

# 传感器技术如何赋能农业数字化？

九三学社中央科技委副主任、中国传感器与物联网产业联盟常务副理事长 郭源生

农业现代化是国家发展战略的核心。当前，农业正处于从传统经验驱动向现代数据驱动转型的关键期。智慧农业作为农业数字化转型的核心形态，其本质是实现从“经验种植”到可量化、可追溯、可调控的“数据种植”转型，通过技术创新打破传统农业“看天吃饭”的被动局面，推动生产效率与可持续性双提升。

感知技术是农业数据化的基础与核心，是智慧农业的“数据窗口”。不同设施条件、不同作物品种、不同地理环境，对数据采集的精度、频率、维度要求存在显著差异。立足“设施类型—植物品类—地理环境”三个维度形成的交叉数据，系统解析传感器的适配逻辑与应用场景，通过技术参数、典型案例、产业形态的多维支撑，构建一套科学、可落地的智慧农业感知体系，为农业数字化转型提供底层技术参考依据是当务之急。

## 设施农业感知技术的场景类别与适配方法

设施农业是感知技术的承载载体，直接决定了传感器的配置等级与应用模式。可划分为植物工厂、智能大棚、大田农业三大类别和不同的应用场景。

### 植物工厂的全流程感知

植物工厂作为智慧农业的最高形态，通过感知技术对光、温、水、气、肥等环境因子的精准调控，实现作物生长过程闭环控制和科学干预，以及全天候连续生产。实现光环境、温度、水分、气体、养分、病虫害六大类参数的实时监测与闭环调控。

多光谱相机采用16波段高光谱传感器，实时监测作物叶绿素含量、叶片含水量、病虫害胁迫等指标。茎流传感器基于热扩散原理，实时监测作物水分蒸腾速率，为精准灌溉提供数据支撑。二氧化碳浓度传感器采用红外检测技术，可联动二氧化碳发生器实现浓度精准调控。EC/pH

值传感器用于监测营养液浓度与酸碱度和作物养分吸收状况。微型气象传感器集成温度、湿度、光照强度三大参数，支持无线传输。

植物工厂的感知体系具备“高频采集、精准控制、全链追溯”三大特征。传感器数据可与区块链技术结合，实现从种子到采收的全参数追溯，产品溢价3倍以上。

### 植物大棚的环境动态感知

大棚占设施农业总面积的78%，是设施农业的主流形态。与植物工厂相比，注重成本与效益的平衡，传感器配置以核心环境参数监测为主。

聚焦温湿度、光照、土壤墒情、病虫害四大核心参数，实现“监测—预警—调控”的闭环，确保作物生长环境稳定在适宜区间，减少环境波动导致的减产风险。

温湿度传感器采用电容式传感技术，

适用于大棚高湿环境。光照传感器可直接与大棚遮阳网控制系统联动。墒情传感器具备耐盐碱、抗腐蚀特性，适用于不同类型土壤。虫情测报灯可实时上传虫情数据至云平台，支持按害虫种类、数量生成预警报告。水肥一体化监测传感器可实时监测水肥灌溉的流量、压力与养分浓度，确保灌溉均匀性。

采用“联动调控”，传感器数据直接对接遮阳网、水肥机、通风机、卷膜器等设备，实现半自动化运行。

### 大田作物的规模化感知网络

大田农业是粮食生产的主流，种植面积占比超80%。重点关注影响作物产量的墒情、病虫害、气象灾害、倒伏风险等关键因素。受地形复杂、环境多变影响，感知体系需采用“固定+移动”组网模式，平衡监测精度与部署成本。

千亩级、万亩级区域的全覆盖监测，数据

采集频率根据参数类型调整：墒情、气象参数1次/小时，病虫害1次/天，倒伏风险、气象灾害实时监测，确保及时发现生产隐患，支撑规模化精准作业（如精准灌溉、统防统治）。

固定墒情传感器采用土壤张力计与FDR双模检测，支持多深度土壤水分监测。区域虫情测报站采用诱虫灯、高清相机、环境传感器，具备虫体自动计数、图像识别功能。田间气象站集成温度、湿度、风速、风向、降水、日照六大参数，支持气象灾害（如暴雨、大风）预警。无人机巡检系统搭载多光谱相机、热成像相机，实现作物长势分级、病虫害热点区域定位、灌溉效果评估。卫星遥感数据终端支持接卫星数据，实现万亩级作物长势宏观监测。

采用“固定站点+移动巡检+卫星遥感”的三级组网模式：固定站点（墒情传感器、气象站、虫情测报站）实现关键点精准监测，无人机巡检实现中尺度区域细节补充，卫星遥感实现大范围宏观覆盖。

生长期聚焦“长势调控与病虫害防控”，监测重点为水肥状况、长势动态、病虫害发生情况。传感器配置：营养元素传感器监测氮、磷、钾、钙、镁等参数，动态监测土壤养分变化。茎秆生长传感器采用激光测距技术，评估作物长势。病虫害监测传感器包括虫情测报灯、孢子捕捉器、叶片病害传感器，实现病虫害“早发现、早防治”。环境传感器：监测温湿度、光照、二氧化碳浓度等环境参数，为长势调控提供依据。

采收期聚焦“成熟度与品质保障”，监测重点为成熟度、糖分含量、果实硬度、田间环境参数。传感器配置：成熟度传感器可非破坏性检测果实成熟度，指导分批采收。糖分传感器能实时监测果实糖分积累，确保达到商品糖度标准。果实硬度传感器可检测果实硬度，评估耐储运性。田间环境传感器可监测温度、湿度、降水等参数，避免采收后因环境不适导致品质下降。

石膏、有机肥）；结合气象传感器数据，调控灌溉量（洗盐灌溉），降低土壤盐分含量。

### 区域适配原则

值得一提的是，传感器的区域适配须遵循以下三原则：

一是环境耐受性适配：根据区域气候与地理特征，选择具备相应防护等级、工作温度范围、抗干扰能力的传感器。例如，南方多雨地区防护等级需 $\geq$ IP68，北方寒冷地区工作温度需 $\leq$ -40℃，盐碱地需具备抗腐蚀设计。

二是数据精准性优化：在满足环境耐受性的基础上，根据区域种植需求调整传感器精度与采集频率。例如，精准种植区域精度需提升1~2个等级（如温度精度从 $\pm$ 0.5℃提升至 $\pm$ 0.2℃），规模化种植区域可适当降低采集频率（如从1次/10分钟调整至1次/小时）。

三是部署成本控制：结合区域经济与种植规模，选择性价比最优的传感器方案。例如，小农户种植区域可采用低成本传感器（如土壤墒情传感器精度 $\pm$ 3‰vol），规模化种植基地可采用高精度传感器（如精度 $\pm$ 2‰vol）。

“数据采集—分析—决策—执行”的全流程智能化，核心突破点包括：

多功能集成传感器：开发“温湿度+肥力+病虫害”一体化传感器，减少传感器数量，提升数据融合效率。

AI+传感器的智能决策闭环：传感器内置AI算法，实现本地数据预处理与智能决策。

跨场景自适应传感器：开发具备环境自适应能力的传感器，可根据设施类型、作物品种、区域环境自动调整精度与采集频率。

数据安全与共享技术：采用区块链技术实现传感器数据加密存储与共享，确保数据真实性与安全性。

## 不同植物类别、生长周期的差异化感知技术适配方式

不同作物的生物学特性、生长周期、收获部位存在显著差异，决定了感知技术的核心监测参数与适配模式。

### 不同类别农作物的感知监测区别

根茎类作物聚焦根系发育环境，叶菜类作物关注叶片健康状态，果实类作物侧重品质形成过程对数据要求截然不同。

根茎类作物生长质量与土壤环境密切相关，监测参数包括土壤温湿度、土壤肥力、土壤紧实度、根系生长状态。主要传感器配置：土壤温湿度传感器可监测根系发育环境；土壤肥力传感器的氮、磷、钾三大参数，支持土壤养分动态监测；土壤紧实度传感器可避免土壤板结影响根系生长；根系生长监测传感器采用微型电阻式传感

器，可实时监测根系伸长速率。

叶菜类农作物生长周期为25~60天，对水分、光照、病虫害敏感，监测参数包括叶片湿度、叶绿素含量、光照强度、病虫害胁迫。传感器配置：多光谱传感器测量范围为400~900nm；叶片湿度电容式传感器直接贴附于叶片表面，可预警霜霉病、软腐病等真菌性病害；叶绿素传感器可实时监测作物氮素营养状况，指导精准施肥。病虫害孢子捕捉器可捕捉空气中的真菌孢子，支持病害早期预警。

果实类作物生长关键影响因素涉及膨大速率、糖分积累、成熟度调控及病虫害防控，监测参数为果实生长量、糖分含量、成熟度、果实硬度等。果实生长传感器采用位

移传感器，计算膨大速率。糖分传感器基于近红外光谱技术，非破坏性检测果实糖分积累。成熟度传感器通过检测果实色泽、可溶性固形物含量评估成熟度，指导精准采收。果实硬度传感器用于评估果实品质与耐储运性。

### 全生育期的感知技术适配

农作物全生育期可划分为育苗期、生长期、采收期三个阶段，不同阶段的生长重点不同，传感器配置与监测重点也需动态调整。

育苗期聚焦“出苗率与壮苗率”，监测重点为苗床温湿度、光照强度、积温。核心传感器配置：苗床温湿度传感器温度测量范围为-10℃~50℃。光照传感器用于调控育苗棚光照，确保幼苗光合作用需求。积温传感器可累计作物生物所需积温，指导移栽时间。

## 不同地理环境的感知技术适配与优化

南北方气候差异显著，地形地貌复杂（平原、丘陵、山地、盐碱地等），不同地理环境对传感器的环境耐受性、通信方式、部署模式提出差异化要求。

### 南北方气候差异下的感知适配

南北方气候差异核心体现在温度、降水、湿度等参数，直接影响传感器的防护设计、通信稳定性与供电方式。

南方多雨地区（长江以南、华南地区），夏季高温高湿，冬季温和多雨，传感器适配重点为“防雨防腐、抗干扰、排水监测”。防雨型虫情测报灯采用不锈钢304级材质，具备防积水设计，诱虫灯管具备防水涂层，避免雨水短路。防腐湿度传感器采用聚四氟乙烯外壳，抗腐蚀能力强，适用于高湿高盐雾环境。土壤墒情排水监测传感器集成土壤含水量与地下水位监测，预警内涝风险。无线通信优化采用LoRa/Wi-Fi双模通信，在多雨天气下自动切换至LoRa模式（通信距离3~5km），避免Wi-Fi信号衰减。供电方式可

采用太阳能+锂电池双供电。

北方干旱地区（黄河以北、西北地区），夏季炎热干燥，传感器重点为“防风化、耐低温、节水监测”。

稳压型气象传感器采用防风化氟碳涂层，具备抗风沙设计，避免沙尘影响传感器性能。耐低温土壤墒情传感器采用低温锂电池。节水灌溉流量传感器具备防堵塞设计（不锈钢滤网），实时监测灌溉用水量，支撑节水管理。无线通信优化采用NB-IoT通信协议，依托运营商网络，通信距离10~15km，适用于北方广域种植场景。供电方式采用功率 $\geq$ 30W的太阳能板，以及容量 $\geq$ 15Ah的锂电池，保障冬季低温环境下续航 $\geq$ 15天。

### 不同地理单元的感知重点

平原大田适配规模化精准灌溉。例如，华北平原是我国粮食主产区（小麦、玉米轮作），感知重点为墒情监测与规模化精准灌溉。传感器配置包括规模化墒情监测网络、区域气象站、灌溉流量传感器和无人

机巡检系统。可采用“墒情+气象”双因子灌溉模型，当20cm土壤墒情低于15%vol且未来3天无有效降水时，启动精准灌溉，灌溉量根据作物生育期动态调整（小麦拔节期灌溉量40m<sup>3</sup>/亩，玉米抽雄期灌溉量50m<sup>3</sup>/亩）。

丘陵山地适配型感知网络。南方丘陵山地占我国国土面积的30%以上，地形复杂、地块零散。传感器配置包括小型化温湿度传感器、低功耗墒情传感器、便携式虫情测报仪以及地形适配型无人机。例如，某柑橘种植基地，传感器续航时间 $\geq$ 6个月，数据传输成功率 $\geq$ 95%，病虫害预警准确率 $\geq$ 85%，柑橘亩产量提升18%，人工成本下降70%。

盐碱地适配耐盐耐低温感知方案。例如东北盐碱地核心问题是土壤盐碱化与低温胁迫，感知重点为“土壤盐分监测+耐低温设计”。传感器配置为土壤盐分传感器、土壤pH值传感器、耐低温气象传感器、作物耐盐性监测传感器。通过土壤盐分、pH值传感器数据，指导盐碱地改良（如施用脱硫

## 智慧农业数据与模型的底层逻辑

“设施类型—植物品类—地理环境”三维感知体系并非孤立存在，而是以“作物需求”为核心，联动“设施条件”与“区域环境”，构建动态适配的感知矩阵，为智慧农业数据模型提供底层支撑。

**融合逻辑：以作物为核心的三维联动模型**

三维融合的核心逻辑是以特定作物的生物学特性与生长需求为出发点，结合设

施条件的调控能力，适配区域环境的客观约束，形成“作物需求—设施调控—区域适配”的闭环体系。

**实践价值：解决传统感知“一刀切”难题**

传统农业感知技术存在“重设备、轻适配”的问题，同一类型传感器应用于不同设施、作物、区域，导致数据精准度不足、调控效果不佳。三维感知体系通过精准适配，解决了这一难题，其实践价值主

要体现在三个方面：

一是数据精准度提升，通过场景化适配，传感器数据误差率从传统的10%~15%，降至3%~5%；二是调控效率优化，三维数据融合使调控决策更科学，避免“盲目灌溉、盲目施肥”；三是部署成本降低，通过按需配置传感器，避免过度追求高精度设备，部署成本降低20%~30%。

**技术突破方向：从数据采集到智能决策**

三维感知体系的未来发展方向是实现

## 农业传感器技术将进一步突破应用边界

### 小型化、低功耗、低成本

随着应用持续扩大，农业传感器正向小型化、低功耗方向演进，以适配复杂地形与低成本部署需求。

小型化：MEMS技术使传感器体积从厘米级缩小至毫米级。低功耗：采用低功耗芯片与休眠唤醒技术，使工作电流从毫安级降至微安级，续航时间从数月延长至数年。自供电技术：集成太阳能、振动、温差等微能量收集技术，实现传感器自供电，无须外部电源。

### 多功能集成

为减少传感器数量、提升数据融合效率，多功能集成成为重要发展方向。

多参数集成：开发“温湿度+肥力+病虫害”“土壤墒情+盐分+pH值”等多参数传感器。多技术融合：融合光学、电气、声学等多种检测技术，提升性能。

### 智能化升级

从“数据采集”向“智能决策”升级，内置AI算法与边缘计算能力。

AI算法嵌入：将深度学习、机器学习算法集成到传感器中，实现本地数据预处理与智能决策。边缘计算集成：内置微处理器（MCU）与存储模块，实现本地数据筛选、特征提取与分析。自诊断与自校准：内置自诊断算法，监测传感器工作状态，故障预警准确率 $\geq$ 90%；具备自动校准功能，根据环境变化调整参数，确保数据精度长期稳定。

### 本土化发展加速

在政策持续推动与市场需求双轮驱动下，本土化发展成为产业发展新趋势，核心技术、产品性能、市场份额均实现突破性进展。

核心技术突破：国内企业与科研院所联合攻关，聚焦MEMS芯片、敏感材料、检测算法三大核心环节。农业专用MEMS芯片采用自主研发的深硅刻蚀、键合工艺，实现量产；敏感材料突破压电陶瓷、光学镀膜、气体敏感膜等关键材料技术；检测算法适用于农业场景的AI识别、数据校准算法。

产品性能提升：缩小与国际先进水平差距。在精度、稳定性、环境适应性等关键指标快速提高。

市场份额扩张：性价比优势凸显。同时，针对我国南北方气候差异、地形复杂等特点，推出定制化产品，适配性更佳。

### 成本控制与规模化普及路径

通过技术创新、产业协同、政策支持三大路径，降低部署与使用成本，推动“小农户”与“大农业”协同受益。

技术创新降本：从“单一功能”到“多功能集成”，开发“多参数一体化”传感器。

产业协同降本：构建“产学研用”生态链。传感器企业与芯片制造、材料供应、设备集成企业组成上下游协同，签订长期合作协议，通过规模采购降低原材料成本。

政策支持降本：精准赋能产业发展。对农业传感器核心技术研发给予专项补贴，支持企业建设中试平台；对规模化种植基地采购国产传感器给予采购补贴，推动普及；设立农业传感器产业基金，支持技术升级与产能扩张。

农业信息化的本质是数据化，而感知技术是数据化的核心基石。当前，我国农业传感器技术已实现从“跟跑”到“并跑”的跨越，产品性能持续提升，成本不断降低，在规模化种植基地、家庭农场、小农户等不同场景中广泛应用，推动农业生产效率提升，为保障粮食安全、推动乡村振兴提供了有力支撑。

未来，随着传感器技术与AI、物联网、卫星遥感、区块链等技术的深度融合，农业感知将向“全域化、智能化、一体化”方向演进；实现“天—空—地—苗”的全方位感知，智能化实现从“数据采集”到“自主决策”的升级，一体化实现“感知—调控—执行”的闭环协同。在技术创新、产业协同、政策支持的多重驱动下，农业传感器将进一步突破性能极限与应用边界，为农业数字化转型注入源源不断的动力，助力书写农业现代化高质量发展的崭新篇章。