

系统农业：结合农业社会经济属性的建模和控制

康孟珍^{1,2}, 孙贺全^{3,4,5}, 王秀娟^{1,6}, 王飞跃^{1,2}

- (1. 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室, 复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学人工智能学院, 北京 100049; 3. 马克斯·普朗克植物育种研究所, 德国科隆 D-50829;
4. 慕尼黑大学遗传学研究所, 德国慕尼黑 D-82152; 5. 西安交通大学电信学部自动化科学与工程学院, 陕西 西安 710049;
6. 中国科学院自动化研究所北京智能技术工程研究中心, 北京 100190)

摘要: 随着第五次工业革命的到来与发展, 生物科技、信息技术与人工智能深度融合, 为发展信息化、智能化的农业提供了强有力的支持。由于农业具有社会经济属性, 面向具有生物物理特性的种植系统及具有经济社会特性的管理系统, 构建农业社会物理信息系统已成为共识。在系统生物学启示下, 提出系统农业, 即基于平行农业框架, 结合农村、农民两个维度构建农业系统, 以生物、信息、人工智能等技术为支撑, 监测和整合多尺度、多维度、多模态信息, 依据系统理论展开涵盖农业、农村、农民的系统农业研究, 服务未来乡村发展。对系统农业涉及的智能技术及具体案例进行了总结与分析, 并对系统农业的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 平行系统; ACP 理论; DAOs; 农业元宇宙

中图分类号: S-1

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202306

Systems agriculture: modeling and control based on social and economic attributes of agriculture

KANG Mengzhen^{1,2}, SUN Hequan^{3,4,5}, WANG Xiujuan^{1,6}, WANG Fei-Yue^{1,2}

1. State Key Laboratory of Multimodal Artificial Intelligence Systems, State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Max Planck Institute for Plant Breeding Research, Cologne D-50829, Germany
4. Faculty of Biology, LMU Munich, Munich D-82152, Germany
5. School of Automation Science and Engineering, Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
6. Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: With the arrival and development of the fifth industrial revolution, biotechnology, information technology and artificial intelligence are deeply integrated. This provides strong support for the informatization and intelligentization of agriculture. Due to the social and economic characteristics of agriculture, it has become a consensus to build an agricultural physical and social information system toward both the planting system with biophysical properties and the management system with socio-economic properties. Inspired by systems biology, systems agriculture was proposed, which combined two other dimensions of villages and farmers information using the parallel agriculture framework to build and study the agricultural system. Supported by biotechnology, information technology and artificial intelligence technology, systems agriculture had involved monitoring and integrating multi-scale, multi-dimensional and multimodal information, and carried out systematic research covering agriculture, villages and farmers using systems theory, in order to serve the development of future villages. The intelligent technology and the specific cases involved in systems agriculture were summarized and analyzed, and the perspectives of systems agriculture were presented.

Key words: parallel system, ACP theory, DAOs, agricultural metaverse

收稿日期: 2022-11-17; 修回日期: 2023-02-20

通信作者: 王秀娟, xiujuan.wang@ia.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2021ZD0113704); 国家自然科学基金资助项目 (No.62076239)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2021ZD0113704), The National Natural Science Foundation of China (No.62076239)

0 引言

根据联合国人口预测报告,至 2050 年,世界人口将增长至 97 亿人。为了满足人口激增带来的粮食需求,保障世界粮食安全,世界粮食总产量需要增加 35%~56%^[1]。联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 呼吁成员国制定并有效落实利于农业发展的政策,科学地引导农业可持续发展^[1]。农作物作为农业生产活动的对象,其农艺性状(表型)既受内在遗传因素(基因型)的影响,也受外在环境和人的管理的影响。因此,粮食安全的实现需要建立在“环境-农作物-人”三者协调发展的基础上,平行农业框架如图 1 所示。

随着第五次工业革命的到来与发展,生物科技、信息技术与人工智能深度融合,为发展信息化、智能化的农业提供了强有力的支持。在农作物表型和基因型的信息获取和分析、农业生产管理和控制决策等各个环节中已出现新的智能化方法和手段。

农作物表型信息包括能够反映植物细胞、组织、器官、植株和群体结构及功能特征的物理、生理和生化性状^[2],直接关系农作物的产量。在农作物表型信息获取和分析方面,作物表型组学通过集成自动化平台装备和信息化技术手段,获取多尺度、多生境、多源异构的植物表型信息,形成植物表型组学大数据,以便从组学高度系统深入地挖掘“基因型-表型-环境”内在关系,全面揭示特定生物表型的形成机制。作物表型组学的研究还可以促进功能基因组学、作物分子育种与高效栽培等研究,从而提高粮食产量^[3]。

农作物基因型信息包括作物的基因组组成、结构、基因表达等分子层面的生物大数据。农作物基因型的研究与育种密切相关。种业作为农业的“芯

片”^[4],是推进农业发展的重要基础。智能分子设计育种技术利用前沿高通量测序技术,获取、分析农作物基因型信息,结合作物表型信息获取技术,建立智能计算模型选育新品种,通过计算实验预测新品种的表型,指导现实育种过程,缩短通常数以年计的育种周期^[2,5]。智能分子设计育种研究的开展将为提高农作物产量和质量提供基因水平上的技术支持。

在农业生产管理和控制决策方面,随着高质量表型组、基因组数据的积累与相关理论的完善,融合生物、信息、人工智能、分布式自治组织与运营 (decentralized autonomous organizations and operations, DAOs)、物联网 (internet of things, IoT) 等技术,建立信息化、智能化的以农作物、环境、人为基本元件的农业系统成为可能。针对复杂农业系统的管理与控制,中国科学院自动化研究所康孟珍等人^[6]提出了基于 ACP 理论^[7]的平行农业研究框架。其中 ACP 分别代表人工系统 (artificial systems, A)、计算实验 (computational experiments, C) 和平行执行 (parallel execution, P)^[7]。平行农业的本质是构建与实际农业系统相对应的虚拟农业系统 (人工系统),虚实系统通过描述、预测、引导 3 个层次智能实现平行执行,即通过人工系统的在线学习和计算实验对实际系统的行为进行预测,为其管理与控制提供引导,如图 1 所示^[6,8]。

农业发展需要稳定的农村环境,也需要保障粮食安全、建设新农村的主力军——农民。按农用地耕种规模,农业可划分为大规模商业农场、小规模农业等类型^[9]。截至 2016 年,全球共有超过 5.7 亿个农场,其中面积不到 2 公顷的小规模农场和家庭农场经营着世界 87% 的农业用地,多分布于亚洲、非洲的欠发达国家^[10]。联合国将支持小农户平等获得土地、技术和市场列入可持续发展目标

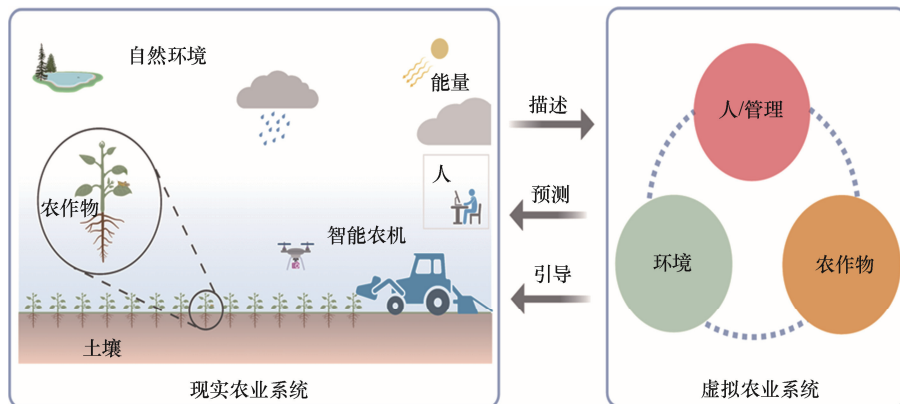


图 1 平行农业框架

(sustainable development goal, SDG) 之一。我国也是小农业为主的国家,截至 2019 年,小农户占农业经营主体数量的 98%以上,2.3 亿农户中经营耕地约 0.67 公顷以下的占 91%。小规模农业作为低成本、低风险的经营方式,结合农民其他的创收活动,对当地生计和粮食安全有重要贡献^[9]。

然而,多分布于发展中国家的小农经济面临复杂的技术和市场挑战,包括农田基础设施差、地理位置分散、城乡数字鸿沟明显、市场风险大、难以获得信贷服务等。“农产品多了多了、少了少了”是小农经济中的常见现象。一些研究人员认为小农户的集体行动(collective action)能够带来农业生产系统的效率提升,实现变革性的重设计(re-design)^[11]。重设计指对农业生态系统进行重新设计以利用生态过程提升系统的生产效率,需要资源的集体管理。我国学者也提出只有农民组织起来,才能有谈判地位和谈判能力,从而形成社会契约能力^[9]。实践证明,农业中的新技术应用和推广通常需要拥有先进理念和农村工作经验的人带头,以改变其跟随者的思想和行为^[12]。

重设计的农业虽然与传统的生态农业方式有共性,在信息时代类似于城市中的共享汽车,重设计的农业是高度知识密集型的农业^[13]。面向这一需求,智能技术的服务不仅体现在生产过程的农业机器人、无人农场,还体现在产前的生产规划及产后采收和加工,支撑订单农业、按需生产,减少产销信息不对称带来的浪费。其中,产前的种植规划(crop planning)是一项农业中的运筹问题,用以解决如何根据种植目标(如满足一定的产量或经济效益)、约束条件(如可用的水资源、轮作生态约束等),决策每个地块的种植作物。考虑经济效益,还需要结合农产品价格波动信息^[14]等社会经济因素。总而言之,重设计的农业需要综合自然社会信息,保障农业“韧性”,旨在实现生态可持续、经济可持续、多参与方共赢的农业。

为此,在系统生物学启示下,本文提出系统农业,即基于平行农业^[8]框架,结合农村、农民两个维度构建农业系统,以生物、信息、人工智能等技术为支撑,监测和整合多尺度、多维度、多模态信息,依据系统理论展开涵盖农业、农村、农民的系统农业研究,服务未来乡村发展。系统农业支持将上千年传统农业农村中积累的经验与现代生物、信息、人工智能等技术相融合,普及面向乡村的自动化与智能化。系统农业等技术研究的开展对于满足

全球人口不断增长带来的更高的粮食需求,应对农业劳动力短缺、气候变化及自然资源稀缺等生产和环境挑战具有重要意义。此外,系统农业思想的提出也旨在支撑农村新科技,催生并创新基于智能科技的社会化和生态化农村,助力双碳经济与可持续发展,实现产业兴旺、乡村宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕。

1 系统生物学的启示

系统生物学源自生物学发展史上的两大基础:一是以个体高分子为重心的元件研究,二是以多高分子元件构成的整体为重心的系统研究。前者与当今仍然备受重视的分子生物学研究密不可分;后者则是基于生物学、数学、物理、化学、控制论、系统工程、计算机科学与技术等诸多学科的高度交叉融合,聚焦从形式上分析多分子元件相互作用时涌现的功能行为^[15]。虽然自然系统的概念早在 18 世纪 40 年代就由现代生物分类学之父——瑞典科学家 Linné C V 提出^[16],系统化研究生物系统的观点也随之出现^[17],但是直到 21 世纪初人类基因组计划的实施及随后基因组、转录组等一系列组学研究的诞生^[18],系统生物学才真正兴起^[19]。

系统生物学的先驱 Hood L E 把系统生物学定义为一种结合实验观测与计算预测、解码复杂生物系统的新方法,该方法基于系统领域的科学与技术,融合多学科、多尺度、多层次信息,通过计算建模揭示生物系统中各要素(包括全部基因、RNA、蛋白质等,而非个别基因或者蛋白质)之间的相互关系,从整体角度探索复杂生物系统运行的机制;并提出了“扰动实验与数据监测-数据整合与计算建模-理论构建”的研究框架^[20]。系统生物学的中心工作包括分析生物系统元件构成,监测在特定扰动实验中不同尺度下的元件响应信息,继而借助数据整合、演算分析、数学分析和建模,揭示各元件之间的相互作用关系网络,从整体上根本地解释生物系统的行为,实现生物学新假设、新发现的螺旋式上升。

具体而言,系统生物学在特定的环境参数设定下,利用 DNA、RNA 高通量测序技术,蛋白质组、代谢组检测技术,结合图像分析的表型检测技术等开展定量实验监测,整合形成集基因组、转录组、蛋白质组、代谢组、表型组、环境参数等各种尺度下的信息于一体的生物数据。继而,基于高性能的计算设备和资源,设计、开发高效的具有系统级洞

察力的结构及功能预测计算方法,分析、构建、理解包括基因调控、蛋白质互作、细胞间竞争与合作、代谢调节等各类生物学信号传递、接收、处理与反馈形成的互作网络和动力学模式。在此基础上,建立模拟生物系统运行的人工系统,通过改变生物系统的环境参数产生学习数据用于提高人工系统的准确性、鲁棒性。反过来,借助人工系统认知、预测生物系统的复杂表型、功能和行为,实现对生命本质的理解,丰富并完善生物学理论知识。

不难想象,一个高级别的生物系统由一系列低级别的子系统组成。例如,对一个生物体的系统化研究可以涉及基因组子系统(基本元件为基因序列)、蛋白质组子系统(基本元件为蛋白质序列)、代谢组子系统(基本元件为代谢产物)等。这些子系统内部元件同样表现出复杂网络特性,因此仍然可用系统领域的科学与技术方法进行研究。事实上,系统基因组学研究、系统蛋白质组学研究等也已出现^[21]。需要注意的是,如果缺失高一级系统作为“环境”因素的影响,子系统的行为与高一级系统中的行为可能有所区别,不能直接用于解释高一级系统,但其研究对认识子系统自身仍有一定意义。

反过来,给定一个生物系统,在一定条件下,它也一定是比其高一个级别的某系统的子系统。例如,任何一类粮食、经济作物都可围绕自身形成一个生物系统,而这些生物系统是人类赖以生存的农业

系统的子系统。继续扩展开来,农业发展离不开其发展环境——农村,更离不开开展农业活动的人——农民。农民建设农村,同时发展农业,三者相互支撑:农业、农村的发展使农民生活水平得以提高,而农民生活改善使农民产生建设农村、发展农业的主观能动性。因此,农业相关研究应该系统化耦合农民、农村乃至经济、社会环境及其他重要因素,根据部分与整体的联系从根本上揭示农业系统在不同环境参数下的运动规律,促进农业系统状态和行为控制技术的发展,从而指导人们对农业的高效改造。基于此,本文提出系统农业的概念,其框架如图2所示。

简言之,系统农业是从系统生物学的研究思维出发,在系统论、控制论、信息论的基础上,利用新一代生物、人工智能及信息等科技,监测并整合多尺度、多维度农业大数据信息(涵盖农作物基因组、表型组、农业、农民、农村、社会、经济等),以平行系统的ACP方法展开研究,建立面向农业、农村、农民的社会信息物理系统模型(虚拟农业系统),通过计算模拟系统对自然和社会经济环境的响应,基于预测和计算引导现实农业系统的行为或为农业生产活动提供精准的决策支持。

2 系统农业中的社会维度

农业系统有两个组分,一个是具有生物物理特性的种植系统,涉及作物、土壤、气候、投入品和

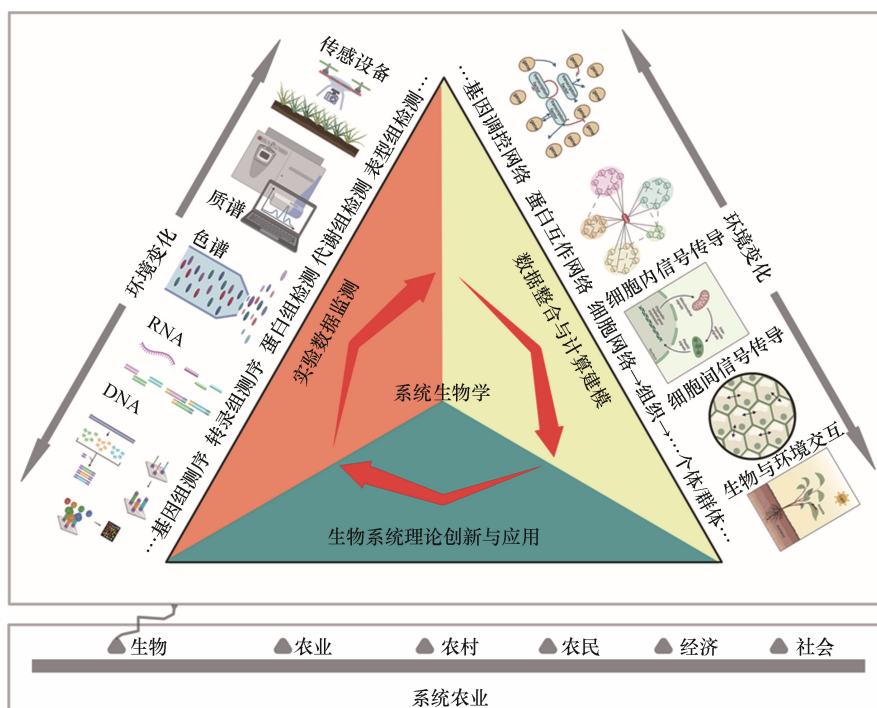


图2 系统农业的框架

产出；另一个是具有经济、社会特性的管理系统，涉及人、目标、价值、知识和决策等^[22]。因此，农业发展需要从一个整体的系统观考虑^[20]，即不仅要根据农业的自然属性（如温度、光照等自然环境）的影响研究其发展，还要把农业放在一个更广阔的社会经济环境下，结合本土文化实现其可持续发展。

我国学者钱学森提出，对于多个子系统构成的开放复杂社会系统，可采用定量模型和定性知识相结合的方式^[23]。与只包含环境控制的农业信息物理系统（cyber-physical system, CPS）不同，对于结合社会维度的农业社会信息物理系统（cyber-physical-social systems, CPSS），系统行为与人的心理、经验等因素有关，不再是牛顿系统，可采用以描述、预测、引导为三部曲的平行农业系统框架，如图 1 和图 3 所示^[6]。该框架中包含了对系统的描述、对未来的预测、基于预测对系统的引导。其中，系统的描述包括农业、农民、自然环境、社会经济乃至文化环境。迅速发展的农业元宇宙可被认为是数字空间的农业 CPSS，在信息空间中的描述、预测可作为农业元宇宙的基石，进一步作用于实际农业系统。

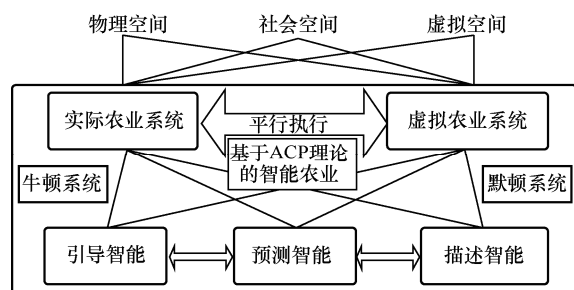


图 3 平行系统农业^[6]

在该框架下的平行农业研究已经取得了一定进展。例如，在物理环境感知方面，笔者所在团队开发了适合小农户的低成本农业环境监测系统^[24]。在智能分析和决策方面，实现了根据环境数据的作物产期预测^[25]及融合环境数据和作物模型的产量预测^[26]。在种植规划方面，提出了结合农产品价格预测的排产方法^[14]。尽管开展了一些工作，笔者认识到农业信息化及智能化的研究还需要将与其息息相关的农村环境、农业经营主体的建模更深入、更系统地融合，与本土文化相适应，从更整体的视角认识并引导农业系统。

3 系统农业中的智能技术

系统农业的开展需要生物、数学、物理、自动化、系统工程、计算机等多学科领域的共同支撑，涉及高通量 DNA、RNA 测序、表型组检测、机器学习、无线传感器、区块链、物联网、大数据挖掘与建模、云计算及数字等多方面的技术。其中，数字技术，尤其是人工智能，是系统农业的关键组成部分。农业信息的获取、整合与计算分析是系统农业的重要环节。从农场的作物和环境数据的实时监测，到理解和应用农业生产中的复杂社会经济及天气环境和作物模型，再到自动化农业任务和操作的机器人——人工智能在系统农业中的应用有可能彻底改变农业劳动力和决策支持方式^[27]。下面详细介绍农业生产中的监测、建模、预测和引导等各个环节涉及的人工智能，如图 4 所示。

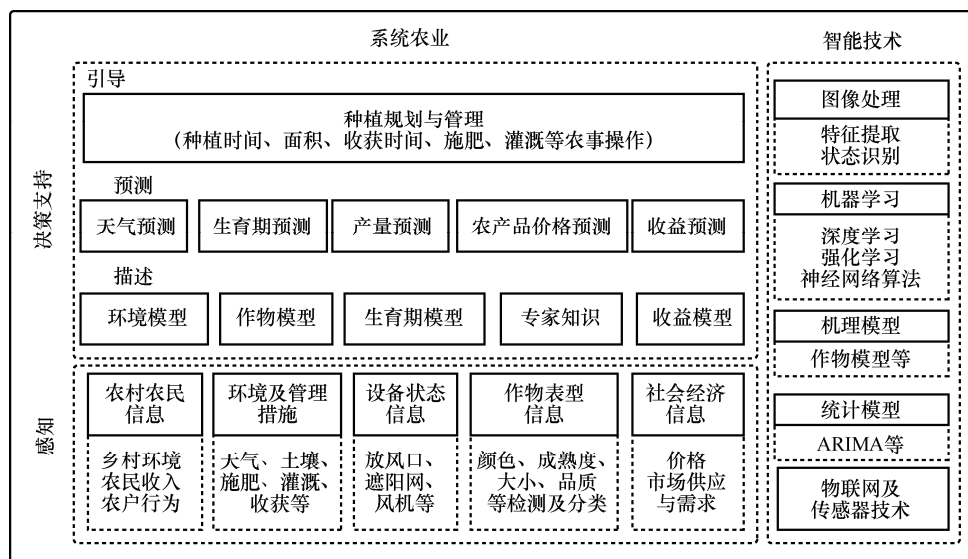


图 4 系统农业中的人工智能技术应用

3.1 系统农业中的监测

系统农业研究的可靠性建立在信息监测系统提供的类型丰富、客观且低噪的数据基础之上。农业系统具有复杂性,且人口逐渐城镇化,依赖逐渐减少的农业从业人员完成精准信息监测必然面临巨大挑战。当前,结合传感器、图像处理、声音识别等先进感知技术及IoT、大数据、人工智能、DAOs、区块链等新一代信息技术,研发可覆盖农业生产各环节的智能农业设备已经成为农业系统发展的重要方向^[28]。智能设备的完善将使管理者可通过终端设备在线远程调控,方便完成农业生产中各个环节信息的采集^[29]。

农业生产按生产过程分成产前、产中及产后3个阶段,产前信息主要涉及环境信息(包括地区土壤养分、光照时长、湿度/温度高低、风向/风速/降水情况等)监测、种子分析/播种等;产中信息主要关注施肥策略、灌溉策略、杂草防除、病虫害防范以及农作物表型信息,涉及植株高度测量、谷粒大小/产量估计、果实成熟度检测、颜色识别等;产后信息主要包括产品加工、品质检测/分类、存储、运输等^[30]。与目前的智慧农业相比,系统农业中信息的获取还应包括基础设施建设等乡村环境信息,以及农产品价格、农产品市场供需、农民技能水平、管理人员水平等社会和经济信息^[23]。

各类数据是智能决策的依据。例如,作物种植面积和种类可以提供重要的产量信息,土壤肥力是施肥方案的依据,实时环境感知是环境调控的基础。以ChatGPT为代表的大模型为农业数据获取带来了突破性的进展。

3.2 系统农业中的建模、预测及引导

农业信息数据获取的目的是通过对数据的进一步分析为农业生产的管理与控制提供决策支持。如何利用所获取的信息进行建模、预测及引导,是系统农业要解决的关键问题之一。目前对农村的建模研究很少,农民的建模研究主要为农民收入、农户行为^[31]等。下面主要对作物、环境和社会经济等方面的建模涉及的人工智能技术进行介绍。

通过与环境及管理等因素结合,作物模型可以模拟并预测作物的生育期及产量,从而分析不同环境和管理因素等对作物生长发育的影响。从是否表述产量形成机理的角度,作物模型可以分为两类:基于过程的模型(process-based model)和统计模型(statistical model)。基于过程的模型又被称为基于

知识的模型,常见模型有美国的DSSAT、法国的STICS、澳大利亚的APSIM,这类模型已被用于农事管理和气候变化模拟^[32]。作物结构的重要性衍生出了个体尺度的植物功能结构模型,可以模拟作物形态结构、生物量的产生和分配及两者的内在联系^[33]。这类模型在更精细的尺度上模拟作物生长,如中法联合发展的GreenLab模型^[34]。统计模型又称基于数据的模型,其根据测量或观察到的历史数据得到气候因素和产量的经验关系,主要包括经验回归方法、机器学习(machine learning, ML)算法和深度学习(deep learning, DL)算法等。基于过程的模型描述影响产量形成的关键生理和物理过程^[35],统计模型直接建立环境输入与产量输出之间的关系,不关注作物的内在生长过程。

环境模型模拟温光水气等因子的条件变化,可为虚拟作物生育期和产量的预测提供环境数据。大气模型可用于全球变暖对农作物生长发育和产量的影响研究,评估作物适应性。例如,Wang X H等人^[36]将小麦、玉米、水稻和大豆的全球田间变暖实验数据集(48个地点)与网格化的全球作物模型相结合,分析了温度变化对作物产量的影响。温室气候模型可用于设施农业研究。随着物联网监测的普及,数据驱动的方法比较常见。例如,Weng Y C等人^[37]提出了一种基于数据的温室环境预测方法并进行了验证,结果表明,该方法可以有效拟合温室气候数据,并具有良好的收敛性,其实验成本较低、周期较短。

在反映市场供需关系方面,对于经济作物来说,农产品价格(现货和期货)是一个重要指标。常用的农产品价格预测方法包括时间序列方法、回归方法和机器学习方法。例如,ARIMA模型、BP神经网络模型及卷积神经网络模型等^[38]。基于市场供需的农产品价格预测,农户可以科学地安排作物的种植和采收,从而使得农业生产获得更高的经济效益,降低风险。

农产品供需分析预测有助于积极释放市场信号,引导农业生产与消费,一直受到国内外研究者的广泛关注。传统的统计方法不能全方位对农产品供需过程进行定量描述,深度神经网络模型所具备的时间、空间数据连续等优势,有助于进一步提高农产品供需过程模拟与估算精度。例如,庄家煜等人^[39]结合农学、气象学、经济学及计算机等多学科知识,充分考虑农产品品种、时间、收入、经济发

展等因素影响,使用长短时记忆神经网络(long short-term memory neural network)构建多时间维度不同农产品供需预测模型,实现对农产品供需信息的实时精准监测和分析预警。

人的管理决策模型是系统农业中模型构建的重要组成部分,也是与目前智慧农业的主要区别之一。系统农业中的建模包括对产业上下游各利益相关者的建模,其中为生产者提供决策支持是一个核心,保障节本增效和产销衔接,服务农业生态及经济的可持续发展。借鉴在交通、工业等领域的建模,人的行为可通过基于代理的模型(agent-based model)进行描述。在管理决策模型中,种植规划(引导)是涉及农民、农村、生态、经济和社会的问题,而动态预测农产品产期和产量、根据价格进行排产,是在种植规划中精细计算经济效益的关键。因此,基于上述获取的环境、土壤、作物表型、管理措施(灌溉、施肥)及市场价格和供需等信息,可以构建环境模型、作物生长发育模型、作物生育期模型及农产品价格和供需模型等。通过构建上述各类模型,可以进行计算实验,从而模拟并预测不同环境条件和管理措施下的作物产量及所能得到的收益。例如,Fan M H 等人^[14]提出了平行种植规划的建模方法,将农户看作智能体,基于启发式搜索寻找最优种植方案,并可根据市场价格变化对种植方案进行调整。

4 系统农业实施场景

过去几十年间,中国的乡村经历了巨大的变化。乡村的要素,除了直观可见的地理分布,还有彼此息息相关的乡村产业、经济、人居环境、服务、文化等。有的学者提出智慧乡村(smart village)的概念,其核心是为乡村居民或乡村事业提供一系列所需的高效服务^[40]。完善的智慧乡村系统如同乡村大脑,结合本地的资源禀赋为乡村振兴提供决策支持。

支撑智慧乡村的信息技术与智慧城市有相当多的共性,涉及物联网基础设施、云计算基础设施、地理空间基础设施等新一代信息技术及社交媒体终端等工具和方法的应用。首先,乡村地理环境的描述一般依赖 3S 技术,即全球定位系统(global positioning system, GPS)、遥感(remote sensing, RS)、地理信息系统(geographic information system, GIS),获取乡村的地理分布并进行三维可视化表达。其次,各种传感技术是获取乡村信息的必要手

段,包括环境传感、村容监测等。数据中心则是对各类数据的汇总、分析和评估,是整个管理的核心。乡村信息还包括比较普及的移动互联网等手段。现代信息与通信技术正在转变为新的生产要素和治理工具,为打破传统城乡分化状态进而推动新时代乡村振兴提供了前所未有的机遇^[41]。平行乡村,或泛称为数字乡村,指对乡村过去和现在的环境、产业、管理、经济、文化等多方面的综合描述,为未来进行预测和引导,是对乡村治理的体制机制、组织架构等进行系统化重定义的过程。

尽管由于城乡之间的数字鸿沟^[40-41],数字乡村的建设远远滞后于数字城市的建设,但随着国家《数字乡村发展战略纲要》《数字乡村发展行动计划(2022-2025 年)》的推进实施,以乡村数字化建设推进农村产业、生态、文化、治理和农民生活现代化在部分地区已被提上日程。例如,浙江省提出了数字乡村“大脑+应用”集成改革实施方案,聚焦农业高质高效、乡村宜居宜业、农民富裕富足,利用卫星遥感、无人机、物联网、大数据、人工智能等技术,综合集成数据、规则、算法、模型、知识、工具等大脑要素,通过强化政府端与市场端、生产端与消费端、服务端和治理端的链接,实现农业生产、乡村治理、农民服务等领域的统计分析、研判预警和辅助决策等功能。系统农业的实施场景框架如图 5 所示。

5 结束语

本文基于农业的社会经济属性提出系统农业的概念,引入人及社会经济环境作为系统的组成部分,以服务未来乡村建设。社会资源对农业发展的重要性已成为共识^[11]。针对我国以小规模农业为主的现状,系统农业通过智能技术支持农业的重设计,通过数字空间的连接和计算促进现实社会中技术、人力和资金等社会资源的调配和优化。系统农业的发展将导向分布式人工智能的应用和数字涉农社区的产生^[42],使得技术等资源通过在数字空间的组合和优化促进实体的发展。

因此,系统农业将是知识密集型的农业,涉及生态农业技术和先进的人工智能技术的高度融合。例如,在生产实践中,已证明高产、高品质、高营养、低成本(三高一低)的有机种植方式是可行的,然而单纯解决种植端的技术服务难以满足农民的需求,技术的推广应用受制于技术支持、人员观念、市场需求等多种因素。结合系统农业思想,构建产

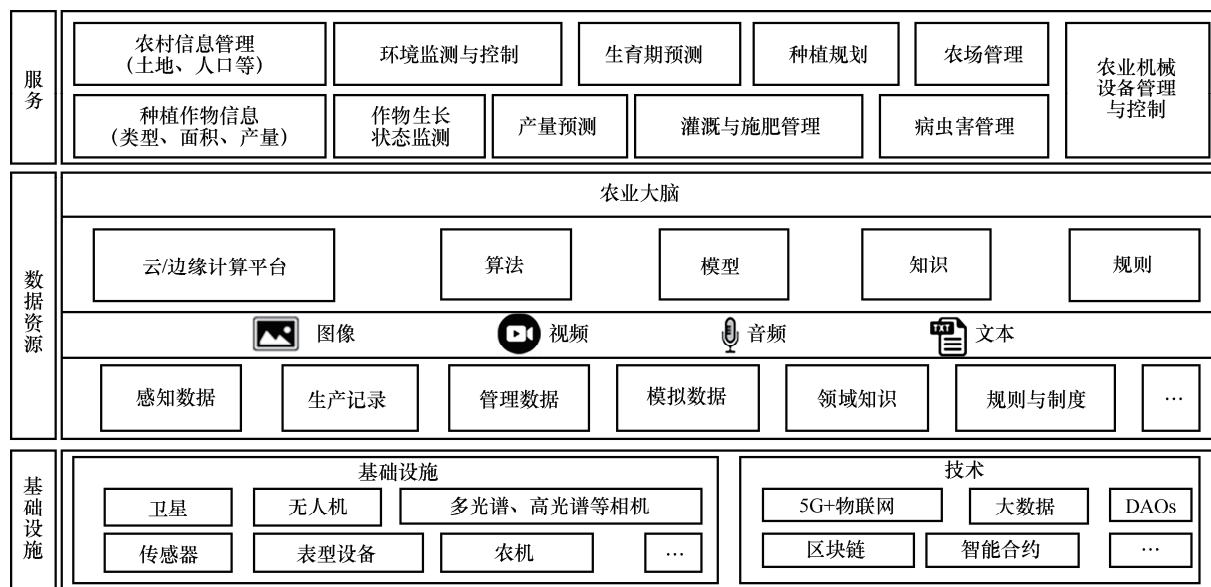


图5 系统农业的实施场景框架

供销一体的一站式智慧农业服务，有望通过市场牵引推动种植端的变革，包括种植方式及新技术应用。近年来，已出现为农户提供产销闭环服务的智慧农业创业公司。这类公司凭借在农产品销售方面的能力和资源，驱动种植端的智能技术应用，为农户解决种什么、如何种、如何卖的问题。产地环境数据及消费者偏好等市场信息的深度融合和处理，将支撑订单农业、社区支持农业等形式，从而提高整体资源利用效率，以技术带动观念的转变。

系统农业的发展和应用预期与元宇宙相关技术的进展息息相关。元宇宙概念的提出催生了农业元宇宙^[43-44]，其目标是通过精细的资源调度和农事安排，以安全、高效和环境友好的方式，支持三农的和谐发展。DAOs 和 Web3.0 的发展为未来农业元宇宙的发展创造了数据和信任基础。元宇宙中基于 Web3.0 和 DAOs 的分布式自主科学（decentralized science, DeSci）则有望将智慧乡村转变为具有“6I”的“6S”社会。“6S”即物理世界安全（safe）、网络世界安全（secure）、生态世界可持续（sustainable）、对个人需求敏感（sensitive）、服务于所有人（serves）、智能于所有人（smart）；“6I”即社会具有智能科技的认知智能（cognitive intelligence）、平行智能（parallel intelligence）、用于智能运营和管理的加密智能（crypto intelligence）、联邦智能（federated intelligence）、用于智能发展和可持续性的社会智能（social intelligence）和生态智能（ecological intelligence）^[45]。

我国是农业大国。在城乡一体化进程中，大量农业人口涌入城市，但根仍在农村。回归乡村、回归自然是很多人的梦想，期望在经济、政治、文化、社会、生态等方面参与乡村建设。数字化、远程参与农业，更适合于已经习惯移动互联网的城市居民。远程租地的平台曾出现于大众视线，满足在乡村体验生活、参与产业的需求。随着系统农业的提出与发展，将农业、农村与农民作为一个整体考虑，使得未来具有“6I”的“6S”支撑智慧乡村的发展成为可能。

参考文献：

- [1] ALEXANDRATOS N. How to feed the world in 2050[C]//Proceedings of High-Level Expert Forum. [S.l.:s.n.], 2009.
- [2] TARDIEU F, CABRERA-BOSQUET L, PRIDMORE T, et al. Plant phenomics, from sensors to knowledge[J]. Current Biology, 2017, 27(15): R770-R783.
- [3] 赵春江. 植物表型组学大数据及其研究进展[J]. 农业大数据学报, 2019, 1(2): 5-18.
ZHAO C J. Big data of plant phenomics and its research progress[J]. Journal of Agricultural Big Data, 2019, 1(2): 5-18.
- [4] ZHANG C Z, YANG Z M, TANG D, et al. Genome design of hybrid potato[J]. Cell, 2021, 184(15): 3873-3883.
- [5] YANG W Y, GUO T T, LUO J Y, et al. Target-oriented prioritization: targeted selection strategy by integrating organismal and molecular traits through predictive analytics in breeding[J]. Genome Biology, 2022, 23(1): 1-19.
- [6] 康孟珍, 王秀娟, 华净, 等. 平行农业: 迈向智慧农业的智能技术[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(2): 107-117.
KANG M Z, WANG X J, HUA J, et al. Parallel agriculture: intelligent

- technology toward smart agriculture[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(2): 107-117.
- [7] 王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2006, 3(2): 26-34.
- WANG F Y. On the modeling, analysis, control and management of complex systems[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2006, 3(2): 26-34.
- [8] KANG M Z, WANG F Y. From parallel plants to smart plants: intelligent control and management for plant growth[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 4(2): 161-166.
- [9] STRINGER L C, FRASER E D G, HARRIS D, et al. Adaptation and development pathways for different types of farmers[J]. *Environmental Science & Policy*, 2020, 104: 174-189.
- [10] LOWDER S K, SKOET J, RANEY T. The number, size, and distribution of farms, smallholder farms, and family farms worldwide[J]. *World Development*, 2016, 87: 16-29.
- [11] PRETTY J, ATTWOOD S, BAWDEN R, et al. Assessment of the growth in social groups for sustainable agriculture and land management[J]. *Global Sustainability*, 2020, 3.
- [12] 温铁军, 梁少雄, 刘良. 乡建笔记: 新青年与乡村的生命对话[M]. 北京: 东方出版社, 2020: 396.
- WEN T J, LIANG S X, LIU L. Rural construction notes: dialogue of life between the new youth and the village[M]. Beijing: Oriental Press, 2020: 396.
- [13] CUI Z L, ZHANG H Y, CHEN X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. *Nature*, 2018, 555(7696): 363-366.
- [14] FAN M H, KANG M Z, WANG X J, et al. Parallel crop planning based on price forecast[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2022, 37(8): 4772-4793.
- [15] BERTALANFFY L V, WOODGER J H. Modern theories of development: an introduction to theoretical biology[M]. London: Oxford University Press, 1933.
- [16] LINNÉ C V. *Systema naturae in quo naturae regna tria, secundum classes, ordines, genera, species, systematice, proponuntur*[M]. Stockholm: Apud G. 1740.
- [17] MESAROVIC M D. Systems theory and biology—view of a theoretician[C]//*Proceedings of systems theory and biology*. Heidelberg: Springer, 1968: 59-87.
- [18] LANDER E S, LINTON L M, BIRREN B, et al. Initial sequencing and analysis of the human genome[J]. *Nature*, 2001, 409(6822): 860-921.
- [19] BOOGERD F C. *Systems biology: philosophical foundations*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [20] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域: 开放的复杂巨系统及其方法论[J]. *自然杂志*, 1990, 12(1): 3-10, 64.
- QIAN X S, YU J Y, DAI R W. A new field of science—open complex giant system and its methodology[J]. *Nature Magazine*, 1990, 12(1): 3-10, 64.
- [21] SURAVAJHALA P, KOGELMAN L J A, KADARMIDEEN H N. Multi-omic data integration and analysis using systems genomics approaches: methods and applications in animal production, health and welfare[J]. *Genetics Selection Evolution*, 2016, 48(1): 1-14.
- [22] KEATING B A, MCCOWN R L. Advances in farming systems analysis and intervention[J]. *Agricultural Systems*, 2001, 70(2/3): 555-579.
- [23] KANG M Z, FAN X R, HUA J, et al. Managing traditional solar greenhouse with CPSS: a just-for-fit philosophy[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(12): 3371-3380.
- [24] 华净, 王秀娟, 王浩宇, 等. 基于物联网的日光温室环境监测在线校准[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(5): 120-124.
- HUA J, WANG X J, WANG H Y, et al. Online calibration of environmental monitoring in solar greenhouse based on internet of things[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(5): 120-124.
- [25] HUA J, WANG X J, WANG H Y, et al. Prediction of crop phenology—a component of parallel agriculture management[C]//*Proceedings of 2017 Chinese Automation Congress*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 7704-7708.
- [26] FAN X R, KANG M Z, HEUVELINK E, et al. A knowledge-and-data-driven modeling approach for simulating plant growth: a case study on tomato growth[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 312: 363-373.
- [27] TAWSEEF SHAIKH A, TABASUM R, FAISAL R L. Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198.
- [28] SUBEESH A, MEHTA C R. Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and internet of things[J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2021, 5: 278-291.
- [29] 韩佳伟, 朱文颖, 张博, 等. 装备与信息协同促进现代智慧农业发展研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(1): 55-63.
- HAN J W, ZHU W Y, ZHANG B, et al. Equipment and information collaboration to promote development of modern smart agriculture[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(1): 55-63.
- [30] SHAIKH T A, AHMAD MIR W, RASOOL T, et al. Machine learning for smart agriculture and precision farming: towards making the fields talk[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, 29(7): 4557-4597.
- [31] YUAN S W, L X, DU E H. Effects of farmers' behavioral characteristics on crop choices and responses to water management policies[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 247.
- [32] 王秀娟, 康孟珍, 华净, 等. 从群体到个体尺度——基于数据的DSSAT和GreenLab作物模型连接探索[J]. *智慧农业(中英文)*, 2021, 3(2): 77-87.
- WANG X J, KANG M Z, HUA J, et al. From stand to organ level—a trial of connecting DSSAT and GreenLab crop model through data[J]. *Smart Agriculture*, 2021, 3(2): 77-87.
- [33] VOS J, EVERS J B, BUCK-SORLIN G H, et al. Functional-structural plant modelling: a new versatile tool in crop science[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(8): 2101-2115.
- [34] DE REFFYE P, HU B G, KANG M Z, et al. Two decades of research with the GreenLab model in agronomy[J]. *Annals of Botany*, 2021, 127(3): 281-295.

- [35] PENG B, GUAN K Y, CHEN M, et al. Improving maize growth processes in the community land model: implementation and evaluation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 250/251: 64-89.
- [36] WANG X H, ZHAO C, MÜLLER C, et al. Emergent constraint on crop yield response to warmer temperature from field experiments[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(11): 908-916.
- [37] WENG Y C, WANG X J, HUA J, et al. Greenhouse environment control based on computational experiments[C]//Proceedings of 2020 4th High Performance Computing and Cluster Technologies Conference & 2020 3rd International Conference on Big Data and Artificial Intelligence. New York: ACM Press, 2020.
- [38] WENG Y C, WANG X J, HUA J, et al. Forecasting horticultural products price using ARIMA model and neural network based on a large-scale data set collected by web crawler[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2019, 6(3): 547-553.
- [39] 庄家煜, 许世卫, 李杨, 等. 基于深度学习的多种农产品供需预测模型[J]. 智慧农业, 2022, 4(2): 174-182.
- ZHUANG J Y, XU S W, LI Y, et al. Supply and demand forecasting model of multi-agricultural products based on deep learning[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(2): 174-182.
- [40] LAKSHMANAN V I, CHOCKALINGAM A, MURTY V K, et al. Smart villages: bridging the global urban-rural divide[M]. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020.
- [41] 吕普生. 数字乡村与信息赋能[J]. 中国高校社会科学, 2020(2): 69-79, 158.
- LYU P S. Digital Village and information empowerment[J]. Social Sciences in Chinese Higher Education Institutions, 2020(2): 69-79, 158.
- [42] 康孟珍, 王秀娟, 李冬, 等. 基于联邦学习的分布式农业组织[J]. 智能科学与技术学报, 2022, 4(2): 288-297.
- KANG M Z, WANG X J, LI D, et al. Distributed agricultural organization based on federated learning[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2022, 4(2): 288-297.
- [43] WANG X J, KANG M Z, SUN H Q, et al. DeCASA in AgriVerse: parallel agriculture for smart villages in metaverses[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2055-2062.
- [44] KANG M Z, WANG X J, WANG H Y, et al. The development of AgriVerse: past, present, and future[J]. IEEE Transactions on Systems,

Man, and Cybernetics: Systems, 2023(99): 1-10.

- [45] WANG F Y. Parallel intelligence in metaverses: welcome to Hanoi![J]. IEEE Intelligent Systems, 2022, 37(1): 16-20.

[作者简介]



康孟珍（1975- ），女，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室副研究员，主要研究方向为平行农业、计算植物。



孙贺全（1982- ），男，马克斯·普朗克植物育种研究所、慕尼黑大学（德国）遗传学研究所生物信息学研究员，主要研究方向为计算生物学、作物基因组学。



王秀娟（1982- ），女，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室助理研究员，主要研究方向为平行农业、植物建模。



王飞跃（1961- ），男，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任，主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能、知识自动化。