doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.002

# 食用菌采收机器人研究进展与展望

苑　进[1]　陶　凯[1]　辛振波[1]　赵　威[1]　孟庆猛[1]　王耀辉[1]　陈月峰[2]　刘成良[3]

（1. 山东农业大学机械与电子工程学院，泰安 271018；
2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司浙江分公司，绍兴 312039；
3. 上海交通大学机械与动力工程学院，上海 200240）

**摘要**：在食用菌产业规模化与工厂化发展的背景下，采收环节对人工依赖程度高，已成为制约食用菌生产全流程自动化的瓶颈。针对国内主要栽培品种——香菇、金针菇、双孢菇、平菇等，系统梳理了棒栽、床栽、袋栽、瓶栽等不同栽培模式下采收作业环境特点，分析了各类食用菌典型生产模式下的作业约束及技术需求。综述了国内外食用菌采收机器人研究及其产品化进展，对比分析了国外基于标准化栽培体系的自动化技术路线与国内面向多品种、非结构化环境的技术特点，总结了国内外食用菌采收技术差异与发展启示。围绕食用菌采收机器人末端执行器、感知、运动平台与系统集成、具身智能技术应用等方面关键技术，重点评述了夹持式、吸附式、切割式及仿生柔性末端执行器的发展现状，以及深度学习、立体视觉和多模态信息融合技术在成熟度识别与目标定位中应用的发展趋势。讨论了固定式、移动式和轨道式平台在狭窄高湿栽培环境中的适应性及系统集成特点。总结分析当前食用菌采收机器人仍存在感知鲁棒性不足、末端执行器兼容性差、作业效率低和经济性差等技术难点。最后，提出了加强栽培模式标准化与农机农艺融合，发展感知-决策-控制一体化的具身智能采收系统，构建采收、切根、分级等环节协同的自动化生产线等未来技术发展方向。

**关键词**：食用菌；采收机器人；末端执行器；具身智能；栽培模式

**中图分类号**：TP242.6　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)13-0025-20　　**OSID**：

# Research Progress and Outlook on Edible Mushroom Harvesting Robots

Yuan Jin[1]　Tao Kai[1]　Xin Zhenbo[1]　Zhao Wei[1]　Meng Qingmeng[1]　Wang Yaohui[1]
Chen Yuefeng[2]　Liu Chengliang[3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Tai'an* 271018, *China*
2. *Zhejiang Branch*, *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co.*, *Ltd.*, *Shaoxing* 312039, *China*
3. *School of Mechanical Engineering*, *Shanghai Jiaotong University*, *Shanghai* 200240, *China*)

**Abstract**: Against the backdrop of large-scale and industrialized development of the edible mushroom industry, harvesting remains highly dependent on manual labor and has become a key bottleneck restricting full-process automation. Focusing on major cultivated species in China, such as shiitake mushroom, enoki mushroom, button mushroom, and oyster mushroom, the characteristics of harvesting environments under different cultivation modes were systematically reviewed, including log cultivation, bed cultivation, bag cultivation, and bottle cultivation, and the operational constraints and technical requirements associated with typical production systems were analyzed. The research progress and commercialization of edible mushroom harvesting robots at home and abroad were comprehensively reviewed. The automated technical routes adopted in foreign countries under standardized cultivation systems were compared with the domestic technical features oriented toward multiple species and unstructured environments, and the differences and implications of domestic and international harvesting technologies were summarized. Key technologies of edible mushroom harvesting robots were discussed, including end-effectors, perception, mobile platforms, system integration, and embodied intelligence. Particular attention was given to the development of gripping, suction, cutting, and bio-inspired flexible

收稿日期：2026-03-10　修回日期：2026-04-15
**基金项目**：国家重点研发计划项目(2024YFD2000704)和国家自然科学基金项目(52275262)
**作者简介**：苑进(1972—)，男，教授，博士，主要从事农业机器人与智能农机装备研究，E-mail：jyuan@sdau.edu.cn

end-effectors, as well as to the application trends of deep learning, stereo vision, and multimodal information fusion in maturity recognition and target localization. The adaptability and integration characteristics of fixed, mobile, and rail-guided platforms in narrow and humid cultivation environments were also examined. Current technical challenges were summarized, including insufficient perception robustness, poor compatibility of end-effectors, low operational efficiency, and weak economic feasibility. Finally, future prospects were proposed from three aspects: strengthening the standardization of cultivation modes and the integration of agronomy with agricultural machinery, developing embodied intelligent harvesting systems integrating perception, decision-making, and control, and constructing automated production lines that coordinated harvesting, root cutting, grading, and other postharvest processes, so as to provide theoretical support and technical references for the intelligent upgrading of China's edible mushroom industry.

**Key words**: edible mushroom; harvesting robot; end-effector; embodied intelligence; cultivation system

## 0 引言

近年来全球食用菌产业呈稳步扩张态势,消费端由传统食用向功能性、蛋白替代品及深加工延伸,市场规模持续增长[1-3]。中国作为全球最大的食用菌生产国,产业规模庞大且发展迅速,2023 年中国食用菌产量占全球 94.3%,约 4 715 万吨[4-5]。食用菌已成为中国农业产值排名前五的重要领域,其产业拉动能力不容忽视[6-7]。

中国食用菌市场格局复杂,除了传统主力品种如香菇、平菇、木耳、双孢菇等,近年“特色珍稀菌”也实现人工规模化栽培,品种多样性成为中国食用菌产业有别于国外的突出特征[8-9]。2016—2020 年间我国食用菌产业集约化率从 7.15% 提高到 9.7%,趋势明显[10]。

食用菌工厂化生产是指在人为控制各种环境因素的条件下,进行机械化、自动化的食用菌生产[11]。目前基质处理、灭菌与环境控制等环节已实现较高机械化/数字化水平,但采摘环节仍主要依赖人工,劳动强度高、作业环境高湿、采摘效率低且品质不易保障。在劳动力短缺和人工成本上升背景下,自动化采收已成为制约工厂化生产效率与品质提升的关键瓶颈,选择性采收机器人需求日益突出[12]。

综上,食用菌产业未来要实现大范围自动化采收商业化应用,需要综合机器人、人工智能、计算机视觉、智能控制等技术,跨学科联合攻关,将成为未来产业升级关键路径[13]。据此,本文围绕图 1 所示研究框架,聚焦以下几个维度:系统分析不同品种(双孢菇、香菇、平菇、金针菇、木耳、草菇等)的栽培方式与采收特征;探讨各类生产模式(床栽、袋栽、瓶栽、椴木等)对采收机器人的影响;总结视觉感知、末端执行器、平台设计与控制、系统集成等关键技术进展;展望中国特色的食用菌产业化应用路径与自动化采收系统发展方向。

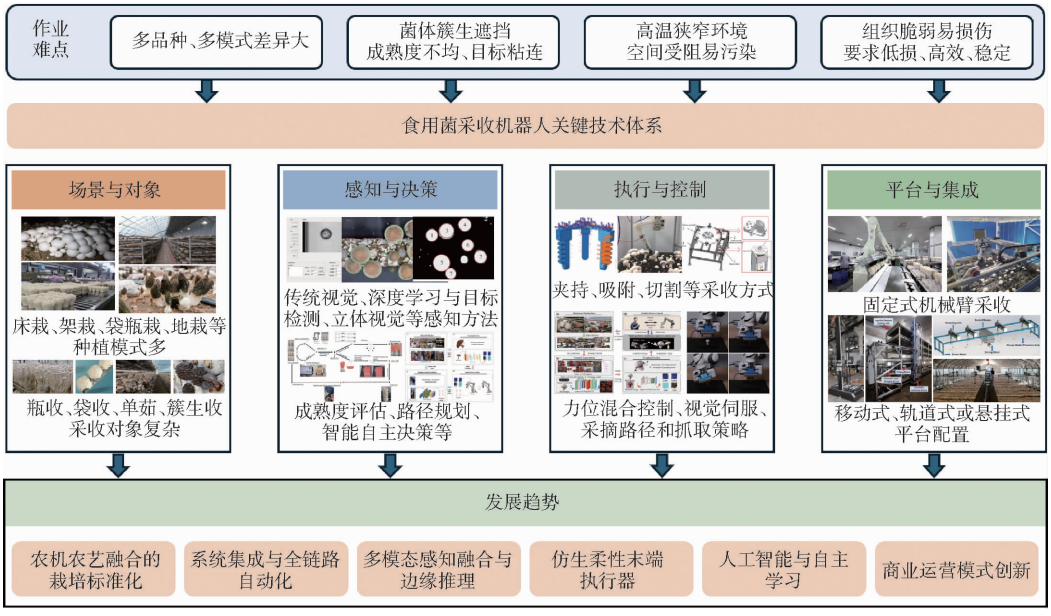



图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

## 1　食用菌生产模式与采收需求

### 1.1　食用菌生产模式

从食用菌产业链结构方面看，现代化食用菌工厂化生产流程如图 2 所示，可概括为：原料预处理与培养基制备、高温灭菌/巴氏灭菌与冷却、接种与基质混匀（拌种）、装袋/装盘/出菇床布料、诱导出菇与环境调控、出菇管理与采收、采后处理（挑拣、分级、包装与冷链运输），以及废弃物处理与综合利用[14-16]。其中，基质制备、灭菌、接种装袋及环境调控等环节已具备较高机械化和数字化水平，而采收环节国内外目前仍然主要依赖人工作业[17]。在分拣、分级与包装环节中，鲜蘑与加工用菌之间差异明显，加工企业更多采用机械化分选与气流/振动分级线[18]。

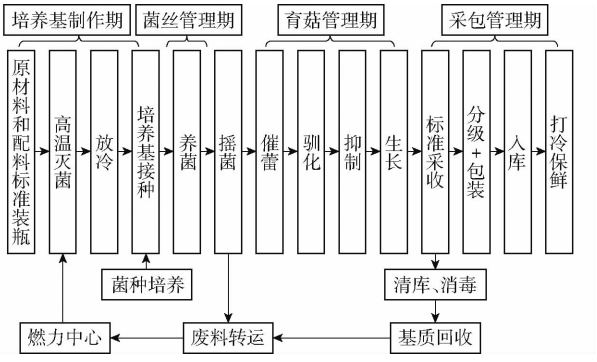



图 2　食用菌生产流程图

Fig. 2　Production process of edible mushrooms

综合近年行业现状，食用菌生产各环节的机械化、自动化发展不均衡，其自动化水平的分布大致可以归类为 3 挡：

（1）低自动化/传统小农户 L1：以人工为主、简单基质装袋机械化（出菇棚人工经验管理）。

（2）半自动化/规模化工厂 L2：机械化完成基质混合、装袋、部分灭菌与输送，环境控制数字化；接种、挑选与采收仍大量依赖人工或半自动装备。

（3）高自动化/智慧工厂 L3：实现自动化接种、输送线、可编程环境控制、自动分拣与包装，并结合简单机器人或机械臂用于采收/分拣（主要用于金针菇/双孢菇/香菇等菌类商业化高端产线及集装箱/模块化工厂）。

综上，尽管在多数现代化食用菌工厂中，“原料处理-灭菌-接种-发菌-环境控制”等环节已实现较高水平的机械化与自动化，但出菇采收环节的自动化仍然滞后，被视为制约产业升级“卡脖子”技术。

### 1.2　中国主要食用菌品种及栽培现状

中国是全球最大的食用菌生产国，据统计香菇、平菇、黑木耳、金针菇和双孢蘑菇构成了主体大宗品种，合计产量占比超过 80%。草菇、杏鲍菇、银耳以及羊肚菌、猴头菇、灵芝等特色菌类也发展较快。中国食用菌产业既有数量优势，又呈现出品种多样化、区域差异化和工厂化生产快速扩张的特征[19-20]。从栽培模式看（图 3），主要分为以下几类：




图 3　常见食用菌栽培模式及代表性菌类

Fig. 3　Common cultivation modes of edible mushrooms and representative mushroom species

（1）出菇床栽培

代表品种为双孢菇和草菇，前者是欧美国家主要品种，中国也有较大产量，后者属于中国南方高温地区特有品种。该模式在平铺基质上集中出菇，双孢菇多潮次采收，草菇则在高温高湿条件下生长快、采收窗口短。床栽的特点是立体多层同步出菇，菇体密集、个体差异明显，人工采收需依赖经验判断成熟度后，通过轻柔扭拔选择性收获，稍有不慎易损伤菇体或破坏菌床[21]。

（2）菌棒栽培

该模式以香菇为代表。我国香菇年产量超过 1 000 万吨，占全球 95% 以上。香菇菌棒发菌后，移

除菌袋,子实体在菌棒侧面出菇。菌棒多采用立式或卧式多层摆放。香菇采收前需疏蕾处理,以保证优质商品率,同时需根据菌盖尺寸或表皮龟裂程度判断成熟度,再进行选择性采收,对人工经验依赖较高。由于需多潮次出菇,采收时还要求菌棒保持完整,并控制菌柄残留长度[22]。

(3)菌袋/瓶栽培

该模式是工厂化食用菌生产的典型代表,主要包括金针菇、蟹味菇、海鲜菇、茶树菇、舞菇、杏鲍菇和平菇等,其依托标准化瓶/袋和洁净车间,适合规模化流水线生产。瓶栽金针菇、蟹味菇、海鲜菇等常以“整束切割 + 定型”方式一次性采收;菌袋栽培的平菇、杏鲍菇和鸡腿菇簇生不均、个体差异大,采收需选择性进行,增加机械自动化难度。黑木耳和银耳则以多批次机械化采收为主[23]。

(4)地栽(林下或设施栽培)

珍稀与药食同源菌类主要品种包括羊肚菌、猴头菇、灵芝、松茸、竹荪等。其栽培模式多样,有林下仿野生出菇方式,以及设施化或半工厂化的地栽方式。由于形态差异大、商品化要求高,其采收标准化与机械化难度更高,如羊肚菌需选择性切割,猴头菇需托举后底切,灵芝采收还需兼顾孢子粉收集与污染防控,松茸/牛肝菌则涉及定位和泥沙处理[24]。

整体来看,我国食用菌栽培已经形成“大宗品种工厂化 + 特色品种多样化”的格局。大宗品种在瓶栽、袋栽模式下正加快向标准化和自动化过渡,而珍稀品种自动化采收仍处于探索阶段。随着劳动力成本上升和标准化需求提升,推动不同栽培模式下的自动化采收装备研发,已成为食用菌产业发展的关键趋势。

### 1.3 食用菌机器人采收需求

食用菌工厂化生产的采收环节,高度依赖人工操作,不仅劳动强度大、效率低,而且受制于劳动力成本上升与稳定性不足,成为制约产业升级的瓶颈[25]。

食用菌采收的特殊性主要体现在两个层面:

(1)子实体特性

体积小、形态复杂:不同品种间差异显著,同一批次内个体大小不一,且常簇生、重叠。成熟周期短且不均一:采收窗口狭窄,有的仅数小时,需高频巡检与选择性采收。品质敏感度高:对外观完整性和切口质量要求极高,轻微机械损伤或压痕都会降低商品等级[26-27]。

(2)采收环境条件

高温高湿、易污染:采收环境恒温高湿状态,菌丝与基质易附着,要求机器人具备防水防潮、防污染设计。空间受限、作业通道狭窄:多层架式、瓶栽/袋栽货架等环境限制机器人尺寸和运动自由度,对机械臂伸展性和平台灵活性提出挑战。连续作业与环境兼容性:需长时间稳定运行并能适应不同工厂布局与多品种混合生产环境[28-29]。

上述共性约束条件决定了食用菌采收机器人研发复杂性和系统集成难度,构成采收机器人研发的基本原则:

(1)高采收成功率与低损伤率是首要目标。食用菌的伞盖、菌柄和基质结合部位较为脆弱,若夹持或切割力过大易造成压痕、折裂或污染,直接影响商品性。机器人需具备柔顺控制与低力操作能力,保证子实体外观完整。

(2)采收效率需达到或优于人工水平。部分品种如草菇,其适宜采收窗口仅持续数小时;瓶栽金针菇、蟹味菇成簇集中成熟,需要快速、批量化切割。机器人采收必须在单位时间内完成足够数量作业,才能具备经济性。

(3)成熟度识别与选择性采收是实现高品质产品关键。不同菌种的成熟判据包括伞缘卷曲度、菌幕完整性、伞面裂纹或柄粗细等,机器人需通过多模态视觉感知与智能识别算法准确区分,避免未熟或过熟菇体被采收。

(4)与采后处理环节的无缝对接是实现全流程自动化的必要条件。机器人采收后往往需要切根、分级、称量、包装及冷链运输,如果缺乏接口设计,机械化收益将大打折扣。因此,采收系统需具备标准化接口和流水线集成功能,实现与后续环节的衔接[30]。

不同的食用菌采收机器人也有其独特需求,具体见表 1。共性需求和特定需求决定了其能否实现产业化推广,是后续关键技术研究与应用验证的核心出发点。

## 2 食用菌采收机器人研究与产品化进展

### 2.1 国际食用菌采收机器人研究与产业化进展

#### 2.1.1 发展情况

过去 5 年,国际上食用菌采收机器人逐渐由实验室原型走向现场试验和小规模商业化部署,主要形成两条发展路径:

(1)工艺标准化 + 专用设备:如日本瓶栽(金针菇、舞茸等)高度工业化生产线,通过流程统一和定制化机械,实现了全流程自动化[31]。

(2)研究选择性采收机器人:针对菇床中簇生且大小不均的蘑菇,研发基于 2D/3D 视觉和柔性低损伤末端执行器的单株选择性采收机器人[32]。

**表 1　典型食用菌子实体采收特定需求**

**Tab. 1　Specific harvesting requirements for common edible mushroom fruiting bodies**

| 菌种 | 关键判据 | 成熟期窗口 | 采收动作要点 |
|---|---|---|---|
| 双孢菇 | 帽径、菌盖完整度、开伞度 | 未开伞或微开伞 | 轻抓/微扭/拔取/修根 |
| 香菇 | 伞面平展度、表皮龟裂、菌柄粗细 | 菌盖近水平但不反卷 | 轻扭/拨/拔/剪 |
| 草菇 | 菌被完整、伞未开裂 | 数小时级 | 快速剪/拔 |
| 金针菇 | 束紧密度、柄长一致性、伞未开 | 整束规格化 | 整束切割 + 束带 |
| 蟹味菇<br>鹿茸菇 | 簇形均匀、帽径一致 | 菌柄 3 ~ 5 cm，菌盖呈伞状 | 整簇切—托举放置 |
| 平菇 | 伞面直径、边缘薄厚 | 分批择熟 | 托举—底切—托盘放置 |
| 杏鲍菇 | 柄长/帽径比、柄粗细 | 柄肥厚期 | 单株拔/切 |
| 鸡腿菇 | 伞开度、柄脆性 | 伞半开 | 单株剪/拔 |
| 黑木耳 | 耳片厚度、色泽 | 耳片肥厚 | 剪取/掰取 |
| 银耳 | 花状层叠度、洁白度 | 花球饱满 | 剪取 |
| 猴头菇 | 刺长、球形饱满 | 刺 1 ~ 3 cm | 托举—底切 |
| 灵芝 | 伞厚度、孢子粉沉积 | 伞定型后 | 柄部切割 |

目前商业化最快的方向仍是标准化栽培环境。加拿大 4AG Robotics 公司[33]研发的 Forager 系列双孢菇采摘机器人(HX800)(图 4)集成视觉识别、吸附夹爪和自动修根集箱功能，可直接部署于出菇床架。



图 4　Forager 系列双孢菇采摘机器人

Fig. 4　Forager series button mushroom harvesting robot

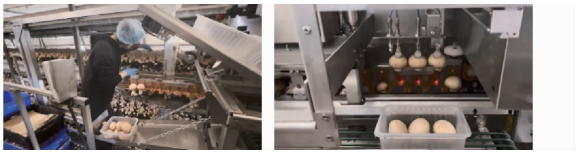


图 5　Gamechanger™ 半自动装盘机器人

Fig. 5　Gamechanger™ semi-automatic tray-loading robot

加拿大 Mycionics 公司[34]研发的双孢菇采摘机器人采用视觉扫描与双臂采收，根据大小和成熟度选择性采收，并与 Christiaens Group 的 Drawer System 集成。该系统已在北美最大蘑菇企业 South Mill Champs 完成试点应用。

英国 Mushroom Machine 公司[35]研发的 Gamechanger™ 半自动装盘机器人(图 5)，利用真空吸盘与机械臂快速装盘、称量和清洁，属于降低人工劳动强度的辅助型自动化装备，已在欧洲、亚洲和北美部署。

日本瓶栽大型企业，如雪国舞茸株式会社等依托瓶栽工艺的高度标准化，形成从出菇、整束切割、切根到分级包装的全流程自动化(图 6)。特点：强调“工艺先行，机械配套”，通过工厂化生产实现高自动化[31]。



图 6　日本瓶栽金针菇收获生产线

Fig. 6　Japanese bottle-cultivated enoki mushroom harvesting production line

### 2.1.2　研究机构与学术成果

英国 Silsoe 研究所较早系统开展双孢蘑菇采收机器人研究，Noble 等[36]构建了由视觉定位、直角坐标机器人和专用采摘末端组成的实验系统，并指出蘑菇采摘更接近人工弯折、扭转及其组合动作。后续研究还分析了菌株、分布密度、生长角度和潮次等因素对采收性能的影响。

荷兰瓦赫宁根大学[37]长期从事设施农业与园艺自动化研究，更强调将作物生长认知、生产管理与自动化装备协同考虑。其代表性贡献在于推动食用菌生产由“单机采摘”向“基于作物模型和流程优化的系统自动化”发展。

美国宾夕法尼亚州立大学[38]研制了集采摘与菌柄修整于一体的原型装置，包括基于弯折动作的采摘末端、多自由度定位机构和修剪单元，并在货架式场景开展验证。其研究同时指出，侧向包覆式夹持和柔性结构较真空吸附更利于兼顾稳定抓取与低损伤采收。

### 2.1.3　技术趋势与差距

从国际研究进展看，食用菌采收机器人正沿着感知智能化、执行器柔性化和系统集成化 3 个方向演进。

在感知层面，研究重点已由二维图像定位转向 RGB - D、三维点云和深度学习检测。对于遮挡频繁、成熟度差异明显的对象，仅依靠传统几何特征已难满足稳定识别需求；结合目标检测、实例分割和生长状态评估的感知方法，正成为择熟采收的重要基础[39 - 41]。

在末端执行器层面，现有方案主要包括真空吸附式、柔性夹持式以及“夹持/导向 + 切割或修剪”复合式。不同路线分别在节拍、低损伤采收和工序衔接方面具有优势，国外研究更强调面向不同菇种、栽培工艺和商品要求进行折中设计[42 - 43]。

在平台构型方面，采收机器人的结构设计高度

依赖栽培车间布局。对瓶栽或袋栽、节拍明确且作业位姿相对固定的工厂化场景,固定式机械臂、专用转台或流水线集成装备更容易实现高效运行;而对于双孢菇货架床栽等作业空间大、目标分布离散的场景,滑轨、桁架式或挂载式移动平台更具适应性。由此可见,采收机器人并非独立设备问题,而是典型的"栽培工艺—空间布局—装备结构"协同设计问题[44]。

不过,国际上距离大规模稳定商业化仍有差距。实际环境中的高湿、遮挡和潮次变化会带来识别误差累积、可达性不足和节拍波动等问题,长期作业可靠性与投资回报周期仍是制约推广的关键因素。

#### 2.1.4 综合分析

总体来看,国际食用菌采收机器人发展可概括为两条相互交织的技术路径:

(1)工艺驱动型:主要面向瓶栽或袋栽等高度标准化生产模式,通过统一品种、容器、姿态和节拍,将采收、切根、分级和包装集成为连续流水线。其优点是稳定性高、工程实现难度相对可控,但依赖较强的工艺前提和一致化生产条件。

(2)技术驱动型:该路径主要面向双孢蘑菇等需择熟采收、目标分布复杂的场景,重点利用机器视觉、成熟度判别、柔性末端和运动规划提升对非结构化环境的适应能力。该类研究已由单一动作验证扩展到系统级原型,但距离长期稳定商业部署仍有距离。

综合而言,未来食用菌采收机器人的发展将更加依赖栽培工艺标准化与机器人智能化的深度融合。当前产业化最为成熟的方向仍集中在单品种、标准化程度高的栽培模式,其中双孢菇与金针菇是最具代表性的应用场景。

### 2.2 国内应用与发展情况

#### 2.2.1 棒栽食用菌采收

香菇是我国栽培最广、产量最大的食用菌之一,2022 年中国香菇产量占全球约 98.3%,具备显著规模优势与供应链话语权[45]。平菇与黑木耳也是典型大宗品种,但因形态及栽培设施差异大,采收方式难以由单一装备覆盖,机械化推广门槛较高[46]。

现阶段国内研究通常以香菇为切入点,通过 RGB-D/多视角视觉实现检测、定位与成熟度判定,并利用刚柔结合末端降低压伤与掉菇率。中国农业科学院的香菇自动采摘机器人样机(图 7)已集成视觉感知和刚柔结合末端执行器,具备菌棒抽取与无损采摘等功能,但仍处于工程化验证阶段[47]。

山东农业大学苑进团队[48-49]围绕香菇工厂化生产中人工采收效率低、采收不及时以及选择性采收难以精准评估等问题,从智能视觉评估和机械化批量采收两个方向开展系统性研究。团队提出基于单目视觉和菌棒-香菇生长关系的 ReYOLO-MSM 评估方法,用于判断菌棒采收时机;同时基于人工采摘动作机理,设计集成推送、导向与采收机构的香菇批量采收机(图 8),采用柔性仿形的环形采摘器实现低损高效采收。

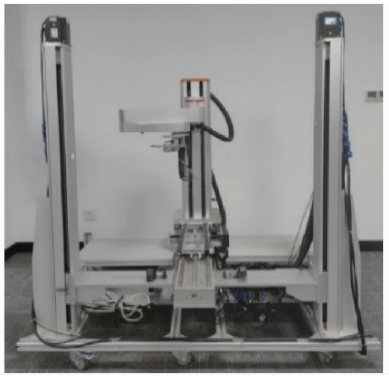


图 7 中国农业科学院研制的香菇自动采摘机器人

Fig. 7 Shiitake mushroom harvesting robot developed by the Chinese Academy of Agricultural Sciences

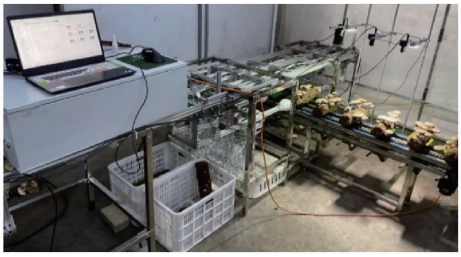


图 8 香菇批量采收机

Fig. 8 Mechanized batch harvesting machine for shiitake mushrooms

#### 2.2.2 瓶栽/袋栽食用菌采收

金针菇为瓶栽工厂化生产典型,工序链条完整、节拍明确,为输送、对位和联机控制提供基础。然而采收端仍存在簇体姿态不一、拉拔阻力波动和污染控制要求高等问题,采收等关键环节成套化、系统化与智能化应用仍相对不足[50]。

针对瓶栽金针菇,国内已出现将"摘取、切根、配重/称量、包装"等单元进行系统集成的专利方案,体现出产业对连续化、联机化的明确需求。例如专利 CN114056664B 提出金针菇自动摘取—切根—配重及包装系统(图 9)的总体架构思路,反映行业正尝试用工程系统集成来压缩人工投入、稳定节拍与品质一致性[51]。

杏鲍菇在国内工厂化生产中占比高,但因袋栽与瓶栽并存、个体差异明显,采收自动化需要更强的末端适配能力。南京农业大学提出移动式杏鲍菇采摘机器人(CN223402981U)(图 10),通过移动底盘车、刀片采摘机构和螺杆升降机构组合,实现多层杏

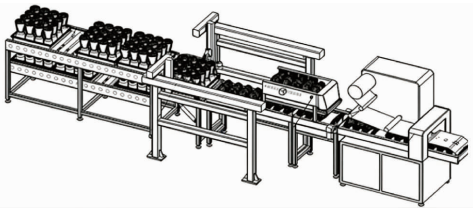


图 9　金针菇自动摘取—切根—配重及包装系统

Fig. 9　An automatic enoki mushroom harvesting, root-cutting, weighing, and packaging system

鲍菇切割采摘，体现了国内在该品类的技术探索[52]。

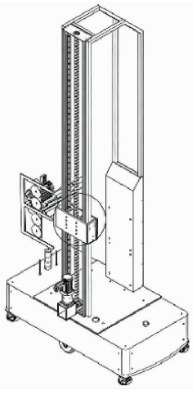


图 10　移动式杏鲍菇采摘机器人

Fig. 10　A mobile king oyster mushroom harvesting robot

### 2.2.3　床栽食用菌采收

双孢蘑菇多采用床栽或层架菇房，空间狭窄、湿热环境、菌菇密集且成熟度分布不均，采收需要“择优择熟”并尽量降低碰伤与带土污染。因此，双孢菇机器人既要完成识别定位，还要在拥挤场景下实现可达性规划与低损操作，整体难度显著高于规则输送线作物。

国内已出现面向菇房场景的双孢菇自动采摘机器人方案。例如中国农业科学院农业信息研究所研发的系统（图 11）包含床载式移动底盘、吸盘式末端执行器以及基于 RGB－D 的检测与定位算法，并具备成熟度判定、三维坐标定位与采摘顺序规划等关键功能[53]。该系统已在工厂场景完成现场评估，体现出该方向正从实验室走向更接近真实产线的验证阶段。

王峰[54]以工厂化规模种植的双孢菇为研究对象，研制出双孢菇自动采摘机器人（图 12），主要包括移动采摘平台和辅助换层装置两部分。其模拟工厂种植环境，进行双孢菇采摘试验，测试结果显示，移动采摘平台的采摘成功率为 97%，单个双孢菇采摘平均用时 7.84 s；辅助换层装置换层成功率 100%，平均用时 54.8 s。

面向双孢菇的智能采收研究，普遍强调识别精度、采摘速度与损伤控制的协同优化。未来仍需在

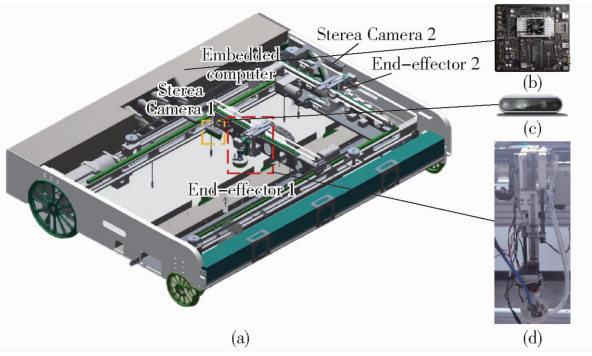



图 11　双孢菇自动采摘机器人

Fig. 11　Automatic button mushroom harvesting robot

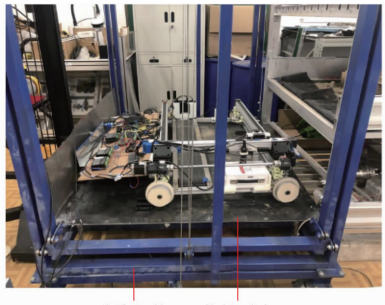



图 12　双孢菇采摘机器人

Fig. 12　Button mushroom harvesting robot

多设备集成、结构卫生设计、抗潮抗雾及与菇房工艺协同等方面持续迭代[55]。

### 2.3　对比与启示

在食用菌采收机器人领域，国外技术优势主要建立在高标准化的栽培模式之上。以日本瓶栽工艺和欧洲货架式栽培为代表，国外工厂普遍采用单品种、全流程的自动化流水线，从采收、切根到分级包装各环节衔接紧密，为机器人作业提供了结构化环境，显著降低了感知与执行的复杂度。

相较之下，我国食用菌产业在品种结构上呈现多样化特点，主栽品种包括香菇、平菇、黑木耳、草菇、银耳等，与之对应的栽培模式涵盖袋栽、棒栽、床栽等多种形式，尚未形成统一的标准化体系。这种品种与工艺的多样性直接导致采收环境的非结构化程度高，增加了机器人通用化设计与适应性部署的技术难度。

上述对比为我国食用菌采收机器人的发展路径提供了 3 点启示：

（1）在产业层面，应稳步推进栽培环境的标准化改造。可借鉴日本瓶栽模式的流水线集成思路，以及欧洲货架式栽培的空间布局经验，结合国内主栽品种的生物学特性，逐步建立适用于机械化采收的栽培规范。

（2）在应用策略层面，宜采取“单点突破、以点带面”的推广路径。优先选择标准化程度较高的工

厂化品种(如金针菇、杏鲍菇)作为技术落地切入点,待成熟后再向香菇、平菇等大宗品种及其对应的袋栽、棒栽模式扩展。

(3)在研究层面,需加强采收机器人与农艺模式的协同创新。针对国内品种多样、栽培灵活的特点,未来的技术攻关应注重柔性感知与自适应执行能力,以提升机器人在非标准化场景下的适应性与鲁棒性。

## 3 食用菌采收机器人关键技术

食用菌采收机器人研发涉及感知、执行、控制与系统集成等多环节,是跨学科协同攻关的复杂系统工程。针对食用菌子实体体积小、成熟度不均一、易损伤以及多层架式狭窄空间等特殊性,在以下关键技术方向取得了突破。

### 3.1 末端执行器与采摘机构

末端执行器是机器人直接作用于子实体的部件,其交互方式决定采收成功率、效率与损伤率等性能。目前常见构型包括:夹持式(双孢菇、褐菇等)、真空吸附式(双孢菇、褐菇等)、切割式(金针菇、鹿茸菇等),以及柔性/软体夹持器(双孢菇)。未来趋势是多模式融合与模块化设计,使末端执行器兼具柔顺性、适应性与效率。当前末端执行器主要构型为:

(1)夹持式(Gripper-based)

夹持式末端执行器通过指爪对菌盖边缘或菌柄部位施加夹持力,并配合扭断、弯折或提拉实现分离。其关键在于在层架狭窄空间和簇生遮挡条件下,同时保证足够的脱离力、稳定性和低损伤接触应力。

卢伟等[56]设计了一种 3 指 4 指节柔性手爪(图 13),对拔断/扭断两类方式给出抓持力约束并优选扭断;进一步用有限元静力分析与遗传算法优化柔性手爪结构,试验对比显示其在降低抓持力的同时减少抓握处表面与内部损伤。

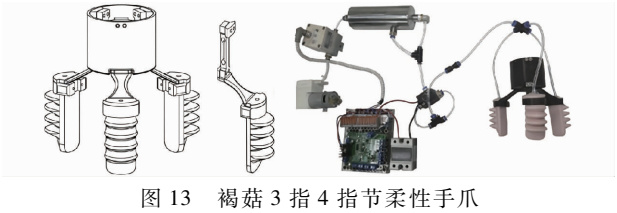


图 13 褐菇 3 指 4 指节柔性手爪

Fig. 13 Flexible three-finger, four-knuckle gripper for brown mushrooms

Xu 等[57]设计了一种双孢菇柔性 3 指夹持器(图 14),利用 ABAQUS 有限元模型分析验证其在抓取和释放双孢菇时的变形符合要求,研究确定了采摘所需的剪切力阈值大于 3.2 N。

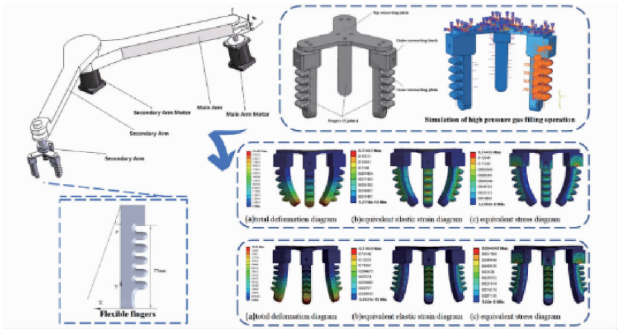



图 14 双孢菇 3 指柔性夹持器

Fig. 14 Flexible three-finger gripper for button mushrooms

Koirala 等[58]提出 3 指刚柔混合夹爪(图 15),在结构上结合刚性支撑与软质接触部件,并完成力学分析与采摘性能评估。该夹爪对单株蘑菇采摘成功率达 100%,但在簇状蘑菇场景下成功率降至 64%,且损伤加剧。

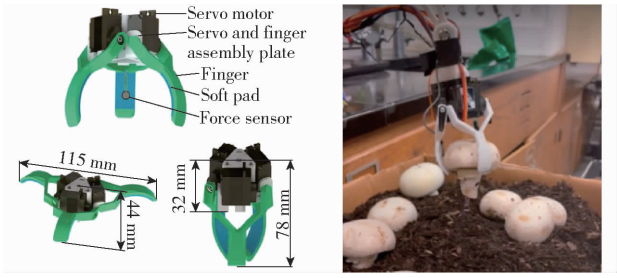



图 15 双孢菇刚柔混合 3 指夹爪

Fig. 15 Hybrid rigid-flexible three-finger gripper for button mushrooms

Shi 等[59]设计了力反馈电动欠驱动夹持器(图 16),具备提升、抓取、旋转 3 自由度,可实现对蘑菇的接近、抓取与分离操作,并引入薄膜力传感与闭环控制实现抓持力精确调节,同时将抓取过程的直径在位测量纳入系统功能。

夹持式优势在于抓取稳定、易于转运和分级集成;局限在于簇生遮挡和狭小空间下易发生干涉,且对力控精度和接触材料敏感。未来更可行的路线是“力闭环控制 + 柔性接触界面 + 小型化结构 + 面向簇生的接近/抓取规划”。

(2)吸附式(Vacuum suction)

吸附式末端执行器利用负压吸盘与菇盖表面形成压差,并配合提升、弯折或旋拧动作实现脱离。其结构简单、节拍快,但易受目标倾斜、表面污染和密封条件影响,不当的负压与作用时间也可能引发压痕或褐变。

姬江涛等[60]基于颗粒阻塞原理设计柔性仿形吸盘(图 17),吸盘能随不同直径与椭圆度的双孢菇形成更大有效接触面积,增强密封与吸附稳定性;其采摘试验在 25 ~ 50 mm 尺寸范围内得到 98.5% 成

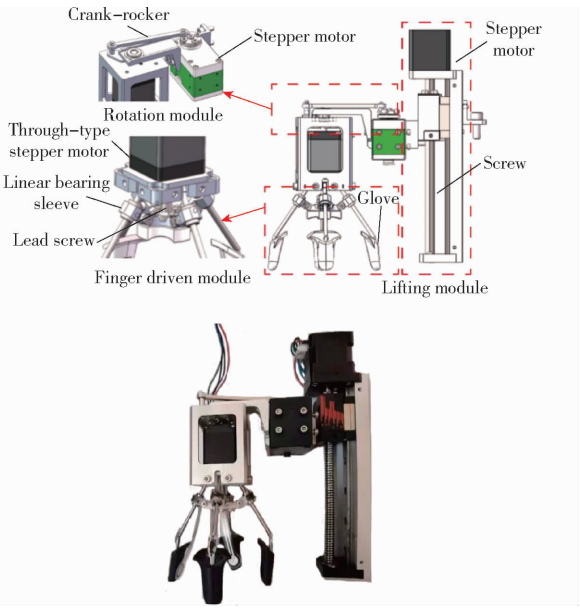



图 16　褐菇力反馈电动欠驱动夹持器

Fig. 16　Force-feedback underactuated electric gripper for brown mushrooms



图 17　双孢菇柔性仿形吸盘

Fig. 17　Flexible adaptive suction cup for button mushrooms

功率与 2.5% 损伤率，并显示在同等吸附力下柔性仿形吸盘可降低所需负压。

Yang 等[61]提出基于负压吸附的双孢菇采摘末端执行器（图 18），通过摆动或旋转实现采摘动作，并在工厂环境测试中获得 88.2% 采摘成功率与 2.9% 损伤率，为吸附式末端执行器参数设计提供了量化参考。

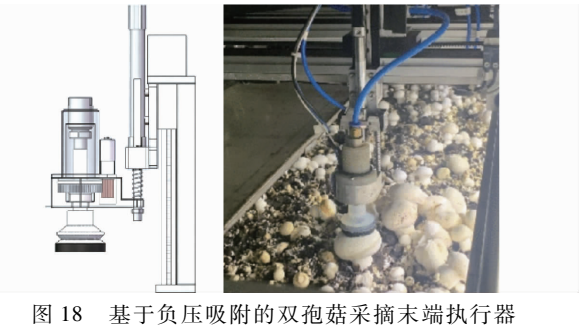


图 18　基于负压吸附的双孢菇采摘末端执行器

Fig. 18　Negative-pressure adsorption end-effector for button mushroom harvesting

Huang 等[62]围绕双孢菇采摘动力学开展对比研究，测得不同动作（旋拧、弯折、提升）的峰值力与力矩差异，并指出弯折动作相对更小的力/力矩需求可为吸附式末端执行器（图 19）的动作规划与参数设定提供依据。



图 19　吸附式双孢菇采摘末端执行器

Fig. 19　Suction-type end-effector for button mushroom harvesting

吸附式更适合层架密集、顶部无遮挡且易于吸盘贴合的菇种与模式，但需要以“柔性密封界面 + 负压/流量反馈控制 + 姿态自适应对准”为主线进行设计，避免单纯提高负压带来的品质风险。

（3）切割式（Cutting-based）

切割式末端执行器通过刀具、剪切或旋切机构切断菇柄（或菌丝束/根部），在金针菇等簇生细柄品种中尤具工艺必要性。相较扭断式分离，切割更有利于获得平整切面并便于后续分级包装，但也对夹持定位、切割路径和刀具卫生管理提出更高要求。

吴彦强等[63]设计了瓶栽鹿茸菇自动采收装置（图 20），提出“输—定—切—夹”采收工艺，并通过仿真与响应面方法优化切割参数。整机试验表明，切割端需要与定位、夹持、输送模块协同优化。



图 20　瓶栽鹿茸菇自动采收装置

Fig. 20　Automatic harvesting device for bottle-cultivated velvet pioppini mushrooms

针对金针菇切根环节，Xie 等[64]设计了旋切式切根装置（图 21），并通过离散元仿真与试验对刀具结构和运行参数进行优化。结果表明，新型刀具可降低切割力和单位面积功耗，同时改善切口平整度。

Sujatanagarjuna 等[65]设计了平菇旋切式采收机，将装袋培养基置于带出菇孔的不锈钢圆筒内，通过孔位对齐实现出菇与限位，并利用刀片旋转完成切割。

Huang 等[66]在双孢菇采收机器人中集成了菌

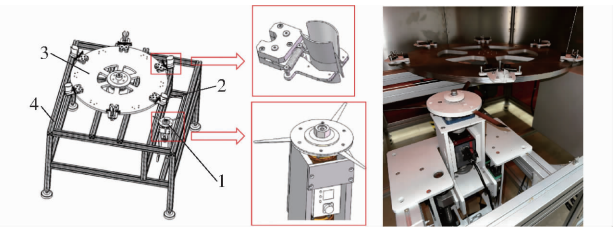



图 21 金针菇旋切式末端执行器

Fig. 21 Rotary cutting end-effector for enoki mushrooms

1. 旋转切割机构 2. 金针菇固定架 3. 输送转盘 4. 机架

柄切割末端执行器(图 22),菌柄切割模块整体成功率达 97%。该研究表明,“采摘—修整”需要在末端模块层面明确工序分工与参数优化,以避免切割动作成为新的损伤源。

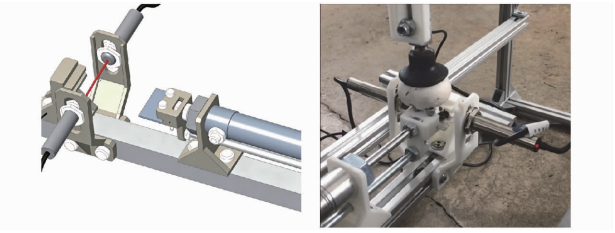


图 22 双孢菇菌柄切割末端执行器

Fig. 22 Stipe-cutting end-effector for button mushrooms

切割式机构在金针菇等切根工序中具有明确工艺必要性,有利于标准切面质量控制;但其在机器人末端集成时仍需系统处理夹持定位、刀具清洁与磨损、碎屑管理等问题。

(4)仿生柔性执行器

仿生柔性末端通过柔性材料、软体驱动或可变刚度结构实现自适应贴合与接触缓冲,目标是降低对菌盖/菌柄的局部应力集中并提升对姿态与尺寸不确定性的容忍度。

Han 等[67]面向受限空间内密集簇生与倾斜双孢菇采收,提出多级伸缩与柔性变刚度吸盘末端执行器(图 23),并基于扭转采收动作建立力学模型,围绕接触面积/接触力/有效吸附面积进行仿真优化与参数筛选。通过试验验证其对狭小空间和倾斜簇生工况具有较好的适应性与减损能力。

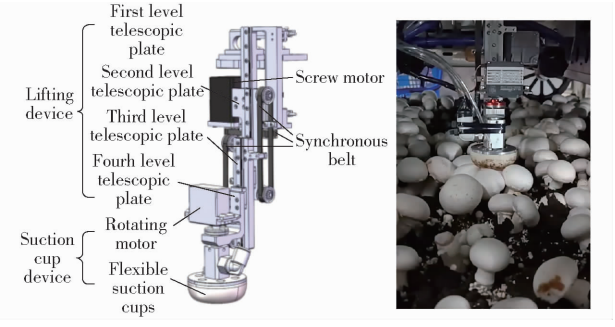



图 23 双孢菇多级伸缩可变刚度柔性末端执行器

Fig. 23 Multi-stage telescopic variable-stiffness flexible end-effector for button mushrooms

仿生柔性末端在减损与适应性方面潜力突出,但仍面临软材料耐久性、清洗消毒和复杂非线性控制等工程难题。

### 3.2 食用菌感知技术

高效、准确的感知与识别是选择性采收的前提。近年来,深度学习与 RGB-D、结构光和点云重建等技术显著提升了食用菌识别、三维定位与成熟度评估能力,未来趋势是多模态融合与轻量化部署。

(1)传统机器视觉与图像处理方法

传统机器视觉主要利用颜色、纹理与几何形态实现菇体分割、尺寸测量和外观分级,具有可解释性强、实现成本低等优点,但对光照变化、反光、遮挡与粘连较为敏感。

俞高红等[68]面向菇床环境提出单体蘑菇定位与轮廓描述方法,通过目标与背景分离及轮廓信息表达菇体边界,为采摘机器人提供几何定位依据。

王风云等[69]针对双孢菇工厂化生产提出在线自动分级系统,采用分水岭、Canny 与形态学闭运算实现菇体边缘提取与大小分级,并结合传送速度与触发时序设计控制策略。

Wang 等[70]提出基于图像处理的双孢菇自动分选系统,围绕菌盖直径外观尺寸特征建立分级流程,体现了传统图像处理在鲜菇分选上的落地路径。但当背景干扰增强或目标粘连加重时,需要更强的分割策略或更严格的采集条件。

Heinemann 等[71]较早将机器视觉用于双孢菇品质分级,量化颜色、形状、切口与菌盖开裂等外观特征,并与人工检验结果对照构建训练/测试样本。该类研究为“可量化外观指标体系”奠定了基础。

总体看,传统方法在工厂化分选等成像可控场景仍具实用价值,但在密集遮挡、粘连与光照不稳的采收现场,其性能上限往往受限,推动了学习型方法与多源传感的引入。

(2)深度学习与目标检测

在菇体密集簇生、尺度变化大且遮挡频繁的场景下,基于 CNN 尤其是 YOLO 系列的目标检测方法能够通过端到端特征学习获得更高的检测精度与鲁棒性,为选择性采收提供可靠的“可采目标”输入。

Redmon 等[72]提出 YOLO,将目标检测统一为一次前向传播的回归问题,同时输出边界框与类别概率,突出实时性与端到端优化特性。

王磊磊等[73]针对平菇采收遮挡与形态差异问题,提出基于 YOLO v5 的 OMM-YOLO 检测分类模型:引入注意力机制与特征融合结构改进,提升遮挡场景检测与分类能力。

Chen 等[74]面向双孢菇菇房复杂光照、粘连与重叠问题，提出改进 YOLO v5s 算法，引入 CBAM 注意力模块并结合 Mosaic 增强以提升检测精度与鲁棒性，识别准确率达 98%。

杨林等[75]针对香菇子实体生育期外观特征变化不显著、成熟期易漏检/误检等问题，提出改进 YOLO v5l 的香菇子实体生育期识别方法，通过更轻量的上采样预测与特征重组结构及新增小目标检测层，实现了精度与速度的平衡。

杨淑珍等[76]针对海鲜菇生长阶段表型相似、精细分类困难的问题，提出改进 YOLO 11 分类方法，识别准确率 96.97%，召回率 96.73%，mAP 为 96.58%，精确率 96.81%，可用于海鲜菇生长阶段精细化分类。

谢立敏等[77]针对菇房内杏鲍菇点云残缺问题，基于 AdaPoinTr 提出改进的 SwinPoinTr 模型，实现残缺点云补全和表型参数测量，为杏鲍菇表型参数测量提供基础。

深度学习显著提升了菇房复杂环境下的识别鲁棒性，但其落地效果高度依赖数据质量与算力条件；因此轻量化网络、边缘侧推理与面向遮挡/小目标的结构优化将持续成为研究重点。

（3）立体视觉与深度传感器

选择性采收不仅要“看见菇”，还要获得可用于机械臂规划的三维位置、尺寸与姿态信息。RGB－D 与结构光深度相机通过深度图与点云提供直接空间观测，有助于将二维检测结果转化为可执行的三维作业参数。

王玲等[78]使用 SR300 结构光深度相机对褐蘑菇进行原位测量，通过在深度图中自适应阈值分离目标，估计直径、位置与姿态等参数，为采摘机器人提供关键几何输入。该方法体现了“深度优先分割＋几何拟合测量”的思路，但仍受深度噪声与目标粘连影响。

卢伟等[79]提出基于 YOLO v5 迁移学习并融合三维边缘信息的“识别—测量—定位”一体化方法，在复杂背景下完成目标检测后，再利用三维边缘信息进行直径动态估测与定位参数提取。结果表明，二维检测与三维几何信息融合可提升测量与定位的可用性。

Shi 等[80]针对双孢菇粘连与重叠导致的定位与分割困难，采用视差校正快速拼接生成高精度 RGB－D 全景融合图像，并在此基础上进行实时检测与实例分割，以提升密集簇场景下的分割与定位效果。

三维视觉能够把“识别到目标”推进为“获取可执行空间参数”，对抓取点确定与尺寸评估尤为关键；但深度噪声、深度缺失和标定误差仍会直接影响执行层可靠性。

深度学习显著提升了食用菌识别在复杂背景、遮挡与尺度变化下的鲁棒性，但往往带来更高的算力与实时性压力。面向温室/菇房的工程落地，趋势将集中在轻量化网络与边缘计算部署，以及 RGB 与深度/点云等多模态信息融合，以在保证实时性的同时提升复杂环境适应能力。

### 3.3　运动平台与系统集成

受不同栽培方式和高湿环境制约，食用菌采收机器人平台设计需兼顾灵活性与稳定性。典型方案包括固定式机械臂/机构、移动底盘＋机械臂以及轨道式或悬挂式平台，并需进一步与切根、分级和包装等环节集成。

（1）固定式机械臂/机构

固定式机械臂多见于高度标准化的瓶栽金针菇、杏鲍菇流水线工厂生产线。这类系统通过将机械臂安装在固定机架上，配合传送带完成定位、抓取与切割的连续作业。

邹城市友泓生物科技有限公司在金针菇工厂化生产线上应用固定工位式采收装备（图 24），机器人在固定工位对随流水线输送的栽培瓶内金针菇进行切割采收。该生产线采后分拣与包装仍依赖人工，属于“机器人采收＋人工后处理”的过渡式配置。



图 24　金针菇采收机器人

Fig. 24　Enoki mushroom harvesting robot

施火结等[81]设计了固定式机械臂金针菇采收机（图 25），由末端执行器、双机械臂和输送/定位夹紧机构组成，可通过双臂协同同时完成 8 瓶菌菇采收。该方案通过“摇晃—拔拉”降低损伤、提升效率，但仍缺少切根工序且上下料需人工辅助。

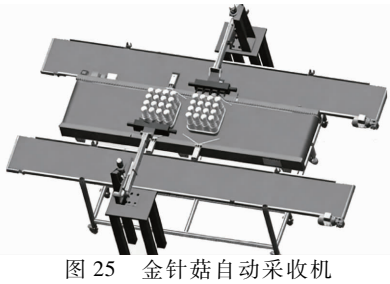


图 25　金针菇自动采收机

Fig. 25　Automatic harvesting machine for enoki mushrooms

周顺[82]设计了瓶栽白玉菇采收装置(图 26),由机械臂、夹持导向装置、锁菇定位装置、链式回转切根装置和运输装置组成,并固定布置于产线工位。该方案实现了拔拉分离、切根和废料输送一体化。



图 26 瓶栽白玉菇采收装置

Fig. 26 Harvesting device for bottle-cultivated white beech mushrooms

(2)移动式机器人平台

在床架式双孢菇或菌棒栽培香菇场景中,移动式机器人平台能够有效打破空间限制,通常由移动底盘搭载机械臂组成,可在菇床之间或菇房行间自主移动与巡回采收。

由于荷兰式多层架作业空间限制,架内移动平台通常设计为轻量化、紧凑型结构,直接运行于栽培床架的侧缘导轨,实现对单层作业面的覆盖,但跨架/跨层切换往往需要额外的转运或换层机构配合。

Ji 等[83]提出双孢菇“采摘平台”方案(图 27),系统由爬升装置、采摘机器人与控制系统构成。机器人沿菇架 U 形轨道行进执行采摘,爬升装置则负责在不同层菇床之间运送机器人完成换层作业。



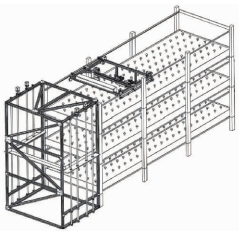


图 27 双孢菇采摘平台

Fig. 27 Button mushroom harvesting platform

王魏魏[84]针对工厂化双孢菇种植模式,菇床多层并行排布,层间空间狭小等问题,设计了双孢菇采摘一体化系统(图 28),主要包括采摘机器人和辅助移架机。移架机是系统中关键辅助机械,负责转移采摘机器人的工作位置。

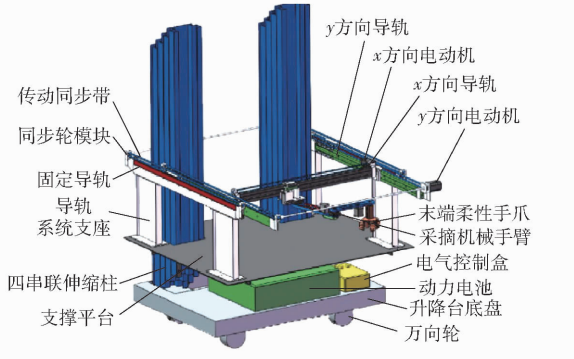
架外地面底盘式平台多采用轮式、履带式或麦克纳姆轮,用于承载机械臂及视觉系统组件,在床架间的过道自主移动作业,通常配备升降机构以覆盖多层床架,具备更强的环境通用性与跨区域作业能力。



图 28 双孢菇采摘一体化系统

Fig. 28 Integrated button mushroom harvesting system

张俊[85]设计了智能褐菇采摘机器人(图 29),由移动升降平台、伸缩导轨系统、采摘手臂、末端执行器和视觉系统组成。作业时平台沿菇架外侧移动并完成升降,伸缩导轨探入菇床内部后由采摘手臂执行采摘。



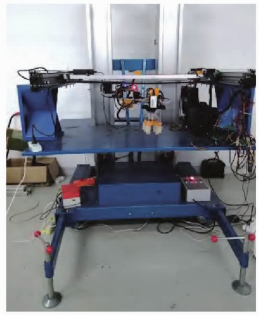



图 29 褐菇采摘机器人

Fig. 29 Brown mushroom harvesting robot

施浩楠[86]设计了面向标准菇房的移动式仿人双孢菇采摘机器人(图 30),由移动平台模块和上层采摘执行机构模块组成,集自主行驶、升降、原位识别、测量定位与采摘功能于一体。

(3)轨道式与悬挂式系统

为克服地面松软、空间狭小和自主导航易受干扰等问题,轨道式与悬挂式系统成为大型工厂化车间的重要方案。该类系统利用物理导轨约束平台运动路径,可显著提升多层立体栽培环境中的定位精度与作业稳定性。

邵逸星[87]研发了平菇采摘机器人(图 31),其车载平台能沿着大棚中间导轨前进、后退、转弯及在不同大棚之间转场,当到达指定区域后,其搭载

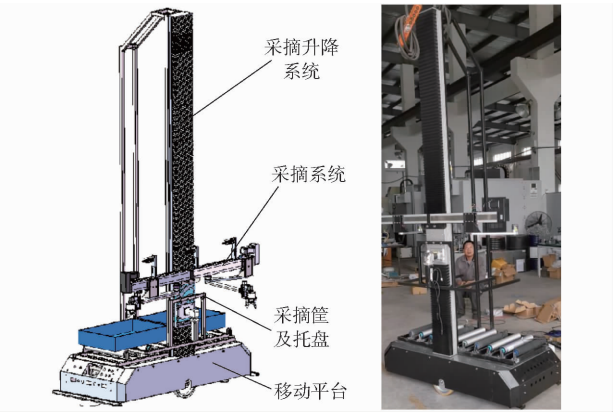



图 30　移动式仿人双孢菇采摘机器人

Fig. 30　Mobile anthropomorphic button mushroom harvesting robot

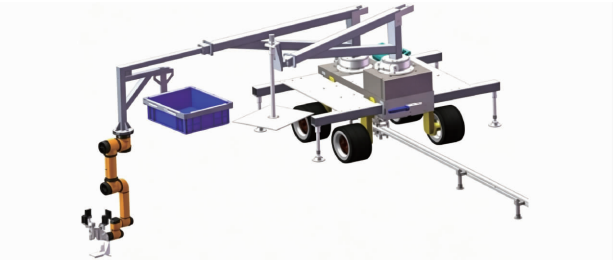


图 31　平菇采摘机器人

Fig. 31　Oyster mushroom harvesting robot

的液压油缸支腿能提供足够的支撑力以防止车身倾翻。

Rong 等[88]针对温室平菇栽培开发了平菇采收机器人(图 32),主要由桁架式移动平台和采摘单体组成。通过在大棚中间和两侧铺设 3 条导轨,平台沿导轨前进即可遍历整个温室,但目前尚不能自主切换至另一温室。

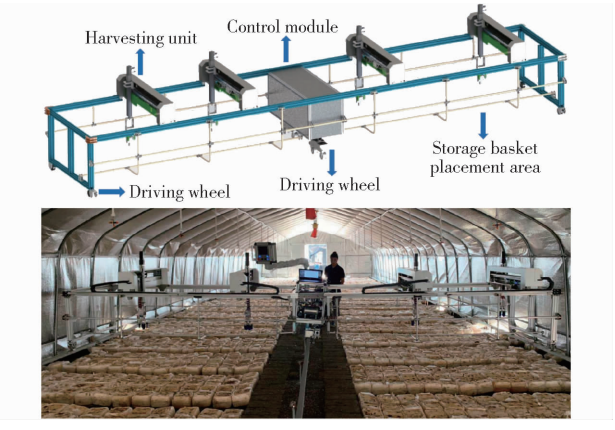



图 32　平菇采收机器人

Fig. 32　Oyster mushroom harvesting robot

Zhong 等[53]提出了双孢菇整体采摘系统。该系统包含采摘机器人、自动换层装置和自动接收装置。自动接收装置悬挂于床架外侧(图 33),自动跟随采摘机器人行走,以接收传送带上的蘑菇。

美国 4AG Robotics 公司[89]针对荷兰式多层菇

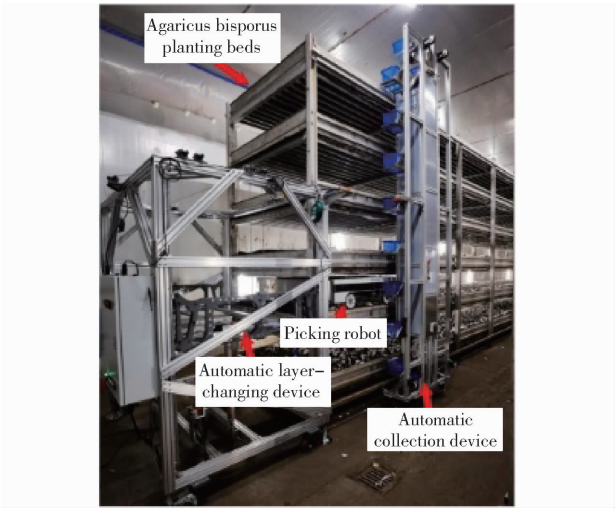



图 33　双孢菇悬挂式自动接收装置

Fig. 33　Hanging automatic receiving device for button mushrooms

架提出轨道式自动采收系统(图 34),将 SCARA 机械臂与垂直、水平滑架组合,可在不同层菇床间切换,并通过两侧对称部署实现 100% 采收覆盖。

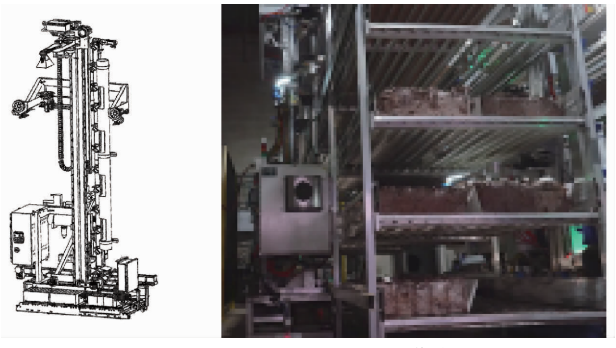


图 34　美国 4AG Robotics 公司双孢菇自动采收系统

Fig. 34　Automatic button mushroom harvesting system of 4AG Robotics, USA

轨道式与悬挂式系统通过物理约束降低了运动控制难度,具有较好的系统稳定性和可达性,更适合空间布局标准化的大型现代化食用菌工厂。

此外,采收机器人还需与切根修整、分级称量等后续环节衔接,将运动平台、机械臂与初加工处理系统协同集成,才能真正构建全流程自动化生产线。

### 3.4　采收机器人具身智能技术

具身智能技术将人工智能算法与机器人物理实体深度融合,使机器人能够在非结构化食用菌栽培环境中通过自主感知、认知、决策与执行完成采摘作业。针对遮挡、纹理相似、菇体易损和弱光等挑战,其核心研究主要围绕具身感知、自主决策与实时控制展开。

(1)多模态融合的具身感知

多模态融合的具身感知通过整合 RGB - D 相机、触觉和力觉传感器等多种通道,并结合视觉语义

理解能力,使机器人不仅能在遮挡和光照多变环境中发现目标,还能判断成熟度与可抓取姿态。

Xie 等[90]针对金针菇自动切割中抓取力难以随单株尺寸调整的问题,提出结合视觉反馈的动态调节末端执行器方法,目标宽度测量误差仅 0.14%,抓取成功率达 96%。

Yin 等[91]针对香菇纹理与环境相似、密集生长且菌体易碎等问题,提出基于视觉语义的拟态柔性抓取方案。其改进的 DeepLabV3 + 模型通过动态窗口模块和 AECA 注意力增强特征表达,分割精度达到 95.8%,为后续抓取提供了精确视觉引导。

Retsinas 等[92]采用多台 RGB - D 相机获取多视角点云,通过 RANSAC 平面分割、ICP 配准等步骤完成点云融合,并构建基于实例分割与模板匹配的处理流程,实现蘑菇目标检测与三维姿态估计。

此外,触觉与力觉感知作为具身感知的重要组成部分,在精细采摘作业中发挥着关键作用。Gu 等[93]设计了刚柔结合夹持器(图 35),在双指结构中集成距离传感器与力传感器,可实时监测夹爪与蘑菇距离及抓取力度,并通过闭环调节实现平滑抓握,模拟了人手的"接触感知—力调整—平滑抓握"模式。

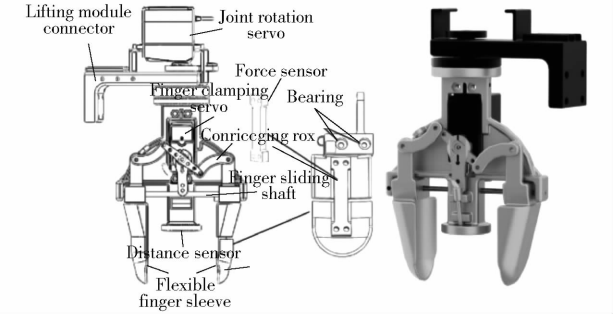



图 35 刚柔结合双孢菇采收夹持器

Fig. 35 Rigid-flexible coupled gripper for mushrooms

上述研究表明,多模态融合与环境自适应的具身感知技术正突破传统视觉在食用菌采收场景中的感知瓶颈,但未来仍需进一步融合触觉、力觉等多维传感信息以提升复杂情况下的鲁棒性。

(2)智能自主决策与运动控制

智能自主决策与运动控制侧重机器人在物理交互中的智能控制,利用强化学习、模仿学习、双臂协调与柔顺控制等方法,自主规划避障、防损的采摘路径和抓取策略,并精准执行剪、扭、拉等分离动作。

刘世栋等[94]针对双臂双孢菇采摘机器人提出改进蚁群算法采摘策略,通过任务分配与采摘顺序规划减少双臂末端总行程并提高采摘效率。

Yao 等[95]提出基于 CSO - ASTGCN 的人体动作预测方法,预判采菇人员的动作意图,优化机器人的抓取路径与作业力。系统将动作预测网络与 GR - CNN 抓取位姿估计融合,使机器人能够提前规划抓取策略。试验表明,该系统在人机协作采收中使采摘效率提升 31%,菌体损伤降低 26%。

针对香菇质地柔软易损的特点,Yin 等[91]提出了融合改进 GR - ConvNet 抓取检测网络与模型预测导纳控制算法的柔性抓取系统,通过解析采摘工人的力学意图生成机械臂运动轨迹,增强鲁棒性,实现更优的轨迹跟踪与柔顺控制。

Vasios 等[96]提出基于 Real2Sim2Real 仿真迁移与模型预测路径积分(MPPI)的规划架构,在仿真环境中离线生成最优采摘动作原语,并使机器人习得了与经验采摘者相符的"根部弯曲"拔取动作。

Porichis[97]探索模仿学习在蘑菇采收中的应用,提出单次示教学习方法,使机器人能够从专家采菇视频中学习"触及—抓取—扭断—拔起"的动作序列。

这些进展表明,智能决策与柔顺控制技术的融合正推动采收机器人从简单重复操作向自适应、低损伤的精细化作业演进。未来研究需进一步融合生物力学模型与强化学习,提升机器人在动态环境中对未知工况的适应能力。

(3)实时控制与边缘计算

实时控制与边缘计算旨在解决复杂环境下智能处理的时效性问题,通过在机器人端部署轻量化神经网络与边缘计算单元,实现感知、决策与控制算法的本地低延迟处理。

Song 等[98]针对香菇工厂化生产空间约束下的机器人自主导航问题,基于 Navigation2 框架建立了多传感器融合的即时定位与地图构建系统,在狭窄道路和卫星信号差条件下实现了可靠的自主导航。

针对菌棒表型测量与品质分级需求,梁秀英等[99]基于 Jetson Orin Nano 边缘计算平台部署 PP - LiteSeg 轻量化分割模型,实现了香菇菌棒表型测量与品质分级的实时处理,验证了轻量化模型在边缘设备上部署的可行性和实时性能。

上述研究表明,轻量化网络设计与边缘计算部署正在支撑食用菌采收机器人从算法验证走向实际应用,未来研究仍需通过软硬件协同设计,在保持精度的同时持续提升处理速度。

### 3.5 评估指标与试验方法

食用菌采收机器人研发不仅需要在实验室完成功能验证,还必须通过标准化的指标体系和科学的试验方法来评估其性能与产业应用潜力。当前学界和产业界常用的评估指标主要包括:

(1)作业性能指标

识别与定位精度：包括对成熟菇体的漏检率、误检率以及三维空间坐标的定位误差，这是成功采收的前置条件。

采收成功率：实际完成采收的菇体数与总目标菇体数之比，是衡量机器人有效性的核心指标。

损伤率：采收过程中出现菌盖压痕、边缘破损或菌柄断裂的菇体比例，直接决定食用菌的商品价值与货架期。

单株采收时间与节拍效率：以“单株采收耗时”及“小时采收量(颗/h 或 kg/h)”来衡量，反映机器人作业效率。

(2)系统运行指标

稳定性与连续作业能力：机器人在高湿弱光环境下的平均无故障运行时间(MTBF)、视觉抗干扰能力以及应对多潮次、不同空间分布密度采收的稳定性，是评估装备成熟度重要依据。

能耗与经济性：通常以单位采收量的能耗水平评估其运行成本，并结合设备造价、维护费用与人工替代效益综合计算投资回报率(ROI)，这是决定技术能否被市场接受的关键指标。

(3)质量与产业化指标

分级与商品率：结合视觉识别或称重系统，对采后产品的规格一致性、商品率进行评价。

对接能力：与切根、分级、包装等后处理环节的接口匹配程度，体现其在全链条自动化中的可集成性。

在试验方法层面，当前研究普遍遵循从实验室环境测试到生产现场验证的技术路线。实验室阶段侧重末端执行器、力学参数与视觉算法等核心单元的精密测定，为系统参数整定与算法优化提供基础数据。

进入生产现场验证阶段后，试验重点转向机器人在真实菇房或工厂化环境中的综合表现，包括不同潮次、光照和温湿度条件下的适应性、识别稳定性与机械系统耐久性。规范化测试流程的引入也有助于实现不同研究成果的可比性，并为行业标准制定奠定基础。

## 4　技术问题分析与发展展望

### 4.1　技术问题分析

尽管近年来食用菌采收机器人关键技术取得了长足进步，但受限于栽培模式多样、菌种差异显著及温室环境复杂性，其从实验室原型走向产业化应用仍面临诸多挑战。当前主要瓶颈集中在系统通用性、复杂环境感知鲁棒性、无损采摘控制以及整机作业效率与经济性等方面。

(1)栽培模式多样化导致采收需求差异极大

食用菌产业存在袋栽、瓶栽、床栽等多种模式，不同模式下的菇体分布、生长姿态与基质特性差异显著。双孢菇强调密集条件下的选择性采摘，金针菇多为整簇切割，香菇和平菇则常呈不规则簇生。农艺形态的多样性对末端执行器结构、识别策略和运动规划均提出了差异化要求。

(2)采收环境复杂导致识别与感知的鲁棒性不足

食用菌普遍个体较小、密集生长，且部分品种色泽与基质背景接近，加之光照变化与补光干扰，视觉感知系统在实际应用中易出现漏检与误判。当前基于深度学习的识别方法虽具精度优势，但仍受算力、实时性和现场稳定性限制，复杂环境下的鲁棒感知能力仍需提升。

(3)末端执行器兼容性与损伤控制难题

现有末端执行器如柔性夹爪、真空吸附、旋转切割等各具优势，但多针对特定品种或采收方式设计，兼容性有限。机械接触还易造成压痕或破损，影响商品性，因此兼顾多品种适配与低损伤控制仍是实用化关键难题。

(4)效率与经济性不足

当前多数采收机器人样机在作业速度与成功率方面仍低于人工水平，难以在采收窗口期内完成高效作业。同时，设备制造成本较高，投资回收周期长，制约了其在以小农户为主体的生产结构中的推广应用。

(5)产业应用瓶颈

中国食用菌产业经营主体分散、标准化程度低，导致机器人在实际部署中面临适配困难。此外，切根、分级、包装等采后环节尚未形成自动化衔接，即使前端实现机械化，也难以形成完整高效的生产闭环。

### 4.2　发展展望

面对复杂环境感知、无损作业控制和产业化推广等瓶颈，未来研究需从农机农艺深度融合、核心软硬件创新及全产业链协同等方面持续突破。应依托栽培模式标准化，结合多模态感知、仿生柔性机构与智能算法，推动采收机器人向高可靠、低损伤和规模化应用发展。

(1)标准化与规模化栽培推动采收自动化

深化农机与农艺融合，推进瓶栽、床栽等标准化与设施化栽培模式演进，从源头为采收机器人构建一致性的作业环境。结合我国产业现状，金针菇、杏鲍菇等工厂化基础较好的瓶栽品种有望率先实现规模化应用。

(2)多模态感知融合与边缘推理

突破单一视觉传感局限,探索 RGB - D、近红外、超声及触觉/力觉等多模态信息融合,构建抗光照干扰与遮挡的鲁棒感知模型。同时结合边缘计算与轻量化网络,实现现场连续作业所需的实时识别与部署能力。

(3)末端执行器的仿生柔性化与模块化设计

针对食用菌质地脆嫩、形态多样的特点,发展基于软体驱动或仿生柔性吸附原理的末端执行器,提升夹持稳定性并降低机械损伤。同时探索“通用机身 + 可更换模块化末端”架构,以增强同一平台对多品种采收任务的适配能力。

(4)系统集成与全链路自动化

采收机器人效能的充分发挥依赖于与切根、分级、包装等采后装备的无缝对接。构建从栽培端到包装端的全流程自动化产线,有助于减少人工干预并提升整体作业效率,推动形成一体化智能生产体系。

(5)人工智能与自主学习控制

在控制系统中引入强化学习与多智能体协作算法,可提升采收装备在动态生长环境中的自适应决策水平。同时,借助数字孪生构建工厂虚拟模型,可实现作业路径离线优化与多机协同任务预分配,降低现场调试成本。

(6)商业运营模式创新

针对我国中小型散户众多的现状,可探索由农业科技企业或大型合作社主导的“采收即服务”等共享运营模式。通过按作业量计费的专业化服务,降低单户购置高端机器人的门槛,促进先进装备在产业中的扩散应用。

## 参 考 文 献


[1] Ritota M, Manzi P. Edible mushrooms: functional foods or functional ingredients? A focus on *Pleurotus spp.* [J]. AIMS Agriculture and Food, 2023, 8(1): 90 - 109.

[2] Badoni P, Siddiqui S A. Metamorphosis of mushroom production from tradition to automation[J]. Discover Applied Sciences, 2025, 7: 974.

[3] Lu X, Brennan M A, Brennan C S. Harnessing the multifaceted potential of mushrooms: sustainable development, health promotion, and industrial innovation[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2025, 60(2): 1 - 13.

[4] FAO. Statistical Yearbook 2023: World Food and Agriculture[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023.

[5] FAO. FAOSTAT database: mushrooms and truffles production data[DB/OL]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. [2026 - 03 - 07]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.

[6] Zhang Y, Geng W, Liu J, et al. Edible mushroom cultivation for food security and rural development in China: bio-innovation, technological dissemination and marketing[J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12302.

[7] 李天来, 许勇, 张金霞. 我国设施蔬菜、西甜瓜和食用菌产业发展的现状及趋势[J]. 中国蔬菜, 2019(11): 6 - 9.
Li Tianlai, Xu Yong, Zhang Jinxia. Current status and trends of protected vegetables, watermelon, melon and edible mushroom industries in China[J]. China Vegetables, 2019(11): 6 - 9. (in Chinese)

[8] 鲍大鹏, 潘迎捷, 谭琦. 中国食用菌产业发展基本面的认识及其启迪[J]. 菌物研究, 2022, 20(3): 160 - 165.
Bao Dapeng, Pan Yingjie, Tan Qi. Understanding the fundamentals of edible mushroom industry development in China and its implications[J]. Journal of Fungal Research, 2022, 20(3): 160 - 165. (in Chinese)

[9] 陈先锋. 中国食用菌产业发展的战略研究与对策分析[J]. 中国食用菌, 2019, 38(12): 74 - 76.
Chen Xianfeng. Strategic research and countermeasure analysis on edible mushroom industry development in China[J]. Edible Fungi of China, 2019, 38(12): 74 - 76. (in Chinese)

[10] 赵静, 王延锋, 盛春鸽, 等. 我国食用菌工厂化生产现状与发展趋势[J]. 中国林副特产, 2021(5): 68 - 71, 74.
Zhao Jing, Wang Yanfeng, Sheng Chunge, et al. Current status and development trend of industrialized edible mushroom production in China[J]. Forest By-Product and Speciality in China, 2021(5): 68 - 71, 74. (in Chinese)

[11] 董浩然, 于海龙, 姜宁, 等. 中国食用菌工厂化生产发展现状及趋势[J]. 食药用菌, 2024, 32(1): 1 - 9.
Dong Haoran, Yu Hailong, Jiang Ning, et al. Current status and trends of industrialized edible mushroom production in China [J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2024, 32(1): 1 - 9. (in Chinese)

[12] Rajendran V, Debnath B, Mghames S, et al. Towards autonomous selective harvesting: a review of robot perception, robot design, motion planning and control[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(7): 2247 - 2279.

[13] Droukas L, Doulgeri I, Tsakiridis N L, et al. A survey of robotic harvesting systems and enabling technologies[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2023, 107(1): 21.

[14] 李长田, 谭琦, 边银丙, 等. 中国食用菌工厂化的现状与展望[J]. 菌物研究, 2019, 17(1): 1 - 10.
Li Changtian, Tan Qi, Bian Yinbing, et al. Current status and prospects of industrialized edible mushrooms in China[J]. Journal of Fungal Research, 2019, 17(1): 1 - 10. (in Chinese)

[15] 王明友, 宋卫东, 周德欢, 等. 平菇发酵料装料接种一体机关键装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1):

12 – 21.
Wang Mingyou, Song Weidong, Zhou Dehuan, et al. Design and experiment of key device for an integrated loading and inoculation machine for fermented substrate of oyster mushroom[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(1): 12 – 21. (in Chinese)

[16] 高丽娜, 张劲松, 李玉, 等. 我国滑菇工厂化生产现状及展望[J]. 菌物研究, 2023, 21(4): 281 – 285.
Gao Lina, Zhang Jinsong, Li Yu, et al. Current status and prospects of industrialized *Pholiota nameko* production in China [J]. Journal of Fungal Research, 2023, 21(4): 281 – 285. (in Chinese)

[17] Koirala B, Zakeri A, Kang J, et al. Robotic button mushroom harvesting systems: a review of design, mechanism, and future directions[J]. Applied Sciences, 2024, 14(20): 9229.

[18] Zhao R, Luo C, Zhang Q, et al. Deep learning-based phenotypic analysis and intelligent environmental control in edible mushrooms: advances, challenges, and prospects[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101330.

[19] 李玉. 中国食用菌产业发展现状、机遇和挑战:走中国特色菇业发展之路, 实现食用菌产业强国之梦[J]. 菌物研究, 2018, 16(3): 125 – 131.
Li Yu. Current status, opportunities and challenges of edible mushroom industry development in China: following a development path with Chinese characteristics to realize the dream of becoming a strong edible mushroom industry nation[J]. Journal of Fungal Research, 2018, 16(3): 125 – 131. (in Chinese)

[20] 张辉, 孔维丽, 闻亚美, 等. 我国食用菌品种权保护及育种研究现状与展望[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(6): 135 – 141.
Zhang Hui, Kong Weili, Wen Yamei, et al. Current status and prospects of variety right protection and breeding research of edible mushrooms in China[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(6): 135 – 141. (in Chinese)

[21] Mcgee C F. Microbial ecology of the *Agaricus bisporus* mushroom cropping process [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102: 1075 – 1083.

[22] Sud D, Sharma S, Dhiman R. Significance and cultivation techniques of shiitake mushroom (*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler)[J]. Indian Phytopathology, 2024, 77(4): 925 – 945.

[23] 周晓武, 陈琼. 银耳数字化生产管理系统设计与种植应用[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(8): 1892 – 1895.
Zhou Xiaowu, Chen Qiong. Design and application of a digital production management system for *Tremella fuciformis*[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(8): 1892 – 1895. (in Chinese)

[24] Xu Y Y, Tang J, Wang Y, et al. Large-scale commercial cultivation of morels: current state and perspectives[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2022, 106: 4401 – 4412.

[25] 李升, 芦新春. 工厂化食用菌智能采收技术与装备研究进展[J]. 农业与技术, 2024, 44(9): 41 – 46.
Li Sheng, Lu Xinchun. Research progress on intelligent harvesting technologies and equipment for industrial edible mushrooms [J]. Agriculture and Technology, 2024, 44(9): 41 – 46. (in Chinese)

[26] Gao W, Baars J J P, Dolstra O, et al. Genetic variation and combining ability analysis of bruising sensitivity in *Agaricus bisporus*[J]. PLoS ONE, 2013, 8(10): e76826.

[27] Dutt N, Choi D. A computer vision system for mushroom detection and maturity estimation using depth images[C]// 2024 ASABE Annual International Meeting, 2024: 2400774.

[28] 韦真博, 金子晶, 陈青, 等. 金针菇菇房环境智能调控系统研发[J]. 农业工程, 2025, 15(11): 63 – 68.
Wei Zhenbo, Jin Zijing, Chen Qing, et al. Development of an intelligent environmental control system for enoki mushroom growing rooms[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(11): 63 – 68. (in Chinese)

[29] Pagliarani N, Tzafestas C, Papadopoulos E, et al. SoftGrip: towards a soft robotic platform for automatized mushroom harvesting[C]// European Robotics Forum 2024. Springer Proceedings in Advanced Robotics, 2025: 48 – 52.

[30] 姜凤利, 王誉诺, 李金翰, 等. 基于机器视觉的双孢蘑菇品质在线分级系统[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(5): 633 – 640.
Jiang Fengli, Wang Yunuo, Li Jinhan, et al. Online grading system for *Agaricus bisporus* quality based on machine vision[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(5): 633 – 640. (in Chinese)

[31] 易菇网. 金针菇瓶栽工厂化生产技术(日本)[EB/OL]. (2014 – 04 – 09)[2026 – 03 – 07]. https://www.emushroom.net/edu/show-5850.html.

[32] Mahnans, Arthur L, He L, et al. Development of a decision-making algorithm to identify picking strategies for robotic mushroom horvesting[J]. Compater and Electronics in Agriculture, 2026,247:111753.

[33] 4AG Robotics. 4AG Robotics raises $40M Series B to power the future of autonomous mushroom farming[EB/OL]. (2025 – 07 – 29)[2026 – 03 – 07]. https://4ag.ai/4ag-robotics-raises-40m-series-b-to-power-the-future-of-autonomous-mushroom-farming/.

[34] FreshPlaza. Launch of large-scale robotic mushroom harvesting and scanning system[EB/OL]. (2025 – 07 – 09)[2026 – 03 – 07]. https://www.freshplaza.com/north-america/article/9748845/launch-of-large-scale-robotic-mushroom-harvesting-and-scanning-system/.

[35] Mushroom Machine. The Gamechanger[EB/OL]. [2026 – 03 – 07]. https://www.mushroommachine.co.uk/the-gamechanger/.

[36] Noble R, Reed J N, Miles S, et al. Influence of mushroom strains and population density on the performance of a robotic harvester[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 68(3): 215 - 222.

[37] Wageningen University & Research. PBR mushroom research; Robotics and automation in greenhouses and field crops; Unifarm-research facility for plant science[EB/OL]. [2026 - 03 - 07]. https://research.war.nl./en/organisations/pbr-mushroom-research.

[38] Penn State University. Researchers develop prototype of robotic device to pick, trim button mushrooms[EB/OL]. (2021 -06 - 01)[2026 - 03 - 07]. https://www.psu.edu/news/research/story/researchers-develop-prototype-robotic-device-pick-trim-button-mushrooms.

[39] Zakeri A, Fawakherji M, Kang J, et al. M18K: a multi-purpose real-world dataset for mushroom detection, 3D pose estimation, and yield forecasting[J]. Computers, 2025, 14(5): 199.

[40] Hubay C, Geösel A, Hubayné Horváth N, et al. Technological development of automated harvesting for cultivated button mushroom using image processing[J]. Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, 2024, 68(4): 413 - 423.

[41] Jiang X, Huang J, Wang W, et al. Moving toward automaticity: a robust synthetic occlusion image generation framework for edible mushroom phenotyping in dense scenes[J]. Agronomy, 2024, 14(6): 1337.

[42] 高文硕, 宋卫东, 王教领, 等. 果蔬菌采摘机械研究综述[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(10): 9 - 15.
Gao Wenshuo, Song Weidong, Wang Jiaoling, et al. Review of harvesting machinery for fruits, vegetables and mushrooms [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(10): 9 - 15. (in Chinese)

[43] 黄梓宸, Sugiyama S. 日本设施农业采收机器人研究应用进展及对中国的启示[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(2): 58 - 77.
Huang Zichen, Sugiyama S. Research and application progress of harvesting robots in Japanese protected agriculture and its implications for China[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(2): 58 - 77. (in Chinese)

[44] Lemphane N J, Kotze B, Kuriakose R B. Mushroom forming smart farming techniques and challenges: a review[C]// Intelligent Systems and Applications. Cham: Springer, 2026: 476 - 486.

[45] 曹斌, 张月吟, 高博. 全球香菇产业发展历史、现状及趋势[J]. 食用菌学报, 2024, 31(3): 1 - 20.
Cao Bin, Zhang Yueyin, Gao Bo. History, current status and trend of global shiitake mushroom industry development[J]. Acta Edulis Fungi, 2024, 31(3): 1 - 20. (in Chinese)

[46] 王明友, 王达, 宋卫东, 等. 菇类采摘机器人研究现状和展望[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 1 - 8.
Wang Mingyou, Wang Da, Song Weidong, et al. Research status and prospects of mushroom harvesting robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1): 1 - 8. (in Chinese)

[47] 中国农业科学院农业信息研究所. 工厂香菇采摘机器人及基于视觉的分级采摘方法: 202410089130.0[P]. 2025 - 10 - 03.

[48] Tao K, Liu J, Wang Z, et al. ReYOLO - MSM: a novel evaluation method of mushroom stick for selective harvesting of shiitake mushroom sticks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 225: 109292.

[49] Wang Z, Tao K, Yuan J, et al. Design and experiment on mechanized batch harvesting of shiitake mushrooms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108593.

[50] 任彩红, 王明友, 吴今姬, 等. 我国食用菌工厂化装备研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(5): 207 - 213.
Ren Caihong, Wang Mingyou, Wu Jinji, et al. Current status and prospects of industrialized edible mushroom equipment research in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(5): 207 - 213. (in Chinese)

[51] 上海机器人产业技术研究院有限公司. 一种金针菇自动摘取-切根-配重及包装系统: 202111318948.8[P]. 2022 - 12 - 13.

[52] 南京农业大学. 一种移动式杏鲍菇采摘机器人: 202422761255.1[P]. 2025 - 10 - 03.

[53] Zhong M, Han R, Liu Y, et al. Development, integration, and field evaluation of an autonomous *Agaricus bisporus* picking robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108871.

[54] 王峰. 基于深度学习检测算法的双孢菇自动采摘装备研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
Wang Feng. Research on automatic harvesting equipment for *Agaricus bisporus* based on deep learning detection algorithm[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024. (in Chinese)

[55] Ma H, Ding Y, Cui H, et al. The application of an intelligent *Agaricus bisporus*-harvesting device based on FES - YOLOv5s [J]. Sensors, 2025, 25(2): 519.

[56] 卢伟,王鹏,王玲,等.褐菇无损采摘柔性手爪设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(11):28 - 36.
Lu Wei, Wang Peng, Wang Ling, et al. Design and experiment of a flexible gripper for nondestructive harvesting of brown mushrooms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 28 - 36. (in Chinese)

[57] Xu H, Xin Y, Wang Z, et al. The design and finite element analysis of the mushroom picking flexible robotic arm[J]. Journal of Vibroengineering, 2025, 27(3): 550 - 566.

[58] Koirala B, Kafle A, Nguyen H C, et al. A hybrid three-finger gripper for automated harvesting of button mushrooms[J]. Actuators, 2024, 13(8): 287.

[59] Shi H, Xu G, Lu W, et al. An electric gripper for picking brown mushrooms with flexible force and in situ measurement[J]. Agriculture, 2024, 14(7): 1181.

[60] 姬江涛, 李梦松, 赵凯旋, 等. 双孢菇柔性仿形采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 104 – 115.
Ji Jiangtao, Li Mengsong, Zhao Kaixuan, et al. Design and experiment of a flexible adaptive harvesting end-effector for *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 104 – 115. (in Chinese)

[61] Yang S, Ji J, Cai H, et al. Modeling and force analysis of a harvesting robot for button mushrooms[J]. IEEE Access, 2022, 10: 78519 – 78526.

[62] Huang M, Jiang X, He L, et al. Picking dynamic analysis for robotic harvesting of *Agaricus bisporus* mushrooms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185: 106145.

[63] 吴彦强,侯献伟,喻俊源,等.瓶栽鹿茸菇自动采收装置设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(8):105 – 116.
Wu Yanqiang, Hou Xianwei, Yu Junyuan, et al. Design and experiment of an automatic harvesting device for bottle-cultivated velvet pioppini mushrooms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 105 – 116. (in Chinese)

[64] Xie L, Gao Y, Lin Z, et al. Design and test analysis of a rotary cutter device for root cutting of golden needle mushroom[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 37219.

[65] Sujatanagarjuna A, Kia S, Briechle D F, et al. MushR: a smart, automated, and scalable indoor harvesting system for gourmet mushrooms[J]. Agriculture, 2023, 13: 1533.

[66] Huang M, Jiang X, He L, et al. Development of a robotic harvesting mechanism for button mushrooms[J]. Transactions of the ASABE, 2021, 64(2): 565 – 575.

[67] Han R, Zhong M, Chai X, et al. Design and development of a multi-stage variable stiffness flexible end-effector for selective harvesting of *Agaricus bisporus*[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 238: 110815.

[68] 俞高红, 赵芸, 李戈, 等. 基于机器视觉的蘑菇单体检测定位算法及其边界描述[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 101 – 104.
Yu Gaohong, Zhao Yun, Li Ge, et al. Detection and localization algorithm for individual mushrooms and boundary description based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 101 – 104. (in Chinese)

[69] 王风云, 冯文杰, 郑吉业, 等. 基于机器视觉的双孢蘑菇在线自动分级系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 256 – 263.
Wang Fengyun, Feng Wenjie, Zheng Jiye, et al. Design and experiment of an online automatic grading system for *Agaricus bisporus* based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 256 – 263. (in Chinese)

[70] Wang F, Zheng J, Tian X, et al. An automatic sorting system for fresh white button mushrooms based on image processing [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151: 416 – 425.

[71] Heinemann P H, Hughes R, Morrow C T, et al. Grading of mushrooms using a machine vision system[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(5): 1671 – 1677.

[72] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2016:779 – 788.

[73] 王磊磊, 王斌, 李东晓, 等. 基于改进 YOLOv5 的菇房平菇目标检测与分类研究[J]. 农业工程学报, 2023, 39(17): 163 – 171.
Wang Leilei, Wang Bin, Li Dongxiao, et al. Target detection and classification of oyster mushrooms in mushroom houses based on improved YOLOv5[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(17): 163 – 171. (in Chinese)

[74] Chen C, Wang F,Cai Y, et al. An improved YOLOv5s-based *Agaricus bisporus* detection algorithm[J]. Agronomy, 2023, 13(7): 1871.

[75] 杨林, 曾大鑫, 边银丙, 等. 改进 YOLOv5 的香菇子实体生育期识别方法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(9): 182 – 189.
Yang Lin, Zeng Daxin, Bian Yinbing, et al. Recognition method for growth stages of shiitake fruiting bodies based on improved YOLOv5[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(9): 182 – 189. (in Chinese)

[76] 杨淑珍,朱浩宇,杨凯威.基于改进 YOLO 11 的海鲜菇生长阶段精细化分类方法[J].农业机械学报,2026,57(3):342 – 352.
Yang Shuzhen, Zhu Haoyu, Yang Kaiwei. Fine-grained classification method for growth stages of seafood mushrooms based on improved YOLO 11[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(3): 342 – 352. (in Chinese)

[77] 谢立敏,黄轶,吴昊宇,等.基于 SwinPoinTr 的视角受限下杏鲍菇表型参数测量方法[J].农业机械学报,2025,56(3):148 – 157.
Xie Limin, Huang Yi, Wu Haoyu, et al. Measurement method of phenotypic parameters of Pleurotus eryngii under limited viewpoints based on SwinPoinTr[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 148 – 157. (in Chinese)

[78] 王玲, 徐伟, 杜开炜, 等. 基于 SR300 深度相机的褐蘑菇原位测量技术[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12):13 – 19,108.
Wang Ling, Xu Wei, Du Kaiwei, et al. In-situ measurement technology of brown mushrooms based on SR300 depth camera [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):13 – 19,108. (in Chinese)

[79] 卢伟，邹明萱，施浩楠，等. 基于 YOLO v5 - TL 的褐菇采摘视觉识别-测量-定位技术[J]. 农业机械学报，2022，53(11)：341 - 348.
Lu Wei, Zou Mingxuan, Shi Haonan, et al. Visual recognition, measurement and localization technology for brown mushroom harvesting based on YOLO v5 - TL[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 341 - 348. (in Chinese)

[80] Shi C, Mo Y, Ren X, et al. Improved real-time models for object detection and instance segmentation for *Agaricus bisporus* segmentation and localization system using RGB - D panoramic stitching images[J]. Agriculture, 2024, 14(5): 735.

[81] 施火结，苏庆列，谢俊淋，等. 金针菇自动采收机械设计[J]. 福建农机，2022(4)：1 - 5.
Shi Huojie, Su Qinglie, Xie Junlin, et al. Design of an automatic harvesting machine for enoki mushrooms[J]. Fujian Agricultural Machinery, 2022(4): 1 - 5. (in Chinese)

[82] 周顺. 面向工厂化生产的瓶栽白玉菇采收装置设计与试验[D]. 泰安：山东农业大学，2023.
Zhou Shun. Design and experiment of a bottle-cultivated white beech mushroom harvesting device for industrial production [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[83] Ji J T, Du S C, Li M S, et al. Design and experiment of a picking robot for *Agaricus bisporus* based on machine vision[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(3): 1 - 10.

[84] 王魏巍. 双孢菇采摘一体化系统设计与研究[D]. 兰州：兰州理工大学，2024.
Wang Weiwei. Design and research of an integrated harvesting system for *Agaricus bisporus*[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024. (in Chinese)

[85] 张俊. 面向工厂化褐菇种植的智能蘑菇采摘机器人设计[D]. 南京：南京农业大学，2019.
Zhang Jun. Design of an intelligent mushroom harvesting robot for industrial brown mushroom cultivation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[86] 施浩楠. 移动式仿人双孢菇采摘机器人设计[D]. 南京：南京农业大学，2021.
Shi Haonan. Design of a mobile anthropomorphic button mushroom harvesting robot[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[87] 邵逸星. 平菇采摘机器人避障最优运动规划技术研究[D]. 长沙：中南大学，2024.
Shao Yixing. Research on obstacle-avoidance optimal motion planning technology for oyster mushroom harvesting robots[D]. Changsha: Central South University, 2024. (in Chinese)

[88] Rong J, Wang P, Yang Q, et al. A field-tested harvesting robot for oyster mushroom in greenhouse[J]. Agronomy, 2021, 11(6): 1210.

[89] 4AG Robotics Inc. Automated mushroom harvesting system: US20240155985A1[P]. 2024 - 05 - 16.

[90] Xie L, Jing J, Wu H, et al. MPG - YOLO: enoki mushroom precision grasping with segmentation and pulse mapping[J]. Agronomy, 2025, 15: 432.

[91] Yin X, Yang L, Yao D, et al. Improved DeepLabV3 + and GR - ConvNet for shiitake mushroom harvest robots flexible grasping of mimicry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 236: 110449.

[92] Retsinas G, Efthymiou N, Anagnostopoulou D, et al. Mushroom detection and three-dimensional pose estimation from multi-view point clouds[J]. Sensors, 2023, 23: 3576.

[93] Gu Y, Li B, Lu W. Mushroom (*Agaricus bisporus*) picking robot based on mimicry of manual harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2026, 243: 111394.

[94] 刘世栋，周吉，常圆顺，等. 基于改进蚁群算法的双臂双孢菇采摘机器人采摘策略[J]. 林业机械与木工设备，2024，52(6)：30 - 35.
Liu Shidong, Zhou Ji, Chang Yuanshun, et al. Picking strategy of a dual-arm *Agaricus bisporus* harvesting robot based on improved ant colony algorithm[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2024, 52(6): 30 - 35. (in Chinese)

[95] Yao D, Yang Z, Chen H, et al. Research on the method of shiitake mushroom picking robot based on CSO - ASTGCN human action prediction network[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1665352.

[96] Vasios K, Porichis A, Mohan V, et al. Robotic mushroom harvesting with Real2Sim2Real and model predictive path integral based planning[C]//2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2025: 13131 - 13137.

[97] Porichis A. Reaping the rewards of autonomous robotic harvesting: imitation learning of picking motions directly from video [D]. Colchester: University of Essex, 2025.

[98] Song Hualu, Qi Kangkang, Feng Wenjie, et al. Design of robot navigation system under spatial constraints in shiitake mushroom fruiting room[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2026, 243: 111396.

[99] 梁秀英，刘欢，米盼盼，等. 基于 PP - liteseg 和 Jetson Orin Nano 的香菇菌棒表型测量方法[J]. 农业机械学报，2025，56(3)：140 - 147，179.
Liang Xiuying, Liu Huan, Mi Panpan, et al. Phenotypic measurement of shiitake mushroom sticks based on PP - LiteSeg and Jetson Orin Nano[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 140 - 147, 179. (in Chinese)