

# 世界设施园艺智能化装备发展对中国的启示研究

齐 飞<sup>1,2</sup>, 李 恺<sup>1,2</sup>, 李 邵<sup>1,2</sup>, 何 芬<sup>1,2</sup>, 周新群<sup>1</sup>

(1. 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 农业部农业设施结构工程重点实验室, 北京 100125)

**摘 要:** 设施园艺智能化是实现园艺产品播种移栽、栽培管理、环境调控、监测预警、作物采收、内部物流等全过程数字化、精细化、自主化的高级生产形态, 是当前包括中国在内的世界农业智能化装备的研发热点和产业升级重点。为在全球设施园艺智能化装备发展的大格局下科学定位中国的发展路径, 指导中国设施园艺智能化装备的研发和推广, 需要对世界各国在该领域的发展现状和趋势进行研究分析。该文以全球设施园艺领域个人、企业和科研机构在智能化方面的主要研究内容和装备开发重点为基础, 从全产业链的角度, 分析世界设施园艺智能化装备的发展现状。籽种生产在播种、移栽等环节上已初步实现了智能化应用; 作物生产在植株调整、授粉、植保和收获等环节正加快研发, 剪叶、巡检等部分智能化装备已经进入商业化试用; 仓储物流在内部运输、分级分选、清洗、包装等智能化方面不断完善, 智能苗床输送、运输机器人已大量应用, 高速分选、包装机器人等在加快研发。分析发现, 世界设施园艺智能化装备需求增长快、研发方向逐步聚焦、更加注重绿色安全、单机商业化速度加快、系统集成的全智能化生产设施开始出现。研究分析成果对中国设施园艺智能化的科技战略和产业政策制订、科研立项、成果评价、国际合作、装备研发及推广等工作提供参考和借鉴。

**关键词:** 装备; 温室; 农业; 设施园艺; 智能化; 现状; 趋势

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.024

中图分类号: S26; TU261

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-02-0183-13

齐 飞, 李 恺, 李 邵, 何 芬, 周新群. 世界设施园艺智能化装备发展对中国的启示研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 183—195. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.024 http://www.tcsae.org

Qi Fei, Li Kai, Li Shao, He Fen, Zhou Xinqun. Development of intelligent equipment for protected horticulture in world and enlightenment to China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 183—195. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.024 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

设施园艺智能化装备是指将现代网络通信技术、信息技术、智能控制技术与设施园艺商品化生产技术相结合, 形成的具有感知能力、记忆和思维能力、学习和自适应能力、决策与行为能力的用于设施园艺生产管理的装备。在新一轮工业革命方兴未艾的大背景下, 世界经济强国都在大力推动智能化为重点的产业升级并制定了相应的发展路线, 如德国“工业 4.0”项目(德语语境中又称“第四次工业革命”)旨在通过“智能工厂”的应用, 全面开启工农业生产乃至整个国民经济体系的智能化过程<sup>[1]</sup>。中国也颁布了以智能制造为核心的纲领性文件《中国制造 2025》<sup>[2-3]</sup>。在第二和第三产业中, 智能化技术和装备发展较快<sup>[4-8]</sup>, 而相对于工业与民用智能装备, 设施园艺等农业产业在操作对象的标准性、环境状态的复杂性、产品的易损性等方面均具有不同特点, 研发难度更大、商业化周期更长, 因此至今还没有像工业机器人那样在实际生产中得到普遍应用。随着新经济时代到来, 设施园艺发达国家均加快了向智能化升级的步伐, 如美国<sup>[9-10]</sup>、英国<sup>[11-12]</sup>、荷兰<sup>[13-15]</sup>、日本<sup>[16-17]</sup>等国都制定了相

关计划并加大了研究力度, 以澳大利亚<sup>[18-20]</sup>、加拿大等为代表的设施园艺新兴国家甚至将智能化作为产业跨越式发展的重大机遇。欧洲提出了以精细农业为特征的“农业 4.0”概念<sup>[21]</sup>。中国也将智能化作为“十三五”现代农业装备技术发展的重点方向之一<sup>[22]</sup>, 并制定了新一代人工智能发展规划<sup>[23]</sup>。设施园艺领域国家重点研发计划“智能农机装备”专项“温室智能化精细生产技术与装备研发”项目正式启动<sup>[24]</sup>。

从发展看, 世界设施园艺技术进步都要经历机械化、自动化、信息化、智能化等阶段。当前, 荷兰、美国等设施园艺发达国家也正处在信息化向智能化的演进时期, 绝大多数国家还没有完成传统意义上机械化和自动化的改造, 以中国为例, 生产力水平不平衡造成同一时间和空间内多种阶段并存的现象<sup>[25-27]</sup>非常普遍。按照设施农业机械化评价标准<sup>[28-29]</sup>, 2016 年中国设施园艺综合机械化水平 31.5%, 远低于大田农作物耕种收 65%的水平<sup>[30]</sup>, 尤其在种植和采运环节仅分别为 15.2%和 7.7%。为开启设施园艺智能化发展道路, 中国必须在提高机械化和自动化水平、突破智能化关键技术装备瓶颈、开展全过程智能化试点<sup>[31-32]</sup>等方面同步推进, 才有可能在新一轮技术革命中赢得发展先机, 同时借助农业智能化过程对社会就业产生的“替代效应”和“创造效应”<sup>[33]</sup>, 来提高农业、乃至全社会的人均劳动生产率。本文按照设施农业生产环节分类, 分项阐述了世界先进设施园艺生产装

收稿日期: 2018-05-25 修订日期: 2018-11-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701500)

作者简介: 齐 飞, 总工程师、研究员, 主要从事温室结构、设备、材料和产业发展方面的研究。Email: qf2008@188.com

备水平,分析了智能化关键技术与自动化装备结合的研发应用现状与趋势,对指导中国设施园艺智能化发展方向、研发重点和开展国际合作、推广应用等具有一定的借鉴和参考价值。

## 1 发展背景

### 1.1 发展的基础

从设施园艺产业自身看,智能化技术研究开展较早<sup>[34-36]</sup>,但受全球人力成本上升、农业从业者减少<sup>[37]</sup>,高技能专业人员不足等因素影响,同时为了进一步提高操作效率、减少人工操作对园艺产品质量的影响<sup>[38]</sup>、保证供应的及时性、提高产业竞争力,以商业化为目标的设施园艺智能化在近 10 年内开始加速发展。

从外部环境看,设施园艺智能化在硬件方面依赖于机械、信息、通讯等产业的发展。国际金融危机发生后,新一代信息技术与先进制造技术加快发展、深度融合,智能制造成为全球新一轮产业变革的代表,数字化、网络化、智能化逐渐成为未来制造业发展的主要趋势,人工智能技术的不断突破<sup>[39-41]</sup>也为设施园艺的智能化预示出光明的前景。这种态势为设施园艺智能化提供了有力的产业技术支撑,也使包括设施园艺在内的农业领域成为智能化制造业新的投资方向之一。近期硅谷在农业信息化、机器人技术等方面投资的大幅增长也说明了这一趋势<sup>[42]</sup>,某些设施园艺新兴国家也出现相同态势<sup>[43]</sup>,迄今投资速度仍在加快、总量不断增长。不少国家也以设立诸如“产业战略挑战基金”<sup>[44]</sup>等形式增加农业人工智能、机器人和遥感等方面的创新投入,提高技术竞争力。

### 1.2 协作研发形式

除以企业和研究机构单独进行的研发行动外,世界各国采用多种协同攻关的方式加快智能化技术装备在园艺产业的应用。欧盟依靠“Horizon2020”计划<sup>[45]</sup>的资助并以前开展的欧洲农业高技术研究项目 CROPS<sup>[46]</sup>为基础,与跨学科的 REELER 项目<sup>[47]</sup>合作,整合来自荷兰、比利时、瑞典和以色列的 6 家研发单位自 2015 年开展了名为 Sweeper<sup>[48]</sup>的甜椒收获机器人研究,旨在实现第一代收获机器人的商业化。英国联合剑桥大学等 5 所顶尖研究型高校组成了科技创新联盟<sup>[49]</sup>,以期在包括智能化农业等产业技术研发方面发挥更重要的作用。日本富士集团联合九州大学<sup>[50]</sup>,发挥各自的优势,加快人工智能技术在农业产业的应用。韩国通过建立以智能化为特征的智慧农业综合体<sup>[51]</sup>来加快技术进步、提升产业竞争力、创造就业并吸引年轻人进入农业领域。上述研发虽与大田园艺智能化交叉进行,但这些装备在技术原理和功能上与设施园艺相通性很多,部分产品可直接用于温室作业。为促进全球设施园艺智能技术研发大协作,2018 年瓦赫宁根大学研究中心在中国腾讯公司的支持下,组织了“国际挑战”活动<sup>[52-53]</sup>,通过人工智能、传感技术和“自治”温室 (autonomous greenhouses) 技术的综合应用来提高设施蔬菜的生产水平。

### 1.3 应用的主要环节

设施园艺工程技术装备主要包括种苗工程、设施生

产、产地物流、综合管理 4 部分<sup>[54]</sup>,涵盖了设施园艺商品化产业链各个环节,这些环节中均有适合于智能化升级的内容,但受技术、经济、生产模式等影响,发展难度不同,重点和阶段也不同。从世界设施园艺智能化装备研发历史和实际应用进展看,目前收获智能装备的投入和研发进展最为显著,这主要源于世界范围内的劳工短缺<sup>[55-56]</sup>和设施生产者老龄化等问题的加剧。但各个领域智能化技术与装备的研发工作都在开展,从后文的分析中可清晰获知。

### 1.4 目标和路径

全球智能化的长远目标是为了更好地满足全球不断增长的食物供应的需要,更有效地保障食品生产全过程的效率、质量和供应的精准性,同时降低农业生产对生态环境的影响。从研究预测看,到 2050 年,世界人口数量将达到 91 亿~96 亿、食物需求较当前增长 70%<sup>[57]</sup>,同时 75% 的世界人口将居住在城市之中,对高品质园艺产品的需求更大。为实现上述目标,设施园艺智能化要以增加效益、提高竞争力和发展持续性为目的,以关键环节为突破口,以提高效率、降低消耗为主要要求,以提高操作速度、作业精度、减少人工为手段。最终,通过智能化的应用,使设施园艺实现由人工操作型向人机协同型和真正意义上的全天候工厂化生产型<sup>[43]</sup>转变,并实现技术供给、经济成本、社会需求三者的平衡。

### 1.5 涉及的其他技术领域

除与园艺作物本身直接相关的生物、环境、管理等农业工程技术外,设施园艺智能化技术装备还主要涉及传感器技术、网络通讯技术、智能控制技术以及以“智能制造”<sup>[58-59]</sup>为代表的机械、电子等工业与信息化技术,它们需要与设施园艺工程技术相互补充、深度融合才能实现由通用技术向设施园艺产业技术的转变。同时,由于设施园艺智能化相对上述技术应用相对滞后,后者技术进步和产业化的速度,会直接影响到设施园艺智能化技术装备常规化和商业化的速度与程度。

## 2 发展现状

### 2.1 种苗生产智能化装备

种苗生产可分为播前处理、播种、嫁接、移栽、定植几个过程。发达国家育苗已基本实现工厂化,大多数以穴盘育苗为主,荷兰也有一定量岩棉直播育苗<sup>[60]</sup>。在育苗阶段除嫁接、定植等少数环节以外,其他均已配套自动化设备,通过物流和输送设备的串联完成流水线作业,装备较为成熟,在智能化方面的研究主要集中在通过在线监测技术和机器视觉反馈,进一步提高设备作业精度和稳定性。

1) 前处理环节。主要装备包括基质消毒、穴盘清洗消毒、基质搅拌等,这些装备均已实现机械化,并且向实现自动化生产过渡,以荷兰、德国、意大利为主的装备制造和应用大国采取蒸汽喷射基质消毒、紫外线穴盘消毒等相对成熟的技术形成了适于推广的系列生产设备<sup>[61-63]</sup>。

2) 播种环节。主要采用播种流水线,由穴盘解垛、基质填充、压穴、播种、附土、喷淋、穴盘播后码垛等

单机设备串联组成<sup>[64-65]</sup>，各单体设备自动化程度、设备匹配度都很高，在运行稳定性、种子适应性等方面已经能够满足当前育苗生产需求。滚筒式播种机生产效率可以达到1 200 盘/h，准确率在95%以上，荷、意、美、英都在播种技术和设备方面形成自己特色<sup>[66-69]</sup>。如荷兰大部分园艺生产以岩棉为主，播种时直接将种子播入岩棉塞或岩棉块中。近年来，播种环节设备研究方向主要集中在如何进一步提高播种生产效率、加快或简化不同类型种子变换时滚筒的更换以及对于特定种子的精量定向播种技术及装备开发等；在智能化方面，荷兰和美国为进一步提高针对不同种子播种时的自适应性，增加了播种滚筒的真空度反馈自动调整系统，通过实时检测负压系统的稳定性，判断播种机运行稳定情况，并智能化调整设备作业速率，初步实现了播种机排种的智能化。中国在播种设备方面还处在自动化研发和初步推广阶段，如何进一步提高播种精度、提升作业稳定性依然是研究重点，针对排种机构、前后端自动化匹配设备的研发已初见成效<sup>[70-72]</sup>。

3) 嫁接环节。从20世纪90年代日本提出自动化嫁接技术方案开始，嫁接设备经历了机械化、半自动化、全自动化的发展过程<sup>[73-75]</sup>，目前正在与机器视觉技术结合实现智能化精准对接。由于嫁接作业过程精细，且嫁接对象复杂多样，嫁接装备研发速度缓慢。近期发展集中在2个方向，一是半智能嫁接机，由人工完成上苗，设备完成嫁接动作，荷兰目前先进的生产设备生产效率可以达到1 050 株/h<sup>[76]</sup>；另一方面由人工完成嫁接作业，研究依靠流程规划并配套合理的输送平台，通过物流方式整合人工嫁接作业流程。在智能化应用上荷兰、韩国为进一步提高嫁接成功率，将机器视觉技术应用于嫁接切削过程，通过实时识别合适的切削位置，躲避茎节、茎秆曲率过大等不利于嫁接的位置，从而调整切刀和对接手，保证对接成功率。中国在嫁接设备方面的研究处于并跑阶段，在嫁接苗及穴盘的机器视觉识别定位，正负压结合的持苗方式等方面有一定的研究，但距离实际生产应用还有一定差距<sup>[77-79]</sup>。

4) 移栽环节。近年，荷、意、美、韩、澳等国在移栽技术和设备研发方面发展较快<sup>[80-81]</sup>，相继开发出盆花与叶菜自动移栽系统，并大面积应用于设施园艺作物生产中<sup>[82]</sup>，在高效自动化的基础上结合机器视觉和图像分析技术实现种苗智能分级移栽。当前的研究重点一是针对移栽机构、末端执行器等硬件的改良升级，不断精简优化移栽拾取手的结构，通过改变移栽拾取轨迹减少对幼苗叶面的伤害，如荷兰在传统3轴直线伺服平台基础上引入6轴机械手臂和并联机械手进行移栽，缩短单作业循环用时，提高移栽定位精度，移栽作业最高速度可达35 000 株/h<sup>[83]</sup>；二是智能化升级，在疏苗、补苗、移栽过程中，依靠机器视觉技术幼苗分级分选、精准调向为后续育苗和成苗商品化提供的可靠保障。通过幼苗托离穴盘、旋转拍照，实现对每一株苗的2D或3D成像，进行图像分析，综合高度、叶面积、叶方向、茎直径、茎弯曲度等参数建立

分级评分算法进行分级<sup>[84]</sup>。荷兰还在扦插移栽方面开展研究，基于视觉快速识别平面扦插叶片、茎秆和茎节侧芽位置，通过机械手末端执行器切割、拾取并插入基质，完成智能化扦插移栽作业<sup>[85]</sup>。中国在穴盘苗移栽设备研发方面起步较晚，目前还未形成成熟的商业化产品，但在基于机器视觉的识别分级研究和针对不同类型幼苗的末端执行器研发方面有所进展<sup>[86-87]</sup>。

总体上，设施园艺种苗需在主要环节自动化、复杂环节半自动化的基础上，进一步提升技术装备的节能环保、智能化水平，尤其在复杂判断环节通过增加机器视觉和人工智能（AI，artificial intelligence）等技术，实现更快、更精准的识别、定位、分级、转移。

## 2.2 作物生产智能化装备

生产过程自动化、智能化一直是设施园艺领域研究与发展的重点，目前中国与其他设施园艺发达国家相继开发出设施环境控制、作物调整与授粉、病虫害防治及自动采摘等自动化与智能化技术装备，大幅度节省了劳动力、提高了资源利用率与生产效率及生产操作舒适度，在一定程度上实现了设施园艺的自动化与智能化生产<sup>[88-89]</sup>。

1) 设施环境控制。环境控制是设施园艺智能化的重要前提。结合不断提升精度和稳定性的环境监测传感器以及叶片温度、径流、茎直径、称质量等原位生理监测传感技术，通过无线传感网络、物联网技术，融合AI技术实现信息通信传输，结合模糊理论、遗传算法等数学工具建立精细的环境控制模型与植物生长模型相适应，同时，在智能算法方面，逐步由单因素控制向多因素耦合控制过渡，不断丰富环境控制专家系统，形成自适应学习的设施环境控制“大脑”。热泵技术、相变材料、LED补光、纳米技术及清洁能源等新型技术与设备在设施农业的推广应用实现了设施环境参数的精确控制；作物—环境互作机理的研究不断深入，明确了不同作物对设施环境参数的需求。结合作物水分与养分快速诊断技术、无损检测技术和装备以及作物生长模型与决策模型研究成果，逐步实现了基于作物真实需求的环境精确控制目标，相应技术与设备的应用大幅度提高了设施作物生产的资源利用效率与生产管理效率<sup>[90-93]</sup>。

2) 作物调整和授粉，视觉技术、人工智能、植物表型组学以及作物生长模型等技术综合应用到设施园艺作物调整与授粉方面<sup>[94-97]</sup>，结合不断发展的机器人技术，装备的智能化属性不断提升。如在劳动强度很大的吊落蔓环节中，美国研发了滑轨式自动吊蔓系统<sup>[98]</sup>；在植物修剪叶方面，荷兰开发出番茄自动剪叶机器人<sup>[99]</sup>，并应用到番茄生产管理中，通过3D视觉定位技术准确识别需要减掉的枝叶，由旋转切刀快速精准完成剪叶工作；在设施作物授粉方面，基于风力授粉与振动授粉原理，国内外研究学者开发出有轨式与无人机的机械化与自动化授粉机器人来代替自然授粉与雄峰授粉<sup>[100-101]</sup>。近年，华沙理工大学、美国哈弗大学、英国谢菲尔德大学和萨塞克斯大学学者将无人机和人造蜜蜂大脑结合在一起研究开发出机器蜂来进行作物授粉<sup>[102-103]</sup>，但目前这种机器蜂在模

拟蜜蜂大脑认知功能方面还有很大的提升空间<sup>[104]</sup>。

3) 植物保护。目前研究大多基于 1972 年被公认病虫害综合治理理念上开展的<sup>[105]</sup>, 近几年美国、荷兰等国家利用多维与高精度光谱成像与分析技术及 3D 传感器(立体摄像头与激光扫描仪)对植物进行高频率扫描, 再进行图像与反射比分析来精确监控病虫害发生情况<sup>[106-107]</sup>, 将分析后的结果记录形成植保数据库, 作为喷药等作业机器人的目标地图, 结合室内定位技术实现智能对靶精量喷施。在植物病虫害防治设备方面, 20 世纪 90 年代开始国内外研究学者就研发了紫外线、臭氧、植物天敌等技术与设备, 并广泛应用到生产中, 近年来的智能化移动喷药设备以及无人机喷药设备也在生产中开始使用。目前作物病虫害防治方向由从单纯注重作物植保到注重作物健康的研究方向发展的趋势。

4) 作物收获。设施作物收获是生产中耗时耗力与持续时间较长的环节, 是智能农业机器人技术集中呈现的领域。自动导航、机械手臂与视觉识别技术的日渐成熟提高了作物自动收获的可行性。近年来, 中国、荷兰、日本、美国、比利时、西班牙、意大利均在果蔬收获方面开展了探索性研究<sup>[108-113]</sup>, 分别针对不同外形、颜色的番茄、黄瓜、草莓等果蔬采摘机器人开展研发工作。在软件方面, 训练不同目标识别模板, 运用双目视觉、高光谱以及荧光成像技术并结合电子鼻技术, 获取采摘果实的位置、尺寸、损伤、成熟度、品质等信息。在识别算法方面研究不断升级, 多卷积神经网络、模糊决策、遗传算法的联合运用攻克背景噪声分割、复杂果实外形识别、消除叶片遮挡和重叠影响等方面不断进步, 结合 AI 技术建立自适应学习算法, 提升识别模型的精准性。在执行机构方面, 为提高采摘效率, 开展了机械臂-手-眼协调研究<sup>[114-115]</sup>, 关节型多轴机械手臂已广泛应用于采摘机器人, 针对草莓等柔软易损对象在末端执行器和拾取手方面展开研究, 采摘方式包括夹持或吸持后切割的方式和更加仿生的柔性扭动采摘方式等<sup>[116]</sup>, 最快的草莓采摘机器人单次采摘周期可以缩短到 3 s<sup>[117]</sup>。果蔬采摘机器人目前还未能商品化, 但大量的研究成果展示出这一领域巨大的发展前景。

总体来看作物生产智能化装备研究处于从单因素向多因素、多环节融合方向发展, 单因素智能技术与装备逐渐成熟, 多因素与多环节融合还处于初级阶段, 美国率先提出的可与植物对话的技术 (SPA, speak plant approach to environment control), 是通过融合植物监测、分析、模型决策、调控等环节, 利用自动化、信息化等技术与设备, 实现对植物生产过程的智能化管控, 这可能成为未来作物生产智能化技术与装备的融合研究方向<sup>[118]</sup>。

## 2.3 物流仓储智能化装备

物流仓储是产后商品化的重要过程, 主要包括内部输送、分级分选、洗净、包装、储藏保鲜、追溯等装备。

1) 内部输送。包括智能苗床输送系统、自动引导车辆 (AGV, automated guided vehicle)、搬运机器人等。智能输送是工厂化盆栽植物及育苗生产需要解决的重要

环节<sup>[119]</sup>。目前, 国外的盆栽植物智能栽培输送设备已形成产业化。荷兰盆花生产中将输送带、自动搬运轨道、苗床搬运天车和搬运叉车等输送设备有机连接, 构成了温室内部物流生产体系, 大大提高了生产效率, 减轻了人工作业的劳动强度<sup>[120]</sup>, 配套智能化的管理软件实现苗床等单元载荷的定时定点自动运输。近年来, 随着中国劳动力成本上升和规模效益的驱动, 智能化物流装备的研发逐步开始, 但只被极少数高档花卉温室采用。设施园艺 AGV 装备在传统的电磁、视觉或惯性导航基础上, 不断拓展定位方式, 如 RFID (radio frequency identification) 定位、Wi-Fi 定位、UWB (ultra wide band) 定位, 精度不断提升, 实现温室内地图与生长、环境信息的匹配, 形成设施园艺生产数据库, 提升设施园艺生产的精准性。另一方面 AGV 成为内部运输、植保巡检、视觉测产等功能机器人的智能化行走底盘<sup>[121]</sup>。荷兰、中国生产者已经将 AGV 应用于收获甜椒、西红柿的运输<sup>[122]</sup>和种苗生产中<sup>[123]</sup>。同时, 越来越多的搬运机器人被应用到温室园艺生产搬运中<sup>[124]</sup>, 以此帮助保障工人的安全和整体效率。美国采用机器人进行盆花的搬运, 效率达到 240 盆/h<sup>[125]</sup>。

2) 分级分选。按大小、质量、色泽、形状、成熟度、病虫害等指标对农产品进行等级评定, 是果蔬商品化的核心环节, 对增值减损具有重要意义。随着视觉传感元件的升级, 识别精度和速度都在提升, 算法模型更加精准、稳定。国外从 20 世纪 80 年代中期开始水果品质自动检测的研究, 早期主要采用彩色 CCD 相机作为传感器, 近年多运用神经网络, 灰度、颜色自适应评估、小波分析和遗传算法、分形理论等对苹果、红枣、番石榴、芒果等进行颜色、果形、缺陷等的检测分级<sup>[126-129]</sup>; 采用高光谱和多光谱图像技术、热红外、X 射线、近红外和中红外双相机在线检测损伤缺陷<sup>[130-132]</sup>; 采用核磁共振、红外线、冲击检测水果的成熟度<sup>[133]</sup>。法国、西班牙、意大利、荷兰等发达国家较早开始利用计算机进行果蔬分级, 开发设备已系列化、商业化。法国可对苹果、柑桔、葡萄、菠萝、火龙果等圆形和穗状水果以及茄子、辣椒等长形蔬菜进行分级分选, 其中苹果、柑橘等的分选效率最高可达 18 000 个/h, 火龙果 5~8 t/h<sup>[134]</sup>。日本山冈大学开发的菜用大豆分选设备, 分选效率达到 85 kg/h, 是人工分选的 7 倍<sup>[135]</sup>。中国关于果蔬品质智能识别分选所采用的理论与技术与国外差别不大<sup>[136-137]</sup>, 研发的设备多聚焦在蔬果的外部品质检测, 如国内企业已实现了赣南脐橙、猕猴桃、柠檬、蜜柚等的分级分选, 四通道电子果蔬分选机处理量达到 20 t/h<sup>[138]</sup>。未来重点是进行多传感器测量信息集成, 采用机械、光学与机器视觉、传统计算和 AI 等实现实时自动检测与分级, 同时基于大数据的深度学习应用于黄瓜等果蔬的分选也将成为热点研究<sup>[139]</sup>。

3) 清洗。发达国家已形成完善的蔬菜加工设备体系, 在结构优化、新工艺和新材料应用等方面处于技术创新阶段; 设备专用性强, 一套设备一般只针对特定种类蔬菜如蘑菇、草本植物等进行清洗, 装备主要还是以自动

化作业为主,通过增加水位及水质实时监测传感器,实现清洗水的自动补充和更新,清洗过程全自动化,避免了人工污染<sup>[140-141]</sup>。荷兰<sup>[142]</sup>、德国<sup>[143]</sup>企业研制的筐式生菜清洗生产设备,针对性强,清洗性能和效果好、蔬菜损伤小且以生产线为主,清洗过程全自动化,生产效率高;荷兰公司<sup>[144-145]</sup>研制的蔬菜清洗生产线采用气浴、水射流和喷淋相结合,通过在水中产生更强的湍流对蔬菜进行低损清洁,清洗能力可达4 000 kg/h。中国蔬菜清洗技术研究基础比较薄弱。山东研制的TS型卧式混流喷冲清洗机清洗能力 $\leq 2\,000\text{ kg/h}$ <sup>[146]</sup>,且蔬菜加工设备应用多集中在发达城市,与美国、荷兰、德国、日本等食品工业发达国家存在一定差距。

4) 包装。包装是采后商品化不可或缺的环节,在保鲜过程中起到至关重要的作用,目前设备主要以自动化作业为主。常见蔬菜包装技术有薄膜包装、涂膜包装、气调包装以及真空包装等<sup>[147]</sup>。国外蔬菜包装设备起步较早,意、西、德、日等国的企业已开发出商业化的包装设备。由于果蔬包装属劳动密集型工作,为此西、澳、英、荷等国果蔬生产商均使用机器人来协助包装生菜、草莓、黄瓜等,使劳动力需求减少80%,如黄瓜最大包装效率可达6 000根/h<sup>[148-151]</sup>。中国蔬菜包装装备研发较快,在2011—2015年协作机器人在包装业的应用从9.5%增加到17.4%,特别是《机器人产业发展规划(2016—2020年)》的发布将有助于进一步推动果蔬包装业的自动化和智能化水平<sup>[152]</sup>。

### 3 主要趋势

农业作为人类生存的基础性产业,随着人口的绝对增加,在社会进步的大背景下必然面临着传统要素投入减少、环境和资源压力增加的客观现实,设施园艺也同样。相较于工业,农业智能化发展依然较落后,但实现智能化的趋势却成为一种必然并呈现出以下主要特点。

#### 3.1 技术与需求加快互促

需求是促进技术进步和产业升级的根本动力。从长远看,农产品供应的压力使智能化成为战略投资者的必然选择,并对此产业前景充满乐观。从当前生产需求看,面对投入成本的增加和人力资源供应的持续减少,设施园艺种植者面临着前所未有的竞争压力,而智能化产品的初步应用,就为许多种植者带来了显著的经济效益<sup>[153]</sup>,展现出巨大的潜力<sup>[154]</sup>,大大激发了种植者采用先进智能化技术装备的热情<sup>[43]</sup>,并且这种意愿不断保持增长,不仅传统的大型企业加快智能化装备的应用,中小企业也在不断增加投入。某些种植者甚至直接与机器人公司合作,以加快相关技术装备的研发<sup>[155]</sup>、更早地获得技术优势。这种工业制造企业寻求新市场,设施种植者追求更高效率和效益的需求在当前高度契合,形成了“拉”和“推”的2种动力,相互促进的态势越来越明显。

#### 3.2 研发方向逐步聚焦

技术进步通常受到发展的必要性、迫切性、技术成熟性和经济性等方面的影响,智能化技术装备也不例外。

通过前文的分析不难发现,世界设施园艺智能化技术装备研发应用也呈现出不同的层次和热度,当前的研发重点主要集中在以下几个方面:1)人工操作比例大、劳动强度高的工作,如收获、打叶、授粉、除草、室内运输、设施维护等;2)操作精度要求高、人员技能要求高的工作,如播种、嫁接、移苗等;3)对经营成本影响大的环节,如灌溉、施肥、施药等;4)内容单调重复,易引起误差的工作,如巡检、数据采集等;5)决策综合性强、内容涉及面广的工作,如环境调控系统、能源综合管理系统等。这些技术装备的局部应用或集成应用可以显著提高设施园艺的作业精度、降低投入成本、提高生产质量,因此也将是智能化技术装备研发应用的长期关注点。

#### 3.3 更加注重绿色安全

农业既受环境影响又影响环境,而设施园艺相对大田农业具有能耗高<sup>[156]</sup>、药肥施用量大<sup>[157]</sup>等特点,因此绿色生产的压力更大。针对绿色生产,智能化装备一方面在信息判断的科学性、操作的精准性、施用的精量化、流程的便捷化等方面不断提高,使水、药、肥、废弃物减量程度不断提高<sup>[158]</sup>,甚至尝试通过建立植物、人类、机器人之间的信息交流平台<sup>[159-160]</sup>,使作物的可持续生产与人类生活更加协调;另一方面,智能技术装备也在适应绿色制造的趋势<sup>[161-162]</sup>,不断推进机械系统、动力系统、能源供应系统的优化和材料的改进,充分利用太阳能等可再生能源,减少材料和能源消耗。针对安全生产,智能化装备在避障、无人化、容错等技术方面也不断提高,最大程度地减少对作物、设施和生产人员<sup>[163]</sup>的不良影响。

#### 3.4 单机商业化速度加快

智能化作为一种复杂性很高的实现过程,技术和产品需要多个应用、反馈、改进的循环。智能化的实现也需要通过局部和某些环节的突破来带动系统化解决方案的实现。除直接采用工业技术的部分仓储物流智能装备应用较早外,其他单一功能的智能化装备均在近5a才开始投入商业化运行,如嫁接机器人、移苗机器人、苗圃和盆花生产转运维护机器人<sup>[164]</sup>、打叶机器人<sup>[165]</sup>、授粉无人机、施药机器人、除草机器人<sup>[166]</sup>、运输机器人等均逐渐进入市场。从目前的研发进度看,以番茄、黄瓜、甜椒为对象的果菜采摘机器人,以草莓为代表的浆果采摘机器人<sup>[167-168]</sup>等研发进度很快,许多机型都已进入商业化测试阶段<sup>[169]</sup>,如松下公司计划2019年开始番茄采收机器人的试销<sup>[170]</sup>。其他诸如综合巡检机器人<sup>[171]</sup>、诊断机器人<sup>[172]</sup>、叶菜采收机器人、落蔓机器人等均在加快研发和测试。随着工业和信息产业在新材料、智能制造、5G通讯、AI等方面的技术进步和产业发展,单机商业化的速度将进一步加快,成本也将逐步降低。

#### 3.5 系统集成的智能化生产设施逐步出现

完全通过数字化信息联接各种生产装备而形成的智能农场将是设施农业发展的最高阶段,在实现此目标之前,小规模、局部性的集成化智能生产单元既是研发过程的必经阶段,也是生产实践的迫切要求,并且这种尝



试需要在生产单元结构化程度相对较高的环境下才易于实现。在当前所有设施类型中,近年来方兴未艾的植物工厂<sup>[173-176]</sup>,品种也逐渐由传统的叶菜、香料作物向果菜、花卉拓展。为进一步提高这一高度集约化生产设施的效率,全智能化设施将会率先以植物工厂为平台开始集成<sup>[177]</sup>,如近年来日本松下、三菱等公司正在探索完全由机械手操作的植物工厂<sup>[178]</sup>。从经济角度看,虽然目前植物工厂的投入成本还是相对较高<sup>[179-180]</sup>,但随着以植物工厂为代表的都市农业不断升温,以自动化和智能化为主要手段来降低成本的趋势将更加明显。

#### 4 讨论和建议

在农业全球化的背景下,智能化技术装备将是包括设施园艺在内的新一轮农业竞争的焦点之一,中国既承担着满足国内社会转型、消费升级和生态需求的重任,也肩负着稳定世界农产品市场的国际责任。作为世界设施园艺面积最大的国家<sup>[181]</sup>,智能化技术装备可以全面促进技术升级、产业转型和竞争力弯道超车,支撑中国城镇化发展和乡村振兴战略的实施。因此,中国在大力发展智能化工业和服务业的同时,应当将农业智能化作为重要的战略性发展目标之一,并率先在设施园艺这一生产参数可控度和相对效益较高的行业率先探索实践,以提高技术进步效率和发挥示范引领作用。

1) 主动适应设施园艺智能化的趋势。克服被动和跟随的产业推动模式和技术研发模式,通过各种方式,研究并准确预见设施园艺智能化发展可能带来的生产方式和竞争态势变化,在产业发展规划和政策、技术发展战略等宏观方面具有前瞻性。在技术引进、知识产权保护、技术转移等方面采取相应的保护和促进措施。

2) 努力形成中国的核心技术和产品体系。针对关键零部件、大数据构建和挖掘、系统集成等关键环节加大投入,国家应设置连续的共性基础研究支持项目,鼓励协同创新、跨行业联合,构建具有中国特色的技术支撑体系。鼓励企业成为创新主体,特别是在大数据共建共享、产品集成和服务方面形成稳定的推广和服务体系。

3) 大力加强国际技术、人才和商业合作。中国设施园艺智能化技术起步较晚,目前的研究项目数量、研发团队规模、企业投入都相对弱小,但在 AI 等技术发展的外部环境上却十分有利,并具有巨大的市场潜力。因此,在技术、产业的发展上要扩大开放,积极引进先进技术和产品,利用本地优势吸引国外高水平专家,同时推动中国产品在“一带一路”等框架下的输出。

4) 加快各类智能化生产模式的研究示范。智能化作为生产方式的一种革命,随着制造成本的下降和农产品销售价格的上升,必然会在适当的时刻成为主流。因此中国应加大在技术、组织、产业 3 方面的创新探索,以适度先进的技术装备为基础、以适当的组织方式为经营主体、以良好的政策与产业环境为保障,探索形成适应中国自然、社会特点和市场需求的新一代生产模式,形成设施园艺和智能化装备制造业的共促共赢。

#### 5 结论

设施园艺智能化正成为产业发展的时代潮流和全球设施园艺产业升级的重要标志,在未来 5~10a 内,育苗、收获、植保等智能化装备将在设施园艺发达国家率先实现商品化应用,全智能生产的植物工厂也将出现。在全球化背景下,受价格竞争和技术输出的影响,各国都将加快设施园艺产业装备升级。在农业供给侧改革深入推进的长期趋势下,中国高品质农产品需求加快增长,并对设施园艺的生产成本、质量和供给效率提出更高要求,智能化装备的市场空间巨大。为保障园艺产品供给的数量质量和质量安全,中国应在智能化上升为国家战略的大背景下,将设施园艺智能化装备研发作为实现农业产业技术升级的重要举措,力争在主要环节、重点装备上优先研发、率先突破。为此,一要充分考虑中国设施园艺数量大、类型杂、层次多的特点,在洞悉世界发展特点的前提下确立具有高度适应性和针对性的中国设施园艺智能装备研发目标体系;二要借鉴发达国家在注重国际合作、协同研发、强调企业主体等方面成功经验,形成以自主创新为主的研发推广体制机制;三要在政府科研投入、政策引导、金融支持、知识产权交易与保护等方面加大对设施园艺智能化的倾斜,通过构建良好的发展环境,让更多的机构、人才、资金、技术进入该领域。通过上述措施,使中国设施园艺产业能够抓住此次智能化技术革命的机遇,成为智慧农业和中国农业现代化的领头羊。

#### [参 考 文 献]

- [1] 贾根良. 第三次工业革命与工业智能化[J]. 中国社会科学, 2016(6): 87-106.  
Jia Genliang. The third industrial revolution and industrial intellectualization[J]. Social Sciences in China, 2016(6): 87-106. (in Chinese with English abstract)
- [2] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 201526(17): 2273-2284.  
Zhou Ji. Intelligent manufacturing main direction of “Made in China 2025”[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284. (in Chinese with English abstract)
- [3] 国务院. 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知[EB/OL]. 2015-05-19[2018-5-12]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm).
- [4] 杨静. 国内外智能化控制系统发展态势的研究[J]. 装备机械, 2016(1): 59-64.
- [5] 肖武坤. 工业 4.0 背景下工业设计在汽车智能化中的应用探析——以特斯拉为例[J]. 时代汽车, 2016(12): 25-26.
- [6] 骆金威, 李飞, 卢大伟. 航空结构件智能化加工设备的发展方向[J]. 航空制造技术, 2017(6): 51-54.  
Luo Jinwei, Li Fei, Lu Dawei. Future directions of intelligent machining equipment for aeronautic structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(6): 51-54. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘焕彬, 李继庚. 工业 4.0 及构建智能造纸企业的思考[J]. 造纸科学与技术, 2016(3): 1-15.  
Liu Huanbin, Li Jigeng. Reflect on industry 4.0 and how to build the smart paper-enterprise[J]. Paper Science &

- Technology, 2016(3): 1—15. (in Chinese with English abstract)
- [8] 袁粤. 浅析未来工业机器人发展方向与智能化[J]. 科技经济导刊, 2017(9): 69.
- [9] Matt McFarland. Farmers turn to artificial intelligence to grow better crops [EB/OL]. 2017-7-26[2018-5-12]. <http://money.cnn.com/2017/07/26/technology/future/farming-ai-tomatoes/index.html>.
- [10] National Science Foundation. National robotics initiative 2.0: Ubiquitous collaborative robots (NRI-2.0) [EB/OL]. 2017-11-21[2018-5-12]. [https://www.nsf.gov/publications/pub\\_summ.jsp?ods\\_key=nsf18518](https://www.nsf.gov/publications/pub_summ.jsp?ods_key=nsf18518).
- [11] HortiBiz. UK: More investment in automation is needed [EB/OL]. 2018-1-26[2018-5-12]. <http://www.hortibiz.com/item/news/uk-more-investment-in-automation-is-needed>.
- [12] HortiBiz. AHDB Hort. Launches robotics survey in UK [EB/OL]. 2017-9-1[2018-5-12]. <http://www.hortibiz.com/item/news/ahdb-horticulture-launches-robotics-survey>.
- [13] Autonomous greenhouses. Autonomous Greenhouses [EB/OL]. 2018-3-21[2018-5-12]. <https://www.autonomousgreenhouses.com/en/autonomousgreenhouses.htm>.
- [14] Hortidaily. Autostix to set a new industry standard[EB/OL]. 2017-6-6[2018-5-12]. <http://www.hortidaily.com/article/35268/Autostix-to-set-a-new-industry-standard>.
- [15] Wageningen university&research. PhenomicsNL-WUR [EB/OL]. 2017-03-23[2018-5-12]. <http://www.wur.nl/en/Research-Results/Projects-and-programmes/PhenomicsNL.htm>.
- [16] HortiBiz. Japanese companies in race for farm tech[EB/OL]. 2016-10-07[2018-5-12]. <http://www.hortibiz.com/item/news/japanese-companies-in-race-for-farm-tech/>.
- [17] HortiBiz. Panasonic develops tomato-picking robot[EB/OL]. 2016-10-06[2018-5-12]. <http://www.hortibiz.com/item/news/panasonic-develops-tomato-picking-robot/>.
- [18] GetFarming. Mission to MARS for Australian vegetable industry [EB/OL]. 2018-4-4[2018-5-12]. <http://www.getfarming.com.au/2017/03/28/mission-mars-australian-vegetable-industry/>.
- [19] ABC Rural. Horticulture hub for robot research could bear fruit within a couple of years, even in internet black spots [EB/OL]. 2018-4-4[2018-5-12]. <http://www.abc.net.au/news/rural/2016-10-06/horticulture-innovation-funds-establish-robot-research-hub/7908502?section=technology>.
- [20] ABC News (Australian Broadcasting Corporation). Swarm farm robotics launches world-first crop spraying technology in Queensland[EB/OL]. 2016-10-06[2018-5-12]. <http://www.abc.net.au/news/2016-03-22/campbell-newman-robotics-robots-emerald-youth-employment/7265932>.
- [21] EURACTIV. Farming 4.0: The future of agriculture? [EB/OL]. 2016-11-8[2018-5-12]. <https://www.euractiv.com/section/agriculture-food/infographic/farming-4-0-the-future-of-agriculture/>.
- [22] 工业和信息化部. 三部委关于印发《农机装备发展行动方案(2016—2025)》的通知[EB/OL]. 2016-12-22[2018-5-12]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757018/c5433686/content.html>.
- [23] 国务院. 国务院关于印发新一代人工智能发展规划的通知(国发〔2017〕35号) [EB/OL]. 2017-07-20[2018-5-12]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content\\_5211996.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm).
- [24] 农业部规划设计研究院. 国家重点研发计划“温室智能化精细生产技术与装备研发”在京启动[EB/OL]. 2017-09-26[2018-5-12]. [http://www.caae.com.cn/kygz/gzdt\\_88/201709/t20170926\\_5828614.htm](http://www.caae.com.cn/kygz/gzdt_88/201709/t20170926_5828614.htm).
- [25] 李中华, 孙少磊, 丁小明, 等. 我国设施园艺机械化水平现状与评价研究[J]. 新疆农业科学, 2014(6): 1143—1148.
- Li Zhonghua, Sun Shaolei, Ding Xiaoming, et al. Research on the present situation and evaluation of protected horticulture mechanization level in China[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2014(6): 1143—1148. (in Chinese with English abstract)
- [26] 邢硕. 天津市武清区设施农业机械化技术发展现状及对策[J]. 农业工程, 2018(1): 22—24.
- Xing Shuo. Development status and counter measures of facility agriculture mechanization technology in Wuqing district of Tianjin city[J]. Agricultural Engineering, 2018(1): 22—24. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张鲁云, 杨耀武, 郑炫, 等. 新疆兵团设施园艺机械化发展现状及建议[J]. 农机化研究, 2015(5): 264—268.
- Zhang Luyun, Yang Yaowu, Zheng Xuan, et al. Xinjiang crops protected horticulture agriculture mechanization development status analysis and suggestions[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(5): 264—268. (in Chinese with English abstract)
- [28] 何芬, 丁小明, 李中华, 等. 设施农业机械化水平评价指标体系构建[J]. 农机化研究, 2013(12): 47—51.
- He Fen, Ding Xiaoming, Li Zhonghua, et al. Based on the CAD variable geometric method for solving kinematics analysis of harvesting robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(12): 47—51. (in Chinese with English abstract)
- [29] NY/T 1408.6-2016 农业机械化水平评价第6部分: 设施农业[S]. 农业部: 中华人民共和国农业部公告第2405号, 2016.
- [30] 中国政府网. 主要农作物生产全程机械化深入推进 [EB/OL]. 2018-4-4[2018-5-12]. [http://www.gov.cn/shuju/2016-12/07/content\\_5144560.htm](http://www.gov.cn/shuju/2016-12/07/content_5144560.htm).
- [31] 张跃峰, 秦四春. 设施园艺智能化发展趋势与路径[J]. 温室园艺, 2015(9): 25—28.
- [32] 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[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 1—9.
- Qi Fei, Wei Xiaoming, Zhang Yuefeng. Development status and future research emphases on greenhouse horticultural equipment and its relative technology in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(24): 1—9.
- [33] 蔡秀玲, 高文群. 中国智能制造对农业转移劳动力就业的影响[J]. 福建师范大学学报: 哲学社会科学版, 2017(1): 68—78.
- Cai Xiuling, Gao Wenqun. Influence of China's intelligent manufacturing on the employment of agricultural transfer labor[J]. Journal of Fujian Normal University: Philosophy and Social Sciences Edition, 2017(1): 68—78. (in Chinese with English abstract)
- [34] HortiBiz. Agribusiness US: 'Get us workers'[EB/OL]. 2016-10-07[2018-5-12]. <http://www.hortibiz.com/item/news/agribusiness-us-get-us-workers/>.
- [35] 齐飞, 周新群, 张跃峰, 等. 世界现代化温室装备技术发展及对中国的启示[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 279—285.
- Qi Fei, Zhou Xinqun, Zhang Yuefeng, et al. Development of world greenhouse equipment and technology and some implications to China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 279—285. (in Chinese with English abstract)

- [36] Tillett N D. Robotic manipulators in horticulture: A review[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 55(2): 89—105.
- [37] Kondo N, Monta M, Fujiura T. Fruit harvesting robots in Japan[J]. Advances in Space Research, 1996, 18(1/2): 181.
- [38] Tillett N D, He W, Tillett R D. Development of a vision guided robot manipulator for packing horticultural produce[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 61(3): 145—154.
- [39] Gil Press. Top 10 hot artificial intelligence (AI) technologies [EB/OL]. 2018-4-8[2018-5-12]. <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2017/01/23/top-10-hot-artificial-intelligence-ai-technologies/#7ed24b271928>.
- [40] 网易科技. 人工智能的十个里程碑事件, 你知道几个? [EB/OL]. 2017-9-27[2018-5-12]. <http://tech.163.com/17/0927/08/CVB08LD4000981EO.html>.
- [41] 搜狐网. 年终盘点 2017 年人工智能大事件[EB/OL]. 2017-12-22[2018-5-12]. [http://www.sohu.com/a/212148659\\_99970484](http://www.sohu.com/a/212148659_99970484).
- [42] HortiBiz. Silicon valley ventures into high-tech farming [EB/OL]. 2016-10-07[2018-5-12]. [http://www.hortibiz.com/item/news/silicon-valley-ventures-into-high-tech-farming/?tx\\_news\\_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx\\_news\\_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=ceb59ce0efe7289c8ee4ef99d53fcb8d](http://www.hortibiz.com/item/news/silicon-valley-ventures-into-high-tech-farming/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=ceb59ce0efe7289c8ee4ef99d53fcb8d).
- [43] Fruitworldmedia. Robots, sensors, apps: Investment by farmers in AG tech is picking up[EB/OL]. 2016-10-07 [2018-5-12]. <http://fruitworldmedia.com/index.php/featured/robots-sensors-apps-investment-farmers-ag-tech-picking/>.
- [44] HortiBiz. £90M to revolutionise tech in UK agriculture [EB/OL]. 2018-3-5[2018-5-12]. <http://www.hortibiz.com/item/news/pound90m-to-revolutionise-tech-in-uk-agriculture>.
- [45] European Commission. Horizon 2020[EB/OL]. [2018-5-22]. <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>.
- [46] European Commission in the 7th Framework Programme. Intelligent sensing and manipulation for sustainable production and harvesting of high value crops[EB/OL]. [2018-5-22]. <http://www.crops-robots.eu/>.
- [47] Reeler. Responsible ethical learning with robotics [EB/OL]. [2018-5-12]. <http://reeler.eu/>.
- [48] European commission. Sweet pepper harvesting robot [EB/OL]. 2016-10-11[2018-5-12]. <http://www.sweeper-robot.eu/>.
- [49] University of Cambridge. Cambridge and four other universities form agritech partnership[EB/OL]. 2018-4-10 [2018-5-12]. <http://www.cam.ac.uk/news/cambridge-and-four-other-universities-form-agritech-partnership>.
- [50] Fujitsu global. Fujitsu and Kyushu University enter into joint research on AI in agricultural production[EB/OL]. 2018-4-12[2018-5-12]. <http://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2018/0412-01.html>.
- [51] Be Korea-savvy. Government to Create 4, 300 Jobs in smart farm industry[EB/OL]. 2018-4-17 [2018-5-12]. <http://koreabizwire.com/government-to-create-4300-jobs-in-smart-farm-industry/117235>.
- [52] HortiBiz. The race toward auton. greenhouses[EB/OL]. [2018-3-21]. <http://www.hortibiz.com/item/news/intl-challenge-of-self-cultivating-greenhouses/?e=qf2008%40188.com>.
- [53] Autonomous Greenhouses. Build the greenhouse of the future, join our international challenge to improve greenhouses through AI and sensors[EB/OL]. 2018-3-21[2018-5-12]. <http://www.autonomousgreenhouses.com/>.
- [54] 齐飞, 周新群, 丁小明, 等. 设施农业工程技术分类方法探讨[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 1—7.
- Qi Fei, Zhou Xinqun, Ding Xiaoming, et al. Discussion on classification method of protected agricultural engineering technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(10): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [55] CNBC. Wave of agriculture robotics holds potential to ease farm labor crunch[EB/OL]. 2018-3-8[2018-5-12]. <https://www.cnbc.com/2018/03/08/wave-of-agriculture-robotics-holds-potential-to-ease-farm-labor-crunch.html>.
- [56] Los Angeles times. As California's labor shortage grows, farmers race to replace workers with robots[EB/OL]. 2017-7-21[2018-5-12]. <http://www.latimes.com/projects/la-fi-farm-mechanization/>.
- [57] B.L. Loeb. Water Energy Food Nexus[J]. Ozone: Science & Engineering, 2016, 38(3): 173—174.
- [58] 万志远, 戈鹏, 张晓林, 等. 智能制造背景下装备制造业产业升级研究[J]. 世界科技研究与发展, 2018(3): 1—8.
- [59] 李末军. 智能制造领域研究现状及未来发展探讨[J]. 工程技术研究, 2017(3): 26—30.
- [60] 辜松, 杨艳丽, 张跃峰, 等. 荷兰蔬菜种苗生产装备系统发展现状及对中国的启示[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 185—194.
- Gu Song, Yang Yanli, Zhang Yuefeng, et al. Development status of automated equipment systems for greenhouse vegetable seedlings production in Netherlands and its inspiration for China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 185—194. (in Chinese with English abstract)
- [61] Urbinati. LAV 10 - Traywasher, washing lines[EB/OL]. [2018-5-22]. <https://www.urbinati.com/en/product/traywasher-lav10/>.
- [62] Urbinati. MC1120 Soil mixer[EB/OL]. [2018-5-22]. <http://en.urbinati.com/product/soilmixer-mc1120-mc2120/>.
- [63] Urbinati. 3561 Gobbler-Bale Processors[EB/OL]. 2018-4-12 [2018-5-22]. <http://www.kaseworks.com/products/3561-gobbler.htm>.
- [64] De. Mayer. The container filling machine TM 2018-There's no easier way[EB/OL]. 2018-5-3[2018-5-22]. <http://mayer.de/en/products/filling/potting-machines/tm2018/>.
- [65] Visser horti systems. Robomatic seeder[EB/OL]. [2018-5-22]. <https://www.visser.eu/filling-machines-potting-machines/robomatic-seeder/>.
- [66] The blackmore company. Cylinder seeder[EB/OL]. [2018-5-22]. <http://www.blackmoreco.com/products-and-services/machine-s-and-automation>.
- [67] Visser horti systems. Auto seeder roulette[EB/OL]. [2018-5-22]. <https://www.visser.eu/seeding-machines/auto-seeder-roulette-ssl/>.
- [68] Hamilton-design. Natural seeder-system 3[EB/OL]. 2017-12-19 [2018-5-22]. <http://www.hamilton-design.co.uk/system3.html>.
- [69] Helper Robotech Co., Ltd. Stepping seeder[EB/OL]. [2018-5-22]. [http://helpersys.en.ec21.com/Stepping\\_Seeder-1\\_1319.html](http://helpersys.en.ec21.com/Stepping_Seeder-1_1319.html).
- [70] 姜凯, 张骞, 王秀. 机械式自清洁播种头设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 18—23.
- [71] 杨艳丽, 辜松, 李恺, 等. 大粒种子定向精量播种装置参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 15—22.
- Yang Yanli, Gu Song, Li Kai, et al. Parameters optimization of directing precision seeder for large cucurbitaceous seeds[J].



- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(13): 15—22. (in Chinese with English abstract)
- [72] 田素博, 杨继峰, 王瑞丽, 等. 蔬菜嫁接机嫁接夹振动排序装置工作参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 9—16.
- Tian Subo, Yang Jifeng, Wang Ruili, et al. Optimization experiment of operating parameters on vibration sorting-clip device for vegetable grafting machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(6): 9—16. (in Chinese with English abstract).
- [73] Conic system. EMP-300 [EB/OL]. [2018-5-22]. <http://www.conic-system.com/wp/en/gallery/injection-robot/?lang=en>
- [74] HRC. Ultra grafting robot[EB/OL]. [2018-5-22]. <http://helpersys.cafe24.com/wp/en/portfolio/pro01/>.
- [75] 大越崇博, 小林研. Development of automatic seedling feeding device for cucurbits grafting robot (Part 1) evaluation of automatic stock feeder[J]. Journal of JSAM, 2013, 75: 100—107.
- [76] ISO-group. iso-graft-1200[EB/OL]. [2018-5-22]. <http://www.iso-group.nl/en/machines/iso-graft-1200>.
- [77] ISO-group. iso-3d-sorter[EB/OL]. [2018-5-22]. <http://www.iso-group.nl/en/machines/iso-3d-sorter>.
- [78] 贺磊盈, 蔡丽苑, 武传宇. 基于机器视觉的幼苗自动嫁接参数提取[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 190—195.
- He Leiying, Cai Liyuan, Wu Chuanyu. Vision-based parameters extraction of seedlings for grafting robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 190—195. (in Chinese with English abstract).
- [79] 刘姣娣, 曹卫彬, 许洪振, 等. 自动补苗装置精准定位自适应模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 37—44.
- Liu Jiaodi, Cao Weibin, Xu Hongzhen, et al. Adaptive fuzzy -PID control of accurate orientation for auto -detect seedling supply device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(9): 37—44. (in Chinese with English abstract)
- [80] 王跃勇, 于海业, 刘媛媛. 基于双目立体视觉的机械手移栽穴盘定位方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 43—49.
- Wang Yueyong, Yu Haiye, Liu Yuanyuan. Mechanical transplanting plug tray localization method based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 43—49. (in Chinese with English abstract).
- [81] TTA. Transplanting[EB/OL]. [2018-5-22]. <http://www.tta.eu/products/transplanting/>.
- [82] 辜松. 我国设施园艺智能化生产装备发展现状[J]. 农业工程技术, 2015(28): 46—50.
- [83] Visser horti systems. Pic-o-mat-vision[EB/OL]. [2018-5-22]. <https://www.visser.eu/plug-transplanters/pic-o-mat-vision/>.
- [84] TTA. Flex Sorter [EB/OL]. [2018-5-22]. <http://www.tta.eu/products/grading/flexsorter>.
- [85] ISO-group. ISO cutting planter 4000[EB/OL]. [2018-5-22]. <http://www.iso-group.nl/en/machines/iso-cutting-planter-4000>.
- [86] 高国华, 冯天翔, 李福. 斜入式穴盘苗移栽手爪工作参数优化及试验验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 16—22.
- Gao Guohua, Feng Tianxiang, Li Fu. Working parameters optimization and experimental verification of inclined-inserting transplanting manipulator for plug seedling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(24): 16—22. (in Chinese with English abstract)
- [87] 韩绿化, 毛罕平, 胡建平, 等. 蔬菜穴盘苗自动精确移栽组合式取苗机构设计与测试(英文)[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 17—23.
- Han Lvhu, Mao Hanping, Hu Jianping, et al. Design and test of combined pick-up device for automatic and precise transplanting of vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2015, 31 (Supp.2): 17—23. (in English)
- [88] Visser horti Systems. Visser autostix live demonstrations [EB/OL]. [2018-5-22]. <https://www.visser.eu/autostix-live-demonstrations/>.
- [89] EU scientific foresight study. Precision agriculture and the future of farming in Europe[J]. European Parliamentary Research Service, December 2016, PE 581.892.
- [90] Pekkeriet E J, Henten E J V, Campen J B. Contribution of innovative technologies to new developments in horticulture [J]. Acta Horticulturae, 2015(1099): 45—54.
- [91] Shamshiri R R, Kalantari F, Ting K C, et al. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban farming[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2018, 11(1): 1—18.
- [92] 王纪章, 李萍萍, 毛罕平. 基于作物生长和控制成本的温室气候控制决策支持系统[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 168—171.
- Wang Jizhang, Li Pingping, Mao Hanping. Decision support system for greenhouse environment management based on crop growth and control cost[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(9): 168—171. (in Chinese with English abstract)
- [93] 王立舒, 侯涛, 姜淼. 基于改进多目标进化算法的温室环境优化控制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 131—137.
- Wang Lishu, Hou Tao, Jiang Miao. Improved multi-objective evolutionary algorithm for optimization control in greenhouse environment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(5): 131—137. (in Chinese with English abstract)
- [94] Frank Tobe. Views and forecasts about robotics for the ag industry: The robot report, [EB/OL]. 2016-12-27[2018-5-22]. <https://www.therobotreport.com/views-and-forecasts-about-robotics-for-the-ag-industry>.
- [95] Erik Pekkeriet. Vision technology in horticulture practice[J]. Fruit & Veg Tech 2009, 12(2): 20—22.
- [96] Artificial intelligence in agriculture. Part 2: How farming is going automated with AI technologies.[EB/OL]. [2018-5-22]. <http://ai.business/2016/05/06/artificial-intelligence-in-agriculture-part-2-how-farming-is-going-automated-with-ai-technologies/>.
- [97] 武书彦, 朱坤华, 王辉, 等. 人工智能系统设计在园艺栽培生产中的运用[J]. 农机化研究, 2018(2): 216—220.
- Wu Shuyan, Zhu Kunhua, Wang Hui, et al. The application

- of artificial intelligence system in the production of horticultural cultivation[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2018(2): 216—220(in Chinese with English abstract)
- [98] Growers develop mechanized lean-lower trellis device for tomatoes. Vegetable grower news[EB/OL]. [2018-5-22]. <https://vegetablegrowersnews.com/article/growers-develop-mechanized-lean-lower-trellis-device/>.
- [99] Priva. Priva kompano deleaf-Line [EB/OL]. [2018-5-22]. <https://www.priva.com/uk/discover-priva/news-and-stories/priva-kompano-deleaf-line>.
- [100] HortiBiz. Robots help Australian growers pollinate[EB/OL]. 2016-10-07[2018-5-22]. [http://www.hortibiz.com/item/news/robots-help-australian-growers-pollinate/?tx\\_news\\_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx\\_news\\_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=2b344e690fbc3899f560fbb3d79385](http://www.hortibiz.com/item/news/robots-help-australian-growers-pollinate/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=2b344e690fbc3899f560fbb3d79385).
- [101] CNNtech. This 'bee' drone is a robotic flower pollinator: [EB/OL]. 2017-02-15[2018-5-22]. <http://money.cnn.com/2017/02/15/technology/bee-drone-pollination/index.html>.
- [102] B-Droid-a robot that's busy as a bee: Warsaw University of technology [EB/OL]. 2016-12-2[2018-5-22]. <https://www.pw.edu.pl/engpw/Research/Business-Innovations-Technology-BIT-of-WUT/B-Droid-a-robot-that-s-busy-as-a-bee>.
- [103] Autonomous flying microrobots (RoboBees): Wyss institute [EB/OL]. [2018-5-22]. <https://wyss.harvard.edu/technology/autonomous-flying-microrobots-robobees/>
- [104] HortiBiz. Could robots replace honeybees?[EB/OL]. 2017-06-19 [2018-5-22]. <http://www.hortibiz.com/item/news/could-robots-replace-honeybees-as-pollinators/>.
- [105] Rice knowledge bank.植物保护与 IPM. [EB/OL]. 2013-6-3 [2018-5-22]. <http://www.knowledgebank.irri.org/country-specific/asia/rice-knowledge-for-china/2013-06-03-07-41-48/2013-06-03-07-42-35>.
- [106] Mahlein A K. Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping[J]. Plant Disease, 2016, 100(2): 241-251.
- [107] Cui Shaoqing, Ling Peter, Zhu Heping, et al. Plant pest detection using an artificial nose system: A review[J]. Sensors, 2018, 18: 378.
- [108] 王丹丹, 宋怀波, 何东健. 苹果采摘机器人视觉系统研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 59—69.
- Wang Dandan, Song Huaibo, He Dongjian. Research advance on vision system of apple picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 59—69. (in Chinese with English abstract)
- [109] 彭艳, 刘勇敢, 杨扬, 等. 软体机械手爪在果蔬采摘中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 11—20.
- Peng Yan, Liu Yonggan, Yang Yang, et al. Research progress on application of soft robotic gripper in fruit and vegetable picking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(9): 11—20. (in Chinese with English abstract)
- [110] 王粮局, 张立博, 段运红, 等. 基于视觉伺服的草莓采摘机器人果实定位方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 25—31.
- Wang Liangju, Zhang Libo, Duan Yunhong, et al. Fruit localization for strawberry harvesting robot based on visual servoing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(22): 25—31. (in Chinese with English abstract)
- [111] 许常蕾, 王庆, 陈洪, 等. 基于体感交互的仿上肢采摘机器人系统设计与仿真[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊1): 49—55.
- Xu Changlei, Wang Qing, Chen Hong, et al. Design and simulation of artificial limb picking robot based on somatosensory interaction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(Supp.1): 49—55. (in Chinese with English abstract)
- [112] Barth R, Hemming J, Henten E J V. Design of an eye-in-hand sensing and servo control framework for harvesting robotics in dense vegetation[J]. Biosystems Engineering, 2016, 146: 71—84.
- [113] Kondon, Yatak, Iida M, et al. Development of an end-effector for a tomato cluster harvesting robot[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2010, 3(1): 20—24.
- [114] Han L J, Fujiura T, Yamada H, et al. Cherry tomato harvesting robot with 3-D sensor on its end effector (part 2): Image recognition and harvest experiment[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2010, 62: 127—136.
- [115] Garc A-Luna F, Morales-D AZ A. Towards an artificial vision-robotic system for tomato identification[J]. IFAC Papers On Line, 2016, 49(16): 365—370.
- [116] Zhao H, O'Brien K, Li S, et al. Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides[J]. Science Robotics. 2016, 1(1): eaai7529.
- [117] Octinion. Strawberry picker [EB/OL]. [2018-5-22]. <http://octinion.com/products/harvesting-series/strawberry-picking-robot>.
- [118] Nishina H. Development of speaking plant approach technique for intelligent greenhouse[J]. Agriculture & Agricultural Science Procedia, 2015, 3: 9—13.
- [119] 马伟, 王秀, 刘旺, 等. 温室栽培输送设备试验[J]. 农业工程技术: 温室园艺, 2013(12): 24—25.
- [120] 辜松, 杨艳丽, 张跃峰. 荷兰温室盆花自动化生产装备系统的发展现状[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 1—8.
- Gu Song, Yang Yanli, Zhang Yuefeng. Development status of automated equipment systems for greenhouse potted flowers production in Netherlands[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(19): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [121] 潘海兵, 万鹏, 黎煊, 等. 基于自动导引小车系统盆栽水稻高通量输送系统的设计[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 136—143.
- Pan Haibing, Wan Peng, Li Xuan, et al. Design of high throughput conveyor system of potted rice based on automated guided vehicle system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(4): 136—143. (in Chinese with English abstract)
- [122] Hortidaily: Netherlands-Nursery Duijnsveld uses AGV pepper trolleys [EB/OL]. 2013-7-12[2018-5-22]. <http://www.hortidaily.com/article/2900/Netherlands-Nursery-Duijnsveld-uses-AGV-pepper-trolleys>.
- [123] 王伟琳, 何芬, 丁小明, 等. 基于智能物流车的种苗生产物流规划研究[J]. 北方园艺, 2017(24): 215—218.

- [124] This Robotic Wheelbarrow will follow farmworkers as they pick berries[EB/OL]. 2018-3-5[2018-5-22]. <https://www.fastcompany.com/40535591/this-robotic-wheelbarrow-will-follow-farmworkers-as-they-pick-berries>.
- [125] Robots used in greenhouses to improve productivity[EB/OL]. 2015-5-2[2018-5-22]. <https://www.controleng.com/single-article/robots-used-in-greenhouses-to-improve-productivity/45b6143e52894edac5be623674279884.html>.
- [126] Khoje S. Appearance and characterization of fruit image textures for quality sorting using wavelet transform and genetic algorithms[J]. *Journal of Texture Studies*, 2017, 49(6): 65—83.
- [127] Kumar R A, Rajpurohit V S, Nargund V B. A neural network assisted machine vision system for sorting pomegranate fruits[C]// Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies. IEEE, 2017: 1—9.
- [128] Song X, Yang L. The study of adaptive multi threshold segmentation method for apple fruit based on the fractal characteristics[C]. *International Symposium on Computational Intelligence and Design*. IEEE, 2016: 168—171.
- [129] Lou H, Hu Y, Wang B, et al. Dried jujube classification using support vector machine based on fractal parameters and red, green and blue intensity[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2012, 47(9): 1951—1957.
- [130] Jafri M Z M, Tan S C. Feature selection from hyper spectral imaging for guava fruit defects detection[C]. *Digital Optical Technologies*. International Society for Optics and Photonics, 2017: 103351E.
- [131] Wu Y, Li L, Liu L, et al. Nondestructive measurement of internal quality attributes of apple fruit by using NIR spectroscopy[J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2017: 1—17.
- [132] Cheng X. NIR/MIR dual-sensor machine vision system for online apple stem-end/calyx recognition[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(2): 551—558.
- [133] 张方明, 应义斌. 水果分级机器人关键技术的研究和发展[J]. *机器人技术与应用*, 2004(1): 33—37.  
Zhang Fangming, Ying Yibin. Research and development on the key technologies of fruit grading robot[J]. *Robot Technique and Application*, 2004(1): 33—37. (in Chinese with English abstract)
- [134] Fresh Plaza. MAF Roda launches first ever dragon fruit sorting line [EB/OL]. 2017-7-21[2018-5-22]. <http://www.freshplaza.com/article/179255/MAF-Roda-launches-first-ever-dragon-fruit-sorting-line>.
- [135] Kaminaga Shunsuke, Takahashi Fumio, Katahir Mitsuhiro, et al. Development for Vegetable soybean (edamame) sorting machine to use image processing[M]. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*, 2015.
- [136] 张立彬, 胡海根, 计时鸣, 等. 果蔬产品品质无损检测技术的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(4): 176—180.  
Zhang Libin, Hu Haigen, Ji Shiming, et al. Review of non-destructive quality evaluation technology for fruit and vegetable products[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(4): 176—180. (in Chinese with English abstract)
- [137] 郭志明, 陈全胜, 张彬, 等. 果蔬品质手持式近红外光谱检测系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 245—250.  
Guo Zhiming, Chen Quansheng, Zhang Bin, et al. Design and experiment of handheld near-infrared spectrometer for determination of fruit and vegetable quality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(8): 245—250. (in Chinese with English abstract)
- [138] 中国果蔬分选设备先行者, 挖掘先锋水果人的创业精神[EB/OL]. 2017-10-18[2018-7-2]. [http://www.sohu.com/a/198620288\\_99988178](http://www.sohu.com/a/198620288_99988178)
- [139] Hortidaily.Japan: Farmer develops cucumber sorting machine with the help of Google. [EB/OL]. 2016-9-6[2018-5-22]. <http://www.hortidaily.com/article/28517/Japan-Farmer-develops-cucumber-sorting-machine-with-the-help-of-Google>.
- [140] 范双喜, 陈湘宁. 我国叶类蔬菜采后加工现状及展望[J]. *食品科学技术学报*, 2014(5): 1—5.  
Fan Shuangxi, Chen Xiangning. Present aspects and prospect of post-harvest processing and preservation of China leafy vegetables[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014(5): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [141] 赵晓燕. 我国蔬菜采后加工产业现状及展望[J]. *中国蔬菜*, 2013(3): 1—5.
- [142] Ftnon. Ftnon is a global leader in washing equipment [EB/OL]. [2018-5-22]. <https://www.ftnon.com/processes/washing/>
- [143] Alexander solia food processing. SWA 60.2[EB/OL]. [2018-5-22]. <https://www.alexandersolia.de/>
- [144] Sormac. Washer pulstar[EB/OL]. [2018-5-22]. <https://www.sormac.eu/en/machines/washer/>
- [145] 李佳伟, 杜志龙, 宋程. 我国蔬菜清洗技术及设备研究进展[J]. *包装与食品机械*, 2017, 35(3): 46—51.  
Li Jiawei, Du Zhilong. Developing status of vegetables cleaning techniques and equipments in China[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2017, 35(3): 46—51. (in Chinese with English abstract)
- [146] 科迈达. TS 型卧式混流喷冲清洗机[EB/OL]. [2018-7-2]. <http://www.colead.cc/Product/view/id/26.html>
- [147] 雷昊, 谢晶. 新鲜蔬菜采后清洗、包装处理研究进展[J]. *食品与机械*, 2016, 32(6): 215—219.  
Lei Hao, Xie Jing. Progress on cleaning and packaging of postharvest fresh vegetables[J]. *Food and Machinery*, 2016, 32(6): 215—219. (in Chinese with English abstract)
- [148] Major robotics investment cuts labour by 80 percent[EB/OL]. 2017-9-19[2018-5-22]. <http://www.fruitnet.com/fpj/article/173430/robotics-investment-cuts-labour-by-80-per-cent>.
- [149] HortiBiz. Robots to assist in the packing of produce: [EB/OL]. 2016-10-06[2018-5-22]. [http://www.hortibiz.com/item/news/robots-to-assist-in-the-packing-of-produce/?tx\\_news\\_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx\\_news\\_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=ab6a617f3c5a15c7958fafa31fdd85e7](http://www.hortibiz.com/item/news/robots-to-assist-in-the-packing-of-produce/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=ab6a617f3c5a15c7958fafa31fdd85e7).
- [150] Slash Gear. Ocado tests gentle robot hands for picking and packing fruit [EB/OL]. 2017-1-31[2018-5-22]. <https://www.slashgear.com/ocado-tests-gentle-robot-hands-for-picking-and-packing-fruit-31473420/>.
- [151] Hortidaily.Netherlands: Packing robots greenhouse vegetables: automation and distinction [EB/OL]. 2014-4-10 [2018-5-22]. <http://www.hortidaily.com/article/1710/Netherlands-Packing-robots-greenhouse-vegetables-automation-and-distinction>.
- [152] 机器人网. 协作机器人推进包装业实现自动化[EB/OL]. 2016-6-1. <http://robot.ofweek.com/2016-06/ART-8321202-8470-29103073.html>

- [153] Robots bringing huge benefits to farming[EB/OL]. 2016-12-12 [2018-5-22]. <http://www.hortibiz.com/item/news/robots-are-bringing-huge-benefits-to-farming/>.
- [154] Fruit world media. Robots: Huge potential for robotics in the agriculture industry [EB/OL]. 2016-10-07[2018-5-22]. <http://fruitworldmedia.com/index.php/featured/robots-huge-potential-robotics-agriculture-industry/>.
- [155] Hortidaily. Naturipe berry growers invests in harvest CROO robotics[EB/OL]. 2016-10-14[2018-5-22]. <http://www.hortidaily.com/article/29023/Naturipe-Berry-Growers-invests-in-Harvest-CROO-Robotics>.
- [156] 姚益平, 苏高利, 罗卫红, 等. 基于光热资源的中国温室气候区划与能耗估算系统建立[J]. 中国农业科学, 2011(5): 898—908.  
Yao Yiping, Su Gaoli, Luo Weihong, et al. A photo-thermal resources based system for greenhouse climate zonation and energy consumption estimation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011(5): 898—908. (in Chinese with English abstract)
- [157] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [158] The Irish Times. Robots on the farm-and they're environment friendly[EB/OL]. 2017-8-16[2018-5-22]. <https://www.irishtimes.com/news/environment/robots-on-the-farm-and-they-re-environment-friendly-1.3139001>.
- [159] Euronews. Flora Robotica: The team of European scientists putting plants and machines together to construct the buildings of the future[EB/OL]. 2018-1-22[2018-5-22]. <http://www.euronews.com/2018/01/22/flora-robotica-the-team-of-european-scientists-putting-plants-and-machines>.
- [160] Hortidaily. Robots as builders in sustainable plant architecture [EB/OL]. 2016-11-18[2018-5-22]. <http://www.hortidaily.com/article/30367/Robots-as-builders-in-sustainable-plant-architecture>.
- [161] 路甬祥. 走向绿色和智能制造——中国制造发展之路[J]. 中国机械工程, 2010(4): 379—386.
- [162] 伍晓榕, 张树有, 裘乐淼, 等. 面向绿色制造的加工工艺参数决策方法及应用[J]. 机械工程学报, 2013(7): 91—100.  
Wu Xiaorong, Zhang Shuyou, Qiu Lemiao, et al. Decision making method of process parameter selection for green manufacturing based on a DEMATEL-VIKOR algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013(7): 91—100. (in Chinese with English abstract)
- [163] 邢杰, 赵键, 孙毅莹, 等. 温室作业人群长期农药暴露相关生物学标志物研究[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(8): 710—712.  
Xing Jie, Zhao Jian, Sun Yiying, et al. Biomarkers for greenhouse workers with long-term exposure to pesticides[J]. Journal of Environment and Health, 2014, 31(8): 710—712. (in Chinese with English abstract)
- [164] HortiBiz. US: Nursery saves costs through robots [EB/OL]. 2016-10-07[2018-5-22]. [http://www.hortibiz.com/item/news/us-nursery-saves-costs-through-robots/?tx\\_news\\_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx\\_news\\_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=906db60bddd89d87733be5f625c63905](http://www.hortibiz.com/item/news/us-nursery-saves-costs-through-robots/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=906db60bddd89d87733be5f625c63905).
- [165] Priva. Tomato growers convinced of robotics-three growers take a head start with the Priva Deleafing Robot[EB/OL]. 2016-10-11[2018-5-22]. <http://www.priva-international.com/en/stay-informed/news-archive/tomato-growers-convinced-of-robotics-%E2%80%93-three-growers-take-a-head-start-with-the-priva-deleafing-robot/>.
- [166] Produce growing. Robotic weeder makes its debut [EB/OL]. 2016-10-06[2018-5-22]. <http://www.growingproduce.com/vegetables/robotic-weeder-makes-its-debut/>.
- [167] The salt: NPR. Robots are trying to pick strawberries. So far, they're not very good at it [EB/OL]. 2018-3-20 [2018-5-22]. <https://www.npr.org/sections/thesalt/2018/03/20/592857197/robots-are-trying-to-pick-strawberries-so-far-theyre-not-very-good-at-it>.
- [168] My suncoast. A robot picking strawberries [EB/OL]. 2018-4-19 [2018-5-22]. [http://www.mysuncoast.com/news/a-robot-picking-strawberries/article\\_cf226e26-441e-11e8-84d7-2b9dbf7ff706.html](http://www.mysuncoast.com/news/a-robot-picking-strawberries/article_cf226e26-441e-11e8-84d7-2b9dbf7ff706.html).
- [169] Fruit world media. Sweet-pepper harvesting robot Sweeper ready for testing[EB/OL]. 2016-10-07[2018-5-22]. <http://fruitworldmedia.com/index.php/featured/1800/>.
- [170] Tomato-harvesting robot to be marketed: HortiBiz[EB/OL]. 2017-02-28[2018-5-22]. <http://www.hortibiz.com/item/news/tomato-harvesting-robot-to-be-commercialized/>.
- [171] HortiBiz. Scout robot predicts crop stress devt. [EB/OL]. 2018-5-9[2018-5-22]. <http://www.hortibiz.com/item/news/scout-robot-predicts-crop-stress-devt/?e=qf2008%40188.com>.
- [172] Fruit world media. Robot detects plant damage before you do[EB/OL]. 2016-10-06[2018-5-22]. <http://fruitworldmedia.com/index.php/featured/robot-detects-plant-damage/>.
- [173] Fruit Net.eurofruit. Staay confirms vertical farm plan [EB/OL]. 2018-4-26[2018-5-22]. <http://www.fruitnet.com/article/175419/staay-confirms-vertical-farm-plan>.
- [174] Greenhouse Canada. The new wave of farming guelph vertical farm brings leafy green production to industrial property[EB/OL]. 2017-11-1[2018-5-22]. <https://www.greenhousecanada.com/structures-equipment/greenhouses/technology-issues-%E2%80%93-the-new-wave-of-farming-32204>.
- [175] Nwosisi S, Nandwani D, Chowdhury S. Organic vertical gardening for urban communities[C]//VI International Conference on Landscape and Urban Horticulture 1189. 2016: 399—402.
- [176] Nicole C C S, Charalambous F, Martinakos S, et al. Lettuce growth and quality optimization in a plant factory[C]//VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134. 2016: 231-238.
- [177] HortiBiz. Robots meet indoor farming [EB/OL]. 2017-02-28 [2018-5-22]. <http://www.hortibiz.com/item/news/robots-meet-indoor-farming/>.
- [178] Okada H, Tada M, Sakai Y. Necessity of the Automation in a Large-Scale Greenhouse (plant factory)[J]. Shokubutsu Kojo Gakkaishi, 2011, 23(2): 44—51.
- [179] Shao Y, Heath T, Zhu Y. Developing an economic estimation system for vertical farms[J]. International Journal of Agricultural & Environmental Information Systems, 2017, 7(2): 26—51.
- [180] Harbick K, Albright L D. Comparison of energy consumption: greenhouses and plant factories[C]//VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134. 2016: 285-292.
- [181] 新华网: 我国设施园艺面积达 370 万公顷居世界首位 [EB/OL]. 2017-8-21[2018-7-2]. [http://www.xinhuanet.com/politics/2017-08/21/c\\_1121517077.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2017-08/21/c_1121517077.htm)

## Development of intelligent equipment for protected horticulture in world and enlightenment to China

Qi Fei<sup>1,2</sup>, Li Kai<sup>1,2</sup>, Li Shao<sup>1,2</sup>, He Fen<sup>1,2</sup>, Zhou Xinqun<sup>1</sup>

(1. *Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China;*

2. *Key Laboratory of Farm Building in Structure and Construction, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)*

**Abstract:** Intelligent protected horticulture is the advanced production form of digitization, refinement and automation in the whole process of horticultural products seeding and transplanting, cultivation management, environmental controlling, monitoring and early warning, harvesting and inner logistic etc. It is the hotspot of research and development and also the focus of agriculture upgrading both in China and overseas. In order to locate the development path of China and guide the research and development of the intelligent equipment of Chinese protected horticulture, it is necessary to study and analyze the current status and trend of the world's development in this field. Based on the individuals', enterprises' and institutes' main research in intelligent technology and equipment, the status and prospect of the intelligent equipment are analyzed. Intelligent seed production has been preliminarily realized in sowing and transplanting. The development of intelligent crop production in the aspects of plant adjustment, pollination, plant protection and harvest is speeding up. Some intelligent equipment such as leaf cutting and inspection has entered commercialized trial. Intelligent storage logistics has been continuously improved continuously in internal transportation, classification separation, cleaning, packaging and so on. The intelligent seedbed conveying and transportation robot has been widely applied, and research for high-speed sorting and packaging robots are accelerating research and development. It is found that the demand for intelligent equipment in the world protected horticulture is growing rapidly, the direction of research and development is gradually focused, green and safety are concerned more, commercialization of single machine is accelerating, and the systematic integrated intelligent production facilities are beginning to emerge. The research and analysis results have important reference for the scientific and technological strategy and industrial policy formulation, scientific research project approval, achievement evaluation, international cooperation and equipment research and development for intelligent protected horticulture in China.

**Keywords:** equipment; greenhouses; agriculture; protected horticulture; intelligence; status; prospect