

平行农业：迈向智慧农业的智能技术

康孟珍^{1,3}, 王秀娟^{1,2}, 华净^{1,3}, 王浩宇^{3,4}, 王飞跃^{1,2}

(1. 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, 北京 100190;

2. 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;

3. 青岛智能产业技术研究院 智慧农业研究所, 山东 青岛 266109;

4. 青岛中科慧农科技有限公司, 山东 青岛 266109)

摘要: 农业生产具有很强的不确定性、多样性、复杂性, 其经营效益与自然条件、国家政策、市场环境息息相关。互联网时代的到来, 给农业生产带来了新的挑战和机遇。总的来说, 智慧农业是指利用信息技术, 对农业生产—经营—管理—服务全产业链进行智能化控制, 实现农业生产的优质、高效、安全和可控。在略述当前智慧农业信息感知、智能决策和决策实施三方面技术现状的基础之上, 提出实现智慧农业智能决策之平行农业技术, 以及如何以人工系统实现描述智能、以计算实验实现预测智能、以平行执行实现引导智能, 并提出与农业企业资源计划、农业生产执行系统、农业生产过程控制系统相结合的构想。在当今大力发展农业规模化生产的背景下, 为发展工业化的农业生产和经营提供了思路。

关键词: 精细农业; 深度学习; 农业大数据; 智能决策; 平行系统; 农业企业资源计划; 农业生产执行系统; 农业生产过程控制; 农业 5.0

中图分类号: S-1

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201904

Parallel agriculture: intelligent technology toward smart agriculture

KANG Mengzhen^{1,3}, WANG Xiujuan^{1,2}, HUA Jing^{1,3}, WANG Haoyu^{3,4}, WANG Fei-Yue^{1,2}

1. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109, China

4. Qingdao Smart Agritech Co. Ltd., Qingdao 266109, China

Abstract: Agricultural production is featured by strong uncertainty, diversity and complexity. Production benefit is related to natural conditions, national policies and market environment. Internet brings new challenges and chances to the management in agriculture. Generally speaking, smart agriculture refers to smart control on full production chain including management and service, using ICT techniques, in order to achieve high quality, high efficiency, security and controllability. Based on a brief introduction on the techniques related to these three aspects, the parallel agriculture as the methodology for decision support in smart agriculture was proposed, with artificial system for description intelligence, computational experiments for prediction intelligence, and parallel execution for prescription intelligence. Moreover, the link to agricultural enterprise resource planning (ERP) system, manufacturing execution system (MES) and process control system (PCS) was discussed. As China was developing large-scale agricultural production, methodology for managing scaled agriculture production was provided.

Key words: precision agriculture, deep learning, agricultural big data, smart decision, parallel systems, agricultural ERP, MES, PCS, agriculture 5.0

收稿日期: 2019-02-22; 修回日期: 2019-03-12

通信作者: 华净, jing.hua@ia.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.31700315, No.61533019, No.31400623)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.31700315, No.61533019, No.31400623)

1 引言

智慧农业是指利用信息技术,对农业生产、经营、管理、服务全产业链进行智能化控制,实现农业生产的优质、高效、安全和可控^[1]。我国高度重视发展智慧农业,《中华人民共和国国民经济和社会发展规划第十三个五年规划纲要》《国家信息化发展战略纲要》都明确提出要加强农业与信息技术融合,大力发展智慧农业。《全国农业现代化规划(2016—2020年)》再次强调要推进农业转型升级,提高技术装备和信息化水平,加快建设智慧农业。发展智慧农业是实现现代农业的必由之路。

在一、二、三产业的融合过程中,智慧农业可以打破信息瓶颈、促进信息流动和分享。智慧农业的技术框架大体包括信息感知、智能决策和决策实施3个方面。信息感知包括通过农业物联网等获得各种与农业生产经营相关的信息,包括作物、土壤等环境以及从事农业生产的人乃至社会的信息;智能决策如同大脑,对各类信息进行分析处理,提供管理或控制的方案,例如专家系统;决策实施则根据分析结果进行,包括经营策略、种植方案、环境调控或农机(例如无人机、播种机)的操控。信息感知和决策实施往往依托于硬件设备,智能决策则主要是数据和知识的处理和计算。农业专家系统一度承担过此重任,但随着信息技术迭代而更新的却是凤毛麟角。而当今大数据、云计算、物联网的时代背景,对智能决策提出了更高的要求。本文在分析智慧农业国内外现状的基础上,重点着眼于作为智慧农业核心的智能决策,以平行农业为主线提出面向智能决策的描述智能、预测智能和引导智能。

2 智慧农业的现状

农业生产的类别包括种植、养殖、加工等,种植又分为大田农业、温室农业。这里包括智慧农业的共性技术但侧重于温室农业,从感知、决策和实施3个方面略作介绍。

2.1 信息感知和数据传输

大数据是智慧农业的基础,信息感知则是农业数据的源头。狭义来说,农业数据是指人之外的农作物自身及环境的生物物理信息。然而,农业生产活动离不开人的活动,生产者自身的经验、消费者构成的市场均会对生产产生影响。因此,广义来说,农业数据还包括从事农业生产的人、社会环境、市

场动态等社会信息。

生物物理信息感知包括空间信息感知和地面信息感知。前者主要包括遥感技术、卫星定位技术、地理信息技术(“3S”技术):基于遥感技术可获得种植面积、作物长势、洪涝、病虫害情况及土壤和作物营养等空间信息;基于卫星定位技术可获得装备的精准位置,可用于农业机械的移动定位;地理信息技术则给出了一个直观的管理数据的方式^[2-3]。后者主要是农业物联网所涉及的传感技术,获得如土壤和空气的温湿度、光照强度、二氧化碳浓度、风速、土壤盐度等数据。除此之外,还有通过可见光/近红外光谱、近红外光谱速测植物养分、土壤肥力、农产品质量的传感器技术。地面感知还包括在田间设置摄像机或红外监测仪等,用户可远程观测,适合用于提升种植透明度、增强消费者的信心。低功耗、低成本、性能稳定的传感器是长期获得可靠数据的关键,也正是目前推广应用农业物联网的瓶颈。

社会信息感知包括农产品市场需求、农产品价格、农业政策、种植者经验等方面。当前,在农业市场国际一体化的发展趋势下,农业企业、协会、合作社等经济合作组织对产前种什么效益高、产中何种农资优质优价、产后卖给谁等市场与技术信息有着更迫切的需求,这些信息对我国现代农业特别是规模化农业、订单农业以及地方特色农业的发展意义重大。农产品需求信息是农业市场的灵魂,便捷、准确地捕捉市场信息,把握市场动向,及时调整生产及销售方向,是感知社会信息的主要目标。基于爬虫技术的自动采集是通过网络感知市场价格的重要方式^[4],可用于每周的农产品价格预测等^[5]。而以投入占用产出技术为核心的粮食产量预测模型则考虑多种体现社会信息的农业投入^[6]。

数据传输基于通信网络,将分散的具有独立功能的设备或子系统连接起来,并按照规定的网络协议进行数据通信,实现分布式系统硬件和软件资源的共享及系统的综合管理与控制^[7]。按照传输媒质的不同,通信技术可以分为有线通信技术和无线通信技术。在农业应用中,有线通信技术存在系统安装成本较高、传输距离受限等不足^[8],限制了其在实际农业生产中的推广应用。无线通信技术的分类方法有很多种,根据传输距离的远近,可以分为无线局域网技术、无线广域网技术两类^[9]。无线局域网技术主要包括 ZigBee、W-Mbus、Bluetooth、Wi-Fi、NFC(近场通信)技术、无线射频识别(RFID)、

Z-Wave 等^[10]。RFID 技术在食品溯源^[11]、货物追踪、产品防伪^[12]等方面发挥了较大作用。常见的广域网技术有 GPRS、4G、5G、LoRa 以及 NB-IoT^[13]。就无线广域网而言, 以 LoRa、NB-IoT 为代表的低功耗广域物联网 (LPWAN) 是未来农业传感器网络组网的主要途径。在技术层面, 国内很多科研院所和公司均可实现上述不同的传输方式, 实际应用采用哪种数据传输方式则需根据农田环境、方案需求、成本约束等因素综合确定。

综上所述, 农业大数据涵盖农业生产本身和产前、产后以及农产品加工、销售整个链条中所产生的大量的数据。目前获取各种农业数据的成本还比较高, 缺乏成熟的产品, 而且不同的用户有不同的需求。如何融合生物物理和社会信息, 为农户、政府、商家等不同的利益相关方提供相应的信息服务, 仍是未来要应对的挑战。

2.2 数据分析和智能决策

智能决策是智慧农业的核心, 是数据产生价值的过程, 覆盖农业生产从产前排产、产中种植管理及环境控制到产后存储、加工、运输和销售等各个环节。产前规划包括需求分析和种植方案推荐^[14]; 产中种植管理包括环境调控 (对于设施农业)、施肥、打药、灌溉等方面的智能决策支持; 产后农产品的库存控制、运输车辆调配、流通加工与配送中心的选址等, 均需要智能计算方法提供决策支持。作物生产管理决策支持技术的研究, 集中在作物生长模拟及各类专家系统方面。

作物管理专家系统是专家系统在农业领域的具体应用, 一般包含一个由权威农业专家的经验、资料、数据与成果构成的知识库, 并能利用其知识, 模拟农业专家解决问题的思维方法进行判断、推理, 以求得解决农业生产问题结论的智能程序系统。早期开发的农业专家系统主要用于农作物的病虫害诊断, 例如 1978 年伊利诺伊大学开发的大豆病虫害诊断专家系统 PLANT/ds^[15], 以及后来的玉米螟虫虫害预测专家系统 PLANT/cd。到了 20 世纪 80 年代中期, 农业专家系统迅速发展, 已从单一的病虫害诊断转向生产管理、经济分析与决策、生态环境等。一度较知名的有美国的棉花生产管理专家系统 GOSSYM/COMAXIS^[16], 后来发展出了用于桃园管理的 CALEX/PEACHES、用于水稻生产管理的 CALEX/RICE。目前, 美国 DSSAT (decision support system for agro-technology transfer) 系统是国际上较

具代表性的农业决策支持系统。我国关于农业专家系统的研究于 20 世纪 80 年代业已开始, 属于国际上开展此领域较早的国家之一。1985 年中国科学院合肥智能机械研究所率先和安徽农业科学院合作研发了“砂姜黑土小麦施肥专家咨询系统”^[17]。此外, 中国农业科学院、北京市农林科学院、河北农业大学、江苏农业科学院等院所分别研发了施肥、管理等不同的专家系统。

基于规则的专家系统在 20 世纪 90 年代进入了一个低迷期。随着农业进入大数据时代, 农业智能决策转入以大数据驱动的方式, 并且体现在农业生产的各个环节。农业智能决策支持系统的算法和呈现方式需随之迭代。随着数据获取的相对便捷和智能手机的普遍使用, 过去只能在电脑上离线使用、被诟病为电子词典的农业专家系统迎来了新的发展时代, 但其也需要发展和应用, 以顺应当下大数据时代的新的理论和方法。未来很可能还需要可解释的智能决策, 要知其然还要知其所以然。

2.3 智能农机和管理软件

智能农机和管理软件是信息感知、智能决策后的呈现形式。随着我国农业从业人员的老龄化和数量减少, 农业智能装备的应用是必然趋势。农业智能装备包括服务于施肥、打药、灌溉、修剪、采摘、播种、环境调控等各种操作的设备。

国外的智能农机装备较为先进, 应用较广, 主要有智能导航、自动驾驶、变量施肥、变量喷药等功能。例如, 美国 Trimble 公司的 EZ-Guide 系统和 AutoSteer 系统能够实现农田作业过程的智能导航和自动驾驶; Mid-Tech 公司的 Field Pilot 可以根据需要实现精准变量施肥、变量喷药等作业控制, 同时实现智能导航和自动驾驶; Beeline Technologies 公司的 Beeline 系统也实现了自动驾驶功能, 在北美的大型农场中得到了应用, 并获得了好评。美国的 John Deere 公司生产了 MaxEmerge Planters 系列高速气吸式精量播种机。随着国家对农业智能装备研发的重视和投入, 国内的多个机构开展了相关研究, 研究内容包括自动导航、变量施肥、精准喷药、播种、插秧、喷药、除草和收获等^[18]。此外, 我国的农业航空作业量逐年增加, 作业领域逐渐扩大, 除对粮食作物、园艺作物、经济作物施药外, 还开展了植物生长授粉等作业^[19]。农田作业装备精准控制技术是发达国家在大面积机械化条件下发展起来的, 而我国的作物生产地域环境条件差异较大,

因此技术和装备的选择不可千篇一律地套用。发展适应我国国情的精准农机化必须持续地、因地制宜地逐步完善^[20]。

管理软件包括农业企业的企业资源计划(enterprise resource planning, ERP)系统、信息管理系统(management information system, MIS),用于实现企业的财务管理和生产管理。不同于工业企业的管理软件,农产品的产量会随环境和管理波动,这也给管理带来了相当大的挑战。原本面向工业企业的各个ERP系统、MIS提供商逐渐进入农业领域,但都面临这一挑战。而在物联网连接一切、工业进入4.0甚至5.0的时代,ERP系统和MIS之间的互联互动也已提上了日程,这就对农业原本不成熟的管理软件提出了更高的要求——以面向订单式、定制式的农业生产。如何及时地响应市场信息、安排生产计划,对于农业企业的经营管理服务非常重要。由于经营人员的理念、学历的限制,农业管理软件在小型农业企业中还不普及,智能化的管理软件还有很大的发展空间。

3 问题和挑战

可持续的农业、粮食和自然资源是人类生存的根本。到2050年,世界人口预计为90亿~100亿人,需要生产比现在多60%~70%的食品,而同时,需要对环境产生最小甚至零负面的影响,减少温室气体排放量,减少用水量,要考虑能源的可用性和成本,增加保护性耕作的应用,采用生物技术,增加有机食品产量^[21]。实现知识和信息的有效传播,减少由于信息不对称带来的资源浪费,及时地响应市场和环境变化,将是农业这一传统产业需要面临的挑战,对我国来说尤其如此。

在2017年IEEE首次智能农业会议上,一个融合纳米技术、生物技术、信息科学和认知科学的综合应用系统被认为是迫切需要的。与现代农业发展较好的国家相比,我国与其既有共性也有差异。从技术成熟度来看,在欧、美等国(地区),智能农机装备早已进入大规模应用,而我国则起步相对较晚。农业传感器的核心专利技术主要被国外所有。现有的农业物联网平台中,数据或者是缺失,或者是准确性差,或者难以公开共享^[22]。从商业模式来看,我国已实施的智慧农业项目大多为政府示范项目或研究项目,缺乏可持续的商业模式,未能发挥大数据的商业价值。从学术研究来看,我国智慧农业相关的期刊论文虽然数量

不少,但高被引文章很少,未能形成国际影响力。从产业生态来看,国外正主动形成由农业企业、智慧农业技术创新公司、市场、农资提供方等多方构成的智慧农业生态;我国也逐渐呈现出类似趋势,正处于萌发期。从应用场景来看,国外土地相对集中,以美国为例,地广人稀,而且以平原为主,农业机械化程度高,大面积种植都是靠机械,因而农业信息化推广较易。而我国的土地较分散,过去以小规模种植为主,有些地区是丘陵山地,难以使用大面积下使用的机械,技术的使用需要因地制宜。此外,我国农民呈现出老龄化趋势,知识水平低,收集数据的意识和能力不足。因此,我国的智慧农业技术发展的方式及技术需要考虑实际情况,任重而道远。

信息感知和智能装备的研发涉及硬件的设计和制作,与一个国家制造业的水平息息相关。智能决策研究则基于数据和知识,同时是整体智慧农业系统的核心,也提供农业智能技术直道超车的机遇。在一二三产业深度融合、数据丰富、通信方便的时代,农业智能决策已从线下转到线上,从离线转为实时,需要新的理论体系的支撑。在此背景下,本文提出新时代下面向智慧农业的平行农业智能技术。

4 平行农业的基本思想与体系

基于ACP(人工系统(A)、计算机实验(C)、平行执行(P))的平行系统面对难以建模、难以解析预测的复杂系统(例如交通^[23-24]、社会^[25]、企业^[26]、网络^[27]、能源^[28]、物流^[29])而提出。其本质是在系统中构建一个与实际系统相对应的虚拟系统或人工系统,通过人工系统的推演、学习为实际系统的管理可控制提供支持,系统框架如图1所示^[30]。

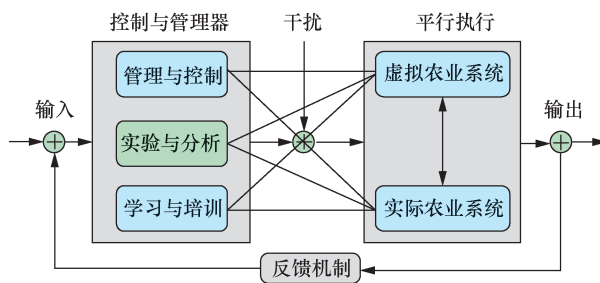


图1 平行农业系统框架

农业虚拟系统的构建与实际系统的平行执行涵盖了描述智能、预测智能、引导智能3个层次^[31],如图2所示。

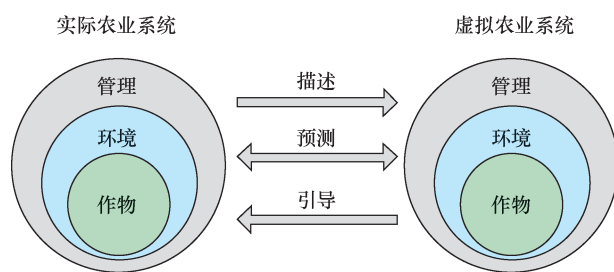


图2 平行农业智能技术

5 平行农业的描述智能

描述智能 (descriptive intelligence) 解决如何在虚拟空间 (cyber space) 构建人工系统、描述实际系统的问题。由于农业生产受品种、种植环境、管理者经验等因素的影响, 具有很强的不确定性、多样性、复杂性, 传统的农业描述主要是对农业生物行为的模拟, 进一步是对生产环境, 乃至社会环境的模拟和建模, 逐渐使得模型与真实系统之间的建模鸿沟成为一个极为严峻的问题。由于建模鸿沟的存在, 描述系统的方式逐渐由依据直接控制系统行为的“牛顿定律”进行建模转向依据只能间接影响系统行为的“默顿定律”进行建模^[32]。

5.1 基于知识的模型

农业生物行为模拟中的作物生长建模是发展最快、成绩最显著的领域, 也是农事模拟的基础。农作物生长模拟自 20 世纪 70 年代荷兰的瓦格宁根大学 (Wageningen University) 的 de Wit 即开始作物模型的研究^[33], 具有代表性的有 TOMGRO^[34]、CERES^[35]、APSIM^[36]等模型。这类模型大多包含了作物的光合作用、呼吸、物质分配的描述, 具有较强的机理性。结合植物器官层面的物质模拟和植物形态构建, 形成了作物建模的一个前沿分支: 植物功能结构模型^[37]。作物的生长过程中固然也存在个体间的相互竞争, 而且最新的模型发展可进行植物单株水平上的光合作用、物质合成和分配的模拟^[38], 但对于农业生产来说, 关注的兴趣点主要为群体行为的模拟, 以及生育期和产量。模型具有参数多、复杂度高、不易应用的特点, 这些特点成为其应用于农业生产的瓶颈。

农业环境的描述主要包括主要气象因子的描述; 农业环境的模拟为农作物的描述提供输入数据。一方面是大田环境的模拟, 包括各种大气模型; 另一方面是温室环境模型, 包括玻璃连栋温室模型^[39]以及日光温室模型^[40]。温室环境中的温湿度等环境

因子相互影响, 基于知识的环境模型的复杂度相当高, 可用于温室的设计及对温室内部能量流动的理解和教学, 但对于栽培各种作物的实际温室的管理则不适宜。农事管理则包括作物种植日期、种植密度、肥料用量及方式、灌溉用量与时间确定等, 以进行对农业生产的定量研究; 农业经济因素的描述, 包括农业再生产的投入与产出关系、市场价格的模型等, 可用于指导未来的生产计划安排。

5.2 基于数据的模型

基于数据的模型在这里特指数据通过学习和训练而构建的模型。现有的大部分作物和环境模型的特征在于, 在给定当前系统状态与控制条件的情况下, 理论上系统下一步的状态可通过求解方程而准确地获得, 从而可以精确地计算和预测系统的行为, 这类系统称为牛顿系统。对于一个仅由作物与环境构成的系统, 牛顿系统在一定范围内适用。但由于作物是生命体, 模型的复杂度高, 实际应用中往往会替代为基于数据和智能算法的模型, 如 Patil 等^[41]利用回归和神经网络模型构建了热带温室温度模型。陈雨青^[42]运用“GA-IBP”算法建立了模拟室内温度的夏季温室小气候神经网络模型。这类基于数据的统计模型 (黑箱模型) 包括人工神经网络^[43]、支持向量机^[44]和模糊方法^[45]等, 是温室智能管理和控制的基础。农事的模拟可基于上述模拟展开。以施肥为例, 基于环境数据和作物模型可计算何时为作物的关键生长期和具体的生长量, 根据经验比例关系可进行需肥量的模拟。

基于数据的人工系统构建方法将对象视为黑箱, 关注输入和产出之间的关系, 而不去对生命体内部复杂的过程进行建模和模拟。在数据充分的条件下, 可以通过反复训练和学习达到期望的效果, 实现人工系统构建的目的。

5.3 数据和知识共同驱动模型

作物的生长由基因和环境决定, 在不同的环境下, 尽管作物的大小和生育期会有相应的调整 (称为作物的可塑性), 但仍保持一定的规律。知识和数据共同驱动的模型即是根据作物生长规律的描述与统计模型相结合的思路, 将描述作物动态生长过程的模型与神经网络相耦合, 使得模型有很强的可塑性, 而且同时可以计算多种状态变量^[46], 从而获取作物生长过程的关键信息。这种方式不仅降低了对数据的依赖性, 而且弥补了传统模型对坐果、分枝等可塑性行为难以模拟和预测的不足。未

来这类模型将有很大的空间,不仅可用于农业生产,还可用于面向教育、娱乐等更具真实感行为的虚拟植物构建。

6 平行农业的预测智能

预测智能(predictive intelligence)是建立在描述智能基础之上的对未来发展的预估和优化,基于计算实验实现,反映的是对当前和过去的规律掌握之上的对未来的认识。

对于如图2所示的“作物—环境—管理”构成的系统,核心是作物对环境响应的预测,管理则通过环境调控起作用。实际的作物种植周期至少达一个月,借助信息技术和人工系统,在虚拟空间中可快速预测不同环境或农事管理下的作物响应,例如不同种植密度、播期、温度条件下的作物生长变化^[47-48],以及在假定全球温室气体增加的判断下作物产量的趋势^[49]。除了环境,作物的生长还受基因的影响。随着基因技术的发展,近年来已有对于不同基因信息的作物的模拟和预测,以实现目标环境下的品种设计^[50]。

智慧农业归根结底要实现对企业、生产过程、生产环境进行更好的管理和控制,以达到期望的目标。这些问题的解决对应于农业ERP系统以及农业生产执行系统(manufacturing execution system, MES)、农业生产过程控制系统(process control system),这三者之间相互联系、相互支撑。预测智能需服务不同层面的管理的预估和优化。

6.1 作物生长管理方案优化

鉴于作物的生长受环境和遗传因素调控,管理方案包括优化给定作物品种的环境配置,以及优化给定环境下的品种选择。对于基于规则的专家系统,这类推荐方案往往可以基于历史经验通过知识库给出。基于作物生长模型的专家系统则可通过作物对环境响应的模拟进行方案的优化计算。为了从虚拟输出中给出最优(次优)的选择,优化算法往往是必要的。例如,吴林等^[51]计算了给定量的水条件下的最优灌溉策略,使向日葵的产量最大化。优化方案固然可基于特定算法得到,但是当要选择的因素很多时(例如播期、密度、施肥水平的组合),优化方案可以基于计算实验产生,即利用人工实验进行试验设计,选择最佳的组合。

6.2 农业生产执行系统(MES)

MES与ERP关系密切,主要是根据生产目标

安排农业生产,以支撑预期经营目标。例如,在保障每年供应蔬菜总量的情况下安排种植计划。对于有一定规模的农业企业,种植计划的安排有时需要几位专家连续工作几天才能完成。结合作物产量、产期的模型,种植计划就可以转为一个非线性整数规划问题,对其进行求解,即可快速地回答在不同的目标下如何安排种植计划。根据经营目标的不同,优化目标可以为产量最大、产量均衡或效益最大等。农业种植计划的安排需随着环境的调控方案(对于温室)和施肥、打药等方案的设定而进行。例如,根据作物品种、约束条件和目标,计算最佳的耕作计划^[14],这是农业生产过程中人力及其他生产资料准备所需的关键信息。从温室环境调控的角度,作物对环境的响应包括短期的响应和长期的响应。短期预测用于调控温室环境装置的开闭,长期预测则可用于确定生产管理计划。随着众多的气象服务的提供,未来几个小时乃至几天的天气变化均可以预测,从而使得温室内环境的短期预测也可基于此做出^[52]。从农事管理角度来看,以施肥为例,基于作物生长预测、收获所带走的营养,可以预估未来的施肥所需量^[53]。

6.3 农业企业资源计划(ERP)

ERP包括供应链管理、生产管理、成本管理、财务管理、人力管理等,记录和分析企业经营业务发生过程中的物流、资金流状态。现有的农业ERP系统更多为信息系统,包括投入品使用记录、农事操作记录、基地的地块生产单元、投入品购买和使用档案、年度生产档案、详细的农事活动、产品抽检记录、销售出库档案等,核算成本和利润,使得经营者心中有数。数据的积累有助于经营者逐渐提高经营水平,为其提供决策支持。从面向生产管理角度来看,预测是决策的基础。农业生产是一项经济活动,技术仅能解决一部分问题,而市场是影响效益的关键。预测智能通过计算实验帮助回答“为实现某种经营目标,应如何进行资源配置”的问题。其中,人力资源是一个重要方面。我国目前呈现农业用人荒的现状,提前规划、提前预知人力需求有助于将被动转为主动,提前应对。“互联网+农业”正在打破信息瓶颈,构建从生产者到消费者的全程透明信息流,种植者能够获得消费者的直接反馈。这给农业经营者既带来了快速响应的挑战,也带来了按订单生产的机遇,需要根据经营目标进行快速的响应。

7 平行农业的引导智能

引导智能 (prescriptive intelligence) 是通过描述智能与预测智能找到有利的或优化的策略, 在人工系统与实际系统的平行执行过程中, 两者持续地相互作用、相互反馈、相互引导。不仅要利用“当前和过去的的数据”, 还要综合考虑期望结果、所处环境、资源条件等更多影响因素, 在不停地对比分析所有可能方案的基础上, 提出“可以直接用于决策的建议或方案”。农业生产过程可类比于交通导航系统: 在管理过程中, 根据计算实验预设一个种植计划, 类比于最初的导航方案。实际过程中, 当在各种因素作用下偏离预先路线时, 重新计算方案, 在线更新。

事实上, 引导 (prescription) 在农业中更常用的表达是“处方”, 主要是农业的施肥处方, 基于土壤的肥力分布、作物的需肥量等计算给出。“引导”的内容则更为广泛, 包括生产计划、环境调控等。根据在系统中是否引入社会因子, 可区分为农业信息物理系统 (cyber-physical systems, CPS) 和社会物理信息系统 (cyber-physical-social systems, CPSS) 的引导智能。

7.1 农业信息物理系统 (CPS)

对于包含“作物—环境”的农业信息物理系统, 以温室为例, 当作物生长发育的预测偏离预先结果时, 模型需要在线学习和调整以适应实际情况。粒子滤波^[54]等算法可以达到这个目的, 该方法已经应用于基于作物模型和遥感数据的叶面积指数的预测^[55]。随着异常天气的出现, 原有的环境自动调控方案已不再适用, 需要从当前点开始更新后续的调控方案。在此范畴内, 整体系统为牛顿系统, 各种在线优化方法均适用。

7.2 农业社会物理信息系统 (CPSS)

对于引入了社会因子的默顿系统, 引导智能的目标在于创造未来, 在“互联网+农业”的时代具有特殊的意义。市场需求对种植的影响从被认为是健康食品的秋葵的种植中可见一斑。当舆论认为秋葵是降糖良药后, 其种植面积迅速扩大。在农村, 由于信息不对称, 目前仍然普遍的现象是农户根据隔壁种什么来判断下一季种什么。在通过“互联网+农业”建立农产品产销信息链的基础上, 基于大数据可以有意识地引导农户种植某种作物, 从而优化整体农产品供求关系和价格的变化。生产者和消费

者都是被引导的对象, 都会对系统产生影响。社会信号的引入 (例如对有机农产品的宣传) 对种植者、消费者的食品健康意识的提升, 都有助于促进可持续发展农业的发展。

8 目前已有工作

中国科学院自动化研究所平行农业团队于1998年基于中法合作与法国农业科学院、法国国际农学发展研究中心、中国农业大学、中国农业科学院等合作开展了植物生长建模的研究, 并联合发展了单株植物的系列模型^[56], 基于此提出了知识和数据共同驱动的模式。如何将作物模型与农业生产管理相结合是团队一直探索的问题。近年来, 团队逐渐以农业 CPSS 为框架^[57]展开了相关研究。研究框架如图3所示。

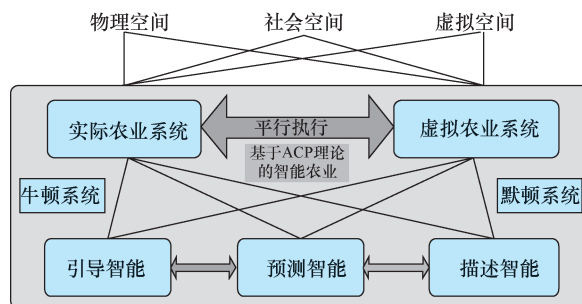


图3 农业社会物理信息系统 (CPSS) 框架

在物理环境感知方面, 平行农业团队开发了基于云平台的轻量化农业环境监测系统, 系统的软硬件界面如图4所示。



图4 潘那利 (Pennellii) 环境监测系统

在智能分析和决策方面, 实现了根据环境数据进行作物产量、产期的预测, 旨在为施肥、打药等农艺操作提供支持^[52]。此外, 还包括融合环境数据和作物模型进行产量的预测^[45], 基于此, 通过结合市场价格, 可以为生产安排提供支持。

目前系统的主要产出形式为农业 MES——道田云生产服务平台,如图 5 所示。该平台集环境监测、投入品管理、产量预测、任务管理、专家问答等功能于一体,既是信息平台,又是智能平台。信息平台本身就可以带来很大的价值,可实现生产过程的全程透明、可溯源管理。目前的溯源系统大多仅体现农产品的产地信息,而没有产品批次的信息,而农产品的质量与每批次的环境、管理有关。对于真正按照有机或类有机高标准管理的农田,全程可溯源的信息能够保障信息的不可伪造性,提升企业信誉。目前新兴的区块链技术^[58]即可用于支撑数据的真实性。

正在开展的研究则是农业知识自动化,涉及物联网、大数据、云计算、智能技术等。正在迅速兴起的知识时代也对人类的智力提出了更高、更加“非分”的要求,知识自动化的方法可“弥补”其智能上的不足,进而去完成各种层出不穷的不定、多样、复杂任务^[59]。知识自动化的关键是把信息、情报等与任务、决策无缝、准确、及时、在线地结合起来,在时间和空间上,实现“所要即所需,所得即所用”。以农业生产过程中涉及的管理、环境及作物等作为观测、建模、计算及运营的对象,知识自动化可实现对农业生产过程的捕捉、识别、追踪、解析及预测。其本质在于以用户为中心,通过采用面向基础设施的架构、面向平台的架构、面向软件的架构,使用 Web 挖掘等技术对互联网、移动互联网及物联网的文本、视频、音乐等数据进行采集(例如对农业专家问答信息的采集);同时,借助机器学习及云计算等技术实现数据的过滤、分析和结构化,获取信息特征;通过特定的建模手段及

方法实现知识的合成,结合农业生产过程的具体特征,针对所涉及的对象进行行为计算与预测,进而提供基于数据与知识的智能推荐与基于决策的智慧服务,实现农业生产管理全过程的自动化^[58]。

农业生产过程和系统的软件化将是农业知识自动化的核心技术之一。基于业已成熟并不断推陈出新的智能技术,加之不断开发的生产过程中的各类模型、方法与工具,可以方便地将人、社会、知识等因素纳入农业生产过程及相关的分析与决策之中,灵活地处理复杂的社会物理信息系统(CPSS)问题,为知识自动化在农业生产过程中的设计与实施奠定坚实的系统工程基础^[60]。

9 结束语

随着人口增加及城镇化发展,农业从基于资源的时代转向基于知识与数据的时代。未来的农业将是知识密集的、市场驱动的。从技术来看,智能技术的发展和普及(如云计算、大数据、物联网、人工智能及智能控制等)使得智慧农业的发展已具备技术条件。从需求来看,人口的老龄化、农业从业人员的缺失,需要智能农业提高生产效率。从社会发展来看,民众对安全食品、环境改善的需求,呼唤农业的精细管理,要求增加农业生产的透明度。从国家政策来看,农业始终是国家非常重视的领域,我国出台了各种有利于农业现代化的政策(例如“三权分离”),为智慧农业的应用创造了条件。

智慧农业的发展与社会的经济、文化、观念息息相关,而不仅仅是农业种植技术和信息技术的结合。将社会因素融入农业系统,发展面向农业的社会物理信息系统(CPSS),将是农业未来发展的

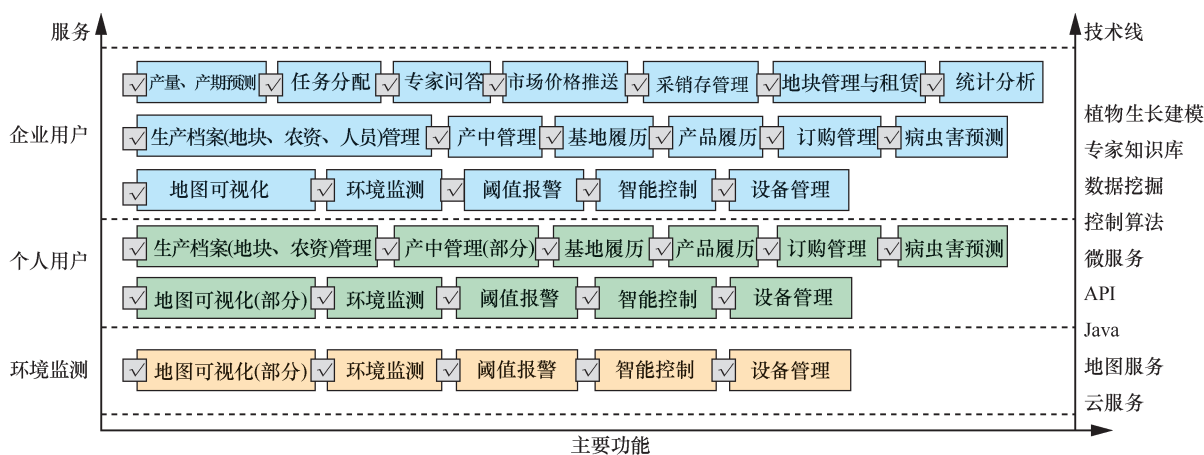


图 5 道田云生产服务平台

趋势。而以描述、预测、引导为三部曲的平行农业,则为智慧农业提供了一个总体发展框架。与之相关,农业 ERP 进入了一个智能 ERP 时代。在与农业相关的物理和社会数据的获取方式和数量远远超过以往的时代,知识自动化提供了从数据中自动获取经验的解决方案^[59]。随着系统包含的对象从环境到“植物—环境”再到管理和市场,系统从牛顿系统向默顿系统演变,描述智能也从知识模型向知识和数据共同驱动的模式转变。特别地,平行农业可提供一个培训的平台。设想这样一个场景:一名新农人怀着情怀进行农业创业,他首先通过一个虚拟的农业公司、虚拟的农场了解和农场经营及管理的方方面面,获取各种信息,然后根据资金、市场预估进行实际企业的经营规划,在运营中,此虚拟农场和实际的农场不断进行互动。对于经营者来说,这如同随身配备了不同专业背景的专家。这样,在知识自动化时代,种菜可以从虚拟转向现实,从游戏转为实践。

回归本源,智慧农业的落脚点在于安全(包括质量和数量安全)、健康的农业生产,实现可持续发展。不适当的施肥、打药对生态环境的破坏已经影响到了社会各个层面。信息的不对称、知识的缺乏,严重制约着农业的可持续发展。现有问题的解决既需要技术,也需要人(包括消费者和生产者)的知识、观念更新。农业社会物理信息系统将社会因子引入农业系统的建模、分析和管理的,具有重要的意义。短期来说,农业生产服务平台的普及可基于大数据促进市场透明化,减少投机的机会,避免菜贱伤农。长远来说,在生产者和消费者之间达成健康生产的共识,可促进农业生产的可持续发展。目前,我国出现的多个由社区和农场构成的社区支持农业(community support agriculture, CSA)系统^[61]是市场引导生产的案例。默顿系统的特征在于,即使在给定当前状态与控制条件的情况下,理论上系统下一步的状态也无法通过求解而准确地获得,从而系统的行为也就难以被精确地预测。农产品供求关系的变化就是个典型的例子:农户常常会根据上一年的农产品价格情况,以及同村人的选择决定当年的种植计划,从而影响市场供求关系的变化。而这类系统行为能够被“默顿定律”影响或指导——“由于信念和行为之间的反馈,预言直接或间接地促成了自身的实现的系统”。这正是平行农业意义之所在。

参考文献:

- [1] 隋斌. 大力发展智慧农业引领驱动农业现代化——在中国发展论坛暨第三届智慧农业创新发展国际研讨会上的主题发言[J]. 农业工程技术, 2016, 36(36): 17-18.
SUI B. Devoting major efforts to developing smart agriculture, leading and driving agricultural modernization[J]. Agricultural Engineering Technology, 2016, 36(36): 17-18.
- [2] 母金梅, 申志永. 3S 技术在我国农业领域的应用[J]. 农业工程, 2011, 1(2): 68-70.
MU J M, SHEN Z Y. Application of 3S technique in agricultural areas in China[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(2): 68-70.
- [3] KHANAL S, FULTON J, SHEARER S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 139: 22-32.
- [4] 王浩宇, 华净, 陆浩, 等. 农产品市场价格采集平台-JJFarmer[C]//2016 年全国智能工程与农业信息化学术会议. 2016.
WANG H Y, HUA J, LU H, et al. Collection platform of agricultural production prices-JJFarmer[C]//2016 National Conference on Intelligent Engineering and Agricultural Information. 2016.
- [5] WENG Y, WANG X, HUA J, et al [J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2019, 6(3): 547-553.
- [6] 陈锡康, 杨翠红. 农业复杂巨系统的特点与全国粮食产量预测研究[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 6: 108-112.
CHEN X K, YANG C H. Characteristic of agricultural complex giant system and national grain output prediction[J]. System Engineering Theory and Practice, 2002, 6: 108-112.
- [7] 高峰, 俞立, 张文安, 等. 现代通信技术在设施农业中的应用综述[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(5): 742-749.
GAO F, YU L, ZHANG W A, et al. Review on modern communication technology and its application to facility agriculture[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(5): 742-749.
- [8] 柏章容. 现代通信技术在设施农业中的应用综述[J]. 农业与技术, 2017, 37(17): 177-178.
BO Z R. Review on the application of modern communication technologies in facility agriculture[J]. Agriculture and Technology, 2017, 37(17): 177-178.
- [9] ZHU C, WANG H, LIU X, et al. A novel sensory data processing framework to integrate sensor networks with mobile cloud[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(3): 1125-1136.
- [10] JAWAD H M, NORDIN R, GHARGHAN S K, et al. Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: a review[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1781.
- [11] 杨信延, 钱建平, 孙传恒, 等. 农产品及食品质量安全追溯系统关键技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 212-222.
YANG X Y, QIAN J P, SUN C H, et al. Key technologies for establishment agricultural products and food quality safety traceability systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 212-222.
- [12] SUN C H, LI W Y, ZHOU C, et al. Anti-counterfeit system for agricultural product origin labeling based on GPS data and encrypted Chinese-sensible code[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2013, 92(1): 82-91.
- [13] 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2018, 1: 1-22.
LI D L, YANG H. A state-of-the-art review for internet of things in

- agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 1: 1-22.
- [14] SANTOS L M R D, MICHELON P, ARENALES M N, et al. Crop rotation scheduling with adjacency constraints[J]. Annals of operations research, 2011, 190(1): 165-180.
- [15] MICHALSKI R S, DAVIS J H, BISHT V S, et al. PLANT/ds: an expert consulting system for the diagnosis of soybean diseases[C]// Ecai-82 European Conference on Artificial Intelligence. 1982.
- [16] MCKINION J M, BAKER D N, WHISLER F D, et al. Application of the GOSSYM/COMAX system to cotton crop management[J]. Agricultural Systems, 1989, 31(1): 55-65.
- [17] XIONG F L. Expert system for decision-making in complex environments[C]// 25th IEEE Conference on Decision and Control. 1986.
- [18] 张小超, 胡小安, 苑严伟. 精准农业智能变量作业装备研究开发[J]. 农业工程, 2011, 1(3): 26-32.
- ZHANG X C, HU X A, YUAN Y W. Research and development of intelligent agricultural machinery on precision agriculture[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(3): 26-32.
- [19] 周志艳, 臧英, 罗锡文. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 1-10.
- ZHOU Z Y, ZANG Y, LUO X W. Technology innovation development strategy on agricultural aviation industry for plant protection in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(24): 1-10.
- [20] 罗锡文, 廖娟, 胡炼. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.
- LUO X W, LIAO J, HU L. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 1-11.
- [21] SCOTT N R, CHEN H, SCHOEN R. Sustainable global food supply[M]. Springer International Publishing, 2016.
- [22] 许世卫. 农业大数据与农产品监测预警[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(5): 14-20.
- XU S W. Agricultural big data and monitoring and early warning of agricultural product[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(5): 14-20.
- [23] WANG F Y, ZHENG N, CAO D, et al. Parallel driving in CPSS: a unified approach for transport automation and vehicle intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(4): 577-587.
- [24] 吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通:虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.
- LV Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [25] 王飞跃, 王晓, 袁勇, 等. 社会计算与计算社会: 智慧社会的基础与必然[J]. 科学通报, 2015, 60: 460-469.
- WANG F Y, WANG X, YUAN Y, et al. Social computing and computational societies: the foundation and consequence of smart societies[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60: 460-469.
- [26] WANG F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS[J]. IEEE Intelligent Systems, 2010, 25(4): 85-88.
- [27] 王飞跃, 杨柳青, 胡晓娅, 等. 平行网络与网络软件化: 一种新颖的网络架构[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(7): 811-831.
- WANG F Y, YANG L Q, HU X Y, et al. Parallel networks and network softwarization: a novel network architecture[J]. Scientia Sinica Informationis, 2017, 47(7): 811-831.
- [28] 张俊, 王飞跃, 方舟. 社会能源:从社会中获得能源[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 7-20.
- ZHANG J, WANG F Y, FANG Z. Social energy: mining energy from the society[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 7-20.
- [29] 沈大勇, 王晓, 刘胜. 平行装卸:迈向智慧物流的智能技术[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 34-39.
- SHEN D Y, WANG X, LIU S. Parallel loading and unloading: smart technology toward intelligent logistics[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 34-39.
- [30] 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.
- [31] KANG M, 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.
- [32] 王飞跃. 系统工程的过去、现在和未来: 系统工程与管理变革: 从牛顿到默顿的升华[J]. 管理学家:实践版, 2013(10): 10-19.
- WANG F Y. The past, present and future of systems engineering: systems engineering and management transformation: paradigm shift from newton to merton[J]. Caijinjie(Guanlixuejia). 2013(10): 10-19.
- [33] DE WIT C T. Photosynthesis of leaf canopies[J]. Agricultural Research Reports. 1965, 663(663): 1-54.
- [34] MEDINA-RUIZ C A, MERCADO-LUNA I A, SOTO-ZARAZÚA G M, et al. Mathematical modeling on tomato plants: a review[J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(33): 6745-6749.
- [35] RITCHIE J T, SINGH U, GODWIN D C, et al. Cereal growth, development and yield[M]. Springer Netherlands, 1998: 79-98.
- [36] MCCOWN R L, HAMMER G L, HARGREAVES J N G, et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research[J]. Agricultural Systems, 1996, 50(3): 255-271.
- [37] YAN H, KANG M, DE REFFYE P, et al. A dynamic, architectural plant model simulating resource - dependent growth[J]. Annals of Botany, 2004, 93(5): 591-602.
- [38] 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.
- [39] 李树海, 马承伟, 张俊芳, 等. 多层覆盖连栋温室热环境模型构建[J]. 农业工程学报, 2004, (3): 217-221.
- LI S H, MA C W, ZHANG J F, et al. Thermal model of multi-span greenhouses with multi-layer covers[J]. Transactions of the CSAE, 2004(3): 217-221.
- [40] 杨文雄, 马承伟. 不同覆盖材料对日光温室室内光环境的影响[J]. 农机化研究, 2016, (2): 145-148.
- YANG W X, MA C W. The effect of different covering materials on the indoor light environment in greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, (2): 145-148.
- [41] PATIL S L, TANTAU H J, SALOKHE V M. Modelling of tropical greenhouse temperature by auto regressive and neural network models[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 423-431.
- [42] 陈雨青. 夏季温室小气候的计算机模拟及预测研究[D]. 南京:南京农业大学, 2002.
- CHEN Y Q. Research on simulation and prediction of greenhouse microclimate in summer by computer[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2002.
- [43] DANIEL J, ANDRÉS P U, HÉCTOR S, et al. A survey of artificial neural network-based modeling in agroecology[M]. Soft Computing

- Applications in Industry, Prasad B, Springer Berlin Heidelberg, 2008, 247-269.
- [44] POUTEAU R, MEYER J, TAPUTUARAI R, et al. Support vector machines to map rare and endangered native plants in Pacific islands forests[J]. Ecological Informatics, 2012(9): 37-46.
- [45] GUTIÉRREZ-ESTRADA J C, PULIDO-CALVO I, BILTON D T. Consistency of fuzzy rules in an ecological context[J]. Ecological Modeling, 2013, 251: 187-198.
- [46] FAN X, KANG M, HEUVELINK E, et al. A knowledge-and-data-driven modeling approach for simulating plant growth: a case study on tomato growth[J]. Ecological Modeling, 2015, 312: 363-373.
- [47] KANG M Z, YANG L L, ZHANG B G, et al. Correlation between dynamic tomato fruit-set and source-sink ratio: a common relationship for different plant densities and seasons?[J]. Annals of Botany, 2010, 107(5): 805-815.
- [48] KANG M, HEUVELINK E, CARVALHO S M P, et al. A virtual plant that responds to the environment like a real one: the case for chrysanthemum[J]. New Phytologist, 2012, 195(2): 384-395.
- [49] 郑邦友, 马蕴韬, 李保国, 等. 基于三维模型评估全球变暗效应对水稻光合生产的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3): 386-393.
- ZHENG B Y, MA Y D, LI B G, et al. Assessment of the influence of global dimming on the photosynthetic production of rice based on three-dimensional modeling[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 41(3): 386-393.
- [50] XU L, BUCK-SORLIN G. Simulating genotype-phenotype interaction using extended functional-structural plant models: approaches, applications and potential pitfalls[M]//Crop Systems Biology, Struik X Y A P, Springer International Publishing Switzerland, 2016: 33-53.
- [51] WU L, LE DIMET F X, DE REFFYE P, et al. An optimal control methodology for plant growth-case study of a water supply problem of sunflower[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2012, 82(5): 909-923.
- [52] HUA J, WANG X, KANG M, et al. Prediction of crop phenology – a component of parallel agriculture management[C]// 2017 Chinese Automation Congress, Jinan, Shandong: IEEE, 2017.
- [53] 赵军, 王智敏, 王熙, 等. 基于 GPS 的精准农业变量施肥系统及研究进展[Z]. 2003.
- ZHAO J, WANG Z M, WANG X, et al. Precision agricultural variable fertilization system based on GPS and its research progress[Z]. 2003.
- [54] DOUCET A, FREITAS N, GORDON N. Sequential Monte Carlo methods in practice, first edition[M]. Springer Verlag, 2001.
- [55] KANG M, CORPETTI T, HUA J, et al. Remote sensing of biomass – principles and applications[M]. Rijeka: InTech Open Access Publisher, 2012, 217-228.
- [56] DE REFFYE P, JAEGER M. Modèles mathématiques du développement et de la croissance de l'architecture des plantes. Le cas du modèle GreenLab[M]. 2011.
- [57] 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.
- [58] 袁勇, 周涛, 周傲英, 等. 区块链技术: 从数据智能到知识自动化[J]. 自动化学报, 2017, 43(9): 1485-1490.
- YUAN Y, ZHOU T, ZHOU A Y, et al. Blockchain technology: from data intelligence to knowledge automation[J]. Acta Automatica sinica, 2017, 43(9): 1485-1490.
- [59] 王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华[J]. 自动化学报, 2015, 41(1): 1-8.
- WANG F Y. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1): 1-8.
- [60] 王飞跃. 指控 5.0: 平行时代的智能指挥与控制[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 107-120.
- WANG F Y. CC 5.0: Intelligent command and control systems in the parallel age[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(1): 107-120.
- [61] 金莹, 叶立润. 兰州市市民对社区支持农业(CSA)模式选择意愿的实证分析[J]. 中国农学通报, 2015(7): 272-278.
- JIN Y, YE L R. Empirical analysis of the citizens' willingness to select community supported agriculture mode (CSA) in Lanzhou City[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015(7): 272-278.

[作者简介]



康孟珍(1975—), 女, 浙江宁波人, 中国科学院自动化研究所副研究员, 主要研究方向为平行农业和计算植物。



王秀娟(1982—), 女, 内蒙古赤峰市人, 中国科学院自动化研究所助理研究员, 主要研究方向为平行农业和植物建模。



华净(1981—), 男, 江苏常德人, 中国科学院自动化研究所助理研究员, 主要研究方向为植物生长建模、智慧农业、编程语言、分布式计算系统及计算机图形学。



王浩宇(1984—), 男, 河北沧州人, 中国科学院自动化研究所助理研究员, 主要研究方向为植物生长建模、智慧农业、编程语言及信息系统。



王飞跃(1961—), 男, 浙江东阳人, 中国科学院自动化研究所研究员, 主要研究方向为智能系统和复杂系统建模、分析与控制。