

加工番茄全程生产机械化技术与装备研究进展*

王海宁, 胡国玉[†], 赵艺涵, 章明星, 张伟杰

(新疆大学 机械工程学院(智能制造现代产业学院), 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 加工番茄作为我国重要的经济作物, 在生产中存在机械化薄弱及依赖人工作业的问题。如移栽环节依赖半自动设备作业, 需人工持续投苗及补栽, 导致作业精度与效率难以满足规模化种植需求; 采收环节因分选机构适应性不足, 果实含杂率居高不下, 制约商品化处理效率; 相比之下, 耕整地环节虽初步实现机械作业但深松质量仍有待提升; 针对加工番茄的植株特性, 植保环节存在精准施药的技术瓶颈。本文系统梳理国际和我国加工番茄全程生产机械化技术现状, 并对国内外耕整地机械、移栽机械、植保机械、采收机械的发展现状进行了综述分析。针对我国加工番茄生产机械化水平低、各环节发展不均衡的问题, 提出未来发展需聚焦关键环节技术攻关与装备迭代、农机农艺深度融合及生产机械自动化与智能化研究等建议, 以期为我国加工番茄全程机械化发展提供理论支持与技术参考。

关键词: 加工番茄; 全程机械化; 农业机械装备; 农机农艺融合

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2025.03.14.0001

中图分类号: S226.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)06-0745-019

引文格式: 王海宁, 胡国玉, 赵艺涵, 章明星, 张伟杰. 加工番茄全程生产机械化技术与装备研究进展[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(6): 745-763.

英文引文格式: WANG Haining, HU Guoyu, ZHAO Yihan, ZHANG Mingxing, ZHANG Weijie. Research progress on full-process mechanisation technology and equipment for processing tomatoes[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(6): 745-763.

Research Progress on Full-Process Mechanisation Technology and Equipment for Processing Tomatoes

WANG Haining, HU Guoyu, ZHAO Yihan, ZHANG Mingxing, ZHANG Weijie

(School of Mechanical Engineering (School of Intelligent Manufacturing and Modern Industries),

Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

Abstract: Processing tomatoes, as a major cash crop in China, still face challenges in mechanization and rely heavily on manual labor during production. For instance, the transplanting stage depends on semi-automated equipment, requiring continuous manual seedling placement and replanting, resulting in precision and efficiency that fail to meet the demands of large-scale cultivation. During harvesting, the limited adaptability of sorting mechanisms leads to persistently high rates of impurities in the fruit, hindering commercial processing efficiency. In contrast, while land preparation has achieved preliminary mechanization, deep loosening quality remains sub-optimal. Plant protection faces technical bottlenecks in precise pesticide application tailored to processing tomato characteristics. This paper systematically reviews the global and domestic status of mechanized technologies across the entire processing tomato production chain, analyzing the development of land preparation, transplanting, plant protection, and harvesting machinery. Addressing the low mechanization level and uneven development across production stages in China's processing tomato sector, this paper proposes future development should focus on: Tackling key technological challenges and upgrading equipment, deepening the integration of agricultural machinery and agronomic practices, and advancing research on automation and intelligent production machinery. These recommendations aim to provide theoretical support and technical guidance for achieving full mechanization in China's processing tomato production.

Key words: processing tomatoes; full-process mechanisation; agricultural machinery equipment; agricultural machinery and agronomic integration

* 收稿日期: 2025-03-14

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项“新疆哈密瓜全产业链提质增效技术研发与集成推广”(2024A02007)。

作者简介: 王海宁(2000—), 男, 硕士生, 从事特色农作物机械化技术与装备研究, E-mail: wanghaining52100@163.com.

[†] 通讯作者: 胡国玉(1977—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机器人与智能农机装备研究, E-mail: xjhuguoyu@xju.edu.cn.

0 引言

番茄 (*Solanum lycopersicum*) 作为我国重要的经济作物, 根据用途分为可鲜食型与加工型两大类. 其果实中富含番茄红素、 β -胡萝卜素等功能性成分, 不仅具有重要的营养价值, 还使得番茄成为制作番茄酱、番茄汁等深加工产品的理想原料. 加工番茄高附加值产品的开发, 一方面能提供多样化的营养食品, 丰富居民膳食选择; 另一方面可通过延伸产业链、提升产品价值, 推动农产品加工业的技术升级与结构优化. 加工番茄高附加值产品的开发, 使其在加工适应性上具备了鲜食番茄难以比拟的内在品质与商业价值^[1-4]. 从加工番茄的生产、种植及栽培特性来看, 加工番茄植株形态紧凑、果皮较厚、花期集中, 田间管理相对简化, 这些特性使其特别适宜大规模田间种植与全程机械化作业模式^[5]. 目前, 我国新疆、内蒙古等主要产区已初步建立涵盖耕地、种植、管理和收获等环节的集约化生产体系.

加工番茄的生产管理环节多, 且各环节的机械化应用水平存在显著差异. 美国、意大利等主产国已基本实现全程机械化, 其移栽、采收等关键环节技术成熟度高, 装备呈现出明显的智能化与集成化特征. 然而, 我国加工番茄的机械化生产仍面临各环节发展不均衡的挑战. 在耕整地环节, 虽已普遍采用机械作业, 但深松质量仍难以完全匹配农艺要求; 在植保环节, 受植株冠层密集影响, 雾滴难以有效沉积, 制约施药效果的提升; 在移栽环节, 因供苗装置定位精度不足, 仍需依赖人工补苗, 限制了作业效率的进一步提高; 在采收环节, 因分选机构对簇生果实的适应性较差, 导致果实含杂率居高不下, 直接影响最终商品品质.

本文基于全球加工番茄主产区的机械化发展动态, 系统梳理耕整地、移栽、植保、采收四大核心环节的机械化技术水平. 通过对比分析国内外装备技术差异, 揭示我国在加工番茄农机农艺协同、智能决策等领域的结构性短板. 研究结果将推动我国加工番茄产业从“机械替代”向“智能决策”转型升级, 助力实现《“十四五”全国农业机械化发展规划》提出的2025年耕种收综合机械化率超75%的目标^[6].

1 加工番茄产业现状

1.1 加工番茄种植分布与规模

加工番茄大规模种植对气候条件要求较高, 其适宜的种植区域主要集中在北纬 34° 至 50° 之间的地带. 该区域既不过度湿润, 亦不极端干燥, 且昼夜温差显著. 以美国加利福尼亚州的河谷地带、地中海沿岸地区以及中国西北地区为主, 这些地区具有独特的气候条件, 为加工番茄的生长提供了适宜的环境^[7-9]. 根据世界加工番茄委员会统计数据, 2024年全球加工番茄产量约为4 570万吨, 我国加工番茄产量达1 045万吨, 位居全球第二(图1). 我国加工番茄种植集中于新疆、内蒙古、甘肃及宁夏等西北地区, 形成了以新疆昌吉回族自治州、巴音郭楞蒙古自治州、塔城地区以及内蒙古河套平原为核心的规模化产业带. 我国加工番茄产业已形成以主产区为核心的规模化发展格局, 其生产规模位居世界前列. 新疆依托独特的自然条件与农业资源优势, 其种植面积占全国的80%以上^[10], 成为全国加工番茄的核心产区, 加工番茄产业链以深加工产品为主导, 形成了高附加值的出口导向型产业体系, 产品在国际市场中占据重要地位^[11-13].

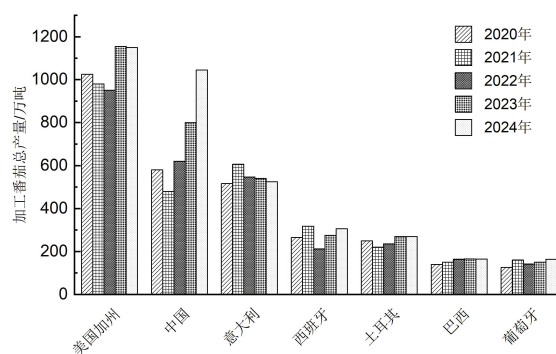


图1 2020—2024年全球加工番茄主产区加工番茄总产量

1.2 加工番茄种植机械化技术现状

我国在推进加工番茄全程生产机械化中, 耕整地、移栽、植保、采收等环节(图2)的机械化水平存在显著差异. 耕整地和植保环节虽具有较高的机械化覆盖面, 但与区域农艺的融合仍有待提升; 移栽与采收仍是制约

全程生产稳定性的关键环节。

在耕整地环节,尽管机械化覆盖逐渐扩大,但现有设备仍难以契合农艺要求。韦钟继等^[14]研究了带翼振动深松铲的运动特性,提出利用振动深松技术来减少耕作阻力,提升土壤松碎质量。试验结果表明,振动深松能显著降低土壤的坚实度,并提高松土效果,为耕整地环节提供了新的技术路径。张鲁云等^[15]研制了一款与大马力拖拉机配套的联合整地机,采用新型合金材料制成的耐磨耙片,并优化了整地机作业幅宽和折叠结构,能够有效提升新疆地区的大规模整地作业效率和质量。

在植保环节,风幕式喷杆喷雾机在我国的应用较为普遍,针对类似番茄植株冠层密集、药液沉积不均的问题,中国农业机械化科学研究院研究制造出基于风幕技术的风幕式喷杆喷雾机,通过气流控制提高药液的均匀性和穿透性^[16]。该风幕式喷杆喷雾机显著提高了农药的利用率,并减少了环境污染。

在移栽环节,俞高红等^[17]通过优化机构设计与轨迹规划,提升了送盘和取苗系统的时空配合稳定性,改善了移栽作业的连续性和精准度。张妮等^[18]提出的“顶钵-夹茎”组合式取投苗装置,兼顾低损伤与高一致性,解决了传统取苗装置存在的损伤问题。文永双等^[19]构建了缺苗检测与补苗闭环系统,减少了人工依赖并提高了苗体的整齐度。

在采收环节,国内机型如天鹅4FZ-1.5、锐拓4FZ-30等,借助多级振动筛分、风选和视觉分选模块的协同作用,提升了作业效率,并优化了簇生果的分离效果。国际机型如G48、THV在色选与成熟度识别技术上积累了丰富经验,为国内在杂质剔除和分选效率方面的研究提供借鉴。



图2 加工番茄全程生产机械化作业环节 (a) 耕整地, (b) 移栽, (c) 植保, (d) 采收

2 加工番茄耕整地机械

2.1 加工番茄种植对耕整地的具体要求

在加工番茄种植前,耕整地环节的土壤条件、深耕施肥及整地标准至关重要。选择地块时,应优先考虑地势平坦、土层深厚且排水性能良好的区域,以有效规避连作重茬现象,进而降低土传病害的发生风险。具体操作方面,前茬作物收获后应开展秋季翻耕,翻耕深度控制在30 cm以上。待到第二年春季整地阶段,应采用对角耙地方式,耙地深度需控制在0~15 cm的范围内,随后开展镇压作业。通过上述流程,可确保土壤具备平整、疏松、细碎且无杂质的特性,为加工番茄的健康生长奠定坚实基础^[20]。

2.2 我国耕整地机械

在加工番茄种植前,耕整地机械主要分为两大类。第一类为耕地设备,如旋耕机、深松机;第二类为整地设备,包括镇压器、起垄机、圆盘耙等。其核心功能在于改善土壤结构,增强土壤的透气与蓄水能力,掩埋杂草和残茬,有效抑制病虫害发生,从而为加工番茄的生长发育提供适宜的环境^[21]。

我国普遍采用单一功能的耕整机械,其主要承担耕地、整地、起垄和中耕等任务。然而,这种作业方式需

要机械多次进入田间,使土壤被反复碾压,引发土壤机械压实问题,显著降低土壤的孔隙度,形成新的犁底层.为解决这一问题,建议采用集灭茬、起垄、压制、施肥、深松等多种功能于一体的复式农机产品.该产品不仅能显著提升作业效率,还能有效减少拖拉机的田间作业次数,从而保护土壤免受进一步破坏^[22-23].现有耕地机械并非针对加工番茄研发,其深松深度在30 cm以上,且西北环境干燥,机器对土壤的适应性较差,现阶段多采用深松机作业后再进行整地.但深松作业存在阻力大、能源消耗多和土壤松碎效果差等难题,故减小阻力、降低能源消耗、提高土壤松碎效果成为我国研究的重点课题^[24].

韦钟继等^[14]针对带翼振动深松铲展开研究,旨在降低耕作阻力.对机具深松部件进行了运动仿真分析,使铲翼和铲尖的切削与抬升土壤动作能够同步交替开展.铲尖主要负责水平切削土壤,而铲翼则侧重抬升土壤,并对土壤实施二次破碎疏松作业.在此基础上,利用振动方式来减小耕作阻力,进而有效提升土壤的疏松质量(图3).田间试验表明,振动深松后20~30 cm土层的坚实度降低53.7%,而不振动深松的坚实度仅降低48.8%,振动深松的松土效果有一定提升.



图3 1ZTS-200振动深松机 (a) 结构简图, (b) 样机

注: 1为机架; 2为变速箱; 3为振动偏心轴连杆式机构; 4为偏心振动传动杆; 5为带翼深松部件; 6为限深轮; 7为切割圆盘刀

新疆普遍采用铺膜铺管的种植方式,该方式对地表平整度要求较高.深松作业完成后,土壤中仍存在较多孔隙,土块较为松散,整体平整度尚不能满足加工番茄种植需要.故需在土壤墒情适宜时及时进行整地作业.针对新疆地区种植面积广阔、大马力拖拉机保有量逐年提升的情况,农户对大型联合整地设备的需求日益迫切.为此,张鲁云等^[15]研制了一款与大马力拖拉机配套的联合整地机(图4).该设备采用新型合金材料制成的耐磨耙片,作业幅宽达7.2 m,且机架具备折叠功能,便于运输.该机型整地效果好,作业效率高,在新疆地区得到广泛应用.

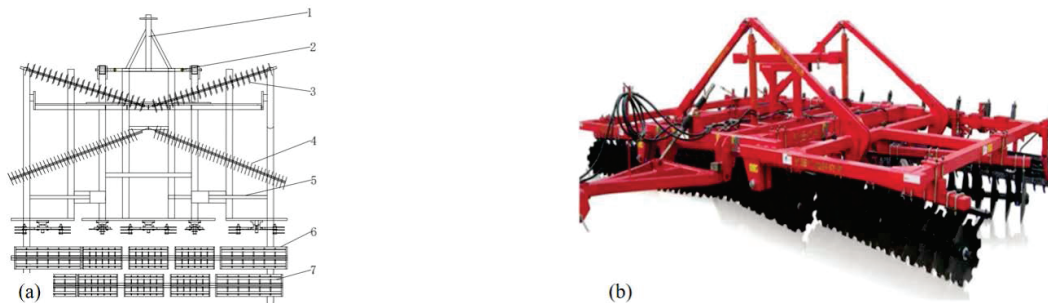


图4 1ZL-7.2型联合整地机 (a) 结构简图, (b) 样机

注: 1为牵引架; 2为中间机架; 3为缺口耙组; 4为后圆盘耙组; 5为折叠架; 6为碎土辊; 7为镇压辊

2.3 国外耕整地机械

国外对于加工番茄大田作物的耕整地机械化早于我国,并针对加工番茄种植规模大和耕地深的特点,研发设计了多种具备深松功能的大型联合整地机.目前,国外应用于加工番茄大田作物的大型联合整地机的发展现状呈现技术先进、性能优良、功能多样化、智能化程度不断提高等特点,且多采用液压驱动的形式,能够实现大宽幅作业的灵活调整.在液压装置加压作用下,农田不平整的情况也能保持一致的耕深^[25].如意大利Maschio生产的Dracula Hydro联合整地机^[26]装备了液压柱塞机构取代了传统的双弹簧减震器,这种解决方案

使铲齿承载力达到900 kg,保证了所有情况下的稳定表现,避免了作业区域内实际深度小于标定深度的风险,且其作业深度通过液压可调,调节范围为8~30 cm,可用于加工番茄灭茬、松地、平土、镇压等工作.法国Kuhn生产的Performer联合整地机^[27]配有4排深松齿,深松齿排间距为28 cm,提高了残茬的通过性.每排弹齿间的横向间距为15 cm,能够在多石和板结地进行高效作业.在任何类型的土壤条件下,新型不停机液压保护系统可实现工作深度始终保持恒定,在多石地块也可实现900 kg的液压齿尖压力,确保作业更稳定、均匀(图5).



图5 国外联合整地机(a) Dracula Hydro, (b) Performer

综上,国内耕整地机械应结合作物农艺要求重点研发多功能复式作业机械,整合灭茬、起垄、压制、施肥、深松等工序,减少田间碾压次数;开发智能化深耕控制系统,结合液压传感技术实现自适应调节;优化深松铲结构,引入仿生设计降低阻力,提升土壤松碎率,同时降低能耗,推动耕整地环节向高效节能方向发展.

3 加工番茄秧苗移栽机械

3.1 加工番茄秧苗的特点

加工番茄秧苗展现出显著的农艺特征及与机械化操作的兼容性,其紧凑的株型与粗壮的茎秆结构,为机械化移栽过程中降低损伤提供了有利条件.加工番茄秧苗的特性,使其适宜于大田环境下的种植,且当前加工番茄的种植模式以育苗移栽为主.育苗移栽技术作为一种关键的农业技术手段,对于提升作物的抗旱、抗寒以及抵抗病虫害能力具有显著的促进作用.通过实施育苗移栽,可有效缩短作物的生长周期,提高单位面积的产量,这对促进高产高效农业发展具有深远影响.机械化移栽作为作物生产机械化流程中的核心环节,其发展水平直接反映农业生产机械化与现代化的进程^[28-29].

3.2 我国加工番茄移栽机械

根据供苗方式的差异,现有移栽机械可分为半自动和全自动两大类.半自动移栽机械在操作过程中需要人工取苗并将其放置于送苗装置中,这导致了其工作效率相对较低、作业连续性较差以及对人力的依赖较大.尽管存在诸多局限性,半自动移栽机械在我国加工番茄的移栽作业中仍占据相当大的比例^[30-32].全自动移栽机通过集成自动供苗系统,成功替代了传统的人工取苗和喂苗环节.这种创新不仅保证了作业流程的连贯性和高效性,而且显著降低了人工在取喂苗阶段的劳动强度.这不仅提升了机械作业的经济效益,而且对加工番茄生产机械化的未来发展产生了深远影响.

在加工番茄全自动移栽机中,供苗装置包括送苗装置与取苗装置,鉴于供苗装置对加工番茄移栽机的重要性,国内移栽机领域学者针对供苗装置开展了大量研究.张玉泉等^[33]针对番茄移栽机取送苗装置(图6)高速运动下因负载突变与摩擦振动引发的定位误差及稳定性问题,提出一种基于干扰观测器的取送苗装置非奇异快速终端滑模控制的控制策略.其研究通过建立夹持-驱动系统的非线性摩擦模型与惯性力动态方程,量化了高频扰动对定位精度的累积影响;进一步设计模糊自适应抗干扰控制器,结合扰动观测器在线补偿摩擦振动与负载突变干扰,有效抑制了传统PID控制在高速响应中的滞后问题.试验表明,该方法使定位误差降低42%,漏苗率下降至3%以下,验证了动态建模与抗干扰策略对系统稳定性的优化作用.

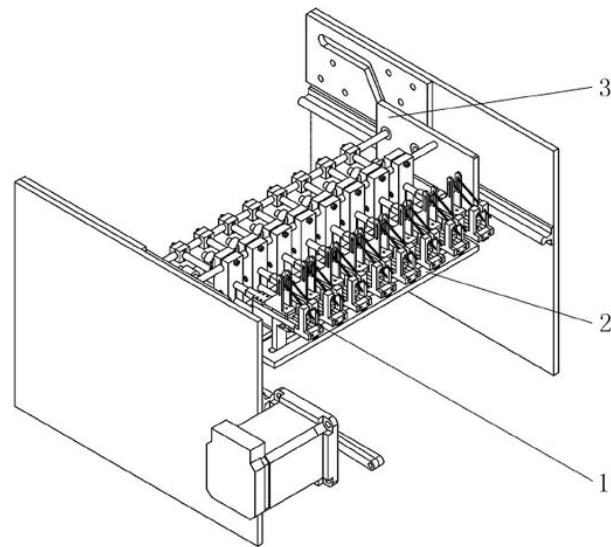


图 6 翻转式取送苗装置结构示意图^[33]

注: 1为取投苗机械手; 2为机械臂翻转机构; 3为分苗机构

俞高红等^[17]针对降低取送苗阶段误差问题, 提出了一种基于凸轮连杆与扇形齿轮驱动的四连杆纵向送盘机构设计方案(图7)。该方案基于穴盘的具体尺寸以及配套取苗机构的运动原理, 深入规划纵向送盘的运动轨迹。在此基础上, 运用遗传算法综合优化了运动轨迹。随后, 对送盘机构进行了结构设计、虚拟仿真以及取苗试验, 验证所设计的纵向送盘机构的合理性与可行性, 进而提升蔬菜钵苗全自动移栽机中纵向送盘机构的精确度和稳定性。

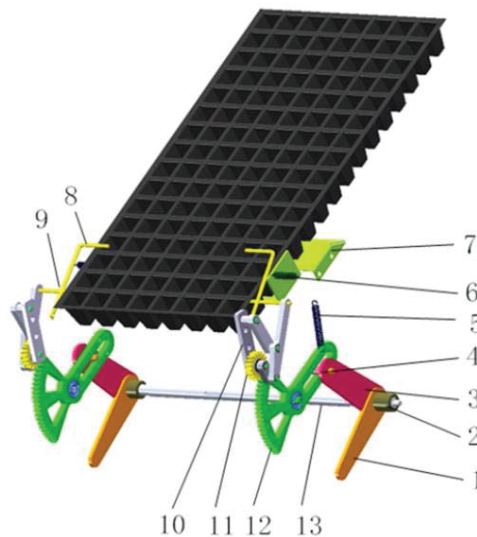
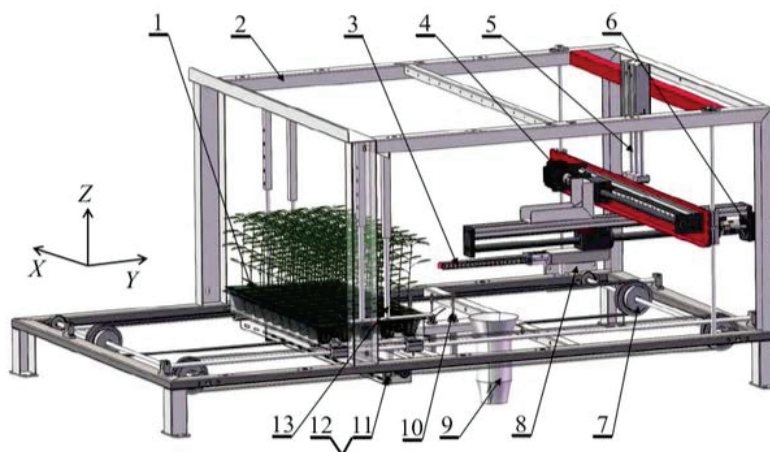


图 7 四连杆纵向送盘机构^[17]

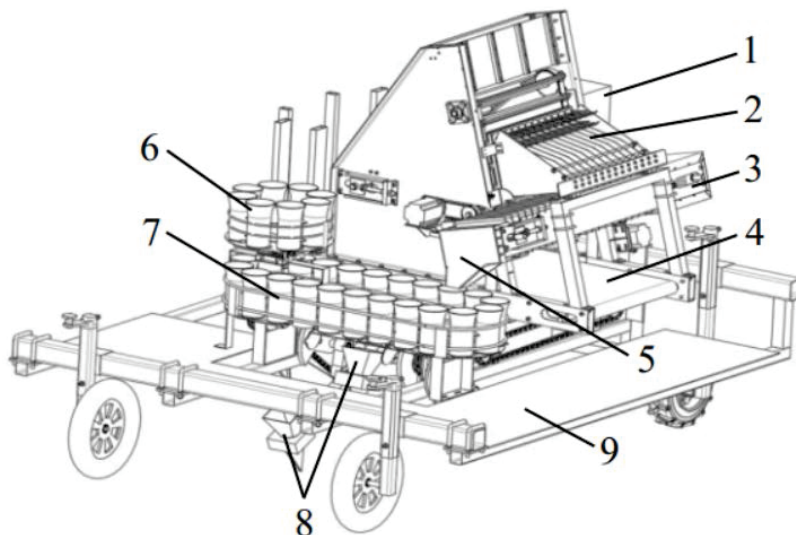
注: 1为摆杆; 2为套筒; 3为联动杆; 4为滑块销; 5为扇形齿轮弹簧; 6为压盘杆弹簧; 7为穴盘支撑板; 8为压盘杆; 9为送盘杆; 10为四杆机构; 11为圆齿轮; 12为扇形齿轮; 13为联动轴

张妮等^[18]针对取苗装置钵苗破损率高和取苗成功率低等问题, 基于钵苗力学分离原理开发了顶钵-夹茎组合取苗装置(图8)。该装置创新采用分阶段作业模式: 第一阶段通过顶升机构实现钵体与穴盘的初步分离, 第二阶段则运用柔性夹持机构完成茎秆的精准提取。这种分段式作业机制突破了传统夹茎式取苗装置存在的技术瓶颈。研究表明, 常规取苗装置在作业过程中易受植株茎秆力学性能薄弱以及钵体-穴盘界面结合力过强等因素影响, 常导致移栽过程中出现钵体破碎或根系完整性受损等不良现象。通过实施分离阶段力学解耦策略, 新型复合式机构有效降低了茎秆受力载荷和基质黏滞阻力, 经试验验证, 其作业完整性与操作效率均较传统装置显著提升。

图8 顶钵-夹茎组合取苗装置^[18]

注: 1为穴盘苗; 2为机架; 3为夹茎取苗机构; 4为取苗X向驱动电机; 5为Z向升降机构; 6为取苗Y向伸缩电机; 7为苗盘输送装置; 8为苗盘输送电机; 9为苗杯; 10为苗盘定位杆; 11为顶钵装置; 12为顶钵Z向移动电机; 13为压盘机构

供苗装置的优化设计,核心目标是解决移栽过程中的漏栽问题.文永双等^[19]为解决漏栽问题,成功研发出一种钵苗检测与缺苗补偿系统(图9).该系统运用传感器技术精确判断苗盘中的缺苗情况,并通过PLC控制步进电机驱动补苗装置完成补苗操作.试验结果表明,该系统实现了98.15%的识别准确率,将移栽机的漏栽率显著降低至2.31%,为提高移栽机的作业效率和质量提供了技术保障.

图9 钵苗检测与缺苗补偿系统^[19]

注: 1为控制柜; 2为取苗机构; 3为送苗机构; 4为空盘回收机构; 5为投苗漏斗; 6为补苗装置; 7为分行装置; 8为栽植机构; 9为踏板

根据移栽机型式不同,可分为钳夹式、导苗管式、挠性圆盘式和鸭嘴式等^[34].栽植结构是移栽机核心机构之一,其性能直接影响钵苗成活率.其中:导苗管式移栽机与挠性圆盘式移栽机在工作时,秧苗会出现倒伏与埋苗的情况,不适合膜上移栽.钳夹式移栽机的结构相对简单,适用于裸苗和细长苗的移栽.然而,该机型对秧苗的形状有较高的要求,株距和行距的调节较为困难,工作部件容易对秧苗造成损伤.此外,在速度较快的情况下容易出现漏栽的情况,无法进行膜上移栽^[35].在加工番茄的育苗移栽过程中,鸭嘴式移栽机因其对茎秆秧苗无损伤的特性而被证明是最适宜的移栽机类型,适用于根系脆弱且不发达的钵苗移栽.移栽机具备入土开穴的能力,适用于薄膜上打孔移栽技术,且在移栽过程中能够提供稳定的秧苗扶持,确保移栽后的秧苗具有较高直立度.

国内具有代表性的加工番茄全自动移栽机械,如巴州良佳制造有限公司生产的2ZB-2型钵体育苗旱地全自动移栽机(图10),能一次性实现机械自动取苗、分苗、投苗、破膜打穴、栽苗、覆土、压土等作业,适用于平地、铺膜地及垄上移栽番茄、辣椒等钵体育苗农作物^[36]。



图 10 2ZB-2型钵体育苗旱地全自动移栽机

3.3 国外加工番茄移栽机械

在应对加工番茄工业化种植的特殊农艺要求方面,欧美国家农业装备研发机构针对其植株茎秆粗度大、冠层结构紧密及规模化垄作特征,开发了适配性高的移栽装备.以欧洲农机企业Ferrari推出的Futura全自动移栽机为例(图11),其创新性体现在定制化倾斜苗盘结构是依据番茄钵苗根系生物力学特性优化设计的,弹性夹持机构与气液复合驱动系统的协同配合可适应茎秆脆性特征,通过光电传感阵列与膜面定位装置的系统集成,实现了移栽作业中植株定位、覆膜开孔与定植操作的相位同步控制.该装备通过多模块协同作用,显著提升了加工番茄种植的农艺适配性^[37-38]。



图 11 Ferrari Futura全自动移栽机

日本农业生产经营用地规模相对较小,且劳动力资源相对匮乏,其在加工番茄等类似作物移栽作业中所采用的全自动移栽机,主要以小型化与精密化为设计导向.这类移栽机在机械传动技术应用方面较为常见,如日本洋马公司的PF2R型乘坐式全自动旱田钵苗移栽机(图12).该设备具备一次性完成镇压、取苗、开孔、落苗、

覆土等全自动一体化移栽作业的能力,可在起垄(单垄两行、两垄两行)和平地等多种状态下实现松土移栽.其取苗方式采用机械手臂取苗,适应苗高范围在40~100 mm、叶龄3~4叶、盘根良好的叶茎类蔬菜钵体苗.在作业条件方面,移栽泥面土块颗粒需小于40 mm、作业面无杂草、土壤含水率不大于25%的起垄或平地移栽环境^[39].



图 12 PF2R型乘坐式全自动旱田钵苗移栽机

综上,尽管我国加工番茄全自动移栽机的研发起步较晚,但自全自动移栽机研发启动以来,我国在送盘、取苗、栽植等关键环节已取得显著进展.近年来,多家企业研发的全自动移栽机已逐步投入实际应用,并展现出良好的作业效果.然而,目前仍面临若干关键问题,例如取送苗机构在长时间作业后工作误差逐渐增大,以及在复杂田间环境下栽植机构可能出现的突发性堵塞问题.此外,补苗作业目前仍需依赖人工完成.故全自动移栽机在我国的研究与应用仍需经历长期的实践检验.

4 加工番茄植保机械

4.1 加工番茄植株特点

加工番茄植株特点是矮化自封顶,一般植株高度为30~70 cm,分枝数多,匍匐、直立或半直立生长,植株连在一起,导致冠层浓密,上下层相遮挡,施药难以打透^[40].并且加工番茄一般种植规模比较大,要确保在规定时间内将配置好的药液喷洒完成.故如何有效提高植保机械喷洒效率和药液利用率,成为加工番茄植保机械设计的核心问题.

4.2 我国加工番茄植保机械

目前,我国广泛采用风幕式喷杆喷雾机(图13)对加工番茄进行病虫害防治工作.在应对5级以下风力的作业环境时,该施药系统通过特定气流控制技术实现稳定作业.作业过程中,鼓风机驱动气流经防风气囊在施药区域前方构建动态屏障,该屏障可有效阻隔外界风力对药液喷洒轨迹的干扰.施药装置运行过程中,防风气囊产生的下行气流接触地表后形成向上反冲气流层,该气流层具备双重功能:(1)通过湍流效应促进药液微粒的二次雾化;(2)借助气流抬升作用增强雾滴的穿透性能.这种复合气流控制技术使作物冠层(包含叶片正反表面)实现全向药液附着,在确保沉积均匀性的同时显著提升农药有效利用率^[41-42].北方大面积农田耕作常在有风条件下进行,该设备能显著减少农药使用量,提升作业效率.

然而,此类大容量喷雾设备在喷施作业过程中,会产生大量细小的药液雾滴,这些雾滴易向非靶标作物和非靶标环境扩散,引发一系列负面效应,包括但不限于周边环境污染、非靶标生物受害、农产品中农药残留超标以及农药利用率降低,这些问题最终影响健康、造成财产损失^[43].故开发和应用植保无人机喷药技术尤为迫

切. 与传统有人驾驶的陆地及航空机械施药相比, 植保无人机无需建设起降跑道, 在高机动性、成本低廉等方面展现出显著优势^[44].

李继宇等^[45]罗列市场上具有代表性的四种旋翼无人机(图14), 并总结了相关特点(表1), 在对类似加工番茄等大田作物施药时, 植保无人机更加关注最大起飞质量、满载悬停时间以及标准载荷等体现其搬运农药能力的参数. 但如果综合考虑推重比、载荷比、旋翼作业面积和旋翼作用空气形成的有效面积风压强, 现有植保无人机应以发展绝对载质量能力为主, 还是强调相对载质量能力为主, 则需要开展大量研究来确定. 作者根据作业时机体、雾滴的物理状态、旋翼气流、脱靶飘移、对靶沉积、雾滴附着、机体控制、气流与作物互动、喷施量控制以及作业模式等基本要素进行分析研究, 分析了作业模式无法直接表征作业效果、高精度飞行参数难以转化为作业参数的问题.



图 13 风幕式喷杆喷雾机



图 14 四种旋翼无人机 (a) 电动多旋翼MG-1S, (b) 油动多旋翼DZ310, (c) 电动单旋翼S40-A, (d) 油动单旋翼3WQF120-12

表 1 无人机类型及特点

类型及型号	主要特点
电动多旋翼MG-1S	轻量化设计: 整机10 kg, 最大起飞24.8 kg, 载荷比1:1; 短时高效: 悬停10 min, 抗风压11.17 kg/m ² ; 精准作业: 覆盖1.79 m ² , 适合小面积植保
油动多旋翼DZ310	大载重长航时: 标准载荷60 kg, 悬停60 min; 强抗风性: 风压46.62 kg/m ² , 适应恶劣环境; 大田适用: 覆盖3.11 m ² , 适合规模化喷洒
电动单旋翼S40-A	高载荷比: 载荷20 kg (推重比2.08); 大旋翼覆盖: 旋翼直径2 400 mm, 覆盖4.52 m ² ; 低风压限制: 仅8.85 kg/m ² , 适合静风条件作业
油动单旋翼3WQF120-12	平衡性能: 标准载荷12 kg, 悬停25 min (推测); 中等抗风: 风压9.21 kg/m ² 燃油优势: 兼顾续航与轻载任务, 覆盖4.56 m ²

近些年,随着智能化技术的发展,除了植保无人机,自走式对靶喷雾机(图15)逐渐成为大田防治的主流.如李海龙等^[46]改进大田自走式对靶喷施机器人,提高了对靶喷施作业的准确率,确定了符合大田高效和低成本作业的校正方案.

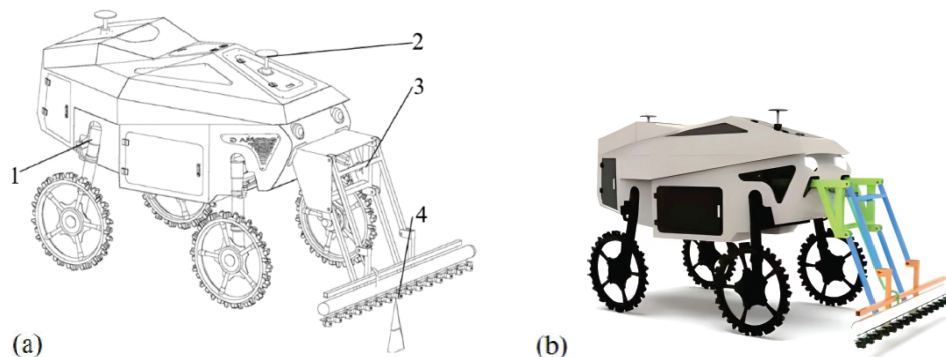


图 15 大田自走式对靶喷施机器人^[46] (a) 结构简图, (b) 实物

注: 1为行走底盘; 2为GNSS系统; 3为对靶施药控制系统; 4为电磁喷头



图 16 马佐蒂3WPZ-4620N/5280N自走式喷雾机

4.3 国外加工番茄植保机械

欧美国家的作物普遍以露地垄栽的大规模、产业化种植为主,普遍采用大型喷杆喷雾机,喷幅可达20 m以上.液压技术的运用使喷杆的平衡性与稳定性大幅提高.同时,配备了计算机和电子控制技术,能够实时监测和调整大型喷杆喷雾机的前进速度、喷杆倾斜度、喷量、喷洒面积和药箱剩余药液量等信息.显著提高了操作的便利性、喷雾机的作业效率和作业精度.如美国John Deere公司的马佐蒂3WPZ-4620N/5280N自走式喷雾机

(图16),该产品配置了智能化电子控制系统,极大提高了施药的精准性.应用低量精准施药技术,并开发了一系列低量喷头,可根据不同的作业对象、气候情况等选用相应的低量喷头,以最少的农药达到最佳防治效果.这种技术的应用减少了农药的使用量,降低了农业生产成本,同时也减少了环境污染^[47-48].

综上,结合番茄植株特性,应推广变量喷雾技术,利用冠层传感器检测药液附着情况,动态调节施药量,以提高药物喷施精准性.同时,明确植保机械喷药质量相关标准,并针对喷药质量进行优化,量化控制风速、喷雾压力及载荷容量等物理变量,增强植保机械的抗风性和载荷能力;此外,还应研发环境友好型技术,降低农药用量,推动植保机械向精准化、低污染方向升级.

5 加工番茄采收机械

5.1 加工番茄采收的特点

加工番茄采收适用于机械化作业是由于其品种特性与种植管理高度适配.科研人员通过定向育种培育出果皮厚、果柄无节、成熟集中的品种,配合起垄栽培和膜下滴灌等技术,确保植株株高适中且果实位置便于机械操作.采收时采用一次性机械采收模式,通过振动分离和色选技术高效完成果实与枝蔓分离,显著提升效率并减少损伤.机械采收不仅节省人力成本,还能降低霉变风险,同时枝蔓等副产品可资源化利用.该模式在新疆等主产区已实现规模化应用,形成采收、加工一体化的高效产业链.

5.2 国内加工番茄采收机械

在加工番茄采收机械方面,近年来我国科研人员开展了大量研究.谭洪洋等^[49]通过比较梳齿法、振动分离法和机械手采摘法,设计出了一种偏心式激振机构的加工番茄果秧分离装置(图17).该装置工作原理为分离装置基于惯性力实现果实与植株的分离,其核心机构通过激振器偏心转子产生周期性激振力矩,驱动分离系统作变速旋转运动.沿圆周均布的弹性元件在离心作用下产生动态惯性载荷,形成抛甩效应,动态惯性力突破果柄连接强度使果实脱离,同时定向离心场将果秧持续后抛保证了果秧分离作业的连续性.

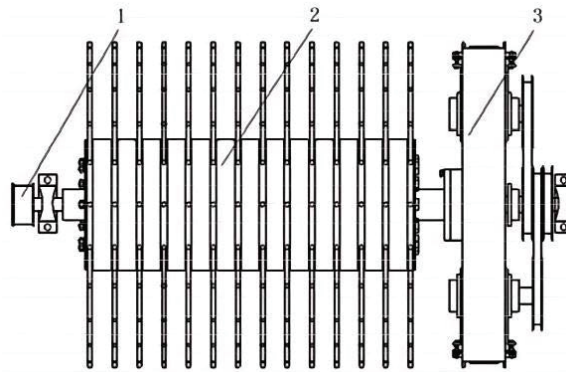


图 17 分离装置示意图^[49]

注:1为阻尼器;2为分离滚筒;3为激振器

李阳^[50]设计了一种刮刷式加工番茄采收装置,与以往一次性采收装置不同,该装置不用收割番茄果秧,根据青果与熟果的果柄分离率进行分批次采收,熟果先被采收,青果继续生长等待下次采收,能够更好地提高采收效率;陈阳等^[51]申请公开了一种番茄采收机及其割台仿形系统,当割台没有仿形功能时,番茄采收机挑秧杆和割刀易入土致使磨损严重,部分番茄会被割刀和挑秧杆损伤,导致割台整体适应性差、采收效果不佳.陈晨^[52]对加工番茄收获机的底盘调平系统进行了优化,设计了底盘调平液压系统方案使机身更加平稳,避免底盘调平系统不能正常工作而导致输送和色选皮带跑偏及偏磨、色选精度下降、割刀断裂甚至整机侧翻等问题.

国内农机生产厂家不断加大创新研发力度,推出了一系列新型加工番茄采收机械(图18).这些机械在采收效率和质量、智能化程度等方面均有显著提升(表2),满足了不同种植户的需求.在技术创新方面,国内农机生产厂家积极引进国外先进技术,并结合国内实际情况改进和创新.如山东天鹅棉业机械股份有限公司成功研发了天鹅牌番茄采收机,该机械具有高效、智能的特点,适用于大规模的番茄种植;石河子大学研制了4FZ-30型自走式番茄采收机^[53],其是国内机械化番茄采收的代表性作品,是一款全液压自走式番茄采收机,配套功率为180马力;此外,石河子大学、威明德科技股份有限公司和石大锐机机械装备有限公司联合研制了4FZ-35优化

型自走式番茄采收机^[54];2024年6月20日,铁建重工新疆有限公司研发的4FZ-80型番茄采收机有效应对新疆复杂种植环境,标志着我国农业机械化发展历程中的一次重要跨越.这些番茄采收机械各具特色,有的注重高效性,有的强调智能化,还有的关注机器耐用性和适应性.



图 18 国内加工番茄采收机械 (a) 山东天鹅4FZ-1.5型, (b) 石河子4FZ-30型, (c) 石大锐拓4FZ-35全液压, (d) 铁建重工4FZ-80型

表 2 国内加工番茄采收机械

自走式番茄采收机型号	主要特点
山东天鹅4FZ-1.5型	采收效率达80 t/h,集成智能双色分选系统(分选速度70 m/min)与液压四驱技术,适配垄作和平作地形;配备横向调平装置及仿形割台,显著降低果实破损率
石河子4FZ-30型	具有气动剔除机构,实现未成熟果及异物分选,集成切割捡拾、果秧振动分离等核心技术.整机全液压驱动,适配新疆大面积种植模式;采收效率达40 t/h,兼具结构简洁、操作便捷等特点,技术指标达到国际先进水平
石大锐拓4FZ-35全液压	搭载视觉分选系统,实时识别剔除杂质与未熟果,结合柔性振动筛分技术;整机采用全电控液压驱动,配备智能恒压割台与自适应底盘;作业幅宽1.8 m,采收效率达60 t/h
铁建重工4FZ-80型	搭载221 kW发动机与四轮驱动/转向系统,采收效率达80 t/h,适配1 350~1 650 mm种植幅宽,配备地膜清除割台及皮带反转防堵功能;有效应对新疆复杂种植环境.集成北斗导航智能操控与故障诊断系统

5.3 国外加工番茄采收机械

国外加工番茄采收机械的果秧分离技术研究始于二十世纪六七十年代.早期研究以机械传动为核心,开发出链式差速分离装置,通过链条纵向速度差异与横向摆动相结合的运动方式实现果秧分离.在此基础上,曲柄摇杆机构的应用进一步强化了机械运动的动态特性,利用非对称运动轨迹提升分离效果.随着技术进步,弹性元件与振动系统逐渐融入设计,如采用橡胶元件与滚筒协同工作的间歇式击打装置,以及结合垂直和水平振动的复合式分离机构,显著提升了分离过程的稳定性.此外,基于物料力学特性的逐筒器式分离方案,通过高低落差设计实现了果秧的物理分层剥离.这些技术的突破逐步构建了差速分离、弹性击打和复合振动三大基础原理体系,为现代机械化采收装备的模块化设计提供了关键技术支撑,推动了番茄采收技术从单一机械传动向多维度协同作用方向的系统性发展^[47,55].

从现有机型来看,国外机型根据加工番茄的果秧分离方式分为两种,分别是皮带摇筛式和弹齿滚筒式.皮带摇筛式采用带齿的输送带输送果秧,并利用带齿输送带运动速度和运动方向的频繁改变来分离番茄果实和果

秧. 当输送带改变运动方向或速度时, 番茄果实由于惯性作用会从果秧上脱落, 从而实现分离. 弹齿滚筒式采用滚筒的往复转动来分离番茄果实和果秧, 滚筒上装有弹齿, 这些弹齿在滚筒转动时带动番茄秧抖动, 抖动过程中, 番茄果实由于惯性作用会从果秧上分离出来^[56-58].

现代采收设备在传统分离技术基础上普遍采用先进的分离和筛选技术, 如振动分离器、电子色选仪等, 显著提升了采收效率和果实品质. 不同品牌和型号的机械在设计上充分考虑了气候条件、土壤类型、番茄品种等因素, 以确保在各种环境下稳定运行. 目前, 国外加工番茄采收机械技术成熟且机型多样(图19), 这些不同机型特点为全球番茄种植业提供了高效解决方案(表3).



图 19 国外加工番茄采收机械 (a) 美国FMC公司SL350T型, (b) 意大利Pomac公司COMSO系列, (c) 意大利GUARESI G89/93 MS40型, (d) 意大利MTS公司THV自走式

表 3 国外加工番茄采收机械

机具型号	主要特点
美国FMC公司SL350T型	转向方式为四轮液压助力转向, 作业速度15~30 km/h; 采收效率达20~35 t/h, 可一次性完成采收、分离、装车等工序; 日采收量高达40×667 m ² , 相当于80~90人的工作量
意大利Pomac公司COMSO系列	采用先进的自动化技术, 设计人性化操作系统, 操作简单易懂; 采收过程中可有效保护番茄果实, 避免果实受损
意大利GUARESI G89/93 MS40型	配备40通道电子分拣机, 额定功率175马力; 升级后卸载传送带宽81.5 cm, 带刀收割头100 cm; 增加风力和液压力(三个进风口), 采收效率达40 t/h
意大利MTS公司THV自走式	配备50通道电子分拣机, 特定振动器带振动轮辐; 采收效率达90~100 t/h, 含分拣机自动调平系统、带刀收割头; 风机风力和液压力增强, 风口均匀, 杂质清除更干净

综上所述, 我国在加工番茄采收机械方面的研究已取得显著进展, 研究内容涵盖分离装置、底盘稳定装置和割台系统等多个方面. 此外, 还突破了一次性采收模式, 开发出分批次采收装置. 这些研究为加工番茄采收机械的研发和应用提供了重要的技术支持. 后期应针对成熟期差异的特性, 重点研发基于光谱成像技术的成熟度识别系统和柔性分离机构, 以实现单个果实成熟度的精准判别和选择性采收, 同时配合自调节振动分离装置以减少未成熟果实的损伤. 针对番茄的多膜种植模式, 需开发自适应仿形割台和地膜清除模块, 并结合北斗导航路径规划以优化采收轨迹. 通过分批次采收模式与精准分选技术的协同创新, 推动采收环节向“减损提质、按需采收”的绿色化方向升级.

6 我国加工番茄全程生产机械化发展分析

6.1 发展现状分析

6.1.1 加工番茄机械化技术与装备研究起步较晚

我国在加工番茄机械化技术研发领域显著滞后,根源在于核心技术积累不足,关键环节的装备长期依赖国外技术.首先,在移栽环节,国产设备取送苗机构因动态摩擦产生误差累积,需通过人工补苗弥补技术上的不足,而国外Ferrari等企业,已将气液复合传动与光学定位技术相结合,显著提升了移栽精度.其次,国内自主创新方向偏重局部优化,多集中于深松铲曲面优化等.虽然短期内可以提升松土效果,但在智能传感、多物理场耦合控制等底层技术上未取得突破.这种侧重局部优化的现状,导致采收环节视觉分选系统在处理簇生果实时,识别稳定性与国外振动筛分方案存在显著差距.为提升整个产业链的竞争力,迫切需要加强自主创新能力,开发具有自主知识产权的核心技术和设备,推动整个行业的技术进步和产业升级.

6.1.2 加工番茄机械化装备缺乏

我国加工番茄生产机械化装备存在结构性短缺,其中核心环节专用设备不足,一定程度上影响产业升级.移栽环节依赖人工补苗,供苗机构适应性差,膜上栽植装备研发滞后,作业效率难以满足规模化需求;采收环节虽有自走式联合采收机,但分选机构效率低,色选系统智能化程度不足,果实含杂率和损伤率高.耕整地与植保环节初步机械化,但作业质量不能完全满足农艺要求.装备供给失衡导致生产衔接不畅,因此,我国加工番茄产业需突破技术瓶颈,构建适配标准化种植的全程机械化装备体系.

6.1.3 现有农机农艺不配套

我国加工番茄种植区域广泛,新疆、内蒙古等主产区在气候、土壤、品种及栽培模式上存在较大差异,缺乏统一农艺规范.农机装备多为通用型,难以满足多样化种植需求.新疆采用膜下滴灌与垄作结合的种植方式,内蒙古采用平作露地的种植方式,导致移栽和采收环节出现问题多,如地膜撕裂、移栽深度不均、漏栽率高、分离机构适应性不足、含杂率高等.耕整地机械参数与土壤墒情和轮作要求不匹配,增加土壤压实风险.农机与农艺的不匹配降低了作业效率,增加了人工成本,造成资源浪费.

6.2 加工番茄生产装备与技术发展展望

6.2.1 关键环节技术攻坚与装备迭代

在加工番茄全程机械化进程中,需针对核心环节的技术瓶颈实施定向突破与装备升级.移栽环节应重点提升供苗装置的精度与稳定性,通过抗干扰控制技术优化取送苗机构的定位误差,结合传感系统实时监测苗盘状态与膜孔位置,开发柔性夹持与自适应栽植机构,实现膜上精准栽植.采收环节需强化果实分离与分选效能,融合多级振动筛分、气流分选及视觉识别技术,优化分离机构对簇生果实的适应性,降低机械损伤率与含杂率.

6.2.2 农机与农艺的深度融合

农机农艺深度融合需以作物生长特性与环境适应性为核心,围绕植株形态、土壤条件、气候响应及作业质量等协同创新.针对加工番茄幼苗茎秆特点、加工番茄植株冠层密集特点,分别对应优化移栽机夹持机构与植保机械喷施精度,避免损伤植株并提升药液穿透性.同时结合果实成熟特性,设计采收机柔性分离机构,减少机械损伤.在种植模式适配方面,需针对主产区垄作或平作差异,定制移栽机与耕整机械相关参数,如新疆膜下滴灌模式需提高地膜适应性以降低撕裂风险,而内蒙古露地种植需强化设备抗风沙能力.在气候适应性方面,植保环节需结合区域多风环境开发抗飘移技术.作业质量方面,采收机械需平衡效率与精准度,通过多级振动筛分与气流分选技术协同优化,实现簇生果实高效分离与杂质精准剔除.

当前阶段已存在适配于加工番茄植株特性的农机产品,实现了农机与农艺的有效融合.如巴州良佳制造有限公司生产的2ZB-2型钵体育苗旱地全自动移栽机,针对番茄茎秆木质化程度较高的特性,设计了夹茎式取苗机构.该机构在取苗夹前端固定有防滑橡胶垫片,可有效避免取苗作业对茎秆造成的损伤.其整排夹取与投苗功能可高效且低损耗地完成钵苗移栽作业^[34].

6.2.3 开展加工番茄全程生产机械自动化与智能化研究

开展加工番茄全程生产机械自动化与智能化研究,针对加工番茄生产全程智能化程度低的问题,基于人工智能、北斗导航、卫星遥感、农业大数据、智能制造等先进技术和理念,集成研发智能耕整地机械、移栽机、植保机械和采收机,构建加工番茄病虫害监测与防控治理体系,提升机具的作业质量和作业效率,推动加工番茄

生产机械向智能化方向发展.

参考文献:

- [1] 崔锦, 王丽萍. 番茄育种现状及发展趋势[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(6): 21-23.
CUI J, WANG L P. Current situation and development trend of tomato breeding[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021, 27(6): 21-23. (in Chinese)
- [2] 田海燕, 张占琴, 颀建辉, 等. 加工番茄果实番茄红素与主要品质性状的关系[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(9): 2197-2202.
TIAN H Y, ZHANG Z Q, XIE J H, et al. Study on the relationship between lycopene and main quality characters of processing tomato[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(9): 2197-2202. (in Chinese)
- [3] IDE R, ICHIKI A, SUZUKI T, et al. Analysis of yield reduction factors in processing tomatoes under waterlogging conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 295: 110840.
- [4] BHATKAR N S, SHIRKOLE S S, MUJUMDAR A S, et al. Drying of tomatoes and tomato processing waste: A critical review of the quality aspects[J]. Drying Technology, 2021, 39(11): 1720-1744.
- [5] 郝朝会. 双动力回转振动式番茄果秧分离装置设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2015.
HAO C H. Experimental study and design of dual-power rotary vibration type tomato separation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2015. (in Chinese)
- [6] 徐彦平. 农机化技术推广存在的问题与对策[J]. 中国农机装备, 2024(4): 110-112.
XU Y P. Problems and countermeasures for promotion of agricultural mechanization technology[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2024(4): 110-112. (in Chinese)
- [7] 李荣霞, 刘磊, 刘伟, 等. 新疆加工番茄种植现状、问题及建议[J]. 中国蔬菜, 2022(4): 4-8.
LI R X, LIU L, LIU W, et al. Status of processing tomato cultivation in Xinjiang, problems and suggestions[J]. China Vegetables, 2022(4): 4-8. (in Chinese)
- [8] 陈晨. 番茄收获机底盘调平液压系统设计及基于AMESim的仿真[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(9): 28-33.
CHEN C. Design on hydraulic system of tomato harvester chassis leveling and simulation based on AMESim[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023, 43(9): 28-33. (in Chinese)
- [9] 杜红艳, 庞胜群, 马海翔, 等. 加工番茄早熟突变体农艺性状相关性及其通径分析[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(4): 943-950.
DU H Y, PANG S Q, MA H X, et al. Correlation and path analysis of agronomic traits of processing tomato early maturity mutants[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(4): 943-950. (in Chinese)
- [10] 中国农村技术开发中心. 自走式加工番茄收获机顺利完成中试[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(6): 175.
China Rural Technology Development Center. Self-propelled processing tomato harvester successfully completes pilot tests[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(6): 175. (in Chinese)
- [11] 郑茹月, 任前, 谢琪, 等. 中国西北旱区加工番茄需水量时空变异特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(7): 39-47.
ZHENG R Y, REN Q, XIE Q, et al. Spatial and temporal variability of irrigation water demand of processing tomato in the northwest arid region of China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(7): 39-47. (in Chinese)
- [12] 张录霞, 魏强, 李倍金, 等. 中熟、高产、高可溶性固形物含量的加工番茄新品种“屯河2606”的选育[J]. 蔬菜, 2024(7): 67-69.
ZHANG L X, WEI Q, LI B J, et al. Breeding of a new medium-maturity, high-yield, high content of soluble solids tomato variety “Tunhe 2606” suitable for processing[J]. Vegetables, 2024(7): 67-69. (in Chinese)
- [13] 陈宇, 马捷, 刘燕, 等. 河套地区加工型番茄高产高效栽培技术[J]. 蔬菜, 2022(5): 74-76.
CHEN Y, MA J, LIU Y, et al. High-yield and high-efficiency cultivation technology of processing tomato in the river-loop area[J]. Vegetables, 2022(5): 74-76. (in Chinese)
- [14] 韦钟继, 郑丁科, 杨丹彤, 等. 带翼振动深松铲运动特性分析及试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 32-37.
WEI Z J, ZHENG D K, YANG D T, et al. Kinetic characteristic analysis and experimental study for subsoiler with wing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(12): 32-37. (in Chinese)
- [15] 张鲁云, 杨怀君, 王子龙, 等. 1ZL-7.2型联合整地机的研制[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(1): 199-201.
ZHANG L Y, YANG H J, WANG Z L, et al. Design test of 1ZL-7.2 combined preparation machine[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 199-201. (in Chinese)
- [16] 申彬. 风幕式喷杆喷雾雾滴飘移和穿透特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
SHEN B. Experimental investigation on drift performance and penetration characteristics of air-assist boom sprayer[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)

- [17] 俞高红,赵钧,单杭琦,等. 蔬菜钵苗自动移栽机纵向送盘机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 285-293.
YU G H, ZHAO J, SHAN H Q, et al. Design and experiment of longitudinal feeding mechanism of vegetable pot seedling automatic transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 285-293. (in Chinese)
- [18] 张妮,张国忠,付建伟,等. 顶钵-夹茎组合式取苗装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 50-61.
ZHANG N, ZHANG G Z, FU J W, et al. Design and experiment of the seedling pick-up device with ejecting pot-clamping stem combination[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(3): 50-61. (in Chinese)
- [19] 文永双,张宇,田金元,等. 蔬菜移栽钵苗检测与缺苗补偿系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 123-129.
WEN Y S, ZHANG Y, TIAN J Y, et al. Design and experiment of detection and supply system of vegetable plug seedlings for transplanting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 123-129. (in Chinese)
- [20] 郭斌. 加工番茄优质高产栽培技术[J]. 农村科技, 2024(5): 56-58.
GUO B. Processing tomato high-quality and high-yield cultivation technology[J]. Rural Science & Technology, 2024(5): 56-58. (in Chinese)
- [21] 赵冬梅. 耕整地机械: 向宽幅大型化和高效联合化发展[J]. 农机市场, 2022(10): 36.
ZHAO D M. Tillage machinery: Towards wide and large-scale and high-efficiency joint development[J]. Agricultural Machinery Market, 2022(10): 36. (in Chinese)
- [22] 李兴国. 我国耕整地机械发展现状及未来趋势[J]. 农机使用与维修, 2024(6): 86-88.
LI X G. The development status and future trend of China's tillage and land preparation machinery[J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2024(6): 86-88. (in Chinese)
- [23] 马若飞,伟利国,赵博,等. 基于多传感器数据融合的旋耕耕深检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 52-64.
MA R F, WEI L G, ZHAO B, et al. Rotary tillage depth detection based on multi-sensor data fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 52-64. (in Chinese)
- [24] 王红元. 振动深松机的设计与试验[J]. 农机使用与维修, 2023(4): 15-17.
WANG H Y. Design and experimental study of a vibratory deep loosener[J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2023(4): 15-17. (in Chinese)
- [25] 李峰. 耕整地机械产品研发趋势及适用性分析[J]. 农机使用与维修, 2024(5): 103-105.
LI F. Product development trend and applicability analysis of cultivation and preparation machinery[J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2024(5): 103-105. (in Chinese)
- [26] 马斯奇奥. 新产品推荐之马斯奇奥Dracula Hydro多功能联合整地机[J]. 农业机械, 2025(8): 23.
MASCHIO. New product recommendation: Maschio Dracula Hydro multi-function combined tillage machine[J]. Farm Machinery, 2025(8): 23. (in Chinese)
- [27] 田辛亮. 黑土区玉米秸秆混埋还田技术及其配套关键部件研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
TIAN X L. Research on straw incorporation returning of corn and its corresponding key components in black soil region[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [28] 赵晓伟,韩长杰,赵占军,等. 新疆地区辣椒、番茄移栽机发展现状及趋势[J]. 农业科技与装备, 2015(5): 41-43.
ZHAO X W, HAN C J, ZHAO Z J, et al. Present situation and development trend of chilli and tomato transplanter in Xinjiang[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2015(5): 41-43. (in Chinese)
- [29] 崔志超,管春松,杨雅婷,等. 蔬菜机械化移栽技术与装备研究现状[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3): 85-92.
CUI Z C, GUAN C S, YANG Y T, et al. Research status of vegetable mechanical transplanting technology and equipment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 85-92. (in Chinese)
- [30] 刘蒙滋,姜凯,王秀,等. 蔬菜自动移栽机研究现状与展望[J]. 农机化研究, 2024, 46(10): 1-8.
LIU M Z, JIANG K, WANG X, et al. Research status and prospect of automatic vegetable transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(10): 1-8. (in Chinese)
- [31] 陈子文,曾添明,林繁松,等. 蔬菜机械化移栽装备研究现状[J]. 南方农机, 2024, 55(19): 1-7.
CHEN Z W, ZENG T M, LIN F S, et al. Current status of research on mechanised vegetable transplanting equipment[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2024, 55(19): 1-7. (in Chinese)
- [32] 齐祺,夏焕,沈天宜,等. 全自动蔬菜移栽机的应用现状与技术挑战[J]. 长江蔬菜, 2024(19): 7-11.
QI Q, XIA H, SHEN T Y, et al. Application status and technical challenges of automatic vegetable transplanting machine[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2024(19): 7-11. (in Chinese)

- [33] 张玉泉,任玲,杨苗,等. 基于非奇异快速终端滑模的移栽机取送苗机构运动控制[J]. 农业工程学报, 2025, 41(3): 22-31.
ZHANG Y Q, REN L, YANG M, et al. Motion control of transplanter seedling pickup and delivery mechanism using non-singular fast terminal sliding mode[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(3): 22-31. (in Chinese)
- [34] 俞高红,王磊,孙良,等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 1-20.
YU G H, WANG L, SUN L, et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 1-20. (in Chinese)
- [35] 刘飞,徐丽明,牛丛,等. 株距可调式葡萄苗木栽植机设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 184-193.
LIU F, XU L M, NIU C, et al. Design and experiment of a plant spacing adjustable grape seedling planting machine based on human computer interaction[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(10): 184-193. (in Chinese)
- [36] 张晨,梁佳,郭俊先,等. 2ZB-2型穴盘钵苗旱地膜上自动移栽机的研制与试验[J]. 新疆农机化, 2014(1): 19-20.
ZHANG C, LIANG J, GUO J X, et al. Development and test of 2ZB-2 type hole tray potting seedling dryland membrane automatic transplanting machine[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2014(1): 19-20. (in Chinese)
- [37] 刘凯华,刘威,祝露,等. 国内外蔬菜移栽机械发展现状与路径[J]. 现代农业装备, 2025, 46(3): 1-8.
LIU K H, LIU W, ZHU L, et al. Current status and development of vegetable transplanting machinery[J]. Modern Agricultural Equipment, 2025, 46(3): 1-8. (in Chinese)
- [38] 张勇. 全自动移栽机穴盘苗识别与控制系统的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
ZHANG Y. Research on plug seedling recognition and control system of fully automatic transplanter[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [39] 王宝龙,孙芳媛,刘建. 海南省设施叶菜机械化生产建议[J]. 农业工程技术, 2021, 41(34): 16-22.
WANG B L, SUN F Y, LIU J. Suggestions for mechanised production of leafy vegetables at facilities in Hainan Province[J]. Agricultural Engineering Technology, 2021, 41(34): 16-22. (in Chinese)
- [40] 吴闻,王吉奎. 新疆加工番茄机械化收获现状与效益分析[J]. 新疆农垦科技, 2018, 41(5): 28-31.
WU W, WANG J K. Analysis of the current status and benefits of mechanised harvesting of processing tomatoes in Xinjiang[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2018, 41(5): 28-31. (in Chinese)
- [41] 林贵忠,王立涛,朱世贤,等. 几种新型喷药机械简介[J]. 现代化农业, 2011(11): 46-47.
LIN G Z, WANG L T, ZHU S X, et al. Introduction to several new types of spraying machines[J]. Modernizing Agriculture, 2011(11): 46-47. (in Chinese)
- [42] 刘子源,李荣龙,黄宏宇,等. 风幕式喷雾机研究现状及发展趋势[J]. 南方农机, 2021, 52(19): 19-20+23.
LIU Z Y, LI R L, HUANG H Y, et al. Research status and development trend of wind screen sprayer[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(19): 19-20+23. (in Chinese)
- [43] 兰玉彬,彭瑾,金济. 农药喷雾粒径的研究现状与发展[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(6): 1-9.
LAN Y B, PENG J, JIN J. Research status and development of pesticide spraying droplet size[J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(6): 1-9. (in Chinese)
- [44] HE X K, JANE B, ANDREAS H, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 18-30.
- [45] 李继宇,兰玉彬,施叶茵. 旋翼无人机气流特征及大田施药作业研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 104-118.
LI J Y, LAN Y B, SHI Y Y. Research progress on airflow characteristics and field pesticide application system of rotary-wing UAV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(12): 104-118. (in Chinese)
- [46] 李海龙,权龙哲,朱成亮,等. 大田对靶喷施机器人喷头位置解析与校正[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 21-30.
LI H L, QUAN L Z, ZHU C L, et al. Nozzle positions resolving and calibration for the field target spraying robots[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(18): 21-30. (in Chinese)
- [47] 陆琳. 发达的国外植保机械化[J]. 云南农业, 2007(4): 23.
LU L. Developed foreign plant protection mechanisation[J]. Yunnan Agriculture, 2007(4): 23. (in Chinese)
- [48] 郑加强,徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 1-16.
ZHENG J Q, XU Y L. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 1-16. (in Chinese)
- [49] 谭洪洋,李成松,坎杂,等. 加工番茄果秧分离装置的设计及仿真[J]. 农机化研究, 2012, 34(1): 84-87.

- TAN H Y, LI C S, KAN Z, et al. Design and simulation on processing tomato fruit separation device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(1): 84-87. (in Chinese)
- [50] 李阳. 加工番茄刮刷式采摘装置的设计及试验[D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
LI Y. Design and performance experiment of the scraping and picking device on processing tomato[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017. (in Chinese)
- [51] 陈阳, 伍涛, 周阳, 等. 一种番茄收获机及其割台仿形系统: CN202210816274.2[P]. 2023-07-04.
CHEN Y, WU T, ZHOU Y, et al. A tomato harvester and its cutting deck profiling system: CN202210816274.2[P]. 2023-07-04. (in Chinese)
- [52] 陈晨. 自走式番茄收获机底盘调平液压系统设计[J]. 新疆农机化, 2023(5): 8-11.
CHEN C. Design of hydraulic system for chassis levelling of self-propelled tomato harvester[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2023(5): 8-11. (in Chinese)
- [53] 李阳, 王吉奎, 段文献, 等. 刮刷式加工番茄采摘装置试验研究[J]. 机械设计与制造, 2018(2): 267-269.
LI Y, WANG J K, DUAN W X, et al. Experimental research of scraping and picking in batches device on processing tomato[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(2): 267-269. (in Chinese)
- [54] 李成松, 坎杂, 谭洪洋, 等. 4FZ-30型自走式番茄收获机的研制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 20-26.
LI C S, KAN Z, TAN H Y, et al. Development of 4FZ-30 self-propelled tomato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 20-26. (in Chinese)
- [55] 朱兴亮. 基于非圆轮系加工番茄果秧分离振动发生器的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2016.
ZHU X L, Study of processing tomato fruit separate vibration generator base on non-circular gear planetary train[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016. (in Chinese)
- [56] 郝朝会, 杨学军, 周军平, 等. 双动力回转振动式番茄果秧分离装置优化与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 241-248+296.
HAO C H, YANG X J, ZHOU J P, et al. Optimization and validation of double power hybrid rotary vibration type tomato fruit separation device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(S1): 241-248+296. (in Chinese)
- [57] 朱兴亮, 李成松, 坎杂, 等. 加工番茄果秧分离技术发展现状分析[J]. 河北科技大学学报, 2013, 34(5): 399-402.
ZHU X L, LI C S, KAN Z, et al. Analysis of present development of fruit-seedling separation technology in tomato processing[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2013, 34(5): 399-402. (in Chinese)
- [58] 肖彬彬, 毕新胜, 蔡洁洁, 等. 加工番茄果秧分离装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2013, 35(5): 163-166.
XIAO B B, BI X S, CAI J J, et al. Design and experiment of separation device for the processing tomato[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(5): 163-166. (in Chinese)

责任编辑: 刘 敏