doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.001

棉花生产全程机械化技术与装备研究进展

陈学庚[1,2]　温浩军[1,2]　颜利民[1,2]　赵　岩[1,2]　缑海啸[1,2]　田辛亮[1,2]
郑招辉[1,2]　蒋德莉[1,2]

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832003)

摘要: 棉花作为重要战略与经济作物,在农村劳动力结构性短缺、生产成本持续升高的背景下,推进其生产全程机械化,对提升产业竞争力、保障国家棉花安全具有迫切现实意义。本文分别从耕整地、播种、田间管理、收获及残膜回收 5 个关键环节出发,系统梳理了国内外相关技术与装备的发展现状、典型机型、结构特点与性能。指出我国棉花生产虽已基本实现全程机械化,但仍面临核心装备性能与可靠性不足、关键部件依赖进口、土壤-机器-作物互作机理等基础研究薄弱、装备智能化水平不高、各区域机械化发展不均衡等问题。提出应聚焦采收、播种、田间管理、残膜回收等薄弱环节,突破关键核心技术;加强基础研究与前沿技术融合;推动基于北斗导航、多源信息感知与智能决策的精准作业系统应用,构建智慧生产体系;并制定区域差异化发展策略,推动中小田块适用装备研发与社会化服务模式创新。

关键词: 棉花; 耕整地; 播种; 田间管理; 收获; 残膜回收

中图分类号: S233.75　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)07-0001-23　　**OSID**:

Research Progress in Key Technologies and Equipment for Full Mechanization Production of Cotton

CHEN Xuegeng[1,2]　WEN Haojun[1,2]　YAN Limin[1,2]　ZHAO Yan[1,2]　GOU Haixiao[1,2]
TIAN Xinliang[1,2]　ZHENG Zhaohui[1,2]　JIANG Deli[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *China*
2. *Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: As a crucial strategic and economic crop, cotton faces pressing needs to advance full-process mechanization in its production, particularly in the context of structural labor shortages in rural areas and continuously rising production costs. This advancement is essential for enhancing industrial competitiveness and ensuring national cotton security. The development status, representative models, structural features, and relevant technologies and equipment were systematically reviewed, both domestically and internationally, focusing on five key stages: tillage, seeding, field management, harvesting, and residual film recovery. It indicated that while China had essentially achieved full-process mechanization in cotton production, challenges persist, including insufficient performance and reliability of core equipment, reliance on imported key components, weak foundational research on soil-machine-crop interaction mechanisms, low levels of equipment intelligence, and uneven mechanization development across regions. It was proposed to focus on weak links such as harvesting, seeding, field management, and residual film recovery, and to make breakthroughs in core technologies. Additionally, strengthening the integration of fundamental research with cutting-edge technologies was crucial. The promotion of precision operation systems based on Beidou navigation, multi-source information perception, and intelligent decision-making was recommended to establish an integrated smart production system. Furthermore, formulating regionally differentiated development strategies would advance the R&D of equipment suitable for small and medium-sized fields and innovate socialized service models.

Key words: cotton; tillage; seeding; field management; harvesting; residual film recovery

收稿日期: 2026-01-12　修回日期: 2026-02-05

基金项目: 国家棉花产业技术体系建设项目(CARS-15-26)

作者简介: 陈学庚(1947—),男,研究员,中国工程院院士,主要从事棉花生产机械化和残膜污染治理研究,E-mail: chenxgl30@sina.com

通信作者: 温浩军(1971—),男,研究员,主要从事棉花生产及残膜回收机械化研究,E-mail: 547273950@qq.com

0 引言

作为重要的战略作物和经济作物,棉花种植主要集中于亚洲、美洲及非洲的干旱半干旱适宜区域,中国、印度、美国、巴西、乌兹别克斯坦、澳大利亚为主要产棉国,合计产量占全球 70% 以上[1]。我国是全球最大的棉花生产国与消费国,种植区域呈现“新疆为主、黄河流域与长江流域为辅”的分布特征。2024 年新疆种植面积占全国 86.2%,产量占比为 92.2%[2-3]。

棉花的生长周期长、种植模式多、栽培自然条件差异较大、生产作业环节多。随着工业化、城镇化的加速发展,劳动力结构性短缺、人工成本持续上升[4]。棉花全程机械化已成为提升产量、降低成本、实现绿色可持续发展的必然选择。在全球不同国家和地区,其栽培模式、经营规模等差异显著,因此棉花生产机械化技术与装备也各具特点[5]。

美国作为全球棉花主产国之一,早在 20 世纪 70 年代便实现了棉花生产全程机械化,耕种收综合机械化率超 95%,机采率接近 100%,实现从耕整地、精准播种、变量施肥到智能采收、棉包溯源的全链条数字化管理。澳大利亚棉花生产机械化程度与美国齐平,播种环节采用宽幅联合作业机组(如配套播种机幅宽可达 21 m),植保环节普遍应用农用飞机喷施农药,收获环节以大型采收装备为主,充分体现规模化经营与机械化技术之间的协同优势[6]。乌兹别克斯坦、巴西等新兴棉花产区则以技术引进为主,加速棉花生产机械化进程。作为全国最大棉花生产基地,新疆棉花生产机械化覆盖耕整地、播种、田间管理、收获、残膜回收生产全过程[1,6]。在黄淮海流域棉区,受限于地块零散和种植规模较小的客观条件,机械化发展相对受限。而长江流域棉区普遍推行一年两熟制,棉花种植多以套种、复种与其他作物轮作的模式[7]。尽管存在多样化的种植模式,但该区域棉花生产的全程机械化水平仍稳步提升[8]。

本文着重对国内外棉花机械化耕整地、播种、田间管理、收获和残膜回收技术及装备的研究进展进行概述,指出棉花生产机械化面临的问题,提出我国棉花生产机械化技术与装备的发展建议,为我国棉花产业的机械化、现代化发展提供参考,总体框架如图 1 所示。

1 棉花耕整机械化技术与装备

耕整地是棉花种植生产过程中的一个重要环节,在棉花耕整地作业体系中,旋耕最为常见,其以碎土、整平、构建适宜苗床为主要目的,能够满足棉花播前整地和铺膜播种对地表平整度与表土细碎度的要求,因此在生产中应用最广。相比之下,翻耕与深松更多属于“阶段性改良型作业”:翻耕主要用于秸秆残茬翻埋、抑草与病虫源压低、重塑耕层结构;深松则针对犁底层或紧实层,通过打破硬化层改善土壤通气与下渗条件,促进棉花根系下扎与抗逆性提升。受作业成本与土壤条件差异影响,这两类作业通常不必年年实施,而是依据地块板结、压实、残茬量等情况间隔若干年进行一次,或与联合整地机的深松-旋耕等联合作业组合实施,以在保障播前整地质量的同时兼顾土壤结构长期改良与作业经济性。

1.1 国内棉花耕整机械化技术与装备

棉花作为重要的经济作物,其耕整机械化技术与装备有别于一般大田作物的耕整机械。棉花耕整机械的特殊要求主要体现在以下几方面:首先,棉田作业环境较为复杂,土壤疏松或粘重,且受降水和温度变化的影响较大,因此棉花耕整机械需要具备较强的适应性和多功能性。其次,棉花生长周期较长,对土壤质量要求较高,尤其是在播种、施肥和除草等环节上,需要机具具备精细化操作的能力。此外,棉田中的灌溉设施和土壤疏松度对作业深度和效率提出了特殊要求,因此棉花耕整机械必须能有效解决水土保持问题,确保作业过程中的稳定性和精度。相比之下,其他大田作物的耕整机械在土壤适应性和作业效率方面要求较低。

1.1.1 翻耕机械

我国翻耕机械普遍存在寿命短、磨损快、机体笨重、犁耕阻力大及工作效率低等问题[9-10]。犁制成后其工作幅宽即已固定,使用时不能改变[11],面对土壤较坚实而又要求耕深较大的地块时,发动机的牵引功率无法适应。复式耕地机在制作过程中充分利用数控来加工曲面,可减少土垡运动的侧向速度,避免侧向过分抛扔土垡,减少抛扔的能量消耗,提高耕地机械的工作效率[12]。此外,复式耕地机将施肥机、深耕犁、旋耕机等机具结合在一起,能一次完成化肥深施、深耕、平墒等多项作业。与传统耕地机相比,提高了 50% 的生产率,油耗减少了 30% ~ 40%[13]。

1.1.2 旋耕机械

如表 1 所示,旋耕机械以卧式旋耕机为主,卧式旋耕机对土壤适应性较强,旋耕效果良好,可同时达到翻耕、碎土和平整土地的要求。但其耕深较浅,一般 12 ~ 18 cm,无法满足深翻耕农业技术的要求[14]。针对卧式旋耕机存在的缺点,近年来研发了立式和

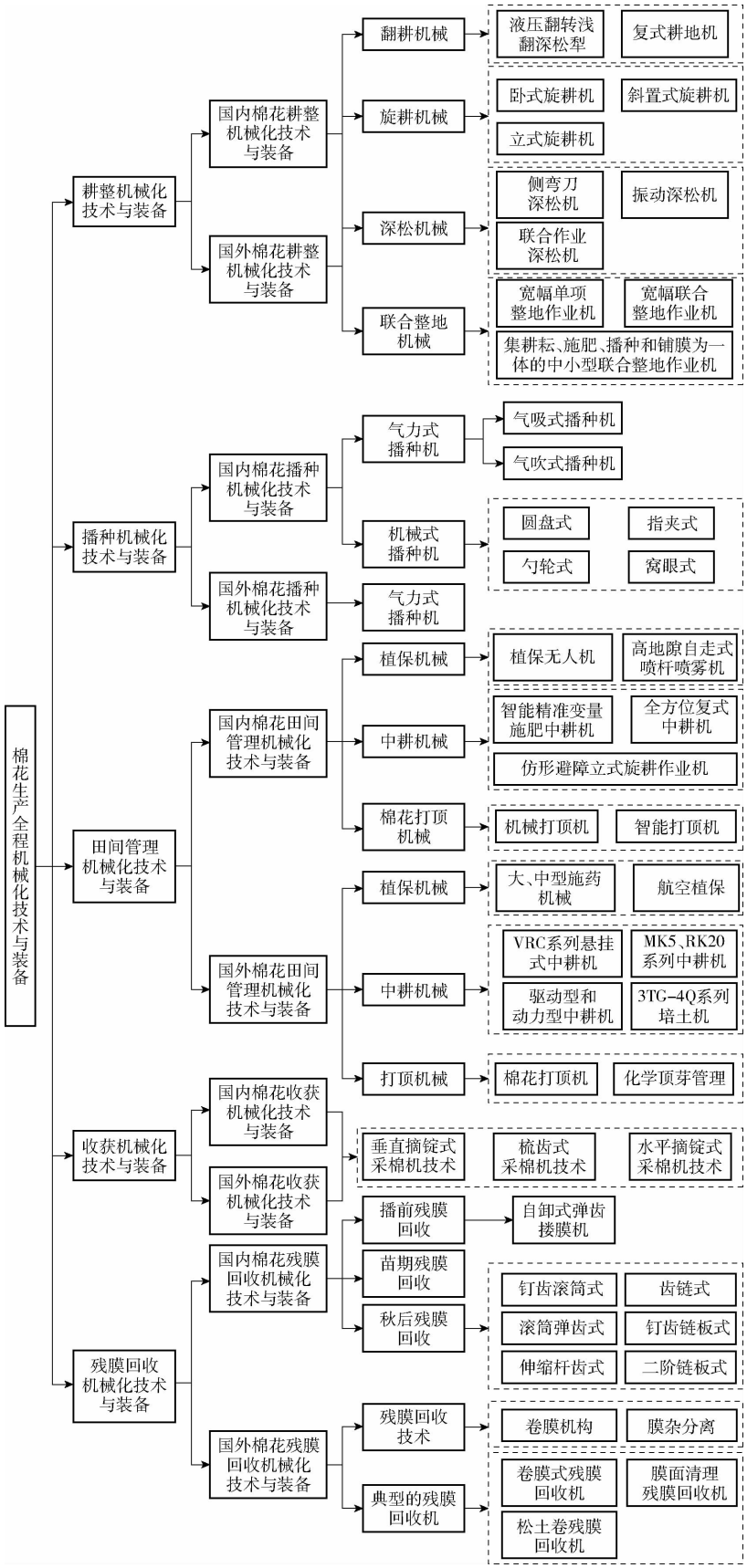


图 1　棉花生产全程机械化技术与装备研究总体框图

Fig. 1　Overall framework of research on key technologies and equipment for full mechanization production of cotton

斜置式旋耕机。立式旋耕机适用于灭茬作业，斜置式旋耕机融合犁与旋耕机的特性，能够提高耕作深度和效率，适应多种土壤类型和复杂地形，是新型旋耕作业机具。

表 1 各类旋耕机

Tab. 1 Various types of rotary tiller

类型	实物图	主要特点
卧式旋耕机		刀轴横向水平布置,其核心特点是碎土充分、地表平整,是水旱田播前整地的标准机型。主要局限在于耕深较浅、功耗较高,且在秸秆覆盖条件下易发生缠绕
立式旋耕机		轴纵向垂直布置,其核心优势在于打破犁底层、深耕效果好,功耗相对较低。主要缺陷是作业后地表起伏大,需二次整平,多用于深松改土而非最终整地
斜置式旋耕机		刀轴以一定倾角(约 45°)斜向布置,其设计旨在平衡深耕与整地质量,通过土壤侧向位移,实现“上虚下实”的耕层构造,在取得优于卧式的耕深同时,地表平整度显著高于立式,是一种高效的复合型耕作方案

近年来,旋耕机械的刀刃口设计主要采用阿基米德曲线作为作业曲线。为了提高工作效率并降低能耗,科研人员提出了多种新的刃口曲线设计,包括节能型刃口、放射螺旋线、平面型和曲面型等。这些新型刃口设计已投入到实际生产中,并取得了显著的成效。为满足不同地段的耕作需求,还开发出了不同幅宽的旋耕机,幅宽范围为 1.25 ~ 2.80 m 不等。

1.1.3 深松机械

我国深松机械研究起步较早,在深松机械的设计、制造、关键部件材料研发方面取得了较好的成果,研发的机具主要类型有侧弯刀式、杆齿式、翼铲式和振动式等,侧弯刀式深松机具采用弯曲形状的刀具,通过切削和弯曲作用来松动土壤,特别适用于硬化或粘重土壤。它能够打破土壤的硬壳,提高土壤的通气性和透水性,改善作物生长环境。杆齿式深松机具使用细长的杆齿部件,这些杆齿通过穿透力将土壤破碎并松动。它适合较松软的土壤,能够有效增加土壤的透气性,促进根系发育。翼铲式深松机具配备大面积的翼铲部件,通过其广阔的接触面切入土壤,松动土层并提升土壤的疏松度。它特别适用于干旱或盐碱土壤,能够有效改善土壤的结构,促进作物根系的深入生长。

2005 年吉林大学应用仿生理论设计出一款高效深松铲[15]。2006 年,周玉乾[16]建立了深松铲工作时受力的数学模型,并对深松铲的结构参数进行了优化。2007 年,余泳昌等[17]建立了立柱式深松铲受力的数学模型,并对深松铲的结构进行了优化。山东大华宝来公司的 W 系列侧弯刀式深松机在国内应用比较广泛,深松铲采用弧面倒梯形结构,其制作材料使用高硼钢,强度高和耐磨性好,使得使用寿命得到较大提高(表 2)。黑龙江省农业机械工程科学研究院研发的 1SL - 535 型杆齿式深松机,利用限深轮调节耕深,能够深入到地下 35 cm 左右,全方位深松土壤。

表 2 国内各类深松机

Tab. 2 Domestic various types of subsoilers

型号	类型	关键部件	实物图	主要特点
W 系列深松机	侧弯刀式	侧弯铲柱与铲头、限深轮、悬挂架		采用独特的侧弯铲柱结构,作业时通过对土壤产生横向拉伸与挤压,实现“松土不断层”,这种设计能在有效打破犁底层的同时,确保上层与下层土壤的有机连接,避免了传统垂直深松可能形成的土壤断层,有利于水分下渗与根系下扎,且牵引阻力相对较小,对地表覆盖物扰动小,符合保护性耕作的要求
1SZ - 2 型深松机	振动式	振动发生装置、凿形深松铲、减振与传动机构		引入了机械振动技术(通常由 PTO 驱动偏心机构实现),使深松铲在周期性振动状态下作业。这种工作方式能显著降低牵引阻力(20% ~ 40%),并利用振动惯性更有效地破碎紧实土块,实现了高效节能与良好碎土效果的结合;但振动装置也使其结构相对复杂,对机具的可靠性和动平衡要求较高

1.1.4 联合整地机械

根据种植农艺需求研制了品种繁多、功能各异,集旋耕、灭茬、碎土、分流和整地为主体的联合作业机,如表 3 所示。河南科技大学研制的旋耕深松联合作业机,采用先松土后旋耕的作业方式,配套拖拉机动力为 88 kW。整机主要由深松铲齿、限深滑板、牵引悬挂架、传动箱总成和旋耕刀轴等主要部件组成。深松铲齿采用弧线形生物仿生学工作原理设计制造,以减小土壤阻力。深松深度 240 ~ 280 mm、旋耕深度 120 ~ 150 mm、作业幅宽 1 500 mm,适用于面积较小的耕作地块。黑龙江省农业机械工程科学研究院研制的深松联合整地机系列产品,主要工作部

件由灭茬、深松、旋耕和起垄 4 部分组成。灭茬部件采用 L 型弯刀，刀轴转速 500 r/min，灭茬深度 80 mm，灭茬率大于 96%；深松部件采用杆齿式深松铲，深松最深 400 mm；可根据实际需求加装施肥和镇压装置[18]。新疆南疆地区作为我国重要的棉花生产基地，近年来大力推广“干播湿出”种植技术，现有整地机过度切土、碎土导致表层土壤细粒化，土壤跑墒严重，加剧风蚀。针对“干播湿出”种植需求，石河子大学与石河子市天山机械制造有限公司研制了适应新疆南疆盐碱地棉花种植“干播湿出”高产栽培技术的分流式平地整地联合作业机，将分流装置、平地齿板、螺旋碎土辊和镇压器等多种工作部件组合在一起，实现联合作业，提高整地作业质量，一次作业可完成碎土、平整和镇压作业工序，实现地表平整、土壤细碎、上虚下实的作业要求。

表 3　联合整地机

Tab. 3　Land preparation machine

型号	实物图	技术参数
1ZFZ－6.2 型分流式联合整地机		工作幅宽：6 200 mm 配套动力：147 ~ 205 kW 作业速度：12 ~ 14 km/h
1GHL－280 型旋松起垄机		工作幅宽：2 800 mm 配套动力：67 ~ 82 kW 生产效率：1.4 ~ 1.8 hm^2/h
1GSZ－210 型组合式旋耕多用机		工作幅宽：2 100 mm 配套动力：37 ~ 67 kW 作业速度：4 ~ 8 km/h

1.2　国外棉花耕整机械化技术与装备

1.2.1　翻耕机械

国外翻耕机械代表产品有美国约翰迪尔的 5 铧液压翻转犁、德国雷肯的欧派翻转犁、法国格力格尔-贝松翻转犁。约翰迪尔采用高强度材料的犁铲和具有独特结构设计的犁架，使得犁具可以与多种型号的大功率拖拉机配套使用。半圆柱形镜面犁体翻垡效果良好，翻耕后地表平整，非常适合后续的铺膜播种作业。德国雷肯悬挂翻转犁如图 2 所示，关键部件都经过先进的热处理技术加工处理，耐磨耐用，抗疲劳强度高，配备安全剪切螺栓保护犁体负荷过载[19]。法国库恩的格力格尔-贝松翻转 5 铧犁，独特的犁梁形状设计，既增加了整机大梁的强度，又使得机具重心整体后移，有利于保护犁体[20]。犁柱采用先进的空心铸造技术，在减轻整架犁具质量的同时又增加了整机强度。采用可移动拆卸式带自磨刃的犁尖，使用寿命更长。



图 2　德国雷肯翻转犁

Fig. 2　Germany LEMKEN over turning plow

1.2.2　旋耕机械

欧洲的农业自然生态环境相对优良，土质疏松肥沃，较少进行翻耕作业，而大多使用旋耕机进行浅翻整地。作业特点是轻巧灵活，燃油消耗少，操作简便。英国的牵引自驱式旋耕机，不需要拖拉机驱动，由前后配置的双排水平横轴滚刀组成[21]。与传统机型相比作业效率提升 2 倍，能耗降低 30%。意大利 CELLT 公司生产的自动避让式旋耕机，机架前方装有传感器触杆，旋耕作业时触杆碰到障碍物之后，传感器触发液压系统运转，液压油缸带动刀架产生横向位移。

1.2.3　深松机械

目前国外普遍应用的深松机有侧弯刀式深松机、振动式深松机以及深松、整地、播种联合作业深松机等，如图 3 所示。侧弯刀式深松机由机架、侧弯刀深松铲柱、深松铲齿等部件组成，工作阻力小、牵引功耗少、作业效率高。振动式深松机有一个与拖拉机动力输出轴相连的传动轴，带动振动杠杆牵引臂使深松机产生振动，工作时能大量减小土壤阻力，提高工作效率。免耕播种联合作业机是将深松机、动力耙和播种机功能融合于一体的深松整地播种机，可以一次完成深松、整地、播种等多项作业环节。



(a) 侧弯刀式深松机　(b) 振动式深松机　(c) 联合作业深松机

图 3　国外各类深松机

Fig. 3　Foreign various types of subsoilers

1.2.4　联合整地机械

国外自 20 世纪 50 年代初期开始研发联合整地作业机械。英国、法国、德国和奥地利等生产和使用整体型联合整地作业机以缩短适播期。北美地区大多使用宽幅单项整地作业机，约翰迪尔和凯斯纽荷

兰相继开发了与大功率拖拉机相配套使用的重型、宽幅、高效联合整地作业机,如图 4 所示。日本、韩国多使用集耕耘、施肥、播种和铺膜于一体的中小型联合整地作业机。



图 4 国外大型联合整地作业机

Fig. 4 Foreign large scale combined land preparation machine

国外耕整地机械发展方向:整机和工作部件模块化、种类多样化、批量生产少量化;以旋耕、施肥、播种和整地为主体的联合作业机成为优先发展机型,以适用于少耕、免耕的保护性耕作方式。机具结构不断创新、关键部件加工工艺逐渐完善、配套附属设备越来越多,快速挂接环、动力输出轴离合器、过载保护器和自动避障器等装置不断在新机具上出现,提升了机具工作的稳定性,机具不断向高效、大宽幅、多功能的方向发展,由传统的机械式向智能化的方向发展;机电液一体化与智能化控制等新技术不断用于联合作业机组的作业监测、工作控制,机具能根据实际工作条件自动调节耕深、碎土率、作业速度等各项工作指标。

1.3 国内外棉花耕整机械化技术与装备对比分析

我国棉花耕整机械化技术与装备在基础材料与制造工艺、设计的精细化与模块化以及智能化水平方面,与国外先进水平存在明显差距。具体而言,国外机具普遍采用高强度特种材料和先进热处理工艺,确保关键部件耐磨、轻量且长寿,而国内产品在材料科学和加工精度上尚有不足;国外设计注重模块化与功能集成,能灵活组合成复式联合作业机,并广泛配备自动避障、过载保护等装置,国内机具则相对笨重、功能单一且适应性较弱;国外高端装备已普遍应用机电液一体化与智能传感技术,能够根据工况实时自动调节耕深、速比等参数,实现精准、高效、低耗作业,而国内技术仍以机械传动和人工操作为主,正处于向智能化转型的初级阶段。

2 棉花播种机械化技术与装备

2.1 国内棉花播种机械化技术与装备

面向棉花播种作业对精量排种、稳定株距与播深控制、适应覆膜/滴灌配套、兼顾较高作业效率与出苗一致性等需求,经过多年发展,我国已初步形成较完善的棉花播种机械化装备体系,主要包括气力式播种机和机械式播种机两大类[22]。

气力式播种机分为气吸式播种机和气吹式播种机。气吸式播种机利用真空负压吸附种子,实现单粒精确排种,适应种子范围广、作业速度快,是目前国内精量播种的主流技术。气吹式播种机利用正压气流在播种过程中精准吹掉型孔内多余的种子,确保每次只保留一粒,从而大幅提升单粒播种的精度和作业速度。

针对新疆地区的地膜覆盖穴播作业需求,陈学庚团队[23-24]研制 2MBJ-12 型气吸式精密膜上点播机。该机型可一次性完成整地、开沟、铺管铺膜、压膜覆土、膜上穴播及种行覆土等多道工序,在气力式取种、零速投种、膜上打孔精播等关键技术上实现了多项突破。进一步设计出一种新型穴播器,并对其关键部件参数进行了优化,其单粒率超过 95.5%,重播率低于 2.9%,漏播率低于 1.6%。徐国杰[25]采用阵列吸孔吸种与侧向气吹清种相结合的方式,设计出一种气吸滚筒阵列式棉花精密排种器,对 3 种棉花种子进行试验。结果表明:合格指数均在 92% 以上,漏播指数均在 3% 以下,重播指数均在 5% 以下。康施为等[26]采用气流清种、减小负压气室空间及清理吸孔等方法,以气流吸种为基础设计了一种滚筒式精密排种器,结果表明:播种合格率为 93.2%,漏播率为 2.1%,重播率为 4.7%。

机械式总体分为两种:一是通过机械方式直接从种群中精确攫取种子来确定排种量,如指夹式,严格要求种子形状与尺寸,因此需精选种子,必要时需进行丸粒化处理,应用较少;二是通过控制种子体积以确定排种量,如圆盘式、勺轮式、窝眼式等,利用排种元件上的容腔从种子群精确分离单粒种子,但种子形状和大小、型孔形式对排种性能产生直接影响。

2003 年王吉奎等[27]研制了一种内充种半精量穴播排种器,通过内充式勺型取种孔和清种板配合,使单粒率高达 66%、双粒率低于 31%、破损率小于 5%。

2008 年王吉奎等[28]设计了一种机械式精量穴播排种器,该排种器利用 V 形槽取种、夹持板清种。当取种单元进入充种区后种子通过缺口进入 V 形槽:取种单元离开充种区后,重块因重力下落带动夹持板转动,夹持板将 V 形槽内种子夹持完成单粒取种。该装置利用夹持特性清种,大幅提高了单粒率,平均单粒率达 90%。

2009 年王顺利[29]研制了一种钳夹式精量穴播器,该研究通过高速摄影技术探究棉种在穴播器内运动轨迹,明确了影响重播率因素。

2010 年陈学庚等[30]调研新疆棉区气候、土壤成分等环境因素，发现部分地区春季倒春寒现象影响棉苗成活率，为解决这一问题，设计了 2BMSJ－12 型双膜覆盖气力式棉花精量播种机（表 4）。该机型利用膜上覆膜技术，用窄膜替代覆土遮盖种孔，可有效保墒、增温提高出苗率，待出苗率达到 60% ～ 70% 时揭去种孔上窄膜即可。双膜覆盖技术极大减轻棉苗出土压力，提高了棉苗成活率，出苗率可达 94%，推进了新疆棉花机械化播种进程。

2012 年张世杰[31]针对地膜覆盖机械化程度低等问题，设计了 2BMK－1/3 型穴播式铺膜播种机，该机型可完成种床镇压、开沟铺膜、打孔穴播、覆土压埋等工序，可满足“VVV”形种植需要。该机型覆膜宽度 1 600 mm，播种作业 3 行。

2015 年宋德平等[32]为解决棉花宽行种植问题，设计了一款折叠式铺膜播种机，该机可一次性完成耕地平整、开沟铺膜、施肥播种等多项工序，实现了宽幅、高效、智能作业（表 4）。

表 4　国内棉花播种机

Tab. 4　Cotton seeders used in China

型号	类型	实物图	主要特点
2BMSJ－12 型双膜覆盖气力式棉花精量播种机	气吸式		采用单臂牵引、左右配置结构，适用于新疆机采棉密植种植模式，播种行数 12 行，配套动力大于等于 40 kW，作业速度 3 ～ 4 km/h，穴粒合格率大于等于 85%，空穴率小于等于 3%，出苗率大于等于 94%
2MB3－6 型折叠式棉花覆膜播种机	机械式		采用三段水平折叠机架结构，适用于大面积棉田宽幅覆膜播种作业，播种行数 6 行，穴粒合格率大于等于 96%
2BMJ－3A 型基于机采棉的智能精量播种机	机械式		采用机器视觉监测与电控精量排种结构，适用于新疆机采棉精量播种作业，播种行数 3 行
机械式双膜覆盖精量播种机	机械式		采用机械式穴播排种器配合双膜覆盖机构，适用于新疆棉田膜下滴灌播种条件，播种行数 12 行，配套动力大于等于 40 kW，作业速度 3 ～4 km/h，穴粒合格率大于等于 85%，空穴率小于等于 5%，出苗率大于等于 90%

2017 年张爱民等[33]研发了一款适用于等行密植的棉花智能播种机，该机针对 76 cm 等行种植模式进行设计，可一次性完成棉田碎土、耕地平整、开沟施肥、宽幅铺设、精量播种及膜上覆土压埋等工序（表 4）。

2013 年于永良[34]以窝眼轮式精量穴播排种器为核心，设计了一款应用于棉花的双膜覆盖精量播种机，该播种机核心部件采用模块化设计，通过更换取种单元个数、调整种行间距，可适应棉花不同株距的种植需要。通过增设铺膜单元，该机型可完成双膜铺设、滴灌带铺设、膜上精量穴播、覆土镇压等作业，通过多机组联合作业，可实现增产节本的目标（表 4）。

2021 年卢宇[35]依据实际播种作业情况，结合机采模式农艺要求，研制了一款针对棉花铺膜播种的精量播种机。该机型一次作业 4 行，可同时完成开沟施肥、喷洒农药、铺膜铺管、膜上穴播、覆土压埋等作业工序。

作业速度方面，传统机械式棉花播种机由于排种机构对种子形状和一致性要求高，作业速度相对较低，一般为 2 ～5 km/h。随着气力式精量播种技术的发展，主流气吸式、气吹式棉花精量播种机通常可在 6 ～8 km/h 下稳定作业，部分优化机型在接近 10 km/h 时仍能保持良好的播种质量。新型内充气力式高速排种器在 8 ～12 km/h 作业时播种合格率仍保持在 91% 以上[36]。

作为全国最大的棉花种植基地，新疆近年来持续推出多款先进的精量播种机，显著提升了棉花种植的机械化与智能化水平。新疆天诚农机公司研发的自动断膜断带机械式精量铺膜播种机，能够替代

传统人工完成地头固定地膜、滴灌带以及上土压膜等作业,大幅提高了工作效率。该公司还创新推出3膜18行折翼播种机,结构设计便于长途运输和存放,进一步增强了设备的种植适应性与操作便捷性。同时,新疆宏基智能农机装备制造有限公司研发并已实现量产的全国最大棉花播种机,幅宽达到13.68 m,可一次性完成36行播种作业,日均作业面积高达50 hm^2,作业效率达到普通播种机的5倍。此外,新疆棉花播种机普遍集成了北斗导航、无人驾驶、精量播种、铺设滴灌带与地膜等多种功能于一体。其播种直线误差可控制在2 cm以内,不仅能节省超过50%的棉种,还可显著提高土地利用率,为后续的机械化田间管理与采收作业提供了极大便利。

2.2 国外棉花播种机械化技术与装备

国外播种机的播种单体多采用气力式取种,播种单体具有通用性强、取种精度高、作业效率高等优势。国外播种机研究从20世纪40年代开始,最初研究机械播种技术,到50年代末开始研究气力式播种技术,近几年国外大幅宽气力式播种机已经成熟,已经成为播种作业的主要机型。

1970年,HUDSPETH等[37]研制出气吸式棉花精密播种机,播种后种子间距合理,与传统的条播机相比具有良好的生长环境。随后,学者对气吸式排种器结构参数和工作参数进行优化,探究了排种盘转速、真空度、吸种孔形状、吸孔数量和作业速度对排种效果的影响,获得了参数间最优组合[38-41]。

到了21世纪,农机企业纷纷推出大幅宽气力式精量播种机,例如法国摩诺塞公司的NG Plus系列气力式精量播种机、德国阿玛松公司的ED系列气力式精量播种、美国约翰迪尔公司的MaxEmerge系列气力式精量播种机、凯斯纽荷兰公司的DV系列气力式精量播种机(表5)。美国约翰迪尔公司的高速精量播种机可在约14 km/h的作业速度下保证精确播种;凯斯纽荷兰公司推出的最新精量播种机能实现8 km/h的精确播种;德国阿玛松公司研发的ED系列精量播种机则可在最高13 km/h的速度下保持播种精度。这些高速精量播种装备的作业速度普遍可达8~14 km/h,显著高于传统播种机的作业水平,提升了棉花播种作业的效率[42]。

表5 国外棉花播种机

Tab.5 Foreign cotton seeders

型号/生产企业	类型	关键部件	总体结构	主要特点	实物图
NG Plus 4/摩诺塞	气吸式精量播种机	真空(气吸)排种器、剔种机构、双圆盘开沟器、限深轮、V形覆土镇压轮、种箱	多行独立行单元(可调行距)+机架+行单元深度调节机构	精准单粒与株距;深度控制稳定;种土接触好,适应多种作物	
ED系列/阿玛松	气吸式精量播种机	真空排种单元、真空系统、机械/液压驱动、施肥计量系统、ISOBUS/电控终端	多行精量播种机架+并联(平行四连杆)行单元+施肥箱+电控/ISOBUS	真空单粒稳定;剔种机构对速度、种形适应性强;可配置电控、ISOBUS实现精细化管理	
MaxEmerge/约翰迪尔	精量播种行单元	开沟双圆盘、种管/导种系统、V形覆土轮、气动下压力/压实轮系统	多行独立行单元+平行四连杆悬挂+机架(牵引/悬挂式)	出苗一致性与沟型稳定性好;配套下压力/覆土能力增强起伏地形适应能力;配件体系成熟	
DV90R/凯斯纽荷兰	气吸式精量播种机	真空风机排种系统、不锈钢种盘、侧深施肥装置、开沟/覆土/镇压机构	多行机架+一次完成开沟—播种—覆土—镇压的作业链	种盘更换方便、适配多作物;带侧深施肥;一次作业完成全流程,可靠性与维护性较好	

2.3 国内外棉花播种机械化技术与装备对比分析

国内棉花播种机械经过持续研发,在播种精度、效率、多功能集成等方面取得了一定成就。然而,在高速条件下的精确播种能力、整机结构的标准化与模块化程度、电子控制与智能化水平、关键零部件材料工艺等存在一些不足。国外大型播种机研发公司在这些方面积累了丰富的经验和先进理念。因此,需要借鉴国外在气力式排种器优化、高速播种稳定性方面的成果,结合棉花种子特性改进国产排种器设计,保证在常规速度下达到更高单粒合格率,在更高作业速度下保持精度不下降。加强与拖拉机自动导航系统的融合,实现人机协同或无人作业,提高作

业精准度和效率。

3　棉花田间管理机械化技术与装备

3.1　国内棉花田间管理机械化技术与装备

我国棉花田间管理机械化技术近年来取得了显著进展，尤其在新疆棉区，已形成了一套相对成熟的技术体系[43]。棉花田间管理主要环节包括植保、中耕和打顶等，其机械化水平直接关系到棉花产量与品质的提升。

3.1.1　植保机械

在植保机械化方面，我国棉区已实现从传统人工喷药到机械化、智能化施药的转变。现代农装科技股份有限公司的 3WZG－3000A 型高地隙自走式喷杆喷雾机（图 5a），采用全液压驱动加风幕式气流辅助防飘移喷雾，轮距适合机采棉工艺要求，一定范围可调，配有自动变量喷雾控制系统，能基于作业速度实时检测，喷杆后置，液压折叠和升降，具有自动仿形平衡和减振机构[44]。山东华盛中天机械集团股份有限公司的华盛泰山 3WP－1300G 型喷雾机（图 5b），喷杆采用钢管焊接三角形立体桁架结构，具有自动液压调平功能，喷臂设有防碰撞自动保护装置，喷雾系统具备三级过滤和射流搅拌功能，有助于提高农药利用率；中农丰茂植保机械有限公司的 3WPZ－1800G 型高地隙自走式喷雾机（图 5c），喷幅为 18～24 m，喷杆采用了自动平衡机构，利用喷杆自身的重力，使其在与地面不平行时能自动回位，并通过摩擦阻尼装置来调节平衡反应的灵敏度，从而在起伏不平的田地里也能保持喷杆始终处于水平状态，保障药液均匀分布[45－46]。



(a) 3WZG-3000A型喷雾机　(b) 3WP-1300G型喷雾机　(c) 3WPZ-1800G型喷雾机

图 5　国内典型喷雾机实物图

Fig. 5　Photographs of typical domestic sprayers

近年来，无人机飞防已成为新疆棉田的标准配置，无人机采用螺旋机翼，作业高度可控，当药液雾滴从喷洒器喷出时被旋翼的向下气流加速形成气雾流，增加了药液雾滴对农作物的穿透性，覆盖密度高、喷洒均匀，药液沉积量和药液覆盖率都优于常规施药技术，防治效果好[47]。2014 年中央一号文件《关于全面深化农村改革加快推进农业现代化的若干意见》中提出“加强农用航空建设”[48]。2015 年 12 月，大疆公司推出 MG－1 型植保无人机（图 6a），MG－1 型植保无人机具有连续波雷达和智能飞控系统，自动保证与作物之间合理的距离[49]。2025 年 11 月，大疆发布了 T100S（图 6b）、T70S 及 T55 型农业无人机，产品通过多传感器融合技术、AI 农服系统以及“免航测仿地”飞行等功能，使无人机在复杂地形中也能实现安全高效的自主作业。



(a) MG-1型植保无人机　(b) T100S型植保无人机

图 6　大疆植保无人机

Fig. 6　Photograph of DJI crop protection UAV

3.1.2　中耕机械

我国中耕机的研发工作起步相对较晚，近年来广大研究者在多个领域中取得了显著突破。2011 年，车刚等[50]设计了一种结构简单、适应性强、机构紧凑合理的全方位复式中耕机，如图 7 所示。能够完成除草、计量、施肥以及松土等多项作业，并且采用液控可变地隙机架结构设计，能够实现作业深度的自动调节。

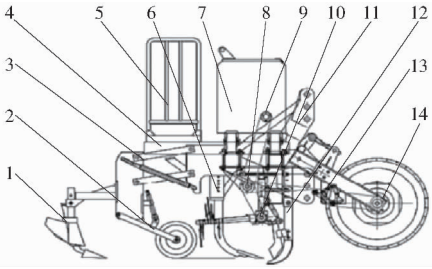


图 7　3ZFC－7 型全方位复式中耕机结构简图

Fig. 7　Structural diagram of 3ZFC－7 multi-purpose cultivator

1. 培土器　2. 限深轮装置　3. 平行四杆仿形装置　4. 机架及踏板　5. 扶手　6. 深松铲　7. 种肥箱　8. 中间传动　9. 肥计量传感器　10. 除草器单体　11. 悬挂架　12. 施肥器单体　13. 张紧装置　14. 地轮总成

2015 年，李博等[51]基于 SRIZ－100 型多功能微耕机为原始载体，构建了一种耕深自动控制系统，该系统主要包含耕深检测装置、执行装置、控制装置、支架以及配重等部分，通过内部算法和信号处理控制执行装置到达耕深指定位置，从而完成耕深调节，并有效提高了耕深稳定性和整机自动化水平。

2019 年，王文明等[52]以旋转中耕机为试验样机，借鉴振动减阻的方法设计了一种振动式旋转单体装置，该装置主要由机架、仿形弹簧、单体弹簧、凸轮轴、压缩杆和碎土刀等组成，有效解决了传统中耕机切削阻力大、作业能耗高、作业效果差等问题。

2023 年，翟世克[53]设计了仿形避障立式旋耕作业机，采用链轮箱移动或油缸伸缩的方式调节作

业幅宽,通过控制液压缸运动调节作业耕深,可实现作业耕深 10 ~ 30 mm 可调。

3.1.3 打顶机械

2008 年,罗昕等[54]研究设计了后悬挂式 3MD - 12/20 型棉花打顶机,该打顶机初步实现扶禾-打顶-放开连续作业和主侧枝同步打顶,基本满足了棉花打顶作业的农艺要求。

2005 年,胡斌等[55]研发了 3MDY - 12 型前悬挂液压驱动式棉花打顶机,该机型较好地解决了驾驶员不能根据前方棉株的长势适时调节棉花打顶高度问题,实现打顶机对棉株顶部高度的整体仿形与浮动作业。

2008 年,胡斌等[56 - 57]研发了 3MDZK - 12 型组控式单行仿形棉花打顶机。该打顶机较好地解决了棉花机械打顶行内和行间棉花顶部的独立仿形技术难点,实现了各组切割器独立仿形打顶作业的控制。

打顶过程中,打顶动力通过皮带直接传递到滚筒切割器刀轴,高速旋转的刀轴与四杆机构仿形装置容易产生共振,导致切割器剧烈跳动,严重影响打顶的精度和稳定性。随着计算机视觉技术的快速发展,研究者提出基于视觉检测与定位的棉花打顶作业方案。2024 年深圳纬尔科技有限公司研发出一款牵引式机械式智能打顶装备(图 8a),该打顶机使用计算机视觉技术,结合深度相机实现棉花顶芽的精准识别与定位,通过 2 自由度机械臂带动旋转刀头进行打顶作业,作业幅宽为 1 膜 6 行,作业速度达到 2 km/h。2025 年在此基础上研发出一款自走式、作业幅宽达到 3 膜 18 行的机械式精准打顶机(图 8b),通过集成定位系统、动力匹配系统、传动系统和控制执行系统,该打顶机实现了各项技术的高度协同,提升了作业效率和可靠性。周建平团队[58]研发了一种棉花激光打顶机器人(图 8c),利用机器视觉技术对棉花顶芽进行高精度识别定位,使用激光灼烧的方式进行打顶作业,棉花顶芽识别准确率达 98.9%,伤苗率小于 3%,打顶合格率达到 82% 以上,其核心指标仍有较大迭代提升空间。



(a) 纬尔科技一代打顶机 (b) 纬尔科技二代打顶机 (c) 激光打顶机

图 8 智能棉花打顶机实物图

Fig. 8 Physical image of intelligent cotton topping machine

3.2 国外棉花田间管理机械化技术与装备

3.2.1 植保机械

欧美等发达国家棉花植保机械化技术呈现出以大规模、智能化、精准化和环保化为特征的发展模式[59]。美国、澳大利亚、巴西等棉花生产大国,基于其农场经营规模大、土地集中连片的特点,已形成以大型自走式喷杆喷雾机和航空植保为主体的高效植保技术体系。

20 世纪六七十年代,国外发达国家开始致力于研制高效、低污染、环保型的施药新机具[60]。到 21 世纪,在发达国家大、中型施药机械成为植保机械的主力军,并采用牵引式、悬挂式和自走式等多种方式。国外知名喷杆喷雾机生产企业约翰迪尔(John Deere)、阿玛松(Amazone)、哈滴(HARDI)、Agrifac、凯斯(CNH)、爱科(AGCO)等,生产的喷杆喷雾机作业幅宽超过 50 m,大型、智能、高效是其主要特点,整体技术基本上趋于成熟[61]。

植保无人机的概念最早起源于日本,1987 年雅马哈公司研制出第一款荷载为 20 kg 的 R - 50 型植保无人机,植保无人机首次加入农业航空领域,此后植保无人机在农业航空领域得到迅速发展[62 - 64]。20 世纪 90 年代起,无人直升机逐渐在大田和果树的病虫害防治上投入使用。经历了 30 多年的创新和技术改进,日本已然成为植保无人机防治最为成熟的国家之一。美国是目前农业航空喷雾技术最发达、应用最广泛的国家,无论是有人驾驶直升机还是植保无人机,都已成熟地投入应用,美国已从航空喷雾技术的应用逐步转向精准喷施的研究,通过多传感器和图像实时处理技术的融合,提高系统控制的准确性和快速性[65 - 66]。

3.2.2 中耕机械

在德国、美国和澳大利亚等农业机械化水平较高的国家,中耕机的研发起步较早,相关技术和研究已经相对成熟。许多国际知名品牌已推出一系列高性能产品,这些中耕机不仅配备强大的动力系统和先进的机械结构,还具备精细化、多样化及自动化程度较高的作业调节功能[67 - 69]。

丹麦康斯基德公司研发的 VRC 系列悬挂式中耕机,采用四杆仿形结构并配备无压实橡胶镇压轮。可在保持培土一致性与垄形稳定的同时完成作业,最大作业幅宽达 9.5 m[70]。荷兰 STRUIK 公司生产的驱动型和动力型中耕机(图 9)均可调节作业幅宽来完成多项作业[70],驱动型由拖拉机提供动力,采用并联独立培土单元,利于减少伤根和故障检修,动力型则由各单元独立的液压马达驱动,拖拉机仅负责悬挂牵引。

亚洲代表性的中耕机械包括日本的 SYR1101、MK5、RK20 系列中耕机及 K652NH - D 培土机,以及韩国的圣地亚 3TG - 4Q 系列培土机[70]。这类机械多基于通用底盘,通过动力输出轴驱动各类配套



图 9　荷兰 STRUIK 动力中耕机

Fig. 9　Dutch STRUIK powered cultivator

机具，适应性较强。

3.2.3　打顶机械

欧美发达国家在 20 世纪初就开始了棉花打顶机的研究。1919 年，MARQUIS 等[71]研究出了如图 10 所示的马拉式机械打顶装置。其由地轮带动往复式切刀切割，这是目前所知的世界上最早的棉花打顶机。1931 年，SMITH[72]研究出了人工调整切割高度的打顶机（图 11），由驾驶员根据棉花长势，通过上下提压手柄调节切顶高度。1951 年，BELL[73]发明了螺栓调高的棉花打顶机，切顶刀高度根据棉株高度预先通过门字型高度锁定装置调整，该打顶机一次能切两行，打顶刀外有罩网以防割下顶芽飞溅。1955 年，HOWELL[74]研发的连环带轮用于打顶机，使得打顶机的行数大幅扩展，这个结构目前仍是主流多行打顶机动力传输的主要方式。1961 年，STROMAN[75]研制了棉花疏枝切顶机（图 12），该机型带分禾器和残叶排除导向装置，侧面设有排叶风道，将切下的顶芽排入分禾器打开的棉花行间空当中，减少了残叶挂枝遮光和病虫害的传播。1962 年，KEYES[76]研发出了挂接在拖拉机前端、用液压马达驱动的打顶机，这种前挂接结构可视性更好，操作者可以根据棉株高度调整打顶高度。由于机械打顶仿形问题始终未得到有效解决，欧美各国在 20 世纪 60 年代以后停止了棉花打顶机的研究。目前，欧美国家主要通过植物生长调节剂（化学顶芽管理）和人工打顶来解决棉花打顶问题。植物生长调节剂被广泛应用，通过喷雾设备精确控制棉花顶芽的生长，避免了机械打顶中精度难以保证的问题。尽管机械打顶技术在研发中有所进展，但仍面临仿形精度的挑战，因此化学方法和人工打顶依然是国外当前最常用的解决方案。

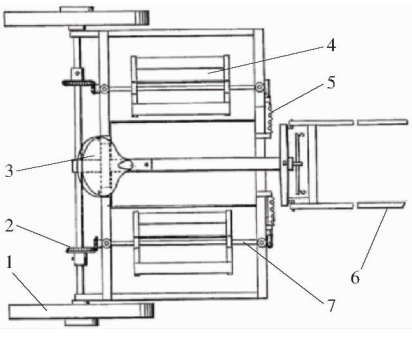


图 10　国外马拉棉花打顶机结构示意图

Fig. 10　Schematic of horse-drawn cotton topping machine

1. 地轮　2. 传动伞齿轮　3. 座位　4. 回转轮　5. 往复切刀　6. 车辕　7. 传动轴

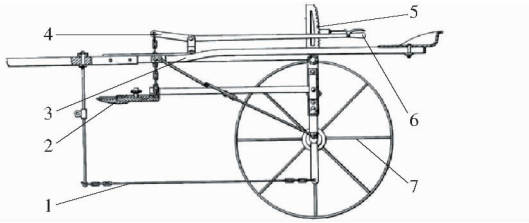


图 11　人工调整切割高度打顶机结构示意图

Fig. 11　Schematic of cotton topper with manually adjusted cutting height

1. 力平衡拉杆　2. 往复式切刀　3. 机架　4. 打顶高度调节杠杆　5. 高度锁定齿　6. 高度控制手柄　7. 地轮

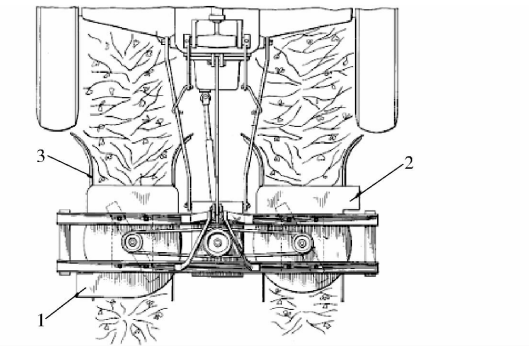


图 12　棉花疏枝切顶机结构示意图

Fig. 12　Schematic of cotton defoliator-topper

1、2. 排叶风道　3. 分禾器

3.3　国内外棉花田间管理机械化技术与装备对比分析

我国植保和中耕环节与国外先进水平存在一些差距。国外植保机械已广泛采用农药直接注入系统、多级过滤、自动对靶施药及风送喷雾与静电喷雾等先进技术，并集成 GPS 与变量控制，农药利用率可达 50% 以上。相比之下，我国植保机械仍以常量喷洒的植保无人机为主，农药利用率普遍在 20% ~ 30%，且存在重喷、漏喷现象；大型高地隙喷雾机虽已应用，但在智能变量控制、核心部件可靠性及应对棉花高密度冠层的药液穿透性方面仍有不足。中耕管理方面，国外已应用基于机器视觉的智能除草机器人实现精准物理除草，而国内仍高度依赖人工或化学除草，智能识别技术与精准作业装备尚处起步阶段。未来，我国需重点借鉴国外机电液一体化集成经验，突破智能感知决策技术，并研发适应小农地块的中小型智能化装备，以缩小在精准化、智能化及

生态环保性方面的差距。

国外早期机械打顶研究聚焦于机械传动、多行作业与人机交互设计，但因仿形精度这一根本性技术瓶颈未能突破，最终转向化学调控为主的技术路线。国内研究虽起步较晚，但实现了从机械仿形向智能感知与精准执行的跨越性发展，现阶段已通过融合机器视觉、深度学习与激光技术，率先进入棉花顶芽智能识别与精准处置的智能化阶段，居于该领域技术前沿。当前核心任务在于提升系统在复杂农艺环境下的鲁棒性、作业效率与工程化可行性，推动技术实现产业化应用。

4 棉花收获机械化技术与装备

棉花作为全球重要的经济作物，其收获环节的机械化水平直接影响产业效率、产品质量与市场竞争力。随着农业现代化进程加速，棉花收获机械化已成为破解劳动力短缺、降低生产成本、保障供应链稳定的核心路径。我国作为棉花生产与消费大国，历经数十年技术攻关实现了从依赖进口到自主创新的跨越式发展，而国外发达国家则在长期实践中形成了技术成熟、体系完备的发展模式[77]。

4.1 国内棉花收获机械化技术与装备

我国棉花收获机械化技术的发展经历了从无到有、从引进模仿到自主创新的艰难历程。近年来，在国家农机购置补贴政策强力推动与农业产业结构优化升级的双重驱动下，国产棉花收获机械的研发与应用取得了显著进步[78]。

4.1.1 水平摘锭式采棉机技术

为适应大规模、高密度、集中连片的棉花种植模式，实现高采净率与低纤维损伤的作业目标，水平摘锭式采棉机技术成为国内绝对主导的技术路线，尤其适用于新疆等大型农场的大规模集约化生产[79]。其利用一系列水平旋转的、带有钩齿的摘锭，伸入棉株中，通过缠绕的方式将吐絮的棉花从开裂的棉铃中摘取下来，然后通过脱棉盘将棉花从摘锭上剥离[80-82]。具有采净率高、作业效率高、对棉花品质损伤相对较小的作业特点。国产水平摘锭式采棉机（表 6）如沃得 4MZD－6A 型采棉机、新疆钵施然智能农机股份有限公司 4MZD－4A 型采棉机、新疆天鹅公司的 4MZ－3A 型采棉机、铁建重工新疆有限公司的 4MZD－6 型采棉机，采净率高，通常达 90% 以上，含杂率低于 10%，作业速度为 7～9 km/h。国产采棉机智能化与自动化水平在车速调节、对行控制、动力分配等方面取得了突破。基本实现了进口替代，但在核心部件、整机智能化控制和可靠性方面与约翰迪尔等国际顶尖产品尚有差距。

表 6 国内水平摘锭式采棉机

Tab. 6 Horizontal spindle cotton picking machine

型号	实物图	技术特点
4MZD－6A		核心特点是采棉与打包一体化，采用 6 行采摘头，配备双风道高效清洗系统，并集成液压圆捆打包技术，在棉箱内直接形成圆柱形棉捆，极大提升转运与存储效率
4MZD－4A		高效 4 行采棉机，以电液智能化控制为特点，配备自动对行、工况监测、故障诊断等系统，操作简便，适应性强，性价比高，在中型采棉机市场占有率高
4MZ－3A		自主研制的 3 行箱式采棉机。结构紧凑，通过性强，适合中小地块及复杂地形，采用机械液压传动，工作可靠，维护成本较低，是国内早期推广的主力机型之一
4MZD－6		高端 6 行采棉机，采用静液压行走系统，动力强，集成智能控制与监测系统，采棉部件耐磨性强，作业效率高，稳定性好，旨在对标国际高端机型性能

4.1.2 垂直摘锭式采棉机技术

垂直摘锭式采棉技术主要针对部分棉株较密的作业场景。垂直摘锭式采棉机技术在国内曾有引进和应用，但目前市场份额很小。摘锭的轴线与地面垂直，通过垂直滚筒的旋转，使摘锭插入棉株进行采摘[83-84]。结构相对坚固，对干燥度要求略低，但在作业过程中易带入更多枝叶等杂质（含杂率高），对棉纤维的损伤风险也相对较高。由于在采棉质量上普遍认为不如水平摘锭式，且技术源头本身迭代缓慢，该技术路线在国内已非主流，仅在极个别特定区域或有应用。

4.1.3 梳齿式采棉机技术

梳齿式采棉机技术主要应用于内地中小田块、丘陵山区等分散种植区。其利用高速旋转的齿杆或刷辊，通过“梳刷”的方式将棉花从棉铃中剥离[85-86]。结构简单，制造成本低，但其采净率相对较低，对未完全吐絮的棉铃采摘效果差，目前主要作为补充性机械，在特定区域用于辅助收获或落地棉回收。

4.2 国外棉花收获机械化技术与装备

国外棉花收获机械化起步早、技术成熟，以美

国、澳大利亚、巴西等产棉大国为代表，形成了“高自动化、高适应性、可持续化”的发展特征，其技术路线与装备设计对全球棉花机械化发展具有重要引领作用。

4.2.1　水平摘锭式采棉机技术

为应对超大规模田块、劳动力成本高及对棉花品质一致性严苛的要求，以约翰迪尔、凯斯纽荷兰等为代表的公司集成了液压、电子和传感器技术，生产了如约翰迪尔 CP690、凯斯 IH 2555 XD 等采棉机，实现了棉花采收的智能化与高效化，如图 13 所示。例如，配备自动对行系统、产量监测器、棉花湿度传感器以及基于 GPS 的自动导航和变量作业系统。近年来，革命性的圆模打包采棉机成为发展趋势，它能在机内将采摘的棉花直接压缩成大型圆柱形棉模并打包，极大减少了运输成本和贮藏空间，并避免了二次污染。主要应用地区有美国、澳大利亚、巴西、以色列以及中国。



(a) 约翰迪尔CP690型　　(b) 凯斯IH 2555 XD

图 13　国外水平摘锭式采棉机实物图

Fig. 13　Physical images of horizontal spindle cotton picking machine from abroad

4.2.2　垂直摘锭式采棉机技术

垂直摘锭式采棉机技术是以苏联/独联体国家为代表的另一大技术体系，一定程度上满足了该地区特定的农艺需求。主要生产商包括乌兹别克斯坦的 Chirchiq 农业机械公司等。该技术在其传统应用区域仍保持一定市场，但由于收获质量不高，其全球市场份额远低于水平摘锭式。主要应用于乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦、土库曼斯坦等独联体国家。

4.2.3　梳齿式采棉机技术

梳齿式采棉机技术是一种原理相对简单的采摘技术，多用于棉籽收获、特种纤维回收或落地棉捡拾等。在发达国家，梳齿式采棉机已很少用于商品棉的大规模生产，而是作为功能性机械服务于特定农业环节。

4.3　国内外棉花收获机械化技术与装备对比分析

国内与国外在棉花收获机械的技术差距主要体现在 3 方面。首先，国产机型在基础采摘功能上已实现追赶，但核心基础部件的可靠性较差，如高端摘锭、脱棉盘等关键采摘元件的材料工艺和耐磨性存在代差，影响长期作业稳定性。其次，整机智能化与集成控制水平较低，国外领先机型已普遍实现基于多传感器融合与 AI 算法的全流程自适应调控，而国产机型多在单点自动化有所突破，系统协同与智能决策能力有待提升。此外，全产业链技术融合深度不足，国外已构建“采收-田间处理-物流”一体化技术体系，我国则侧重于采收环节的单机突破，采后处理协同性不足。国内可重点借鉴国外“采收-处理一体化”设计理念，并深度融合物联网、AI 诊断与预测等技术，从而由单机智能化向整体智能化推进，提升装备在复杂工况下的作业质量与稳定性。

5　棉花残膜回收机械化技术与装备

5.1　国内棉花残膜回收机械化技术与装备

棉花残膜回收机主要是指回收棉田当季地表及往季耕层中残留地膜的农业机械。我国残膜机械化回收技术与装备的研发始于 20 世纪 70 年代[87]，国内使用的农用地膜厚度小、耐候性差，回收时地膜拉伸强度低，地膜破损严重。因此，国内残膜回收技术及装备以捡拾回收方式为主[88-91]。地膜回收机械根据农艺要求和作业时间可分为播前残膜回收机具、苗期残膜回收机具和秋后残膜回收机具；按工作深度可以分为表层残膜回收机和耕层残膜回收机；按捡拾部件的不同，可分为柔性钉齿链板式、伸缩滚筒式、弹齿滚筒式、搂膜弹齿式、齿链式等残膜回收机；按作业形式不同，分为单项作业机和联合作业机。本文按照播前残膜回收机具、苗期残膜回收机具和秋后残膜回收机具加以阐述。

5.1.1　播前残膜回收

播前残膜回收作业是指土地翻耕后，平整作业至播种作业前进行耕层地膜回收作业。此时的残膜主要以碎片状形式分布在耕层 20 cm 以内，回收难度大，主要采用搂、扎、分的方式回收，残膜回收率不超过 50%[92]。播前残膜回收根据作业模式可分为整地收膜联合作业和整地后播种前的残膜回收作业两种模式。整地收膜联合作业模式通常采用在联合整地机上集成齿钉辊式扎膜装置或弹齿式搂集装置，进行整地与耕层残膜回收联合作业；播前回收采用搂膜、扎膜以及膜土筛分的回收方式，其中搂集、扎膜结构存在卸膜困难等问题，筛分式膜杂分离效果好，但需要对耕层土壤过筛，存在筛分效率低、作业能耗大的问题[93-95]。对筛分式的研究主要集中在如何提升筛分装置膜土分离效率和降低功耗上，典型播前残膜回收机如表 7 所示。

5.1.2　苗期残膜回收

苗期残膜回收是指在作物出苗后、浇头水前进行地膜回收。此时地膜使用时间较短，力学性能衰

表 7 典型播前残膜回收机

Tab. 7 Typical pre-sowing residual film recycling machine

型号	作业模式	实物图	结构特点
1SM－2.0 型自卸式弹齿搂膜机	整地后播前回收		采用链扒驱动成排的弹齿入土作业，弹齿直径 5～8 mm，长度 8～15 cm，入土深度约 5 cm。适用于春季整地作业后、播种前耕层中的残膜回收。回收率高，但结构较为复杂，幅宽小，作业效率低，适用于播前残膜回收[96]
4SZ－3.0 型收膜整地联合作业机	整地收膜联合作业		常规联合整地机上加装多组搂膜齿。适用于春季整地作业时对 0～5 cm 耕层中的片状残膜回收。结构简单、效率高，但脱膜较为困难
1LM－5.0 型自卸式弹齿搂膜机	整地后播前回收		使用弹齿直径小于 10 mm，弹齿间距小于 10 cm，前后 2 或 3 排弹齿组合，最大作业深度 5～10 cm。适用于春季整地作业后、播种前的耕层中最大展开长度大于 5 cm 的残膜回收。结构简单、作业幅宽大、效率高[97]

变程度小，回收相对容易。此类机具基本采用卷膜的技术方案[98]。但苗期收膜会导致作物生长保墒性能差、灌水量增加，与膜下滴灌技术不相适应，因此目前关于苗期残膜回收机的研究很少。

5.1.3 秋后残膜回收

秋后残膜回收是在作物收获后、耕地前进行，主要回收当年铺设的地膜。棉花收获后地膜仍有一定的强度，相对完整，可以满足机械回收要求，所以地膜回收以当季地膜机械化回收为主[99－100]。因此，秋后残膜回收机在实际应用中占比达 87.8%，已成为当前残膜回收的主要采用机具。秋后残膜回收过程中需要同时考虑秸秆还田作业，因此回收机具主要采用秸秆粉碎与地膜回收联合作业方式。学者设计研发了多种形式的地膜捡拾回收装置，如滚筒式、齿链式、钉齿链板式、二阶链板式等，其结构特点及适用性如表 8 所示。

围绕残膜回收装置捡拾率低、含杂率高、缠膜率高及可靠性不足等作业难点，学者开展了深入研究。段利英等[107]设计凸轮滚筒式残膜捡拾机构（图 14），采用凸轮机构驱动捡拾齿实现规律性伸缩，改善捡拾齿入土与脱膜轨迹，捡拾率达 88.2%，含杂率达到 32.6%；吾斯曼·吾木尔等[108]研发伸缩钉齿式残膜回收机，重点优化捡拾装置结构与工作原理（图 15），针对性改进凸轮盘轮廓及钉齿参数，田间验证显示捡拾率稳定且含杂率 34.7%，满足行业标准；赵昱宇等[109]针对传统伸缩杆齿式装置可靠性差、捡拾率低、缠膜率高的问题，基于定心直动滚子凸轮机构优化设计导向伸缩式捡拾装置，确定凸轮导轨盘、拾膜滚筒及弹齿轴总成的核心结构参数，拾膜率达 88.87%、缠膜率仅 1.51%，满足作业要求，为同类装置优化提供了参考。许宁等[110]优化研制气吸式残膜回收除杂一体机，通过增设割膜、吸膜除杂及集膜装置，残膜捡拾率达 91.6%、含杂率仅 10.5%，显著提升除杂与捡拾性能；张学军等[111]设计双滚筒式残膜回收机，采用分别负责捡膜与脱膜清杂的双滚筒结构（图 16），利用脱膜滚筒内“O”形气流场基于密度差异实现膜杂分离，残膜拾净率 86.1%、含杂率 39.2%，其气流辅助分离思路为降低含杂率提供了新路径；陈学庚团队[112]设计随动式残膜回收机起膜捡拾机构（图 17），通过前置起膜轮松动土壤并挑起残膜，捡拾滚筒与起膜轮反向转动且前进速度与拖拉机保持一致，在两轮交汇区域将残膜挂接至捡拾钉齿，再经脱膜、卷膜装置完成回收，既实现 90.45% 的平均起膜率，又解决了普通机具壅土堵塞的问题，增强了作业流畅性。

5.2 国外棉花残膜回收机械化技术与装备

国外对残膜回收方面研究可追溯至 20 世纪 60 年代，以美国、日本、法国及以色列等为代表的发达国家起步较早，其残膜回收机械化技术的发展路径与本国农艺要求、严格的地膜质量标准及特定的土壤条件密切相关[113－114]。多数发达国家通过立法强制规定地膜厚度不低于 0.02 mm，以确保地膜具备足够的抗拉强度和柔韧性，为机械化回收创造条件。目前，国外残膜回收机研究主要集中在卷膜机构和膜杂分离方面[115－116]。

在卷膜装置转速匹配优化方面，研究者通过改进驱动与控制机制提升回收效率与残膜完整性。SAWYER 等[117]开发的双卷膜筒残膜回收机（图 18a）通过差异化转速实现了地膜与滴灌带的同步回收，解决了卷膜速度与机具行进速度的协同问题，但未能解决地膜发生拉断裂问题。为解决残膜回收机地膜断裂这一机械化作业难题，转速匹配优

表 8　典型秋后残膜回收机

Tab. 8　Typical film recycling machine after autumn

型号	类型	实物图	结构特点
4CMJ－2.0 型残膜回收与秸秆还田一体机	钉齿滚筒式		采用牵引式设计，集成钉齿残膜拾取、振动筛土分离及液压打捆装置，其残膜打捆密实、秸秆还田均匀，适用于棉花等大规模农田，兼顾残膜高效回收与秸秆资源化利用，尤其适合干旱及半干旱地区连片作业，经济性与环保性优势明显[101]
4JM－205Q 型秸秆还田残膜回收一体机	滚筒弹齿式		可一次完成棉花秸秆粉碎还田、膜秆分离、地膜集箱作业，采用弹性齿滚筒收膜形式实现残膜起膜，可适应各种软硬程度的地块，作业时整体动平衡的粉碎滚刀震动小，机器运行更平稳，秸秆粉碎后从两侧排出还田，实现膜秆分离，搭配拖拉机使用，回收后的地膜干净少杂[102]
1MSF－2.15 型秸秆粉碎残膜回收一体机	伸缩杆齿式		采用偏心滚筒与伸缩杆齿组合机构，通过相对运动实现杆齿入土时伸出捡膜、回程时缩回脱膜，无需额外脱膜装置，其专为处理集条后的残膜设计，可有效应对与秸秆、碎土混杂的工况，加装前置小弹齿辊可进一步提升在杂质较多田块中的捡拾洁净率与作业效率[103]
CSM－130B 型齿链式悬挂收膜机	齿链式		由起膜、输送、齿链式拾膜、卸膜机构及地轮、机架等组成，动力源自拖拉机，经变速箱与传动系统驱动，含两次筛选清杂，适配农田残膜回收，能高效收集残膜，实现机械化拾膜与卸膜[104]
4JMLQ－210A 型残膜回收机	钉齿链板式		集棉花秸秆粉碎还田、当季残膜捡拾、膜秆膜土分离、残膜收集打包为一体，采用钉齿链板式捡拾机构，实现整幅捡拾，拾净率高；双曲柄振动机构膜杂分离效果好，含土率低，配备的边膜铲可清除边膜覆土，提高了边膜拾净率[105]
4JMLE－210 型二阶链板式秸秆粉碎地膜回收联合作业机	二阶链板式		采用秸秆粉碎还田与残膜回收联合作业，一次完成棉花秸秆粉碎还田、残膜二次捡拾清杂、回收残膜打卷等作业工序，回收地膜含杂率低[106]

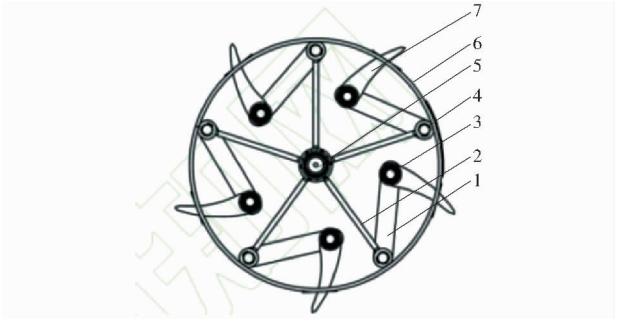


图 14　凸轮滚筒捡拾装置结构示意图

Fig. 14　Schematic of cam roller picking device structure

1. 齿杆　2. 摆杆　3. 驱动辊　4. 固定辊　5. 中心旋转轴　6. 滚筒外壳　7. 捡拾齿

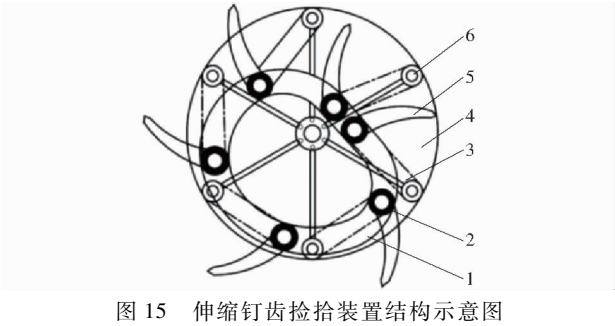


图 15　伸缩钉齿捡拾装置结构示意图

Fig. 15　Structural diagram of telescopic nail tooth pickup

1. 凸轮盘　2. 辊子　3. 摆臂　4. 端盖　5. 捡拾钉齿　6. 固定轴

化成为关键。PARISH 等[118]设计的残膜回收机通过调节液压马达流量，使卷膜转速能够匹配机器前进速度；以色列 A. V. I 公司设计的残膜回收机则利用闭环控制实现实时精准跟随，二者均有效提升了回收膜的完整性与机具的机械化作业效能[119]。

在膜杂分离技术方面，清除残膜表面黏附的土壤、秸秆等杂质是提升回收质量的关键环节。早期残膜回收设备在清杂功能方面存在明显局限，PARRY[120]设计的残膜回收机未配置专用清杂装置，导致残膜含杂率较高。为克服上述瓶颈，后续研究聚焦于清杂装置的集成与优化，逐步形成了振动清杂、机械刷清杂等主流技术路径。CHRYSLER 团队[121]开发了具备液压升降与振动清杂功能的残膜回收机（图 18b），构建了“松土—起膜—清杂—卷收”的连续作业流程，通过振动作用有效分离膜面

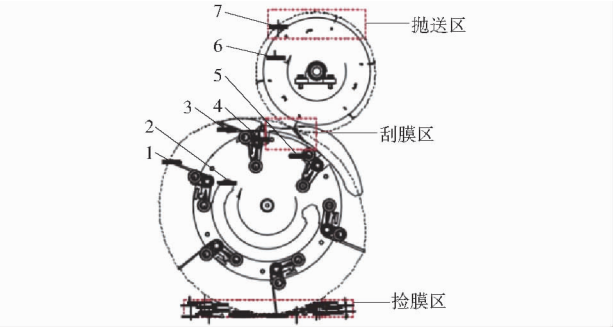


图 16 双滚筒装置结构示意图

Fig. 16 Structural diagram of double roller device

1. 捡膜弹齿 2. 正向凸轮轨道 3. 反向凸轮轨道 4. 双拐臂 5. 捡膜滚筒 6. 脱膜滚筒 7. 刮膜板

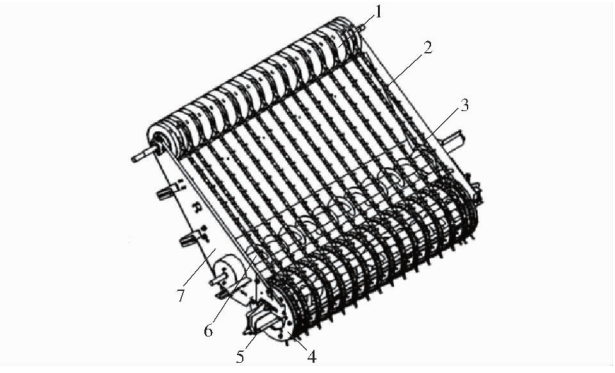


图 17 随动式残膜回收机起膜捡拾机构结构图

Fig. 17 Schematic of film lifting and collecting mechanism in a tracking-type residual film recovery machine

1. 脱膜装置 2. 捡拾钉齿 3. 传动链板 4. 捡拾滚筒 5. 二级螺旋输送器 6. 一级螺旋输送器 7. 连接架



(a) 卷膜式残膜回收机 (b) 松土卷膜残膜回收机 (c) 膜面清理残膜回收机

图 18 国外典型残膜回收机

Fig. 18 Foreign typical residual film recycling machines

杂质;SARL[122]则采用机械刷清杂方式,利用高速旋转的毛刷辊对残膜表面进行清扫,显著降低了回收残膜的含杂率。

随着对残膜回收作业复杂性的深入认知,残膜回收作业以卷膜为核心的单一功能向多流程协同的复合型发展,实现了作业效率的提升。BROOKS[123]实现了膜杂分离与预处理一体化,通过切割和制球机构将残膜制成球状便于运输;ROCCA[124]则采用“铲起—输送—分离—卷收”集成流程,利用物料特性实现残膜与杂质的自然分离,简化了作业环节;KIMBALL[125]开发的多功能机(图 18c)集成了切割、起膜、切碎、清杂、集膜和压缩六大模块,形成全流程作业体系,大幅提升了残膜回收效率。

5.3 国内外棉花残膜回收机械化技术与装备对比分析

地膜物理特性的差异是制约国内外机具作业性能的主要因素。国外使用的地膜厚度不低于 0.02 mm,保证了膜材强度与完整性,为液压驱动与闭环控制等技术的应用提供了基础。相比之下,国内长期使用的超薄地膜耐候性差、易破碎,致使在相同的联合作业流程下,仍面临膜杂分离困难、捡拾机构易缠绕及地膜断裂等问题,作业可靠性与国外存在显著差距。因此,我国棉花残膜回收技术的突破,一方面需推动高强度地膜的应用与标准化,从源头改善机械化作业对象的物理属性;另一方面,应重点引入电液控制与智能监测技术,以解决复杂工况下的速度失配与断膜难题,从而实现国产棉花残膜回收装备作业性能与智能化水平的实质性提升。

6 棉花生产全程机械化技术面临的问题与发展建议

6.1 棉花生产全程机械化技术面临的问题

(1)核心装备性能与可靠性不足

我国棉花生产虽已基本实现全程机械化,但在装备整体性能、可靠性及关键部件自主化方面仍存在明显不足。当前,采棉机核心部件如摘锭的耐磨性和疲劳寿命与国际先进水平尚有差距,直接影响采棉效率与纤维品质。在播种环节,精密排种器在高速作业下的播种均匀性与稳定性仍有待提高;同时,液压系统与电控单元故障率较高,影响了机具的连续作业能力。此外,高性能传感器、智能控制模块及合金材料等关键基础部件仍依赖进口,不仅增加了生产成本,也对我国农机装备的自主创新与产业链安全构成制约。

(2)研究基础薄弱及创新性不足

在对土壤-机器-作物互作机理、残膜回收与清选机理、采收部件磨损机制等基础理论的研究方面,目前仍显薄弱,系统性不足。相关装备设计多依赖传统经验,难以实现突破性的技术创新。科研与产业实际需求之间存在脱节现象,部分研究成果仅停留在实验室阶段,未能有效转化为稳定可靠的产品。材料科学、信息技术、人工智能等新兴前沿技术与棉花生产装备进行深度融合的进程缓慢,创新性不足。

(3)棉花生产装备智能化水平不足

我国棉花生产装备的智能化水平仍有不足。机械装备普遍缺乏基于多源信息融合的自主决策与协同控制能力,作业参数仍主要依赖经验设定,难以实现因苗、因地、因时的精准调控。农机装备之间、农

机与农艺系统之间的数据交互机制尚未有效建立，信息孤立现象较为突出。同时，农业物联网、人工智能与大数据等技术在棉花生产中的应用多处于局部试点阶段，尚未形成“感知—分析—决策—执行”一体化的智慧作业体系，制约了棉花生产向精细化、科学化管理方向的进一步发展。

（4）棉花生产机械化各区域发展不均衡

我国棉花种植模式多样，除新疆大规模集约化种植外，黄淮海、长江流域等地普遍存在田块零散、种植制度复杂（如棉麦、棉油轮作套种）、地形复杂等问题。当前机械化推进仍以大型化、标准化装备为主，适用于中小田块、丘陵坡地的轻简型、复合式、可调节机具研发滞后，导致不同区域间机械化水平差异显著，制约整体产业协同发展。

6.2　棉花生产全程机械化技术发展建议

（1）攻克薄弱环节关键核心技术

在采收环节，需攻克采棉机高效低损采摘机构设计与控制系统，减少纤维损伤、提升采净率；在播种环节，研发适应高速作业的精量排种器，提高播种均匀性与稳定性；在田间管理环节，实现棉花精准打顶的智能识别与执行；在残膜治理环节，突破残膜高效回收与清洁分离技术，降低含杂率、提升回收膜可用性。系统提升高端传感器、精密液压件、智能控制器、长效耐磨材料等核心零部件的自主研发与产业化能力，逐步构建起安全可控、性能可靠的关键部件供应链体系，为我国棉花生产装备的自主化与高端化奠定坚实基础。

（2）加强土壤-机器-作物基础研究及前沿技术应用研究

依据作物生长特性，围绕播种、植保、收获、残膜回收等生产环节中涉及到的土壤-机器-作物互作问题，开展相关理论体系与关键技术研究，提高机具及关键部件的适用性与可靠性，提高作业效果和生产效率。加强智能控制、仿生科学、新能源动力、农业机器人等前沿技术在棉花装备上的应用研究。

（3）实现棉花生产精准化、智能化

推广应用基于北斗的高精度导航、基于多源信息融合的作业质量监测、基于作物模型的变量作业等智能技术，提升装备自主作业能力。集成遥感监测、物联网感知、无人机巡检与地面智能装备，建立信息采集与作业调度系统，实现多机协同、任务优化与过程管控。构建覆盖棉花全生育期的生长模型、产量预测模型与病虫草害预警模型，为生产管理提供基于数据的智能决策支持，推动棉花生产向精准化、智慧化发展。

（4）推进各区域棉花生产机械化发展

针对不同生态棉区，制定差异化的机械化推进策略和技术路线。加大对中小农户机械化发展的政策倾斜，发展农机合作社、托管服务等社会化服务模式，提升机械化服务的可及性和经济性。加强跨区域技术交流与合作，推动成熟技术模式在不同棉区的适应性改良与推广。

参　考　文　献

[1] 李辉. 中国新疆棉花产业国际竞争力研究[D]. 武汉：华中农业大学，2006.
LI Hui. Research on international competitiveness of Xinjiang's cotton industry in China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006. (in Chinese)

[2] 何阳. 新疆棉花种植现状及发展对策[J]. 中国棉花加工，2025(6)：24－26.
HE Yang. Current situation and development countermeasures of cotton cultivation in Xinjiang[J]. China Cotton Processing, 2025(6): 24－26. (in Chinese)

[3] 张晨，周欣欣. 兵团棉花全产业链发展存在问题与对策[J]. 新疆农垦科技，2025，48(5)：59－62.
ZHANG Chen, ZHOU Xinxin. Problems and countermeasures in the development of the whole cotton industry chain in Xinjiang Production and Construction Corps[J]. Xinjiang Agricultural Reclamation Science & Technology, 2025, 48(5): 59－62. (in Chinese)

[4] 付自江. 钢辊式圆捆机变腔式卷捆机构的设计与试验研究[D]. 郑州：河南农业大学，2025.
FU Zijiang. Design and experimental study of variable chamber baling mechanism of steel-roll round baler[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2025. (in Chinese)

[5] 马林燕. 中国对“一带一路”沿线国家农业直接投资风险研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2025.
MA Linyan. Research on the risks of China's agricultural direct investment in countries along the“Belt and Road” Route[D]. Yingling: Northwest A&F University, 2025. (in Chinese)

[6] 陈学庚，温浩军，张伟荣. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业(中英文)，2020，2(4)：1－16.
CHEN Xuegeng, WEN Haojun, ZHANG Weirong. Advances and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 1－16. (in Chinese)

[7] 雷天翔，宋敏，毕显杰，等. 新疆生产建设兵团多熟种植模式发展现状与对策研究[J]. 中国农技推广，2024，40(7)：3－7.

[8] 赵岩，陈学庚，温浩军. 新疆兵团精准农业发展与北斗卫星导航技术的应用[J]. 石河子大学学报(自然科学版)，2018，

36(4):397 - 404.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun. Application of the development of precision agriculture and the China's Beidou satellite navigation system in agricultural production in the Xinjiang Production and Construction Corps[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science Edition),2018,36(4):397 - 404. (in Chinese)
[9] 韩云龙,尹继连.法国格里格尔-贝松液压翻转犁性能测试[J].现代化农业,2013(6):46 - 47.
[10] 高尔光.大功率拖拉机配套铧式犁的结构特点和发展趋势[J].农业机械,2003(7):36 - 38.
[11] 范浩灵,岳书云,范伟玲.农业机械的分类与作用特点[J].南方农机,2020,51(6):20.
[12] 蒋建强.基于耕地机犁体自由曲面的数控铣削加工[J].农机化研究,2008,30(10):160 - 161,191.
JIANG Jianqiang. Research that free curved surface of plow base num erical control bright metal chop processes owing to cultivated land machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2008,30(10):160 - 161,191. (in Chinese)
[13] 丁才新.节本增效复式耕地机——霸王犁[J].山东农机化,2004(6):36.
[14] 蒋伟俊,杜叶康,方伟泉.棉田残膜回收机研究进展与展望[J].中国农机化学报,2026,47(2):14 - 20.
JIANG Weijun, DU Yekang, FANG Weiquan. Research progress and prospects of residual plastic film recovery machines in cotton fields[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2026,47(2):14 - 20. (in Chinese)
[15] 朱凤武.金龟子形态分析及深松耕作部件仿生设计[D].长春:吉林大学,2005.
ZHU Fengwu. Analysis of the morphology of scarabaeoidea and bionic design of subsoiling components[D]. Changchun: Jilin University,2005. (in Chinese)
[16] 周玉乾.深松铲受力数学模型与计算机模拟[D].郑州:河南农业大学,2006.
ZHOU Yuqian. Force mathematical model and computer simulation of the subsoiler[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2006. (in Chinese)
[17] 余泳昌,刘文艺,赵迎芳,等.立柱式深松铲受力数学模型及试验分析[J].农业工程学报,2007,23(6):109 - 113.
YU Yongchang, LIU Wenyi, ZHAO Yingfang, et al. Force mathematical model and examination analysis of the column subsoiler [J]. Transactions of the CSAE,2007,23(6):109 - 113. (in Chinese)
[18] 高靖华,韩杰,陶继哲.1SL - 535 型杆齿式深松机及主要部件的设计[J].农机化研究,2004,26(4):89 - 90.
[19] 王丽萍.推荐雷肯(德国)EurOpaL 系列液压翻转犁[J].现代农业,2019(1):100 - 101.
[20] 李霞,王维新,坎杂.贝松 R71 型翻转五铧犁的正确使用与调整[J].新疆农机化,2004(4):40.
[21] 杜兆辉,陈彦宇,张姬,等.国内外旋耕机械发展现状与展望[J].中国农机化学报,2019,40(4):43 - 47.
DU Zhaohui, CHEN Yanyu, ZHANG Ji, et al. Development status and prospects of rotary farm machinery in domestic and abroad [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(4):43 - 47. (in Chinese)
[22] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等.播种机导种技术与装置研究进展分析[J].农业机械学报,2020,51(12):1 - 14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):1 - 14. (in Chinese)
[23] 李亚雄,陈学庚,温浩军.2MBJ - 12 型精密播种膜上点播机[J].农业机械,2002(6):46 - 47.
[24] 卢勇涛,李亚雄,陈学庚.气吸式棉花精量穴播器的设计与试验[J].甘肃农业大学学报,2012,47(3):129 - 133.
LU Yongtao, LI Yaxiong, CHEN Xuegeng. Design and experiment on air-suction cotton precision dibbler[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2012,47(3):129 - 133. (in Chinese)
[25] 徐国杰.气吸滚筒阵列式棉花精密排种器的设计与试验研究[D].石河子:石河子大学,2018.
XU Guojie. Design and experiment of pneumatic cylinder array precision seed-metering device for cotton[D]. Shihezi: Shihezi University,2018. (in Chinese)
[26] 康施为,倪向东,齐庆征,等.气吸滚筒式棉花精密排种器的设计与试验[J].农机化研究,2020,42(6):136 - 141.
KANG Shiwei, NI Xiangdong, QI Qingzheng, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for cotton[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(6):136 - 141. (in Chinese)
[27] 王吉奎,王建民,丛锦玲.内侧充种式膜上点播器的研制[J].新疆农机化,2003(2):54.
[28] 王吉奎,郭康权,土鲁洪,等.夹持自锁式棉花精量穴播轮的研究[J].农业工程学报,2008,24(6):125 - 128.
WANG Jikui, GUO Kangquan, TU Luhong, et al. Improved design of the clamping and self-locking cottonseed precision dibbler [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(6):125 - 128. (in Chinese)
[29] 王顺利.机械钳夹式棉花精量排种器排种机理研究及计算机仿真分析[D].石河子:石河子大学,2009.
WANG Shunli. The mechanism of seeding about mechanical precision clamp-type cotton seed metering device and computer simulation analysis[D]. Shihezi: Shihezi University,2009. (in Chinese)
[30] 陈学庚,赵岩.棉花双膜覆盖精量播种机的研制[J].农业工程学报,2010,26(4):106 - 112.
CHEN Xuegeng, ZHAO Yan. Development of double-film mulch precision planter for cotton seeding[J]. Transactions of the CSAE,2010, 26(4):106 - 112. (in Chinese)
[31] 张世杰.2BMK - 1/3 型穴播式铺膜播种机的设计与试验[J].中国农机化学报,2013,34(4):113 - 117.

ZHANG Shijie. Design and test of 2BMK－1/3 dibble filming planter machine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(4): 113－117. (in Chinese)

[32] 宋德平,宋庆奎,成永朋,等. 基于机采棉的折叠式棉花覆膜播种机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2015,36(6):27－31.
SONG Deping, SONG Qingkui, CHENG Yongpeng, et al. Design and experiment of folded cotton membrane planter based on mechanial harvest cotton[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(6): 27－31. (in Chinese)

[33] 张爱民,李明军,谢庆,等. 2BMJ－3A 型基于机采棉的智能精量播种机设计与试验[J]. 农机化研究,2018,40(11):140－146.
ZHANG Aimin, LI Mingjun, XIE Qing, et al. Design and experiment of 2BMJ－3A type intelligent precision seeding machine based on technology of harvesting cotton by cotton-picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 140－146. (in Chinese)

[34] 于永良. 结合新疆实际的棉花双膜覆盖机械式精量播种机的研发与应用[J]. 湖南农机,2013,40(7):3－5.
YU Yongliang. Development and application of cotton double membrane covering mechanical precision planter combining with the actual of Xinjiang[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2013, 40(7): 3－5. (in Chinese)

[35] 卢宇. 双 U 型棉花精量播种机关键部件设计与试验研究[D]. 秦皇岛:河北科技师范学院,2021.
LU Yu. Design and test study on key components of double U type cotton precision seeder[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2021. (in Chinese)

[36] 胡梦杰,夏俊芳,郑侃,等. 内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8):73－85.
HU Mengjie, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high-speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 73－85. (in Chinese)

[37] HUDSPETH E B, WANJURA D F. A planter for precision depth and placement of cottonseed[J]. Transaction of the ASAE, 1970, 13(2): 153－155.

[38] PARISH R L. Development of a narrow-row vertical-plate planter[J]. Transactions of the ASAE, 1979, 15(4): 636－637.

[39] ÖNAL İ, DEGIRMENCIOGLU A, YAZGI A. An evaluation of seed spacing accuracy of a vacuum type precision metering unit based on theoretical considerations and experiments[J]. Turkish Journal of Agriculture Forestry, 2012, 36(2): 133－144.

[40] YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. Measurement, 2014, 56(10): 128－135.

[41] SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimization of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 429－438.

[42] 胥南. 盐碱地棉花耙播机研制与关键触土部件作业性能提升研究[D]. 泰安:山东农业大学,2025.
XU Nan. Development of a cotton rake seeder for saline-alkali land and research on enhancing the operational performance of key soil-engaging components[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2025. (in Chinese)

[43] 张若宇,张建强,夏彬,等. 数字棉花技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2025,56(5):1－16.
ZHANG Ruoyu, ZHANG Jianqiang, XIA Bin, et al. Research progress on digital cotton technology and equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 1－16. (in Chinese)

[44] 乔白羽,丁素明,薛新宇,等. 喷雾机喷杆有限元模态分析与试验[J]. 农机化研究,2019,41(4):30－36.
QIAO Baiyu, DING Suming, XUE Xinyu, et al. Finite element modal analysis and experiment of sprayer boom[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4): 30－36. (in Chinese)

[45] 崔龙飞,薛新宇,乐飞翔,等. 大型喷杆喷雾机钟摆式主被动悬架自适应鲁棒控制研究[J]. 农业机械学报,2020,51(12):130－141.
CUI Longfei, XUE Xinyu, LE Feixiang, et al. Adaptive robust control of active and passive pendulum suspension for large boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 130－141. (in Chinese)

[46] 崔龙飞,薛新宇,乐飞翔,等. 喷杆运动与喷雾沉积分布变异系数关系试验研究[J]. 农机化研究,2019,41(6):169－174.
CUI Longfei, XUE Xinyu, LE Feixiang, et al. Experimental study on relationship between spray boom movement and spray deposition distribution variation coefficient[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 169－174. (in Chinese)

[47] 王珏,杨欣,殷梦杰,等. 棉花植保机械在河北省的应用[J]. 农机科技推广,2017(1):44－45.

[48] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2014,45(10):53－59.
ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 53－59. (in Chinese)

[49] 孙乐鑫,陈兵,赵静,等. 无人机施药技术在农业生产中的应用研究现状及展望[J]. 江苏农业科学,2022,50(15):31－42.

[50] 车刚,张伟,梁远,等. 3ZFC－7 型全方位复式中耕机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(1):130－135.

CHE Gang, ZHANG Wei, LIANG Yuan, et al. Design and experiment of the 3ZFC-7 omni-bearing duplex type cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 130-135. (in Chinese)

[51] 李博,李清荣,何培祥,等. 微耕机耕深自动控制系统[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2015,40(4):74-77.
LI Bo, LI Qingrong, HE Peixiang, et al. On micro tillage machine-cultivated deep automatic control system[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 40(4): 74-77. (in Chinese)

[52] 王文明,王天元,郭兵,等. 基于振动减阻原理的旋转中耕机关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(3):35-45,135.
WANG Wenming, WANG Tianyuan, GUO Bing, et al. Design and experiment of key components of rotary cultivator based on vibration reducing resistance principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 35-45, 135. (in Chinese)

[53] 翟世克. 仿形避障立式旋耕作业机的设计与试验[D]. 长沙:湖南农业大学,2023.
ZHAI Shike. Design and test of imitation obstacle avoidance vertical rotary tillage machine[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[54] 罗昕,胡斌,王维新,等. 3MDZK-12 型组控式单行仿形棉花打顶机[J]. 农机化研究,2008,30(11):136-138.
LUO Xin, HU Bin, WANG Weixin, et al. 3MDZK-12 type group control and single row profiling cotton topping machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(11): 136-138. (in Chinese)

[55] 胡斌,罗昕,李明志,等. 3MDY-12 型前悬挂液压驱动式棉花打顶机[J]. 新疆农机化:2006(2):26-27.

[56] 罗昕,胡斌,王维新,等. 3MDZK-12 型组控式单行仿形棉花打顶机[J]. 新疆农机化,2008(6):23-24,31.

[57] 胡斌,罗昕,王维新,等. 3MDZK-12 型组控式单行仿形棉花打顶机的研制[J]. 农机化研究,2008,30(5):73-75,78.
HU Bin, LUO Xin, WANG Weixin, et al. Study on group control and single row profiling cotton top cutter of 3MDZK-12 type [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(5): 73-75, 78. (in Chinese)

[58] 彭炫,周建平,许燕,等. 改进 YOLOv5 识别复杂环境下棉花顶芽[J]. 农业工程学报,2023,39(16):191-197.
PENG Xuan, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Cotton top bud recognition method based on YOLOv5-CPP in complex environment[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 191-197. (in Chinese)

[59] 孟志军,王昊,付卫强,等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2023,54(10):1-24.
MENG Zhijun, WANG Hao, FU Weiqiang, et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 1-24. (in Chinese)

[60] 刘建,吕新民,党革荣,等. 植保机械的研究现状与发展趋势[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,32(增刊 1):202-204.
LIU Jian, LÜ Xinmin, DANG Gerong, et al. Status quo and development tendency of plant protection equipment[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2003, 32(Supp. 1): 202-204. (in Chinese)

[61] 庄腾飞,杨学军,董祥,等. 大型自走式喷雾机喷杆研究现状及发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊 1):189-198.
ZHUANG Tengfei, YANG Xuejun, DONG Xiang, et al. Research status and development trend of large self-propelled sprayer booms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp. 1): 189-198. (in Chinese)

[62] RALPH H. Canadian use of aircraft for plant protection[J]. Phytoprotection, 2004, 85(1): 7-12.

[63] 毛利建太郎. 无线操控直升飞机喷洒农药技术[C]// 水稻生产机械化技术交流会,2006:234-235.

[64] 尹选春,兰玉彬,文晟,等. 日本农业航空技术发展及对我国的启示[J]. 华南农业大学学报,2018,39(2):1-8.
YIN Xuanchun, LAN Yubin, WEN Sheng, et al. The development of Japan agricultural aviation technology and its enlightenment for China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(2): 1-8. (in Chinese)

[65] MOGILI U R, DEEPAK B B V L. Review on application of drone systems in precision agriculture[J]. Procedia Computer Science, 2018, 133: 502-509.

[66] 孙竹,顾伟,崔龙飞,等. 智能植保装备关键技术研究现状与发展趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文),2024,5(4):1-23.
SUN Zhu, GU Wei, CUI Longfei, et al. Research status and development trends of key technologies for intelligent plant protection equipment[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(4): 1-23. (in Chinese)

[67] KOSULNIKOV R A, KONOVALOV P V, GAPICH D S, et al. Tillage implement with vibrating working body[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 577(1): 012014-012014.

[68] LAZIZA T, SAIDAKBARKHYZHA Y, GULCHEHRA J. Improving the wear resistance and durability of cultivator tools[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2373(2): 022260.

[69] BORTOLI D L, MARSI S, MARINELLO F, et al. Cost-efficient algorithm for autonomous cultivators: implementing template matching with field digital twins for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109509.

[70] 何激光,张晟,邓志强,等. 中耕培土机械装备研究进展[J]. 农业工程与装备,2022,49(5):1-5.

HE Jiguang, ZHANG Sheng, DENG Zhiqiang, et al. Research progress of the cultivation and banking machine and equipment [J]. Agricultural Engineering and Equipment, 2022, 49(5): 1 - 5. (in Chinese)

[71] MARQUIS A, SPROTT W. Cotton topper and boll weevil catcher: United States, 1325406[P]. 1919 - 12 - 16.

[72] SMITH J A. Cotton topper: US27547428A[P]. 1931 - 11 - 24.

[73] BELL J W. Cotton topper: US78031047A[P]. 1951 - 12 - 18.

[74] HOWELL J P. Rotary cotton topper: US43487054A[P]. 1955 - 10 - 18.

[75] STROMAN L E. Mechanical cotton defoliator and topper: US85205559A[P]. 1961 - 04 - 04.

[76] KEYES A A. Cotton topper: US83813359A[P]. 1962 - 01 - 23.

[77] 石茂林,高小雅,张卫东,等. 采棉机关键技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2025,56(5):167 - 183.
SHI Maolin, GAO Xiaoya, ZHANG Weidong, et al. Development status and prospect of research on key technologies of cotton pickers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 167 - 183. (in Chinese)

[78] 张山鹰. 新疆棉花机收现状分析及对策研究[J]. 新疆农机化,2022(1):47 - 48.
ZHANG Shanying. Analysis and countermeasure of present situation of mechanized cotton harvest in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2022(1): 47 - 48. (in Chinese)

[79] 肖霄,孙奎,谢方平,等. 水平摘锭式采棉机采摘系统研究现状与展望[J]. 农机化研究,2023,45(10):1 - 9.
XIAO Xiao, SUN Kui, XIE Fangping, et al. Research status and prospects of horizontal spindle type cotton picker picking system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(10): 1 - 9. (in Chinese)

[80] 陈廷官,张宏文,王磊,等. 水平摘锭式采棉机采摘头传动系统优化与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(17):18 - 26.
CHEN Tingguan, ZHANG Hongwen, WANG Lei, et al. Optimization and experiments of picking head transmission system ofhorizontal spindle type cotton picker[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 18 - 26. (in Chinese)

[81] 刘秀梅,张宏文,王磊,等. 水平摘锭式采棉机摘锭采棉的缠绕模型研究[J]. 农机化研究,2020,42(8):13 - 19.
LIU Xiumei, ZHANG Hongwen, WANG Lei, et al. Study on winding model of spindle picking cotton for horizontal cotton picker [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(8): 13 - 19. (in Chinese)

[82] 杨潇,章如权,唐永飞. 水平摘锭式采棉机采棉头脱棉盘调整机构的设计[J]. 新疆农机化,2022(4):20 - 21,24.
YANG Xiao, ZHANG Ruquan, TANG Yongfei. Design of doffer adjustment device for cotton picking head of horizontal spindle cotton picking machine[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2022(4): 20 - 21, 24. (in Chinese)

[83] 刘超,古丽巴哈尔·托乎提,买买提明·艾尼,等. 柔性垂直摘锭式采棉系统刚柔耦合动态特性分析——基于 ADAMS [J]. 农机化研究,2025,47(10):36 - 42.
LIU Chao, GULIBAHAER·Tuohuti, MAIMAITIMING·Aini, et al. Analysis of rigid-flexible coupling dynamic characteristics of flexible vertical spindle cotton picking system based on ADAMS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(10): 36 - 42. (in Chinese)

[84] 努尔艾合买提·吾甫尔,依西甫江·赛依提,赵田,等. 垂直摘锭结构参数优化设计与有限元分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(1):206 - 213.
NUR AIHEMAITI WUPUER, YIXIPUJIANG SAIYITI, ZHAO Tian, et al. Optimization design and finite element analysis of vertical picking structure parameter[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(1): 206 - 213. (in Chinese)

[85] 田虎楠,王作棠,王春耀,等. 梳齿式采棉机气力输棉系统的探索性研究[J]. 农机化研究,2014,36(2):20 - 23.
TIAN Hunan, WANG Zuotang, WANG Chunyao, et al. Exploratory study on pneumatic conveying system of comb-type cotton harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(2): 20 - 23. (in Chinese)

[86] 张丽,张佳喜,蒋永新,等. 梳齿式采棉机采摘装置[J]. 北京农业,2014(3):176 - 177.

[87] 杨扬,何文清. 农田土壤微塑料污染现状与进展[J]. 环境工程,2021,39(5):156 - 164.
YANG Yang, HE Wenqing. Research status and progress of microplastic pollution in farmland soil [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(5): 156 - 164. (in Chinese)

[88] 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2017,48(6):1 - 14.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 1 - 14. (in Chinese)

[89] 梁荣庆,陈学庚,张炳成,等. 新疆棉田残膜回收方式及资源化再利用现状问题与对策[J]. 农业工程学报,2019,35(16):1 - 13.
LIANG Rongqing, CHEN Xuegeng, ZHANG Bingcheng, et al. Problems and countermeasures of recycling methods and resource reuse of residual film in cotton fields of Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 1 - 13. (in Chinese)

[90] 寇嘉乐,王吉奎,王磊,等. 夹指链式棉田残膜回收秸秆粉碎还田一体机设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(23):14 - 22.
KOU Jiale, WANG Jikui, WANG Lei, et al. Integrating clamping finger-chain residual film recycling and straw crushing return to cotton field[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(23): 14 - 22. (in Chinese)

[91] 靳伟,丁幼春,农峰,等. 抖动链齿杆式残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(11):71 - 82.
JIN Wei,DING Youchun,NONG Feng,et al. Design and test of excavating and conveying device with vibrating chain tooth and bar for residual film - soil - straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(11):71 - 82. (in Chinese)

[92] 王志超,李仙岳,史海滨,等. 农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(5):101 - 106.
WANG Zhichao, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(5):101 - 106. (in Chinese)

[93] 蒋永新,曲衡,刘旋峰,等. 残膜回收机铲齿式起膜装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):282 - 289.
JIANG Yongxin, QU Heng, LIU Xuanfeng, et al. Design and experiment of spade tooth film lifting device for residual film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(1):282 - 289. (in Chinese)

[94] 王海基,王敏,卢勇涛,等. 弹齿链耙式残膜回收机链耙装置的设计与试验[J]. 浙江农业学报,2023,35(10):2465 - 2476.
WANG Haiji, WANG Min, LU Yongtao, et al. Design and test of spring teeth chain rake type residual film reclaimer[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2023,35(10):2465 - 2476. (in Chinese)

[95] 张俊丽,索龙,梁建宏,等. 我国农用地膜应用趋势及残留特点分析[J]. 农业与技术,2023,43(24):69 - 71.

[96] 刘旋峰,张丽,郭兆峰,等. 1SM - 1.8(2.0)型牵引式棉田残膜回收机的研制[J]. 新疆农机化,2015(3):13,16.

[97] 营雨琨,曹肆林,王敏,等. 1LM - 5.0 型播前搂膜机的研制[J]. 新疆农机化,2016(4):11 - 12.
YING Yukun, CAO Silin, WANG Min, et al. Development of 1LM - 5.0 film raking machine[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization,2016(4):11 - 12. (in Chinese)

[98] 邵静. 几种典型的苗期揭膜回收机特性分析[J]. 新疆农机化,2021(3):15 - 17.
SHAO Jing. Characteristics analysis on several typical seedling stage film recyclers[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2021(3):15 - 17. (in Chinese)

[99] 张学军,史阳阳,鄢金山,等. 基于 SPH - FEM 耦合的残膜-根茬-弹齿互作规律研究[J]. 农业机械学报,2025,56(12):386 - 396,406.
ZHANG Xuejun, SHI Yangyang, YAN Jinshan, et al. Residual film-root stubble-elastic tooth interactions based on SPH - FEM coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(12):386 - 396,406. (in Chinese)

[100] 李东,赵武云,辛尚龙,等. 农田残膜回收技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报,2020,41(5):204 - 209.
LI Dong, ZHAO Wuyun, XIN Shanglong, et al. Current situation and prospect of recycling technology of farmland residual film [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(5):204 - 209. (in Chinese)

[101] 陈兴华,陈学庚,李景彬,等. 钉齿滚筒式播前残膜回收装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(2):30 - 39.
CHEN Xinghua, CHEN Xuegeng, LI Jingbin, et al. Design and test of nail-teeth roller-type residual film recovery device before sowing[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(2):30 - 39. (in Chinese)

[102] 刘策,胡斌,罗昕,等. 基于滚筒弹齿式起膜机构的残膜回收机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2022,57(5):230 - 239.
LIU Ce, HU Bin, LUO Xin, et al. Design and test of residual film recovery machine based on drum elastic tooth film lifting mechanism[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2022,57(5):230 - 239. (in Chinese)

[103] 刘进宝,郑炫,赵岩,等. 新型杆齿滚筒式残膜捡拾机构的设计与试验[J]. 干旱地区农业研究,2017,35(6):300 - 306.
LIU Jinbao, ZHENG Xuan, ZHAO Yan, et al. Design and experiment of a new rod-tooth-roller plastic film residue collector [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2017,35(6):300 - 306. (in Chinese)

[104] 柯泽荣,杨术明,张峰,等. 齿链式残膜回收机设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2024,59(1):313 - 322.
KE Zerong, YANG Shuming, ZHANG Feng, et al. Design and experiment of a toothed chain residual membrane recycling machine[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2024,59(1):313 - 322. (in Chinese)

[105] 温浩军,陈学庚,陈浩,等. 农田地膜回收机械应用现状与发展[J]. 农业环境科学学报,2024,43(6):1271 - 1277.
WEN Haojun, CHEN Xuegeng, CHEN Hao, et al. Application status and development of farmland mulch recycling machinery [J]. Journal of Agro-Environment Science,2024,43(6):1271 - 1277. (in Chinese)

[106] 缑海啸,温浩军,陈学庚. 二阶钉齿链板式残膜回收装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(19):1 - 11.
GOU Haixiao, WEN Haojun, CHEN Xuegeng. Design and test of the two-order pin-tooth chain plate type residual film recovery device[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(19):1 - 11. (in Chinese)

[107] 段利英,霍峥嵘,孔令彦,等. 凸轮滚筒式农田残膜回收机设计与试验[J]. 农机化研究,2026,48(3):62 - 69.
DUAN Liying, HUO Zhengrong, KONG Lingyan, et al. Design and test of cam roller type farmland residual film recycling machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2026,48(3):62 - 69. (in Chinese)

[108] 吾斯曼·吾木尔,沙塔尔·司马义,克然木·热合木吐力,等. 伸缩钉齿式残膜回收机捡拾装置节本增效设计与优化[J]. 农机化研究,2025,47(5):75－81,87.
WUSIMAN WUMUER,SHATAR SIMAYI,KERANMU REHEMUTULI,et al. Cost saving and efficiency improving design and optimization of telescopic spike-tooth type residual film recovery pick-up device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(5):75－81,87. (in Chinese)

[109] 赵昱宇,谢建华,曹肆林,等. 导向伸缩式残膜捡拾装置设计与试验[J]. 中国农机化学报,2023,44(11):14－20.
ZHAO Yuyu,XIE Jianhua,CAO Silin,et al. Design and test of guided telescopic film pickup device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(11):14－20. (in Chinese)

[110] 许宁,康建明,张恒,等. 气吸式残膜回收除杂一体机试验研究[J]. 中国农机化学报,2021,42(1):14－19.
XU Ning,KANG Jianming,ZHANG Heng,et al. Experimental research on the air suction type residual film recovery and decontamination integrated machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2021,42(1):14－19. (in Chinese)

[111] 张学军,康梦晨,史增录,等. 双滚筒式收后地表残膜回收机设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(14):1－13.
ZHANG Xuejun,KANG Mengchen,SHI Zenglu,et al. Design and experiments of a double drum surface residual film recycling machine after harvest[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(14):1－13. (in Chinese)

[112] 王昭宇,陈学庚,颜利民,等. 随动式残膜回收机起膜捡拾机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):80－90.
WANG Zhaoyu,CHEN Xuegeng,YAN Limin,et al. Design and experiment on collecting and removing device for profile modeling residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):80－90. (in Chinese)

[113] 程方平,庹洪章,易文裕,等. 棉田残膜回收机械研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报,2023,44(2):200－207.
CHENG Fangping,TUO Hongzhang,YI Wenyu,et al. Research status and development trend of residual film recycling machinery in cotton field[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(2):200－207. (in Chinese)

[114] 李挺,闻朝华,马世龙. 国内外残膜回收装备的研究现状及发展趋势[J]. 河北农机,2021(12):35－36.

[115] 胡灿,王旭峰,陈学庚,等. 新疆农田残膜污染现状及防控策略[J]. 农业工程学报,2019,35(24):223－234.
HU Can,WANG Xufeng,CHEN Xuegeng,et al. Current situation and control strategies of residual film pollution in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE,2019, 35(24):223－234. (in Chinese)

[116] 严伟,胡志超,游兆延,等. 3 种残膜回收机的作业性能对比试验研究[J]. 农机化研究,2017,39(3):197－202.
YAN Wei,HU Zhichao,YOU Zhaoyan,et al. Comparative experimental study on working performance of three kinds of residue plastic film collectors[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(3):197－202. (in Chinese)

[117] SAWYER A G,ROBERSON R L. Plastic sheet take-up implement:US82108192A[P]. 1993－08－17.

[118] PARISH R L. An automated machine for remove of plastic mulch[J]. Transactions of ASAE, 1999,42(1):49－51.

[119] 由佳翰. 4JSM－2000 型棉秆粉碎与残膜回收联合作业机的设计与试验[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2019.
YOU Jiahan. Design and test of 4JSM－2000 type combined operation machine for cotton stalk chopping and plastic film recovery[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University,2019. (in Chinese)

[120] PARRY J R. Farm machine for removing protective ground covers from a cultivated field:US3687392DA[P]. 1972－08－29.

[121] CHRYSLER R W. Apparatus for removing plastic film from raised plant beds:US87946986A[P]. 1989－01－10.

[122] SARL DL SYSTEM. Machine for removing wide strips laid out on the ground:US88876792A[P]. 1995－02－07.

[123] BROOKS T W. Apparatus for removing and baling plastic mulch:US21368894A[P]. 1995－09－26.

[124] ROCCA A R. Plastic mulch retriever for use by e. g. farmer:WO2009076729－A1[P]. 2011－03－10.

[125] KIMBALL J. Agricultural implement for recovery of plastic mulch and processing of the same:US201715466104A[P]. 2019－05－14.