doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.05.001

数字棉花技术与装备研究进展

张若宇[1,2]　张建强[1,2]　夏　彬[1,3]　吴　超[1,3]　常金强[1,2]　王三辉[1,3]

(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;
3.兵团智慧农场数字化装备技术创新中心,石河子 832003)

摘要:棉花作为我国重要的战略物资,其产业数字化升级对实现农业现代化与边疆经济可持续发展意义重大。本文系统梳理了数字棉花技术体系的研究成果,提出“数字棉花”概念框架和技术体系,涵盖种植管理、测产采收、收购加工、公证检验、仓储物流及全流程质量追溯等全产业链环节。重点分析了数字化装备通过融合物联网、遥感、大数据及人工智能技术,在精准播种、智能水肥调控、无人机植保、采收监测等环节的应用现状与关键技术突破,揭示了当前技术应用中存在的设备适配性不足、数据孤岛及成本效益失衡等问题,从生产流程的全链条优化、标准体系建设、技术融合创新及数据平台构建等维度,提出了推动数字棉花技术标准化、规模化应用的路径,为棉花产业提质增效与高质量发展提供理论支撑。

关键词:棉花;数字技术;智能装备;全产业链数字化;质量追溯

中图分类号:S562;G203　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)05-0001-16　　**OSID**:

Research Progress on Digital Cotton Technology and Equipment

ZHANG Ruoyu[1,2]　ZHANG Jianqiang[1,2]　XIA Bin[1,3]　WU Chao[1,3]　CHANG Jinqiang[1,2]　WANG Sanhui[1,3]

(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*
3. *Technology Innovation Center of Smart Farm Digital Equipment, Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: As an important strategic material in China, the digital upgrading of cotton industry is of great significance to the realization of agricultural modernization and sustainable development of border economy. The research progress of digital cotton technology system was systematically reviewed, and the conceptual framework of “digital cotton” was proposed, covering the whole industrial chain links such as planting management, yield measurement and harvesting, acquisition and processing, fair inspection, warehousing and logistics, and whole-process quality traceability. Focusing on the analysis of the application status and key technological breakthroughs of digital equipment in precision seeding, intelligent water and fertilizer control, unmanned aerial vehicle plant protection, machine cotton picking monitoring and other links through the integration of Internet of Things, remote sensing, big data and artificial intelligence technology, the problems of insufficient equipment adaptability, data islands and cost-benefit imbalance in the current technology application were revealed. It can provide theoretical support for the quality and efficiency improvement and high-quality development of the cotton industry.

Key words: cotton; digital technology; intelligent equipment; full industry chain digitization; quality traceability

0　引言

棉花作为全球纺织工业的基石性原料,不仅是国际贸易中大宗交易的农产品,更是关系到国家战略安全的重要物资。全球棉花种植面积常年维持在 3×10^7 hm^2 以上[1],年产量约 2.5×10^7 t,中国作为

收稿日期:2025-03-11　修回日期:2025-04-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2002400)、兵团科技攻关计划项目(2023AB014、2022DB003)、新疆棉花产业技术体系项目(XJARS-03)和石河子大学高层次人才科研启动项目(CJXZ202104)

作者简介:张若宇(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事数字棉花技术与装备研究,E-mail:ry248@163.com

全球棉花生产与消费大国,2024 年棉花种植面积达 2.83×10^6 hm^2,总产量达 6.16×10^6 t,占全球总产量的 24% 以上[2-3]。新疆棉区占全国 92.2% 的产量和 93.96% 的综合机械化率[4],成为全国干旱区农业技术创新的典范。

新疆在棉花面积与产量上的突破主要得益于 40 年来“阶梯式创新”的科学研究成果与完全自主知识产权的技术演进路径:20 世纪 80 年代突破地膜覆盖机械化技术,攻克了积温不足制约棉苗生长的难题[4-7];21 世纪初首创膜下滴灌与水肥一体化协同作业系统,极大提升了荒漠绿洲的水分利用效率;当前依托北斗导航定位与自动驾驶技术,实现精准播种,构建了膜下滴灌、全程机械化、北斗导航等关键技术的“农机-农艺-生态”三位一体种植模式,推动单产从 1980 年的 450 kg/hm^{2}跃升至 2024 年的 2 322.8 kg/hm^2,增幅达 416%,为全球资源约束型地区提供了大规模棉花生产的成功范式[8-12]。

随着全球棉花单产增长逐渐到达技术上限,产业竞争焦点已从规模扩张转向效率革命。生产资料成本上升与气候风险加剧,使得传统生产模式面临“高成本-低弹性”的双重刚性约束。如何提高植棉效益,帮助棉农增产提效,提升应对气候和价格波动的能力,已成为当前新疆棉花高质量发展中亟待解决的关键问题。在此背景下,数字技术成为突破瓶颈的关键,将物联网、智能传感、大数据、区块链等技术应用于棉花生产,为规模化棉花水肥药精准管理、灾害预测预报、产量估测、市场动向分析、种植结构布局优化等提供精准服务,数字化改造可通过重构生产要素效率,为产业可持续发展开辟新赛道[13-15]。同时,作为智能化的基础,数字棉花为产业智能化发展提供了数据与技术基础。

本文系统梳理数字棉花技术与装备的研究进展,提出“数字棉花”概念框架,解析精准播种、智能水肥调控、无人机植保等环节的技术现状与突破,探讨技术融合创新、装备智能化升级及数据共享平台构建等发展方向,旨在为棉花产业提质增效与高质量发展提供理论支撑与发展路径。

1 概念与框架

“数字棉花”是指通过现代信息技术手段,对棉花全产业链(种植、加工、交易等)各个环节进行数字化管理的过程。以全产业链数字化重构为核心,通过物联网、遥感、大数据、人工智能等现代信息技术与农业机械化、生物技术交叉与融合,形成“农机-农艺-生态-数字”四维融合;通过“物理精耕 + 数字赋能”双轮驱动模式,实现棉花“种植-采收-加工-流通”全流程数据贯通、智能决策与精准调控的现代农业范式。其本质是通过“感知-分析-执行”闭环体系,将物理棉田映射为数字孪生体,形成覆盖生产要素优化配置、生产过程动态调控、质量全程可溯的智慧农业生态系统,实现推动单产突破、水肥药综合成本降低、棉花品质提升的目的,为资源约束型地区提供“降本-增产-增效”的系统解决方案。

数字棉花体系呈现“三横三纵”特征(图 1)。横向以“精准感知-智能决策-协同执行”为链条,构建天空地一体化感知网络(卫星遥感、无人机、田间传感器)、数据驱动的生长模型与智能算法、自主作业装备集群三大技术支柱。纵向贯穿“种植管理数字化”(北斗导航播种、变量水肥调控、无人机植保)、“采收加工智能化”(机采棉低损监测、籽棉品质快速检测、皮棉加工质量在线调控)、“流通追溯透明化”(区块链赋码、仓储物流可视化、质量溯源穿透式管理)三大核心环节。依托农业云平台整合多源数据资源,建立覆盖气象预警、病虫害预测、市场供需分析的决策支持系统,形成“数据-知识-服务”转化闭环。



图 1 数字棉花框架图

Fig. 1 Digital cotton frame diagram

数字棉花技术体系正从单点突破向系统集成跨越。早期聚焦装备自动化，如播种监测传感器；中期强化数据驱动，如产量遥感预测模型；当前向全链协同，如质量追溯区块链演进，未来将依托 5G、数字孪生等技术实现全域智能互联。这一过程既需要突破多源异构数据融合、边缘计算实时响应等技术瓶颈，更需构建政府-科研-企业-农户协同的生态体系，推动技术标准化、服务普惠化与模式可扩展化。

2　关键技术

2.1　物联网与智能传感

物联网依托“感知-传输-决策”闭环架构驱动棉花全产业链数字化升级，其技术突破主要体现在智能传感系统的创新集成。通过融合传感器、微处理器与智能算法构建的物联感知体系，赋予传感终端多维数据处理能力。在田间场景中，传感器可同步完成数据采集、特征提取、模式分析和策略生成，形成从原始信号到决策指令的闭环处理路径。

借助物联网的网络通信与数据处理技术，智能传感系统构建覆盖全产业链的数据共享平台。通过边缘计算与云端协同机制，实现海量农业数据的标准化处理与多维度解析，使棉花种植的环境参数、加工环节的工艺指标、流通领域的市场信息等异构数据得以有机整合。基于此，生产者可精准调控水肥施用，加工企业能优化设备运行参数，供应链各主体可建立需求响应的动态匹配机制，最终推动棉花产业形成“精准感知-智能决策-高效执行”的智慧化生产体系，实现资源利用率、产品质量和运营效率的全面提升。

2.2　大数据与云计算

大数据与云计算技术构建起棉花产业数字化转型的算力基座，形成“数据驱动-云端赋能-全链协同”的技术生态。大数据技术通过构建多模态数据融合引擎，系统整合土壤理化参数、微气象动态、作物生理指标等全要素农业数据流，形成贯穿棉花种植、采收、加工、流通的全生命周期数字体系。云计算平台依托分布式存储架构与弹性计算资源，建立“边缘节点-区域云-中心云”3 级计算架构，实现海量数据的分布式存储、流式清洗与智能建模，完成从田间感知到产业决策的算力闭环。

在技术架构层面，系统构建“端-边-云”协同的智能中枢，前端通过异构传感网络实现种植环境多尺度感知，边缘计算节点完成数据预处理与轻量化建模；中端部署基于深度学习的生长态势预测引擎与质量溯源模型，构建包含特征向量的棉花数字孪生体；后端形成跨域数据平台，通过知识图谱技术实现生产数据、加工参数与市场需求的动态映射，突破传统农业数据孤岛，构建起覆盖“农田-工厂-市场”的产业级数据平台，驱动棉花产业向精准化、低碳化、高值化方向演进。

2.3　遥感与无人机技术

遥感与无人机技术为棉花智慧化生产构建起“空-天-地”立体感知网络，形成对地面传感系统的多维度增强体系。卫星遥感通过周期性广域扫描建立棉田环境数据库，无人机平台凭借灵活机动性实现厘米级精细观测，二者与地面固定式传感节点形成时空互补的监测范式。卫星提供宏观趋势分析，无人机聚焦关键区域动态捕捉，地面设备保障连续定点监测，共同构建多尺度、多精度的三维感知矩阵，形成覆盖棉花全生命周期的动态监测网络。

在数据融合层面，通过时空配准算法将卫星影像的周期性更新、无人机的应急巡检数据与地面传感器的连续记录进行耦合，建立包含光谱特征、环境变量、生长指标的三维数据立方体，同时形成覆盖植株个体-田块-区域的多级观测梯度。这种全天候、多维度的立体感知网络突破传统地面监测的视野局限，使棉田管理具备空间异质性解析能力，为棉花精准变量作业提供高分辨率空间决策支持，实现从单点调控向面域优化的技术跨越，推动传统经验农业向数据驱动的智慧农业转型。

2.4　机器视觉与图像处理

机器视觉技术为棉花产业数字化转型提供可视化智能引擎。以高分辨率多光谱成像系统作为感知终端，结合卷积神经网络与数字图像处理算法，形成从光学信号采集到农艺决策输出的完整技术链。图像处理技术作为底层支撑，完成噪声过滤、几何校正、特征增强等预处理，为高阶视觉分析提供标准化数据输入，实现农业视觉信息从物理信号到决策指令的智能转化。

技术架构包含“光学感知-智能解析-决策执行”三维协同模块。光学感知层集成高分辨率工业相机、近红外光谱仪等设备，构建覆盖可见光至短波红外的多波段成像系统；智能解析层部署深度学习等智能算法框架，建立包含纹理特征、形态学参数、光谱指纹等多维特征向量的解析模型；决策执行层通过数字孪生技术将视觉数据映射为三维生产场景，生成可执行的质量评估图谱与作业指令。通过突破传统人工检测的感知局限，使棉花生产管理具备亚毫米级空间分辨能力和毫秒级决策响应速度，为育种优化、精准田管和智能加工提供可视化决策支持。

2.5 区块链与质量追溯

区块链技术构建起棉花产业质量追溯的信任基础设施,形成“数据确权-流程穿透-价值确权”三位一体的治理体系。基于分布式账本架构,通过加密算法与智能合约技术,将棉花生产、加工、流通全链条数据转化为不可篡改的时序区块,建立覆盖“棉田-轧花厂-纺织厂-消费者”的全程溯源网络。

数据采集层部署物联网设备与数字标识系统,实现棉包质量参数、加工工艺指标等数据的标准化上链;共识网络层采用多节点验证机制,确保农事记录、检验证书、物流信息等异构数据的跨主体可信共享;应用服务层通过智能合约自动执行质量评级、补贴计算等业务逻辑,形成数据流与价值流的精准映射。打通了农业、工信、市场监管等多部门数据壁垒,推动形成“优质优价”的市场激励机制,促进产业链各环节主体建立基于数据互信的协同关系,重构棉花产业的价值分配与质量治理范式。

2.6 数字孪生与协同控制

数字孪生技术为棉花生产构建起虚实映射的决策中枢,通过高精度建模与实时数据驱动,实现棉田物理空间与数字空间的深度交互。基于多源感知数据(卫星光谱、无人机点云、地面传感器时序记录),采用多物理场耦合建模技术构建棉田三维孪生体,以厘米级精度还原植株形态、土壤结构、微气候环境等要素,并依托时空同步引擎实现虚拟模型与实体棉田的毫秒级数据同步。

结合数字孪生平台提供的虚拟模型,协同控制技术通过实时采集棉田的环境数据和棉花生长状态数据,对棉田管理进行精准调控。同时,整合无人机、智能喷药设备等机具,实现精准施药,减少农药使用量,提升防治效果。此外,协同控制技术还支持农机设备的智能调度与任务分配,自动规划植保无人机的飞行路径,协调多台农机具同时作业,显著提升生产效率。通过多设备、多任务的协同,系统能够高效整合资源,降低生产成本,提高棉花产量和品质。

3 数字棉花技术与装备研究成果

3.1 数字化种植管理

棉花数字化种植管理构建了覆盖全生产周期的智能化技术体系,包含精准播种、生长感知、智能植保与水肥调控四大核心模块,旨在通过“感知-决策-执行”闭环系统实现生产精准化、作业标准化与资源高效化,数字化种植管理研究路线如图 2 所示。

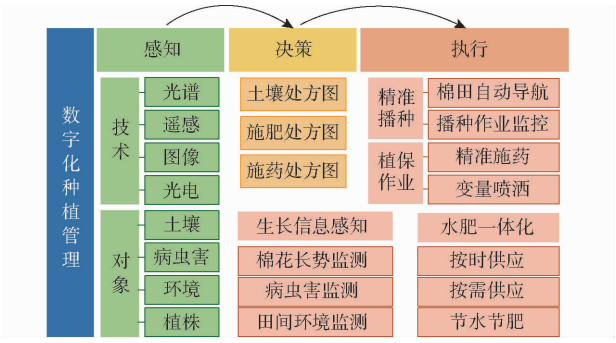


图 2 数字化种植管理研究路线图

Fig. 2 Research route of digital implant management

3.1.1 棉花精准播种作业

播种环节是生产高产优质棉花的重要环节,其精准度直接决定了棉花全生命周期的生长效能与资源利用效率。精量播种通过精准化作业重构了农业生产要素配置模式,推动棉花产业向资源集约化、管理精细化、产出高效化方向跨越式发展。目前棉花机械化播种智能技术研究主要集中在自动导航和播种作业参数实时监控等方面[16-19]。

(1)棉田自动导航技术

棉花精量播种导航技术经历了人工操控向智能化的转型。传统人工驾驶存在播行不直、接行不准等问题。北斗导航技术的应用实现了亚米级定位精度,通过自动驾驶确保播行端直与接行准确,土地利用率提升 5%,为后续农事作业奠定标准化基础[20-22]。但北斗系统在高压线、林带等复杂地形下易受信号干扰,导致定位精度下降。为此,结合视觉导航[23]突破环境遮蔽限制。当前技术演进围绕“精度-效率-适应性”三维度发展。未来,从单一卫星导航到视觉图像多模态感知融合,从预设路径执行向动态环境响应升级,将进一步强化系统的实时决策能力,推动播种作业向全环境自适应方向迈进,为棉花生产全程机械化提供核心支撑。

(2)播种作业参数实时监控

棉花播种质量实时监测技术作为精准农业的核心环节,由于棉花播种作业过程中穴播器全封闭,无法观察到其工作情况,加上恶劣的田间环境,穴播器易出现漏播、重播等故障,导致棉花减产,因此,棉花播种质量监测对于棉花提质增效具有重要意义。目前,通过光电等方法实现棉花播种质量的实时监测,相关研究成果如表 1 所示。

3.1.2 棉花生长与环境信息感知

生长信息感知技术是精准农业的核心引擎,对于我国粮食安全和贸易具有重大价值[27]。其通过多维度、多尺度的动态数据采集与智能分析,重构了农业生产决策的科学性与时效性。以数据驱动为核心,突破传统农业的粗放管理模式,构建“感知-分析-决策”闭环,提升资源利用效率与生产可控性,

表 1　棉花播种质量检测技术对比

Tab. 1　Comparison of cotton sowing quality testing technologies

监测技术类型	原理	特点	文献序号
光电式	对射式光电传感器和光电编码器	以齿盘式穴播器为载体、光照强度对监测系统无影响，实现棉花播种合格穴数监测精度 96.17%，空穴数监测精度 93.11%	[24]
电容式	通过介电常数变化检测种子通过状态，完成对播种、漏播和重播量信息的获取	脉冲识别、寻峰算法、脉冲积分面积实现籽粒脉冲的动态检测，播种、漏播、重播监测精度达到 94.6%、93.5%、88.1%	[25]
机器视觉	采用 LabVIEW、图像处理等技术对棉种图像进行处理，实现每穴棉种播种量的精量检测	通常在播种机出厂前对穴播器的性能进行鉴定检测	[26]

实现作物生长状态的实时量化诊断、资源投入的动态精准调控以及环境风险的智能预警。目前，棉花生长信息与环境信息感知的研究主要集中在棉花长势监测、病虫害监测和土壤养分监测。

(1)棉花长势监测

棉花长势监测技术体系已形成覆盖“单株-田块-区域”的多尺度监测网络，通过融合地面传感、航空遥感和卫星观测等多源数据，构建起“形态-生理-环境”多维度的长势评估体系。新疆农业大学研发的仿生“太阳花”状植物可穿戴传感器[28]，其超薄柔性结构可紧密贴合棉株茎秆表面，可精准捕捉蒸腾作用的细微波动，该装置通过监测茎流速率与冠层温度的耦合关系，实现植物体内茎流的长期持续监测；搭载数字成像等设备的无人机平台可实现冠层参数的动态解析，航空遥感技术在田块尺度监测中展现出高时空分辨率优势；卫星遥感技术则为区域尺度的长势监测提供了宏观视角，部分研究成果如表 2 所示。未来棉花生长监测将围绕 3 个维度展开：仿生传感材料开发；多模态数据融合；自主决策系统构建。

表 2　棉花长势监测技术及特点

Tab. 2　Cotton growth monitoring technology and characteristics

监测方式	原理	技术方法	优势	不足	应用场景	文献序号
地面传感器监测	实时采集植株参数，结合棉花生理模型预测长势	茎流传感器、机器视觉、深度学习等，结合物联网传输	实时连续监测、数据精度高	覆盖范围有限，需要多点部署	小规模农田、精细化管理的试验田	[28-31]
航空监测	无人机搭载光谱仪等设备获取高分辨率影像，分析冠层结构、叶面积指数等	无人机成像光谱仪、热红外成像、激光雷达、可见光遥感影像等	分辨率高，灵活机动，可实时监测，适用于复杂地形	续航时间短，初期设备成本高	中小规模农田、精准施肥、灌溉决策、灾害评估	[32-35]
卫星监测	以卫星遥感数据为基础，计算棉花植被指数等参数评估长势	地质统计学、影像纹理、神经网络等	覆盖范围广，数据免费易获取，适合大区域监测	空间分辨率低，受云层干扰大	宏观长势评估、区域产量预测	[36-37]

(2)病虫害监测

当前，棉花病虫害监测技术正经历从单一模态向天空地协同感知的范式革新。地面监测技术在高精度诊断领域持续突破，航空监测技术在大尺度动态监测中展现独特优势，卫星遥感技术则为区域尺度监测提供新范式。通过地面传感、航空遥感和卫星观测的多层级技术互补，为决策者准确决策和农户有针对性地实施相关措施提供了有效信息源。初步构建了覆盖“叶片-植株-田块-区域”的全尺度预警体系，推动病虫害识别从定性判断向定量诊断的跨越式发展，相关研究成果如表 3 所示。病虫害监测技术发展呈现三大趋势：多源数据融合；边缘智能计算；早期预警突破。

(3)土壤养分监测

土壤养分监测是实现现代农业精准化、可持续化发展的核心技术，目前可通过实验室化学分析、便携式快速监测(近红外光谱等)、物联网传感网络等方法实现土壤氮、碳含量以及含水率等指标的监测[47-50]。测土配方施肥在促进粮食增产、农户增收、提升和保护耕地质量、治理农田面源污染减轻农业生产对环境的压力方面具有明显优势，并与土壤养分监测形成“诊断-决策-实施”的闭环体系。针对在测土配方施肥取样困难、效率低、信息化程度不高等问题，石河子大学研发了集土壤样本采集点自动布局、实时路径规划、自动采样、工作状态监测、土壤信息上传与管理于一体的车载式土壤采样器及信息管理平台(图 3)[51]，在提高采样效率的同时，根据土壤样本检测结果自动生成棉田土壤处方图，从而为科学施肥、地力提升及生态环境保护提供数据驱动的决策依据。

表 3 棉花病虫害监测技术及特点

Tab. 3 Cotton disease and pest monitoring technology and characteristics

监测方式	原理	技术方法	优势	不足	应用场景	文献序号
地面传感监测	田间部署监测装置，获取病虫害图像，建立预测模型	光谱、图像、深度学习等方法，结合物联网和数据分析平台	实时连续监测，支持环境风险预警，自动化程度高	部署复杂，监测范围有限	设施农业环境调控、病害高发区	[38－41]
航空监测	通过无人机搭载高分辨率相机等，捕捉病虫害导致的冠层异常	无人机成像高光谱、Logistic 回归模型、图像识别算法等	灵活高效，分辨率高，可定位病害区域	续航短，数据处理复杂，阴雨天气受限	精准施药指导、局部虫害爆发监测	[42－44]
卫星监测	利用病害虫导致的植物叶片敏感特征（光谱、遥感因子等）	遥感监测技术、机器学习、平行六面体监督分类方法等	非接触式监测，覆盖范围广，可早期发现隐性病害	受环境干扰（如云层、光照）	大田病虫害分布制图、早期预警	[45－46]



图 3 车载式土壤采样器及信息管理平台

Fig. 3 Vehicle-mounted soil sampler and information management platform

3.1.3 棉花植保作业装备

在全球农业绿色转型背景下，棉花植保技术正经历从粗放式施药向精准化防控的范式转变，在棉花植保技术革新进程中，植保装备的智能化升级成为突破传统作业瓶颈的关键驱动力。孙元义[52]设计了一套基于机器视觉的棉田农药喷洒系统，实现了自然环境下棉株特征识别，并且根据垄的走势获得植保机械自主行走的导航控制信息。使用无人机飞防技术可以减少防治成本，提高农药使用效率，防治效果优于传统植保技术，全天候无人机喷洒药物是传统人工喷洒面积的 30 倍，可节约 30% 纯农药使用量，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，与传统的植保机械相比，无人机有其独特的优势[53]。

随着科学技术的发展，无人机、物联网、深度学习等技术及平台在植物病虫害监测与预警中发挥着越来越重要的作用[54－55]。基于物联网技术的病虫害预测应用和基于高光谱、图像处理的病虫害诊断[56－58]等促进了病虫害预测的发展。智慧植保通过融合无人机集群、高光谱遥感与人工智能决策系统，构建“智能感知-动态调控-精准执行”的技术体系，将植保作业从经验判断升级为数据驱动，从全域喷洒转向靶向施治。

3.1.4 棉花水肥一体化

在农业资源约束与生态保护的双重压力下，棉花水肥管理正从粗放经验模式向数据驱动的精准调控体系转变。通过融合物联网传感网络、智能决策算法与自主执行装备，逐步构建起“数据采集-模型决策-变量执行”的闭环管理系统，相关研究成果如表 4 所示。以作物需求为核心，依托土壤墒情实时监测、生长模型动态修正与变量灌溉控制，实现水肥配比从经验判断到科学调控的根本转变，推动水肥利用率提升、节水节肥。面向未来发展，数字孪生、强化学习与高分辨率遥感技术的集成应用将推动系统向“毫米级感知-克级调控”的精准靶向模式升

表 4 棉花水肥一体化技术对比

Tab. 4 Comparison of cotton water and fertilizer integration technology

水肥一体化系统类型	核心技术	功能特点	文献序号
施肥管理决策系统	JSP（Java server pages）技术	棉田信息管理、智能化施肥决策、数据信息管理	[59]
视觉感应式水肥一体机	超像素图像分割技术、模糊聚类算法、土壤 EC/pH 预测模型	生长信息监测、数据远程传输与分析，实现节水	[60]
PID（Proportion integration differentiation）闭环施肥控制系统	PID 控制算法、云端远程监控技术	对施肥管道流量监测，调节电机转速，施肥数据的收集、整理及保存，提高施肥精度	[61]

级。然而，系统复杂性带来的高成本仍是制约大规模推广的核心瓶颈。同时，农田环境的多维异质性与气候土壤的动态变化对智能算法的自适应能力提出更高要求，需通过优化控制策略和算法架构构建更具弹性的决策系统。

3.2　数字化测产采收

数字化测产采收作为数字棉花技术体系的核心环节，通过遥感监测、无人机航测、物联网感知与大数据建模等技术手段，构建起覆盖产量预测、采收优化与质量监控的智能决策系统。通过精准测产指导采收调度、优化资源配置，为后续加工分类与质量追溯奠定数据基础，推动棉花产业形成“以产定采-因质优工-全程可控”的智慧化生产范式，数字化测产采收技术路线如图 4 所示。

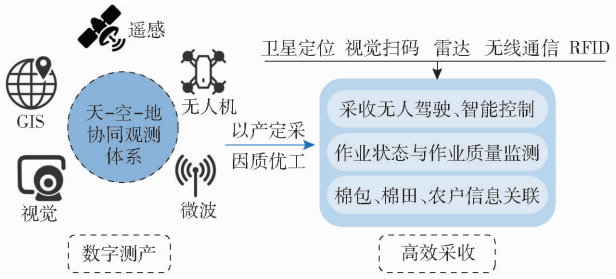


图 4　数字化测产采收技术路线图

Fig. 4　Technology roadmap for digital yield measurement and harvesting

3.2.1　数字化测产

目前，在数字化测产技术领域，国内外学者通过多源遥感与智能感知技术的深度融合，持续推动棉花产量监测体系的创新发展。卫星图像因能够获取大范围的时空数据而成为应用最广泛的遥感数据之一，通过利用多光谱或高光谱遥感影像，分析棉田长势，预测产量，无人机通过搭载光谱相机等设备，以低成本、高灵活性、高图像分辨率等优点进行棉花产量预测，在采棉机上安装质量流量等传感器实现棉花采收过程中产量的实时监测，相关研究成果如表 5 所示。当前技术正从单点突破向“天-空-地”协同观测体系跨越。未来，棉花测产将围绕精准化、智能化方向展开，通过大数据等技术将棉花产量与土壤、气象、品种、田间管理等数据结合起来，为棉花产业构建“以产定采、因质优工”的智慧化生产范式奠定数据基础，推动资源利用效率与全产业链价值协同提升。

表 5　棉花数字化测产技术类型与特点

Tab. 5　Types and characteristics of cotton digital yield measurement technology

技术类型	原理	技术手段	优势	缺点	应用场景	文献序号
卫星遥感测产	获取卫星遥感数据，建立棉花产量与棉花叶片指数等植株信息的估产模型	卫星遥感影像分析、时间序列分析等	覆盖范围广，适合大区域监测	空间分辨率有限，受云层干扰	规模化棉田、区域产量预测	[62-66]
无人机测产	通过低空高分辨率影像（厘米级）捕捉冠层结构，根据模型反演产量	脱叶期棉铃分层识别，多光谱与可见光图像分析等	分辨率高，灵活适应田间规模	续航短，数据处理复杂，天气影响飞行	精准分层测产、局部产量异质性分析	[67-69]
在线产量监测	通过在采棉机安装质量流量等智能传感设备，结合相关算法实时计算产量	近红外光无线传感器、光电传感器、微波发射-反射信号混合分析等	采收过程产量实时监测	依赖高精度信号处理设备，成本较高，定期校准	安装在大型采棉机上实时监测产量	[70-74]

3.2.2　棉花高效采收

目前，以新疆天鹅、江苏沃得、钵施然等为代表的企业相继研发了国产厢式和打包式采棉机，我国棉花机采率达到 88% 以上，约有 7 000 台采棉机作业于新疆棉区，其中自主研发的国产采棉机占比超过 50%[75]。在棉花高效采收技术领域，国内外研究团队围绕智能监测与精准调控展开深度创新。为解决传统人工操作采棉机劳动强度大、效率低等问题，何创新等[76]提出了一种基于平行轨迹导航的采棉机自动对行控制方法，实现棉花采收自动对行平均绝对横向偏差为 2.91 cm。在采棉机故障监测方面，苗中华等[77]开发了基于 CAN 总线的嵌入式虚拟仪器智能监控系统，实现对多个 CAN 节点的数据通信，完成采棉机的工作状态在线监测与故障报警。张若宇等[78]研发了集设备状态监测、应急报警、作业面积统计、远程通信等功能于一体的采棉机监控终端（图 5），通过动态检测采棉机采收过程中棉花物料回潮与含杂，实现采收作业中棉花水杂的实时监测与超标预警，同时，采用视觉扫码与 RFID 技术实时获取棉模标识码信息，建立棉模、棉农、地块、地理坐标等信息的关联，实现采收过程信息融合与可追溯，促进采收作业的科学监管。

当前棉花高效采收技术发展呈现三大趋势：多源感知融合；数字孪生技术应用；跨环节数据链闭环。随着 5G 通信与自主导航技术的深度集成，采棉机正从单机智能化向集群协同化演进，推动采收作业向“无人值守、按需调控、质效双优”的智慧模式加速转型。



(a) 棉花采收作业监管系统界面 (b) RFID传感器 (c) 采棉机作业监管 (d) 采棉机作业统计分析

图 5 棉花采收作业监管系统

Fig. 5 Supervision system for cotton harvesting operations

3.3 数字化收购加工

棉花数字化收购加工构建了棉花产后环节的智能管控体系,通过机器视觉、物联网与智能算法的深度耦合,实现从籽棉检验、加工调控到质量追溯的数字化重塑,不仅提升了加工环节的标准化水平,更通过数据驱动的决策优化实现资源精准配置,为棉花产业构建“优质优价”市场机制提供核心技术支撑,数字化收购加工流程如图 6 所示,技术路线如图 7 所示。

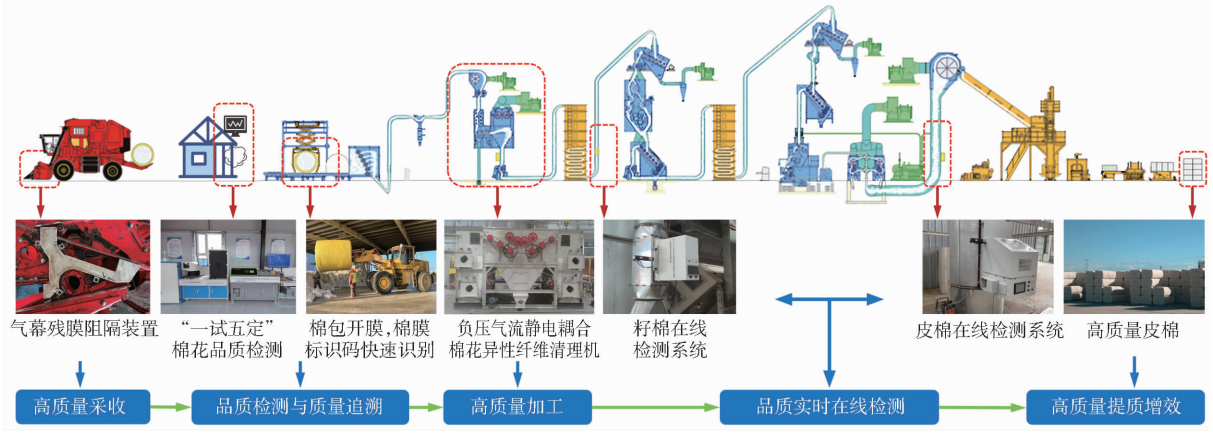


图 6 棉花数字化收购加工流程图

Fig. 6 Digital acquisition and processing of cotton

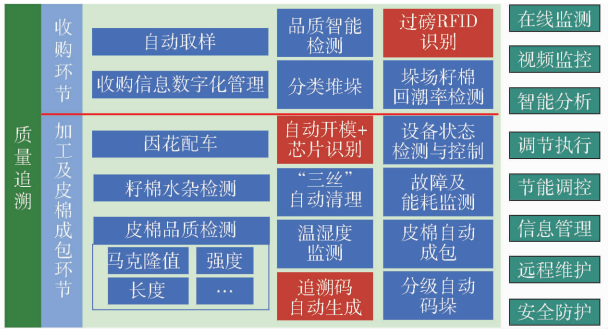


图 7 数字化收购加工技术路线图

Fig. 7 Technology roadmap for digital acquisition and processing

3.3.1 棉花品质快速检验

针对籽棉收购过程中含杂率检测工序繁杂、劳动强度大、效率低,不利于籽棉的快速检测分级,严重影响籽棉收购效率,万龙等[79]开发了一种适于收购环节的机采籽棉含杂率快速检测系统,对去除较大杂质后的籽棉称量并进行图像分析,预测去除大杂的籽棉含杂率和小杂质量,最后结合计算的大杂质量预测籽棉样本总含杂率,实现检测平均绝对误差为 0.36%。LI 等[80]提出了一种基于机器视觉的机采籽棉颜色检测算法,通过多通道融合的二次动态阈值分割算法,将图像杂质和凹坑阴影像素有效分割,消除了杂质与凹坑阴影对颜色检测的影响,实现机采籽棉颜色级检测。文献[81]发明了一种棉纤维长度检测装置及应用方法,结合“视觉光学 + 机器学习”策略,实现棉纤维长度的检测,并集成籽棉水杂快速检测等设备,研发籽棉“一试五定”快速检测系统(图 8)[82],单个样本品质检测时间由 20 ~ 30 min 缩短至 5 min 以内,实现棉花回潮率、含杂率、颜色级、长度、衣分率和马克隆值的一体化快速检测。检测结果可自动上传至籽棉数字化收购系统、棉花高质量生产流通监管平台及棉花质量追溯平台(图 9),提升籽棉收购数字化水平,推动棉花公平交易。

3.3.2 棉花数字化加工

我国的棉花加工技术经过 4 次大的飞跃,目前已经进入规模化、信息化、数字化时代,棉花加工实现从棉包自动开包喂花到生产线产量自动匹配,从设备运行状态的自动监测到设备自动联锁控制,从自动打包、捆扎到生产线的自动码包,全部实现自动

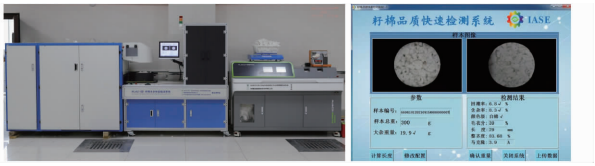


图 8　籽棉品质快速检测系统

Fig. 8　Seed cotton quality rapid detection system

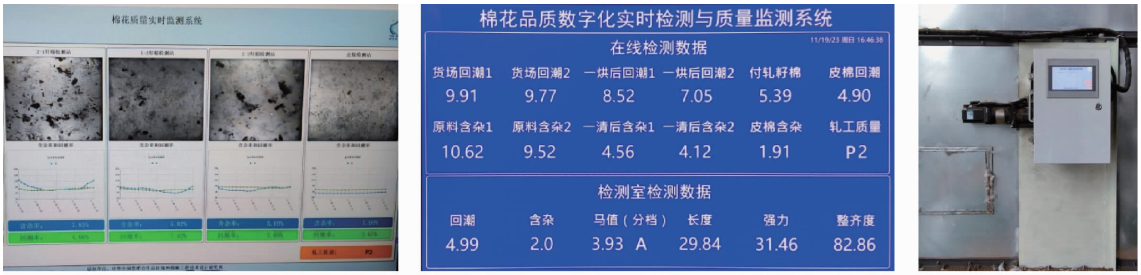


图 9　棉花高质量收购监管平台

Fig. 9　Regulatory platform for high-quality cotton acquisition

化控制，天鹅股份公司自主研制全新的 60 包/h 机采棉生产线，并在新疆示范推广应用。然而，当前加工环节仍面临数字化渗透不足、棉花品质实时监测体系缺失、工艺调控依赖人工经验、综合生产效率待优化等瓶颈，制约产业向高品质与智慧化方向升级[83-84]。

针对上述挑战，在棉花品质检测领域，石河子大学研发收购环节籽棉品质“一试五定”快速检测系统，有效突破棉纤维长度等指标检测技术瓶颈，科学指导棉花分类堆垛、因花配车、分类加工。同时，针对我国机采棉高回潮率与高含杂率的特点，不同加工环节对棉花物理特性的要求不同，为了实现棉花加工过程中对工艺的调控，石河子大学及中华全国供销合作总社郑州棉麻工程技术设计研究所研发了棉花在线取样与在线检测装置（图 10），实现加工过程中皮棉回潮率、含杂率、长度等重要品质指标实时监测，从而为棉花加工工艺的调控提供数据支撑，实现皮棉质量反馈控制指导生产[85-86]。



(a) 品质在线检测平台界面　　(b) 品质在线检测指标　　(c) 在线检测装置

图 10　棉花品质在线实时检测

Fig. 10　On-line real-time detection of cotton quality

轧花自动控制是棉花加工过程自动化的重要环节，对棉花加工质量、产量等有重要影响，董全成等[87]根据轧花机设计了自适应模糊免疫 PID 控制系统来控制喂花辊的转速，通过实时修正 PID 参数来保持控制系统的稳定，在回潮率、籽棉等级等因素发生变化时，调节喂花辊转速，来实时控制喂花量，以保持合适的籽棉卷密度，达到轧花自动控制的目的。为实现棉花的精细化加工，张成梁[88]围绕回潮率在线检测及控制、杂质自动识别分类、加工设备对棉花性状参数的影响规律、重点设备数控化设计及工艺智能优化等关键技术进行了研究，提出了棉花加工过程中工艺参数自适应优化策略，确定各设备的工艺参数，实现“因花配车”。郭春丽[89]则将数字孪生技术应用到棉花加工生产，构建数字孪生虚拟实体，实现对加工参数的监控与远程调控。石河子大学开发的棉花数字加工信息化平台（图 11）实现了对棉花加工能耗、产量、品质的实时监测与统计分析，并进行可视化展示。



图 11　棉花数字加工信息化平台

Fig. 11　Cotton digital processing information platform

3.4　数字化公证检验

经过棉花加工后的皮棉棉包在外包装双侧缝制可追溯条形码标签，统一转运至指定监管仓库实施重量核验与抽样质检。经规范取样的棉样进入国家棉花公证检验体系，开展棉纤维质量仪器化检验，为国家棉花产业宏观调控提供精准数据支撑[90]。基于公证检验报告构建的质量数据库，纺织企业可实现多维度的优化升级：①精准甄选优质棉花，依据检测指标建立原料分级管理体系。②通过数据分析建立纺纱配棉模型，科学配比不同批次原棉特性，实现纤维资源高效利用、成纱品质提升以及生产成本降低[91]。③深度解析公证检验大数据，精准预判不同品质等级原棉的供需波动，赋能企业建立智能化的

采购决策系统与弹性生产机制，全面提升棉纺供应链协同效能。目前，我国棉花公证检验仪器主要使用大容量棉花纤维测试仪（High volume instrument，HVI），如图 12 所示，HVI 能够全面反映棉花纤维的质量特性，其检测结果具有高度的准确性和可重复性，测试结果在全球范围内被广泛认可，为棉花分级、纺织企业配棉和质量控制提供重要依据。其采用光电检测等技术，实现棉纤维长度、马克隆值、颜色级、整齐度指数、杂质粒数、杂质面积等纤维指标的数字化检测，检测结果实时上传中国纤维质量监测中心。近年来，国产棉花综合性能测试仪也相继装备棉花检验实验室[92]。随着强制性国家标准 GB 1103.1—2023《棉花第 1 部分：锯齿加工细绒棉》的发布与实施，棉花短纤维率指标的检测纳入公检要求[93-94]，上海康信光电仪器有限公司、陕西长岭纺织机电科技有限公司以及石河子大学研发的短纤维率检测设备相继进入公检实验室，其中石河子大学创新性地使用视觉成像技术，突破棉花短纤维视觉检测技术瓶颈，实现棉花短纤维率的快速、准确、自动化检测[95-96]。



（a）大容量棉花纤维测试仪 （b）短纤维率快速测试仪

图 12 棉花品质检测仪器

Fig. 12 Cotton quality testing instrument

3.5 数字化仓储物流

棉花仓储物流作为连接棉花生产和消费的中间环节，对整个棉花产业链的发展具有重要意义。数字化仓储物流包含了日常运营的出入库、订单挑选等业务，与产业链的其他环节信息进行对接整合，如何挖掘出仓储相关大数据的价值，成为整个仓储物流行业目前最为关心的问题。数字化仓储物流研究框架如图 13 所示。

针对目前棉花生产销售中存在的供求信息不透明以及棉花供销商分散化，结合对实际现状的研究分析，北京智棉科技有限公司[97]开发的仓储物流监管系统通过应用现代互联网、RFID、系统日志抓取等技术，实现仓储物流环节库存的精细化分类存放、库内棉包二次组批、仓库信息化管理、智能巡检盘库，与纺织企业数据对接。为了提高进出口棉包检验工作的高效性、可靠性和维护简便性，赵洁等[98]研制了基于 EtherCAT 的分布式棉包检验管理系统，实现了进出口棉花和国棉入库、出库中的称量、抽样

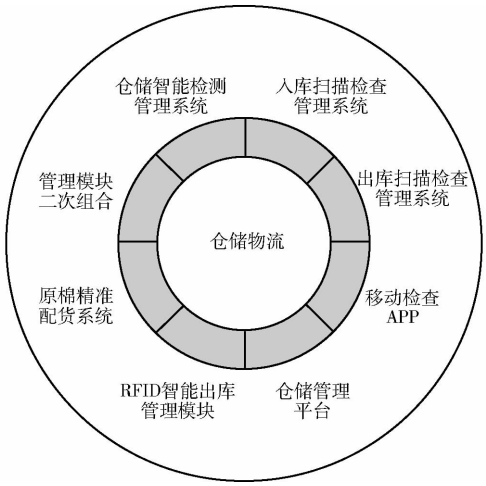


图 13 数字化仓储流通研究框架

Fig. 13 Research framework for digital warehousing and circulation

和打标等连续工艺的自动化过程。

3.6 棉花生产全流程质量追溯

为促进棉花产业高质量发展，新疆维吾尔自治区与兵团积极探索并开展了棉花质量追溯补贴工作，运用数字化手段实现籽棉生产者信息与皮棉质量信息的相互对应，将补贴直接发放至优质棉生产者以实现“优质优补”，提升棉花质量[99-101]。

针对棉花采收、收购、加工环节信息链尚未打通，棉花质量信息无法准确追溯到农户地块等问题，文献[102]提出了一种棉花质量追溯方法并研发了质量追溯系统（图 14），突破棉花产后各环节信息精准匹配、数据库平台建设、多源异构数据融合、数据交换共享及数据安全等关键技术，打破棉花采收、收购、加工等各环节信息孤岛，研发了采棉机采收环节信息监测、籽棉品质快速检测、收购信息采集、棉模标识码快速识别与自动开模、皮棉品质在线检测与追溯码生成等关键技术装备和系统，并开展从采收

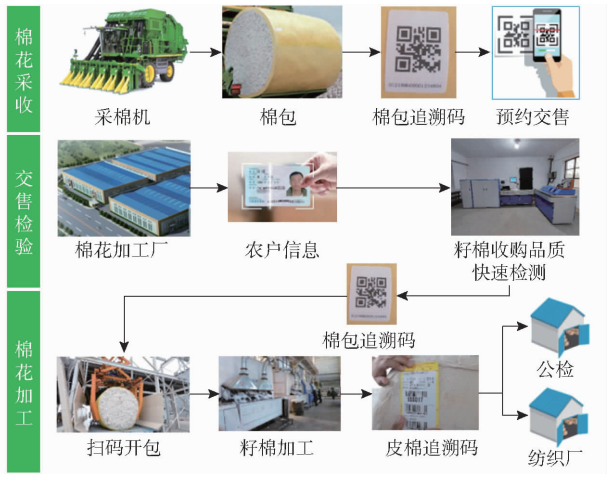


图 14 棉花质量追溯系统主要环节流程图

Fig. 14 Flowchart of main links of cotton quality traceability system

监测、预约交售、收购检验、开包扫码和加工成包等环节棉花质量追溯关键技术装备的示范应用，为实现“皮棉-籽棉-农户”的精准对应以及棉花质量差异化补贴政策的顺利实施提供了有效技术保障。

4　总结与展望

4.1　总结

数字棉花技术与装备在近年来取得了显著的发展，对棉花产业的现代化转型起到了关键的推动作用。

在技术层面，遥感、物联网、大数据和人工智能等数字技术在棉花种植、生长监测、病虫害防治等环节得到广泛应用。遥感技术能够实现大面积棉花种植区域的快速监测，通过获取棉花的种植面积、生长状况等信息，为宏观决策提供数据支持。物联网通过部署在田间的各类传感器，实时采集棉花生长环境的温湿度、土壤湿度、光照强度等数据，实现精准化种植管理。大数据和人工智能技术则可对海量的棉花生长数据进行分析挖掘，构建生长模型，预测棉花的产量和品质，为种植决策提供科学依据。

在装备方面，自动化的棉花种植机械、采收机械、检测仪器以及加工装备不断涌现。播种机可根据预设的参数实现精准播种，提高播种效率和质量；植保无人机能够精准喷洒农药，降低劳动强度和农药使用量；采棉机高效采收大幅提高了采摘效率，降低了人工采摘成本；棉花品质检测仪器的研发应用，为推动棉花的公平化交易、促进“优棉优价”，提供了科学化、标准化手段。同时，在棉花加工环节，数字化的加工装备能够实现对棉花质量的在线监测和控制，提高加工的效率与质量稳定性。棉花质量追溯系统的应用，打破了棉花生产各个环节的信息壁垒，实现了棉花信息的精准溯源。

数字棉花技术与装备的应用，有效提高了棉花产业的生产效率、降低了生产成本、提升了产品质量，增强了棉花产业的竞争力。但目前也存在一些问题，如数字技术在棉花产业的应用深度和广度仍有待提高，部分地区的数字化基础设施建设相对滞后，不同数字技术和装备之间的兼容性和协同性不足，专业的数字棉花技术人才短缺等。

4.2　展望

（1）生产流程的全链条优化

数字棉花将以数据为驱动，深度融合物联网、AI、区块链和生物技术，从种植到流通实现全链条数字化闭环，在实现棉花全流程质量追溯的基础上，利用大数据等技术深度融合挖掘各环节数据信息，从全链发展视角为棉花从业者提供更加科学、合理的管理决策。同时，优化生产过程，探寻棉花产业的循环经济模式，提升棉花全链条协同效率与综合效益，实现棉花产业的绿色、可持续发展。

（2）数字技术融合创新

数字棉花技术将朝着更加深度融合的方向发展。用人工智能技术为棉花生产赋能，基于遥感、物联网、土壤环境等数据，快速构建棉花品种选育、长势预测、病虫害防治、品质预测等大模型。同时，依托 5G 等新一代技术的发展，研发高集成度的智能装备，推动无人农场建设，实现全过程自动化与智能化管理。

（3）数据平台建设

加强数字棉花领域的数据共享平台建设，整合政府、科研机构、企业等各方的数据资源，打破数据壁垒。以数据全生命周期管理为核心，通过构建统一的数据标准和规范，提高数据的质量和可用性，加强数据资源共享，为数字棉花技术的创新和应用以及智能化发展提供丰富的数据支撑。

（4）数字棉花标准体系建设

标准体系建设是推进数字棉花体系发展的重要保障。随着科技的进步，智能化和数据驱动的标准体系建设将成为趋势，发挥关键技术标准在产业协同、技术协作中的纽带和驱动作用，不断健全棉花标准体系，着力研究关键环节、关键领域、关键产品的标准，发挥标准在保障棉花供给安全、产业稳定和促进产业链上中下游配套协作的重要作用，推动棉花生产的标准化与规模化。

（5）数字人才培养

加大对数字棉花专业人才的培养力度，培养既懂棉花生产又掌握数字技术的复合型人才，推动产学研合作，加速数字棉花技术的研发和推广。

参　考　文　献

[1]　吴传云，冯健，陈传强，等. 我国棉花产业现状与机械化发展情况分析[J]. 中国农机化学报，2021，42(5)：215－221.
WU Chuanyun, FENG Jian, CHEN Chuanqiang, et al. Analysis of the status quo and mechanization development of cotton-producing industry in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(5): 215－221. (in Chinese)

[2]　黄立祥. 中国棉花进口贸易结构研究[D]. 呼和浩特：内蒙古财经大学，2022.
HUANG Lixiang. Study on China's cotton import trade structure[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Finance and Economics, 2022. (in Chinese)

[3]　刘文静，范永胜，董彦琪，等. 我国棉花生产现状分析及建议[J]. 中国种业，2022(1)：21－25.

LIU Wenjing, FAN Yongsheng, DONG Yanqi, et al. Analysis and suggestions on the current situation of cotton production in China[J]. China Seed Industry, 2022(1):21 - 25. (in Chinese)
[4] 崔建玲. 棉花生产全程机械化亟待提档升级[N]. 农民日报,2022 - 11 - 29(007).
[5] 徐爱武. 近十年我国棉花生产量与消费量分析及建议[J]. 棉花科学,2022,44(4):61 - 64.
XU Aiwu. Analysis and suggestion of cotton production and consumption in China in recent ten years[J]. Cotton Sciences, 2022, 44(4):61 - 64. (in Chinese)
[6] 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)
[7] 武建设,陈学庚. 新疆兵团棉花生产机械化发展现状问题及对策[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 5 - 10.
WU Jianshe, CHEN Xuegeng. Present situation, problems and countermeasures of cotton production mechanization development in Xinjiang Production and Construction Corps[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 5 - 10. (in Chinese)
[8] 胡晓棠,李明思,马富裕. 膜下滴灌棉花的土壤干旱诊断指标与灌水决策[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 49 - 52,11.
HU Xiaotang, LI Mingsi, MA Fuyu. Drought diagnosis indexes and drip irragation decision making for cotton under mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2002,18(1): 49 - 52,11. (in Chinese)
[9] 喻树迅,周亚立,何磊. 新疆兵团棉花生产机械化的发展现状及前景[J]. 中国棉花,2015,42(8):1 - 4,7.
YU Shuxun, ZHOU Yali, HE Lei. Development of mechanization of cotton production in the Xinjiang Production and Construction Corps[J]. China Cotton, 2015,42(8):1 - 4,7. (in Chinese)
[10] 王军,李久生,关红杰. 北疆膜下滴灌棉花产量及水分生产率对灌水量响应的模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 62 - 68.
WANG Jun, LI Jiusheng, GUAN Hongjie. Modeling response of cotton yield and water productivity to irrigation amount under mulched drip irrigation in North Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 62 - 68. (in Chinese)
[11] 徐飞鹏,李云开,任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考[J]. 农业工程学报,2003,19(1):25 - 27.
XU Feipeng, LI Yunkai, REN Shumei. Investigation and discussion of drip irrigation under mulch in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(1):25 - 27. (in Chinese)
[12] 陈学庚,卢勇涛. 气吸滚筒式棉花精量穴播器排种性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 35 - 38.
CHEN Xuegeng, LU Yongtao. Sowing-performance of air-suction cylindrical cotton precision dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 35 - 38. (in Chinese)
[13] 吕新,梁斌,张立福,等. 新疆生产建设兵团棉花生产大数据平台建设与探索[J]. 农业大数据学报,2020,2(1):70 - 78.
LÜ Xin, LIANG Bin, ZHANG Lifu, et al. Construction of an agricultural big data platform for XPCC cotton production[J]. Journal of Agricultural Big Data, 2020,2(1):70 - 78. (in Chinese)
[14] 胡艳萍,张立祯,孙帅,等. 新疆数字棉花技术 + 收入保险新模式及应用前景分析[J]. 中国棉花,2023,50(10):28 - 34.
HU Yanping, ZHANG Lizhen, SUN Shuai, et al. Application prospect of digital cotton technology and income insurance in Xinjiang[J]. China Cotton, 2023,50(10):28 - 34. (in Chinese)
[15] 谢慧变. 数字化赋能新疆棉花提质增效[N]. 新疆日报(汉),2022 - 02 - 08(006).
[16] 史增录,王美静,张学军,等. 折叠式棉花宽幅铺膜精量播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 53 - 62.
SHI Zenglu,WANG Meijing, ZHANG Xuejun, et al. Design and test of folding cotton wide film spreading precision seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 53 - 62. (in Chinese)
[17] 苑严伟,白圣贺,牛康,等. 棉花种植机械化关键技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 1 - 11.
YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress in the key technologies and equipment for cotton planting mechanization[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(6): 1 - 11. (in Chinese)
[18] 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), 2018, 36(4):397 - 404. (in Chinese)
[19] 陈焕轩,韩迎春,冯璐,等. 智慧农业在棉花生产管理中的应用[J]. 棉花学报,2020,32(3):269 - 278.
CHEN Huanxuan, HAN Yingchun, FENG Lu, et al. Application of smart agriculture in cotton production management[J]. Cotton Science, 2020,32(3):269 - 278. (in Chinese)
[20] WANG M, NIU C, WANG Z, et al. Study on path planning in cotton fields based on prior navigation information[J]. Agriculture, 2024, 14(11): 2067.
[21] 李笑,李宏鹏,牛东岭,等. 基于全球导航卫星系统的智能化精细平地系统优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 48 - 55.
LI Xiao, LI Hongpeng, NIU Dongling, et al. Optimization of GNSS-controlled land leveling system and related experiments [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 48 - 55. (in Chinese)
[22] 宋德平,王成,孙冬霞,等. 基于北斗导航的智能棉花播种机设计与试验[J]. 智能化农业装备学报,2021,2(1):44 - 50,63.

SONG Deping, WANG Cheng, SUN Dongxia, et al. Design and test of intelligent cotton planter based on Beidou navigation [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2021, 2(1): 44 – 50, 63. (in Chinese)

[23] 李景彬,陈兵旗,刘阳. 棉花铺膜播种机导航路线图像检测方法[J]. 农业机械学报,2014,45(1):40 – 45.
LI Jingbin, CHEN Bingqi, LIU Yang. Image detection method of navigation route of cotton plastic film mulch planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 40 – 45. (in Chinese)

[24] 张学军,张海涛,史增录,等. 棉花精量穴播器取种状态监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 9 – 19.
ZHANG Xuejun, ZHANG Haitao, SHI Zenglu, et al. Design and experiments of seed pickup status monitoring system for cotton precision dibblers[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(5): 9 – 19. (in Chinese)

[25] 周利明,季雨希,牛康,等. 基于电容法的齿盘式棉花穴播器播种量传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 1): 177 – 185.
ZHOU Liming, JI Yuxi, NIU Kang, et al. Design and experiment of seeding quantity sensor for cotton hill-drop planters based on capacitive method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 177 – 185. (in Chinese)

[26] 曹叶. 基于机器视觉的穴播器排种性能检测系统的设计[D]. 塔里木:塔里木大学,2021.
CAO Ye. Design of a detection system for the seed-metering performance of a seeder based on machine vision[D]. Tarim: Tarim University, 2021. (in Chinese)

[27] 王鹏新,田惠仁,张悦,等. 基于深度学习的作物长势监测和产量估测研究进展[J]. 农业机械学报,2022,53(2):1 – 14.
WANG Pengxin, TIAN Huiren, ZHANG Yue, et al. Crop growth monitoring and yield estimation based on deep learning: state of the art and beyond[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 1 – 14. (in Chinese)

[28] WANG S, CHAI Y, SA H, et al. Sunflower-like self-sustainable plant-wearable sensing probe[J]. Science Advances, 2024, 10(49): eads1136.

[29] 刘立波,程晓龙,戴建国,等. 基于逻辑回归算法的复杂背景棉田冠层图像自适应阈值分割[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 201 – 208.
LIU Libo, CHENG Xiaolong, DAI Jianguo, et al. Daptive threshold segmentation for cotton canopy image in complex background based on logistic regression algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 201 – 208. (in Chinese)

[30] 陈文岭,靳孟贵,刘延锋,等. 微根管法监测膜下滴灌棉花根系生长动态[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 87 – 93.
CHEN Wenling, JIN Menggui, LIU Yanfeng, et al. Monitoring cotton root growth dynamics under mulched drip irrigation using monirhizotron technique[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(2): 87 – 93. (in Chinese)

[31] QIN S, DINGY, ZHOU Z, et al. Study on the nitrogen content estimation model of cotton leaves based on "image-spectrum-fluorescence" data fusion[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1117277.

[32] 张智韬,边江,韩文霆,等. 无人机热红外图像计算冠层温度特征数诊断棉花水分胁迫[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 77 – 84.
ZHANG Zhitao, BIAN Jiang, HAN Wenting, et al. Cotton moisture stress diagnosis based on canopy temperature characteristics calculated from UAV thermal infrared image[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(15): 77 – 84. (in Chinese)

[33] MA Y, ZHANG Q, YI X, et al. Estimation of cotton leaf area index(LAI) based on spectral transformation and vegetation index[J]. Remote Sensing, 2021, 14(1): 136.

[34] CHEN X, WEN S, ZHANG L, et al. A calculation method for cotton phenotypic traits based on unmanned aerial vehicle LiDAR combined with a three-dimensional deep neural network[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 230: 109857.

[35] SONG C. UAV-based multispectral inversion of integrated cotton growth[J]. Agronomy, 2024, 14(12): 2903.

[36] 廖楚江,王长耀,李红,等. 基于地质统计学影像纹理的石河子地区化控期棉花长势监测[J]. 农业工程学报,2006,22(8):135 – 139,274.
LIAO Chujiang, WANG Changyao, LI Hong, et al. Cotton growth monitoring during chemical control stage using geostatistical image texture: a case study of Shihezi[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 135 – 139, 274. (in Chinese)

[37] WANG H, YAO Q, ZHANG Z, et al. Comprehensive growth monitoring index using Sentinel – 2A data for large-scale cotton production[J]. Field Crops Research, 2024, 317: 109525.

[38] 孙俊,贾忆琳,吴兆祺,等. 基于改进 YOLOv7 的棉田虫害检测[J]. 农业工程学报, 2024, 40(10): 176 – 184.
SUN Jun, JIA Yilin, WU Zhaoqi, et al. Detecting pests in cotton fields using improved YOLOv7[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(10): 176 – 184. (in Chinese)

[39] MARTIN D E, LATHEEF M A. Remote sensing evaluation of two-spotted spider mite damage on greenhouse cotton[J]. Journal of Visualized Experiments: JoVE, 2017, 122: 54314.

[40] 翟治芬,徐哲,周新群,等. 基于朴素贝叶斯分类器的棉花盲椿象危害等级识别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 204 – 211.
ZHAI Zhifen, XU Zhe, ZHOU Xinqun, et al. Recognition of hazard grade for cotton blind stinkbug based on Naive Bayesian classifier[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 204 – 211. (in Chinese)

[41] ZHANG Y, MA B, HU Y, et al. Accurate cotton diseases and pests detection in complex background based on an improved

YOLOX model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 203: 107484.

[42] 宋勇,陈兵,王琼,等. 基于无人机多光谱影像的病害棉田产量损失估算[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 175 - 183.
SONG Yong, CHEN Bing, WANG Qiong, et al. Estimation of yield loss in diseased cotton fields using UAV multi-spectral images[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 175 - 183. (in Chinese)

[43] HUANG H, DENG J, LAN Y,et al. A two-stage classification approach for the detection of spider mite- infested cotton using UAV multispectral imagery[J]. Remote Sensing Letters, 2018, 9(10 - 12):933 - 941.

[44] WANG C, CHEN Y, XIAO Z, et al. Cotton blight identification with ground framed canopy photo-assisted multispectral UAV images[J]. Agronomy, 2023, 13(5): 1222.

[45] 竞霞,黄文江,琚存勇,等.基于 PLS 算法的棉花黄萎病高空间分辨率遥感监测[J].农业工程学报,2010,26(8):229 - 235.
JING Xia, HUANG Wenjiang, JU Cunyong, et al. Remote sensing monitoring severity level of cotton verticillium wilt based on partial least squares regressive analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 229 - 235. (in Chinese)

[46] 陈兵,王克如,李少昆,等.棉花黄萎病疑似病田的卫星遥感监测——以 TM 卫星影像为例[J].作物学报,2012,38(1): 129 - 139.
CHEN Bing, WANG Keru, LI Shaokun, et al. Monitoring cotton field with suspected verticillium wilt using satellite remote sensing with TM satellite image as an example[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(1): 129 - 139. (in Chinese)

[47] 王星明,杨玮,李民赞,等.集成 3S,ZigBee 和射频识别的土壤采样远程智能管理系统[J].农业工程学报, 2017, 33(增刊): 143 - 149.
WANG Xingming, YANG Wei, LI Minzan, et al. Remote intelligent management system for soil sampling based on 3S, ZigBee and radio frequency identification[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.): 143 - 149. (in Chinese)

[48] 陈俊英,项茹,贺玉洁,等. 基于 Landsat8 与 Sentinel - 1 遥感图像融合的土壤含水率反演模型[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 208 - 219.
CHEN Junying, XIANG Ru, HE Yujie, et al. Soil moisture content inversion model based on Landsat8 and Sentinel - 1 image fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 208 - 219. (in Chinese)

[49] 唐澳华,杨贵军,杨悦,等. 基于中红外光谱特征增强和集成学习的土壤有机碳含量估算模型研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 382 - 390.
TANG Aohua, YANG Guijun, YANG Yue, et al. Estimation model of soil organic carbon content based on mid-infrared spectral characteristics enhancement and ensemble learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 382 - 390. (in Chinese)

[50] 冀荣华,李常昊,郑立华,等. 基于稀疏自注意力和可见-近红外光谱的土壤氮含量预测[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 392 - 398,409.
JI Ronghua, LI Changhao, ZHENG Lihua, et al. Prediction of soil nitrogen content based on sparse self-attention and visible-near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 392 - 398, 409. (in Chinese)

[51] 石河子大学. 车载式土壤快速采样系统及适配的土壤采样方法:CN202210652724.9[P]. 2024 - 10 - 08.

[52] 孙元义.机器视觉在棉田农药喷洒机中应用的研究[D].北京:中国农业大学,2006.
SUN Yuanyi. Research on the application of machine vision in cotton field pesticide sprayers[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)

[53] 马小艳,王志国,姜伟丽,等.无人机飞防技术现状及在我国棉田应用前景分析[J].中国棉花,2016,43(6):7 - 11.
MA Xiaoyan, WANG Zhiguo, JIANG Weili, et al. Analysis of current status and application prospects of unmanned aerial vehicle plant protection technology in cotton field in China[J]. China Cotton, 2016, 43(6): 7 - 11. (in Chinese)

[54] 戴建国,赖军臣. 基于图像规则与 Android 手机的棉花病虫害诊断系统[J].农业机械学报, 2015, 46(1): 35 - 44.
DAI Jianguo, LAI Junchen. Image-rule-based diagnostic expert system for cotton diseases and pests based on mobile terminal with Android system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 35 - 44. (in Chinese)

[55] GAO J, BO P, LAN Y, et al. Study on droplet deposition characteristic sand application of small and medium crown garden plants sprayed by UAV sprayer[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1343793.

[56] 王献锋,张传雷,张善文,等.基于自适应判别深度置信网络的棉花病虫害预测[J].农业工程学报,2018,34(14):157 - 164.
WANG Xianfeng, ZHANG Chuanlei, ZHANG Shanwen, et al. Forecasting of cotton diseases and pests based on adaptive discriminant deep belief network[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 157 - 164. (in Chinese)

[57] ZHANG Z, YANG Y, XU X, et al. GVC-YOLO: a light weight real-time detection method for cotton aphid-damaged leaves based on edge computing[J]. Remote Sensing, 2024, 16(16): 3046.

[58] AAFAR S, NADEEM A, AHSAN K, et al. IoT-based cotton plant pest detection and smart-response system[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1851.

[59] 陈砣,吕新. 基于 JSP 的棉花施肥管理决策系统的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 124 - 129.
CHEN Tuo, LÜ Xin. Design and implementation of JSP-based administrative decision system in cotton fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 124 - 129. (in Chinese)

[60] 王立环,盖立丰.高精度视觉感应技术在水肥一体机中的应用[J].农机化研究,2024,46(9):232－235.
WANG Lihuan, GAI Lifeng. Application of high precision vision induction technology in water fertilizer machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(9): 232－235. (in Chinese)
[61] 单永超,张立新,胡雪,等.棉花膜下滴灌施肥闭环控制系统设计与试验[J].农机化研究,2023,45(4):119－123.
SHAN Yongchao, ZHANG Lixin, HU Xue, et al. Design of control system of cotton submembrane precise irrigation and fertilization based on PLC[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(4): 119－123. (in Chinese)
[62] 高中灵,徐新刚,王纪华,等. 基于时间序列 NDVI 相似性分析的棉花估产[J].农业工程学报, 2012, 28(2): 148－153.
GAO Zhongling, XU Xin'gang, WANG Jihua, et al. Cotton yield estimation based on similarity analysis of time-series NDVI [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 148－153. (in Chinese)
[63] BRANDAO Z N, GREGO C R, INAMASU R Y, et al. Spectral reflectance of satellite images using geostatistics methods to estimate growth and cotton yield[C]// Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI. SPIE, 2014: 515－522.
[64] LANG P, ZHANG L, HUANG C, et al. Integrating environmental and satellite data to estimate county-level cotton yield in Xinjiang Province[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13: 1048479.
[65] PSOMIADIS E, TOUBARIDIS C, AVRAMIDOU M. Combining multispectral data from unmanned aerial system and Sentinel－2 for kiwifruit and cotton monitoring and yield assessment[C]// 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2024: 4312－4315.
[66] CHEN Y, MEI X, LIU J. Cotton growth monitoring and yield estimation based on assimilation of remote sensing data and crop growth model[C]// International Conference on Geoinformatics. IEEE, 2016.
[67] 刘祥,田敏,梁金艳.基于 RCH－UNet 的新疆密植棉花图像快速分割及产量预测[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 230－239.
LIU Xiang, TIAN Min, LIANG Jinyan. Prediction of cotton yield densely planted in Xinjiang of China using RCH－UNet model[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(7): 230－239. (in Chinese)
[68] FENG A, ZHOU J, VORIES E D, et al. Yield estimation in cotton using UAV-based multi-sensor imagery[J]. Biosystems Engineering, 2020, 193: 101－114.
[69] 徐权,郭鹏,祁佳峰,等.基于无人机影像的 SEGT 棉花估产模型构建[J].农业工程学报,2020,36(16):44－51.
XU Quan, GUO Peng, QI Jiafeng, et al. Construction of SEGT cotton yield estimation model based on UAV image[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(16): 44－51. (in Chinese)
[70] 林鑫洁,马蓉,安光辉,等.基于 CAN 总线的棉花在线测产系统设计[J].农机化研究,2013,35(4):179－182.
LIN Xinjie, MA Rong, AN Guanghui, et al. Design of CAN bus based cotton on-line yield monitoring system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(4): 179－182. (in Chinese)
[71] 王欢.基于 WSN 的采棉机产量在线监测系统设计与研究[D]. 石河子:石河子大学,2020.
WANG Huan. Design and research of an on-line yield monitoring system for cotton harvesters based on WSN[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020. (in Chinese)
[72] 林昌建,李彦明,苗中华,等.基于遗传算法和 GRNN 的棉花流量检测模型研究[J].机械与电子,2013(4):11－14,18.
LIN Changjian, LI Yanming, MIAO Zhonghua, et al. Research on model of cotton flow measuring based on genetic algorithm and GRNN[J]. Machinery & Electronics, 2013(4): 11－14, 18. (in Chinese)
[73] PHELA J J, GOODRICH D L, NELSON F W, et al. Microwave flow sensor for a harvester:China,6606571[P]. 2003－08－12.
[74] 伟利国,马若飞,周利明,等. 基于 SSA－RFR 算法的采棉机测产传感器研究[J].农业机械学报, 2023, 54(9): 154－163.
WEI Liguo, MA Ruofei, ZHOU Liming, et al. Yield sensor of cotton picker based on SSA－RFR algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 154－163. (in Chinese)
[75] 杨杰.国产采棉机大显威力将加大力度研发推广[N].中国农机化导报,2024－10－17(002).
[76] 何创新,巩蕾,苗中华,等. 基于平行轨迹导航的采棉机自动对行控制方法[J].农业机械学报, 2024, 55(6): 34－41.
HE Chuangxin, GONG Lei, MIAO Zhonghua, et al. Automatic row-follow control method for cotton picker based on parallel traiectory navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 34－41. (in Chinese)
[77] 苗中华,陆鸣超,胡晓东,等. 基于虚拟仪器技术的采棉机智能监控系统开发与应用[J].农业工程学报, 2014, 30(23): 35－42.
MIAO Zhonghua, LU Mingchao, HU Xiaodong, et al. Development and application of intelligent monitoring and controlling system of cotton-picking machine based on virtual instrument technology[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 35－42. (in Chinese)
[78] 张若宇,付宇轩,韩晨阳,等.棉花质量监管车载系统及应用方法:CN114486880A[P].2021－12－24.
[79] 万龙,庞宇杰,张若宇,等.机采籽棉收购环节含杂率快速检测系统研制[J].农业工程学报,2021,37(6):182－189.
WAN Long, PANG Yujie, ZHANG Ruoyu, et al. Rapid measurement system for the impurity rate of machine-picked seed cotton in acquisition[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(6): 182－189. (in Chinese)

[80] LI Hao, ZHAN Ruoyu, ZHOU Wanhuai, et al. Anovel method for seed cotton color measurement based on machine vision technology[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2013,215:108381.
[81] 石河子大学. 基于机器视觉的棉纤维长度检测装置及应用方法:CN202210642908.7[P]. 2022-08-09.
[82] 石河子大学. 籽棉品质快速检测系统:CN202111602368.1[P]. 2022-05-10.
[83] 胡春雷,李孝华,王瑞霞,等. 2023 年棉花加工行业产业发展报告(下)[J]. 中国棉花加工,2024(2):4-11.
HU Chunlei, LI Xiaohua, WANG Ruixia, et al. 2023 industry development report of the cotton processing industry(part 2)[J]. China Cotton Processing, 2024(2): 4-11. (in Chinese)
[84] 胡春雷,李孝华,王瑞霞,等. 2023 年棉花加工行业产业发展报告(上)[J]. 中国棉花加工,2024(1):4-18.
HU Chunlei, LI Xiaohua, WANG Ruixia, et al. 2023 industry development report of the cotton processing industry(part 1)[J]. China Cotton Processing, 2024(1): 4-18. (in Chinese)
[85] 石河子大学. 定量条件下皮棉品质在线检测系统及应用方法:CN202410023474.1[P]. 2024-04-05.
[86] WANG P, WANG H, ZHANG R, et al. Numerical simulation of an online cotton lint sampling device using coupled CFD-DEM analysis[J]. Agriculture, 2024, 14(1): 127.
[87] 董全成,冯显英. 基于自适应模糊免疫 PID 的轧花自动控制系统[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 30-37.
DONG Quancheng, FENG Xianying. Cotton-gin automation by using adaptive fuzzy immune PID controller[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 30-37. (in Chinese)
[88] 张成梁. 棉花加工过程智能化关键技术研究[D]. 济南:山东大学,2011.
ZHANG Chengliang. Research on the key technologies for the intelligentization of the cotton processing process[D]. Ji'nan: Shandong University, 2011. (in Chinese)
[89] 郭春丽. 棉花加工数字孪生系统的研究与设计[D]. 济南:山东大学,2022.
GUO Chunli. Research and design of the digital twin system for cotton processing[D]. Ji'nan: Shandong University, 2022. (in Chinese)
[90] 王娟,马辉,王永斌,等. 浅析棉花公证检验数据的应用[J]. 中国棉花,2024,51(11):47-49.
WANG Juan, MA Hui, WANG Yongbin, et al. Analysis of the application of cotton notarial inspection data[J]. China Cotton, 2024, 51(11): 47-49. (in Chinese)
[91] 刘永川. 棉花品质仪器化公检数据在纺织配棉中的应用[J]. 棉花科学,2017,39(6):38-40.
LIU Yongchuan. Application of instrumented notarized inspection data of cotton quality in textile cotton blending[J]. Cotton Sciences, 2017, 39(6): 38-40. (in Chinese)
[92] 倪玉婷. 中国创造:国产棉花综合性能测试仪替代进口[J]. 中国纤检,2013(12):2.
[93] 夏彬,付晟,王楚云. 以棉花标准 GB1103.1—2023 发布实施探讨我国棉花质量标准体系的发展[J]. 中国棉花加工,2024(5):18-21.
XIA Bin, FU Sheng, WANG Chuyun. Discussion on the development of China's cotton quality standard system with the release and implementation of cotton standard GB1103.1—2023[J]. China Cotton Processing, 2024(5): 18-21. (in Chinese)
[94] 李伟,张保国,王丹涛,等. GB1103.1—2023《棉花第 1 部分:锯齿加工细绒棉》解析[J]. 中国棉花,2024,51(8):52-59.
LI Wei, ZHANG Baoguo, WANG Dantao, et al. Analysis of GB 1103.1—2023《Cotton-Part 1: Saw ginned upland cotton》[J]. China Cotton, 2024, 51(8): 52-59. (in Chinese)
[95] 石河子大学. 一种高效的棉花短纤维率快速检测装置:CN202420700440.7[P]. 2024-10-25.
[96] 石河子大学. 一种便于棉花短纤维率检测的快速制条装置:CN202420700439.4[P]. 2024-10-25.
[97] 北京智棉科技有限公司. 仓储物流解决方案[EB/OL]. (2023-12-01)[2024-11-25]. https://www.cottech.com/jjfa/151.jhtml.
[98] 赵洁,俞方,唐敏峰,等. 基于 EtherCAT 的分布式棉包检验管理系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 207-216.
ZHAO Jie, YU Fang, TANG Minfeng, et al. Design and implementation of EtherCAT-based distributed cotton bale inspection and management system[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 207-216. (in Chinese)
[99] 张杰,王红艳. 兵团棉花质量追溯补贴:现状、问题与对策[J]. 新疆农垦经济,2024(10):20-29.
ZHANG Jie, WANG Hongyan. The current situation, problems, and countermeasures of the corps cotton quality traceability subsidy[J]. Xinjiang State Farms Economy, 2024(10): 20-29. (in Chinese)
[100] 刘晓. 浅谈兵团棉花质量追溯政策对棉花质量的影响[J]. 中国棉花加工,2024(4):20-23.
LIU Xiao. Discussion on the impact of the cotton quality traceability policy of the corps on cotton quality[J]. China Cotton Processing, 2024(4): 20-23. (in Chinese)
[101] 孙琪,吴莹. 棉花质量追溯标准体系框架搭建[J]. 标准科学, 2021(9): 93-97.
SUN Qi,WU Ying. Frame construction of the cotton quality traceability standards system[J]. Standard Science, 2021(9): 93-97. (in Chinese)
[102] 石河子大学. 一种棉花质量追溯系统及棉花质量追溯方法:CN202111600448.3[P]. 2022-04-08.