

棉花生产智慧农场标准体系研究

潘昊^{1,2} 张若宇^{1,2} 蔡凤杰^{1,2} 胡慧兵^{1,2} 李玉林^{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: 标准体系构建是实现智慧农场标准化建设的基础性工程。针对当前棉花生产智慧农场建设中存在的标准体系碎片化、标准化水平偏低、数据共享机制不完善等关键问题,在系统梳理棉花生产智慧农场标准现状及标准化需求的基础上,确立了标准体系构建的核心原则与思路。进而融合改进切克兰德方法论与霍尔三维结构模型,构建了包含层次维度、环节维度和专业维度的三维架构模型,提出了由基础通用标准、数据标准、产品标准、方法标准和管理服务标准构成的标准体系框架,实现了标准层级的纵向贯通与业务环节的横向覆盖。为验证体系科学性,本研究构建了包含4个一级指标和7个二级指标的模糊层次综合评价模型,评价结果表明该标准体系具有良好的适用性,具备显著的应用指导价值。研究成果可为我国棉花生产智慧农场标准体系建设提供理论依据。

关键词: 棉花; 智慧农场; 标准化; 标准体系

中图分类号: S24; F306.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)05-0038-11

OSID:



Standard System for Smart Cotton Production Farms

PAN Hao^{1,2} ZHANG Ruoyu^{1,2} CAI Fengjie^{1,2} HU Huibing^{1,2} LI Yulin^{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: The construction of a standard system is a fundamental project for achieving the standardization of smart farms. In response to the key issues existing in the current construction of smart farms for cotton production, such as fragmented standard systems, low levels of standardization, and incomplete data sharing mechanisms, based on a systematic review of the current status and standardization needs of smart farms for cotton production, the core principles and paths for the construction of the standard system were established. Through integrating modified Checkland methodology and Hall's three-dimensional structure model, a novel three-dimensional architecture encompassing hierarchical, procedural, and professional dimensions was proposed. The developed framework comprised five standardized clusters: fundamental and general standards, data standards, product standards, methodological standards, and management/service standards, achieving vertical integration across standard levels and horizontal coverage of operational processes. To validate system efficacy, a fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) comprehensive evaluation model incorporating four primary and seven secondary indicators was established, with evaluation results demonstrating good applicability (grade II) and significant implementation value. This research provided theoretical foundations for standard system development in China's smart cotton production.

Key words: cotton; smart farms; standardization; standard systems

0 引言

在农业现代化和智能化的大背景下,智慧农场

通过物联网(IoT)、大数据与人工智能(AI)等技术的深度融合,使农业进入了网络化、数字化、智能化发展的新时代。智慧农场日益成为推动农业转型、

收稿日期: 2025-03-07 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)和新疆棉花产业技术体系项目(XJARS-03)

作者简介: 潘昊(1998—),男,助教,主要从事棉花产业标准体系构建研究,E-mail: ph00469@163.com

通信作者: 李玉林(1979—),男,副教授,主要从事工业工程理论与技术研究,E-mail: lyl_mac@126.com

加速数字农业新质生产力形成、推进乡村振兴的有力措施^[1]。2024 年 10 月,农业农村部印发《农业农村部关于大力发展智慧农业的指导意见》(以下简称《指导意见》)、《全国智慧农业行动计划(2024—2028 年)》(以下简称《行动计划》),明确提出“培育一批智慧农(牧、渔)场,推进农业全产业链数字化改造”^[2-3]。

棉花产业作为我国乡村振兴的基础性支撑产业,在国民经济中占有重要地位,其智慧农场实践具有显著的范式价值^[4]。当前,我国棉花产业全程机械化已基本实现^[5],在农机作业导航^[6]、水肥一体化自动控制^[7]等方面也有了基础。然而,随着智慧农场建设的不断推进,棉花生产智慧农场标准体系不健全、标准化程度低、各生产环节存在“数据孤岛”等问题逐渐显现,极大限制了科学数据开放共享和数据价值^[8-11]。

标准体系构建贯穿于棉花生产的全过程,对棉花生产智慧农场建设发挥着重要的支撑作用。《指导意见》强调“要有序推动智慧农业产业健康发展,关键是加强标准体系建设”^[2]。因此,本研究系统分析棉花生产智慧农场建设要求及标准化研究现状,明确标准体系构建的基本原则,并改进视角分析法,从 5 个视角系统分析棉花生产智慧农场标准体系建设需求。基于系统工程理论框架,将改进的切克兰德方法论与霍尔三维结构法相结合,构建覆盖“耕种管收+加工”全流程的棉花生产智慧农场标准体系。为进一步验证标准体系的科学性与适用性,基于模糊层次分析法,建立棉花生产智慧农场标准体系综合评价模型。

1 棉花生产智慧农场概述

智慧农业是现代农业的发展方向,智慧农场是实现智慧农业的重要途径。当前,学术界尚未对智慧农场给出一个确切的定义,学者普遍认为智慧农场是现代信息技术与智能装备深度融合的产物^[12]。吴文福等^[13]提出,智慧农场是以先进科学技术为基础的新型科技领域,可对农业进行数据分析,指导农业生产;穆悦等^[14]认为智慧农场是一种利用信息与通信技术(Information and communications technology, ICT)提高农产品产量和质量的农业经营理念;YOON 等^[15]将智慧农场的概念分为狭义与广义两部分,狭义概念是指将 ICT 应用于农场,以实现远程自动维护和管理,广义概念是以各种方式将农业生产和 ICT 相融合,以实现产业创新。此外,国际标准化组织智慧农业战略咨询小组(ISO SAG-SF)在战略咨询报告中将智慧农场定义为一种基于理论框架的数据驱动决策模式,通过多目标优化,应对全球环境中的波动性、不确定性、复杂性与模糊性^[16]。

近年来,我国在智慧农业发展方面开展了系列部署,实施了一批重大应用示范工程,支持科研院校持续推进智慧农业技术模式迭代创新,加强智慧农业前沿技术研发与系统集成,引领智慧农业未来发展方向^[2,17]。棉花生产智慧农场(如图 1 所示)作为智慧农业生产的一个重要应用实例,以智能装备为依托,构建标准化模式,打破各生产环节的信息孤岛,提升棉花生产加工一体化、科学化与智

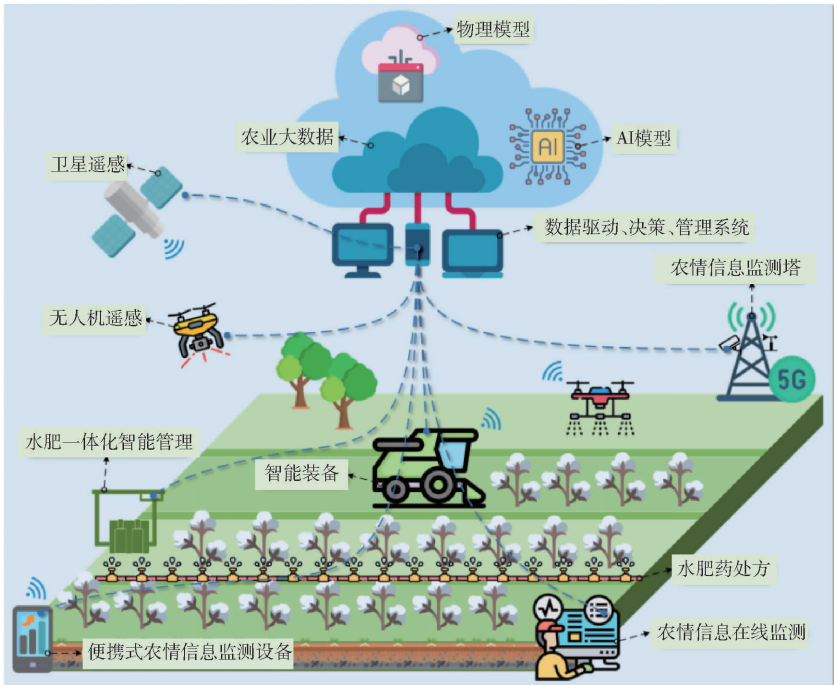


图 1 棉花生产智慧农场示意图

Fig. 1 Schematic of a smart farm for cotton production

慧化管理水平,以实现棉花生产节本降耗、提质增效和生态可持续,进而引领我国棉花产业的高质量发展。

棉花生产智慧农场作为现代农业的高级形态,其主要特征如下:

(1)数据驱动决策:系统整合土壤、气象、作物生长等全要素农业数据流,形成贯穿棉花“耕种管收+加工”的全生命周期农业大数据体系,结合 AI 算法实现智能决策。

(2)智能装备协同:基于北斗卫星导航系统、变量水肥调控系统、植保无人机等智能技术装备形成高效作业集群,显著提升生产效率。

(3)全链条可追溯:依托棉花质量追溯关键技术装备,打破各环节信息孤岛,实现“耕种管收+加工”全流程数据记录,支持棉花生产全流程质量追溯。

2 棉花生产智慧农场标准现状及需求分析

2.1 棉花生产智慧农场标准现状

为了解棉花生产标准制修订进展,本研究以全国标准信息公共服务平台 (<https://std.samr.gov.cn/>)、中国标准服务网 (<https://cssn.net.cn/>) 和国家标准文献共享服务平台 (<https://www.pep.com.cn/>) 数据库为检索对象,从国家标准、行业标准、地方标准和团体标准 4 个层面,以“棉花”、“棉田”、“机械”、“农机”为关键词进行检索。通过标准去重和人工筛选,截至 2025 年 1 月 26 日共计得到 820 项标准,包括国家标准 221 项(含国家标准计划 41 项)、行业标准 155 项、地方标准 370 项和团体标准 74 项,涵盖棉花种植、田间管理、采收、加工等环节。

如图 2 所示,对检索得到的标准按国际标准分类法(International classification for standards, ICS)进行分类可知,“植物栽培(65.020.20)”以 167 项占

比 20.4% 位居首位。“农业机械和设备综合(65.060.01)”有 134 项占比 16.4%,凸显了农业机械化在棉花生产中的重要地位,相关标准覆盖了农业机械的通用要求、性能指标等。“农业和林业(65.020)”与“农业和林业综合(65.020.01)”等通用型标准分别占比 11.1%(91 项)和 10.9%(89 项)。其中,包含新疆维吾尔自治区地方标准 38 项,这充分体现了新疆作为棉花主产区的重要地位。此外,植保设备、农业机械各类别(农业拖拉机和牵引车辆、收获设备等)占比在 3.3%~4.6% 之间,为棉花生产全程机械化提供了标准支撑。

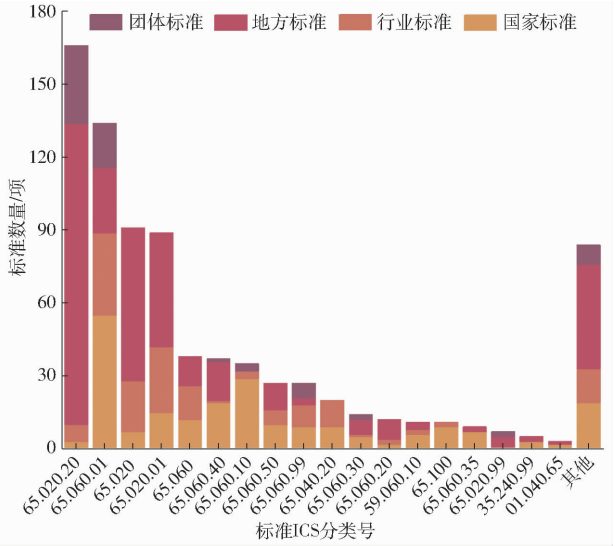


图 2 ICS 分类结果

Fig. 2 ICS classification results

然而,检索结果中专门针对“智慧农业”或“智慧农场”标准较少,且相关国家标准仍处于拟制订阶段。现有相关标准多属技术类(如数据获取、通信协议),整体呈现出“地方先行探索、国家补位跟进、技术驱动为主、场景覆盖有限”的特点。未来需向智能决策、精准服务等应用层标准拓展,以满足棉花生产智慧农场建设的多样化需求,如表 1 所示。

表 1 以“智慧农业”或“智慧农场”为主题的结果示例

Tab. 1 Examples of results with theme “smart farming” or “smart farm”

序号	标准编号	标准名称	标准类型
1	DB3205/T 1087.1—2023	智慧农业示范基地建设与评价规范 第 1 部分:智慧农场(大田作物)	江苏省地方标准
2	DB6111/T 195—2023	智慧农业园区数据获取技术规范	陕西省地方标准
3	DB6111/T 196—2023	智慧农业园区数据贮存技术规范	陕西省地方标准
4	DB6111/T 197—2023	智慧农业园区数据处理技术规范	陕西省地方标准
5	DB15/T 3588—2024	黄河灌区智慧农业物联网设备通信规约	内蒙古自治区地方标准
6	NY/T 4298—2023	气候智慧型农业小麦-水稻生产技术规范	行业标准-农业
7	NY/T 4300—2023	气候智慧型农业作物生产固碳减排监测与核算规范	行业标准-农业
8	20232101-T-424	(相关标准仍在拟制订阶段)	国家标准计划
9	GB/T 43443—2023	物联网 智慧农业信息系统接口要求	国家标准
10	GB/T 43440—2023	物联网 智慧农业数据传输技术应用指南	国家标准

此外,以“棉”为关键词通过中国标准服务网(<https://cssn.net.cn/>)数据库进行 ISO 及欧洲标准化委员会(Comité Européen de Normalisation, CEN)标准检索,得到现行标准 26 项。剔除如 ISO 6866:1985《动物饲料—游离棉酚和总棉酚的测定》、ISO 105-F09:2009《色牢度试验 第 F09 部分:棉摩擦布规范》、ISO 10290:2018《纺织品—棉纱—规格》等不属于智慧农场范畴标准后,得到现行有效标准 7 项,其中属于收获设备(65.060.50)2 项,天然纤

维(59.060.10)5 项,如表 2 所示。当前,国际标准化组织已完成标准 ISO 4254-7:2017《农业机械—安全 第 7 部分:联合收割机、青贮收割机、棉花收割机和甘蔗收割机》的修订工作,并于 2025 年 2 月发布了修订条款。与此同时,欧洲标准化委员会也开展了该项标准的修订工作,由 CEN/TC 144/WG 2(拖拉机和自走式机械)委员会负责起草,修正号为 EN ISO 4254-7:2017/prA1,并计划于 2025 年 5 月发布。

表 2 检索结果示例(ISO 标准)
Tab.2 Example of search results (ISO standard)

序号	标准编号	标准名称	状态	发布机构
1	ISO 4254-7:2017	农业机械—安全 第 7 部分:联合收割机、青贮收割机、棉花收割机和甘蔗收割机	现行	国际标准化组织
2	ISO 4254-7:2017/Amd 1:2025	农业机械—安全 第 7 部分:联合收割机、青贮收割机、棉花收割机和甘蔗收割机—修正条款 1	现行	国际标准化组织
3	ISO 8115-3:2022	棉包 第 3 部分:包装和标签	现行	国际标准化组织
4	ISO 8115-1:2022	棉包 第 1 部分:尺寸和密度	现行	国际标准化组织
5	ISO 2403:2021	棉纤维—马克隆值的测定	现行	国际标准化组织
6	ISO 4913:1981	棉纤维—长度(跨度长度)和均匀度指数的测定	现行	国际标准化组织
7	ISO 3060:1974	棉纤维—扁束断裂韧性的测定	现行	国际标准化组织

近年来,ISO 在智慧农业领域开展了一系列的标准化工作,加速推进智慧农场标准化进程。2021 年 6 月,ISO SAG-SF 成立;2022 年 8 月,ISO SAG-SF 中国专家工作组成立;2024 年 4 月,数据驱动农业食品系统技术委员会(ISO/TC 347 Data-driven agrifood systems)成立,为基于数据的农业和食品系统制定标准^[18]。这一系列举措标志着全球视角下的智慧农业标准化建设已进入系统化、专业化发展阶段。

综上,尽管相关部门或国际组织已出台相关政策、成立技术委员会针对性地开展标准制(修)订及标准体系建设工作,但聚焦棉花生产智慧农场领域仍存在明显短板。相较于智慧城市等成熟领域,棉花生产智慧农场领域标准化研究起步较晚,存在基础理论研究薄弱、标准分布不均衡、标准体系尚不健全等问题,标准服务棉花生产智慧农场高质量发展的效能有待进一步提升。

2.2 棉花生产智慧农场标准化需求分析

本研究基于改进视角分析法,结合棉花生产智慧农场实际,从角色视角、数据视角、装备视角、管理视角及技术视角 5 方面分析棉花生产智慧农场标准化需求,如图 3 所示。视角分析法^[19]是国际标准化组织/国际电工技术委员会(ISO/IEC)在 20 世纪 90 年代制定的开放分布式处理参考模型(The reference model of open distributed processing, RM-ODP)中提出的标准体系框架分析方法,以解决分布式系统异构性问题。

(1)角色视角:从棉花生产利益相关方角度出发,系统阐释棉花生产智慧农场标准体系建设的目的、范围、层级结构,为其它视角标准的制定提供基础。

(2)数据视角:聚焦棉花“耕种管收+加工”全生命周期农业大数据的基本语义和结构标准,为规范智慧农场数据管理、交换和共享等提供指南。

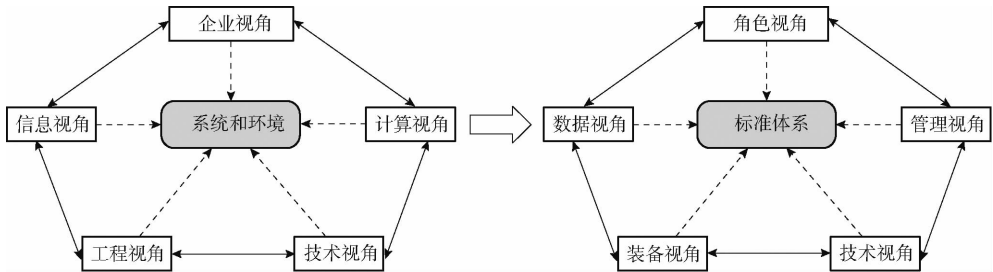


图 3 标准体系框架视角分析法示意图

Fig.3 Schematic of viewpoint-based analysis of standard framework

(3)装备视角:重点关注智慧种管、高效采收、废弃物回收及智能加工等各环节的智能化装备需求,提高生产效率、降低生产成本。

(4)技术视角:充分考虑遥感技术、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、病虫害防治等环节的应用,从操作规范或技术规程的角度考虑如何根据实际作业环境选择和配置适当的技术,以实现标准化作业。

(5)管理视角:构建“培训-监管-评估”三位一体智慧化管理体系,加强农民或者技术人员的培训,并定期对农场智慧化水平进行监测和评价。

3 棉花生产智慧农场标准体系构建与设计

3.1 构建原则与思路

3.1.1 构建原则

依据 GB/T 13016—2018《标准体系构建原则及要求》^[20]、GB/T 12366—2009《综合标准化工作指南》^[21]等国家标准,结合《指导意见》和《行动计划》政策要求,将棉花生产智慧农场标准体系构建原则总结如下:

(1)针对性与系统性相统一

立足新疆主产区棉花生产特征,系统性考虑棉花产业未来发展需要,构建内部协调、相互支撑、覆盖全面的标准框架,确保标准体系在机采棉模式下的可操作性。

(2)继承性与创新性相结合

充分吸收和借鉴现有智慧农业标准体系和棉花产业标准体系的有益经验,参考智慧城市标准体系,结合实际需要进行标准体系的创新和完善,确保标准的延续性和适用性。

(3)规范性与灵活性相统一

标准体系构建需严格遵循国家标准 GB/T 13016—2018《标准体系构建原则及要求》、GB/T 12366—2009《综合标准化工作指南》及 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》^[22]的有关规定,确保标准编制的规范性,同时保留一定的灵活性,以适应棉花生产智慧农场建设工作的发展变化。

3.1.2 构建思路

综合运用系统工程理论,采用改进的切克兰德法^[23-24]与霍尔三维结构法^[25]相结合的系统分析方法论,开展标准体系构建分析。首先基于改进的切克兰德法对棉花生产智慧农场标准化内容进行比较、探寻,以确定内容包络;然后,结合内容包络和霍尔三维结构分析法,针对智慧农场标准体系构建需求进行优化分析。基于改进的切克兰德法具体分析

过程如图4所示。

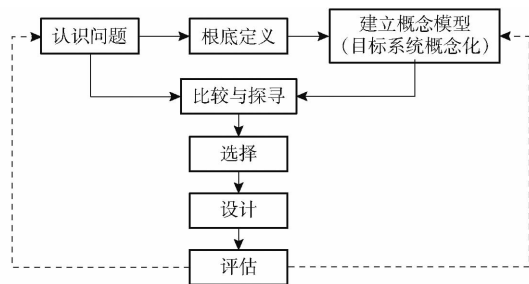


图4 改进的切克兰德分析法原理图

Fig.4 Schematic of improved Chekland analysis method

(1)认识问题:系统收集国内外智慧农场标准体系相关文献资料,深入研读标准规范文件。通过分析智慧农场标准体系的影响因素与结构组成,确定有关的利益主体和行为主体,明确智慧农场标准体系的国内外发展现状及标准化建设面临的主要问题。

(2)根底定义:系统梳理棉花生产智慧农场标准体系内部关联因素及关键要素,分解智慧农场建设的具体要求。通过调研“耕种管收+加工”各环节的智慧农场建设需求,收集利益相关方的基本观点,并对初步需求进行筛选和归并。

(3)建立概念模型:结合智慧种管、高效采收、废弃物回收、智能高效加工核心领域,依据根底定义的输出结果,建立棉花生产智慧农场标准体系建设概念模型,如图5所示。

(4)比较与探寻:将构建的棉花生产智慧农场标准体系概念模型与智慧农场的建设要求进行系统对比,评估模型的适用性和完整性,识别差异点,并根据对比结果对根底定义过程进行适当修正。

(5)选择:针对对比结果,筛选对比分析结果中必要的标准规范,明确初步需求项,为后续标准制定提供依据。

(6)设计:通过详尽和有针对性的设计,形成具有可操作性的棉花生产智慧农场标准体系建设需求方案。

(7)评估:组织专家评估,对需求方案的合理性进行评审,根据评审意见,修正问题描述、根底定义及概念模型等。

通过上述方法的应用,本研究明确了国内外标准体系的构成和现状,经过系统对比和需求收集,最终形成初步的棉花生产智慧农场标准体系建设需求方案。在此基础上,进一步运用霍尔三维结构分析法(如图6所示)对标准体系构建内容进行深入分析,确保标准体系的科学性、系统性和可操作性,具体内容如下:

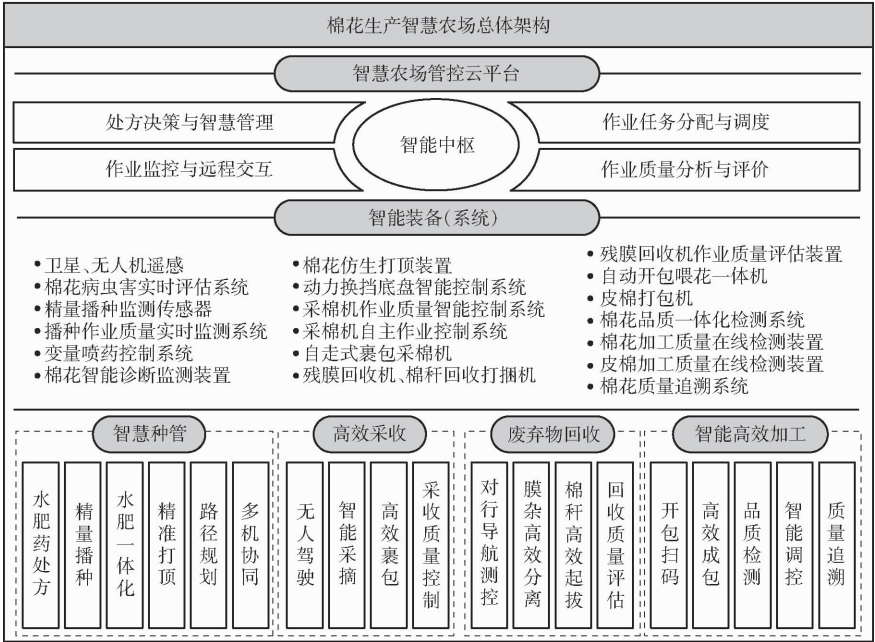


图 5 棉花生产智慧农场标准体系建设概念模型

Fig. 5 Conceptual model for building a smart farm standard system for cotton production

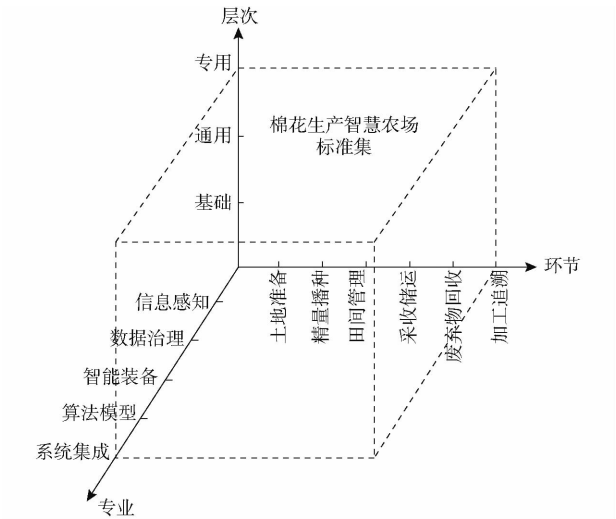


图 6 棉花生产智慧农场标准体系三维结构图

Fig. 6 Three-dimensional structure diagram of standard system of smart farms for cotton production

(1) 层次维度: 根据棉花生产智慧农场标准体系的规范范围, 将棉花生产智慧农场标准体系层次结构分为基础标准、通用标准、专用标准 3 个层级。

(2) 环节维度: 根据棉花生产全生命周期构建棉花生产智慧农场的序列结构, 主要包括: 土地准备、精量播种、田间管理、采收储运、废弃物回收和加工追溯等环节。

(3) 专业维度: 棉花生产智慧农场标准体系属于产业标准体系, 专业结构应为以技术装备分类的标准结构。主要包括: 信息感知、数据治理、智能装备、算法模型和系统集成等。

从层次维、环节维和专业维分析标准规范的必

要性和优先级, 进一步优化梳理, 从而构建面向棉花生产智慧农场的标准体系结构。

3.2 棉花生产智慧农场标准体系框架结构

基于棉花生产智慧农场标准体系构建内容研究, 结合“十四五”规划设想和 2035 年远景目标以及 2025 年中央一号文件精神, 构建了涵盖基础通用标准、数据标准、产品标准、方法标准、管理服务标准 5 个子体系的标准体系, 实现了棉花生产“耕种管收+加工”全流程标准化, 如图 7 所示。

3.2.1 纵向层级划分与设计

将棉花生产智慧农场标准体系划分为基础通用、行业通用和专业通用 3 个层级, 以明确标准体系的层次。

(1) 基础通用层: 从棉花生产智慧农场建设总体要求出发, 将智慧农场整体范围内具有普遍指导意义的、统领智慧农场各相关工作要素的标准设计为整个标准体系的第 1 层, 设置为基础通用标准, 主要包括术语与定义、图形符号、基础设施、通用技术要求及参考模型等。

(2) 行业通用层: 将棉花生产智慧农场的数据标准划分为行业通用层, 主要包括智慧农场元数据、数据采集、数据共享、数据分析、数据存储、数据安全及参考模型等, 为智慧农场数据规范化管理提供了参考, 有利于促进智慧农场数据共享, 对于提高数据可复用性, 最大程度发挥数据价值有重要意义。

(3) 专业通用层: 将产品标准、方法标准及管理服务标准等专业通用的标准集合设为第 3 层, 该层

4 基于 FAHP 的棉花生产智慧农场标准体系综合评价

为了综合评价前文构建的棉花生产智慧农场标准体系,本研究根据模糊层次分析法(Fuzzy analytic hierarchy process,FAHP)构建评价指标体系,计算指标权重,对建立的标准体系进行综合评价。

4.1 标准体系综合评价模型建立

4.1.1 评价指标体系建立

评价指标的选取要充分体现标准体系建立的原

则和要求。本研究以 GB/T 13016—2018《标准体系构建原则和要求》为基础^[20],将目标导向性、体系完备性、层次适当性和结构清晰性作为评价指标体系的准则层即一级指标,并在此基础上对各项指标进行细化,从而形成本标准体系的综合评价指标体系,如表 4 所示。综合评价指标体系分为 3 层。第 1 层为评价目标层 R ;第 2 层为准则层 R_i ,共含有 4 项一级指标;第 3 层为因素层 R_{ij} ,共含有 7 项二级指标,分别为目标匹配度 R_{11} 、全生命周期覆盖度 R_{21} 、标准要素完备度 R_{22} 、粒度一致性 R_{31} 、标准唯一性 R_{32} 、分类逻辑一致性 R_{41} 、边界明确度 R_{42} 。

表 4 综合评价指标关系
Tab.4 Comprehensive evaluation indicator relationship

目标层	准则层(一级指标)	因素层(二级指标)	定义
棉花生产智慧农场标准体系综合评价 R	目标导向性 R_1	目标匹配度 R_{11}	标准体系与棉花生产智慧农场建设目标的匹配度
	体系完备性 R_2	全生命周期覆盖度 R_{21}	标准体系对棉花生产全流程(耕种管收+加工)的覆盖完整性
		标准要素完备度 R_{22}	标准明细表对技术规范、实施指南等要素的涵盖程度
	层次适当性 R_3	粒度一致性 R_{31}	标准体系各层级间内容细化程度的均衡性与一致性
		标准唯一性 R_{32}	单个标准在体系中的唯一隶属关系,避免跨子体系重复
	结构清晰性 R_4	分类逻辑一致性 R_{41} 边界明确度 R_{42}	标准体系分类规则在纵向层级与横向子体系间保持逻辑统一 各子体系/层级间责任范围界定清晰程度

4.1.2 指标权重确定

邀请 N 名专家进行咨询和填写问卷,并采用德尔菲法(Delphi method)^[26]对同一层次且相互关联的各指标进行相对重要性的比较。使用九级标度法进行评分,九级标度法具体取值如表 5 所示。

表 5 九级标度法取值
Tab.5 Nine-level scale method taking values

标度	定义	解释说明
0.1	绝对不重要	元素 i 比元素 j 绝对不重要
0.2	非常不重要	元素 i 比元素 j 非常不重要
0.3	比较不重要	元素 i 比元素 j 比较不重要
0.4	稍微不重要	元素 i 比元素 j 稍微不重要
0.5	同等重要	元素 i 比元素 j 同等重要
0.6	稍微重要	元素 i 比元素 j 稍微重要
0.7	比较重要	元素 i 比元素 j 比较重要
0.8	非常重要	元素 i 比元素 j 非常重要
0.9	绝对重要	元素 i 比元素 j 绝对重要

从数学原理角度对评分矩阵 S 的一致性原理给出解释,定义 n 阶模糊矩阵 S

$$S = (S_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

若满足

$$\begin{cases} 0 \leq S_{ij} \leq 1 \\ S_{ii} = 0.5 \quad (i,j = 1,2,\cdots,n) \\ S_{ij} + S_{ji} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

则矩阵 S 为模糊互补矩阵^[27]。

若满足

$$S_{ij} = S_{ik} - S_{ij} + 0.5 \quad (i,j,k = 1,2,\cdots,n) \quad (3)$$

且同时满足公式(2),则 S 称为模糊一致矩阵^[28]。

结合模糊互补矩阵的定义,将最终满足模糊互补矩阵评分结果的评分矩阵记作 T ,表示为

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \cdots & t_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对评分得到的模糊判断矩阵 T 进行按行求和,得到列矩阵 t_i 为

$$t_i = \sum_{k=1}^n t_{ik} \quad (i = 1,2,\cdots,n) \quad (5)$$

对列矩阵 t_i 中各元素值除以其中各元素之和得到权重系数 r_i

$$r_i = \frac{t_i - \frac{n-2}{2}}{n(n-1)} \quad (i = 1,2,\cdots,n) \quad (6)$$

并将权重系数行列式记作 R_I

$$R_I = [r_1 \quad r_2 \quad \cdots \quad r_n]^T$$

对模糊判断矩阵进行模糊一致化处理

$$r_{ij} = \frac{(n-1)(r_i - r_j)}{2} + 0.5 \quad (7)$$

从而得到模糊一致矩阵 A

$$A = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix}$$

对模糊一致矩阵 A 进行一致性检验。判断矩阵中各元素的不一致程度为

$$C_l(T,A) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |A_{ij} - T_{ij}|}{n^2} \tag{8}$$

当 C_l 值越小,则该组数据的一致性越好,当 $C_l < 0.1$ 则表示该组数据满足模糊一致性要求^[28]。

4.1.3 模糊综合评价

根据棉花生产智慧农场标准化建设需求,本研究将该标准体系综合评价指标体系中因素层二级指标划分为“很差”、“较差”、“中等”、“良好”、“很好”5个等级。因此,设置综合评价结果评语集 $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{\text{很差,较差,中等,良好,很好}\}$ 。等级标准区分依据如表6所示。

表 6 等级标准区分

Tab.6 Grade standard differentiation values

等级	评语	评分值
1	很好	90 ~ 100
2	良好	75 ~ 90
3	一般	60 ~ 75
4	较差	50 ~ 60
5	很差	0 ~ 50

若总打分人数为 N ,则各评价等级对应的打分人数依次记为 N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 ,则有

$$S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \left\{ \frac{N_1}{N}, \frac{N_2}{N}, \frac{N_3}{N}, \frac{N_4}{N}, \frac{N_5}{N} \right\} \tag{9}$$

最终各级评分人数总和及总参与打分人数应相等。

将得到的单因素评级打分矩阵 S 与各单因素指标权重 R 相乘并求和得出评价结果行矩阵 $P = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5]$,即

$$P = S \cdot R \tag{10}$$

随后,按照评语集释义,行矩阵 P 中最大值即为该模型综合评价的最终结果。

4.2 棉花生产智慧农场标准体系综合评价

本研究以已建立的综合评价指标体系为基础,设计指标权重系数调查问卷,邀请15位相关研究领域的专家、研究生对问卷进行填写,并对数据进行处理,从而形成统一数据。其中,对一级指标的评分数据所对应的模糊判断矩阵记作 T ,并利用公式(6)进行计算从而得到权重行列式

$$R_l = [0.308\ 3 \quad 0.25 \quad 0.225 \quad 0.216\ 7]^T \tag{11}$$

利用公式(7)对权重行列式 R_l 进行模糊一致化处理,从而得到模糊一致矩阵 A

$$A = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.552\ 2 & 0.578\ 1 & 0.587\ 2 \\ 0.447\ 8 & 0.5 & 0.526\ 3 & 0.535\ 7 \\ 0.421\ 9 & 0.473\ 7 & 0.5 & 0.509\ 4 \\ 0.412\ 8 & 0.464\ 3 & 0.490\ 6 & 0.5 \end{bmatrix} \tag{12}$$

利用公式(8)计算得出对一级指标的模糊一致性 $C_l = 0.078\ 73 < 0.1$,满足一致性要求。

同理,可对其余二级指标的专家评分数据进行相同处理,进而确定二级指标权重并通过模糊一致性检验,因此可以认为将权重行列式 R_l 作为准则层的权重分配是可靠的。如表7所示,将二级指标权重与一级指标的权重相乘,进而得到指标结论权重。

表 7 二级指标权重矩阵元素取值

Tab.7 Weight matrices for secondary-level indicators

一级指标	二级指标	权重 R_{ij}	结论权重
目标导向性 R_1	目标匹配度 R_{11}	1.00	0.308 3
	全生命周期覆盖度 R_{21}	0.35	0.087 5
体系完备性 R_2	标准要素完备度 R_{22}	0.65	0.162 5
	粒度一致性 R_{31}	0.15	0.033 8
层次适当性 R_3	标准唯一性 R_{32}	0.85	0.191 3
	分类逻辑一致性 R_{41}	0.45	0.097 5
结构清晰性 R_4	边界明确度 R_{42}	0.55	0.119 2

邀请参与棉花生产智慧农产建设的科研工作者,以调查问卷的形式对本文设计的标准体系进行评价。调查问卷主要采取以下几种方式:实地发放调查问卷,填写人现场填写问卷,共发放调查问卷13份,回收的有效问卷13份;通过电话的方式进行问卷填写,联系人员均为棉花生产智慧农场常驻研究生,共填写有效问卷8份。为了确保调查问卷收集数据的有效性,对无效问卷进行剔除。经过对收集数据整理后,获得综合评价指标评价统计表,如表8所示。

表 8 指标评价统计

Tab.8 Index evaluation statistics

评价指标	打分结果				
	很好	良好	中等	较差	很差
R_{11}	0.428 6	0.619 0	0	0	0
R_{21}	0.381 0	0.571 4	0.047 6	0	0
R_{22}	0.333 3	0.571 4	0.095 2	0	0
R_{31}	0.476 2	0.428 6	0.095 2	0	0
R_{32}	0.333 3	0.619 0	0.047 6	0	0
R_{41}	0.381 0	0.428 6	0.142 9	0.047 6	0
R_{42}	0.523 8	0.428 6	0.047 6	0	0

利用公式(10)引入打分表数据进行计算,计算出评价结果行矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 0.399\ 1 & 0.559\ 5 & 0.051\ 6 & 0.004\ 6 & 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

对行矩阵 P 中元素进行大小排序,最大数值对应的影响程度即为标准体系综合评价相应的评价结果。最大数值 0.559 5 相对应的打分结果为“良好”,即对本文设计的棉花生产智慧农场标准体系基于模糊层次分析法的综合评价结果为良好,具有良好的适用性和指导性,能够满足棉花生产智慧农场的发展需求。

5 结束语

棉花生产智慧农场标准体系构建是一项复杂的系统工程,涉及作物栽培、信息科学及智能制造等多门学科,并与数字农业经济发展紧密相连。本研究创新性地从层次维、环节维和专业维 3 个维度构建了涵盖棉花生产“耕种管收+加工”全流程的标准体系,并通过棉花生产智慧农场标准体系综合评价模型,对构建的标准体系进行综合评价。结果表明,该标准体系具有“良好”的适用性和指导性,研究成果可为我国棉花生产智慧农场标准体系建设提供理论依据。

参 考 文 献

[1] 高群,陈诗瑶,王宏杨. 中国智慧农场的时空演变及驱动因子研究[J]. 中国农业资源与区划,2025,46(2):117-129.
GAO Qun, CHEN Shiyao, WANG Hongyang. Study on spatial-temporal transition and driving factors of smart farms in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2025, 46(2):117-129. (in Chinese)

[2] 农业农村部. 农业农村部关于大力发展智慧农业的指导意见:农市发[2024]3号[EB/OL]. (2024-10-23)[2025-03-23]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/SCYJJXXS/202410/t20241025_6465040.htm.

[3] 农业农村部. 农业农村部关于印发《全国智慧农业行动计划(2024—2028年)》的通知:农市发[2024]4号[EB/OL]. (2024-10-23)[2025-03-23]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/SCYJJXXS/202410/t20241025_6465041.htm.

[4] 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)

[5] 赵岩,陈学庚. 我国棉花产业高质量生产面临的问题与展望[J]. 塔里木大学学报,2023,35(1):1-8.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng. Problems and prospects of high quality cotton production in China [J]. Journal of Tarim University, 2023, 35(1):1-8. (in Chinese)

[6] 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 trajectory navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6):34-41. (in Chinese)

[7] 娄善伟,田立文,罗宏海,等. 新疆棉花优质高产关键生产技术分析[J]. 中国农业科学,2023,56(14):2673-2685.
LOU Shanwei, TIAN Liwen, LUO Honghai, et al. Analysis on key production techniques of cotton with good quality and high yield in Xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(14):2673-2685. (in Chinese)

[8] 胡春雷,李孝华,何锡玉,等. 2021年棉花加工行业产业发展报告(下)第六章 2021年度机采棉品质快速检测和质量追溯系统应用情况产业报告[J]. 中国棉花加工,2022(2):7-9.

[9] 颜腾腾,胡继连. 山东棉花标准化生产问题研究[J]. 当代经济,2020(5):92-95.
YAN Tengting, HU Jilian. Research on standardised production of cotton in Shandong [J]. Contemporary Economics, 2020 (5):92-95. (in Chinese)

[10] 尹鹏超,陈相颖.《成包皮棉数据技术要求》行业标准解读[J]. 中国棉花加工,2024(1):29.

[11] 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.

[12] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. 华南农业大学学报,2021,42(6):1-7.
ZHAO Chunjiang. Current situations and prospects of smart agriculture [J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6):1-7. (in Chinese)

[13] 吴文福,张娜,李姝晓,等. 5T智慧农场管理系统构建与应用探索[J]. 农业工程学报,2021,37(9):340-349.
WU Wenfu, ZHANG Na, LI Shuyao, et al. Construction and application exploration of 5T smart farm management systems [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9):340-349. (in Chinese)

[14] 穆悦,丁艳锋. 智能农场:以水稻为例的一个未来农场运营的设想[J]. 中国稻米,2020,26(5):80-83.
MU Yue, DING Yanfeng. Smart farm: conceiving of running future farm with rice as an example [J]. China Rice, 2020, 26(5):80-83. (in Chinese)

[15] YOON C, LIM D, PARK C. Factors affecting adoption of smart farms; the case of Korea [J]. Computers in Human Behavior, 2020, 108:106309.

[16] Strategic advisory group report on smart farming [R]. International Organization for Standardization, 2023:9.

[17] 赵春江,李瑾,冯献. 面向 2035 年智慧农业发展战略研究 [J]. 中国工程科学,2021,23(4):1-9.
ZHAO Chunjiang, LI Jin, FENG Xian. Development strategy of smart agriculture for 2035 in China [J]. Strategic Study of

CAE, 2021, 23(4): 1–9. (in Chinese)

[18] 农业食品标准化研究所. ISO 智慧农业标准化战略咨询组中国专家工作组获批成立[EB/OL]. (2022–08–31)[2025–03–23]. https://www.cnis.ac.cn/bydt/zhxw/202208/t20220831_53739.html.

[19] 姚艳敏,白玉琪. 农业大数据标准体系框架研究[J]. 农业大数据学报,2019,1(4):76–85.
YAO Yanmin, BAI Yuqi. A framework for agricultural big data standards[J]. Journal of Agricultural Big Data, 2019, 1(4): 76–85. (in Chinese)

[20] 中国标准化研究院. 标准体系构建原则和要求:GB/T 13016—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

[21] 中国标准化研究院. 综合标准化工作指南:GB/T 12366—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

[22] 刘志强. 2024 年全国棉花产量同比增长 9.7% [N]. 人民日报,2024–12–27(02).

[23] 陈澈,孟庆刚. 基于切克兰德方法论的中国健康养老产业分析[J]. 中国老年学杂志,2018,38(21):5371–5375.
CHEN Che, MENG Qinggang. Analysis of china's healthy aging industry based on clandestine methodology [J]. Chinese Journal of Gerontology, 2018, 38(21): 5371–5375. (in Chinese)

[24] 杨建梅. 切克兰德软系统方法论[J]. 系统辩证学学报,1994(3):86–91.
YANG Jianmei. On the soft systems methodology of checkland[J]. Chinese Journal of Systems Science, 1994(3): 86–91. (in Chinese)

[25] 刘光盛,王红梅,胡月明,等. 中国土地利用工程标准体系框架构建[J]. 农业工程学报,2015,31(13):257–264.
LIU Guangsheng, WANG Hongmei, HU Yueming, et al. Infrastructure of standard system for land use engineering in China [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 257–264. (in Chinese)

[26] 王同林,邵志勇,聂智星,等. 基于德尔菲法及层次分析法构建鲜食番茄品质评价体系[J/OL]. 浙江农业学报,1–14.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1151.S.20250212.1410.002.html>.
WANG Tonglin, SHAO Zhiyong, NIE Zhixing, et al. Construction of a quality evaluation system for fresh-eating tomatoes based on Delphi method and analytic hierarchy process [J/OL]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 1–14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1151.S.20250212.1410.002.html>. (in Chinese)

[27] 董君. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 科技资讯,2015,13(29):218,220.
DONG Jun. Analysis of hierarchical analysis weighting method and its application research [J]. Science & Technology Information, 2015,13(29): 218,220. (in Chinese)

[28] 李锦清. 基于模糊层次分析法的知识产权质押融资风险评价研究[D]. 成都:电子科技大学,2021.
LI Jinqing. Research on risk evaluation of intellectual property pledge financing based on fuzzy analytic hierarchy process [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)

(上接第 25 页)

[28] YANG J,ZHAI Z,LI Y,et al. Design and research of residual film pollution monitoring system based on UAV[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2024,217:108608.

[29] 岳继博,冷梦蝶,田庆久,等. 叶片多理化参数的高光谱遥感与深度学习估算[J]. 光谱学与光谱分析,2024,44(10): 2873–2883.
YUE Jibo, LENG Mengdie, TIAN Qingjiu, et al. Estimation of leaf physical and chemical parameters based on hyperspectral remote sensing and deep learning technologies [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(10): 2873–2883. (in Chinese)

[30] 蒋凯伟,刘彪,刘国豪,等. 基于卷积神经网络的车道线逆透视变换算法[J]. 北京交通大学学报,2023,47(2):106–113.
JIANG Kaiwei, LIU Biao, LIU Guohao, et al. An inverse perspective transformation algorithm for lane lines based on CNN[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(2): 106–113. (in Chinese)

[31] JJOCHER G, NISHIMURA K, MINEEVA T, et al. YOLO11[EB/OL]. 2024, <https://github.com/ultralytics/ultralytics>.

[32] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM:convolutional block attention module[C]// Computer Vision-ECCV 2018. Cham: Springer International Publishing, 2018:3–19.

[33] 鲍文霞,苏彪彪,胡根生,等. 基于 FE–P2Pnet 的无人机小麦图像麦穗计数方法[J]. 农业机械学报,2024,55(4):155–164,289.
BAO Wenxia, SU Biaobiao, HU Gensheng, et al. Method for counting wheat ears in UAV images based on FE–P2Pnet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 155–164, 289 (in Chinese)