

吴文福教授主持“智慧粮食基础探索”特约专栏文章之一/“新理念和新方法”分栏文章之一

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.02.001

吴文福, 王雨佳, 李姝晓, 等. 粮仓哲学——对储粮科技走向智慧化的哲学思考[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 1-10.

WU W F, WANG Y J, LI S Y, et al. Granary philosophy—philosophical thinking on the intelligence of grain storage science and technology[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 1-10.

# 粮仓哲学

## ——对储粮科技走向智慧化的哲学思考

吴文福<sup>1,2</sup>, 王雨佳<sup>1</sup>, 李姝晓<sup>1</sup>, 刘哲<sup>1</sup>, 王锐<sup>1</sup>, 吴子丹<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>1,3</sup>

(1. 吉林大学 生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 吉林工商学院 粮食学院, 吉林 长春 130507;

3. 曼尼托巴大学 生物系统工程系, 加拿大 曼尼托巴 MB 3T 5V6)

**摘要:**关于科学技术影响认知变化的探索由来已久, 分别形成科学哲学和技术哲学。我国储粮技术发展, 经历了改革开放前的初探、改革开放后 30 年的现代化粮仓建设以及近 10 年数字化智能化开创等 3 个阶段。从以“四合一”储粮新技术为主构建现代化粮仓, 到以信息技术形成世界上最大的粮食物联网、原创粮堆多场耦合及生物场理论、以粮情云图扫描技术实现储备粮动态监管等, 中国储粮的科技进步有目共睹。新时期面临百年未有之大变局、中国第二个百年奋斗目标对粮食安全的新要求以及第四次工业革命带来的冲击, 粮食科技智慧化的趋势越来越显著。从我国近 40 多年储粮实践科技成果积累, 结合团队对粮堆多场耦合和生物场理论、储备粮云图动态监管、粮食围收储自然区块链 5T 事联信息化管理以及粮食干燥智能 EAT 窗口测控方法等的研究, 尝试在解构储粮系统三元微结构的基础上, 以“一分为二、二分为三、三生变化”为基本思想, 以机理、数据等联合驱动为智慧化策略, 引入粮仓哲学, 以提升对已有科技成果的认知高度、指导新时期储粮科技智慧化的探索, 为构建高质量的智慧粮食体系提供支撑。粮仓哲学是对储粮实践情景的深度思考, 源于储粮实践, 但不限于储粮实践, 具有一定的普适性。

**关键词:** 储粮实践; 智慧粮食; 情景哲学; 粮仓哲学; 多场耦合理论

中图分类号: TS205 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)02-0001-10

网络首发时间: 2023-03-09 14:42:21

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20230309.1053.016.html>

### Granary Philosophy

#### ——Philosophical Thinking on the Intelligence of Grain Storage Science and Technology

WU Wen-fu<sup>1,2</sup>, WANG Yu-jia<sup>1</sup>, LI Shu-yao<sup>1</sup>, LIU Zhe<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, WU Zi-dan<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>1,3</sup>

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China;

2. School of Grain Science and Technology, Jilin Business and Technology College, Changchun, Jilin 130507,

China; 3. Department of Biosystems Engineering, University of Manitoba, Manitoba MB 3T 5V6, Canada)

收稿日期: 2022-12-19

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0401001; 2017YFD0401003-3; 2017YFD0401004-3)

Supported by: National Key Research and Development Project of China (No. 2016YFD0401001; 2017YFD0401003-3; 2017YFD0401004-3)

作者简介: 吴文福, 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 研究方向为粮食干燥与储藏方向的研究。E-mail: wwfzlb@126.com. 本专栏背景及作者详细介绍见 PC6-PC12.

**Abstract:** The influence of science and technology on cognitive change has a long history, which lead to forming philosophy of science and philosophy of technology respectively. The development of grain storage technology in China has gone through three stages: the initial exploration before the reform and opening up, the construction of intelligence in the past 10 years modern granaries in 30 years after the reform and opening up, and the creation of digital. The scientific and technological progress of grain storage in China has been witnessed by all, including building a modern granary with "four in one" new grain storage technology, to forming the world's largest grain and food networking with information technology, original multi-field coupling and bio-field theory, and realizing the dynamic supervision of grain reserves with grain cloud image scanning technology. In the new era, the political and economic situations have not changed significantly in the past century, and the new requirements of China's second centenary goal for food security and the impact of the fourth industrial revolution have made the trend of food science and technology becoming more and more intelligent. Based on the accumulation of scientific and technological achievements in grain storage practice for more than 40 years in China, combined with the team's research on multi-field coupling and bio-field theory of grain storage, dynamic supervision of cloud image of grain reserves, 5T information management of natural block chain for grain storage, and intelligent EAT window measurement and control methods for grain drying, this paper attempted to take the basic idea of "one divides into two, two divides into three, and three generates changes" on the basis of deconstructing the micro and macro ternary microstructure of grain storage system. Taking the joint driving of mechanism and data as the intelligent strategy, the granary philosophy is introduced to improve the recognition of existing scientific and technological achievements. The granary philosophy also guided the exploration of grain storage technology in the new era, and provided support for building a high-quality intelligent food system. The granary philosophy is a deep reflection on the practical situation of grain storage, and has certain universality, which originates from grain storage practice, but is not limited to grain storage practice.

**Key words:** grain storage practice; smart grain; scenario philosophy; granary philosophy; multi field coupling theory

十八大以来,我国提出了“确保谷物基本自给、口粮绝对安全”的新粮食安全观,走出了一条中国特色粮食安全之路<sup>[1]</sup>。2018 年全国共有标准粮食仓房仓容 6.7 亿 t, 简易仓容 2.4 亿 t。2017 年,全国粮食物流总量达到 4.8 亿 t, 其中跨省物流量 2.3 亿 t。这些成就的取得离不开科技进步的支撑。而在历史上很长时间,我国的储粮实践主要依赖于经验,科学技术的成分很低。改革开放后,在国家主导下开始建设现代化粮仓体系,以“四合一”储粮新技术这一集成创新成果,实现了较高水平的设施化和机械化,取得了粮食行业至今唯一的国家科技进步一等奖(2010 年)。2010 年以后国家又启动实施粮安工程等项目,推动储粮的数字化和智能化,建成了世界上最大的粮食物联网,特别发展了储粮生态多场耦合理论及其

智能策略,其中“云图动态储备粮监管系统”在国务院组织的清仓查库专项中被全国 20 省应用,是一个标志性的科技进步<sup>[2-3]</sup>。然而,中国储粮实践以科技进步取得成就的同时,思想认知是否同步发生变化?在实践中,科技进步和思想认知往往不同步,有时是先知先觉,有时是后知后觉,但科技进步和思想认知具有如量子一样的纠缠和互补效应。目前粮食行业更多的关注了粮食科技进步以及产生的效应,少有梳理和总结科技进步引发的思想认知变化,也少有从思想认知去开拓未来粮食科技发展路线。

新时期在第四次工业革命的背景下,我国粮食安全战略对粮食科技又提出了新的要求,一方面要在任何突发条件下保障粮食的安全供给;另一方面要保障从“吃得饱”向“吃得好”、“吃得

营养健康”战略转移。以信息新技术，引导粮食科技走向智慧化是一个必然的结果。本文在“情景哲学”概念基础上，尝试引入了粮仓哲学，以提升对已有科技成果的认知高度、指导新时期储粮信息化和智能化的探索。

## 1 情景哲学定义、本质和特点

关于科学技术影响认知变化的思考由来已久。1840年，英国学者威廉·休厄尔的著作《科学归纳哲学》面世，标志着科学哲学的诞生<sup>[4]</sup>。1877年，卡普(E. Kapp)出版了《技术哲学概要》一书，被认为是技术哲学的创始人<sup>[5]</sup>。20世纪早中期，发轫于量子论、相对论诞生的物理学革命，建立在来自观察实验事实基础上的实证主义哲学思潮，共同推动了一场科学技术哲学运动。20世纪70年代之后，科学、技术与社会相互关系的研究渐成热门，再一次加快了科学史、科学哲学和科学社会学的学科建设。发展至今，在国际上科学技术哲学已经应用于许多研究领域并茁壮成长。在中国，科学技术哲学是1978年改革开放以后才开始的，但创造了非常光荣的历史，它是中国社会发展新思维的重要提供者，是中国社会变革的参与者，在改革开放中发挥了重要作用<sup>[6]</sup>。然

而，粮食科技领域关于科学哲学和技术哲学的研究少有报道。其中原因可能是科学哲学和技术哲学太宏观和太哲学化，粮食科技又太微观、太专业，这是本文试图以情景哲学为基础，探索粮仓哲学的缘由。

### 1.1 情景哲学的定义

情景即现实中的具体，如事情、事件、案例等。情景哲学是对情景的深度思考和实践，超越情景本身，是具体性和抽象性的统一。情景哲学在自然辩证法(含科学哲学和技术哲学)的指导下，直接挖掘情景中蕴含的、具有一定的、普适性道理，可为新的科学研究和工程实践提供原则性和方法性的指导，避免科学研究进入歧路和长时期的瓶颈。

### 1.2 情景哲学的本质

情景哲学的本质是对特别事物本质认知的阶段性升华。认识特别事物的过程往往是从自然情景、事例或者人为选择和设计的案例出发，通过观察和分析其中性质和道理，升华对事物的认知并抵达专门科学，进而形成科学体系。升华对事物的认知并抵达专门科学的思考，即情景哲学。情景哲学与情景的关系见图1。

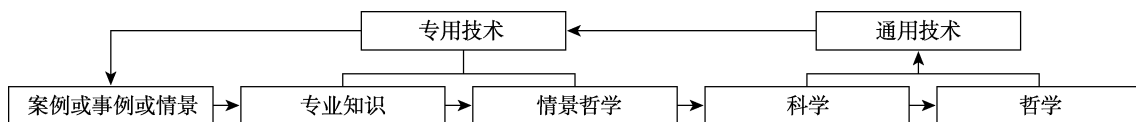


图1 情景与情景哲学的关系

Fig.1 Relationship of scenarios with situational philosophy

### 1.3 情景哲学的特点

情景哲学具有七个鲜明的特点，一是结合了自然辩证法的思辨方式，但不限于自然辩证法对实际自上而下的指导，而更多的是自下而上的感悟以及由此及彼的启发；二是情景哲学注重对科学技术成果中的“1+1>2”即涌现性的挖掘，更体现整体性和系统性思维的特性；三是情景哲学从实际案例和事件出发，以更鲜活、更简明和更友好的方式进行思想认知的表达和传播；四是情景哲学具有东方文化特质，注重知行不二，行中求知，知后促行；五是情景哲学是原则性与方法性的结合，原则性是为问题规定了适用范围，方

法性是指明解决问题的方向；六是情景哲学是“具体的抽象”和“抽象的普适”，如同中国香港的经济学家张五常建立的“佃农理论”<sup>[7]</sup>；七是情景哲学具有多维性和统一性的协调，既可以不同角度凝练出不同思想，又可以把思想不同维度和不同案例由此及彼地协调。

## 2 我国储粮实践理念的演变

到目前，我国储粮实践理念的演变<sup>[7-9]</sup>，已经历三个阶段，正处于第四阶段。

第一阶段，从20世纪40年代至70年代，是生态理念的初探阶段。李隆术在20世纪70年代提出了粮堆生态系统的理念<sup>[10]</sup>，即“粮堆是一个

由多种生物和非生物有机结合，相互联系，具有一定功能的封闭型生态系统，必须全面研究系统内矛盾的各个方面及其联系，包括：粮堆内生物群落（虫、螨、霉等）的一般结构、数量特征和分类；它们与其它因子的相互关系；系统的物质转换和能量流动规律等。通过综合分析、协调管理才能控制粮堆向有利的方向发展。”

第二阶段，从 20 世纪 80 年代至 90 年代，是生态理念的形成阶段。在这一时期内，许多学者都对生态储粮系统展开深入思考和研究<sup>[11-12]</sup>。靳祖训在 90 年代末期提出<sup>[13]</sup>：“粮食储藏科学技术必须以经济伦理——科技伦理——可持续发展战略为指导”；储粮生态系统理论是“生态储粮”、“绿色储粮”的基础，最大限度地保护和利用人类食物资源、最大限度地保护人类生存环境、最大限度地提高人类生存质量。

第三阶段，主要本世纪前 10 年，是生态理念的应用实践阶段。在生态储粮理论的支持下，集成创新了粮情检测、机械通风、环流熏蒸和谷物冷却“四合一”储粮新技术体系<sup>[14-21]</sup>，系统地解决了我国粮食储备特有的仓型大、粮堆高、储期长的技术难题，使我国储备粮库的技术装备水平实现了向现代化的整体跨越。

第四阶段，从 2010 年以来是生态理念深化与信息技术和生物技术结合的阶段。这一阶段以将生态储粮理念提升为粮堆多场耦合及生物场理论为标志<sup>[22-27]</sup>，更大范围和更深层次的引入信息化技术和生物工程技术，如以粮仓云图动态扫描技术完成储备粮跨单位跨地区的动态实时监管<sup>[2-3,28-30]</sup>。

### 3 对我国储粮实践理念的再解构

#### 3.1 储粮系统的生态性

如图 2<sup>[19]</sup>，储粮系统是一个封闭或半封闭生态系统，主要由粮仓围护结构、粮堆、物理和生物因子四部分组成。该系统不仅涉及粮仓内部各种生物因子（储粮自身、害虫、微生物等）、非生物因子（温湿度、水分和气体浓度等），而且还受到仓外的局部地区大气环境（风速、大气温湿度和太阳辐射等）的影响。国内外大量研究、特别是我国 40 年的实践表明，储粮系统中的各

种物理、化学和生物现象都不是单独存在的，各种生物和非生物因素及其参量之间相互耦合、相互影响，因此是一个生态系统。这一点已经成为行业的共识<sup>[2-3,8-13]</sup>。

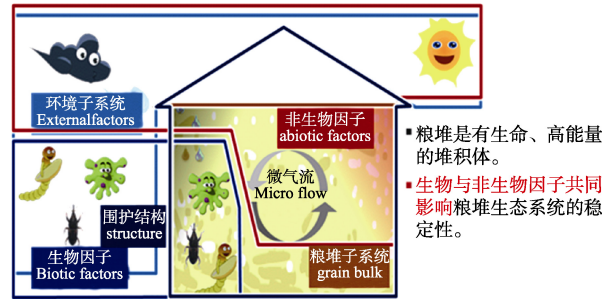


图 2 储粮生态系统  
Fig.2 Grain storage ecosystem

#### 3.2 储粮系统的微观结构

储粮系统，从宏观，由环境、粮仓围护结构、粮堆（粮食籽粒、杂质、气体、微生物和生物）、机械装备、测控装置等组成。从微观，储粮系统是一个具有温度、湿度和水分三元相互作用的基本微结构，受到杂质、气体、微生物和生物因子的影响和反影响（如图 3）。三元基本微结构是储粮系统主要矛盾，主要体现物理机制，这是 CAE 模型<sup>[15-19]</sup>成为“四合一”储粮新技术核心的原因，这一点不能被忽略和轻视。进一步考虑生物和微生物的伴生存在，又具有微元、伴生微元和微环境的三元组成微结构，这个微环境是指大环境对微元空间的影响（是一个独立存在）。物理微结构与组成微结构，均以场的方式相互效用。

#### 3.3 储粮系统微观的多重耦合关系

对于储粮系统，首先其与外部环境存在场耦合关系，与内部也是场耦合关系（如图 4）。粮堆内部的微观组成包括微元、伴生微元、微环境。粮堆内部的微环境由微元环境、伴生微元环境和群体环境叠加而成，对应微元、伴生微元和群体的影响。微环境和微元环境不同，微环境是大环境的影响，微元环境是微元的影响。微结构和微环境的联系和相互作用通过场，包括微元场、伴生场和共生场，微元场以微元为源、伴生场以伴生微元为源、共生场以环境和群体（不含微元及伴生微元）为源。

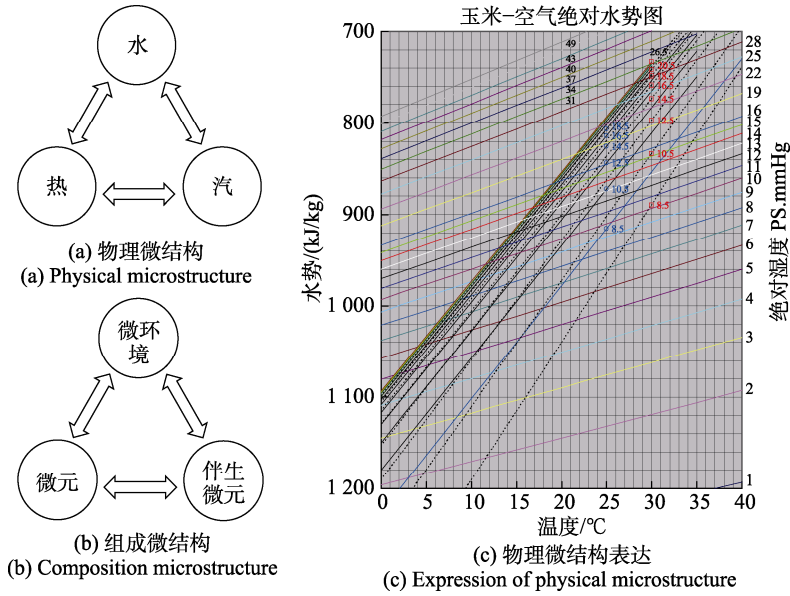


图 3 储粮系统微观机构

Fig.3 The microstructure of grain storage system

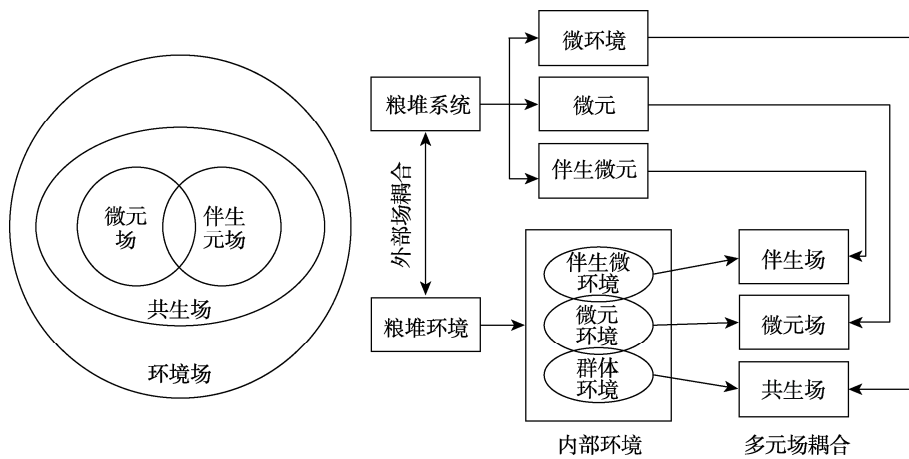


图 4 储粮系统的多重耦合关系

Fig.4 Multi-coupling relationships of grain storage system

### 3.4 储粮系统微观结构的拓展

复杂耦合关系下储粮系统的微观结构可以拓展(如图5)。生物对储粮系统的影响被称为“生物场”<sup>[26]</sup>,水、汽、热等物理和生物耦合,则微结

构由前述三元变为四元。储粮系统的运行离不开人的参与,把物理、事理和人理耦合,则微结构变为五元。未来的储粮系统的运行,引入人工智能 AI 势在必行,则微结构变为智能五元。这是发

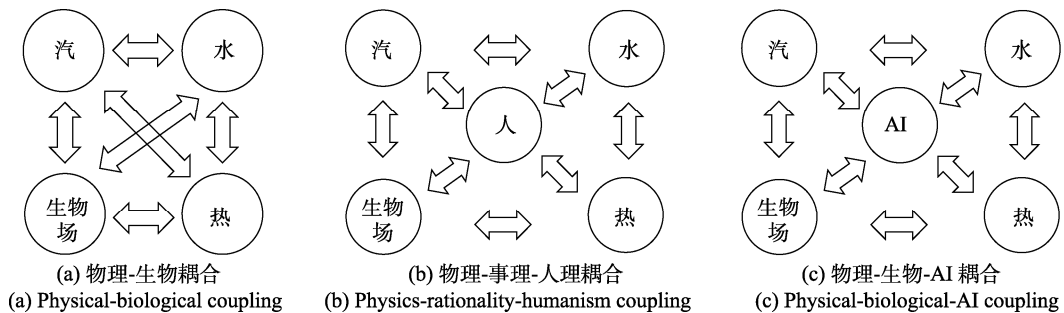


图 5 粮仓微结构的拓展

Fig.5 Expansion of granary microstructure

展粮堆生态多场耦合及生物场理论的缘由，其中场、AI 的引入对未来发展十分重要。

### 3.5 储粮系统的宏观作用

从微观上，储粮系统是物理系统，但从宏观上，它则存在于一个农业经济系统中。如图 6，粮食的生产、储藏和消费构成储粮三元系统，这三个环节与经济系统中价值的创造、保持和交换相对应。储藏在社会经济体系中发挥着不可或缺的作用，在思想上重视微观储粮技术的同时，应该重视储藏的社会经济作用。这也证明了引入粮仓哲学的必要性。

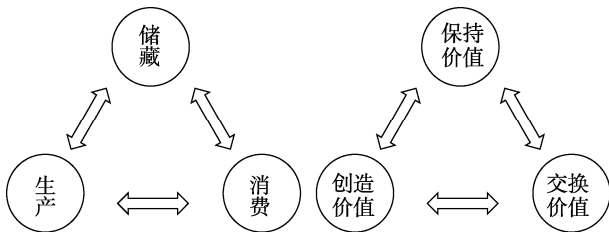


图 6 储粮系统的宏观作用解析

Fig.6 Analysis of macro-function of grain storage system

### 3.6 储粮系统智慧化的方法论

储粮生态系统是一类具有复杂性的系统。20 世纪 80-90 年代，我国著名的科学家钱学森为复杂系统问题的解决提出了“从定性到定量的综合集成法”<sup>[31-32]</sup>，这为我国智慧粮食技术体系的研究提供方法论借鉴。目前，研究储粮生态系统的方法大体有四类，如图 7。

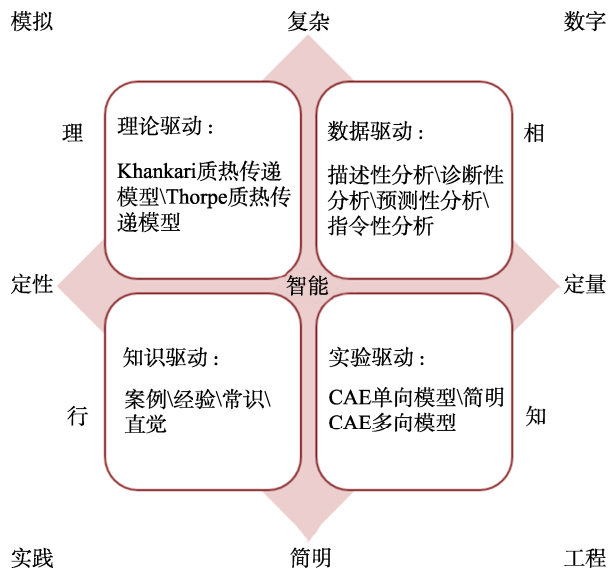


图 7 储粮系统智慧化的方法论解析

Fig.7 Methodological analysis of intelligent grain storage system

一是理论驱动法，即基于能量、动量、质量守恒原理，建立微分方程，如针对无干预自然储粮系统的 Khankari 质热传递模型<sup>[33-34]</sup>、有人工干预的 Thorpe 质热传递模型<sup>[35-36]</sup>。这类方法可以对储粮系统状态进行精细的模拟，在增强储粮知识学习方面卓有成效，但在面对实际情况时因数十个物性参数时变和边界条件复杂且不确定，数值模拟难免陷入“画靶子”的尴尬境界，难以直接付诸应用。二是知识驱动法，主要指一线工作人员受到的专业训练以及从事专业工作后积累的知识，包括案例、经验、常识和直觉。这在我国目前的粮仓实际管理依然发挥重要作用，但存在的问题是个体差异大、不易精准传承、需要长时间积累等，越来越不能适应现代化粮仓的管理。三是实验驱动方法，严格说是精准实验驱动法，就是在实验室精准控制条件，对微量样品测定数据并建构多参量关系的精准方程，“四合一”储粮新技术所采用的 CAE 模型就是这样一个情形，在我国现代化粮仓建设中发挥了非常重要的作用，但因从微量样品数据推广到规模化粮仓存在适应性问题，受到一些研究的存疑。四是数据驱动法，一切从数据出发，让数据说话，在已建构世界上最大物联网的今天，前景被看好。存在的问题是，到目前为止，大量储粮系统的数据质量不高、利用率很低、不支持决策和管理；以数据研究数据的策略，难以获得有全面代表性的数据；获得的储粮系统结露、发霉等数据，容易以小概率事件而被忽略。

四类方法各有千秋。理论驱动长于模拟，远离实相，突显复杂性，不易为一线人员掌握。数据驱动长于逼近实相，缺乏理性，限于大数据，也不易把握。实验驱动长于精准测定，但由微向规模的推广中容易受到质疑。最后知识驱动方法长于效果，但受到人自身限制需要积累且难以普及。如果四类方法结合起来，是否可以找到解决复杂问题的路径，是本文所探究的重点。本团队参与开发的“云图动态储备粮监管系统”在政府性储备粮全国的清仓查库专项中被全国 20 省应用，在多场耦合理论指导下，提出了储备粮数字监管原理，进一步以机理/数据联合驱动策略实现储备粮云图动态监管<sup>[37-42]</sup>。图 8 是某一粮仓纵截



熏蒸等作业,都是利用环境条件优化粮仓内环境,取得保持粮食品质、减少粮食损失和保持粮食价值的效果。

粮仓是自然与科技的统一。粮仓是自然的,秉承了粮堆的自然属性,服从自然规律。粮仓是科技的,利用人类智慧为粮仓创造了人造环境可以进行监测和调控,更有利于人的需求。生态理念、粮堆多场耦合理论、智能窗口控制都是科技的成果。

粮仓是自然与社会的统一。粮仓与粮食生产全过程关联,包括生产、储藏和消费。进一步来说,粮仓与粮食经济运行也高度关联,包括价值、使用价值和价格的形成和变化。

粮仓是定性和定量分析的统一。粮仓多驱动的定量与定性结合创新集成方法不限于粮仓本身,而具有一定的普适性。各个传统学科在数字化和智能化升级过程中都面临了单一方法不奏效的问题,粮食科技以耦合策略进行突破,为未来大数据广泛应用提供了借鉴。

#### 4.2 粮仓以其微结构对科学研究和工程实践的哲学思维有无借鉴?是否是一种范式?

马克思辩证唯物主义哲学以及自然辩证法,提倡用辩证法来看待问题,中国传统文化提倡阴阳概念来认知,都突出了事物“一分为二”的普遍特性,是以“二元”为中心的思想体系和哲学范式。进一步,中医理论在阴阳基础上结合了五行进行调理,又是一套有详有略的深入浅出的思想体系,是“五元”的哲学思维范式,为世界所公认。老子在《道德经》中提出“道生一、一生二、二生三、三生万物”的思想,但尚难以整理出一套有详有略的完备的三元思想体系,进而形成哲学思维范式。粮仓在微观和宏观具有独特的三元结构,国内外储粮实践已经提供了丰富的处理三元问题科学理论、工程实践和生态思辨的思想认知,是建构“三”的思想体系和哲学范式的基础。粮仓哲学借助储粮科学研究和工程实践系统阐释“一分为二、二分为三、三生变化”的复杂问题。挂一漏万来讲,第一步,储粮问题可以按“一分为二”的策略,即按热质二元传递的方式来科学研究和工程实践;第二步,针对结露、霉变等复

杂性问题,按“热、水、汽”的三元问题进行精准科学实验,如在假设平衡条件下已建构 CAE 方程和绝对水势图等;第三步,针对粮仓不同条件下普适性,以定性定量结合的策略,构建粮堆生态系统的多场耦合及生物场理论和方法,借助智能感知、物联/事联、大数据分析、智能测控等技术,来处理“三生变化”的复杂景象。这里要注意处理好定性定量、复杂与简明的关系,要体现到模型和算法之中。此外,粮仓哲学研究也有助于从宏观厘清储藏与生产和消费的分析,为保证粮食安全的宏观调控提供理论分析工具。

#### 4.3 提出粮仓哲学有无意义?

没有哲学指导的实践往往是盲目的,储粮实践就是如此,粮仓哲学的建立有助于形成科学的储粮观。新时期第四次工业革命在不断带来新技术手段的同时,也会带来新的问题,如信息技术关联的信息孤岛、数据滥用、数据浪费等,需要哲学在思想认知层面提供指导,这为“粮仓哲学”的引入提供了时代的必要性。粮仓哲学属于情景哲学,尚有延伸意义,特有的三元结构,与中国传统文化的“三生万物”相通,简单之中表现出系统的复杂性,对相近和相似系统研究有指导性。粮仓哲学从情景出发,和张五常提出经济学的“佃农理论”异曲同工。粮仓哲学对其他学科或者研究建立相应的情景哲学具有参考意义。

## 5 结论

我国 40 年的储粮实践,取得了巨大的科技进步,为中国的粮食安全做出了巨大的贡献。三阶段储粮实践,构建了以设施化,机械化为核心的现代粮仓体系,开启了以数字化和智能化为核心的智慧化进程,这些实践已经改变了行业的思想认知,实现了从简单物料堆积到生态系统的转变,生态、绿色、低碳等理念在粮食行业已经深入人心和广泛践行,实际已经形成了有特色和一定普适性的思维或行为方式。以上为我国储粮思想认知的提升以及粮仓哲学的引入奠定了基础。

新时期面临百年未有大变局、中国第二个百年奋斗目标对粮食安全的新要求以及第四次工业革命带来的冲击,凝练和提出粮仓哲学对解决未



来面临的挑战是有益的尝试。粮仓哲学是对储粮实践（情景）的深度思考，以储粮系统特有的三元基本微结构为基础，以“一分为二、二分为三、三生变化”为理念，引导储粮实践走机理和数据联合驱动的探索路线。粮仓哲学有望加深对“四合一”储粮新技术、储备粮云图动态监管技术等已有科技成果的认知和科普教育，助力信息孤岛、数据滥用、数据浪费等问题解决，构建高质量的智慧粮食体系，如数字孪生、元宇宙等技术体系。粮仓哲学源于储粮实践，但不限于储粮实践。从宏观角度而言，粮仓所关联的生产、储藏和消费以及价值、使用价值和价格都有三元基本微结构，粮仓哲学的研究有助加深理解和实践，更有助于建立科学完备的储粮观。

#### 参考文献：

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的粮食安全[M]. 北京: 人民出版社, 2019.  
People's Republic of China (PRC) press office. Food Security in China [M]. Beijing: People's Publishing House, 2019.
- [2] 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.  
WU Z D, ZHANG Q, WU W F, et al. Current application and outlook prospect of ai technology in the field of post-harvested cereal[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(11): 133-139+146.
- [3] 吴文福, 韩峰, 张亚秋, 等. 粮食干燥和储藏系统理论与方法的研究——吉林大学粮食储运研究发展回顾[J]. 粮食储藏, 2021, 50(3): 1-10.  
WU W F, HAN F, ZHANG Y Q, et al. Research on theories and methods of grain drying and storage systems-- review on the development of grain storage and transportation research in Jilin University[J]. Grain Storage, 2021, 50(3): 1-10.
- [4] 邹山丹. 科学技术哲学在农业农村发展的兴起研究[J]. 中国果树, 2022(1): 131.  
ZOU S D. Study on the rise of philosophy of science and technology in agricultural and rural development[J]. China Fruits, 2022(1): 131.
- [5] 刘娜. 浅析技术哲学下人工智能问题[J]. 互联网周刊, 2021(24): 56-58.  
LIU N. A brief analysis of artificial intelligence under the philosophy of technology[J]. China Internet weekly, 2021(24): 56-58.
- [6] 刘大椿. 科学技术哲学在中国的兴起与自然辩证法[J]. 自然辩证法研究, 2020, 36(10): 3-11.  
LIU D C. The rise of philosophy of science and technology in China and dialectics of nature[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2020, 36(10): 3-11.
- [7] 张五常. 佃农理论: 应用于亚洲的农业和台湾的土地改革[M]. 北京: 商务印书馆, 2000.  
ZHANG W C. The theory of tenant farming: application to agriculture in Asia and land reform in Taiwan[M]. Beijing: The Commercial Press, 2000.
- [8] 宋伟, 靳祖训, 汪海鹏. 中国储粮生态系统研究进展[J]. 粮食储藏, 2009, 38(1): 16-21.  
SONG W, JIN Z X, WANG H P. Research progress on Chinese grain storage ecosystem[J]. Grain Storage, 2009, 38(1): 16-21.
- [9] 靳祖训. 中国粮食储藏科学技术成就与理念创新[J]. 粮油食品科技, 2011, 19(1): 1-5.  
JIN Z X. innovation concept and achievements of China grain storage science and technology[J]. Science and technology of cereals, oils and foods, 2011, 19(1): 1-5.
- [10] 李隆术. 再谈粮堆生态系统[J]. 粮食贮藏, 1982(4): 13-19.  
LI L S. Let's talk about the grain stack ecosystem[J]. Grain Storage, 1982(4): 13-19.
- [11] 路西玉. 粮油储藏学[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 1989.  
LU Q Y. Grain and oil storage[M]. Beijing: China Financial and Economic Publishing, 1989.
- [12] 蒋中柱. 粮堆生态系统原理及其在储藏中的应用[J]. 粮食储藏, 1990(2): 20-25.  
JIANG Z Z. Principle of grain heap ecosystem and its application in storage[J]. Grain Storage, 1990(2): 20-25.
- [13] 靳祖训, 于英威, 潘成. 中国加入 WTO 以后粮食储藏科学与技术研究发展方向[J]. 粮食储藏, 2002(4): 5-10.  
JIN Z X, YU Y W, PAN C. Research and development direction of grain storage science and technology after China's accession to WTO[J]. Grain Storage, 2002(4): 5-10.
- [14] 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.  
ZHANG Z J, LI Q, YANG D Y, et al. Temperature field simulation of stored bulk grain by CFD method[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(4): 46-50.
- [15] 吴子丹. 储粮机械通风的计算机控制[J]. 粮食储藏, 1987(4): 28-31.  
WU Z D. Grain aeration system under the control of computer[J]. Grain Storage, 1987(4): 28-31.
- [16] 吴子丹. 再谈储粮机械通风的计算机控制[J]. 粮食储藏, 1991(3): 3-9.  
WU Z D. More about grain aeration system under the control of computer[J]. Grain Storage, 1991(3): 3-9.
- [17] 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): 73-78+83.  
WU Z D, LI X J. The use of CAE model for controlling aeration in a Chinese rough rice depot[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(2): 73-78+83.
- [18] 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.  
WU Z D. Green low-carbon grain storage technology[M]. Beijing: Science and technology of China press, 2011.
- [19] 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.  
LI X J, WU Z D. Determination of grain stack's equilibrium absolute humidity and dew-point temperature[J]. Processing of grain, 2011, 36(4): 34-37.
- [20] 任广跃, 彭威, 张忠杰, 等. 仓储粮堆机械通风时压力场的模拟研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(9): 90-95.  
REN G Y, PENG W, ZHANG Z J, et al. Study on simulation for pressure field under the condition of mechanical ventilation in grain storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(9): 90-95.

- [21] 本刊特约通讯员. 粮食储备“四合一”新技术研究开发与集成创新获得国家科技进步奖一等奖[J]. 粮食储藏, 2011, 40(1): 3. Special correspondent for The Times. The "four-in-one" new technology research and development and integrated innovation of grain reserve won the first prize of the National Science and Technology Progress Award[J]. Grain Storage, 2011, 40(1): 3.
- [22] 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. YIN J, WU Z D, WU X M, et al. Analysis of temperature field recurrence in discrete points of grain heap based on coupling of temperature and humidity fields[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(12): 95-101.
- [23] 尹君, 吴子丹, 张忠杰, 等. 基于多场耦合理论浅析圆仓局部结露机理[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(5): 90-95. YIN J, WU Z D, ZHANG Z J, et al. Analysis of the formation mechanism of partial condensation for the stored grain in steel squat silo based on multi-fields coupling theory[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(5): 90-95.
- [24] 王小萌, 吴文福, 尹君, 等. 基于温湿度场云图的小麦粮堆霉变与温湿度耦合分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 260-266. WANG X M, WU W F, YIN J, et al. Analysis of wheat bulk mould and temperature-humidity coupling based on temperature and humidity field cloud map[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 260-266.
- [25] 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. WANG X M, WU W F, YIN J, et al. Research on temperature and humidity field change during corn bulk microbiological heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 268-273.
- [26] WU Z D, ZHANG Q, YIN J, et al. Interactions of multiple biological fields in stored grain ecosystems[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1).
- [27] 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. WU W F, ZHANG J, XU W, et al. Research on graphical detection system for multi-field interaction in grain storage based on NMR[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 66-73.
- [28] 崔宏伟, 吴文福, 吴子丹, 等. 基于粮温时空相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. CUI H W, WU W F, WU Z D, et al. Reserves monitoring method for grain storage based on temporal and spatial correlation of grain temperature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 321-330.
- [29] 崔宏伟, 吴文福, 吴子丹, 等. 基于温度场云图的储粮数量监控方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 290-298. CUI H W, WU W F, WU Z D, et al. Monitoring method of stored grain quantity based on temperature field cloud maps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 290-298.
- [30] 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. CUI H W, WU W F, WU Z D, Method to detect granary state based on statistical characteristics of grain temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(2): 320-330.
- [31] 戴汝为. 从定性到定量的综合集成法的形成与现代发展[J]. 自然杂志, 2009, 31(6): 311-314+326. DAI R W. The proposal and recent development of metasynthetic method (M) from qualitative to quantitative[J]. Nature, 2009, 31(6): 311-314+326.
- [32] 苗东升. 综合集成法的认识论基础[J]. 系统辩证学学报, 2003(1): 37-42+50. MIAO D S. The epistemological foundation of the meta-synthesis[J]. Journal of Systemic Dialectics, 2003(1): 37-42+50.
- [33] 王远成, 吴子丹, 李福君, 等. 储粮生态系统数学模型和数值模拟研究进展[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(10): 157-162. WANG Y C, WU Z D, LI F, et al. Overview of mathematical models and numerical simulations in the stored grain ecosystem[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(10): 157-162.
- [34] KHANKARI K, PATANKAR S, MOREY R. A mathematical model for natural convection moisture migration in stored grain [J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(6): 1777-87.
- [35] THORPE G R. The application of computational fluid dynamics codes to simulate heat and moisture transfer in stored grains[J]. JOURNAL OF STORED PRODUCTS RESEARCH, 2008, 44(1): 21-31.
- [36] THORPE G R. Modelling ecosystems in ventilated conical bottomed farm grain silos[J]. Ecological Modelling, 1997, 94: 255-86.
- [37] 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: 247-260.
- [38] 吴文福, 崔宏伟, 张忠杰, 等. 储备粮数字监管方法及应用[J]. 现代农业装备, 2020, 41(5): 2-7+47. WU W F, CUI H W, ZHANG Z J, et al. Digital supervision method and application of grain reserves[J]. Modern Agricultural Equipment, 2020, 41(5): 2-7+47.
- [39] 崔宏伟. 储备粮实物数字云图监管方法和应用研究[D]. 吉林大学, 2021. CUI H W. Research on supervision method and application of digital and cloud maps of grain reserves[D]. Jilin University, 2021.
- [40] 朱浩天. 储粮云图的特征提取及监管方法的应用[D]. 吉林大学, 2019. ZHU H T. Feature extraction of storage grain nephogram and application of supervision method[D]. Jilin University, 2019.
- [41] 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. WU W F, WU Y S D, CHEN K, et al. The digital intelligence method for stored grain supervision based on mechanisation and data[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 11-17.
- [42] 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. LU Y H, LI X Z, WU W F, et al. Development of basic data manual for intelligent analysis of grain condition[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 47-55. ㊟
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (http://lyspkj.ijournal.cn)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。