

张忠杰研究员主持“粮食干燥与绿色仓储”专栏文章之一（专论）

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.05.002

吴子丹. 新世纪中国粮食储藏科技发展新脉络的梳理与展望[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(5): 9-18.

WU Z D. Review and prospect of China's grain storage science and technology development in the new century[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(5): 9-18.

新世纪中国粮食储藏科技发展 新脉络的梳理与展望

吴子丹

（国家粮食和物资储备局，北京 100834）

摘要：本世纪以来，中国在粮食储藏领域的科学理论、研究方法、应用技术研发都得到加速发展。在简要回顾上世纪中国粮食储藏科技发展过程的基础上，对本世纪以来粮食科技取得的新发展进行了归纳，从微观、宏观、信息化与人工智能三个维度对粮食科技发展新脉络进行梳理和展望。微观维度的发展是指粮堆生物体的微观机理研究的进展。从粮食基础参数研究起步，介绍了在分子生物学、基因工程学、蛋白组学、代谢组学等生命科学理论和方法支持下，对粮食籽粒、储粮害虫和微生物的微观参数、特征、代谢和品质变化规律、以及真菌毒素防控技术等研究取得的新成果。宏观维度的发展是指在储粮生态理论的基础上，从宏观层面研究粮食储藏中环境生态因子之间的互相影响。介绍了在粮堆生物场和物理场等多场耦合理论支持下取得的新成果。在信息化与人工智能维度的发展方面，介绍了我国粮食领域人工智能（AI）的发展过程，在机理驱动 AI 和数据驱动 AI 相结合的“机理+数据”双驱动 AI 的新理念指导下取得的新成果。通过对发展新脉络的梳理，提出展望：一是在发展战略层面，要通过科技提升粮食流通系统管理能力，包括粮食储备安全的监管技术、全产业链质量控制和追溯、提升粮食产业可持续发展能力等等，仍然要继续开展重大粮食科技难题和“卡脖子”问题的行业攻关。二是在科学理论和技术方法层面，运用好粮食领域“技术平移”优势和交叉学科突破优势，推进理论创新和技术迭代，加快步入中国粮食储藏科技发展的高速路。

关键词：粮食储藏；微观维度；宏观维度；信息化与人工智能维度；生命科学；粮堆生物场；“机理+数据”双驱动 AI

中图分类号：TS205；S24 文献标识码：A 文章编号：1007-7561(2023)05-0009-10

网络首发时间：2023-09-08 17:00:36

网络首发地址：<https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20230907.1925.005>

Review and Prospect of China's Grain Storage Science and Technology Development in the New Century

WU Zi-dan

(National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100384, China)

收稿日期：2023-05-13

作者简介：吴子丹，男，1955年出生，研究员，副局长（原），本刊前主编，研究方向为粮食储藏。E-mail: wuzidan@263.net。本专栏背景及作者详细介绍见 PC21。

Abstract: Since the beginning of this century, there has been an acceleration in the scientific theory, study approaches and application technology research and development in the field of grain storage in China. This paper provides an overview of national grain storage science and technology development in the last century, and introduces new developments that have occurred this century. The progress of grain storage technology has been reviewed and prospected from three aspects, micro and macro dimension, as well as through dual-driven AI. In the micro dimension, there has been progress made in understanding grain bulk microorganism mechanism. The basic parameters of grain were researched, followed by the study of characteristics, metabolism, and quality laws for grain seeds, stored grain pests, and microorganisms, using biological science methods such as molecular biology, genetic engineering, proteomics, and metabolomics. Then, the basic parameters, characteristics, metabolism and quality laws for grain seeds, stored grain pests and microorganisms were studied, using biological science methods such as molecular biology, genetic engineering, proteomics and metabolomics. Additionally, methods for preventing and controlling mycotoxins in grain bulk were explored, leading to new achievements in these fields. In the macro dimension, interactions between environmental factors in grain storage and macro-level studies were conducted based on the theory of grain storage ecology. The achievements have been introduced based on grain bulk multi-fields between grain biological fields and its multi-physical fields. Furthermore, in the research area of the artificial intelligence (AI) in grain field, some new achievements have been reached through the theory of dual-driven AI for mechanism and data. In conclusion, the progress in grain technology was analyzed and prospects for the future were put forward. Finally, the development prospects are proposed by summarizing the progress of grain technology. At the level of development strategy, it is necessary to improve the management abilities of grain circulation system through science and technology, including the supervision technology of grain safety storage, the quality control and traceability of whole grain chains, and the sustainable development ability of grain industry. The major grain science and technology challenge and grain industry technology bottleneck will be continued to carry out. At the level of scientific theory and methods, theoretical innovation and technology iteration will be promoted through the advantages of ‘technology translation’ and interdisciplinary breakthrough benefits, with the ultimate goal of creating a highway of grain storage science and technology in China.

Key words: grain storage; micro dimension; macro dimension; dimensions of informatization and artificial intelligence; biological science; grain bulk biological field; dual-driven AI for mechanism and data

1 中国粮食储藏科技的传承与发展

上世纪中国粮食储藏科技的发展,为新世纪的起步提供了良好基础。上世纪上半叶中国曾由于内忧外患而一时衰败,1949年粮食产量只有不到现在的五分之一,粮食仓容不足现在的二分之一。新中国建立以后的半个世纪,粮食储藏技术经历了经验传承、学习引进、创新发展等阶段,取得了巨大进步。上世纪50年代老一代粮食储藏工作者总结历史经验、因陋就简、“扫把加干净”创造了“四无粮仓”^[1-2],同时学习引进了“苏式粮仓”等苏联和东欧国家的储藏烘干、防治等技术;20世纪60-70年代使用杀虫剂的“化学防治”

曾风行世界,但伴随环境污染问题逐步受到限制。我国粮食储藏工作者因地制宜研发的“双低”储粮、“三低”储粮、地下储粮、自然缺氧储藏、二氧化碳气调储藏等等具有中国特色的储粮技术,部分解决了储备粮管理中的虫霉防治和如何减缓品质劣变问题^[1]。在消化吸收国外先进储粮技术和理念的同时,积极推进适合中国国情的储藏基础参数、基本规律和方法的研究。包括开展了多次中国储粮害虫调查、储粮微生物区系调查、储粮品质变化规律研究、储备粮陈化指标研究、储粮平衡水分算法 CAE 方程与储粮通风计算机控制研究^[3-4]、粮食机械烘干机理研究、储粮害虫抗

性研究、气调储粮杀虫机理研究、储粮生态体系研究等等。到上世纪末初步形成了具有中国特色的粮食储藏基础理论拼图框架。

1998 年, 国家决定利用国债投资建设一批现代化国家储备粮库。储粮科技人员在总结多年科研成果基础上, 提出了“四合一”储粮新技术的集成创新, 包括智能机械通风、低剂量环流熏蒸、智能粮情检测、高效谷物冷却, 以及二氧化碳整仓气调等技术和装备的组合应用, 解决了高大型粮仓长期安全储藏的难题。到 2003 年已在国债建设中央储备粮库全面推广。到 2020 年应用面已经超过 2.5 亿 t 仓容。应用新技术后中央储备粮品质全面提升, “宜存率”从 70% 提升到 95% 以上, 储粮化学药剂使用量减少四分之三, 总经济效益已经突破 700 亿元。该成果获得 2010 年度国家科技进步奖一等奖^[5]。之后, 该项技术得到不断升级完善。2014 年以横向通风为基础的包括横向环流、横向谷冷、多参数粮情检测等组合技术的“四合一升级技术”在多省迅速推广, 不仅提高了防治作业效率, 而且使机械化出入仓能力提高了近三倍, 目前应用规模已超过 400 万 t^[6]。同时氮气气调技术^[7-8]应用规模累积达到 3 500 万 t; 内环流均温技术^[9]在我国北方地区获得较大范围应用。

2 中国粮食储藏科技发展新脉络的梳理

新世纪第一个十年以来, 随着生命科学、信息技术、人工智能等科技的快速进步, 支撑中国粮食储藏科技向绿色、低碳、环保发展, 速度和质量都大幅度提升^[10]。通过发展脉络的梳理, 大体可分为三个维度的发展: 微观维度的发展、宏观维度的发展、信息与人工智能维度的发展。

2.1 微观维度的发展

粮堆是生命体的集合。粮食籽粒、储粮害虫和微生物的微观参数、特征和代谢规律等, 都是仓储科技的基础。微观维度的研究从粮食平衡水分、储粮安全水分、储粮基础参数和陈化劣变规律研究起步。在分子生物学、基因工程学、蛋白组学、代谢组学等生命科学理论和方法支持下, 粮食储藏科技针对粮堆生物体的微观机理研究不断深化, 包括粮食籽粒劣变机理、害虫基因鉴别

及抗性机理、微生物产毒及消解机制、生物安全等, 了解其规律, 找出抑制或利用的方法, 进而获得应用技术的提升或储粮品质的改善。研究技术和方法不断迭代, 成果水平从量变到质变。例如在储粮微生物领域, 从早期的形态学分类到基因分类; 从化学物理防治到生物拮抗防治; 从普通化学物理脱毒到生物脱毒、到石墨烯吸附协同光催化脱毒; 从化学物理诱变筛选到基于人工智能引导的从头设计; 从野生菌株到基因编辑菌株重构, 从天然酶提取到酶异源高效表达等等。进展比较显著的研究包括:

(1) 粮食平衡水分的研究: 采用试验测试和理论计算相结合方法, 建立一套我国自主的粮食平衡水分数据库^[10-13], 为粮食信息化建设和安全储粮奠定了理论数据支撑。

(2) 粮食安全储存水分的研究: 针对不同储粮生态区域的环境特点, 结合粮食呼吸作用和代谢作用等, 以主要储粮霉菌生长为判别阈值, 提出了适合不同区域的粮食储藏安全水分^[14-17], 以保障储粮安全。

(3) 储粮基础参数数据库建立: 采用文献总结、试验测试和理论计算等方法, 建立了我国主粮主要品系的基础参数数据库(主要包括热特性、物理特性、化学特性)^[18-21], 为我国储粮生态系统的研究提供基础数据支撑。

(4) 我国粮食真菌图谱及信息档案的建立: 采用菌落和显微形态学观察与多基因联合发育分析相结合的方法, 准确鉴定粮食真菌形态特征、菌种特征等, 建立了我国不同粮种真菌图谱和信息档案^[22-24], 完善了我国储粮微生物学基础理论。

(5) 储粮品质数据库的建立: 基于连续跟踪测试我国主粮、杂粮和杂豆等品质参数、营养成分、功能性成分等^[25-29], 构建了我国粮食的品质营养资源数据库, 并搭建了可视化、功能化展示平台, 以准确掌握我国粮食的资源禀赋情况。

(6) 储粮虫螨 DNA 鉴定与数据库研究: 基于分子 DNA 条形码、线粒体基因组和三维建模技术, 建立了“凭证标本-分子条码-线粒体基因组-三维数字标本”多维度鉴定技术体系和中国储粮害虫 DNA 条形码数据库^[30-31]。

(7) 害虫抗性基因研究: 基于储粮害虫基因组数据库, 以编码的氨基酸序列、信号肽和保守结构域等角度揭示了表皮蛋白基因等在其磷化氢抗性形成过程的 RNA 变化和所起作用^[32-36], 为储粮害虫防治和实施提供了精准视角。

(8) 生物防治害虫研究: 生物防治是储粮害虫综合防治的重要组成部分, 以多杀菌素^[37-39]为代表的生物防护剂, 建立了防效测试、研发了实仓施用工艺和设备, 形成了操作规程; 以捕食螨^[40-43]为代表的天敌生物防治技术, 筛选出了适合我国粮库的优势天敌捕食螨, 建立了饲养-投放-中试-操作规则的捕食螨生防体系。生物防治将有力支撑药剂减量, 服务我国绿色仓储提升行动。

(9) 真菌毒素的检测分析与监测预警研究: 针对田间-收储-加工不同环节中的粮食真菌毒素污染情况, 采用基于统计和地理系统的采样技术、快速高通量检验监测技术、现场快速检测技术和可视化风险评估技术的融合方法, 以整理分析数据、绘制风险地图、提出解决方案等, 从而构建一套完整分析与预警方法, 为粮食收储、加工企业的决策提供指导^[44-46]。

(10) 真菌毒素阻控体系建立: 针对粮食种植、流通、加工等环节真菌毒素污染的突出问题, 确立了以“生物技术为主, 理化技术相结合”的实施路线。开展的阶段成果主要包括: 一是利用合成生物学及酶工程等手段集成, 开发的具有自主知识产权的真菌毒素降解菌/酶制剂已进入产业化推广应用, 基本建立了真菌毒素污染粮食的安全合理利用技术研发体系^[47-54]; 二是针对真菌毒素分子特征, 研制了多种功能化石墨烯吸附、催化剂, 并解析了相关机制, 确立了石墨烯吸附-光催化协调降解真菌毒素的策略^[55-57], 利用第三代深紫外半导体芯片技术与高压等离子体技术联合, 通过对细胞、蛋白结构的破坏和遗传路径干扰, 以实现消减毒素的目的。该物理毒素降解法, 具有处理效率高、毒素降解较为彻底、处理后无有害物质残留、环境友好、对原粮品质无影响等特点。此外, 还可抑制原粮或成品粮表面易引起腐败的活性物质, 以延长储藏期和货架期^[58-60]; 三是生物拮抗减毒技术, 结合比较基因组学方法,

研发的 PCR-RFLP 分子鉴别技术可快速区分不产毒黄曲霉菌株, 研制的生防制剂对花生中黄曲霉毒素田间防治效果达到 60%至 90%^[61-63]。上述工作, 增强了我国粮食质量安全源头保障能力, 提升了我国粮食质量安全保障水平, 为粮食行业建立污染粮食长效处置机制提供支撑。

2.2 宏观维度的发展

在对粮食、微生物、害虫分别研究的基础上, 1965 年 Raper 和 Fennel^[64]与 1982 年中国学者李隆术^[65]分别从不同角度阐述了储粮生态理论的概念, 从宏观层面描述粮食储藏中环境生态因子之间的互相影响。中国在储粮生态理论的研究可分为储粮环境生态规律研究和粮仓生态规律研究两部分。前者的研究主要侧重在地理气候环境对储粮生态的影响, 其代表成果是中国七个储粮生态区域的划分^[66]。后者的研究侧重在粮仓围护结构之内的粮堆内部生态规律, 包括粮堆内的温度、湿度、微气流、气体成分等物理因子的时空分布与变化, 及其对粮堆生物因子(籽粒、微生物、害虫、啮齿动物、工作人员)的相互影响规律^[67]。前期研究侧重对粮堆物理场的研究, 包括运用流体力学、三传机理、有限元方法对特定粮仓的温度、湿度、气流等时空演替规律的推导。包括运用 CFD 算法, 建立了特定粮仓温度湿度变化模型, 推动了粮堆“场”的研究^[68-72]。但是这些模型的推导需要清晰的储粮环境、粮仓围护结构和粮堆基础参数等边界初始条件。实践上, 我国复杂的储粮环境和大量不同类型粮仓结构数据不完善, 导致这类模型的应用受到制约。尤其是因为粮堆并非单纯存在物理场, 粮堆生物的作用往往导致模型推算结果偏离实测。

粮堆生物场和多场耦合理论概念的提出^[67], 推动了粮堆生态系统相互作用规律研究的不断深化。“场”一般是指在时间和空间上的连续变量。这个量可以用数字(标量场, 例如温度)或矢量或张量(矢量场或张量场, 如力和应力)表示。场论已经成功地解释或预测许多物理现象。粮堆中的生物体(如储粮微生物)与环境相互作用, 与物理场原理相类似。通过国家粮食公益专项课题的研究, 2014 年国家粮食局科学研究院(以下简称“国粮院”)验

证了粮堆多场耦合现象的客观存在^[73-74]；2015—2019年河南工业大学验证了粮堆压力场、密度场的各向异性^[75-77]。通过研究粮堆微生物场行为以及微生物场与温度场、湿度场之间的耦合作用，2020年吉林大学、国粮院和加拿大曼尼托巴大学共同建立了粮堆生物场理论框架，即生物系统中多种生物体共存、生物个体之间以及其与环境之间的相互作用规律^[78]。生物场是指生物体的时空分布以及它与周围环境中的生物体、非生物体之间通过能量、物质、信息交换而相互影响（或被影响）的能力，生物场场强是指生物体在单位空间中利用、转换或消耗能量的能力。生物场场强 P 的单位表示为每立方米空间的每秒焦耳数或瓦特数（ W/m^3 ），表示特定空间中的能量利用/转换/消耗的速率。生物场中的能量 Q 有多种表达形式，如热能 Q_H ；机械能 Q_M （如相变、聚集和分散）；化学能 Q_E （如植物将太阳能转化为淀粉、脂肪、蛋白质、纤维素）；生物生长和繁殖的能量 Q_B ；以及产生或分解有机物质和其他生物体（如有机酸、生物碱和生物毒素）的能量 Q_R 。因此，生物场场强 P 也可表达为不同的场强分量，如热能 Q_H 对应的热转换场强分量为 P_H 。该研究量化了粮堆微生物场的场强，即微生物将谷物中的淀粉转化为热能的速率大小。测量结果表明，粮堆微生物场场强在时空分布上会不断变化，当微生物场与温度场和湿度场耦合作用最强时场强最大，实际测量 P_H 最大值为 $120\sim 133 W/m^3$ 。这是粮堆出现发热现象的基础原因。实验结果表明，不同类型的生物场场强，可以用不同的指示状态变量 ISV（Indicative State Variable）来量化计算。例如粮堆微生物场热转换场强 P_H ，可使用微生物的呼吸热引起的温度变化量（ ΔT ）作为 ISV 进行量化测量计算。

这一理论的价值，不仅在于提供了分析研究粮堆的储藏安全的准确定量方法，还在于为更多涉及生物与环境相互作用的定量研究提供了新的思路。例如在粮食生产领域，碳4作物（如玉米）比碳3作物（如小麦）的光合作用效率高，表明碳4作物的太阳能转化为化学能的生物场强分量 P_E 更强。又如在养殖领域，如何提高肉料比，实际也是如何提高动物蛋白质转换效率的生物场场

强问题。推而论之，在需要加强生物场作用的场合（如种植、饲养、发酵、繁殖等），犹如木桶效应，要力争提升所有有利于生物场耦合因子的“桶板长度”（如适宜的环境参数、营养、种质等），避免出现任何影响生物场耦合强度的短板，因为短板决定了“产量”。在需要抑制生物场作用的场合（如储藏、保鲜等），要有一个以上的环境因子的“桶板”低于生物场出现耦合的下限。通常在粮食储藏中通过控制温度、水分、气体成分等一个或多个因子，或者引入抑制因子，确保粮堆生物场场强处于极低的水平，可以降低有害生物对储粮的转化消耗速率，同时减轻粮食自身品质的劣变。

粮堆生物场和多场耦合理论的研究，将以往对储粮现象的经验归纳提升为科学理论的支撑，从以往的定性判断研究提升为定量预测研究。目前已经获得了阶段性的成果：

1. 基于粮堆温度湿度场云图指纹分析技术的库存实物监控软件系统。由国粮院、吉林大学等研发成功。通过对接已有的粮情检测装备直接导入日常储粮粮情数据，结合七大储粮生态区域长期积累的储粮数据，快速生成直观的储粮粮情云图，通过智能识别策略自动辨别储粮典型特征模态，实现追溯储粮周期内任意阶段的历史安全情况，发出储粮异常情况追溯报警。应用于2018—2019年国务院组织的“政策性粮食库存数量和质量安全大清查”的20个省份试点抽查和复查工作。共筛查899 331组粮情数据，发出异常报警6 110组，经现场核实5 319组，准确率87.6%。目前该项成果已应用于全国各储粮生态区域200多家中央和地方储粮企业日常保粮储粮管理工作。已纳入国家粮食和物资储备局“中央储备粮库存动态监管软件服务系统”的联调。获得1项省部级一等奖和1项行业二等奖^[79-80]。

2. 基于粮堆生物场分析的储粮安全预测预警系统。通过实时状态数据分析，预测未来数十天的动态变化，并发出储粮结露、霉变倾向、虫害等隐患预报预警。该技术在理论和方法上均突破现有行业技术瓶颈，具有准确率高（ $>85\%$ ）、成本低等特点，解决了人为监管和经验保管的成本高、效率低等难题。初步实现了对粮食库存真

实性、储粮安全性、作业合规性和其它问题等的智能管理^[81-83]。

3. 基于激光扫描和粮堆压力场分析技术的库存粮食实物在线监测系统^[84-86]。利用光电技术和机械机构研制了一套通过三维激光扫描、准确定位、自动测量计算粮堆压力场、密度场和体积,进而求出粮食库存数量的远程实时在线监测系统,能够实现粮食库存数量实时监控,尤其是对代储库点的粮食库存数量和进出粮作业情况实现远程实时有效的监控。

4. 基于粮堆积温积湿与生物场耦合分析技术的库存粮食储存质量监测预警系统^[87]。基于粮堆多场耦合理论,以粮食储藏品质关键敏感指标为指征指标,构建储藏期间粮堆生物场与积温、积湿之间关系模型,再结合实仓粮情检测数据和储藏环境气象数据,可追溯历史态、分析实时态和预测未来态的粮食储藏关键品质时空分布,为企业日常储粮管理工作提供技术服务,也为国家宏观调控决策提供依据支撑。

2.3 信息化与人工智能维度的发展

自从 2022 年底 Chat GPT 等生成式人工智能的出现并快速迭代发展,人工智能将在多大程度上替代人类智能?能否超过人类智能?引起许多讨论。1950 年图灵提出“机器思维”的概念,1956 年明斯基、麦卡锡和香农提出“人工智能”(AI)概念,70 多年来人工智能经历了几起几落的发展历程。前期的人工智能主要以“工程学方法”(Engineering Approach)为主,主要特点是根据已经掌握的自然机理和规律建立控制模型和知识库,机器遵循已知的机理模型和知识库数据优化控制生产和作业过程。我们称为“机理驱动”AI。机理驱动 AI 的优点在于能够准确体现自然规律,优化控制过程可识别、可解释、可推导、可迭代。缺点是,许多机理的研究过程和知识库建立的工作量和难度较大,对巨复杂型问题往往使控制逻辑计算量呈指数级膨胀,有时不得不用近似模型或经验模型替代,难以准确适应过多的细节变量和个性化需求。在计算机算力还不能满足需要的情况下,上世纪的 AI 技术发展一度陷入低潮。直到上世纪末,随着计算机算力不断提升,包括

深度学习、神经网络、遗传优化算法、卷积算法、支持向量机算法等大数据挖掘处理方法得以实施,以“机器学习”方法为主的“数据驱动”AI 快速发展,无论是属于归纳寻优问题还是分类判别问题,都能较快找出具体场景控制的最优路径、最优参数、最优判断。数据驱动 AI 的最大特点是:可以在机理不详的情况下找到优化控制的方式或得出优劣判断,可以针对具体场景实现快速个性化优化。但是数据驱动 AI 也有不足,主要是:优化过程多属于“黑箱”过程,由于机理不清,优化控制判断过程可能得不到解释,有时即使是开发者也往往知其然不知其所以然;具体个性问题的解决结果,不一定是同类共性解和全局最优解;对于数据不足、训练目标和价值取向不明确的领域存在判断盲区;目前的 AI 尚缺乏举一反三、触类旁通等人类特有的顿悟性创造性思维。

粮食行业的人工智能应用也是在这种背景下发展起来的。1998 年开始全面推广的“四合一”储粮新技术,将计算机粮情检测技术纳入粮库基本配置,其中的通风智能控制技术将粮食平衡水分算法纳入控制系统,代替了有经验的管理人员,提升了储粮通风的效率。“四合一”技术中的人工智能就属于“机理驱动”AI。在此基础上,通过二十多年不断发展,粮食行业目前已经建设成了覆盖全国近千个仓库、拥有 400 多万个粮情传感器和 8 万多个监控探头的粮食物联网,部分采用了库存识别代码物联技术,为保障库存粮食数量真实和质量可靠提供了较好的信息化硬件基础。粮食领域许多学者和工程人员研究了大量粮食储藏和加工等机理问题,除了智能控制通风以外,还开发了智能控制干燥^[88-89]、CFD 算法粮情分析技术^[69,90-91]、智能控制加工^[92-93]等技术。但是由于机理驱动 AI 技术自身的局限性,粮食 AI 的发展也一度陷于瓶颈。例如储粮温度的智能测报问题,全国数十万粮仓的结构不同、气候环境不同,每个粮堆内部不同深度和点位温湿度的变化都有各自的细节规律,要找到各自细节规律以实现逐点、逐时地精确描述判断或预测所有点位粮情是否正常,往往就形成巨复杂型问题,是粮库计算机系统难以承受和普及的。另一方面,在数据驱

动 AI 的应用上,北京邮电大学、吉林大学等应用 BP 神经网络、NARX 神经网络、支持向量机模型、粒子群算法、遗传优化算法、模糊免疫 PID 控制等多种不同数据驱动 AI 技术,对粮食干燥控制做了对比应用^[94-96],虽然对所研究的特定干燥设备取得了较好的优化控制效果,但是算法结果不通用,对不同干燥设备需要重新训练。

归纳了粮食领域应用 AI 技术的情况和特点,于 2019 年在长春举行的首届粮食人工智能国际研讨会上提出了机理驱动 AI 和数据驱动 AI 相结合的“机理+数据”双驱动 AI 的理念^[97]。双驱动 AI (又称为“联合驱动 AI”)是指在一个控制过程中同时结合使用机理驱动 AI 和数据驱动 AI,两种 AI 优势互补,取长补短,更好地优化控制。根据双驱动 AI 的思路,目前在粮食领域人工智能的应用获得一批阶段性成果:

1. 在粮食干燥控制方面,吉林大学、北京邮电大学等通过干燥模型机理驱动 AI 优化烘干机总体控制过程,再通过“窗口”数据驱动 AI 的自动学习实现个性优化,接通同类机型控制模型共性与具体设备个性贴合的最后一公里^[98-100]。

2. 在储粮通风控制方面,国粮院、吉林大学通过机理驱动 AI 解决通风平衡水分共性规律问题,再由数据驱动 AI 贴合每个粮仓不同通风特性,解决控温与保水双目标同时实现问题^[101]。

3. 在粮情测控方面,国粮院采用机理驱动归纳全国各地气候规律,再使用数据驱动 AI 自学习功能,使吻合每个粮仓与测量点位的特点,实现粮仓不同点位安全性的准确测报^[102-103]。

4. 在害虫图像识别方面,北京邮电大学开发的粮仓储粮害虫识别系统,克服了以往图像识别技术在粮仓视频球机现场应用中存在的害虫图像像素低、姿态复杂、遮挡率高等难点,运用卷积图像识别技术与害虫活动机理结合^[104-105],识别准确率大幅度提升。

5. 在库存实物监管方面,吉林大学、国粮院在储粮生态学和粮堆多场耦合理论指导下,建立变化机理模型。利用神经网络对大量的空仓、新粮、通风、半仓、发热时的温度场云图样本进行训练,对新获取的历史粮情数据进行分析判断。通过双驱

动 AI 智能分析方法^[106-109],实现各种不同类型储粮状态的检测判断,对储粮异常状态发出预警。

6. 在全产业链管理方面,吉林大学提出了优质稻谷囤收储期作业 5T 事联管理方法和标准^[110],基于“机理+数据”双驱动 AI 的理念,结合事联码、库存识别代码、自然区块链等技术构建了全程溯源管控信息系统,其应用具有提升稻谷食味品质、减低产后损失、提升品牌价值、增强产业竞争力等多重效益。益海嘉里结合 5T 管理推出了稻谷“六步鲜米精控技术”创新体系^[111],在吉林、黑龙江、辽宁、江苏和江西等省开展了示范应用,2022 年获得中国粮油科学技术特等奖^[112]。

随着物联网、移动互联、区块链、云计算、大数据、人工智能等为代表的新一代信息技术的发展,粮库管理从传统以数据联网和管理数据统计分析为特征的“数字粮库”向具有智能控制、专家辅助决策等功能的“智能粮库”推进;并进一步向以全粮食产业链的监测、追溯、控制、管理、服务和监管等一条龙整体智能优化的“智慧粮食”加速发展,为全面提升粮食产业的管理水平提供了新契机。

3 讨论与展望

从要解决的问题看,粮食产自千村万户,源头品质参差不齐;流通渠道千变万化,掺杂使假多有发生;天下粮仓点多面广,库存真实牵动社稷;粮食质量、绿色、低碳、环保、减损的水平与人民生活水平提高和粮食安全的需求还不完全适应;各层级粮食部门在粮库现代化建设取得一定成效的同时,也存在管理和科技提升未能覆盖全链条的不足;与其他工业和流通领域相比,粮食领域的高技术和人工智能应用起步较晚,人才、理论支撑、技术应用和装备水平仍然处于“科技洼地”。

从解决问题的方法看,中国粮食储藏科技的发展要从两个方面突破。

一是发展战略层面。要通过科技提升粮食流通系统管理能力。首先是提升管理的“技防”水平和智能追溯、反欺诈能力,确保粮食数量和质量数据真实,为国家粮食安全提供保障条件。其次是提升企业和产业链各个环节(包括收获、清

理、干燥、储藏、运输、加工、销售等)的精准质量控制能力,消除管理短板;将粮食质量、绿色、低碳、环保、减损目标结合推进,提升粮食产业综合效率和可持续发展能力。在顶层设计上,关键是突破不同管理层级、不同类型企业系统存在的大量“信息孤岛”,重构以人工智能应用为主导的粮食流通产业链管理框架体系。在组织实施上,仍然要继续开展对重大粮食科技难题和“卡脖子”问题的行业攻关。要力争恢复粮食公益专项等定向支持。

二是科学理论和技术方法层面。粮食“科技洼地”也有优势,就是“技术平移”优势和交叉学科突破优势。其他领域的先进技术“平移”到粮食“洼地”容易形成覆盖式突破;粮食领域空白区域多、学科交叉多,是边沿科学理论创新、技术创新的肥沃“试验田”。生物场和多场耦合理论被称为粮食领域的科学创新,“数据+机理”双驱动 AI 是粮食行业首先提出的人工智能方法创新,都来自于粮食的“洼地”和“试验田”。运用好粮食领域“技术平移”优势和交叉学科突破优势,加快吸引人才、推进理论创新和技术迭代,中国粮食储藏科技的发展将步入高速路。

参考文献:

[1] 任志杰,关延生,吴子丹,等.中国粮食储藏大全[M].重庆:重庆大学出版社,1994.

[2] 姚磊,温朝晖.“四无粮仓”活动促进粮食仓储科技创新[J].粮油食品科技,2013,21(5):114-115.

[3] 吴子丹.储粮机械通风的计算机控制[J].粮食储藏,1987(4):28-31.

[4] 吴子丹,王元会.储粮通风自动判断控制系统[P].中国:CN1011163B,1991.

[5] 2010 年度国家科学技术进步奖获奖项目 https://www.most.gov.cn/cxfw/kjilcx/kjil2010/201101/t20110117_84334.html.

[6] 国家粮食局科学研究院.粮食“四合一”储藏技术升级背景与应用效果[J].粮油食品科技,2015,23(S1):1-3.

[7] 陈锐,陈二虎,唐培安,等.氮气气调对五种储粮害虫防治效果评估及磷化氢交互抗性的研究[J].粮食科技与经济,2019,44(8):45-48.

[8] 乐大强,潘增利,李国斌,等.高大平房仓氮气气调与空调控温储粮应用[J].粮油仓储科技通讯,2020,36(6):1-4.

[9] 王艺.房式仓环流均温及环流熏蒸的数值模拟研究[D].济南:山东建筑大学,2022.

[10] 吴子丹.绿色生态低碳储粮新技术[M].北京:中国科学技术

出版社,2011.

[11] 吴子丹,李兴军.利用 CAE 方程调控我国稻谷仓库通风[J].中国粮油学报,2011,26(2):74-78.

[12] 李兴军,吴子丹.粮堆平衡绝对湿度和露点温度的查定方法[J].粮食加工,2011,36(4):34-37.

[13] 李兴军,吴子丹,季振江,等.小麦平衡水分测定及实仓智能化降温通风试验[J].中国粮油学报,2017,32,(11):94-99.

[14] 程树峰,唐芳,伍松陵.小麦储藏安全水分的研究[J].中国粮油学报,2011,26(1):88-91.

[15] 唐芳,程树峰,欧阳毅,等.储藏水分、温度和真菌生长对小麦发芽率的影响[J].粮食储藏,2014,43(4):44-47.

[16] 唐芳,程树峰,欧阳毅,等.储存水分、温度和真菌生长对大豆品质的影响[J].粮油食品科技,2016,24(3):74-78.

[17] 唐芳,程树峰,张海洋,等.稻谷储藏真菌危害早期预测的研究[J].粮食储藏,2015,44(1):24-27+32.

[18] 程绪铎,严晓婕,徐鑫.稻谷堆的压缩密度与体变模量的测定与分析[J].中国粮油学报,2014,29(8):101-105+110.

[19] 田晓红,李光涛,张淑丽.谷物自然休止角测量方法的研究[J].粮食加工,2010,35(1):68-71.

[20] 程龙,曹阳,李光涛,等.圆球导热法测定粮食导热系统研究[J].中国粮油学报,2009,24(10):89-93.

[21] 田晓红,李光涛.粮食孔隙率测定方法探讨[J].粮食加工,2009,34(5):35-37+45.

[22] 祁智慧,周欣,张海洋,等.中国稻谷可培养真菌群落组成及多样性[J].菌物学报,2020,39(4):683-694.

[23] 祁智慧,张海洋,田琳,等.北方储藏稻谷真菌多样性分析[J].中国粮油学报,2020,35(5):122-129.

[24] 祁智慧,张海洋,田琳,等.粮食真菌群落组成及多样性研究进展[J].中国粮油学报,2022,37(5):24-31.

[25] 张玉荣,张婷婷,王游游,等.加速陈化对稻谷储藏品质和糊化特性的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2021,42(3):85-92.

[26] 孙辉,包金阳,张蕊,等.糙米在不同温度储藏中脂肪酸的变化[J].粮油食品科技,2014,22(3):102-105.

[27] 洪宇,常柳,段晓亮,等.强筋小麦氮气气调启封后品质变化规律研究[J].粮油食品科技,2023,31(2):124-130.

[28] 洪宇,段晓亮,商博,等.东北褐变玉米品质变化及影响褐变的因素[J].中国粮油学报,2020,35(3):23-29.

[29] 綦文涛,陈文若,陈银基,等.大麦功能活性物质含量与抗氧化活性的关系[J].中国食品学报,2018,18(11):232-239.

[30] WU Y, LAN Y M, XIA L Y, et al. The first complete mitochondrial genomes of two sibling species from nitidulid beetles pests[J]. Insects, 2020, 11, 24.

[31] 吴志刚,李文欣,赵紫华,等.中国储粮害虫 DNA 条形码鉴定系统研究[J].中国农业大学学报,2017,22(5):82-89.

[32] 孟宏杰,张婷,唐培安,等.硅藻土对 5 种储粮害虫和不同磷化氢抗性水平杂拟谷盗防治效果的研究[J].植物保护,2020,46(6):240-245.

[33] 单常尧,曹阳,陈鑫,等.储粮害虫磷化氢抗性检测设备及应用研究[J].中国粮油学报,2020,35(5):152-158.

[34] 吴芳,严晓平.储粮害虫 PH₃ 抗性机理及分子监测研究进展

- [J]. 粮食储藏, 2011, 40(3): 8-13.
- [35] 程玉, 曾伶. 储粮害虫磷化氢抗性分子遗传学研究进展[J]. 粮食储藏, 2016, 45(1): 5-10.
- [36] LIU N N. Insecticide resistance in mosquitoes: impact, mechanisms, and research directions[J]. Annual Review of Entomology, 2015, 60(1): 537-559.
- [37] 王珂慧, 郭超, 刘艳丽, 等. 多杀菌素类杀虫剂的应用及抗性研究进展[J]. 世界农药, 2022, 44(2): 18-24.
- [38] 李能威, 张晓琳, 郭伟群, 等. 多杀菌素防治储粮害虫的研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2011, 27(3): 400-403.
- [39] 吴若旻, 王殿轩, 姜雪, 等. 多杀菌素对储粮害虫谷蠹磷化氢抗性和敏感品系的毒力比较[J]. 河南农业大学学报, 2010, 44(2): 202-205.
- [40] 薛丁榕, 孙为伟, 王超, 等. 基于负压通风的多杀菌素粉剂实仓喷施工艺研究[J]. 河南工业大学学报(自然版), 2022, 43(5): 102-107.
- [41] 伍祎, 曹阳, 贺培欢, 等. 马六甲肉食螨的饲养方法及应用[P]. 中国: ZL201811381636.X, 2021.
- [42] 贺培欢, 张涛, 伍祎, 等. 普通肉食螨对9种储粮害虫的捕食能力研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(11): 112-117.
- [43] SUN W W, CUI M, XIA L Y, et al. Age-stage, two-sex life tables of the predatory mite cheyletus malaccensis oudemans at different temperatures[J]. Insects 2020, 11, 181.
- [44] 谢刚, 王松雪, 张艳. 超高效液相色谱法快速检测粮食中黄曲霉毒素的含量[J]. 分析化学, 2013, 41(2): 223-228.
- [45] 谢刚, 叶金, 吴宇, 等. UPLC-Quadrupole/Orbitrap HRMS 同时测定玉米中多种真菌毒素和农药残留[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(3): 126-133.
- [46] 陈金男, 叶金, 郭旭光, 等. 免疫磁珠高通量自动净化-超高效液相色谱法测定粮食中玉米赤霉烯酮[J]. 食品科学, 2021, 42(22): 318-323.
- [47] 孙长坡. 粮食中真菌毒素毒素脱除与卫生污染物监控技术研究[J]. 科技成果管理与研究, 2020, 164(6): 65-67.
- [48] 孙长坡, 代岩石, 王松雪, 等. 利用生物技术消减、防控粮食及其制品中的真菌毒素[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(11): 97-101.
- [49] WANG S J, FU W, ZHAO X Y, et al. Zearalenone disturbs the reproductive-immune axis in pigs: the role of gut microbial metabolites[J]. Microbiome, 2022, 10(1): 1-24.
- [50] CHANG X J, LIU H J, SUN C P, et al. Zearalenone removal from corn oil by an enzymatic strategy[J]. Toxins, 2020, 12(2): 117-131.
- [51] ZHANG W, WANG J, DOU J P, et al. A novel investigated method for decoupling adsorption and degradation effect on AFB1 based on isotope tracing and NMR analysis[J]. Food Chemistry, 2022, 405: 1-10.
- [52] JIANG L X, GU X N, SUN C P, et al. Improved production of recombinant carboxylesterase FumDM by co-expressing molecular chaperones in Pichia pastoris[J]. Toxins, 2023, 15(2): 1-16.
- [53] CHANG X, WU Z, SUN C, et al. Degradation of ochratoxin A by Bacillus amyloliquefaciens ASAG1[J]. Food additives & contaminants, 2015, 32(4): 564-571.
- [54] LI T T, HUANG S M, WANG J, et al. Alginate oligosaccharides protect against fumonisin B1-induced intestinal damage via promoting gut microbiota homeostasis[J]. Food Research International, 2022, 152: 1-12.
- [55] BAI X J, SUN C P, XU J, et al. Detoxification of zearalenone from corn oil by adsorption offunctionalized GO systems[J]. Applied Surface Science, 2017, 430: 198-207.
- [56] BAI X J, SUN C P, LIU D, et al. Photocatalytic degradation of deoxynivalenol using Graphene/ZnO hybrids in aqueous suspension[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, 204: 11-20.
- [57] YAO L T, SUN C P, LIN H, et al. Enhancement of AFB1 removal efficiency via adsorption/photocatalysis synergy using surface modified electrospun PCL-g-C3N4/CQDs membranes[J]. Biomolecules, 2023, 13(3): 1-18.
- [58] WON W, TRAN L G, PARK W, et al. UV-LEDs for the disinfection and bio-sensing applications[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19(12): 1901-1915.
- [59] ISLAM M S, PATRAS A, POKHAREL B, et al. Effect of UV irradiation on the nutritional quality and cytotoxicity of apple juice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(41): 7812-7822.
- [60] BHULLAR M S, PATRAS A, KILANZO-NTHENGE A, et al. Microbial inactivation and cytotoxicity evaluation of UV irradiated coconut water in a novel continuous flow spiral reactor[J]. Food Research International, 2018, 103(1): 59-67.
- [61] 孙长坡, 常晓娇, 伍松陵, 等. 利用 PCR-RFLP 方法鉴别黄曲霉毒素产毒菌株[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3675-3683.
- [62] ZHANG W, DOU J P, WU Z D, et al. Application of non-aflatoxigenic aspergillus flavus for the biological control of aflatoxin contamination in China[J]. Toxins, 2022, 14(10): 1-12.
- [63] ZHANG W, CHANG X, WU Z, et al. Rapid isolation of non-aflatoxigenic Aspergillus flavus strains[J]. World Mycotoxin Journal, 2020, 13(2): 277-286.
- [64] 宋伟, 靳祖训, 王海鹏. 中国储粮生态系统研究进展[J]. 粮食储藏, 2009, 38(1): 16-21.
- [65] 李隆术. 粮堆生态系统[J]. 粮食储藏, 1982, 82(4): 13-19.
- [66] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 粮油储藏技术规范: GB/T 29890—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [67] 吴子丹, 赵会义, 曹阳, 等. 粮食储藏生态系统的仿真技术应用研究进展[J]. 粮油食品科技, 2014(22): 1-6.
- [68] 张忠杰, 李琼, 杨德勇, 等. 准静态仓储粮堆温度场的 CFD 模拟[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(4): 46-50.
- [69] 彭威, 张忠杰, 任广跃, 等. 仓储粮堆温度场 CFD 模拟应用研究[J]. 粮油食品科技, 2011, 19(6): 5-8.
- [70] 王远成, 张忠杰, 吴子丹, 等. 计算流体力学技术在粮食储藏中的应用[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(5): 86-91.
- [71] JIAN F J, DIGVIR S J, NOEL D G W, et al. Two-dimensional diffusion of Cryptolestes ferrugineus (Stephens) (Coleoptera: Laemophloeidae) populations in stored wheat under constant

- environmental conditions[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2006, 43(4): 342-348.
- [72] JIAN F J, TANG P A, MD. ABDULLAH AL MAMUN, et al. Effect of field treatment on microfloral respiration and storability of canola under different storage conditions[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2019, 10(11): 1989-2001.
- [73] 尹君, 吴子丹, 吴晓明, 等. 基于温湿度场耦合的粮堆离散测点温度场重现分析[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(12): 95-101.
- [74] 王小萌, 吴文福, 尹君, 等. 玉米粮堆霉变发热过程中的温湿度场变化规律研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 268-273.
- [75] 张达, 郑德乾, 陈桂香, 等. 高大平房仓散装粮堆压力场 FLAC^{3D} 数值模拟[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(6): 98-103.
- [76] 陈家豪, 陈桂香, 刘文磊, 等. 平底筒仓 Janssen 公式中储料特征高度的测定及其变化规律[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 307-316.
- [77] 徐启铿, 揣君, 曹宇飞, 等. 散粮堆底部压力颗粒流数值模拟分析[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(9): 126-130.
- [78] WU Z D, ZHANG Q, YIN J, et al. Interactions of multiple biological fields in stored grain ecosystems[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 9302.
- [79] 吉林省人民政府关于 2022 年度吉林省科学技术奖励的决定 https://xxgk.jl.gov.cn/szf/gkml/202212/t20221209_8646141.html.
- [80] 关于表彰 2020 年度中国粮油学会科学技术奖获奖项目的决定 <https://www.ccoaonline.com/News/show/id/464.html>.
- [81] 张忠杰, 尹君, 吴晓明, 等. 粮情云图动态分析软件系统研发与应用[J]. *粮油食品科技*, 2020, 28(1): 94-99.
- [82] 崔宏伟, 吴文福, 吴子丹, 等. 基于粮温时空性关性的储粮数量监管方法研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 321-330.
- [83] 吴文福, 张记, 徐文, 等. 基于 NMR 的粮仓多场耦合图形化探测系统研究[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(2): 66-73.
- [84] 吴才章, 许启铿, 王录民. 一种手持式粮食库存数量检测仪器的设计[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(4): 107-112.
- [85] 许启铿, 刘永超, 袁庆利, 等. 基于进出仓作业频繁的筒仓散粮堆平均密度计算方法研究及应用[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(2): 27-32.
- [86] 许启铿, 周晓军, 吴强, 等. 便携式粮食库存数量检测设备研发及应用[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(2): 41-46.
- [87] 尹君, 吴子丹, 张忠杰, 等. 一种基于粮情数据的粮食储藏品质变化规律的研究方法[P]. 中国: CN202210449582.6, 2022-9-22.
- [88] 王桂英, 韩峰, 刘哲, 等. 农产品能源循环节能干燥工艺智能实验系统的研究[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(2): 90-96.
- [89] JIN Y, YIN J, XIE H H, et al. Reconstruction of rice drying model and analysis of tempering characteristics based on drying accumulated temperature[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11, 11113.
- [90] 王远成, 余海, 杨开敏, 等. 仓储稻谷热湿耦合传递及黄变的数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(4): 297-307.
- [91] WANG Q Y, FENG J C, HAN F, et al. Analysis and prediction of grain temperature from air temperature to ensure the safety of grain storage[J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1): 1200-1213.
- [92] 戴智华, 黄文雄, 程科, 等. 一种新型柔性智能碾米机[J]. *粮食与饲料工业*, 2022(3): 4-6.
- [93] 熊治文. PLC 技术在粮食加工中的应用——评《粮食制品加工工艺与配方》[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(5): 169.
- [94] 代爱妮, 周晓光, 刘相东, 等. 基于 BP 神经网络的旁热式辐射与对流粮食干燥过程模型[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 351-360.
- [95] 聂放, 周晓光, 代爱妮, 等. 基于遗传算法优化的模糊 PID 控制在粮食干燥中的应用[J]. *软件*, 2017, 38(12): 37-41+60.
- [96] JIN Y, WONG K W, YANG D Y, et al. A neural network model used in continuous grain dryer control system[J]. *Drying Technology*, 2021, 40(9): 1901-1922.
- [97] 吴子丹, 张强, 吴文福, 等. 我国粮食产后领域人工智能技术的应用和展望[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(11): 133-139+146.
- [98] LIU Z, WU Z D, WANG X M, et al. Numerical simulation and experimental study on deep bed corn drying based on water potential[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015: 1-13.
- [99] 吴玉柱, 付大平, 尹慧敏, 等. 基于多参数调控薄层干燥实验的玉米积温数学模型及工具图表的建立[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(8): 114-120.
- [100] 韩峰, 吴文福, 刘哲, 等. 粮食连续干燥工艺及过程控制模拟实验系统[J]. *粮油食品科技*, 2022, 31(2): 83-89.
- [101] 吴文福, 陈思羽, 吴子丹, 等. 基于绝对水势图的储粮通风作业管理初探[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(11): 100-107.
- [102] 尹君, 吴子丹, 张忠杰, 等. 基于多场耦合理论浅析浅圆仓局部结露机理[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(5): 90-95.
- [103] WU W F, CUI H W, HAN F, et al. Digital monitoring of grain conditions in large-scale bulk storage facilities based on spatiotemporal distributions of grain temperature[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 210(43): 247-260.
- [104] 刘思琪, 李江涛, 周慧玲, 等. 基于视频目标跟踪算法的储粮害虫活跃程度判别研究[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(11): 179-186.
- [105] 苗海委, 周慧玲. 基于深度学习的粘虫板储粮害虫图像检测算法的研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(12): 93-99.
- [106] 崔宏伟, 吴文福, 吴子丹, 等. 基于粮温统计特征的粮仓库存状态检测方法[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 320-330.
- [107] 吴文福, 乌云山丹, 陈凯, 等. 机理/数据联合驱动储备粮数字监管智能方法[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(2): 11-17.
- [108] 卢延辉, 李欣泽, 吴文福, 等. 粮情智能分析基础数据手册的开发[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(2): 47-55.
- [109] 吴文福, 张记, 徐文, 等. 基于 NMR 的粮仓多场耦合图形化探测系统研究[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(2): 66-73.
- [110] 吴文福, 张娜, 李姝晓, 等. 5T 智慧农场管理系统构建及应用探索[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 340-349.
- [111] 吴文福, 张娜, 李姝晓, 等. 事联管理方法及其智慧化在粮食围收储期的应用[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(2): 18-26.
- [112] 关于表彰 2022 年度中国粮油学会科学技术奖获奖项目的决定 <https://www.ccoaonline.com/News/show/id/667.html>. 