

## 综合研究

## 温室传感器技术的研究进展与应用展望\*

程涛, 荆珮, 沈超, 张漫, 李民赞<sup>※</sup>

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**【目的】智能温室是设施农业未来的发展趋势, 传感技术和物联网技术是智能温室的基础, 分析温室传感器技术的研究进展与应用展望很有意义。【方法】温室传感器根据应用领域可划分为环境因素传感器和植物体信息传感器, 从传感器的精度、特点、适用范围、发展趋势等方面对两类传感器进行了分析。【结果】环境因素传感器包括光照传感器、空气温湿度传感器、CO<sub>2</sub>传感器和土壤相关的传感器, 植物体信息传感器包括植物温度传感器、植物水分传感器和植物营养元素传感器。光照传感器以硅光电池使用最广, 空气温度传感器中最具应用前景之一的是半导体PN结型温度传感器, 空气湿度传感器中的电阻式、电容式感湿材料都有应用, CO<sub>2</sub>传感器以红外线应用原理为主。在土壤和植物体信息传感器中, 光谱学扮演着越来越重要的角色。【结论】未来温室专用传感器领域会进一步细分, 土壤和植物体信息传感器继续成为未来的研究热点。温室传感器总体上会朝着体积更小、精度更高、非接触式、实时检测的方向不断发展, 传感器的信息融合趋势会愈加明显。传感器和物联网技术在智能温室发展中将会发挥越来越重要的作用。

**关键词:** 温室; 物联网; 传感器; 环境因素; 植物体信息

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20200301

## 0 引言

温室作为设施农业的一种典型代表, 目前我国已经得到了广泛的应用和推广。温室从技术上的分类主要为玻璃连栋、塑料连栋、日光温室和塑料大棚<sup>[1]</sup>。目前, 我国的温室设施生产面积居世界第一。根据全国农业统计最新数据, 截止2018年全国温室总面积189.42万hm<sup>2</sup>, 其中, 日光温室面积为57.75万hm<sup>2</sup>, 占总面积30.5%; 塑料大棚126.24万hm<sup>2</sup>, 占总面积比66.6%; 连栋温室5.43万hm<sup>2</sup>, 占比2.9%<sup>[2]</sup>。虽然我国是温室生产的面积大国, 但还不是温室生产的科技强国。当前, 我国温室生产的整体科技含量不高, 还是以消化和吸收外国技术为主。此外, 我国温室的生产集约化程度低、单位面积的产出率低、对环境污染严重以及从事农业生产的人口老龄化等问题也比较

收稿日期: 2020-04-20

第一作者简介: 程涛(1996—), 硕士研究生。研究方向: 精细农业系统集成。Email: chengtao2017@foxmail.com

<sup>※</sup> 通信作者简介: 李民赞(1963—), 教授、博士生导师。研究方向: 精细农业系统集成。Email: limz@cau.edu.cn

<sup>°</sup> 基金项目: 国家自然科学基金项目(31971786), 云南省院士专家工作站项目(2018IC143)



突出。

设施农业是一种高投入、高产出、高效益的农业，它力图为农产品各阶段提供适宜的环境，以期摆脱自然条件和传统生产技术的束缚，生产出优质的农产品。设施农业的技术组成主要有生物技术、环境技术和工程技术<sup>[3]</sup>。物联网、大数据、云计算和人工智能是现代工程技术的代表，它们正在引领传统设施农业向智慧农业（智慧温室）方向发展。智慧温室的核心是信息的获取、知识的利用<sup>[4]</sup>。数据准确度的高低决定了系统整体性能的高低。我国智慧农业的短板主要有 3 项，其中之一便是农业专用传感器落后、农业传感器自主创新力度不大<sup>[5]</sup>。

温室传感器概括起来可以分为两类：环境因素传感器和植物体信息传感器。文章将以设施农业的温室为主题，以这两大类传感器为线索，详细介绍在智慧农业的大背景下温室传感器技术的发展现状，指出当前我国温室传感器的不足之处，并分析未来我国温室传感器的发展方向。

## 1 环境因素传感器

### 1.1 光照传感器

光照对植物的生长发育至关重要，同一种植物在不同光照条件下会出现不同的生物性状。只有在光补偿点之上，即植物的光合作用大于呼吸作用时，植物才会积累有机物而增加产量。当光照强度不足时，植物的光合效率会降低，植物的生长发育会放缓；当光照强度过强时，植物的光抑制会增强，也达不到最佳的生长发育状态。因此，光照的调控对温室十分重要。

将光学量数值转化成电压、电流等电量数值的传感器称为光电传感器。光电传感器的主要类型有光敏电阻、光电池、光敏二极管和光照传感器集成芯片等。光电传感器需要具有线性范围宽、灵敏度高、光谱响应合适、稳定性高、寿命长等特点<sup>[6]</sup>。光敏电阻是传统的光电传感器，其工作原理是将光照信号转成模拟信号，再将模拟信号转成数字信号。其电路比较复杂，费用也比较高。并且光照强度和电阻阻值之间存在非线性关系，两者之间的转化关系比较复杂且容易受到干扰，因而现在光敏电阻应用较少<sup>[7]</sup>。目前应用最为广泛的是光电池，其中以硅光电池最为出名。在硅光电池流行之前，硒光电池也曾流行过，但由于其稳定性较差而被代替。硅光电池产生的光电流与光照强度成线性关系，并且硅光电池的收光面积较大，还可以采用视觉校正、余弦校正技术来对测量值进行修正，因而测量值比较精确<sup>[8]</sup>。此外，硅光电池还具有响应时间短、转化效率高、耐高温辐射等优点<sup>[9]</sup>，因此它是一个较为理想的光照感应传感器。

在智能温室设计中被开发人员选用的光照传感器有很多，其中一款比较常见的传感器是 BH175FVI。BH175FVI 是由日本半导体公司 ROHM 推出的一款用于两线式串行总线接口的数字型光照传感器集成电路，利用 I<sup>2</sup>C 总线接口进行数据通信。工作电压为 2.4 ~ 3.6 V，测量范围 1 ~ 65 535 lx。BH175FVI 的结构框图如图 1 所示<sup>[10]</sup>。光照通过接近人眼

2020年6月

敏感度的光敏二极管 PD 捕捉到，经过集成运算放大器 AMP 将 PD 电流转成 PD 电压，又通过模数转换器 ADC 获取 16 位数字数据，最后在逻辑控制单元被处理和存储。OSC 是内部逻辑时钟，为指令的执行提供动力<sup>[11]</sup>。还有一款比较常见的传感器是 S1087，S1087 是由日本滨松公司生产的一种硅光电池。硅光电池的基本结构是 PN 结，当光照射在 PN 结上，一部分光被 PN 结吸收，被 PN 结吸收的光以光子的形式与半导体中的电子发生碰撞而结成电子-空穴对，这些电子-空穴对在 PN 结的内建电场中发生偏移和聚集，因而产生光电势<sup>[12]</sup>。不同的光电势对应不同的光照强度，这就是硅光电池的基本原理。另外，还有一些诸如 TSL2550、GY-30 等其他型号的光照传感器在智能温室设计中也有被采用<sup>[13-14]</sup>。

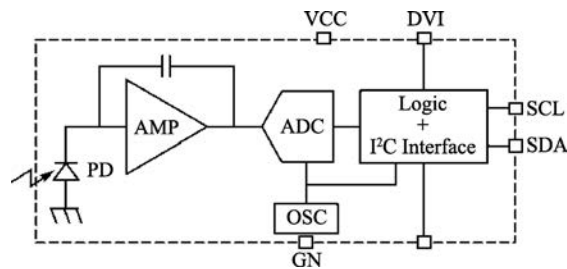


图 1 BH175FVI 结构框架  
Fig.1 BH175FVI structure block diagram

### 1.2 空气温度和湿度传感器

空气的温度、湿度是温室中最受关注的环境因素之一。适宜的温度能为植物的生长提供动力。温室温度过低，植物的生长发育会放缓；温室温度过高，又容易造成植物叶片的灼伤。温室温度的典型特点是昼夜温差大。为了让植物健康生长，调控好温度尤为重要。由于土壤水分的蒸发和植物的蒸腾作用，温室中湿度的典型特征是偏湿。温室湿度过高，不利于植物生长，并且还容易诱发病害。因此，监控好温室湿度、及时降湿是温室调控中的重要举措之一。

目前比较常用的温度传感器是电阻式温度探测器、热电偶和半导体温度传感器。电阻式温度传感器主要利用电阻值随温度的升高而增加的原理，其中常见的电阻式温度传感器的材料是铂、镍或铜。热电偶是由两种不同的金属熔接在一起形成敏感结，温度变化会产生相应的热电势，这是热电偶测量温度的基本原理。常用的金属有铂、铂铑合金、铁、铜、镍铬合金等，此外碳、石墨和碳化硅等非金属也可以作为热电偶材料。半导体温度传感器可分为热敏电阻和 PN 结型温度探测器两种。热敏电阻的阻值随温度的变化存在非线性关系，需要进行线性修正。PN 结型温度传感器利用的是电压与温度的线性关系，与热敏电阻相比不需要额外的处理，它是现代温度传感器的主要发展方向之一<sup>[15]</sup>。湿度传感器依托于湿敏元件，主要分为电阻式和电容式两种。当空气中的水蒸气吸附在感湿材料上后，感湿材料的阻值、介电常数会发生很大的变化，这是湿敏元件的基本原理。电阻式湿敏元件主要包括氯化锂湿敏元件、碳湿敏元件、陶瓷湿敏元件、氧化铝湿敏元件等。电容式湿敏元件主要包括高分子聚合物、氯化锂和金属氧化物等<sup>[16]</sup>。

在智能温室的设计中，温度、湿度的获取有采用集成的传感器电路来测量的，也有采用各自专门的传感器来测量的。温湿度测量比较常用的一种集成传感器是 SHTxx 系列，其结构框如图 2 所示<sup>[17]</sup>。SHTxx 系列是由瑞士 Sensirion 公司生产的一种数字式温湿度集成检测传感器，采用 CMOSens 专利技术，将测温元件、湿敏元件、A/D 转换器以及串行接口电路集成在一个芯片中。该传感器具有体积小、响应速度快、抗干扰能力强、性价比高等优点。以 SHT11 为例，该传感器利用两个传感器产生温度、相对湿度传感器信号，温度的测量范围是  $-40^{\circ}\text{C} \sim 123.8^{\circ}\text{C}$ ，湿度的测量范围是  $0 \sim 100\% \text{RH}$ ，默认两者的分辨率分别为 14 位、12 位，然后经过信号放大，分别送入 A/D 转换器进行模数转换和数值修订，最后经过二线串行接口将数据送出<sup>[18]</sup>。还有一种常见的温湿度集成传感器是 DHT11，该芯片由广州奥松有限公司生产。其温度的测量范围是  $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ，湿度的测量范围是  $20\% \sim 95\% \text{RH}$ 。DHT11 包含一个 NTC 测温元件和一个电阻式感湿元件，并与一个高性能 8 位单片机相连，具有校验信号输出功能。一次完整的数据输出为 40 位，分别为 8 位温度整数数据、8 位温度小数数据、8 位湿度整数数据、8 位湿度小数数据和 8 位校验和<sup>[19-20]</sup>。除了集成的温湿度传感器，还有一些专门的温度、湿度传感器。例如，专门测量温度的美国 Analog Devices 公司型号 AD590 的 PN 结温度传感器，专门测量湿度的起源于日本市场型号 H 104 的陶瓷湿度传感器<sup>[21]</sup>。

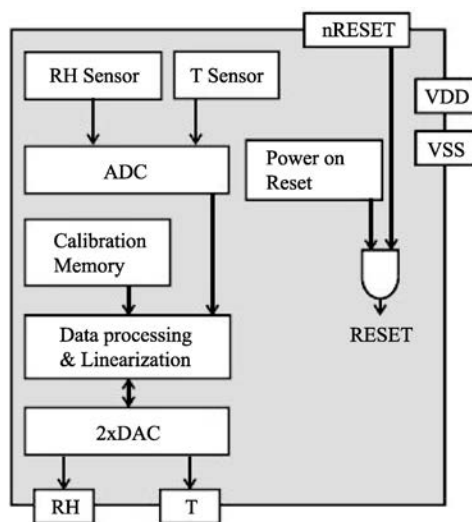


图 2 SHTxx 系列结构框架 (以 SHT3x 为例)

Fig.2 SHTxx series structure block diagram

### 1.3 CO<sub>2</sub> 传感器

温室中 CO<sub>2</sub> 的含量是近几年越来越受关注的温室环境因素之一。作为植物光合作用的重要原料，CO<sub>2</sub> 的浓度高低直接决定了温室产量的高低。除了通风以平衡温室中的 CO<sub>2</sub> 浓度外，适时地使用“气肥”也是很受欢迎的举措。植物生长需要适合的 CO<sub>2</sub> 浓度，CO<sub>2</sub> 浓度过高、过低都会影响植物的生长发育。CO<sub>2</sub> 浓度过高，会造成植物叶片卷曲，影响植物对氧气的吸收，植物不能进行正常的代谢活动；CO<sub>2</sub> 浓度过低，植物叶片暗淡而无光





2020年6月

泽, 容易让植物产出异形果, 同时也不利于植物增产。

目前出现的 CO<sub>2</sub> 传感器主要分为红外线式、电容式、电化学式、热传导式等, 其中应用最为广泛的是电化学式和红外线式。电化学式 CO<sub>2</sub> 传感器刚进入实用阶段, 抗干扰能力差、不稳定。红外线式 CO<sub>2</sub> 传感器比较成熟, 国内外厂商均有生产, 其精度高、功耗小、浓度检测范围大、稳定性好, 在市场上比较受欢迎<sup>[22]</sup>。固态电解质 CO<sub>2</sub> 传感器是电化学式 CO<sub>2</sub> 传感器的一种, 主要利用原理是当 CO<sub>2</sub> 通过气敏材料时会通过化学反应产生电离子并形成电动势, 根据电动势的高低可反应空气中 CO<sub>2</sub> 浓度的高低<sup>[23]</sup>。红外线式 CO<sub>2</sub> 广泛采用的技术是非色散红外检测技术 (NDIR), 其理论原理是朗伯-比尔定律。不同的气体由于其内部结构不同, 因而吸收光谱的特性存在差别, 同一种气体在光的不同波峰处吸收特性也是不同的, 这就是气体浓度测量的理论依据<sup>[24]</sup>。例如, CO<sub>2</sub> 气体在 4.26 μm 左右的红外波长波段存在明显的吸收峰, 且不受空气中其他气体的影响<sup>[25]</sup>。

在智能温室的实践中, 使用频率较高的一家 CO<sub>2</sub> 传感器生产公司是英国的 GSS 公司<sup>[26]</sup>。该公司有很多 CO<sub>2</sub> 传感器系列, 比如 COZIR 系列等。此外, 瑞典森尔的 S8-0053 系列 CO<sub>2</sub> 传感器在近年来的温室 CO<sub>2</sub> 浓度检测中也有被采用<sup>[27]</sup>。类似还有诸如国外的 B-530 CO<sub>2</sub> 传感器也在温室智能调控中有所应用<sup>[23, 28]</sup>。上述几种 CO<sub>2</sub> 的传感器都是基于 NDIR 技术的光学检测方法, 该方法是当前 CO<sub>2</sub> 气体检测的主流方法。作为 CO<sub>2</sub> 检测方法的另一种方法电化学法, 虽然目前也有研究<sup>[29]</sup>, 但距离大规模的应用还有较长的路要走。

#### 1.4 土壤相关的传感器

土壤质量的好坏直接决定植物生长发育的好坏。该部分选取两个角度来对土壤传感器的研究进行介绍, 即土壤含水量、植物的营养元素 (氮、磷、钾, 肥料 3 要素)。植物的生长发育需要适宜的土壤水分, 过低和过高都不利于植物的生长。土壤含水量过低, 会影响植物的蒸腾作用, 减弱植物向上输送无机盐的动力; 土壤含水量过高, 植物根部的呼吸会受阻, 同时也容易造成根的腐烂。植物的生长发育对氮、磷、钾的需求很大, 但土壤中这 3 种元素又相对较少, 因而需要施加相应的肥料。氮肥能促进植物的枝叶发育, 促进叶绿素的形成; 磷肥能促进植物的开花和结果, 能增加植物的产量; 钾肥能促进根部的生长, 提高植物的抗倒伏能力。检测好土壤中氮、磷、钾的含量是对土壤进行变量施肥的第一步, 这对精细作业具有相当重要的指导意义。

目前土壤水分的测定大体可分为 3 类: 取样一定位测量法、遥感监测法、模型模拟法<sup>[30]</sup>。实际生产中应用最多的是取样一定位测量法, 下面主要介绍在取样一定位测量法中常用的一些方法。国家标准的土壤水分测量法是烘干法<sup>[31]</sup>。通过取样泥土烘干前后的质量差来间接计算土壤的水分含量。因为该方法的实时性较差, 所以大规模使用较少。常见的土壤水分的测量大都依靠传感器来完成, 根据传感器的原理不同可分为介电法、中子仪法和张力计法等<sup>[32]</sup>。介电法对土壤水分比较敏感而受土壤环境影响较小, 因而此方法使用较为广泛。在介电法的基础上, 频域反射法、时域反射法等方法被研发出来。这类方法的原理是电磁波会在不同含水量的土壤中衰减不同, 因而可以根据反馈电磁波的差异测得土壤含水量<sup>[33-34]</sup>。中子仪法则是根据射线经过土壤的衰减量跟土壤含水量存

在函数关系，然后再通过该关系的校准来得到土壤含水量<sup>[35]</sup>。张力计法则是利用土壤水分对仪器的压力跟土壤含水量的关系进行函数修正来得到土壤的含水量<sup>[36]</sup>。在智能温室的应用中，赵强采用了 FC-28 型土壤湿度传感器来测量土壤的湿度，以达到对温室草莓土壤湿度检测的效果<sup>[8]</sup>。该传感器有两根极柱，像叉子一样可插进土壤中，同时其表面做了镀镍处理以增加传感器的使用寿命。该传感器是一种介电法的传感器，两极柱间的土壤相当于一个电阻，通过阻值的不同来判断土壤湿度。Yin Zhe 等<sup>[37]</sup>研制了一种适用于室内外的近红外 LED 反射率传感器。该传感器基于两个不同波长的发光二极管，分别对应为 1 940 nm 的强吸水带和 1 800 nm 的弱吸水带。通过对室内 4 种土壤样本的实验表明，该传感器具有良好的实用性。Goswami M P 等<sup>[38]</sup>采用印刷电路板技术对边缘场电容式土壤湿度传感器进行了优化和实现。传感器用覆铜板制造并采用三维有限元法进行仿真，实验结果表明，该传感器的测量结果与标准称重法的结果基本吻合。

传统的土壤中氮、磷、钾的测定方法都以化学法为主<sup>[39-41]</sup>，虽然测量准确，但同样也存在实时性不强的问题。光谱学的核心是利用不同官能团对不同波段的吸收存在差异来进行元素测定的，其在土壤营养元素的测定中有广泛的应用。祁亚琴等<sup>[42]</sup>利用高光谱对土壤的营养成分（全氮 TN、全磷 TP、全钾 TK）进行检测，通过田间实验和反复验证，证明了其归一化的高光谱遥感模型取得了较好的成果。章涛等<sup>[43]</sup>总结前人对土壤有机质高光谱估算模型的研究，发现目前的高光谱估算模型呈现出多种模型耦合估算且计算复杂度逐步降低、致力于消除环境因素影响以及越来越贴近生产实际等趋势。中国农业大学李民赞团队长期致力于土壤参数的光谱预测研究工作，研究对象以东北黑土和华北潮土为主，对土壤参数预测已经取得较大的突破并且已经开发出便携式土壤全氮实时分析仪等实用工具<sup>[44]</sup>。李民赞团队开发的便携式土壤氮素含量测定仪通过管柱中的自带光源照射，经土壤漫反射回传的光由 InGaAs 光电探测器捕捉，光信号被转为电信号，又通过对电信号的放大和滤波，后传至 89S52 单片机进行数据处理，然后在 LCD 显示结果并可以通过上位机程序实现数据的转存<sup>[45]</sup>。Shi Tiezhu 等<sup>[46]</sup>在可见光 / 近红外条件下，研究对比了逐步多元线性回归、偏最小二乘回归和支持向量机回归在评估土壤总氮（Total Nitrogen，简称 TN）含量的表现，结果表明，偏最小二乘回归（PLSR）是该研究中估算 TN 含量最合适的方法。此外，该文献还得出在 PLSR 模型中 1 450 nm、1 850 nm、2 250 nm、2 330 nm 和 2 430 nm 附近的光谱带是重要的波长，而且在光谱数据预处理中，光谱反射率的一阶导数比二阶导数更适合应用。

表 1 环境因素传感器

Table 1 Environmental factors sensors

环境因素	测量原理 / 材料	典型类型	代表性产品
光照强度	光电效应	硅光电池	BH175FVI、S1087
空气温度	半导体	PN 结型	SHTxx 系列、DHT11
空气湿度	湿敏元件	电阻式、电容式	
二氧化碳	光谱特性	红外线式	COZIR 系列、B-530
土壤水分	电磁波衰减	介电法	FC-28
土壤营养元素	光谱特性	近红外光谱	实验室产品



2020年6月

## 2 植物体信息传感器

### 2.1 植物温度传感器

植物的冠层温度是指植物不同高度叶片温度的平均值，是植物温度测量中备受关注的要素之一。植物的冠层温度是外界环境因素和植物体自身共同作用的结果，同时植物产量的高低与植物温度的高低也息息相关。通过对叶温的测量，可了解植物的生长状况来指导农业生产。例如，当叶温比空气温度高时，可考虑土壤是否缺水。因为土壤水分不足时，植物的蒸腾作用会减弱，植物叶温会变高。

植物叶温测量法可以分为接触式测温、非接触式测温 and 叶温模型估计 3 种方法<sup>[47]</sup>。接触式测温有热电阻测温 and 热电偶测温。热电阻测温是根据已知电阻随温度变化而变化的原理制成。不同的温度会导致电阻的阻值不同，进而导致电阻两端的电压不同，然后对电压进行放大、A/D 转换和计算来得到对应的温度值。常见的热电阻材料是铂电阻。热电偶测温也是一种将温度信号转换为电信号的温度传感器，和热电阻不同的是它的测温敏感结构是热电偶。CB-0231 热电偶测温仪是一种典型的热电偶温度传感器，该仪器由 CID 生态科学仪器有限公司生产，是我国首次向市场推送的用于生理生态研究和教学的仪器。非接触测温有红外测温 and 红外热成像测温。红外温度传感器是根据叶片温度不同向外辐射能力不同的原理，通过捕捉叶片发出的红外辐射大小来判断温度的高低。相对于接触式测温而言，红外测温方法具有不损伤植物、响应快、测温范围广和精度高等优点。红外热成像测温是把物体的红外辐射通过信号处理技术转化成热图像，从而得到物体表面各点的温度。红外热成像测温的实时性很强，为实时监控植物的生长状态提供了可能。叶温模型主要通过对外界环境因素（如：空气温湿度、土壤含水量等）进行建模来间接计算叶温。但叶温模型对植物种类依赖过高，不同植物的叶温预测模型通常是不同的。

在智能温室的实践中，王春生<sup>[48]</sup>采用 DS18B20 作为叶片温度传感器进行植物体温度的采集。该温度传感器是一种接触式测温传感器，测温时需要用塑料夹将 DS18B20 与叶片夹紧进行测定。该文献把以色列 PTM-48A 叶片温度传感器的测定值作为标准值，对比表明 DS18B20 直接测定的值还需要进一步修正。由于接触式测温仪器直接暴露在空气中，受空气温度影响较大，这是造成 DS18B20 测量误差的主要原因。植物叶温的测量用途大体可分为 3 类：植物生理健康的应用、灌溉指导和抗旱基因筛选、产量预测<sup>[49]</sup>。Minyoung Kim 等<sup>[50]</sup>利用热红外技术对温室黄瓜采用 3 种不同的灌溉策略，成功证明了热红外技术在测量植物水分胁迫方面具有良好的效果。Hackl H 等<sup>[51]</sup>利用田间模拟实验比较了高分辨率热像法和红外测温法在区分水分胁迫方面的作用。实践表明，在植物密植条件下，简单的红外测温法取得的效果与复杂的高分辨率热像法取得的效果类似。Wu Ziming 等<sup>[52]</sup>采用手持式红外测温仪 M312216 对早稻和晚稻叶片温度进行了测量，发现在生长后期降低叶温，增加叶气温差，可增加产量。不同基因品种的作物在生长阶段的叶温也不同，因此叶温可以作为高产品种筛选的参考



之一。

## 2.2 植物水分传感器

植物水分检测最初都是靠测量土壤水分来间接检测，但这种方法存在滞后性、水资源浪费过多的问题。检测好植物体的水分对灌溉决策、节约用水和观测植物体的生长状况具有重要的指导意义。我国水资源绝大多数都用于农产品灌溉，但由于供水设备的落后，导致我国的水资源利用率在 30%~40% 之间，发达国家的利用率则高达 80% 以上<sup>[53]</sup>。我国的人均水资源比较少，因此农业节水的技术水平亟待提高，其中准确地检测好植物的含水状态是节水工作的重要一环。

水分从植物的根部吸收进入植物体，经过木质部的导管从茎部把水分送往植物的叶子。因此，根部的水分含量大于茎部的水分含量，茎部的水分含量大于叶子水分含量。从植物水分测量的角度看，根部埋藏在地下使得测量比较困难，茎部的粗细不一致使得测量容易产生偏差。综合考虑来看，叶子是比较理想的植物水分测量部位<sup>[54]</sup>。叶子的厚度和水分含量必然存在函数关系，一般来说，植物含水量高，叶子就相对较厚。但是，这种函数关系必须在叶子亚微米级的厚度范围下才能实现，所以这对传感器精度提出了很高的要求。这种微型厚度增量的测量运用的是位移转换的原理，常见的方法有 3 种：电感法、电容法和应变法<sup>[55]</sup>。电感法的精度不能达到亚微米级的精度，而应变法受温度影响较大，因此电容法是理想的厚度增量测量法。电容法是将被测量的变化转化成电容量的变化，其中传感器极板常见的有 3 种：变面积型、变极距型和变介电常数型。3 种类型的传感器极板在实践中均有应用，其中变介电常数型的极板类型用得较多一些。在传感器的材料选择上以轻型耐腐蚀材料和非金属材料为主，如铝合金、工程塑料等。

张新<sup>[56]</sup>提出了两种对智能温室有启发意义的无创判定植物是否缺水的方法。(1) 对植物的叶片数据进行点云收集，将叶片的萎蔫程度与缺水程度进行建模，通过图像处理来判断植物是否缺水；(2) 采用驻波率原理，通过环形传感器对植物进行夹持，当植物茎部含水量不同时会引起驻波率的变化，进而引起传感器两端电压的变化，通过电压值可间接得到植物的含水量。Zheng Lihua 等<sup>[57]</sup>利用植物不同含水量的生理电学性质不同，研制了一种基于四电极法的植物电学性质检测仪。该仪器由两个向物体注入恒定交流电的电流探针和两个测量电极间电压差的电压探针组成，用电压差来评价叶片含水量。Seelig H 等<sup>[58]</sup>利用高精度的电子距离传感器对温室条件下的豇豆叶片进行测量，把叶片的测量结果作为植物是否灌溉的指导因素。通过与定时灌溉策略的对比发现，该方法可以节约 25%~45% 的用水量。Jia Jiannan 等<sup>[59]</sup>利用近红外光谱技术设计了一种反射式植物水分检测仪。该仪器的信号采集采用三个不同波长的 LED 轮流发光、一个光频转换器接收的方式进行。实验结果表明，该仪器的预测结果与真实测量值基本一致，相关系数约为 0.82。

## 2.3 植物营养元素传感器

植物营养元素（此处特指植物的氮、磷、钾）对植物的生长发育极其重要。对土壤营养元素的检测是对植物营养元素的间接检测，该方法具有一定滞后性且容易造成资源





2020年6月

的浪费,因此最直接的方法就是对植物营养元素直接检测。在对活体植物的营养元素检测中,必须满足不影响植物生长(微创或无创)、检测响应时间短的特点,这对植物营养元素的检测提出了较高的要求。

植物氮元素的检测是植物营养元素的检测中研究最多的,该部分以氮元素的检测为例介绍一下目前常见的植物营养元素检测方法。光谱学在植物氮素的快速检测中有重要的应用,从原理上分可分为3种:被动光源的氮素检测、主动光源的氮素检测和多波段激光雷达检测<sup>[60]</sup>。被动光源的氮素检测是获取植物对太阳光特征波段反射率来构建反映植被氮素的植被指数对植物氮素进行探测。常见的被动光源的氮素检测仪有德国 Yara 公司的 N-Sensor 等。主动光源的氮素检测是利用人为光源对植物进行检测,根据尺度不同可分为叶片尺度的氮素检仪器和冠层尺度的氮素检仪器。叶片尺度的氮素测量仪是通过单片叶片的透过率来分析氮素含量。常见的叶片尺度的氮素测量仪有日本 Konica Minolta 的 SPAD-502 等。冠层尺度的氮素测量仪是朝植物冠层发射一定频率的闪烁的光,接收其反射光并在处理时滤去环境光的影响,通过对光反射率的计算来获得植物氮素。常见的冠层尺度的氮素测量仪有美国 Trimble Navigation 公司的 GreenSeeker、日本 Topcon 公司的 CropSpec 等。多波段激光雷达具有两个及以上的出射波段,可以同时获得距离信息和光谱信息。多波段激光雷达一般采用发射合束、接收分束的方法,通过对光束各段的前后差异分析、计算来得到所要的结果。常见的设备有美国 NASA 的 LiDAR 等。

在智能温室的应用中,杨玮等<sup>[61]</sup>对温室黄瓜利用近红外图像与叶片氮素含量进行关联性分析。图片采集用普通 CCD 相机和滤光片,对采集的图片利用小波变换进行消噪处理,后利用基于邓氏关联度的图片分割算法对图片进行分割,再通过计算灰度值得到叶片植被指数。最后,利用最小二乘支持向量机算法对4种植被指数,组合归一化植被指数(CNDVI)、绿色归一化植被指数(GNDVI)、归一化植被指数(NDVI)和归一化差异绿度植被指数(NDGI),与叶片含氮量进行了相关性分析,验证 $R^2$ 达到了0.728,取得了理想的结果。Zhang Xiaolei 等<sup>[62]</sup>利用近红外高光谱成像技术获取了波长范围在380~1 030 nm的140个油菜叶片样本。利用偏最小二乘回归和最小二乘支持向量机将养分含量与光谱数据进行关联,并利用回归系数确定有效波长,降低光谱数据的维度。通过把最优标定模型应用于高光谱图像的每个像素点,可得到油菜叶片中氮、磷、钾含量的分布图,这对活体植物的原位检测具有重要的指导意义。Habibullah M 等<sup>[63]</sup>制作了一款便携式的叶片氮素检测仪,该仪器使用两个多光谱传感器,可见光(VIS)和近红外(NIR),利用高斯过程回归(GPR)算法在温室条件下对油菜、玉米、大豆和小麦4种植物进行测试并取得了良好的效果。Sun Guoxiang 等<sup>[64]</sup>提出了一种基于多视点高光谱的三维建模方法,根据傅里叶变换原理将植物多光谱反射率记录到深度坐标上。最后,利用反向传播人工神经网络(BPANN)、支持向量机回归(SVMR)和高斯过程回归(GPR)方法,分别构建了基于植物多光谱三维点云模型反射率特征的番茄植株氮、磷、钾含量的确定模型,这些都为温室番茄植株中氮、磷、钾含量的测定提供了高效、准确的方法。

表 2 植物体信息传感器  
Table 2 Plant information sensors

植物体信息	测量原理 / 材料	典型类型	代表性产品
植物温度	热电偶	铂电阻	CB-0231、DS18B20
植物水分	位移转换原理	电容法	实验室产品
植物营养元素	光谱特性	特定敏感波长	N-Sensor、CropSpec

### 3 结论

该文将温室传感器分为两类：环境因素传感器和植物体信息传感器。环境因素传感器分为光照传感器、空气温湿度传感器、二氧化碳传感器和土壤相关的传感器；植物体信息传感器分为植物温度传感器、植物水分传感器和植物营养元素传感器。通过这 7 部分的划分，逐个介绍了当前比较流行的各因素传感器的发展状况。硅光电池在光照传感器中用得最多；半导体 PN 结型传感器是空气温度传感器的一个有前景的方向；电阻式和电容式的感湿材料在空气湿度传感器中都有广泛的应用；红外线式二氧化碳传感器是空气二氧化碳测量的主流；光谱学在土壤和植物体信息获取中发挥着越来越重要的角色。此外，我国的温室传感器相对于发达国家还是落后一些。目前，我国的温室传感器研究大部分还是在实验室阶段，而部分发达国家的传感器制品已经推向市场了。但我国温室体量大、需求高，加上国家越来越重视，相信我国的温室传感器会有长足的进步。

针对上述的总结，未来的温室传感器的发展方向可能有以下几点<sup>[65-68]</sup>。

(1) 专用传感器的研究会越来越多，且领域会不断细分。目前大部分应用于农业的传感器都是从工业传感器过渡而来，而且农业传感器大都还在跨领域使用。随着传感器研究的不断深入，温室传感器的研究必然更加专门化。

(2) 温室传感器会朝向体积小、精度高、非接触式的方向不断发展。随着制造工艺和材料科学的不断进步，未来的传感器会越来越易于携带，测量方式也会越来越友好，并且测量结果也会越来越可信。

(3) 传感器的信息融合趋势会愈加明显。单个传感器可能会融合越来越多的修正信息来提高传感器的精度。多个传感器可能会更加注意集群协作，通过群智能的方式来提高测量的精度。

(4) 土壤领域的传感器和植物体信息传感器可能成为未来的研究热点。土壤的信息比较丰富、测量难度较大，未来土壤领域的研究肯定越来越多。植物体信息传感器的测量对象更直接，也可能会引发更多的研究者关注。

### 参考文献

- [1] 周长吉. 温室工程实用创新技术集锦. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 第三次全国农业普查主要数据公报(第二号), 2017.
- [3] 齐飞, 魏晓明, 张跃峰. 中国设施园艺装备技术发展现状与未来研究方向. 农业工程学报, 2017, 33(24): 1-9.
- [4] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究. 智慧农业, 2019, 1(1): 1-7.

2020年6月

- [ 5 ] 葛文杰,赵春江.农业物联网研究与应用现状及发展对策研究.农业机械学报,2014,45(7):222-230,277.
- [ 6 ] 韩晨燕.温室大棚数字光照度计系统的研究.南京:南京林业大学,2013.
- [ 7 ] 刘攀,张虎,赵晓艳,等.温室大棚内光照度远程监控技术研究.现代制造技术与装备,2019,11:77,79.
- [ 8 ] 赵强.草莓大棚光照及温湿度无线监控系统设计.保定:河北大学,2016.
- [ 9 ] 谢宁,张毅,明成国,等.使用对比法研究硅光电池的特性.实验室科学,2019,22(4):50-52.
- [ 10 ] ROHM. BH1750FVI 光强度传感器(中文版). <https://www.rohm.com.cn/>, 2020-04-10.
- [ 11 ] 云中华,白天蕊.基于BH1750FVI的室内光照强度测量仪.单片机与嵌入式系统应用,2012,12(6):27-29.
- [ 12 ] 江晓军.光电传感与检测技术.北京:机械工业出版社,2011.
- [ 13 ] 孟刚.基于ZigBee技术的温室智能测控系统设计.曲阜:曲阜师范大学,2014.
- [ 14 ] 林伟.基于Android平台的远程智能农业大棚控制系统设计.哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.
- [ 15 ] 唐中.高性能低成本CMOS温度传感器研究.杭州:浙江大学,2020.
- [ 16 ] 代建勋.聚合物电解质湿度传感器的制备及呼吸监测应用研究.长春:吉林大学,2020.
- [ 17 ] Sensirion. Datasheet SHT3x-ARP. Switzerland: [www.isweek.com](http://www.isweek.com), 2015.
- [ 18 ] 刘胜男,张英乐.基于SHT11的温湿度控制系统设计.集成电路应用,2020,37(4):154-156.
- [ 19 ] 李长有,王文华.基于DHT11温湿度测控系统设计.机床与液压,2013,41(13):107-108.
- [ 20 ] 广州奥松有限公司. DHT11 数字温湿度传感器的原理和应用范例. <http://www.aosong.com/>, 2020-04-10.
- [ 21 ] 原大明.基于单片机的温室大棚温湿度控制系统设计.农业工程,2018,8(1):32-34.
- [ 22 ] 王嘉宁.基于中红外吸收光谱技术的设施园艺CO<sub>2</sub>测控系统的研制.长春:吉林大学,2017.
- [ 23 ] 周庆珍.基于光温耦合的温室二氧化碳调控系统设计.咸阳:西北农林科技大学,2014.
- [ 24 ] 常敏,刘奔,张学典.红外CO<sub>2</sub>浓度检测中的温度补偿方法研究.仪表技术与传感器,2017(2):93-95,101.
- [ 25 ] HITRAN. HITRAN 数据库. <https://www.hitran.org/>, 2020-04-10.
- [ 26 ] 蒋毅琼.基于无线传感器网络的温室CO<sub>2</sub>浓度调控系统设计与开发.北京:中国农业大学,2014.
- [ 27 ] 苏战战.温室番茄自适应调光系统研究.北京:中国农业大学,2020.
- [ 28 ] 王东,张海辉,冯建合,等.温室大棚CO<sub>2</sub>浓度精准测控系统的设计与实现.农机化研究,2012,34(3):114-118.
- [ 29 ] 刘超,王燕刚,康诗飞,等.基于电化学的固态CO<sub>2</sub>传感器研究进展.传感器与微系统,2012,31(6):1-4.
- [ 30 ] 王大龙,舒英格.土壤含水量测定方法研究进展.山地农业生物学报,2017,36(2):61-65.
- [ 31 ] 中华人民共和国国家标准.GB/T7172-1987 土壤水分测定法.农业标准,2015.
- [ 32 ] 余涵,谢德体,骆云中,等.4种常见土壤含水量传感器精度分析及评价.农业工程,2019,9(6):26-32.
- [ 33 ] 罗红品,李光林.土壤含水率的检测研究进展.农机化研究,2014,36(5):244-247.
- [ 34 ] 万书勤,李晓彬,康跃虎.基于土壤基质势的温室土壤墒情监测技术.农业工程技术,2019,39(13):10-17.
- [ 35 ] 林杉,刘建然,王爱平.中子散射法测量土壤水分时标定方法的概述.南方农机,2017,48(9):41-42.
- [ 36 ] Mendes J, Gallipoli D, Boeck F, et al. A comparative study of high capacity tensiometer designs. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2020, 102901: 1-20.
- [ 37 ] Yin Zhe, Lei Tingwu, Yan Qinghong, et al. A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 99: 101-107.
- [ 38 ] Goswami M P, Montazer B, Sarma U. Design and characterization of a fringing field capacitive soil moisture sensor. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 2019, 68(3): 913-922.
- [ 39 ] 中华人民共和国国家标准.GB 7173-1987 土壤全氮测定法(半微量开氏法).农业标准,2015.
- [ 40 ] 中华人民共和国国家标准.GB/T 9837-1988 土壤全磷测定法.农业标准,2015.
- [ 41 ] 中华人民共和国国家标准.GB 9836-1988 土壤全钾测定法.农业标准,2015.
- [ 42 ] 祁亚琴,张显峰,张立福,等.基于高光谱数据的农田土壤养分含量估测模型研究.新疆农业科学,2018,55(3):490-495.
- [ 43 ] 章涛,于雷.土壤有机质高光谱估算模型研究进展.湖北农业科学,2017,56(17):3205-3208.
- [ 44 ] 李民赞,郑立华,安晓飞,等.土壤成分与特性参数光谱快速检测方法及其传感技术.农业机械学报,2013,44(3):73-87.
- [ 45 ] 安晓飞,李民赞,郑立华,等.便携式土壤全氮测定仪性能研究.农业机械学报,2012,43(S1):283-288.
- [ 46 ] Shi Tiezhu, Cui Lijuan, Wang Junjie, et al. Comparison of multivariate methods for estimating soil total nitrogen with visible/near-infrared spectroscopy. *Plant and Soil*, 2013, 366(1/2): 363-375.
- [ 47 ] 于鹿.高精度红外叶温测量系统研发.保定:河北大学,2016.
- [ 48 ] 王春生.多功能作物生长及环境因子监测系统的设计与研制.合肥:安徽农业大学,2014.
- [ 49 ] Yu Lu, Wang Wenli, Zhang Xin, et al. A review on leaf temperature sensor: measurement methods and application. *A Review on Leaf Temperature Sensor: Measurement Methods and Application. Beijing, China*, 2015: 231-245
- [ 50 ] Minyoung Kim, Seounghee Kim, Youngjin Kim, et al. Infrared Estimation of Canopy Temperature as Crop Water Stress

- Indicator. *Korea Soil Fertilizer Institute*, 2015, 48(5): 1–6.
- [ 51 ] Hackl H, Baresel J P, Mistele B, et al. A Comparison of Plant Temperatures as Measured by Thermal Imaging and Infrared Thermometry. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2012, 198(6): 1–15.
- [ 52 ] Wu Ziming, Zhao Wei, Shi Qinghua, et al. The study on double-season rice leaves temperature change law and its relationship with yield. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(18): 86–92.
- [ 53 ] 张盼盼. 关于我国农业节水灌溉的几点思考. *农技服务*, 2020, 37(3): 112–114.
- [ 54 ] 李恺, 魏晓明, 何芬. 基于植物生理检测参数的温室环境控制研究进展. *北方园艺*, 2020(15): 130–137.
- [ 55 ] 张萌. 阵列式电容传感器探测土壤水分方法研究. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [ 56 ] 张新. 植物生命需水状况实时在线智能检测方法研究. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [ 57 ] Zheng Lihua, Wang Zhuo, Sun Hong, et al. Real-time evaluation of corn leaf water content based on the electrical property of leaf. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 112: 102–109.
- [ 58 ] Seelig H, Stoner R J, Linden J C. Irrigation control of cowpea plants using the measurement of leaf thickness under greenhouse conditions. *Irrigation Science*, 2012, 30(4): 247–257.
- [ 59 ] Jia Jiannan, Ji Haiyan. Plant leaf water detection instrument based on near infrared spectroscopy. 5th International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture (CCTA). *China Agricultural University, Renmin University of China, Beijing*, 2012: 20–27.
- [ 60 ] 孙刚. 基于光谱信息的植被氮素快速探测仪器研究. 北京: 中国农业大学, 2013.
- [ 61 ] 杨玮, 李民赞, 孙红, 等. 温室黄瓜叶片近红外图像消噪算法与含氮量快速检测. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 216–221.
- [ 62 ] Zhang Xiaolei, Liu Fei, He Yong, et al. Detecting macronutrients content and distribution in oilseed rape leaves based on hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*, 2013, 115: 56–65.
- [ 63 ] Habibullah M, Mohebian M R, Soolanayakanahally R, et al. A Cost-Effective and Portable Optical Sensor System to Estimate Leaf Nitrogen and Water Contents in Crops. *Sensors*, 2020, 20(5): 1–16.
- [ 64 ] Sun Guoxiang, Ding Yongqian, Wang Xiaochan, et al. Nondestructive Determination of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Contents in Greenhouse Tomato Plants Based on Multispectral Three-Dimensional Imaging. *Sensors*, 2019, 19(23): 1–20.
- [ 65 ] 李灵. 温室大棚多传感农业物联网系统设计与研究. 重庆: 西南大学, 2020.
- [ 66 ] 马怡蕾. 农业物联网系统的软件设计与开发. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [ 67 ] 黄海松, 秦志远, 张慧. 基于农业物联网的农作物生长监测数据融合研究. *江苏农业科学*, 2017, 45(21): 241–243.
- [ 68 ] 龚尚福, 潘虹. 智能温室大棚监控系统的设计与研究. *现代电子技术*, 2017, 40(19): 119–122.

## Research progress and application prospects of greenhouse sensor technology

Cheng Tao, Jing Pei, Shen Chao, Zhang Man, Li Minzan\*

(Key Laboratory on Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [ **Purpose** ] Smart greenhouse is the future development trend of facility agriculture, and sensing technology and Internet of Things technology are the foundation of smart greenhouse. It is significant to analyze the research progress and application prospect of greenhouse sensor technology. [ **Method** ] Greenhouse sensors can be divided into environmental factor sensors and plant body information sensors according to their application fields. The two types of sensors are analyzed from the aspects of accuracy, characteristics, application scope and development trend. [ **Result** ] Environmental factor sensors include light sensors, air temperature and humidity sensors, CO<sub>2</sub> sensors, and soil-related sensors. Plant body information sensors include plant



2020年6月

temperature sensors, plant moisture sensors, and plant nutrient element sensors. The light sensor is most widely used with silicon photovoltaic cells. Among the air temperature sensors, one of the most promising applications is the semiconductor PN junction temperature sensor. Both resistive and capacitive materials are used in the humidity sensitive materials of the air humidity sensor. CO<sub>2</sub> sensors are mainly infrared sensors. In soil and plant information sensors, spectroscopy plays an increasingly important role. [ **Conclusion** ] In the future, the field of special sensors for greenhouses will be further subdivided, and soil and plant information sensors will continue to become a research hotspot. Greenhouse sensors will generally continue to develop in the direction of smaller size, higher accuracy, non-contact, and real-time detection, and the trend of sensor information fusion will become more obvious. Sensors and IoT technologies will play an increasingly important role in the development of smart greenhouses.

**Key words:** greenhouse; internet of things; sensors; environmental factors; plant information

## 欢迎订阅《中国农业信息》

《中国农业信息》(双月刊)由农业农村部主管,中国农学会农业信息分会、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所共同主办,是我国目前全方位传播和刊载国内外农业遥感/农业信息科学领域的信息获取、处理、分析和应用服务的理论、技术、系统集成、标准规范等方面最新进展和成果,促进学术交流以及农业信息学科关键技术与产品的创新研发、集成推广和应用示范的综合性科学技术期刊。

主要刊登农业遥感、农业传感器、农业信息智能处理、精准农业/智慧农业、农业监测预警与信息服务系统、农业物联网、智能装备与控制、虚拟农业、人工智能、信息技术标准等方向学科热点领域的最新、最重要的理论研究和应用成果。主要栏目有:农业遥感、智慧农业、综合研究、农业信息技术、农业物联网、专题报道等。目前被中国知网(CNKI)、万方数据、中文科技期刊数据库、中国核心期刊(遴选)数据库等多家数据库收录。

《中国农业信息》为国内外公开发行的刊物,开本为16开,彩色四封,读者范围广,影响面大,全国各地邮局均有订阅。每双月25号出版,定价为25.00元/册,150元/年。

### 邮局汇款

收 款 人:《中国农业信息》编辑部

地 址:北京市海淀区中关村南大街12号中国农科院资源所区划楼319

邮 编:100081

### 银行汇款

开 户 行:农行北京北下关支行

行 号:103100005063

账 号:11050601040011896

单位名称:中国农业科学院农业资源与农业区划研究所

电 话:(010)82109632

传 真:(010)82109632

E m a i l : nyxbjb@caas.cn

邮发代号:2-733

投稿网址:www.cjarrp.com