

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2020. 06. 002

植物生理信息监测技术的研究进展*

圣倩倩¹, 何文妍², 刘宇阳¹, 叶舜尧¹, 周思聪¹, 李佳蔚²

(1. 南京林业大学 风景园林学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 信息科学技术学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 植物监测技术对植物栽培及植物研究有着指导性作用, 为生产种植智能化、经营信息化及管理数据化提供了技术基础。了解植物监测技术的研究进展, 对植物监测在环境质量的评估、调控和环境管理等方面的研究具有重要意义。本文综合分析植物生理信息监测技术现状及进展情况, 并进行差异性对比, 总结出目前植物生理信息检测技术的优缺点; 梳理植物外部特征监测技术的研究历史, 分析了接触式监测和非接触式监测的不足之处和发展方向; 并对未来植物生理信息监测技术的相关研究提出对植物进行无损监测、提高传感器的精度和灵敏度、开发新型传感器、传感器的无线化和智能化、构建集成多功能监测系统未来植物生理信息检测技术的建议和展望。

关键词: 植物生理; 信息监测技术; 研究现状; 进展

中图分类号: Q 947 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2020) 06-0008-08

Current Status and Progress of Plant Physiological Information Monitoring Technology

SHENG Qian-qian¹, HE Wen-yan², LIU Yu-yang¹, YE Shun-yao¹, ZHOU Si-cong¹, LI Jia-wei²

(1. Nanjing Forestry University, College of Landscape Architecture, Nanjing Jiangsu 210037, P. R. China;

2. Nanjing Forestry University, College of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210037, P. R. China)

Abstract: Plant monitoring technology plays a guiding role in plant cultivation and plant research, and provides a technical basis for production and planting intelligence, management informatization and management data. It is important to understand the research progress of plant monitoring technology for the research of plant monitoring in environmental quality assessment, regulation and environmental management. In this paper, the current situation and development of plant physiological information monitoring technology were analyzed, and the differences were compared. In addition, the research history of plant external characteristic monitoring technology was reviewed, and the deficiency and development direction of contact monitoring and non-contact monitoring were analyzed. Finally, some suggestions and prospects for the future research of plant physiological information monitoring technology, namely plant non-destructive monitoring, improving the precision and sensitivity of sensors, developing new sensors, making sensors wireless and intelligently, and building integrated multi-function monitoring system are the development direction of plant physiological information detection technology in the future.

Key words: plant physiology; information monitoring technology; current status

* 收稿日期: 2020-04-21

基金项目: 2020年江苏省高校哲学社会科学基金项目(2020SJA0129), 江苏省高校优秀科技创新团队“大数据与园林植物应用技术”, 南京林业大学2019年度教学质量提升工程重点项目“园林植物应用翻转课堂教学模式研究”, 南京林业大学2019年高等教育研究课题“生态文明思想下园林专业创新人才培养课堂改革模式研究”。

第一作者简介: 圣倩倩(1989—), 女, 博士, 讲师, 主要从事园林植物栽培与生态功能研究。E-mail: qqs@njfu.edu.cn

植物监测作为环境监测的重要内容之一，具有综合反映环境污染对生物影响和危害的优势，运用各种传感器技术对植物的外部特征和内部特征进行监测，能够准确获取植物的生理状态信息，进而了解环境质量状况，为环境质量的评估、调控和环境管理提供重要科学依据。植物的内部特征和外部特征都在一定程度上反映了植物生理状态的改变，学者们对植物的外部特征和内部特征进行研究，提出了不同的植物生理信息监测方法。本文收集国内外相关文献，汇总并对比分析目前植物生理信息监测技术现状及进展，对各种监测技术的优缺点进行梳理，提出现有研究的不足之处，总结出无损化、智能化、高精度监测是植物生理信息监测技术的未来发展方向。有利于提高植物生理信息监测技术在植物栽培和研究、农业生产种植、环境监测等方面的指导性作用。

1 监测技术发展历史

现代农业的发展方向是信息化、智能化、自动化^[1]，获取植物当前的生理状态信息是农业现代化的前提条件。目前，国内外对植物生理信息监测的研究较为广泛，随着科技的进步，植物生理信息检测技术不断发展和完善。在图1中，作者总结了近20年来植物外部特征监测技术的发展历史。其中，光谱分析、植物电信号分析技术、机器视觉和图像处理技术等应用较多^[2]。近年来，园林植物的智能化管理、农业水肥一体化、节能灌溉等促进了农林业的快速发展，同时也带动了对植物生理信息技术以及监测系统的研究和完善。提高植物生理信息传感器的准确性、灵敏度以及开发新型传感器是信息采集传感器的研究重点。

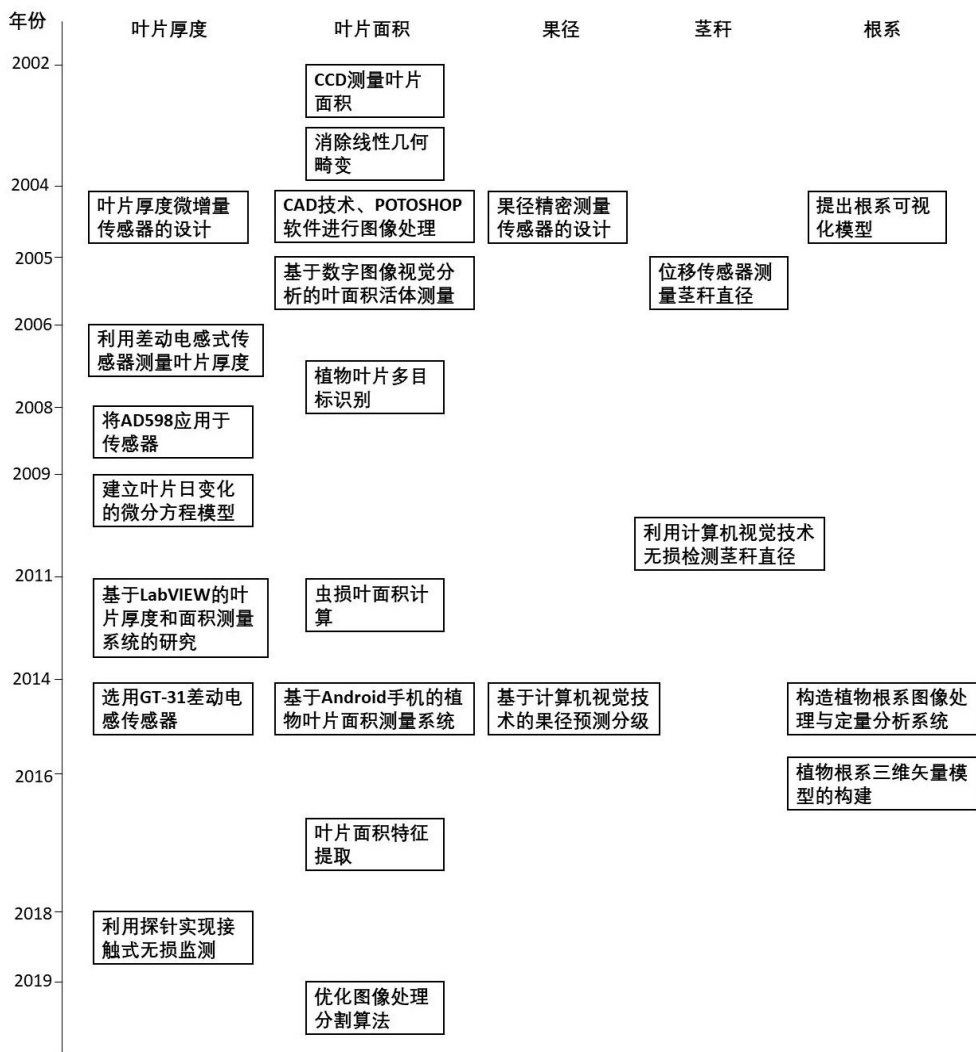


图1 植物外部特征监测技术发展历史

Fig. 1 Development history of plant external feature monitoring technology

2 监测技术

随着互联网技术的广泛应用,远程化、无损化监测成为近年来植物监测的研究热点。总体而言,在监测植物叶片厚度、叶片面积、果实、茎秆、根系、茎流及激素的技术得到广泛关注和研究。

2.1 植物叶片监测技术

叶片作为植物制造营养物质的器官,是其生长和结果的基础,利用植物叶片进行植物分类和识别是最有效、最经济的方法。对于植物叶片,目前主要通过监测其厚度、面积等来获取植物叶片相关的生理信息^[3-5]。

2.1.1 植物叶片厚度监测技术

系列研究表明叶片厚度的微变化能够直接反映植物叶片的含水量,因此对植物叶片厚度进行动态监测,以叶片厚度为控制因素构建植物自动化灌溉系统,同时实现节能灌溉和自动化灌溉。

随着监测技术的发展,现有的植物叶片厚度监测方法分为接触式测量和非接触式测量,在表1中,对两种测量方法进行差异性对比。目前,非接触式测量方法主要通过光谱反射^[6]、遥感^[7]等技术对植物叶片厚度进行监测,实现快速、活体测量,测量范围广,但该方法易受外界环境和叶片内部组织结构等因素的影响,不具备稳定性和普适性。随着传感器技术的不断发展,叶片厚度传感器测量成为主要的接触式测量方法,其原理是将叶片厚度的变化转化为电压的变化来测量^[8],主要有电阻应变位移传感器和电感位移传感器,后者的准确性和精确度较高。由于叶片是柔性材料,其检测结果会极大地受到检测时叶片受到的接触力的影响^[9-10],近几年的研究主要集中在优化预紧力方面,旨在提高传感器的测量精度。李东升等^[11]应用电阻应变式微位移传感器,研制出适用于柔性材料的植物叶片厚度监测传感器,精度达微米级。李东升等^[12]研制的差动电感植物叶片厚度传感器,其精度和抗干扰能力有了很大的提高,但成本较高。刘九庆等^[13]基于应用电感式位移传感器设计出一种接触式无损植物叶片监测仪,该测量仪选用‘探针’作为测量方式,适用于测量柔性材质的微小变化,解决了对柔性材料测量时易变形而导致测量精度低的问题。

刘九庆等^[14]利用虚拟仪器软件开发工具 LabVIEW 设计出植物叶片厚度微增量检测仪的监测系

统,实现了远程化监测。Dieter Seelig 等^[15]使用高精密度仪器对豇豆 (*Cowpea* sp.) 叶片厚度进行测量,将叶片厚度变化作为控制因素构建自动灌溉系统,实现了温室环境中的自动化灌溉。与传统的定时灌溉方案相比,由叶片厚度控制的自动化灌溉技术可以节约 25% ~ 45% 的灌溉用水。

表1 两种测量方法的异同

Tab. 1 Similarities and differences between the two measurement methods

测量方法	接触式测量 ^[8-10]	非接触式测量 ^[19-20]
核心器件	位移传感器	图像采集传感器
测量对象	长度、厚度、直径	长度、厚度、直径、面积等
测量原理	将位移量转化为电压量测量	基于图像处理的数据分析
测量精度	高	较高
对植物的损害	有	无
自动化程度	较高	高
发展趋势	接触力优化	精度提高

2.1.2 植物叶片面积监测技术

传统的植物叶片测量方法包括方格纸法、图形分解法、称重法、回归方程法与抛物线法等^[16]。上述方法在不同程度上存在耗时长、人工投入大、操作繁琐、计算复杂等问题,不利于广泛运用,而且传统方法测量的结果精度和准确性较低,不能准确获取植物的生理信息^[17-18]。随着电子设备的发展和计算机处理技术的提高,基于数字图像的处理方法受到国内外研究学者的广泛关注,在植物生理信息监测科研领域得到广泛的应用^[19-20],其测量叶片面积的流程如图2所示。数字图像处理技术利用数码相机的电子设备采集植物叶片的真实图像,根据图像的像素点个数和每个像素点的实际面积,就可以计算出植物叶片的面积。该方法信息采集和信息处理速度快,避免传统测量方法的耗时长、操作繁琐等问题,同时实现对叶片面积的无损检测。张全法等^[21]提出利用标准物体的线性几何畸变补偿被测物体的线性几何畸变的方法,其操作简单,获得了较高的测量精度,使得数码相机针对植物叶片面积测量的图像采集技术更加实用化。

20世纪70年代,基于光电扫描原理,国外已研制出精度很高的叶面积仪^[22-23],但由于价格昂贵,维修困难,在国内的推广存在很多问题。冯冬霞等^[24],利用微控制器作为控制单元,结合LED

光源和传感器设计研制出一种便携式叶面积仪。该仪器整体采用固定器件，有效地减少系统误差，系统重复性好，成本低，精度高，并且能够实时显示和存储测量结果，使测量方便快捷，但也存在测量结果容易受到个体分布位置的影响和功耗高等问题。有关学者陆续利用图像采集设备获取植物叶片图像，再结合 CAD, MATLAB 等软件进行图像处理。图像采集会受到光照不均匀，叶片弯曲，拍摄角度等因素的影响，导致测量结果在一定程度上仍然存在误差。为提高基于图像处理技术测量叶片面积方法的精度和准确性，学者们在参考物选取、边缘精确性提取及透视畸变等方面的研究更加深入^[25-29]。

马彦平等^[30]以数字图像处理技术为基础，利用中值滤波、膨胀、腐蚀等方法去除图像噪声，一定程度上减小图像采集时所带来的误差。孟祥丽等^[31]利用摄影测量技术改进基于数字图形处理的植物叶面积测量方法，提高了测量的精度和自动化水平且可应用于不规则图形的测量。

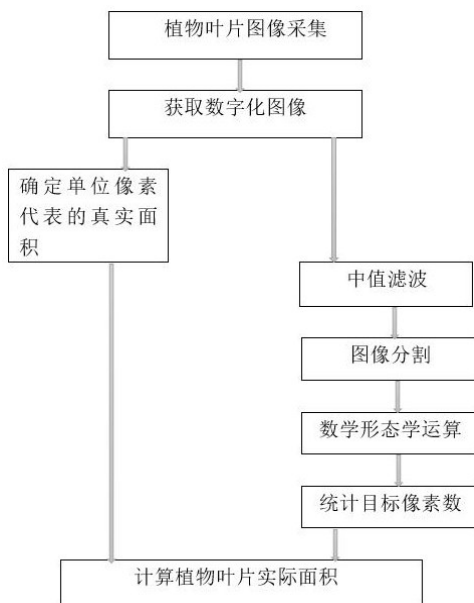


图2 基于图像处理技术的叶片面积测量流程

Fig. 2 Flow chart of measuring blade area based on image processing technology

2.2 植物果实监测技术

对于果实的生理信息监测主要集中于对果实直径的测量，早期是通过人工方式进行测量，耗费人力，且操作繁琐。李东升等^[11]提出了果实尺寸变化测量原理，并研制出了果实测量仪。该测量仪是

将果实尺寸的变化转化为差动电阻值的变化，使输出电压发生变化，然后利用 MATLAB 生成果实直径变化与电压变化的近似线性关系。这一种基于植物电信号分析技术的测量方法相对于人工方式，效率大大提高，测量方便快捷。由于果实测量仪具有非线性，导致其设计原理误差较大，需要借助计算机进行列表分析来解决该问题。

黄永林等^[32]利用计算机视觉技术，研制出一种水果自动分级的控制装置，能够实现实时监测，同步跟踪，并利用硬件操作对分级出口进行控制，实现准确和及时地启闭控制此分级机构。李俊伟等^[33]采用机器视觉技术，使用中值滤波法去除图像中的噪声点，基于数学形态学方法对采集的图像进行优化处理，得到最优二值图像，建立偏最小二乘回归模型预测果径，且其预测精度高。该研究采用的分析方法简单方便，测量效果好，但是对图像采集和图像处理要求很高。因此对未来技术的发展提出完善目标分割算法、预测和分级模型等要求，有利于果实检测技术的推广和研发^[34-35]。

2.3 植物茎秆监测技术

对于茎秆的生理信息监测主要测量茎秆的直径或株高。植物茎秆直径测量原理与果径测量相似，同样采用植物电信号分析技术，将茎秆直径的变化用电信号的变化来表征，通常采用位移传感器，主要包括电阻式位移传感器和电容式位移传感器。传统的电容式传感器采用的方法中，主要有直接改变电容两电极之间的相对距离和相对面积两种方式，可达到微米级的测量，但不能同时保证足够的灵敏度和分辨率。乔晓军等^[36]采用电场屏蔽释放原理的电容位移传感方法克服了上述方法的缺点，设计出一种高精度的测量植物茎秆生长的传感器，检测分辨率理论上可达到 $0.5 \mu\text{m}$ 。

计算机视觉技术也应用于植物株高的测量。李长缨等^[37]利用计算机视觉技术对温室植物生长进行无损监测，获得植物的叶冠投影面积和平均株高。这种无损检测作为一种新技术，能够节省人力，测量的植物信息参数客观，快速高效，准确性高。王震^[38]采用高精度 CCD 图像传感器对植物生长速率的数据进行采集，并且采用精密机械传动装置完成 CCD 传感器的机械转动，其功耗小、成本低、效率高，能够做到非接触图像采集。基于该监测方法设计的系统能够获取植物一段时间的茎秆高度变化，而不影响植物生长的连续性，测量准确性高、监测范围大。张云鹤等^[39]基于机器视觉技术

研发的茎秆直径测量仪,可无损测量植物茎秆的细微变化,且操作简单、测量准确性高。该仪器的研制为进一步研究植物茎秆变化与水分胁迫的关系提供数据基础,对农业节水灌溉技术的发展具有重要意义。

2.4 植物根系监测技术

在早期的研究中,对根系的检测方法有挖掘法、整段标本法、土钻法、玻璃壁法、地下根室,以及原子示踪技术等^[40]。这些传统的研究方法为人类了解认识根系提供有效的手段,其中很多方法至今仍广泛运用。但这些的研究方法如挖掘法、土钻法等需要对根系进行采摘取样,会对根系造成一定程度上的损害,不能保证待检测根系的完整性,影响实验的准确性。同时会影响植物生长的连续性,无法做到连续监测,大大影响了根系检测信息的准确性。而如原子示踪技术这样的非破坏性的研究方法,也不能获取准确、完整的原位检测数据。

2004年,胡秀娟^[40]利用计算机视觉技术对根系进行形态分析,同时结合机电技术,提出了一种能够快速、准确获取植物根系图像的方法。由于光电成像的局限性,提取出的植物根系图像噪声较大、受光照强度变化影响大,检测精度不高。对此,宋文龙等^[41]运用 Gabor 小波理论检测植物根系图像边缘,能够获取连续性好、定位准确的图像边缘。并且可调整 Gabor 小波参数变化,寻求图像边缘的最优检测。吴鹏等^[42]基于带高斯径向基核函数,提出的边缘检测算法相对于 Sobel 算法、Prewitt 算法等能够准确地定位图像边缘,提高检测的精度。

由于根系形态复杂,以及生长环境特殊,图像采集难度大,其研究较为滞后。近几年,不断有学者针对边缘检测提出更好的算法,如 Roberts、Prewitt 和 canny 算法边缘检测算法等^[43],这些算法计算量小,实现方便,但在不同程度上丢失真边缘。冷欣等^[44]进一步提出一种改进的灰色关联度的边缘检测算法,能够较准确地检验出有用的根系边缘信息,且具有较好的抗噪能力。

2.5 植物茎流监测技术

植物茎流通常采用热量法^[45-47]进行测量,包括热脉冲法、热平衡法、热扩散法。1958年,Marshall^[48]分析热传导作用与液流流动形成的热对流作用,认为在低速液流的植物中,所测得热脉冲的速度是热传导速度和茎流速度的加权平均速度,提出热脉冲的理论计算方法。该方法是在茎秆中

插入加热源和测温元件,会对茎秆造成一定程度的破坏,形成的愈伤组织阻碍液流的正常通过,使得测量值偏低。为了测量的准确性,学者们基于热脉冲技术提出的茎流检测方法有补偿法^[49-50]、最大温度法^[51]、热比率法^[52],虽然这些检测技术得到广泛应用,但仍然存在很多难题,植物的正常生理活动会被破坏,无法保证加热器与传感器的精确安装,并且热脉冲的产生和检测只是短时间的现象,无法做到实时监测。热平衡法^[53]利用热量平衡原理,对植物局部用加热器进行加热,通过电路记录一段距离的能量差来计算液流,根据加热器安装在茎秆表面还是茎秆内部,分为茎秆平衡法和树干平衡两种方法^[54],前者是将加热器放在植物体内,后者是依靠环形包裹式加热器。因为有严格的热力学方程的理论推导,故该方法的测量结果较准确,容易理解,并且适合于直径较大的植物,但是该方法的设备较多,导致安装较为复杂和严格。热扩散法^[55]在测定时将两根温度探针沿垂直于茎流的方向插入到植物的茎中,通过两探针的温差实现对叶流量的测量。

也有学者^[56]提出了热场变形法,该方法通过检测插入边材的线形加热器的温度场的形状变化,计算出对应的茎流量。William^[57]提出一种无插入式的茎流量测量方法,该方法采用激光加热,不会对植物茎秆造成伤害,不影响植物生长的连续性,可进行无损检测、连续监测。吕丹桔等^[58]基于混合差分 AIC 算法提出了植物茎体超声回波位置检测方法,可有效地获取植物茎体的超声一次回波位置,实现了茎体水分变化的动态监测,并且提高了自动化水平。

2.6 植物激素监测技术

植物激素包括生长素、赤霉素、细胞分裂素、脱落酸、乙烯等^[59],植物检测技术主要包含生物鉴定法、色谱检测法、免疫检测法。植物激素在植物体内的含量极低,检测过程中容易受色素、多酚等次生代谢物的干扰。因此,学者们深入研究植物激素检测,旨在提高检测植物激素含量方法的准确性和高效性。

生物鉴定法^[60]是最早采用的植物激素测定方法,是利用植物激素的生理活性,通过植物的组织和器官对植物激素产生的特异性反应进行测定。这种方法对样品纯度要求高,专一性差、重复性差,工作量大,但生物鉴定法能够很好地检测激素的活性,常被作为植物激素活性检测的手段。Wout

Boerjan 等^[61]将重组 DNA 技术应用于植物激素监测,实现对生长素和细胞分裂素的定量检测,这对植物激素检测技术的发展贡献很大。该方法对实验条件要求较高,一般难以实现,不利于广泛应用。

免疫检测技术是植物激素检测的常用方法^[62-63],主要包括放射免疫分析(RIA)和酶联免疫法(ELISA)。它的方法是基于抗原和抗体的特异性结合,测量的灵敏度高,使其前处理简化,改善测量的专一性,但对实验室标准要求较高。随着各项分析技术的发展,有学者提出植物激素免疫传感器测定方法^[64],其基本原理是利用抗原或抗体识别待测物,将化学信号转换成电信号,通过对电信号的变化进行分析,实现对植物激素直接或间接地定量检测。

由于色谱法技术的飞速发展,使其在植物激素检测领域得到越来越广泛的应用,研究出色谱检测技术,其原理是利用物质在色谱固定相上保留性质的差异进行分离,包括纸层析、薄层层析(TLC)、气相色谱(GC)、高效液相色谱(HPLC)以及气质联用(GC-MS)等^[65]。纸上层析和TLC应用较早,操作简便,但分离效率和灵敏度有限制。GC和HPLC具有很高的灵敏度和选择性,但植物激素需通过特定的衍生化处理才能进行分析,很难同时测定多种植物激素。李华等^[66]以枇杷(*Loquat* sp.)花和幼果为研究材料,基于高效液相色谱法提出可同时分离和测定10种激素的测量方法,实现对番茄(*Color* sp.)和甘蓝(*Cabbage* sp.)叶片中10种内源激素的同时测定。随着技术的发展,对理化检测的仪器进行联用是当前的研究热点^[67-69],其中气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术进行检测的可靠性高,并且可以鉴定未知物质的结构,因此,其应用十分广泛。

3 研究与展望

植物生长对其生长环境的要求很高,对植物的生长状态进行信息监测能够体现当前环境是否适合植物的生长。这对植物栽培及植物研究有着指导性作用,为生产种植智能化、经营信息化及管理数据化提供技术支撑。植物监测作为环境监测的重要内容之一,具有综合反映环境污染对生物影响和危害的优势,运用各种技术对植物的外部特征和内部特征行监测,能够准确获取植物的生理状态信息,进而了解环境质量状况,为环境质量的评估、调控和

环境管理提供重要科学依据。为尽可能实现对植物多方面信息的监测,并及时做出调控,构建多功能的植物生理信息监测系统是植物监测的发展趋势。这将推动植物智能化管理、水肥一体化的进一步发展。

今后植物监测技术研究应从以下4个方面展开:(1)在大数据的时代背景下,借助互联网的飞速发展产生的互联网与传统行业高效结合是当今的创新形态。急需将生理传感器与移动互联网、云计算、物联网等相结合,实现植物生理监测的远程化、无线化、自动化和智能化。(2)现有的植物生理传感器大多数是对植物外部特征进行监测,缺乏有效监测植物内部特征的传感器,其各方面的性能也会影响采集的数据的准确性、实时性。因此需要开发新型的植物传感器,提高传感器的精度和灵敏度,以更加全面、准确地监测植物的生长状况。(3)植物生理信息监测技术正由传感器技术向图像处理分析技术过渡(表1),因此对未来图像处理技术提出完善目标分割算法、预测和分级模型等要求,以提高监测的精度和准确性。(4)目前研发的大多数植物监测系统监测对象单一。王春泉等^[70]基于Labview构建了一种实时监测植物生理与生长环境的系统,该系统集成空气湿度、温度、光照、茎流量、果实生长率等多种生理传感器,同时通过Labview记录温室环境和植物生理数据。采用此系统能够更全面地采集植物的生理信息,实现科学管理温室,提高温室效率。多功能植物监测系统应用较为广泛,未来应主要研发多功能植物监测集成系统。

参考文献:

- [1]李雄,李鹏,潘虎.信息化推动农业现代化发展的模式及策略研究[J].安徽农业科学,2019,47(24):226-229.
- [2]王越.基于多传感器作物信息检测系统的设计与实现[D].天津:河北工业大学,2014.
- [3]车嘉兴.植物生理信息计算机视觉检测系统研究[D].北京:中国科学技术大学,2010.
- [4]Ighathinathane C,Prakash V S S,Padma U, et al. Interactive computer software development for leaf area measurement[J]. Computers and Electronics in Agriculture. 2006,51:1-16.
- [5]Bylesjö M, Segura V, Soolanayakanahally R Y, et al. LAMINA: a tool for rapid quantification of leaf size and shape parameters[J]. BMC Plant Biology, 2008, 8(1): 82.
- [6]隋学艳,李少昆,张晓冬,等.棉花叶片厚度的高光

谱测试方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 262-266.

[7] 张加龙, 胥辉. 基于遥感的森林生物量估测样地调查方法的研究动态[J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2019, 39(4): 166-173.

[8] 邱兆美, 张昆, 毛鹏军. 我国植物生理传感器的研究现状[J]. 农机化研究, 2013, 35(8): 236-240.

[9] 李东升, 姚静远, 刘楠. 植物叶面物理信息检测技术研究进展[J]. 中国计量学院学报, 2014, 25(3): 238-244, 290.

[10] Ruiz-Altisent M, Ruiz-Garcia L, Moreda G P, et al. Sensors for product characterization and quality of specialty crops - A review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2): 176-194.

[11] 李东升, 高晓红, 张文卓, 等. 植物叶片厚度和果径精密测量传感器的设计[J]. 传感器技术, 2004, 23(12): 43-46.

[12] 李东升, 陆艺, 高晓红, 等. 植物叶片厚度精密测量仪的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(4): 403-405, 419.

[13] 刘九庆, 朱福安. 应用电感式位移传感器设计的叶片厚度监测仪[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(2): 84-87.

[14] 刘九庆, 朱福安, 王楠, 等. 基于 LabVIEW 的叶片厚度远程监控系统[J]. 农机化研究, 2015, 37(10): 211-214.

[15] Hans-Dieter S, Richard J S, James C L. Irrigation control of cowpea plants using the measurement of leaf thickness under greenhouse conditions [J]. Irrigation Science, 2012, 30(4): 247-257.

[16] 热娜古丽·热西提, 刘生智, 刘同金, 等. 植物叶面积测量方法综述[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(5): 22-23.

[17] 张鑫, 孟繁疆. 植物叶面积测定方法的比较研究[J]. 农业网络信息, 2008(12): 14-15, 31.

[18] 谭一波, 赵仲辉. 叶面积指数的主要测定方法[J]. 林业调查规划, 2008, 33(3): 45-48.

[19] 宫志宏, 薛庆禹, 于红, 等. 基于数字照片解析的黄瓜叶片面积测定及效果分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(23): 230-234.

[20] Benoît V, Thierry S, Romain B, et al. PYM: a new, affordable, image-based method using a Raspberry Pi to phenotype plant leaf area in a wide diversity of environments [J]. Plant Methods, 2017, 13(1): 12-15.

[21] 张全法, 何金田, 陈渝仁. 提高植物叶片面积测量精度的方法[J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(1): 91-95.

[22] 冯冬霞, 施生锦. 叶面积测定方法的研究效果初报[J]. 中国农学通报, 2005, 21(6): 150-152.

[23] Gong A, Wu X, Qiu Z, et al. A hand held device for leaf area measurement [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 74-80.

[24] 冯冬霞. 便携式叶面积仪的研制[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.

[25] 程荣花, 马飞, 马丽. 豆科植物叶枯焦面积自动化测量方法[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(12): 108-110.

[26] Lakshmi S, Sankaranarayanan Dr V. A study of edge detection techniques for segmentation computing approaches [J]. International Journal of Computer Applications, 2010, CASCT (1): 35-41.

[27] Zheng L Y, Zhang J T, Wang Q Y. Mean-shift-based color segmentation of images containing green vegetation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(1): 93-98.

[28] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012: 1097-1105.

[29] Long J, Shelhamer E, Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [C]. Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2015: 3431-3440.

[30] 马彦平, 自由路, 高祥照, 等. 基于数字图像的玉米叶面积测量方法研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(22): 329-334.

[31] 孟祥丽, 刘一鸣, 刘瑶, 等. 基于摄影测量技术的植物叶面积精确测量方法研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(2): 222-226.

[32] 黄永林, 应义斌. 用于水果实时分级系统的同步跟踪自动控制装置[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 163-166.

[33] 李俊伟, 郭俊先, 胡光辉, 等. 基于机器视觉技术的单粒葡萄质量与果径预测分级研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(10): 1862-1868.

[34] Kurtulmus F, Lee W S, Vardar A. Green citrus detection using 'eigenfruit', color and circular Gabor texture features under natural outdoor conditions [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 78(02): 140-149.

[35] Ji W, Zhao D A, Cheng F Y, et al. Automatic recognition vision system guided for apple harvesting robot [J]. Computers and Electrical Engineering, 2012, 38(5): 1186-1195.

[36] 乔晓军, 王成, 张云鹤, 等. 一种测量植物茎秆生长的方法及原理[R]. 北京: 国家农业信息化研究中心, 2005: 1-2.

[37] 李长纓. 利用计算机视觉技术实现对温室植物生长的无损监测[C]. 中国农业工程学会设施园艺工程专业委员会, 北京鑫天碧农业设施工程技术有限公司. 中国设施农业可持续发展论坛论文资料汇编. 北京: 中国农业工程学会, 2010: 129-132.

[38] 王震. 基于图像识别和 GPRS 网络技术的植物生长速率检测系统的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.

[39] 张云鹤, 乔晓军, 王成, 等. 基于机器视觉的作物茎秆直径变化测量仪研发[J]. 农机化研究, 2011, 33(12): 158-160, 164.

[40] 胡秀娟. 植物根系形态参数计算机视觉检测系统的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.

- [41] 宋文龙, 王立辉, 曹阳. Gabor 小波理论的植物根系图像边缘检测研究[J]. 自动化仪表, 2011, 32(3): 24-25.
- [42] 吴鹏, 宋文龙. 支持向量机理论在植物根系图像边缘检测中的应用[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(8): 153-156.
- [43] 管宏蕊, 丁辉. 图像边缘检测经典算法研究综述[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2009, 30(S1): 66-69.
- [44] 冷欣, 宋文龙. 基于改进的灰色关联度的根系图像边缘检测[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 46-49.
- [45] Nicolas E, Torrecillas A, Ortuno M F, et al. Evaluation of transpiration in adult apricot from sap flow measurement[J]. *Agricultural Water Management*, 2005(72): 131-145.
- [46] 刘鑫. 热扩散式茎流计在测定植物蒸腾耗水中的应用[J]. 山西林业科技, 2009, 38(4): 31-33.
- [47] 李瑞娟, 刘文兆, 王培榛. 春小麦蒸腾测定中茎流计的标定及其应用[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 79-82.
- [48] Marshall D. C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport[J]. *Plant physiology*. 1958, 33: 385-396.
- [49] Cohen Y, Fuchs M, Green G C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees[J]. *Plant Cell and Environment*. 1981, 4: 391-397.
- [50] Alarcon J J, Ortuno M F, Nicolas E, et al. Compensation heat-pulse measurements of sap flow for estimating transpiration in young lemon trees[J]. *Biologia Plantarum*. 2005, 49(4): 527-532.
- [51] Steve G, Brent C, Bryan J. Theory and practical application of heat pulse to measure sap flow[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(6): 1371-1379.
- [52] Burgess S S, Adams M A, Turner N C, et al. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants[J]. *Tree physiology*, 2001, 21(9): 589-598.
- [53] 刘安, 刘旭, 黄岚, 等. 基于热平衡法检测植物茎流传感器的标定[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 6-10.
- [54] 田清远. 基于热平衡方式的植物茎流检测系统研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [55] 白云岗, 宋郁东, 周宏飞, 等. 热脉冲法对胡杨树树干液流的监测与蒸腾过程模拟[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 188-192.
- [56] Cermak J, Kucera J, Nadezhdina N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands[J]. *Trees-Structure and Function*, 2004, 18(5): 529-546.
- [57] William L B, Thomas H W, Clifford R P, et al. A laser-diode-based system for measuring sap flow by the heat-pulse method[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 110(4): 275-284.
- [58] 吕丹桔, 施心陵, 董易, 等. 基于混合差分 AIC 算法的植物茎体超声回波位置检测[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 153-159.
- [59] 房凯. 植物激素生理作用与检测技术的研究现状及进展[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(8): 35-36.
- [60] 李素梅, 张自立, 姚彦如. 植物激素检测技术的研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2003(2): 227-230.
- [61] Wout B, Chris G, Marc V M, et al. A new bioassay for auxins and cytokinins[J]. *Plant Physiology*, 1992, 99(3): 1090-1098.
- [62] 李巍, 莫瑾, 萧浪涛. 生物传感器在植物激素测定中的研究进展[J]. 生物技术通报, 2010(8): 24-28, 34.
- [63] 徐力红, 林虹君, 李高伟, 等. 自由基聚合反应修饰的金纳米粒子用于高灵敏度免疫传感器研究[J]. 生物技术通讯, 2019, 30(3): 414-417, 424.
- [64] Li J, Wu Z Y, Xiao L T, et al. A novel piezoelectric biosensor for the detection of phytohormone B-Indole acetic acid[J]. *Analytical Sciences*, 2002, 18(4): 403-407.
- [65] 段娜, 贾玉奎, 徐军, 等. 植物内源激素研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(2): 159-165.
- [66] 李华, 郭启高, 梁国鲁, 等. 利用高效液相色谱法同时测定枇杷果实中 10 种植物激素[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(3): 18-25.
- [67] 方志青, 李婷婷, 王娅, 等. 气相色谱-串联质谱法测定豆芽中 3 种生长调节剂[J]. 广州化工, 2020, 48(4): 86-88.
- [68] Lara P, Marta P, Jordi G, et al. Non-invasive quantification of ethylene in attached fruit headspace at 1 p. p. b. by gas chromatography - mass spectrometry [J]. *The Plant Journal*, 2017, 91(1): 172-183.
- [69] 田丽, 胡佳薇, 王敏娟, 等. 气相色谱-质谱法测定豆芽中 6 种植物生长调节剂残留[J]. 中国卫生检验杂志, 2016, 26(20): 2913-2915.
- [70] 王春泉, 杨丽丽, 任剑, 等. 基于 Labview 的植物生理与生长环境监测系统[J]. 电子测试, 2018, 1(1): 34-35, 33.

(编辑: 胡光辉)