据、人工智能、机器人技术)与农业生产的全链条深度融合,实现农业信息的精准感知、生产过程的定量决策与农业装备的智能控制。

在智慧农业的技术体系中,"信息感知"是一切智能决策的逻辑起点与物理基础,"智慧农业是以信息和知识为核心要素的全新的农业生产方式"[3]。当前,农业生产中的信息感知主要依赖于各种传感器,但其监测对象大多集中于环境参数,如土壤温湿度、光照强度、空气温湿度等。然而,这些参数并不能直接反映植物的内在生理状态。植物的生长和健康受到多种内在信号分子的调控,如激素、活性氧、糖分等。这些信号分子在植物应对生物胁迫(如病虫害)和非生物胁迫(如干旱、高温、盐碱)时起着关键作用[4]。因此,实时、原位地监测这些生理信号,对理解植物生长规律、早期诊断胁迫,实现精准干预具有重要意义。

然而,实现对植物体内微量、动态变化的生理信号分子的精准监测,是传统传感技术难以逾越的瓶颈[5-6]。其挑战主要在于:(1)灵敏度不足。许多关

收稿日期:2025-09-03
基金项目:国家自然科学基金项目(22577034);国家级大学生创新创业训练计划项目(202210504006)
叶婷,E-mail:Ytwhh199@163.com
通信作者:宋智勇,E-mail:songzhiyong@mail.hzau.edu.cn

键信号分子在植物体内的基础浓度极低(μmol/L甚至nmol/L级别),且在胁迫下变化幅度细微;(2)特异性差。植物体内环境复杂,存在大量结构相似的干扰物质;(3)侵入性损伤。传统的取样检测方法会破坏植物组织,无法实现连续动态监测;(4)时空分辨率低。难以在活体、原位条件下实现特定组织或细胞器水平的信号可视化。纳米技术的兴起为解决上述挑战带来了革命性的机遇。国际学术界已敏锐地洞察到纳米传感器在农业领域的巨大潜力。2019年,美国国家科学院、国家工程院和国家医学院联合发布的权威报告《2030年推动食品与农业研究的科学突破》中,将“传感技术”列为五大驱动技术之一,并特别强调了纳米传感器在实现精准农业中的核心作用[7],该报告展望,未来的农场将是一个布满智能传感器的网络化系统,农场主可远程、实时地获取从环境到植物内在生理的全方位数据。

本文聚焦于“植物生理监测”这一智慧农业感知层的前沿,系统梳理纳米传感器的技术原理、材料体系及其在解析植物生命活动中的应用,深入剖析纳米传感器如何服务于植物生理这一核心对象,详解各类纳米传感器的设计原理与性能优势,全面展示信号分子在监测不同生理信号分子中的前沿应用案例,并客观讨论其生物相容性等关键限制因素;深入探讨纳米传感数据特有的高维、非线性、影像化等特征,对后续数据处理、传输、建模与系统集成带来的新挑战与创新解决方案;并结合笔者所在团队开发的智慧种植数据分析系统进行相关讨论,旨在为纳米传感器在智慧农业领域中的应用提供参考。

1　纳米传感器用于植物生长监测的机制与系统构成

纳米传感器作为前沿的感知工具,正以前所未有的空间与时间分辨率,开启植物内在生理过程的“黑箱”,推动植物科学进入实时、原位监测的新时代。

1.1　纳米传感器的分类与性能优势

纳米传感器是指至少一维尺寸在1~100 nm范围内,能够将待测的物理、化学或生物量转换为可检测信号(如光学、电学信号)的器件或系统[8]。由于其尺寸与许多生物大分子相当,纳米材料呈现出独特的表面效应、小尺寸效应和量子效应,从而赋予纳米传感器以传统传感器所不具备的卓越性能[5-6]:(1)超高灵敏度与低检测限:巨大的比表面积增强了与目标物的相互作用;(2)卓越的特异性:通过精密的表面功能化修饰,可实现“锁-钥”式的高选择性识别;(3)优异的生物相容性与原位监测能力:某些纳米材料(如近红外荧光碳纳米管)能够穿透植物细胞壁并被递送至特定部位,实现活体、无损、长期成像;(4)多功能集成:可在一颗传感器上同时集成多种传感单元,实现多靶标同步检测。

根据检测原理和目标物的不同,纳米传感器主要可分为3类:(1)纳米物理传感器:用于监测温度、湿度、机械应力等物理参数;(2)纳米化学传感器:用于检测特定化学分子,如气体(乙烯、CO_2)、离子(Ca^{2+}、K^+)、营养物质(NO_3^-)等;(3)纳米生物传感器:通过集成酶、抗体、DNA/RNA适配体等生物识别元件,特异性探测激素、信号分子(如H_2O_2、ABA)、代谢物乃至病原体。

与传统传感器相比,纳米传感器凭借其纳米尺度效应,在灵敏度、特异性、响应速度等方面表现出显著优势。例如,在对植物胁迫关键信号分子H_2O_2的检测中,纳米传感器在检测限、稳定性和抗干扰能力上全面优于传统方法(如比色法)。此外,其优异的亮度、光稳定性(抗光漂白)、可修饰性、高信噪比等特点,使其非常适合在复杂的植物体内环境中进行长期、稳定的监测工作[5]。这些核心优势奠定了其在精准农业和高通量植物表型分析中的应用基础。不同类型纳米传感器的材料构成、作用机制及其在植物生理监测中的应用潜能系统总结于表1。

1.2　纳米传感器的系统集成

从系统集成的角度看,面向植物生长监测的纳米传感器主要分为2大类:体外可穿戴纳米传感器和体内植入式纳米传感器。这2种平台在应用场景、集成方式和技术挑战上各有侧重,共同构成了完整的植物监测技术体系。表2进一步从监测维度(生理、生化、环境)、监测目标、所用纳米传感器类型及集成方式等方面,综合对比了纳米传感器在植物生长多维度监测中的应用实例。

表1 纳米传感器类型、作用机制及其在植物生理监测中的应用潜能

Table 1 Nanosensor types, mechanisms of action, and potential applications in plant physiological monitoring

传感器类型 Types of sensors	工作机制 Working mechanism	空间分辨率 Space resolution	活体/原位能力 *In vivo*/*in situ* capability	生物相容性 Bio-compatibility	优点 Advantages	挑战 Challenges	在植物中检测的分析物 Analyses detected in plants
荧光共振能量转移 Fluorescence resonance energy transfer	由识别元件与报告元件(荧光团对)构成,通过能量转移反映构象变化	亚细胞/细胞级	是(遗传编码)	高	高灵敏度、低检测限、高时空分辨率	荧光蛋白表达稳定性差、易光漂白、背景信号干扰、缺乏统计分析方法	DNA、金属离子、葡萄糖、蔗糖、ATP、植物雌激素
表面增强拉曼散射 Surface-enhanced Raman scattering	通过金属表面吸附分析物增强拉曼信号	亚细胞/细胞级	是(需递送)	中-低	超高灵敏度(单分子级别)、无光漂白、可多路检测	适用分析物有限、仪器复杂	腺嘌呤二核苷酸、葡萄糖
电化学传感器 Electrochemical sensors	基于工作电极、对电极和参比电极,检测电化学响应或电阻变化	组织/整体级	通常否	低	操作简单、高灵敏度(ng/L～mg/L级)、成本低、可直接分析、适用分析物广泛	需现场电源、具有侵入性和破坏性、对温度/pH敏感	重金属、ROS、植物硫醇、生长素、酶、葡萄糖、VOCs
电晕相分子识别 Corona phase molecular recognition	基于分子识别机制,表面电晕相调控荧光开关	细胞/组织级	是(近红外)	中	光稳定性强、无光漂白、近红外区活体光学检测	灵敏度与特异性有限、活体内稳定性不足、需针对分析物设计电晕相	多巴胺、一氧化氮、过氧化氢、葡萄糖
压电传感器 Piezoelectric sensor	机械振动转化为电信号	组织/整体级	是	中	可实时监测植物机械环境(如生长过程)	成本高、制备工艺复杂、无光学读出、尚未在植物系统中实际应用	形态发生中的机械力

表2 纳米传感器在植物生长多维度监测中的应用

Table 2 Applications of nanosensors in multidimensional monitoring of plant growth

监测维度 Monitoring dimensions	检测对象 Analyte	传感器类型与作用机制 Sensor types and sensing mechanisms	检测限和检测范围 Detection limits and ranges	优势 Advantages	挑战与局限性 Challenges and limits	参考文献 References
水分生理 Hydro-physiological processes	叶片蒸腾速率/湿度	共价有机框架薄膜的柔性可穿戴湿度传感器(电信号变化)	高灵敏度(0.839 9 nA/%RH);极高分辨率(0.056 4%);快速响应/恢复(5 s/2 s)及宽湿度响应范围(10%～98% RH)	高灵敏度;柔性可拉伸特性及与植物叶片的长期兼容性	实验室环境的验证局限性;制备工艺的复杂性;预测模型对不规则生理变化数据的预测精度	[9]
	植物茎秆直径变化	碳化丝绸乔其纱作为敏感材料的柔性应变传感器(电阻变化)	检测极限:0.03%～0.17%应变;拉伸范围:高达100%应变	高灵敏度与宽检测范围并存;轻量化、低成本;强适应性;多功能集成;生物相容性好	生长与水力效应的区分;检测极限与线性范围受电路模块限制;能源依赖、数据解析复杂度	[10]
作物养分监测 Precision nutrient sensing	锌缺乏评估	氧化石墨烯与上转换纳米颗粒的复合体系(荧光淬灭)	直接检测植物RNA提取物中的特定mRNA,无需反转录或扩增步骤	便携性强;快速简便、高稳定性;无需扩增	依赖特定激光器与光学配件;通用性受限;抗干扰能力与长期稳定性	[11]

续表 2 **Continued Table** 2

监测维度 Monitoring dimensions	检测对象 Analyte	传感器类型与作用机制 Sensor types and sensing mechanisms	检测限和检测范围 Detection limits and ranges	优势 Advantages	挑战与局限性 Challenges and limits	参考文献 References
胁迫信号 Stress-induced signals	镁离子 Mg^{2+}	全固态微针型离子选择性电极（电位响应）	检测限：1.0×10^{-7} mol/L 线性范围：10^{-6}～10^{-1} mol/L	可实现活体、原位检测；无需破坏植物组织；响应快、检测限低、寿命较长	敏感膜易受光、氧等因素影响，导致性能逐渐衰退；存在干扰离子影响选择性	[12]
	活性氧 ROS	AIE 特性的 NIR-II 荧光团与多金属氧酸盐共组装（NIR-II荧光信号）	检测限～0.43 μmol，结合机器学习模型，识别准确率＞96.67%	高穿透性与低背景干扰；高灵敏度与快速响应；非侵入式、物种通用；智能识别	数据集规模有限；传感器在植物体内的长期稳定性与生态安全性需进一步验证	[13]
	一氧化氮 NO	3,4-二氨基苯基功能化葡聚糖修饰的单壁碳纳米管（近红外荧光猝灭）	检测限：～70 nmol响应时间：数秒内完成荧光猝灭	组织穿透性强、背景干扰小；光稳定性高；可逆检测；生物相容性好；可实现细胞内及活体实时成像	检测基于荧光“关闭”型信号，灵敏度受限；检测限仍高于部分金属荧光探针；在复杂生物环境中可能受其他氧化剂干扰	[14]
	钙离子 Ca^{2+}	荧光共振能量转移的基因编码钙离子传感器（荧光共振能量转移）	高时空分辨率：可实时监测亚细胞水平的 Ca^{2+} 动态	基因编码：无需染料加载，可稳定遗传表达；亚细胞定位：可精确研究特定区域 Ca^{2+} 信号；活体成像：适用于活细胞、活体组织的长时间动态观测	内源性钙调蛋白可能影响传感器动态范围；需针对不同细胞区室设计多种靶向构建体	[15]
植物激素 Phytohormones	生长素 Auxin	碳纤维微电极电化学传感器 T（电氧化反应）	检测范围：0.1～10 000 ng/mL；检测限：10.8～57.8 pg/mL	高灵敏度与宽检测范围；抗干扰性强、实时在线监测	植物体内复杂环境；植入性损伤；长期稳定性	[16]
	脱落酸 Abscisic acid	Au@SnO_2核壳纳米颗粒修饰的垂直石墨烯电化学微针阵列传感器（直接电催化氧化 ABA 分子）	检测范围：0.012～495.2 μmol 检测限：0.002～0.005 μmol	原位检测；高灵敏度与低检测限；宽 pH 适应性；微型化与低损伤；无需复杂前处理	无法单细胞水平检测；选择性有限；制备工艺复杂	[17]
	乙烯 Ethylene	全 MXene 印刷的射频谐振器，结合 MXene@Pd-NPs 作为敏感材料（电阻变化）	检测限：0.084 mg/L；检测范围：0.5～20 mg/L	全印刷制造；柔性可穿戴；无线无源检测；高导电性与分辨率、实时连续监测	稳定性受限；灵敏度在高浓度区下降；选择性有待进一步提升；机制尚未完全明确；规模化组网应用尚未实现	[18]
	赤霉素 Gibberellin	聚合物包裹的单壁碳纳米管（近红外荧光强度变化）	检测限分别为 542 nmol（GA_3）和 2.96 μmol（GA_4）；响应时间＜1 min	无需破坏植物组织；实现实时、原位、高时空分辨率的赤霉素动态监测；适用于多种植物物种	在复杂植物体内环境中可能受干扰；长期稳定性和生物相容性需进一步验证	[19]
	水杨酸 Salicylic acid	基于微针阵列电极的植物可穿戴电化学传感器（电化学检测）	检测限：2.74 μmol 检测范围：150 μmol	微创、实时、连续监测；物种通用性、便携性强；抗污染；可复用性与多目标潜力	温度敏感性；复杂基质干扰；定量限制；长期稳定性； 工艺复杂度	[20]

续表2 **Continued Table** 2

监测维度 Monitoring dimensions	检测对象 Analyte	传感器类型与作用机制 Sensor types and sensing mechanisms	检测限和检测范围 Detection limits and ranges	优势 Advantages	挑战与局限性 Challenges and limits	参考文献 References
病害与病原 Diseases and pathogens	植物病害	还原氧化石墨烯基化学电阻传感器(电阻变化)	检测限低至0.13～1.4 mg/L(单种VOC);响应时间<20 s	非侵入式;实时、连续监测;高灵敏度与特异性	对温度、湿度敏感,需校准以减小环境干扰;数据分析依赖模式识别算法,需配套数据处理系统	[21]
	细胞外DNA	聚乙烯亚胺修饰的二氧化硅纳米颗粒负载荧光染料自报告型荧光纳米传感器(静电相互作用)	检测范围:可检测低至10^3 CFU/mL的细菌浓度;响应时间:在感染后30 min内即可发出信号	非侵入性;高灵敏度与特异性;实时监测;生物相容性好;操作简便	规模化生产与成本;检测对象局限;长期生态安全性	[22]

1)体外可穿戴纳米传感器。传感器监测技术为现代农业研究从宏观经验管理迈向微观精准调控提供了关键数据支撑,其重要性不言而喻。然而,传统的无线传感器网络和图像分析技术存在部署成本高、数据分辨率低、易受环境干扰等局限性,难以实现对植物生理状态的实时、原位监测[23]。植物可穿戴传感器凭借其可直接附着于植物表面的特性,实现了对植株生长、生理参数及胁迫相关挥发物的持续、原位监测[24-25]。这不仅有效弥补了传统技术的不足,以其低成本、高分辨率优势提供了前所未有的实时植物数据,更推动农业研究进入一个能够动态感知植物自身"心声"的新阶段,为精准农业和植物表型组学的发展奠定了坚实的基础[26-27]。

图1展示了多种典型的体外可穿戴纳米传感器设计,主要包括:Lee等[28]报道了一种附着于植物叶片下表面的多模态可穿戴传感器,用于通过追踪植物及其微环境的生化与生物物理信号来持续监测植物生理状态。该传感器平台集成了检测挥发性有机化合物(VOCs)、温度和湿度的传感单元。选择气孔密度较高的叶片背面作为附着位点,以提升信号强度。这一多功能平台可实现从追踪植物失水到早期检测植物病原体等多种胁迫监测应用。研究还开发了机器学习模型,用于分析多通道传感器数据,能够在接种后早至4 d定量检测番茄斑萎病毒。该模型还评估了不同传感器组合对早期病害检测的效果,并预测至少需要包括VOC传感器在内的3种传感器(图1A)。

Li等[21]开发了一种可附着于活体植物的可拉伸、叶片可附着式VOC传感器,用于实时分析植物挥发物谱,以实现早期病害诊断和快速胁迫识别。该传感器阵列基于石墨烯传感材料和柔性银纳米线电极,构建在受剪纸启发的可拉伸基底上,以减小应变干扰。传感器能够以低于百万分之一的浓度快速(<20 s)检测关键植物挥发物。通过多重传感阵列,能够以>97%的准确率区分13种不同的植物VOCs。实际应用中,该可穿戴传感器贴片成功实现了对番茄晚疫病(接种后早至4 d)和机械损伤(1 h内)的非侵入性早期检测(图1B)。

Li等[29]制备了1种全可拉伸摩擦纳米发电机(fully stretchable triboelectric nanogenerator, FSTENG),它由电纺电极和具有反泡沫镍结构的多孔PDMS摩擦层构成,该FSTENG能输出高达92 V的优化电压,是基于平坦PDMS膜的TENG的10倍,其优异性能归因于多孔PDMS膜增加了比表面积和表面粗糙度。重要的是,FSTENG在拉伸率为50%时仍能保持稳定的输出性能。基于这些特性,该FSTENG被设计为用于手指弯曲和行走状态监测的自驱动传感器。此外,研究还成功将FSTENG附着于植物叶片上,用于在自然环境中监测风速,无需外部电源(图1C)。

Kim等[30]采用气相打印技术,将共形导电聚合物电极直接打印在活体植物表面。这些电极被用于通过生物阻抗谱来探测生长中植物的健康状况。与传统的粘附薄膜电极不同,这种气相打印电极不会因生物体成熟而从微结构表面脱落,并且未观察到对植物自然生长模式和自我维持能力产生明显影响。利用这种持久性电极进行的按需、非侵入性生物阻抗谱测量,能够在植物的整个生命周期中,可靠地检测由脱水和紫外线A辐射引起的深层组织损伤(图1D)。

Lee等[31]报道了一种非常规的单步合成方法,用于制备基于多维碳结构的单片集成电子器件。集成

的场效应晶体管和传感器阵列由碳纳米管通道与石墨电极/互连线直接在合成过程中形成。这些全集成、全碳器件具有高度柔性，可转移到平面（如纸张、衣物）和非平面（如指甲）基底上。更重要的是，该传感器网络能够与自然界固有的生命形式（如活体植物或昆虫）进行界面集成，用于实时、无线感知环境条件（图1E）。

尽管植物可穿戴传感器在实时、原位健康监测方面展现出巨大潜力，但其从实验室走向实际农业应用仍面临一系列独特挑战[32]：（1）新型生物标志物的发掘与验证；（2）多模态传感与传感器阵列的集成；（3）系统集成与可持续能源供给；（4）环境稳定性与空间分辨率。未来研究将致力于将传感器产生的大数据与人工智能（AI）相结合，实现从“观测”到“诊断-决策-执行”的闭环，最终实现通过数据驱动的“智慧农业”来定量提升作物产量与品质，以及探索利用自然环境中的可持续能源（特别是太阳能）为传感器网络供电，摆脱电池限制、实现大规模部署。

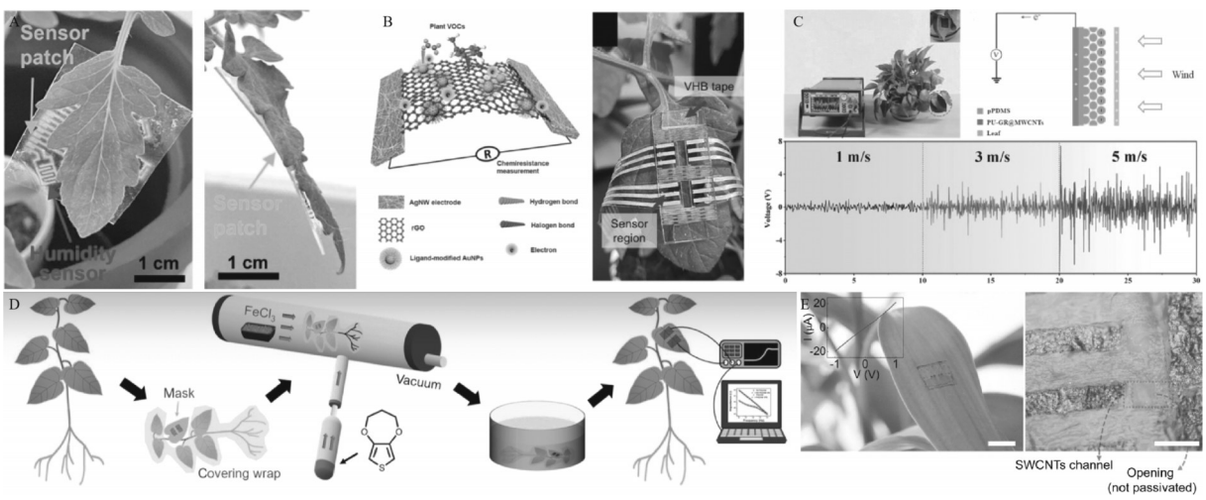


图1　体外可穿戴纳米传感器[21,28-31]

Fig.1　Wearable nanosensors *in vitro* [21,28-31]

2）体内植入式纳米传感器。体内植入式纳米传感器通过特定的递送方法（如脂质交换包膜渗透法、注射法）进入植物组织内部，实现对细胞内或组织间隙的关键信号分子（如糖类、活性氧、激素）的原位、实时监测。Zhang等[33]开发了一种用于实时监测植物体内葡萄糖浓度的量子点系统，并巧妙地设计了2种量子点：一种是不与葡萄糖发生团聚效应的巯基乙酸修饰的（TGA-QD），另一种则是苯硼酸（boronic acid，BA）修饰的量子点（BA-QD），其可以特异识别葡萄糖而发生团聚效应并导致荧光淬灭。将TGA-QD及BA-QD混合导入到叶片中后，使用TGA-QD做为内参，通过Raspberry Pi摄像系统监测两者荧光强度的比值变化，间接实现了对植物体内葡萄糖动态变化的无损追踪。而单壁碳纳米管因其荧光位于近红外区（可避免植物自体荧光干扰）且光稳定性好，成为理想的体内传感平台。通过不同的表面修饰，可实现对特定分子的监测。

活性氧（reactive oxygen species，ROS）是一类重要的信号分子，参与介导细胞间的通讯，激活植物的防御机制[34]。过氧化氢（H_2O_2）是介导植物快速系统信号转导的关键活性氧，被认为是急性胁迫的指示物[35]。目前检测H_2O_2信号的技术主要集中于荧光染料、组织化学试剂、电化学传感和纳米传感器。然而，由于叶绿素自身荧光的干扰，传统的荧光方法难以直接应用于植物器官[36]。Wu等[37]开发了一种对过氧化氢敏感的氯化血红素aptamer DNA修饰的单层碳纳米管感应元件（HeAptDNA-SWCNT）。这种新型HeAptDNA-SWCNT纳米传感器不仅能够实现对植物体内10 μmol/L H_2O_2的实时监测，并且能够通过碳纳米管荧光的强弱变化实时反映植物体内过氧化氢含量的升高与下降，从而实现了HeAptDNA-SWCNT纳米传感器对植物在紫外、强光以及Flg22病害胁迫中的过氧化氢水平的实时监测和早期诊断（图2A）。

Yan等[38]研究开发了一种基于金属有机框架（ZIF-8）的纳米生物传感器，用于实时、原位、无损监测植物内外源H_2O_2，该传感器通过简单喷洒辣根过氧化物酶、ABTS及ZIF-8前体，在植物根、叶柄或叶片表面原位形成，其工作原理基于H_2O_2氧化ABTS

生成$ABTS^+$，后者在近红外光照射下产热，通过热信号转换实现H_2O_2的远程检测。该技术具有亚微摩尔级灵敏度，且因植物组织在近红外区域吸收较弱，能有效避免背景干扰，实现高信噪比的H_2O_2传输及生物/非生物胁迫监测，为植物信号通路与代谢研究提供了新型工具（图2B）。

Lew等[36]利用无损光学纳米传感器，系统研究了6种植物（包括生菜、芝麻菜、菠菜等）在机械损伤后H_2O_2信号的传播规律。发现H_2O_2浓度变化遵循逻辑波形，波速范围为0.44～3.10 cm/min，且与表面电位波同步传播。通过遗传学手段进一步验证了*RbohD*、*GLR*3.3和*GLR*3.6基因在H_2O_2波传递中的关键作用。该研究凸显了纳米传感器在跨物种、实时、时空动态监测植物生理信号方面的优势，为解析植物损伤防御机制提供了新方法（图2C）。

Hu等[13]研制了一种近红外二区（NIR-II）荧光纳米传感器，用于实时、高灵敏、无损检测植物内源H_2O_2。该传感器能有效规避植物自发荧光干扰，特异性响应微量H_2O_2，实现对多种植物胁迫反应的普适性监测。结合机器学习模型，该技术可准确区分4种不同类型的植物胁迫，准确率超过96.67%。该研究不仅深化了对植物胁迫信号机制的理解，也为精准农业的早期病害诊断与防控提供了可靠的光学监测工具（图2D）。

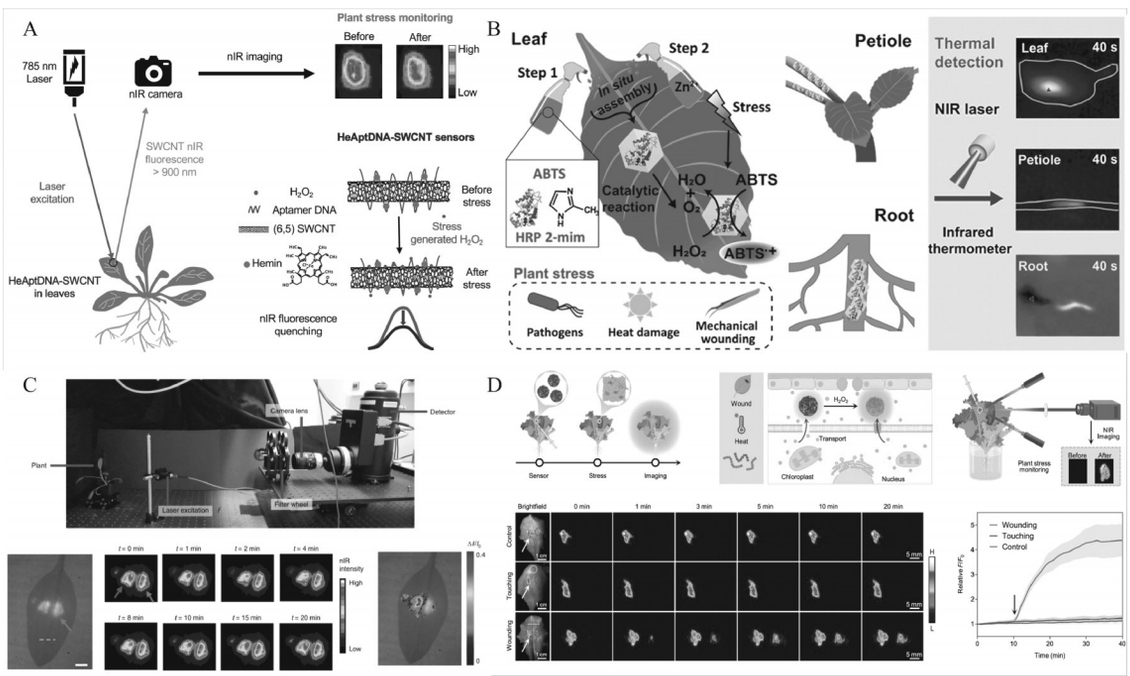


图2 纳米传感器监测植物H_2O_2水平[13,36-38]

Fig.2 Monitoring of H_2O_2 levels in plants using nanosensors[13,36-38]

植物激素在调节植物生长发育和对环境胁迫的反应中起着至关重要的作用。传统的检测和监测这些分子的方法通常是缓慢的、复杂的，不适合实时应用。纳米生物传感器提供了一个改变游戏规则的解决方案，提供增强的灵敏度，特异性和执行实时，现场监测植物激素的能力。Wu等[16]开发了一套用于吲哚-3-乙酸（IAA）在线智能监测系统，包括可重复使用微传感器、便携电化学工作站和在线云平台。微传感器基于氮掺杂碳纳米管/核壳Au@Cu_2O纳米复合材料修饰的碳纤维微电极，在pH 4～8范围内实现对IAA的宽浓度范围检测，检测限低至10.8～57.8 pg/mL，并具备良好的抗干扰性、重复性和稳定性。系统采用人工神经网络算法建立电化学信号与IAA浓度的关系模型，实现了对甘蓝茎部IAA浓度长达12 h的实时在线监测，为精准农业提供了可行的植物激素监测方案（图3A）。

Li等[18]提出了一种全MXene印刷的柔性射频谐振器，作为可穿戴植物传感器用于无线检测乙烯。通过无添加剂的MXene油墨实现快速、规模化印刷制造，传感器具备高印刷分辨率、优良导电性和机械鲁棒性。结合MXene还原的钯纳米颗粒，传感器在1 μL/L乙烯浓度下响应率达1.16%，检测限为0.084 μL/L。无线传感标签可贴附于植物器官表面，实时原位分析乙烯释放动态，为精准农业和食品工业管理提供了新型植物激素监测手段（图3B）。

Wang等[17]构建了一种基于Au@SnO_2-垂直石

墨烯微针阵列传感器，用于原位检测植物体内的脱落酸（ABA）。该传感器以钽丝为基底，通过SnO_2负载Au催化剂，垂直生长石墨烯nanosheets，形成具有丰富催化活性位点和优异导电性的传感层。微针阵列传感器采用三电极系统，通过ABA的直接电催化氧化实现定量检测，具有尺寸小、检测限低、线性范围宽等优势，可在pH 4～7范围内响应0.012～495.2 μmol/L的ABA，检测限达0.002～0.005 μmol/L，实现了植物体内ABA的原位插入式检测（图3C）。

Boonyaves等[19]首次开发了用于赤霉素（GA）的纳米传感器，通过设计聚合物包裹的单壁碳纳米管，利用其特殊冠状相选择性结合活性GAs，触发近红外荧光强度变化。结合新型拉曼/NIR荧光自参考光谱系统，实现了拟南芥、生菜和罗勒根中细胞GA的检测。传感器成功报告了转基因拟南芥突变体中内源GA水平的升高以及侧根发生过程中的GA动态变化，并在盐胁迫实验中捕捉到GA水平下降与鲜质量变化的相关性，展现了跨物种GA时空检测潜力，为解决植物生物技术中的长期难题提供了新工具（图3D）。

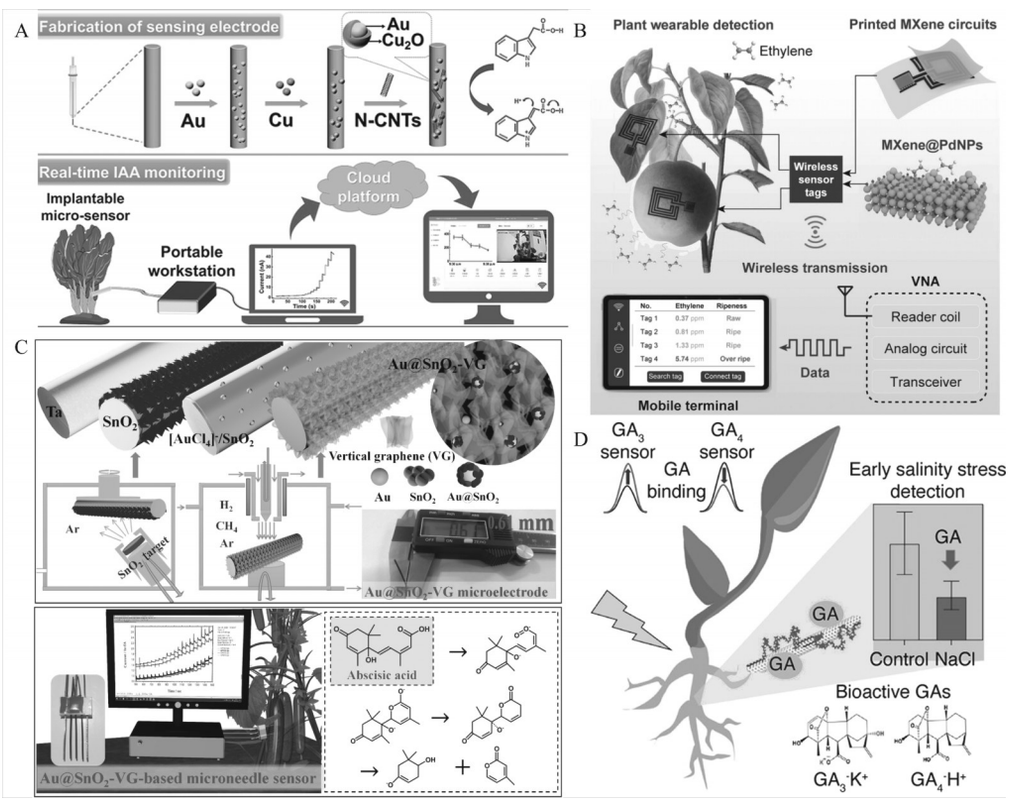


图3　纳米传感器监测植物激素水平[16-19]

Fig.3　Monitoring of plant hormone levels by nanosensors[16-19]

综上所述，尽管各类纳米传感器在实验室尺度已成功应用于捕获植物的生长信息与关键信号分子变化，为作物表型感知提供了前沿的技术支撑，但其在生产实践中的大规模田间应用仍面临诸多挑战[5,8,39]。这些挑战主要集中于以下几个方面：

（1）传感器与作物生长的动态适配性问题。作物在整个生育期内持续生长，其形态与体积动态变化。这对固定于体表或植入体内的纳米传感器及其配套监测设备提出了严峻考验，如何确保传感器界面长期稳定贴合，以及如何动态调整监测位点与角度，均需系统性的验证与解决方案。

（2）田间复杂环境的信号鲁棒性问题。尤其对于依赖光学信号的传感器（如荧光传感器），不利天气条件如刮风（导致监测位点偏移）、降雨或雾霾（导致信号衰减或散射）会严重干扰信号的采集保真度，亟需开发相应的物理防护或信号校正算法以保障数据质量。

（3）田间监测网络的优化布设问题。为实现对田块状况的代表性感知，监测点位或传感器矩阵的空间排布策略至关重要。如何以最少的传感器数量，通过优化布局来最大程度地反映整个田间的空间异质性，是关乎技术经济可行性的核心问题。

（4）技术应用的经济效益评估问题。纳米传感器技术的大规模推广，最终取决于其投入产出比。

这需要对纳米传感器本身、配套监测系统及人工运维的综合成本，与所带来的产量提升、资源节约等经济效益，进行精确的核算。(5)长期生态安全性的评估问题。纳米材料在自然环境中的迁移、转化及其对土壤微生物、昆虫等非靶标生物的潜在影响，仍需长期、系统的监测与评估，以确立其环境安全性并建立相应的使用规范。

2 纳米赋能的智能作物与信息技术

2.1 纳米传感信息的物联网架构与数据处理

纳米传感器作为前沿的感知工具，其核心价值在于将捕获的作物生理与环境信息转化为可传输、可分析的数字信号。这些信息通过物联网架构，能够无缝对接至农场管理决策系统，为精准农业与智能决策提供数据支持。

典型的农业物联网架构包含3个关键层级：感知层、网络传输层与应用层。在感知层，纳米传感器负责执行最基础的数据采集任务，将作物生长状态(如体内激素水平、水分状况)或环境参数(如微气候)等物理、化学信号转换为数字信号。网络传输层则依托有线或无线通信协议(如LoRa、NB-IoT、5G)，实现数据从田间到云端的稳定、高效传输。最终，在应用层，通过云计算、大数据与人工智能等信息技术对海量数据进行处理、建模与分析，并最终生成可执行的决策建议，直接服务于终端用户，完成从数据到洞察、再到行动的闭环[40]。

在此框架下，纳米传感器产生的多源、海量数据可存储于云端，并借助如MapReduce、Spark等分布式计算框架进行高效分析。这一数据处理流程通常涵盖数据训练、工具分析、查询与报告4个层级，最终将非结构化的原始数据转化为具有农业价值的决策建议。该技术路径已在产业实践中得到验证。例如，IBM Watson Agriculture平台深度融合人工智能技术，通过分析历史与实时的气候、土壤及作物数据，为巴西大型咖啡种植园提供精准的管理方案，有效提升了咖啡豆的产量与品质[41]。同样，阿里云的“ET农业大脑”整合了图像识别与云计算能力，可实现对生猪体况与健康的自动化评估，以此动态优化饲料配方与养殖环境，据称将生产效率提升了10%以上。而如托普云农等企业，则综合运用物联网、人工智能与区块链技术，构建了覆盖农业生产与管理的数字化解决方案，为农业体系的全面数字化转型提供支撑。

2.2 农业数据挖掘的流程与方法

农业数据挖掘旨在从海量农业数据中提取隐含的、有价值的模式与知识，其核心流程可系统性地划分为数据准备、数据挖掘、以及结果分析与解释3个阶段。该流程构成了从原始数据到智能决策的转化路径[42]。

1)数据准备。多源数据采集与预处理。本阶段的目标是为后续分析结论构建高质量的数据集，是数据挖掘流程的基础。首先，通过集成多元化的数据采集设备(如无人机、移动终端、物联网节点等)获取多维度数据。其中，纳米传感器作为新兴的感知工具，能够提供传统传感器难以捕获的植物体内生理生化信号，极大地丰富了数据维度[43]。其次，在获取原始数据后，需进行关键的预处理工作，包括数据清洗(去噪、处理缺失值)、标准化(统一量纲与格式)与集成，最终形成结构化的目标数据集并予以存储。

2)数据挖掘。模型构建与知识发现。本阶段是挖掘流程的核心，侧重于从预处理的数据中通过算法模型发现潜在规律，是挖掘流程的核心。首先，需明确具体的挖掘目标(如病害预测、产量预估)。随后，根据目标优选并应用适宜的挖掘算法(如分类、回归、聚类或关联规则分析)，构建预测或描述性模型。生成的模型最终作为新获得的知识，可被存储于领域知识库中，为未来的智能决策提供支持[44]。

3)结果分析与解释。知识可视化与应用评估。本阶段旨在将挖掘结果转化为可供决策的直观知识。首先，需要对模型的性能与发现模式的可靠性进行评估与解释。进而，利用数据可视化技术(如趋势图、热力图)或自然语言生成等方法，将分析结果以用户易于理解的方式呈现。最终，这些决策意见被应用于实际场景，如生成施肥处方图、发布病虫害早期预警等，从而完成从数据到决策的闭环[13]。

2.3 基于大数据的农业模型建构

农业模型是农业科学定量的一个重要方法，智慧农业信息感知离不开农业模型的支撑。建构基于大数据的农业模型是对农业系统要素(如自然环境要素、作物生长信息、技术要素、经济与社会要素、生产要素等)关系的定量化表达。农业模型建构首先需要对系统进行调研和定性，以便形成统一认识，完成系统定义；然后，在数据准备的基础上进一步进行

模型搭建与转换，将真实农业系统进行抽象简化；最后则是，将基于数据分析所得到的初步结果与实践结果比较，判断其有效性，并进行反复再实践再认识，以完成模型验证[45]。郭博健等[46]认为基于农业模型进行农业系统开发时，应该从信息系统所服务对象的特殊性出发，进行系统或系统工程的设计。因此，在智慧农业大背景下，基于纳米传感器获取的作物生长信息感知，仍需要进一步和农业模型建构关联起来，从而为最后的智能决策提供支持。

3　基于物联网的纳米传感器与模型融合的智慧种植数据分析系统

在智慧农业发展的新阶段，实现对作物生理状态的实时原位监测与前瞻性智能管理已成为精准农业的核心需求。本研究基于物联网架构，成功开发了一套纳米传感器与作物生长模型深度耦合的智慧种植数据分析系统[47]（软件著作权登记号：2024SR0067804）。该系统的核心创新在于通过跨学科技术融合，构建了一个从分子信号到田间表型的多尺度、闭环决策支持平台，实现了对作物生长过程的全方位、多维度监控与管理（图4）。

3.1　智慧种植分析系统结构设计

在系统架构设计层面，首先建立了一个完整的4层数据处理体系。在数据采集层，系统通过分布式部署的物联网节点，实时采集来自多个来源的农业数据。这些数据包括：(1)纳米传感器采集的作物生理信号数据，如本研究中采用单壁碳纳米管探针所监测的H_2O_2浓度动态变化；(2)传统农业传感器采集的环境数据及植物生长数据，包括土壤温湿度、大气温湿度、植物氮含量、二氧化碳浓度等；(3)DSSAT作物生长模型模拟输出的预测数据，包括逐日的作物生长状况、土壤水分平衡、氮素动态变化等；(4)农户通过移动终端手动输入的实地观测数据，包括作物长势、病虫害发生情况等。所有这些数据通过物联网网关进行初步处理后，统一传输到云端数据平台。

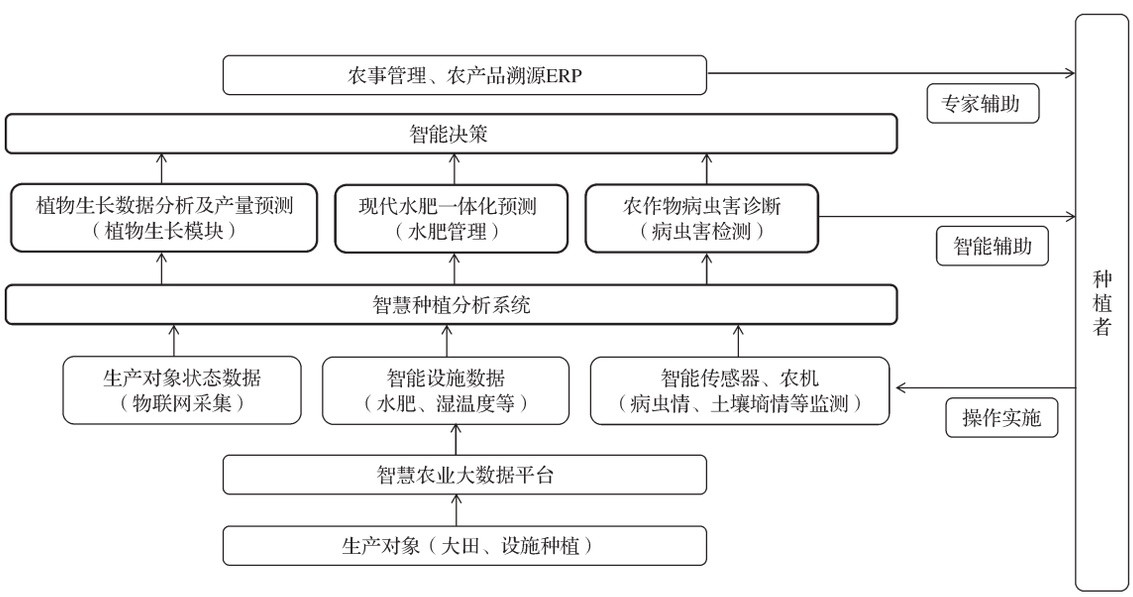


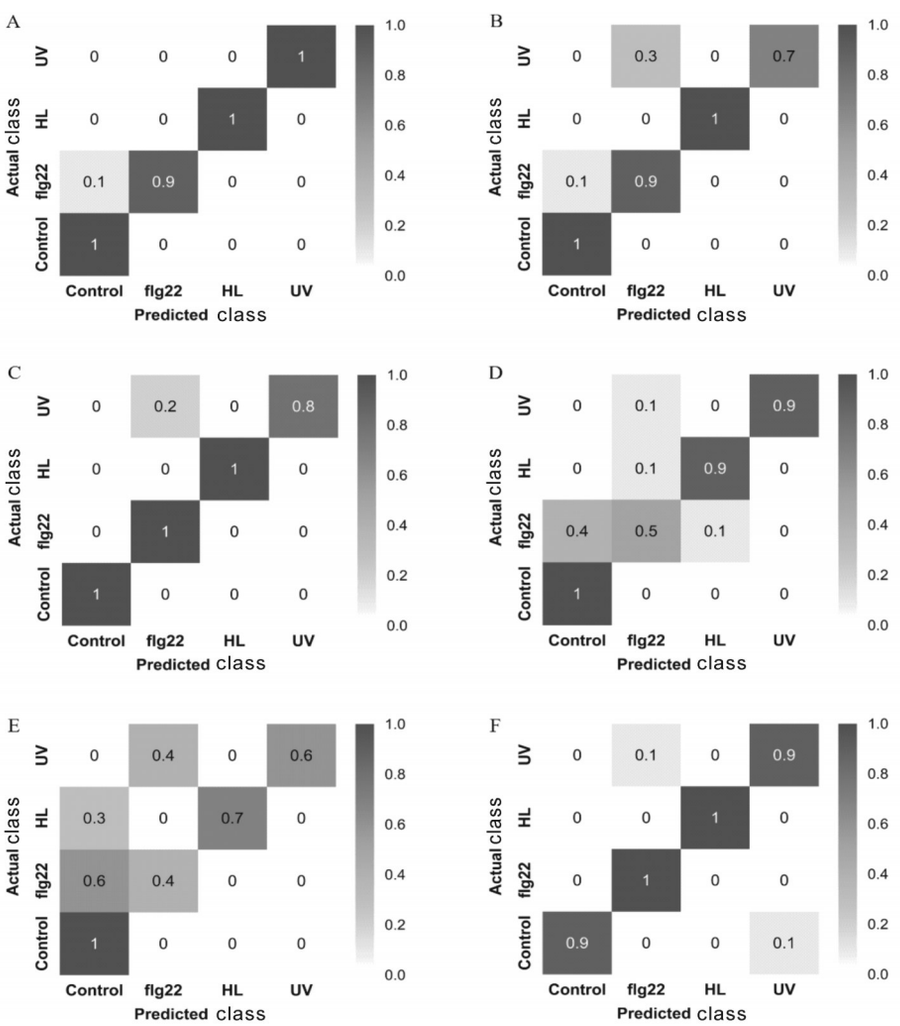
图4　智慧种植分析系统业务原型图

Fig.4　Business prototype diagram of the intelligent planting analysis system

在数据处理与分析层，系统采用模块化设计，包含3个核心分析模块。可视化分析模块负责对原始数据进行预处理和可视化展示。该模块采用小波变换去噪算法对纳米传感器采集的原始信号进行滤波处理，使用Min-Max归一化方法将不同量纲的数据统一到相同尺度，然后通过动态图表、热力图和仪表盘等形式直观展示各类数据的变化趋势。例如，系统可以将纳米传感器监测的H_2O_2浓度变化与DSSAT模型预测的作物生长状况进行同步可视化，帮助用户直观理解作物生理状态与生长表现之间的关联。特别值得一提的是，我们专门设计了基于注意力机制的多尺度卷积神经网络（AMCN），该网络通过并行使用不同尺度的卷积核，能够同时捕捉H_2O_2信号的短期突变特征和长期变化趋势。实验表明，该模型在仅使用胁迫发生后40 min的短序列数据时，对flg22、强光（HL）和紫外线（UV）3种胁迫的分

类准确率即可达到82.3%，显著优于传统的ResNet、FCN等模型(图5)。

预测分析模块将实时监测数据与机理模型深度结合，实现了对作物生长态势的前瞻性预测。模块采用长短期记忆网络(LSTM)处理纳米传感器的高频采样数据，同时将实时监测到的胁迫信号作为动态输入参数传递给DSSAT作物生长模型。这种设计使得系统不仅能够基于历史数据进行预测，还能根据实时监测到的作物生理状态变化，动态调整预测模型参数，显著提升了预测的准确性和时效性。在决策支持层，系统通过知识库和推理机制，将分析结果转化为具体的农事管理建议。知识库中存储了基于领域专家经验构建的决策规则，例如当系统检测到持续的H_2O_2信号增强且DSSAT模型预测显示生长速率下降时，会生成“疑似涝害发生，建议适度减少灌溉”的决策建议。这些建议通过RESTful API接口推送给用户，并可直接下发至田间的智能灌溉、施肥等执行设备。预测分析模块结合应用展示层，系统采用响应式Web设计，支持在电脑、平板和手机等多种终端设备上访问。界面设计充分考虑不同用户群体的需求，为科研人员提供详尽的数据分析和模型参数调整功能，为农户提供简洁明了的农事操作指导和预警信息。系统还支持数据的历史回溯和对比分析功能，用户可以选择任意时间段的数据进行对



A：基于注意力机制的多尺度卷积神经网络Attention-based multi-scale convolutional neural network，AMCN；B：基于注意力机制的单一尺度卷积神经网络Attention-based single-scale convolutional neural network，ASCN；C：多尺度卷积神经网络Multi-scale convolutional neural network，MCN；D：全卷积神经网络Fully convolutional neural networks，FCN；E：残差神经网络Residual networks，ResNet；F：多层感知机Multi-layer perceptron，MLP.

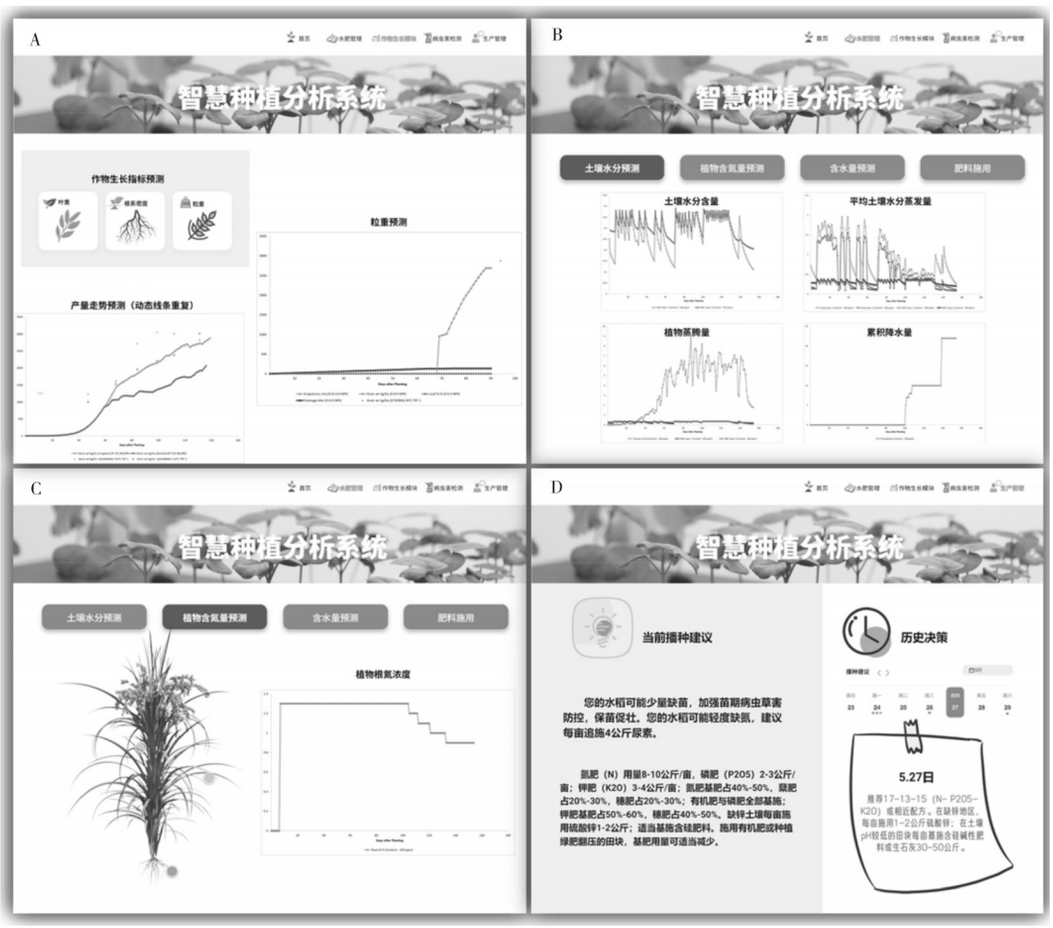
图5 不同模型结构在信号数据测试集的混淆矩阵

Fig.5 Confusion matrices of different model architectures on the signal data test set

比，分析不同管理措施对作物生长的影响（图 6）。

3.2　系统局限与对策

尽管本研究开发的智慧种植数据分析系统在实验中表现出显著优势，但在实际推广中仍面临多方面挑战。技术层面，系统的预测能力部分依赖外部DSSAT 模型，制约了数据分析的自主性和实时性，且模型参数校准需要大量本地化工作，增加了部署成本和复杂度。同时，部分环境信息仍依赖人工输入，在大规模种植场景下难以保证数据的及时性和准确性。



A：作物生长模块“叶质量分析”Crop growth module eaf weight analysis；B：水肥管理模块“土壤水分预测”Water and fertilizer management module soil moisture prediction；C. 水肥管理模块“植物含氮量预测” Water and fertilizer management module plant nitrogen content prediction；D：播种建议 Sowing suggestions.

图 6　智慧种植分析系统应用页面

Fig.6　Application page of the intelligent planting analysis system

在纳米传感器应用方面，传感器在复杂田间环境中的长期稳定性亟待验证，且必须显著降低其大规模部署成本，才能有利于实现商业化。AMCN 模型在新作物品种和新环境下的泛化能力不足，对多胁迫同时发生的情况识别准确性有限，且处理大规模传感器网络数据时存在延迟问题。系统集成方面，现有界面对新用户存在学习门槛，决策建议缺乏对个性化需求和本地种植习惯的适应性，与不同厂商设备的兼容性也有待提升。

未来，我们将在技术创新方面开发轻量化作物生长模型以减少外部依赖，探索可生物降解纳米材料和自供能传感技术，并引入迁移学习和多任务学习提升模型适应性。在系统优化方面，将开发移动端优先的交互界面，建立个性化推荐机制，并与设备厂商合作制定统一接口标准，提升系统实用性和兼容性。

4　展　望

农业可持续发展是“人类命运共同体”的重要支撑[48]，离不开新技术带来的升级迭代，如智慧农业。然而，智慧农业的核心矛盾之一在于如何在实现生

产精准化的同时保障系统的可持续性和信号的高保真度。精准农业高度依赖传感器、物联网和人工智能等集成技术，长远来看，可能对农业生态系统的韧性带来压力。纳米传感器作为新兴感知工具，在提升监测精度和实时性方面展现出显著优势，有望部分替代或补充传统传感器，从技术层面增强智慧农业系统的适应能力和可持续性。

然而，纳米传感器在农业实际推广应用中仍面临诸多挑战：(1)在技术层面，如何实现作物全生育期内监测的连续性与稳定性是一大难题。植株不断生长，体内外传感器的位置固定、信号耦合及设备自适应调节机制尚不成熟。(2)复杂田间环境(如风雨、雾霾、温度剧烈变化)对荧光类纳米传感器的信号采集造成严重干扰，需开发具有更强抗干扰能力和环境自适应性的新型传感器，并配套相应信号校正算法与冗余容错机制。(3)纳米传感器的布点策略与空间优化模型仍处于初步阶段，需结合作物栽培模式、冠层结构、微环境异质性与传感网络理论，建立多尺度、动态优化的监测点位布置系统。(4)纳米传感器的制造成本仍较高，且与配套软硬件系统(如专用成像设备、边缘计算节点、云平台)的整合经济性仍有待系统评估，亟需通过材料创新、工艺优化与系统集成降低综合应用成本。(5)纳米材料在环境中的残留、迁移、转化及其对土壤微生物组、植物生理及农产品安全的长期影响尚未明晰，缺乏统一规范的生物相容性与生态毒理学评价体系。

面向未来，可重点从以下方向展开研究布局：(1)器件设计与新材料创新：开发具有仿生特性、可随植物生长的柔性、可降解或自修复纳米传感器，提升其生信兼容性与环境适应性；探索新型低维纳米材料(如石墨烯、MXene、量子点等)在农业传感中的应用，兼顾高性能与低环境负荷；(2)智能监测与抗干扰机制：基于不同的作物、种植密度、行间距等信息估算田间监测点位的布设以及矩阵排列等，融合人工智能、机器视觉与机器人技术，开发具有主动定位、跟踪与补偿功能的智能监测设备，保障复杂环境下数据采集的高保真、连续性与稳定性；(3)组网建模与决策支持：基于大模型算法开发可实时调整监测相机位置的设备系统，从而保证叶片监测点位和监测设备中的距离和角度不变，以获取高保真监测信息；构建基于作物-环境-传感器多源数据融合的动态优化布点模型，结合无人机、卫星遥感形成空、天、地一体化监测网络；推动纳米传感器与物联网、边缘计算、数字孪生深度集成，建立“感知-决策-控制”闭环的“按需农业”智能平台；(4)系统效益与风险管控：系统评估不同纳米传感器在不同作物中的长期稳定性和生物兼容性以及对生态环境的影响；开展纳米农业技术全生命周期的经济、环境与社会效益综合评价，建立纳米传感器农业应用的标准规范与风险监管框架；(5)加强跨学科合作，推动材料学、信息科学、农学与环境科学的深度融合。

总之，纳米传感器作为21世纪前沿科技在农业中的典型代表，有望显著提升农业信息感知的精度与智能水平。通过持续优化器件设计、强化数据挖掘与系统集成，纳米传感器将更好地服务于智慧农业，为实现农业精准化、绿色化和可持续发展提供关键技术支撑，从而为应对全球粮食安全挑战贡献力量。

致谢：感谢李召虎教授对本文的指导。

参考文献 References

[1] WHEELER T, VON BRAUN J. Climate change impacts on global food security[J]. Science, 2013, 341(6145): 508-513.

[2] LIPPER L, THORNTON P, CAMPBELL B M, et al. Climate-smart agriculture for food security [J]. Nature climate change, 2014, 4(12): 1068-1072.

[3] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 1-7. ZHAO C J. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectivs of smart agriculture [J]. Smart agriculture, 2019, 1(1): 1-7 (in Chinese with English abstract).

[4] ALI J, MUKARRAM M, OJO J, et al. Harnessing phytohormones: advancing plant growth and defence strategies for sustainable agriculture [J/OL]. Physiologia plantarum, 2024, 176 (3): e14307 [2025-09-03]. https://doi. org/10.1111/ppl.14307.

[5] KWAK S Y, WONG M H, LEW T T S, et al. Nanosensor technology applied to living plant systems [J]. Annual review of analytical chemistry, 2017, 10(1): 113-140.

[6] GIRALDO J P, WU H H, NEWKIRK G M, et al. Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors [J]. Nature nanotechnology, 2019, 14(6): 541-553.

[7] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Science breakthroughs to advance food and agricultural research by 2030 [R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2019.

[8] JAVAID M, HALEEM A, SINGH R P, et al. Exploring the potential of nanosensors: a brief overview[J/OL]. Sensors international, 2021, 2: 100130 [2025-09-03]. https://doi. org/10.1016/j.sintl.2021.100130.

[9] HUANG L, HE X Y, HU J M, et al. Wearable sensor based on covalent organic framework humidity films for long-term monitoring of tomato physiology under abiotic stress[J]. ACS nano, 2024, 18(48): 33105-33118.

[10] SUN T, LU C Z, SHI Z, et al. PlantRing: a high-throughput wearable sensor system for decoding plant growth, water relations, and innovating irrigation[J/OL]. Plant communications, 2025, 6(5): 101322[2025-09-03]. https://doi.org/10.1016/j.xplc.2025.101322.

[11] GIUST D, LUCÍO M I, EL-SAGHEER A H, et al. Graphene oxide-upconversion nanoparticle based portable sensors for assessing nutritional deficiencies in crops[J]. ACS nano, 2018, 12(6): 6273-6279.

[12] 王志豪, 樊成孝, 王焯, 等. 一种对作物 Mg^{2+} 活体检测的全固态微针型传感器制备及应用[J]. 农业工程学报, 2025, 41(9): 29-36. WANG Z H, FAN C X, WANG Z, et al. Development and application of an all-solid-state Mg^{2+} microneedle sensorfor crop *in situ* detection [J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(9): 29-36(in Chinese with English abstract).

[13] HU H, YUAN H, SUN S C, et al. Machine learning-powered activatable NIR-II fluorescent nanosensor for *in vivo* monitoring of plant stress responses[J/OL]. Nature communications, 2025, 16: 5114 [2025-09-03]. https://doi. org/10.1038/s41467-025-60182-w.

[14] KIM J H, HELLER D A, JIN H, et al. The rational design of nitric oxide selectivity in single-walled carbon nanotube near-infrared fluorescence sensors for biological detection[J]. Nature chemistry, 2009, 1(6): 473-481.

[15] KREBS M, HELD K, BINDER A, et al. FRET-based genetically encoded sensors allow high-resolution live cell imaging of Ca^{2+} dynamics[J]. The plant journal, 2012, 69(1): 181-192.

[16] WU B F, XU H T, SHI Y F, et al. Online monitoring of indole-3-acetic acid in living plants based on nitrogen-doped carbon nanotubes/core - shell Au@Cu_2O nanoparticles/carbon fiber electrochemical microsensor[J]. ACS sustainable chemistry & engineering, 2022, 10(40): 13465-13475.

[17] WANG Z, XUE L F, LI M J, et al. Au@SnO_2-vertical graphene-based microneedle sensor for *in situ* determination of abscisic acid in plants[J/OL]. Materials science and engineering: C, 2021, 127: 112237[2025-09-03]. https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112237.

[18] LI X, SUN R J, PAN J Y, et al. All-MXene-printed RF resonators as wireless plant wearable sensors for *in situ* ethylene detection [J/OL]. Small, 2023, 19 (24): 2207889 [2025-09-03]. https://doi.org/10.1002/smll.202207889.

[19] BOONYAVES K, ANG M C, PARK M, et al. Near-infrared fluorescent carbon nanotube sensors for the plant hormone family gibberellins[J]. Nano letters, 2023, 23(3): 916-924.

[20] BUKHAMSIN A, AIT LAHCEN A, DE OLIVEIRA FILHO J, et al. Minimally-invasive, real-time, non-destructive, species-independent phytohormone biosensor for precision farming [J/OL]. Biosensors and bioelectronics, 2022, 214: 114515 [2025-09-03]. https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114515.

[21] LI Z, LIU Y X, HOSSAIN O, et al. Real-time monitoring of plant stresses *via* chemiresistive profiling of leaf volatiles by a wearable sensor[J]. Matter, 2021, 4(7): 2553-2570.

[22] ZHU C M, KANG S M, WU S C, et al. A self-reporting nanosensor for detecting bacterial exploitation in plants through extracellular DNA[J]. Nano letters, 2024, 24(48): 15464-15472.

[23] LI Y F, XU H Y, HAN C L, et al. Plant-wearable sensors for intelligent forestry monitoring [J/OL]. Advanced sustainable systems, 2023, 7(2): 2200333 [2025-09-03]. https://doi.org/10.1002/adsu.202200333.

[24] YIN H Y, CAO Y T, MARELLI B, et al. Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture[J/OL]. Advanced materials, 2021, 33 (20): 2007764 [2025-09-03]. https://doi.org/10.1002/adma.202007764.

[25] YIN S H, IBRAHIM H, SCHNABLE P S, et al. A field-deployable, wearable leaf sensor for continuous monitoring of vapor-pressure deficit[J/OL]. Advanced materials technologies, 2021, 6(6): 2001246[2025-09-03]. https://doi.org/10.1002/admt.202001246.

[26] BANERJI S, HŌRAK H, TOROP J, et al. Unravelling the secrets of plants: emerging wearable sensors for plants signals and physiology [J/OL]. Advanced sensor research, 2024, 3 (3): 2300023 [2025-09-03]. https://doi. org/10.1002/adsr.202300023.

[27] DI TOCCO J, LO PRESTI D, MASSARONI C, et al. Plant-wear: a multi-sensor plant wearable platform for growth and microclimate monitoring [J/OL]. Sensors, 2023, 23 (1): 549 [2025-09-03]. https://doi.org/10.3390/s23010549.

[28] LEE G, HOSSAIN O, JAMALZADEGAN S, et al. Abaxial leaf surface-mounted multimodal wearable sensor for continuous plant physiology monitoring [J/OL]. Science advances, 2023, 9 (15): eade2232 [2025-09-03]. https://doi. org/10.1126/sciadv.ade2232.

[29] LI X J, JIANG C M, ZHAO F N, et al. Fully stretchable triboelectric nanogenerator for energy harvesting and self-powered sensing[J]. Nano energy, 2019, 61: 78-85.

[30] KIM J J, ALLISON L K, ANDREW T L. Vapor-printed polymer electrodes for long-term, on-demand health monitoring[J/OL]. Science advances, 2019, 5(3): eaaw0463[2025-09-03].

https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw0463.

[31] LEE K, PARK J, LEE M S, et al. *In situ* synthesis of carbon nanotube-graphite electronic devices and their integrations onto surfaces of live plants and insects[J]. Nano letters, 2014, 14(5): 2647-2654.

[32] LEE G, WEI Q S, ZHU Y. Emerging wearable sensors for plant health monitoring[J/OL]. Advanced functional materials, 2021, 31(52): 2106475[2025-09-03]. https://doi.org/10.1002/adfm.202106475.

[33] ZHANG Q, YING Y B, PING J F. Recent advances in plant nanoscience[J/OL]. Advanced science, 2022, 9(2): 2103414[2025-09-03]. https://doi.org/10.1002/advs.202103414.

[34] MITTLER R, VANDERAUWERA S, SUZUKI N, et al. ROS signaling: the new wave?[J]. Trends in plant science, 2011, 16(6): 300-309.

[35] VARADARAJ K, KUMARI S S. Lens aquaporins function as peroxiporins to facilitate membrane transport of hydrogen peroxide[J]. Biochemical and biophysical research communications, 2020, 524(4): 1025-1029.

[36] LEW T T S, KOMAN V B, SILMORE K S, et al. Real-time detection of wound-induced H_2O_2 signalling waves in plants with optical nanosensors[J]. Nature plants, 2020, 6(4): 404-415.

[37] WU H H, NIßLER R, MORRIS V, et al. Monitoring plant health with near-infrared fluorescent H_2O_2 nanosensors[J]. Nano letters, 2020, 20(4): 2432-2442.

[38] YAN Y, NI M, WANG F, et al. Metal-organic framework-based biosensor for detecting hydrogen peroxide in plants through color-to-thermal signal conversion[J]. ACS nano, 2022, 16(9): 15175-15187.

[39] SHAW D S, HONEYCHURCH K C, SHAW D S, et al. Nanosensor applications in plant science[J/OL]. Biosensors, 2022, 12(9): 675[2025-09-03]. https://doi.org/10.3390/bios12090675.

[40] 徐雯颖,叶婷,姚雪,等.智慧农业背景下的纳米智能作物构建[J].智慧农业导刊,2021,1(9):9-13.XU W Y, YE T, YAO X, et al. Construction of nanosensor-enabled smart plants in the context of smart agriculture[J]. Journal of smart agriculture, 2021, 1(9): 9-13(in Chinese with English abstract).

[41] ZHAI Z Y, MARTÍNEZ J F, BELTRAN V, et al. Decision support systems for agriculture 4.0: survey and challenges[J/OL]. Computers and electronics in agriculture, 2020, 170: 105256 [2025-09-03]. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256.

[42] 叶婷,马宏娟,卢锐,等.人工智能在智慧农业中的应用:以数据挖掘与机器学习为例[J].智慧农业导刊,2022,2(18):27-29.YE T, MA H J, LU R, et al. Application of artificial intelligence in smart agriculture: taking data mining and machine learning as examples[J]. Journal of smart agriculture, 2022, 2(18): 27-29(in Chinese with English abstract).

[43] GIRALDO J P, LANDRY M P, FALTERMEIER S M, et al. Plant nanobionics approach to augment photosynthesis and biochemical sensing[J]. Nature materials, 2014, 13(4): 400-408.

[44] MAJUMDAR J, NARASEEYAPPA S, ANKALAKI S. Analysis of agriculture data using data mining techniques: application of big data[J/OL]. Journal of big data, 2017, 4(1): 20[2025-09-03]. https://doi.org/10.1186/s40537-017-0077-4.

[45] 胡荣群.基于大数据的农业模型建构及应用[J].中国农业资源与区划,2022,43(10):256-266.HU R Q. Construction and application of agricultural models based on big data[J]. Chinese journal of agricultural resources and regional planning, 2022, 43(10): 256-266(in Chinese with English abstract).

[46] 郭博健,王娜,王君姣.数字孪生系统在农业领域的建构路径探究[J].现代农业装备,2024,45(2):29-33.GUO B J, WANG N, WANG J J. An exploration of the path of constructing digital twin systems in agricultural field[J]. Modern agricultural equipment, 2024, 45(2): 29-33(in Chinese with English abstract).

[47] 叶婷,徐雯颖,龚袁源,等.智慧农业数据分析系统V1.0[CP].软件著作权登记号:2024SR0067804,证书号:软著登字第12471677,2023.YE T, XU W Y, GONG Y Y, et al. Smart agriculture data analysis system V1.0[CP]. Software copyright registration number: 2024SR0067804, certificate number: Ruan Zhu Deng Zi No.12471677, 2023(in Chinese).

[48] 曾晨,周詹杭,柯新利,等.全球气候变化下农业可持续发展的研究现状和学科交叉分析[J].华中农业大学学报,2024,43(6):6-16.ZENG C, ZHOU Z H, KE X L, et al. Review and interdisciplinary analysis of sustainable development of agriculture in context of global climate change[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(6): 6-16(in Chinese with English abstract).

Nano-sensors for monitoring plant growth: working principles and examples of system integration in applications

YE Ting[1,2], LUO Zhen[2], XU Wenying[2], LI Jiaqi[2], ZHANG Youchang[3], WANG Xiaogang[3], SONG Zhiyong[2,4]

1.*School of Computer and Information Technology, Wuhan Institute of Shipbuilding Technology, Wuhan 430050, China*;
2.*Center for Crop Nanobiology and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*;
3.*Institute of Industrial Crops, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China*;
4.*College of Chemistry, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

Abstract The development of intelligent agriculture urgently needs to transcend traditional environmental monitoring to achieve precise and real-time perception of the internal physiological state of plants. Nano-sensors provide unprecedented technological tools for the *in situ*, non-destructive, and dynamic analysis of plant physiological processes due to its ultra-high sensitivity, excellent specificity, and good biocompatibility with biological systems brought about by nanoscale effects. This article systematically reviewed the principles of design, material systems, and cutting-edge applications of nano-sensors for monitoring plant growth, with a focus on analyzing the mechanisms and efficacy of nano-sensors in the dynamic detection of key physiological signaling molecules including H_2O_2, Ca^{2+}, phytohormones within plants. The new challenges and emerging solutions presented by the unique properties of nano-sensing data including near-infrared fluorescence imaging and high-frequency electrochemical signals for agricultural Internet of Things (IoT), data mining, and intelligent modeling were discussed. The full-chain integration pathway from data acquisition and intelligent processing to decision support was elaborated in detail by combining an example of an "Intelligent planting analysis system" that integrates multi-source nano-sensing data. The bottlenecks and development directions of nano-sensors in moving towards large-scale field applications in the future was systematically prospected from four dimensions including material innovation, intelligent anti-interference, system integration, and risk assessment. It will provide a solid theoretical reference for studying the intersection of intelligent agriculture and nanotechnology.

Keywords nano-sensors; intelligent agriculture; monitoring plant physiology; processing signal; data fusion; biocompatibility; precise agriculture

（责任编辑：陆文昌）