

陆华忠, 李君, 李灿. 果园机械化生产技术研究进展 [J]. 广东农业科学, 2020, 47(11): 226-235.

果园机械化生产技术研究进展

陆华忠^{1,2}, 李君², 李灿²

(1. 广东省农业科学院, 广东 广州 510640; 2. 华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642)

摘要: 近年来, 随着果园种植规模的不断扩大, 传统果园生产技术普遍存在水果栽培方式与机械化作业不配套, 农艺与农机结合不完善, 呈现各自发展态势上升, 标准化技术短缺、人工成本增高、劳动力不足等突出问题, 严重制约我国水果产业的经济效益。目前, 我国果园大部分环节仍采用人工作业的方式, 制造技术落后、机械化程度较低已成为制约我国果园现代化发展的主要因素, 传统的人工作业已无法满足现代果园的发展需求, 果园机械化问题亟待解决, 而生产作业机械化已发展成为支撑现代水果产业提质增效的重要保障, 更是推动产业科技进步的重要根源。对国内外水果生产管理及各作业环节的机械化现状进行分析总结, 重点围绕果园土壤与植被管理、病虫害防治、冠层花果管理、水果采收及智能信息管控等技术进行综述, 展望了水果生产机械化技术的研究方向, 提出未来果园机械化生产技术将逐渐向智能化、标准化、精准化方向发展, 为全面提高我国果园机械化生产水平提出发展思路 and 对策。

关键词: 果园; 机械化; 信息感知; 智能控制; 精准作业

中图分类号: S233.74

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X(2020)11-0226-10

Research Progress in Orchard Mechanization Production Technology

LU Huazhong^{1,2}, LI Jun², LI Can²

(1. Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In recent years, with the continuous expansion of orchard planting scale, the traditional orchard production technology is not matched with mechanized operation as it has no compatible fruit cultivation methods. The combination of agronomy and agricultural machinery is quite imperfect, showing their respective upward development trend, shortage of standardization technology, increase of labor costs, labor shortage and other problems, seriously restricting the economic benefits of China's fruit industry. At present, the methods used in most links of orchard production in China are still manual operations, backward manufacturing technology and low degree of mechanization have become the main factors restricting the modernization of China's orchards, and the traditional manual operations have been unable to meet the development needs of modern orchards. Orchard mechanization problems need to be solved urgently, and the mechanization of production operations has developed into an important guarantee to support the modern fruit industry to improve quality and efficiency, but also a significant foundation to promote the development of industrial science and technology. This paper analyzes and summarizes the mechanization status of fruit production management and various operation links at home and abroad, focusing on soil and vegetation management, pest control, canopy flower and fruit management, fruit harvest and intelligent information management. For the future research direction of fruit production mechanization technology, future orchard mechanization production technology will gradually develop in an intelligent, standardized and precise way, providing development ideas and countermeasures for the overall improvement of China's orchard mechanization production level.

Key words: orchard; mechanization; information sensing; intelligent control; precise operation

我国水果品种繁多, 果园种植面积和水果产量常年稳居世界首位, 水果已成为我国继粮食和蔬菜之

后的第三大农业种植产业, 据《中国农业年鉴》统计, 截至 2018 年, 我国果园种植面积为 1 187.5 万 hm²,

收稿日期: 2020-10-04

基金项目: 国家现代农业(荔枝龙眼)产业技术体系项目(CARS-32-14)

作者简介: 陆华忠(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为果园设施与机具, E-mail: huazlu@scau.edu.cn

水果产量为 2.57 亿 t, 稳居世界第一。我国是世界第一大水果消费国, 然而水果产业的经济效益并未增收^[1]。现阶段果园大部分生产环节仍以人工作业为主, 效率低、强度大、耗时费力, 加之劳动力日益短缺, 果园面临无人可用的生产管理困境, 不能及时完成割草、施肥、采收等作业, 迫切需要解决当前果园生产瓶颈问题, 而果园机械化的发展, 是促进我国果业发展转型的重要举措。近年来, 随着国际水果产业结构的优化调整 and 消费需求的急剧增加, 世界水果产业发展迅猛, 果业已逐渐成为不少国家和地区农业增效、农民增收和农村经济发展的支柱产业之一, 尤其是对促进山区经济发展以及生态环境保护具有主要意义, 这对我国果园机械化的发展提出了新的要求。

水果产业现代化的根本是要实现生产技术集成化、劳动过程机械化和生产经营信息化, 其中机械化生产是最主要的生产方式和最重要的标志^[2-3]。与发达国家相比, 我国果园综合机械化研究、制造和实际作业水平均相对较低, 人工成本占比居高不下、资源利用率和劳动生产率低下的问题依然存在, 立地条件不理想、基础设施不充足、种植模式不配套、栽培方式不统一、生产农机具不适用等限制因素亟需改善, 部分作业环节仍需大量的人力, 施肥、割草、采收等环节尚未完全实现机械化作业。标准化种植模式和规范化管理技术的缺失、农机农艺匹配程度较低等问题仍需攻克, 传统果园需要逐步升级改造, 标准化、规范化、规模化的果园是现代果园发展的必然趋势, 果园机械化的重要性与应用性具有广阔的发展前景。

本文通过综述近年来国内外果园主要生产环节中机械化技术发展现状, 重点围绕果园土壤与植被管理、病虫害防治、冠层花果管理、水果采收及智能信息管控技术进行阐述, 并对现阶段技术面临的主要挑战以及未来的研究方向进行展望, 以期为我国果园生产机械化技术的推广应用提供参考与借鉴。

1 土壤与植被管理技术

1.1 节水灌溉

我国南北水资源分布不均, 东西部降雨差别较大, 果园主要分布在我国西南丘陵山区, 水资源匮乏是果园普遍存在的现象, 且我国果园灌溉条件还相对落后, 并无相对成熟的灌溉条件, 灌溉周期长、技术落后、灌溉粗放等问题较为突出, 水分无法充分有效的利用。因此, 高效节水灌溉技术是我国果园灌溉发展的重点方向^[4-5]。

1.1.1 灌溉方式 我国农业以传统灌溉方式为主,

用水灌溉利用系数仅为 0.54, 远低于发达国家的 0.7~0.8; 传统灌溉水资源浪费严重, 灌溉效率仅为 50%~60%, 而喷灌和滴灌的效率则分别可达 60%~70% 和 80%~90%^[6-7]。果园常用的节水灌溉方式包括漫灌、沟灌、喷灌、微喷灌、渗灌和滴灌等, 当前水资源危机愈演愈烈, 各国对节水灌溉技术也越来越重视。美、英等国以精准灌溉为目标建立了节水灌溉模型, 对果园果树是否需要灌溉、何时需要、需水量进行模型预测, 实现了喷灌和滴灌面积达 50% 以上; 以色列温室种植采用先进的微灌技术, 水资源利用率高达 95%。随着高效集约农业的发展和节水灌溉技术的发展, 国外已开始普及信息传感与自动管控技术, 达到定时、定量及保质有效的满足作物的需水量, 实现了高效节水灌溉^[8]; 国内主要是采用合理安排改进灌溉制度、优化田间覆盖保水的方法, 通过滴灌、管道输水及地下痕量等技术, 达到有效减少水分流失和提高水分利用率的目的。虽然部分果园进行了水肥一体化系统建设, 节水节肥已初见成效, 但由于产品性能和质量较差、自动化程度较低、作物灌溉决策管理针对性不强等一系列问题, 限制了该项技术的推广应用。

1.1.2 灌溉管理技术 改进灌溉管理制度, 确保果树在生长关键期的供水需求, 在果树盛果期合理灌水, 在其他时期做好蓄水保水工作, 控制树体生长。现阶段水资源短缺、季节性干旱和作物养分需求胁迫的问题日益突出, 国外在环境信息采集、自动灌溉控制、灌溉策略、灌溉生理响应特性等方面研究较为深入, 一些新的灌溉技术如亏灌、根区交替灌溉等已逐步在果园中实现, 通过智能化管控技术, 实现了果园水肥一体化精准灌溉, 满足了果树在不同生长期的灌水需求。以色列 Netafim 公司采用计算机智能控制模式, 可根据气候、土壤及作物等因素状况, 进行智能自动灌溉, 无需人工操作; 澳大利亚采用一种固定道机械作业模式, 实现田间作业动力驱动轮和行走轮都在固定道上行走, 增强土壤蓄水能力, 有效减少了地表径流; 荷兰利用卫星遥感和地理信息系统技术, 可根据树体大小和太阳辐射情况及时调整供水量, 水分利用率提升显著^[9]。随着现代信息传感、通信传输及智能控制技术的不断发展, 精准灌溉管控技术在果园具有广阔的应用前景。

1.2 机械化施肥

施肥是果园生产中的重要环节之一, 当前我国许多地区果园施肥仍采用人工作业为主, 肥量的把控和施放难以做到精准施用, 合理有效的施肥技术可以最大限度地使用肥料, 有效降低肥料流失、

降低肥料对土壤的危害、提高肥料利用率,在农业中对于环境保护和提高果树肥料吸收效率至关重要^[10]。

1.2.1 施肥方式 现阶段我国果园施肥作业方式主要有人工挖穴施肥、机械化施肥和水肥一体化施肥等。人工挖穴施肥劳动强度大、效率低,肥量的把控和施放不均,粗施和过量偏施的现象普遍存在,不仅会造成土壤微量元素的流失,还会影响果树生长;水肥一体化施肥技术受地域影响较大,无法满足我国丘陵山区施肥作业的需求。果园机械化施肥有开沟施肥、挖穴施肥、气爆深松施肥和注射施肥等方式^[11-14],其中沟施是现阶段果园常用的施肥方式,作业机具通常是开沟机或小型挖掘机,按作业方式的不同,用于果园施肥的开沟机械可以分为圆盘式、犁铧式、链式和螺旋式等4种类型^[15]。

1.2.2 施肥技术 目前,国内外果园机械化施肥技术主要以开沟施肥为主,国外对果园开沟施肥机械的研究起步较早,经过长时间的研制,逐步向现代化、智能化、标准化的方向发展,无线传感技术、机器视觉技术、“3S”技术的运用,实现了果园的精准施肥;国内开沟施肥机大多是借助拖拉机动力来牵引开沟机具作业,因其轮距不可调、匹配程度低、刀具设计单一等原因,不能很好地解决作业走偏、刀具易损以及不同土质开沟均匀性差的问题。考虑到种植农艺需求,吴佩鸿等^[16]设计了一种矮化密植果园多功能管理机,可完成挖穴、施肥、除草作业;为满足山地果园施肥作业效率需求,西北农林科技大学采用液压驱动方式研制了挖坑、施肥、覆土一体化作业机具^[17];沈从举等^[18]研制的履带自走式果园气爆深松施肥机通过将高压空气和定量肥料同时注入根部土壤,实现了气爆松土和定量施肥。我国正向标准化果园阶段过渡,合理有效的施肥可以最大限度地提高肥料的利用率、降低肥料的流失和对土壤的危害,对环境保护和提高果树肥料吸收效率至关重要,施肥机械的发展,势必会为果园机械化发展带了新的机遇。

随着计算机技术和各类传感技术的快速发展,精准变量施肥技术已得到广泛关注,其在果树施肥的应用也越来越多。变量施肥技术是目前实现精准农业的核心内容,从变量施肥装备到变量施肥控制系统已形成相关体系,如美国约翰迪尔公司的Green Star 变量施肥机、比利时基于土壤传感器的变量施肥机、日本实时排肥传感的控制系统、韩国气吸式变量施肥机等已得到较好的应用;国内起步较晚,技术相对落后,通过吸收和借鉴国外技术,中国农业大学研制的基于处方图的变量施肥机、华

南农业大学的香蕉变量施肥机、吉林大学自主研发的变量施肥系统、上海交通大学基于GPRS的变量施肥变量施肥系统等技术的应用。为保证作业效率及质量,越来越多的施肥机控制器采用了PDA或车载式计算机,利用微机处理来自图像传感器^[19]、测距传感器^[20]、双目摄像头^[21]、定位系统、GIS系统等传感方法获取作物生长、土壤营养以及机器作业状态的信息^[22],为果园变量施肥决策提供精准的参考量。

1.3 机械化割草

果园每年一般要打3次除草剂或人工除草4次以上,费时费力,除草剂的使用还会造成环境污染和果树药害。杂草对果树的危害很大,能直接或间接影响果园水果生长,科学、合理、有效的控制及清除杂草,对提升水果产量和品质、降低果园虫害的发生具有重要作用。

1.3.1 割草方式 目前,果园常用的除草方式主要有3种:人工除草、化学除草和机械除草。与人工除草和化学除草相比,机械化割草具有高效安全、绿色省工、环境友好等特点,是目前最为便捷、安全的除草方式^[23]。除草技术的关键在于执行部件的工作原理,可以分为机械式除草、机械气力式除草和机械液力式除草;机械式除草按照切割方式的不同,可分为甩刀式切割、旋耕式切割、往复式切割、旋转式切割和滚刀式切割5种。我国果园多分布于丘陵山区,由于地形、作业要求的限制,一般采用旋转式切割的方式,且山地果园割草任务多半以半机械化作业为主,耗时费力效率低;机械气力式除草是通过机械式先将杂草清除,然后用高压气体将杂草吹出的一种技术,在果园上的应用较少。

1.3.2 割草技术 国外割草机发展起步较早,标准化种植模式的果园,割草机从传统的大型化、单一化、机械式逐渐朝轻简型、多功能、智能化的方向发展,果园机械化割草技术先进^[24]。如日本筑水公司的割草机高度可调,斜坡适应性好,配有减震的可调节座椅、可任意调整高度和角度的转向系统;意大利必圣士公司研制的720/730系列的微耕机,通过配套多种机具用以完成不同的功能,实现一机多用。我国多数果园立地条件差且地块细碎,以便携式割草机和推车式割草机应用为主,作业效率不高、劳动强度大。随着果园机械化进程的推进,割草机器人^[25]是机械化割草技术的重要发展方向,其能依靠智能系统自主完成预定区域的割草任务,工作期间无需人为干预,且具有高效、便捷、安全等特点。自动避障及路径规划的能力是衡量割草机器人智能化程度的重要标志,依靠接触式或非接触

式传感器实现障碍物信息感知, 路径规划有随机覆盖法、往复形式、口字形式和螺旋形式等形式, 轨迹跟踪算法比较成熟的有曲线轨迹拟合、预瞄控制、模型预测控制和纯跟踪算法等。在动力方面, 割草机也由传统的内燃机驱动向清洁能源电力驱动方向转变, 如利用太阳能电池板和蓄电池组合作为割草机作业的动力源。当前国内太阳能割草机相关技术研究工作还处于探索性起步阶段, 太阳能光伏发电技术在割草机上的应用也只是局限在一些高等院校、科研单位进行。

2 病虫害防治技术

病虫害防治工作是果园生产管理的重要环节, 平均每年喷施农药约 8~15 次, 其工作量约占果园管理工作总量的 30%^[26]。在新发展理念的要求下, 我国农药的用量正实现逐年减少, 农药利用率仍十分低效, 仅有极少数的药剂沉积在靶标上起到杀虫作用, 其余药剂沉积在土壤或蒸发在空气中, 果园植保机械的应用能大幅度地提高施药的工作效率并能结合高效喷雾技术提高农药的利用率。

2.1 施药方式

果园常见的施药方式有背负式、喷杆式、风送喷雾式及无人机施药, 其中背负式喷雾器、担架式喷雾机最早进入国内果园应用。背负式喷药设备主要通过人工背负进行作业, 因其价格低、操作简单、携带运输方便, 在我国小规模耕地、果园以及地形不佳的丘陵山区使用较为广泛, 据统计背负式喷雾器占我国植保机械保有量的 98% 左右。喷杆式喷雾机作业幅宽大, 但大田用的杆架结构和喷头并不能很好适应果树植保要求。近年来预埋管道式喷雾系统发展较快, 出水口位置包括树下和冠顶两种, 塔式、环形、多风管式、多风机式风送喷雾机从原理上来看, 均为利用风送气流把农药雾化成雾滴并沉积于叶片正反面, 雾化好、射程远、喷雾宽, 在平地 and 缓坡地果园有广阔的应用前景。农用航空无人机可以克服地形条件的限制, 其旋翼产生的风场使得雾滴有一定的冠层穿透性, 作业速度快, 防治效果相比人工与机械作业提高 15%~35%, 适合在山地果园推广^[27]。

2.2 施药技术

农药减量化、施药精准化、作业智能化是当前国内外机械化施药技术的发展态势。在以减少农药使用量为核心理念的推动下, 静电喷雾、变量喷雾、离心雾化技术在果园逐步得到应用。近年来, 基于超声波、红外传感、机器视觉技术的对靶喷雾施药技术发展较为成熟, 通过流量控制系统, 根据反馈

信息, 精准判断目标有无靶标位置和树形情况进行施药。在施药过程中, 防漂移、药液回收等技术是提高药液附着率、减少药液流失、降低环境污染的重要举措, 国外已采用经典喷雾技术和防漂移辅助装备进行辅助施药。变量喷雾技术和静电喷雾技术是作为目前低容量、低污染的喷雾技术之一, 而离心雾化技术是当前世界公认的产出雾滴均匀性较好、雾滴粒径范围较窄、适用于可控喷雾施药的先进技术。离心雾化器可根据转速控制雾滴粒径大小, 以满足不同条件需要、提高农药雾滴在靶标作物上的附着能力及分布均匀性, 已达到有效利用率与防治效果。刘德江等^[28]设计了一种离心雾化装置, 通过边缘带齿的转盘来产生较小的均匀分布雾滴, 雾滴粒径范围较窄, 适用于可控喷雾施药。赵铨等^[29]设计了一种基于低容量离心雾化技术的喷雾机, 试验证明离心雾化方式可有效提高药液的冠层穿透性 2.9 倍以上。随着计算机技术的发展及不断完善, 高精度信息获取以及定位技术的快速发展为植保智能化精准作业提供了实现可能, 融合多传感器、导航自动作业、大数据云平台等方法, 基于冠层轮廓、密度或体积实时探测进行对靶精准喷雾作业甚至无人化作业的相关施药技术研究已有报道。

3 冠层花果管理技术

3.1 机械化修剪

果园整形修剪作业是一个季节性较强和劳动密集型的工作, 果树整形修剪每公顷所用工时约占整个生产过程所用工时的 20%, 通过科学合理的整形修剪, 不仅有利于高光效树形及标准化果园的培育, 还可改善果园小气候生态环境, 进而为后续的果园机械化管理创造便利条件^[30]。

3.1.1 修剪方式 果树修剪可分为人工选择性修剪和机械化整形修剪^[31]。前者是人工为主、机械为辅, 通常借助电动剪、动力锯等手持辅助修剪机具, 选择性修剪效率低、劳动强度大、对操作者的要求较高。就此, 日本、意大利等国研发出针对不同树形和环境的人工机械修剪机, 以气动源为动力, 省时省力; 后者主要针对矮化密植栽培的标准化果园以及一些可以中重程度修剪的果树, 适合于进行机械化整形修剪, 通过在拖拉机悬挂或者专用底盘上安装可以上下升降、左右移动的修剪刀具, 以液压或电动的方式驱动刀具进行往复切割运动, 其切割装置可根据需要调整角度, 并将果树修剪成一定的形状, 作业效率高, 有利于果树塑形及标准化果园的建立。果树整形修剪按切割方式可以分为往复割刀式、转刀式和圆盘锯式; 根据机架形式不同, 又可

分为前置式、侧置式、双侧式、龙门架式等^[32]。

3.1.2 修剪技术 国外对于果园修剪机械的研究较早,对于果园修剪机械的研究成果较多,先后针对不同地形的修剪需求,设计了不同类型的修剪机械。果园地域小的日韩地区研制了小型履带式修剪机,丘陵山地居多的德国和意大利改装了拖拉机式的修剪机,中小型农场为主的英法等国改装大、中型圆盘锯修剪机,标准化大型农场为主的美国研制出作业效率高的大型修剪机械和自动化程度较高的修剪机器人,大大提高了工作效率。国内修剪机械起步较晚,大多以手持修剪器械为主,修剪机较少。近年来,针对不同果树对修剪机械的修剪需求,华中农业大学工学院^[33]研制了一种双边齐切式柑橘修剪机,该机根据不同柑橘果园的树宽、树高等差异,可随时调节修剪宽度、修剪高度和修剪形状,然后进行整行齐切;河南科技大学^[34]针对果树仿形修剪设计需求及大多数果园的机械化管理需求,设计了一种液压驱动前悬挂式果树仿形修剪机,该果树漏剪率为10%;山东省农业机械科学研究院^[35]研制了一种果园宽幅联合仿形修剪机,可根据修剪高度、修剪形状进行调节,实现一机多用,该机修剪漏割率为7.3%,修剪合格率为90.9%。阶段我国果园正向矮化密植栽培的标准果园过渡,可以采用自走式修剪机械进行整株修剪,用于整株整形修剪,其修剪装置可根据需要调整角度,并将果树修剪成一定的形状。同时,通过整株修剪后的果树也为后续的果园机械化管理创造便利条件。

3.2 机械化疏花疏果

疏花疏果是提高果实品质、减少养分消耗和持续稳定丰产的重要措施,是果园生产管理作业较为繁重的环节,具有季节性强、劳动强度大等特点。传统果园栽培模式无法满足现代果园生产,规模化的现代矮密集约栽培果园管理逐渐得到发展,由于果树长势易受控制,易成花成果,若不进行疏花疏果,盛果期果实过多将会影响果实产量,导致果实品质下降。

3.2.1 疏花疏果方式 目前常见的疏花疏果方式包括人工疏花疏果、化学疏花疏果和机械疏花疏果。人工疏花是操作者按照经验,通过使用简单的工具进行均匀性保花留果,该方式对操作者的要求较高,效率低、成本高、花费时间长,用工投入和资金投入均占果园投入的20%~30%;化学疏花是在花果开花期或者是幼果期进行喷施化学药剂,使一部分的花或幼果不能长成果实而脱落,具有较强的随机疏除性,虽然化学疏花疏果比传统的人工疏花疏果作业效率大幅度提高,但目前用于稀释核果类的试

剂有限,且果树易受药剂种类、喷施时间、配制浓度、作业现场温度、及果树品种等诸多因素的影响,极易导致花和幼果疏除过度或疏除不足现象,这与后期手工定果的农艺要求不一致,同时,也无法解决果品农药残留和环境友好性的问题;机械疏花疏果作为一种对花果管控的友好型技术,运用柔性疏刷装置对树冠进行击打,通过使树干树冠振动的方式达到疏花疏果的目的,与以上两种方法相比,该方法机械作业效率高,且不存在农药残留、污染环境、受气候条件影响等问题,将成为今后该领域的重点发展方向。

3.2.2 疏花疏果技术 国外机械化疏花疏果技术最早出现在20世纪80年代,根据作业方式的不同,可分为树冠或树干振动式、高压水喷射式、柔性绳旋转式^[36]。Romano等^[37]基于振动原理设计了可通过改变频率和振幅获得花、芽、幼果、青果最佳值的振动测试实验台。Martin等^[38]试验发现单株产量、坐果率和平均单果质量与人工处理无显著差异,且手持式疏花疏果装置将每棵桃树作业成本节约了近90%,比人工疏花疏果效率提高了6~15倍;Barreto等^[39]使用手持式修剪和离心疏花疏果机械进行田间试验表明,两种方式均能提高产量和果实大小。为满足大规模现代化果园的高效作业要求,多节臂式、门架式等新型疏花疏果机已投入研发和试验。

机械化疏花疏果技术在国内研究起步较晚,近年来青岛农业大学^[40]、河北农业大学^[41]、华南农业大学^[42]、江苏省农业科学院^[43]等高校及科研机构进行了探索研究,如华南农业大学研制出基于超声波探测的手持式以及悬挂式荔枝树仿形柔性疏花疏果机,青岛农业大学、江苏省农业科学院分别研制出矮密苹果树主轴式、棚架Y形梨园三节臂机载式疏花疏果机等。受国内传统果树栽培模式以及农艺管理方法的限制,现已无法满足现代果园生产需求,规模化的现代矮密集约栽培果园管理逐渐得到发展。

4 水果采收技术

水果采收作为果园生产中的重要环节之一,具有季节性强和作业强度大等特点,采收用工成本占生产总成本的35%~40%,我国水果采收机械化程度低,机械采收率仅为2.33%^[44]。现阶段主要以人工采收为主,耗时费力、效率低和人工成本高等问题突出,而机械化采收不仅能减轻果农的劳动强度、节省成本和提高作业效率,而且还能提高水果的经济效益,符合国家大力发展农业的战略性决策,

加大研究和发​​展水果采收技术对果园现代化建设具有重要的现实意义。

4.1 采收方式

目前,常用的水果采收方式有3种:一是人工采收,通过人工搭载半自动化的采摘作业平台,运用一些辅助器械进行人工采收;二是机械化采收,使用振动或撞击等方法使果实与果树分离;三是机器人采摘,运用智能化程度较高的采摘机械手进行采摘。

国内丘陵山地果园有别于国外大规模种植的果园,相比于粮食作物机械化收获技术,果园采收机械的研究与应用相比较晚。早在20世纪40年代,国外开始对水果机械化采收技术进行研究,振动式^[45]、梳刷式^[46]、剪切式^[47]和气力式^[48]等采收方式均有报道,其中振动式采收机比较常见。20世纪70年代,国内果园采收机械开始得到发展,逐渐出现了振动式采果机、手持剪切式采果机等小型采收机械;为省时省力,一些简易的便携式采摘器逐渐出现在果园生产应用中;为提高鲜食水果采收作业的安全性,一些辅助采收装置得到广泛应用,如单人升降平台、多人作业平台等相继问世。水果商品化处理作为机械化采收的后续配套环节,也已不再局限于工厂化生产,而是走入果园,开始尝试与采收作业集成的模式。

4.2 采收技术

随着计算机技术的兴起以及自动控制技术的迅速发展,特别是机器人、计算机图像处理技术和人工智能技术的日益成熟,国外水果采摘机器人的研究和开发得到了快速发展。20世纪70年代,农业机器人开始取代传统的采收机械进入到采摘作业模式;20世纪80年代,美国最早研发出世界上第一台采摘机器人,随后西方国家经过研发和不断的试验,先后成功研制出了葡萄、柑橘、番茄、苹果、蓝莓等采摘机器人^[49-53]。20世纪90年代中期,我国开始进行农业机器人研究,主要集中在末端执行器的设计及不同条件下果实的识别及定位技术研究,虽然相较于西方国家起步较晚,但还是取得了一些显著性成果^[54-57]:如华南农业大学研制的荔枝采摘机器人,每小时能采摘20 kg的荔枝,是人工的两倍;中国农业大学针对高架草莓设计的“采摘童1号”采摘样机,采摘成功率达88%,单果采摘平均耗时18.54 s;国家农业智能装备工程技术研究中心针对吊栽番茄开发设计的轨道移动平台式采摘机器人,单果采摘作业用时24 s,采摘成功率为83.9%。目前大部分研究都处于实验阶段,普遍存在适应性差、精确性低、灵活性差、用时处理较长

等缺点,投入农业生产使用还需时日。

5 信息化管控技术

随着智能应用的发展,物联网将把农业领域推向新高度,将物联网技术应用到果园生产种植中,赋能水果产业“新机遇”。国内外科研人员利用物联网、大数据、人工智能等技术,在果树生长环境在线监测系统和数字农业云平台等方面进行了深入研究,将信息化技术与果园生产技术进行了融合。

5.1 果园环境在线监测系统

果树的生长受日照、土壤、湿度、温度、病虫害等环境因素影响,其生长状况直接决定树叶的光合作用、树体的生长速度、果实的质量和产量。在大面积的果园中主要通过传统的人工管理和监测方式判断果树的种植、生长、病虫害等状况,不仅增加了大量的劳动力成本,而且具有盲目性和随机性,无法高效、全面的实现果园的信息化管理。近年来,随着“互联网+农业”发展方式深入的研究,通过在果园安装智能气象监测设施^[58],利用传感器可以采集到果园的空气温(湿)度、光照强度、CO₂溶度、土壤温湿度EC值、土壤酸碱性等环境信息,实现果树生长环境的在线监测,并根据环境信息预测可能给果树带来的危害,进而采取防护措施,是降低果园损失的重要手段^[59-63]。

5.2 数字农业云平台

现阶段,现代果园示范园区正逐步通过建立数字农业云平台,融合农业装备与人工智能、物联网、大数据等信息管理技术,帮助果园实现高效管理和产销一体化。云平台主要通过移动端搭建APP管理系统和在PC机上设计大数据分析系统,达到实现果树生长环境实时在线监测、远程控制水肥灌溉、视频监控果园病虫害状况、控制虫控设备安全喷药、追溯水果质量管理等效果。当前,我国正在努力实施乡村振兴战略,提升果园生产环境状况,开展对基于数字农业云平台的果园智能设施研究,以进一步提高果园生产的效率及保障各类水果的质量安全,为实现智慧果园建设打下坚实基础。

6 启示与展望

国外许多发达国家在土壤耕作、水肥管理、疏花疏果、物理割草、整形修剪、病虫害防控和灾害预防等环节已经实现了机械化,配套生产经济效益明显,当前正朝着自动化、智能化方向发展。我国果园生产管理环节的关键技术与装备已经具备,部分地区正在推广与应用,宜机化改造初见成效。但由于果园种植模式与机械不配套问题较为突出,规模化和规范化程度差,且各环节的单项机械化技术

不能有效集成应用,导致节本增效不显著、农机装备技术供给与需求的矛盾依然突出,为此对我国果园机械化发展提出了新的要求。

(1)土壤与植被管理技术。随着地理信息系统、传感器和图像处理技术在精准农业领域中的应用,果园机械化除草和施肥装备研发及灌溉管控技术将向智能化、自动化发展,高效节水灌溉技术、精准变量施肥技术、自动化割草技术的开展,更多的向环保、绿色、有机方向发展,发展节能环保型果园机械除草,水、肥精准施控技术,这也是我国未来土壤与植被管理机械发展的重中之重。

(2)病虫害防治技术。受果园作业环境的限制,大型施药机械难以在国内果园推广应用,一些小型或轻筒型的喷雾机仍将是主流选择,而无人机航空施药、无人驾驶施药技术是未来研究方向的发展趋势。采用先进的施药技术,结合先进的检测、图像识别、自动化控制和喷雾技术,开展高效施药装备的研发,以提高农药利用率和施药质量、减少农药的使用量为目的,促进果园健康发展。

(3)冠层花果管理技术。我国果园处在传统果园向标准化和规模化的现代果园过渡的阶段,传统的修剪及花果管控机械大部分是通过悬挂在拖拉机上,通过人工操作完成作业,适应性较低。针对不同栽培种植模式和树形修剪要求的果园,实现修剪机械的通用性、自适应以及集多功能(剪枝、收集与粉碎)于一体的修剪机械的研发,以及从结构和技术上对疏花疏果机械进行升级改造,通用性强的花果管控机械是未来的发展选择。

(4)水果采收技术。果园采收是制约果园机械化发展的瓶颈问题,不同水果采收原理不同,现阶段主要以人工为主,半自动化采收作业平台及采收机械得到较大的发展及应用;计算机技术、传感技术、控制技术及机器视觉等技术的发展,机器人采摘技术得到较大的研究进展,但大部分仍处在试验阶段,是我国果园未来发展的新方向;而开发适用我国国情的结构简单、通用性强、操作简单的小型采收机是当下研究重点方向。

(5)信息化管控技术。随着智能化技术的发展及在农业中的应用,通过对果园苗情、病虫害、草情、果实成熟度、环境等数据收集及分类处理,构建关于灌溉、病虫害、施肥以及采收等模型,以实现果园果树生长环节进行分析和预测,对果园农情进行精准决策判断,实行智能化管理操作,智慧果园的建设将会得到发展。

推进农机农艺深度融合将来依然会是果园机械化技术的重要研究方向,其核心内容是构建现代果

园全程机械化生产技术模式。机械化技术发展上则是通过深入信息感知、定量决策、自主导航、智能控制、精准作业等方面研究,集成互联网信息交换和智能作业管控技术,未来在地面管理、树体管理、花果管理等果园生产全过程作业机械上实现高度自动化、智能化。

参考文献 (References) :

- [1] 段洁利, 陆华忠, 王慰祖, 王亮, 赵磊. 水果采收机械的现状与发展[J]. 广东农业科学, 2012, 39(16): 189-192. DOI:10.3969/j.issn.1004-874X.2012.16.059.
DUAN J L, LU H Z, WANG W Z, WANG L, ZHAO L. Present situation and development of the fruit harvesting machinery [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 39(16): 189-192. DOI:10.3969/j.issn.1004-874X.2012.16.059.
- [2] 常有宏, 吕晓兰, 简经, 薛新宇, 王中华. 我国果园机械化现状与发展思路[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 21-26. DOI:10.3969/j.issn.2095-5553.2013.06.007.
CHANG Y H, LYU X L, LIN J, XUE X Y, WANG Z H. Present state and thinking about development of orchard mechanization in China [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(6): 21-26. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5553.2013.06.007.
- [3] 陈小艳, 张园, 李明, 邓怡国, 王业勤, 董学虎. 我国热带果园机械化发展现状与建议[J]. 现代农业装备, 2019, 40(4): 2-5. DOI:10.3969/j.issn.1673-2154.2019.04.001.
CHEN X Y, ZHANG Y, LI M, DENG Y G, WANG Y Q, DONG X H. Current status and suggestions on mechanization development of tropical orchard in China [J]. *Modern Agricultural Equipments*, 2019, 40(4): 2-5. DOI:10.3969/j.issn.1673-2154.2019.04.001.
- [4] 赵映, 肖宏儒, 梅松, 宋志禹, 丁文芹, 金月, 韩余, 夏先飞, 杨光. 我国果园机械化生产现状与发展策略[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(6): 116-127. DOI:10.11841/j.issn.1007-4333.2017.06.14.
ZHAO Y, XIAO H R, MEI S, SONG Z Y, DING W Q, JIN Y, XIA X F, YANG G. Current atatus and development strategies of orchard mechanization production in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(6): 116-127. DOI:10.11841/j.issn.1007-4333.2017.06.14.
- [5] 刘建芬. 基于节水理念的规模化果园灌溉系统设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
LIU J F. Design on the scale orchard irrigation system based on water-saving Ideas [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [6] 刘思汝, 石伟琦, 马海洋, 王国安, 陈清, 徐明岗. 果树水肥一体化高效利用技术研究进展[J]. 果树学报, 2019, 36(3): 366-384. DOI: 10.13925/j.cnki.gsb.20180212.
LIU S R, SHI W J, MA H Y, WANG G A, CHEN Q, XU M G. Advances in research on efficient utilization of fertigation in fruit trees [J]. *Journal of Fruit Science*, 2019, 36(3): 366-384. DOI:10.13925/j.cnki.gsb.20180212.
- [7] 李君, 陆华忠, 杨洲, 吕恩利. 荔枝龙眼生产机械化现状与发展趋势[J]. 广东农业科学, 2011, 38(5): 177-179. DOI:10.3969/j.issn.1004-874X.2011.05.062.
LI J, LU H Z, YANG Z, LV E L. The status and future directions of mechanization of production for Lychee and Longan [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(5): 177-179. DOI:10.3969/j.issn.1004-874X.2011.05.062.

- [8] 张晋文. 不同灌溉方式下的灌溉智能决策系统研究 [D]. 南昌: 江西理工大学, 2016. DOI:10. 7666/d. D01011295.
ZHANG J W. Research on irrigation intelligent decision system under different irrigation methods [D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology, 2016. DOI:10. 7666/d. D01011295.
- [9] 化延斌, 赵军, 李六林. 国内外果园节水灌溉技术研究进展 [J]. 中国农业文摘——农业工程, 2016, 28 (6): 15-17. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-5103. 2016. 06. 004.
HUA Y B, ZHAO J, LI L L. Advances in water-saving irrigation techniques of orchard at home and abroad [J]. *Agricultural Science and Engineering in China*, 2016, 28 (6): 15-17. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-5103. 2016. 06. 004.
- [10] 赵明辉. 果园开沟施肥机设计及试验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
ZHAO M H. Design of orchard ditching-fertilizing machinery and research of experiment [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [11] 曾繁伟, 张东峰, 杨术明, 胡超, 胡新德, 白发. 葡萄厩肥施肥机的设计与试验 [J]. 农机化研究, 2020, 42 (12): 180-183. DOI:10. 13427/j. cnki. njyi. 2020. 12. 032.
ZENG F W, ZHANG D F, YANG S M, HU C, HU X D, BAI F. Design and experiment of grape farmyard manure fertilizer application machine [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42 (12): 180-183. DOI:10. 13427/j. cnki. njyi. 2020. 12. 032.
- [12] 宣峰, 朱清智, 梁硕, 汪小志. 激光扫描精密施肥定位机械装置研究——基于 PLC 控制 [J]. 农机化研究, 2016, 38 (6): 21-25. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-188X. 2016. 06. 004.
XUAN F, ZHU Q Z, LIANG S, WANG X Z. Study on fertilization positioning mechanism of laser scanning precision—based on PLC [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016, 38 (6): 21-25. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-188X. 2016. 06. 004.
- [13] CHEN C, HE P X, ZHANG J J, LI X X, REN Z Y, ZHAO J, HE J C, WANG Y, LIU H B, KANG J. A fixed-amount and variable-rate fertilizer applicator based on pulse width modulation [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 148:330-336. DOI: 10. 1016/j. compag. 2018. 03. 033.
- [14] 王理想, 王辉, 仇维佑, 殷慧子, 耿龙伟, 奚小波, 单翔, 张瑞宏. 基于 Amesim 果园气爆式施肥机液压系统设计与仿真 [J]. 农业装备技术, 2019, 45 (5): 13-15.
WANG L X, WANG H, QIU W Y, YIN H Z, GENG L W, XI X B, SHAN X, ZHANG R H. Design and simulation of Hydraulic System of air-explosive fertilizer applicator based on amesim orchard [J]. *Agricultural Equipment & Technology*, 2019, 45 (5): 13-15.
- [15] 刘彪, 肖宏儒, 宋志禹, 梅松. 果园施肥机械现状及发展趋势 [J]. 农机化研究, 2017, 39 (11): 263-268. DOI:10. 13427/j. cnki. njyi. 2017. 11. 050.
LIU B, XIAO H R, SONG Z S, MEI S. Present state and trends of fertilizing machine in orchard [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39 (11): 263-268. DOI: 10. 13427/j. cnki. njyi. 2017. 11. 050.
- [16] 吴佩鸿, 靳伟, 赫荣彬, 何晨, 刘鑫, 顾思琪, 王兆北. 矮化密植果园挖穴施肥除草多功能机的研制 [J]. 新疆农机化, 2019 (1): 9-11. DOI:10. 13620/j. cnki. issn1007-7782. 2019. 01. 002.
WU P H, JIN W, HAO R B, HE C, LIU X, GU S Q, WANG Z B. Study on digging, fertilizing and weeding machine for dwarf dense orchard [J]. *Xiangjiang Agricultural Mechanization*, 2019 (1): 9-11. DOI:10. 13620/j. cnki. issn1007-7782. 2019. 01. 002.
- [17] 魏子凯. 山地果园挖坑施肥覆土机设计与研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
WEI Z K. Design and research on hydraulic system of hilly orchard digging fertilizing covering machine [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [18] 沈从举, 贾首星, 张立新, 周艳, 李帆, 代亚猛, 张景, 马文霄. 履带自走式果园气爆深松施肥机研制 [J]. 农业工程学报, 2019, 35 (17): 1-11. DOI:10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2019. 17. 001.
SHEN C J, JIA S X, ZHANG L X, ZHOU Y, LI F, DAI Y M, ZHANG J, MA W X. Development of caterpillar self-propelled orchard gas explosion subsoiling and fertilizer machine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35 (17): 1-11. DOI:10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2019. 17. 001.
- [19] BACK S W, YU S H, KIM Y J, CHUNG S O, LEE K H. An image-based application rate measurement system for a Granular fertilizer applicator [J]. *Transactions of the ASABE*, 2014: 679-687. DOI: 10. 13031/trans. 57. 10605.
- [20] COLAÇO A F, MOLIN J P. Variable rate fertilization in citrus: a long term study [J]. *Precision Agriculture*, 2017, 18 (2): 169-191. DOI: 10. 1007/s11119-016-9454-9.
- [21] ZHANG J Q, LIU G, LUO C M, HU H, HUANG J Y. MOEA/D-DE based bivariate control sequence optimization of a variable-rate fertilizer applicator [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 167 (105063). DOI:org/10. 1016/j. compag. 2019. 105063.
- [22] CHANDEL N S, MEHTA C R, TEWARI V K, NARE B. Digital map-based site-specific granular fertilizer application system [J]. *Current Science (Bangalore)*, 2016, 111 (7): 1208-1213. DOI:10. 18520/cs/v111/i7/1208-1213.
- [23] REISER D, SEHSAH E S, BUMANN O, MORHARD J, GRIEPENTROG H. Development of an autonomous electric robot implement for intra-Row weeding in Vineyards [J]. *Agriculture*, 2019, 9 (1). DOI: 10. 3390/agriculture9010018.
- [24] YAO W, WU D, XIAO M, QIAN Y, GE Y. Design and analysis of multi-functional variable speed weeding machine [J]. *International Agricultural Engineering Journal*, 2018, 27 (3): 176-184. DOI:10. 3233/JCM-180881.
- [25] 王伟, 王远, 孟堃, 钟雨辉, 于晓华. 无人智能滚刀式草坪修剪机的研制 [J]. 林业机械与木工设备, 2018, 46 (2): 32-36. DOI:10. 3969/j. issn. 2095-2953. 2018. 02. 007.
WANG W, WANG Y, MENG K, ZHONG L H, YU X H. Development of unmanned intelligent hob-type lawn trimmers [J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2018, 46 (2): 32-36. DOI:10. 3969/j. issn. 2095-2953. 2018. 02. 007.
- [26] 林春丽. 我国机械化施药技术的应用特点与技术发展途径 [J]. 农机使用与维修, 2020 (8): 141. DOI:10. 14031/j. cnki. njwx. 2020. 08. 111.
LIN C L. Application characteristics and technological development approaches of mechanized pesticide application technology in China [J]. *Nongji Shiyong Yu Weixiu*, 2020 (8): 141. DOI:10. 14031/j. cnki. njwx. 2020. 08. 111.
- [27] 兰玉彬, 陈盛德, 邓继忠, 周志艳, 欧阳帆. 中国植保无人机发展形势及问题分析 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40 (5): 217-225. DOI:10. 7671/j. issn. 1001-411X. 201905082.
LAN Y B, CHENG S D, DENG J Z, ZHOU Z Y, OU Y F. Development situation and problem analysis of plant protection unmanned aerial vehicle in China [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40 (5): 217-225. DOI:10. 7671/j. issn. 1001-411X. 201905082.

- [28] 刘德江, 龚艳, 王果, 张晓, 陈晓. 离心雾化技术在植保机械领域的发展研究 [J]. 中国植保导刊, 2016, 36 (12):58-61. DOI:10.3969/j.issn.1672-6820.2016.12.013.
LIU D J, GONG Y, WANG G, ZHANG X, CHEN X. Research on the development of centrifugal atomization technology in the field of plant protection machinery [J]. *China Plant Protection*, 2016, 36 (12):58-61. DOI:10.3969/j.issn.1672-6820.2016.12.013.
- [29] 赵铖, 何雄奎, 曾爱军, 乔白羽, 张清军, 齐振超, 赵清. 离心雾化低容量喷杆喷雾与常量喷雾对比研究 [J/OL]. 农药学报:1-8. [2020-09-30]. <https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303>. 2020. 0105.
ZHAO C, HE X K, ZENG A J, QIAO B Y, ZHANG Q J, QI Z Q, ZHAO Q. Comparative research on centrifugal-low volume spray and conventional spray in fields [J/OL]. *Chinese Journal of Pesticide Science*: 1-8. [2020-09-30]. <https://DOI.org/10.16801/j.issn.1008-7303>. 2020. 0105.
- [30] 方珏. 矮化密植枣园修枝剪的优化设计与可靠性分析 [D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
FANG J. The optimization design and reliability optimization analysis of jujube close planting garden pruning shears [D]. Shihezi: Shihezi University, 2013.
- [31] 付威, 刘玉冬, 坎杂, 潘俊兵, 崔健, 张慧明. 果园修剪机械的发展现状与趋势 [J]. 农机化研究, 2017, 39 (10):7-11. DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2017.10.002.
FU W, LIU Y D, KAN Z, PAN J B, CUI J, ZHANG H M. The situation and expectation of fruit tree pruning machine [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39 (10):7-11. DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2017.10.002.
- [32] 龙魁. 往复式葡萄修剪机的设计与试验研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014. DOI:10.7666/d.Y2697653.
LONG K. Design and experimental research on reciprocating vines pruning machine [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014. DOI:10.7666/d.Y2697653.
- [33] 常钧翔. 双边齐切柑橘修剪机设计与研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. DOI:10.27158/d.cnki.ghznu.2019.000605.
CHANG J X. Research and design of both sides neatly trim *Citrus* prune machine [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. DOI:10.27158/d.cnki.ghznu.2019.000605.
- [34] 李慧华. 液压驱动前悬挂式果树修剪机的设计与试验 [J]. 农机化研究, 2021, 43 (6):73-78. DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2021.06.013.
LI H H. Design and test of a hydraulic driven front suspension pruning machine for fruit trees [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43 (6):73-78. DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2021.06.013.
- [35] 刘学串, 刘学峰, 张立峰, 闵令强, 褚幼晖, 任冬梅. 新型果园宽幅联合仿形修剪机设计与研究 [J]. 中国农机化学报, 2020, 41 (8):65-71. DOI:10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2020.08.010.
LIU X C, LIU X F, ZHANG L F, MIN L Q, CHU Y H, REN D M. Design and research of wide band combination copying prune machine for new orchard [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41 (8):65-71. DOI:10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2020.08.010.
- [36] BERLAGE A G, LANGMO R D. Machine-vs hand-thinning of peaches [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1982, 25 (3):538-543.
- [37] ROMANO A, TORREGROSA A, BALASCH S, ORTIZ C. Laboratory device to assess the effect of mechanical thinning of flower buds, flowers and fruitlets related to fruitlet developing stage [J]. *Agronomy*, 2019, 9 (11):668. DOI:10.3390/agronomy9110668.
- [38] MARTIN B, TORREGROSA A, GARCIA B J. Post-bloom mechanical thinning for can peaches using a hand-held electrical device [J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 144:179-186. DOI:10.1016/j.scienta.2012.07.003.
- [39] BARRETO C F, FERREIRA L V, NAVROSKI R, PEREIRA J M, ANTUNES L E C. Raleio mecânico como alternativa no cultivo de pessegueiros [J]. *Revista de Ciências Agrárias*, 2019, 42(2):221-230. DOI:10.19084/rca.17178. DOI:10.19084/rca.17178.
- [40] 胡彩旗, 孙传海, 纪晶. 果树机械疏花机执行机构性能试验研究与分析 [J]. 中国农机化学报, 2015, 36 (5):24-28. DOI:10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2015.05.007.
HU C Q, SUN C H, JI J. Performance experiment and analysis on mechanical thinning flower actuator [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2015, 36 (5):24-28. DOI:10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2015.05.007.
- [41] 汪强. 矮密果树疏花装置设计及研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
WANG Q. Design and research of mechanical blossom thinning device for the dwarf dense fruit trees [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.
- [42] 李君, 徐岩, 许绩彤, 杨洲, 陆华忠. 悬挂式电动柔性疏花机控制系统设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (18):61-66. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.18.008.
LI J, XU Y, XU J T, YANG Z, LU H Z. Design and experiment of control system for suspended electric flexible thinner [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (18):61-66. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.18.008.
- [43] 雷晓晖, 吕晓兰, 张美娜, 李雪, 常有宏, ANDREAS H. 三节臂机载式疏花机的研制与试验 [J]. 农业工程学报, 2019, 35 (24):31-38. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.24.004.
LEI X H, LYU X L, ZHANG M N, LI X, CHANG Y H, ANDREAS H. Development and test of three arms tractor-mounted flower thinner [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35 (24):31-38. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.24.004.
- [44] 盛玲玲. 山地水果生产机械化现状及发展策略研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
SHENG L L. Research on present situation and development strategy of mechanization for mountainous fruit production [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017.
- [45] TORREGROSA A, MOLINA J M, M PÉREZ, E ORTÍ, ORTIZ C. Mechanical harvesting of ornamental citrus trees in Valencia, Spain [J]. 2019. DOI:10.3390/agronomy9120827.
- [46] GUPTA S K, EHSANI R, KIM N H. Optimization of a citrus canopy shaker harvesting system: Properties and modeling of tree limbs [J]. *Transactions of the ASABE*, 2015, 58:971-985.
- [47] 李景彬, 王晓华, 坎杂, 张斌, 田康, 孙凯. 剪切式红花采收装置的设计与试验 [J]. 江苏农业科学, 2015 (11):537-539. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.165.
LI J B, WANG X H, KAN Z, ZHANG B, TIAN K, SUN K. Design and experiment of shearing safflower harvesting device [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015 (11):537-539. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.165.
- [48] 姬长英, 张纯, 顾宝兴, 符海娇, 谢娣, 郭俊. 梳割气吸一

- 体式贡菊采摘机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2017, 48 (11): 137-145. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.017.
- JI C Y, ZHANG C, GU B X, FU H J, XIE D, GUO J. Design and experiment of shear-sucking mountain chrysanthemum Picking Machine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48 (11): 137-145. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.017.
- [49] MALEKZADEH M S, QUEISSER J F, STEIL J J. Multi-level control architecture for Bionic Handling Assistant robot augmented by learning from demonstration for apple-picking [J]. *Advanced Robotics*, 2019, 33 (9): 469-485. DOI: 10.1080/01691864.2019.1587313.
- [50] HOHIMER C J, WANG H, BHUSAL S, MILLER J, MO C, KARKEE M. Design and field evaluation of a robotic apple harvesting system with a 3D-Printed Soft-Robotic end-effector [J]. *Transactions of the ASABE*, 2019, 62 (2): 405-414. DOI: 10.13031/trans.12986.
- [51] MEHTA S S, MACKUNIS W, BURKS T F. Robust visual servo control in the presence of fruit motion for robotic citrus harvesting [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 123:362-375. DOI: 10.1016/j.compag.2016.03.007.
- [52] OKTARINA Y, DEWI T, RISMA P, NAWAWI M. Tomato harvesting arm robot manipulator: a pilot project [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2020, 1500:012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1500/1/012003.
- [53] FAROQUE A A, ZAMAN Q U, ESAU T, CHANG Y K, SCHUMANN A W, JAMEEL W. Influence of wild blueberry fruit yield, plant height, and ground slope on picking performance of a mechanical harvester: basis for automation [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2017, 33 (5): 655-666. DOI: 10.13031/aea.12187.
- [54] HU X M, PAN Z R, LV S K. Picking path optimization of agaricus bisporus picking Robot [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 2019 (7): 1-16. DOI: 10.1155/2019/8973153.
- [55] LIU J Z, LI P P, MAO H P. Mechanical and kinematic modeling of assistant vacuum sucking and pulling operation of tomato fruits in robotic harvesting [J]. *Transactions of the ASABE*, 2015, 58 (3): 539-550. DOI: 10.13031/trans.58.10837.
- [56] 李国利, 姬长英, 顾宝兴, 徐伟悦, 董芒. 多末端苹果采摘机器人机械手运动学分析与试验 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (12): 14-21, 29. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.003.
- LI G L, JI C Y, GU B X, XU W Y, DONG M. Kinematics analysis and experiment of apple harvesting robot manipulator with multiple end-effectors [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47 (12): 14-21, 29. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.003.
- [57] 赵德安, 吴任迪, 刘晓洋, 张小超, 姬伟. 气电混合驱动全天候苹果收获机器人设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2020, 51 (2): 21-28, 36. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.003.
- ZHAO D A, WU R D, LIU X Y, ZHANG X C, JI W. Design and experiment of apple harvesting robot based on gas-electric hybrid drive [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51 (2): 21-28, 36. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.003.
- [58] GUO L L, LIU Y H, HAO H J, HAN J Q, LIAO T K. Growth monitoring and planting decision supporting for pear during the whole growth stage based on pie-landscape system // 2018 7th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics) [C]. 2018:91-94. DOI:10.1109/agro-geoinformatics.2018.8476123.
- [59] SUN X, WU H R, LI Q X, HAO P. Research on the agro-technique information service cloud platform of orchard based on the internet of things (IOT) [J]. *6th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials*, 2016, 97: 349-355.
- [60] PADMA T, MIR S A, SHANTHARAJAH S P. Intelligent decision support system for an integrated pest management in apple orchard [J]. *Studies in Computational Intelligence*, 2017, 705: 225-245. DOI:10.1007/978-3-319-53153-3_12.
- [61] HORNERO A, HERNANDEZ-CLEMENTE R, NORTH, P R J, BECK P S A, BOSCIA D, NAVAS-CORTES J A, ZARCO-TEJADA P J. Monitoring the incidence of *Xylella fastidiosa* infection in olive orchards using ground-based evaluations, airborne imaging spectroscopy and Sentinel-2 time series through 3-D radiative transfer modelling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236:111480. DOI:10.1016/j.rse.2019.111480.
- [62] XU X, ZHANG Z H, XU Y, YANG Z, ZHENG J X. Measurement and analysis of wireless propagative Model of 433MHz and 2.4GHz frequency in Southern China orchards [J]. *6th International-Federation-of-Automatic-Control Conference on Bio-Robotics*, 2018, 51 (17): 695-699. DOI:10.1016/j.ifacol.2018.08.115.
- [63] DING D, CHANG Y, WANG H J, LI J H, LI X. Design and implementation of orchard environment monitoring system based on WSN [C]. *CIMNS*, 2017:367-372.

(责任编辑 杨贤智)



陆华忠, 博士, 二级教授, 博士生导师, 现任广东省农业科学院院长、党委副书记, 国务院学位委员会农业工程学科评议组第七届委员, 广东省科协副主席, 中国农业工程学会副理事长, 广东省农业机械学会副理事长, 国家荔枝龙眼产业技术体系机械研究室主任、岗位科学家。

主要从事农业机械化工程、现代农业装备、车辆工程 etc 研究。承担国家科技支撑计划、广东省高校产学研重大项目、国家自然科学基金等课题 30 多项。发表科技论文 150 多篇, 授权发明专利 40 多项, 授权软件著作权 20 多项, 参与获省部级教学科研成果奖励 12 项。指导在读和已毕业博士、硕士研究生 70 多名, 主编和参编出版教材和著作 9 部。

“主动适应经济建设需要, 办好有特色的交通运输工程专业”获广东省教学成果二等奖。“水田耕整机驱动轮优化设计的研究”获农业部科技进步三等奖; “果蔬气调保鲜运输关键技术与装备”“水稻精量早直播技术及机具”通过广东省科技厅成果鉴定, 达国际先进水平。曾获“南粤教坛”新秀、广东省“技工教育教坛”新秀科号。