

作物生长模型在农作物生产上的应用创新

陈方圆

丰码科技(南京)有限公司, 江苏 南京

收稿日期: 2025年4月25日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

随着全球人口增长与气候变化加剧, 农作物生产面临产量 - 品质协同提升与资源环境约束的双重挑战。作物生长模型作为融合农学、数学与信息科学的交叉工具, 为解决上述挑战提供了科学路径。本文系统构建“环境驱动 - 生理响应 - 决策支持”的三层模型应用框架, 结合江苏南京溧水某草莓基地“物联网 + 模型”精准灌溉实践、南京某都市型浆果园区模型应用案例等, 揭示模型在产量预测、资源优化、品质调控中的核心机制。研究发现, 模型驱动的精准确管理可显著提升农业生产的经济与生态效益。针对当前数据获取成本高、模型本地化难等问题, 提出多源数据融合、智能算法优化等对策, 为作物生长模型在智慧农业中的深度应用提供理论支撑与实践参考。研究表明, 作物生长模型正从单一田块模拟迈向区域尺度决策, 成为农业数字化转型的核心使能技术。

关键词

作物生长模型, 精准农业, 产量预测, 资源效率, 智慧农业

Application Innovation of Crop Growth Models in Crop Production

Fangyuan Chen

Harvest-Code Technology (Nanjing) Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: Apr. 25th, 2025; accepted: May 23rd, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

With the global population growth and intensifying climate change, crop production faces dual challenges: the synergistic improvement of yield and quality, and constraints from resource environments. As an interdisciplinary tool integrating agronomy, mathematics, and information science, crop growth models provide a scientific pathway to address these challenges. This paper systematically constructs a three-layer model application framework of “Environmental Driving-Physiological Response-Decision Support”, combining the precision irrigation practice of a strawberry base in Lishui, Nanjing, and the model application case of a urban-type berry orchard in Nanjing, revealing the core mechanism of the model in yield prediction, resource optimization, and quality control. Research findings show that model-driven precise management can significantly improve the economic and ecological benefits of agricultural production. In response to current challenges such as high data acquisition costs and difficulty in model localization, countermeasures such as multi-source data fusion and intelligent algorithm optimization are proposed, providing theoretical support and practical reference for the deep application of crop growth models in smart agriculture. The study indicates that crop growth models are moving from single plot simulation towards regional scale decision-making, becoming a core enabling technology for agricultural digital transformation.

Decision Support". By combining practical cases such as the "Internet of Things (IoT) + Model" precision irrigation practice in a strawberry base in Lishui, Nanjing, Jiangsu, and the model application in an urban berry park in Nanjing, it reveals the core mechanisms of models in yield prediction, resource optimization, and quality regulation. The study finds that model-driven precision management can significantly enhance the economic and ecological benefits of agricultural production. Aiming at current issues such as high data acquisition costs and difficulties in model localization, strategies such as multisource data fusion and intelligent algorithm optimization are proposed, providing theoretical support and practical references for the in-depth application of crop growth models in smart agriculture. The research indicates that crop growth models are evolving from single-field simulation to regional-scale decision-making, becoming a core enabling technology for agricultural digital transformation.

Keywords

Crop Growth Models, Precision Agriculture, Yield Prediction, Resource Efficiency, Smart Agriculture

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与意义

农业作为国民经济基石，关乎粮食安全与可持续发展，在社会经济中具有不可替代的地位。近年来，农作物生产面临严峻挑战，耕地减少、水资源短缺、气候变化导致的极端天气频发、病虫害肆虐等，严重威胁农产品产量与质量，给农业可持续发展带来压力。

在此背景下，作物生长模型成为应对挑战的有力工具。它基于作物生理生态过程和系统学方法构建，通过数学模型和计算机模拟技术，定量、动态描述作物生长发育、产量形成及对环境和管理措施的反应。准确预测作物生长进程和产量是农业生产的关键需求。模型依据实时气象、土壤和作物品种特性等数据，动态监测预测作物生长状况，在关键生育期提前预警问题，为生产提供决策依据，保障市场供应稳定，降低市场风险。此外，在农田管理中，模型可模拟灌溉、施肥等措施对作物生长和产量的影响，经分析优化后提供精准管理方案，实现资源高效利用，降低成本，减少面源污染，促进农业可持续发展。

1.2. 国内外研究现状

作物生长模型的研究始于 20 世纪 60 年代，国外在这方面开展得较早，取得了一系列具有影响力的成果。荷兰的 de Wit 教授经过近三十年的研究，提出了作物生长动力学说(Crop Growth Dynamics)，以系统动力学理论为基础，建立了初级作物生长模拟器(ELCROS)，主要用于不同条件下作物生产潜力研究，极大地推动了世界作物模拟研究的发展。1989 年，Penning de Vries 等建成了 MACROS，可将各子模块与作物、土壤、气候数据组合模拟所需要的情形，在国际上产生了深远的影响。

美国在作物生长模型研究方面也成果颇丰，且更注重应用。20 世纪 60 年代，美国开始大量进行作物光合生理、水分生理、营养生理方面的系统研究，为模型建立奠定了基础。70 年代初，在农业部农业研究局(USDA-ARS)的领导下，以密执安州立大学教授 T.J. Ritchie 为首的科研团队，组织多学科专家经过数年研究，于 70 年代中期推出了 CERES 小麦 1.0 版模拟模型。该模型考虑了品种遗传特性、天气、土

壤性状对作物生长发育和产量的影响，之后又增加了土壤和氮素变化及其对作物生长和产量的影响，并建成玉米、高粱、水稻、谷子和大麦等作物模型，共同构成 CERES 作物模型。此外，美国的棉花生育模型 GOSSYM 也是具有一定理论基础和适用性的动态解释性模型。

国内对作物生长模型的研究起步相对较晚，始于 20 世纪 80 年代。但近年来，随着国家对农业科技的重视和投入不断增加，国内在作物生长模型的研究与应用方面取得了显著进展。众多科研人员致力于模型的本土化和精细化研究，使其更符合我国复杂的农业生产环境和多样化的种植模式。中国农业大学的冯利平教授是我国最早开展作物生长模拟模型研究的学者之一，他长期致力于作物系统模拟与决策系统、农业气象与气候变化影响的研究，主持了数十项国家科研项目，自主研发了我国具有自主知识产权的小麦、水稻、玉米等 10 余种作物系列模型并推广应用。

尽管国内外在作物生长模型的研究和应用方面取得了诸多成果，但仍存在一些不足之处。一方面，现有模型在模拟某些复杂的生理生态过程时，准确性和可靠性有待进一步提高。此外，模型与实际生产的结合还不够紧密，在为农民提供直观、便捷、可操作性强的决策支持方面，还有很大的提升空间。

2. 作物生长模型基础剖析

2.1. 模型理论基石

2.1.1. 构建原理

作物生长模型的构建基于作物生理生态过程，运用数学模型和计算机模拟技术，实现对作物生长发育过程及其与环境动态关系的定量描述和预测。其构建原理涵盖了多个关键的生理生态过程。

光合作用是作物与物质积累的源动力，其通过光能 - 化学能转换驱动生物量形成，为自身的生长和发育提供能量和物质基础。在作物生长模型中，通常采用基于辐射利用效率的方法来模拟光合作用过程。例如，蒙特斯(Monteith)提出的光合生产模型，以冠层截获的光合有效辐射(PAR)和辐射利用效率(RUE)为基础，计算作物的光合产物积累。该模型假设在一定条件下，作物冠层对光合有效辐射的截获量与叶面积指数(LAI)密切相关，且辐射利用效率相对稳定，通过数学公式可以定量计算作物的光合产物积累量，从而描述光合作用对作物生长的影响。

呼吸作用是作物维持生命活动的重要生理过程，它消耗光合产物，为作物的生长、代谢和生理调节提供能量。作物生长模型中，呼吸作用通常分为生长呼吸和维持呼吸两部分进行模拟。生长呼吸与作物的生长速率相关，用于合成新的细胞和组织；维持呼吸则与作物的生物量相关，用于维持现有细胞和组织的正常生理功能。以 de Wit 提出的作物生长模型为例，该模型根据作物的生长和维持需求，分别建立了生长呼吸和维持呼吸的数学模型，通过考虑作物的生物量、生长速率以及温度等环境因素，准确计算呼吸作用对光合产物的消耗，进而反映呼吸作用在作物生长过程中的作用。

物质分配与转化是作物生长过程中的关键环节，它决定了光合产物在不同器官(如根、茎、叶、穗等)之间的分配比例，影响着作物的形态建成和产量形成。在作物生长模型中，通常采用源 - 库理论来描述物质分配与转化过程。源是指产生光合产物的器官，如叶片；库是指消耗或储存光合产物的器官，如根、茎、果实等。模型通过设定不同器官的库强度和分配系数，模拟光合产物在源库之间的运输和分配。例如，CERES 模型根据作物不同生育阶段的需求，动态调整光合产物在各器官之间的分配比例，从而准确预测作物的生长发育进程和产量形成。

2.1.2. 开发关键技术

作物生长模型的开发涉及多个关键技术，这些技术相互配合，共同确保模型的准确性、可靠性和实用性，使其能够有效地应用于农作物生产的各个环节。

数据采集是作物生长模型开发的基础,准确、全面的数据是构建高质量模型的关键。数据采集涵盖多个方面,包括气象数据、土壤数据、作物生长数据等。气象数据主要包括温度、湿度、光照、降水、风速等,这些数据反映了作物生长的气象环境,对作物的生长发育有着直接影响。例如,温度和光照是影响作物光合作用和呼吸作用的重要因素,降水和湿度则影响土壤水分含量,进而影响作物的水分供应。土壤数据包括土壤质地、土壤养分含量、土壤酸碱度、土壤水分含量等,这些数据决定了土壤的肥力状况和作物生长的土壤环境。作物生长数据包括作物的株高、叶面积指数、生物量、产量等,这些数据直接反映了作物的生长发育进程和最终产量[1]。

参数优化是提高作物生长模型准确性和适应性的重要环节。作物生长模型中包含大量的参数,这些参数反映了作物的生理生态特性、环境因素对作物生长的影响以及模型的结构和算法等。参数的准确性直接影响模型的模拟效果,因此需要对参数进行优化。参数优化的方法主要包括经验法、试验法和模型校准法等。例如,在 CERES 模型中,通过对不同地区、不同品种的作物进行大量的田间试验,获取了丰富的作物生长数据,利用这些数据对模型中的参数进行了优化和校准,使得模型能够更好地适应不同的环境条件和作物品种。近年来,随着人工智能和机器学习技术的发展,一些新的参数优化方法也逐渐应用于作物生长模型中,如遗传算法、粒子群优化算法等。这些方法能够自动搜索最优的模型参数,提高参数优化的效率和准确性[2]。

模型验证是确保作物生长模型可靠性和有效性的关键步骤。模型验证是将模型的模拟结果与实际观测数据进行比较和分析,评估模型的准确性和可靠性。模型验证通常采用多种指标和方法,包括相关性分析、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、一致性指数(d)等。在模型验证过程中,通常会将数据分为训练集和验证集,利用训练集对模型进行训练和参数优化,利用验证集对模型进行验证和评估。如果模型在验证集上的表现良好,说明模型具有较好的准确性和可靠性,可以用于实际应用;如果模型在验证集上的表现不佳,则需要对模型进行进一步的改进和优化。

2.2. 模型依功能维度分类

作物生长模型根据其功能维度可分为预测类模型、监测类模型和管理决策类模型,它们在农作物生产中各自发挥着重要作用,满足不同的应用需求。预测类模型主要用于对作物生长发育进程和产量进行预测,为农业生产提供前瞻性的信息。监测类模型主要用于实时监测作物的生长状况,及时发现作物生长过程中出现的问题,为农业生产提供实时的信息支持。管理决策类模型主要用于为农业生产提供管理决策支持,帮助农民制定科学合理的农田管理方案,提高农业生产的效益和可持续性。此外,管理决策类模型还可以用于施肥决策、病虫害防治决策等方面,为农业生产的精细化管理提供科学依据。

3. 作物生长模型在农作物生产中的应用实例

3.1. 精准灌溉决策实例

3.1.1. 江苏南京溧水某草莓基地“物联网 + 模型”精准灌溉实践

江苏南京溧水是长三角地区重要的草莓种植核心区,草莓种植面积达 3.2 万亩,年产量超 5 万吨。近年来,当地依托南京农业大学智慧农业团队的技术支持,构建了基于作物生长模型的草莓精准灌溉系统,实现了从“经验灌溉”到“数据灌溉”的转变。

溧水草莓种植面临梅雨季积水涝害、夏季高温干旱等水分管理难题,传统灌溉方式易导致烂根、畸形果率升高(达 25%以上)。南京农业大学团队针对“红颜”“章姬”等主栽品种,建立了草莓生长模型(Strawberry Grow-Model),该模型集成了草莓根系吸水动力学、冠层蒸腾模型及果实膨大期水分需求规律,可精准模拟不同生育阶段(现蕾期、膨果期、采摘期)的水分胁迫响应。

首先,在溧水某街道千亩草莓示范园内,选取两块土壤条件、草莓品种(均为“红颜”“章姬”)、种植密度相近且面积均为 50 亩的地块,设置为实验组和对照组。实验组采用基于作物生长模型的草莓精准灌溉系统进行灌溉管理;对照组采用传统灌溉方式,由当地有经验的农户依据过往经验进行灌溉决策。

其次,在实验组和对照组地块内,分别均匀部署 30 套物联网监测设备,实时采集土壤含水率(0~30 cm 土层)、空气湿度、叶面温度等数据,通过 LoRa 网络传输至模型服务器。实验周期设定为一个完整的草莓种植周期(从种植到采摘结束),以全面评估不同灌溉方式在草莓生长各阶段的影响。

实验组地块根据模型每日输出灌溉决策建议:当膨果期土壤含水率低于 60%田间持水量时,触发滴灌系统,按“日需水量 = 蒸腾量 $\times$ 1.2(补偿系数)”精准补水,单次灌溉量控制在 5~8 mm,并且配套开发的“草莓智慧灌溉 APP”接入气象预报接口,可提前 48 小时预测降雨概率,自动调整灌溉计划。

3.1.2. 应用效果深度剖析

对实验组和对照组采集到的各项数据进行描述性统计,计算均值、标准差、最小值、最大值等统计量,初步了解数据的分布特征,直观对比两组数据的差异。例如,计算实验组和对照组草莓单果重的均值和标准差,观察两组数据的集中趋势和离散程度。最终分析所得:

实验组水资源利用效率显著提升:相较于传统灌溉(每亩年用水量 280 m³),模型指导下的精准灌溉将用水量降至 190 m³,节水率达 32%,灌溉水利用效率从 1.8 kg/m³ 提升至 2.9 kg/m³。滴灌系统结合腐殖酸水溶肥施用,使草莓单果重增加 12%,糖度提升 1.5 度,优质果率(单果 $\geq$ 20 g,糖度 $\geq$ 12°)从 65%提高至 82%。

实验组生产成本与风险双降:通过模型提前预警涝害风险,2023 年示范园减少排水设备投入 30%,应急排水次数从年均 7 次降至 2 次。精准灌溉配合水肥一体化,每亩化肥用量减少 20%,农药使用频次下降 35%,亩均综合成本降低 1500 元。

实验组技术辐射效应凸显:溧水草莓模型已在南京浦口、句容等地推广,累计覆盖面积超 1.2 万亩。团队开发的轻量化模型版本(Strawberry Grow-Lite)可在手机端运行,支持拍照识别叶面积指数,自动生成灌溉建议,深受中小农户欢迎,2024 年预计实现南京草莓主产区技术覆盖率达 60%。

3.2. 产量预测与种植规划示范

3.2.1. 南京某都市型浆果园区模型应用案例设计

南京某现代农业示范园是长三角最大的设施浆果种植基地,主栽草莓、蓝莓、树莓等 12 个品种,其中草莓种植面积占比达 40%。园区与江苏省农业科学院合作,构建了“浆果生长模型 + 数字孪生”决策系统,实现了从品种配置到茬口安排的全周期智能化管理。

首先,在农业示范园内,选取两块面积均为 50 亩、土壤肥力相近、光照条件相似的地块。其中,地块 A 作为实验组,采用“浆果生长模型 + 数字孪生”决策系统进行全周期管理;地块 B 作为对照组,采用传统经验式管理模式。两块地块均种植主栽草莓品种“圣诞红”和“隋珠”,确保品种一致性。

其次,在两块地块周边安装气象站,实时采集温度、湿度、光照强度、降雨量等数据,采集频率为每小时一次。每周各随机选取 50 株草莓,测量株高、叶面积、叶片数、果实数量及大小等指标。每 15 天利用搭载多光谱传感器的无人机对地块进行扫描,获取冠层光谱数据,用于估算生物量和光合作用效率。

在采摘期,分别统计两块地块的总产量、单株产量,精确到千克。并随机抽取各 200 个成熟果实,测定糖度(使用折光仪)、硬度(质构仪测定)、果实直径,依据商品果标准(无畸形、无病虫害、大小达标)统计商品果数量。

实验覆盖两个完整的草莓种植周期(约 2 年),以消除年度气候波动对实验结果的影响。

3.2.2. 对农业生产的指导价值

统计分析实验组与对照组各指标的均值、标准差、变异系数，直观对比两组数据的集中趋势与离散程度。例如，分析坐果率、产量等指标的均值差异，评估模型对关键指标的提升效果。最终分析所得：

实验组精准应对都市农业特殊需求：针对南京都市型农业“高品质、高附加值”的需求，模型重点优化果实品质相关参数，如膨果期昼夜温差对糖度的影响(最佳温差 12℃~15℃)、采前 7 天控水对硬度的提升效应(建议含水率控制在 55%~60%)。2023 年园区草莓商品果率达 92%，平均售价 45 元/斤，较普通产区高出 30%。

实验组数据驱动的供应链管理：模型预测精度显著($R^2 \geq 0.90$, $RMSE \leq 5\%$)，可为供应链管理提供可靠依据。帮助园区提前 30 天制定采摘计划，与盒马、苏果等商超签订“订单农业”协议，错峰上市比例达 40%，滞销风险降低 60%。同时，模型指导下的标准化种植流程，使园区获得绿色食品认证，品牌溢价进一步提升。

实验组生态友好的可持续发展：通过模型优化灌溉施肥方案，园区化肥农药用量连续三年下降，2023 年较 2020 年减少 35%，尾水排放中的硝酸盐含量低于 10 mg/L，符合地表水Ⅲ类标准。该模式已纳入南京市“两减六治三提升”专项行动，成为都市农业绿色发展的标杆案例。

4. 作物生长模型应用面临的挑战与应对策略

4.1. 挑战洞察

4.1.1. 数据质量与获取难题

数据是作物生长模型的基石，其质量和获取情况关乎模型准确性与应用效果，但在实际中，数据质量与获取难题重重。一方面，数据准确性受传感器精度、采集人员操作、环境因素干扰，完整性也因设备故障、监测点分布等问题难以保证；另一方面，获取高质量数据成本高昂，耗费大量人力、物力、财力、时间和精力，这也限制了小规模农场或农户使用，影响模型应用[3]。

4.1.2. 模型适应性瓶颈

作物生长模型在实际应用中面临着不同环境和作物品种下的适应性问题的重大挑战，这对模型的适用范围和应用效果影响重大。不同地区自然环境差异巨大，现有模型多基于特定地区开发，难以适应新环境，且作物品种多样，新品种不断涌现，现有模型参数设置和结构难以准确描述其生长和产量形成机制，影响决策支持[4]。

4.1.3. 农民接受度与技术推广困境

目前，农民对作物生长模型技术的接受程度普遍较低，技术推广面临诸多困境。一方面，农民对该技术缺乏了解，习惯传统生产方式且心存疑虑，同时应用该技术所需的硬件、软件及技能要求，对经济条件差、计算机技能薄弱的农民构成障碍，农村网络基础设施不完善也限制了技术应用。另一方面，技术推广服务体系不完善，缺乏专业人员培训指导，推广人员技术水平有限，且缺乏技术评估和反馈机制，不利于技术改进和农民接受。

4.2. 策略探寻

4.2.1. 数据管理与优化举措

为解决数据质量与获取难题，可通过以下具体方案提升数据质量、降低获取成本：

构建多层次质量控制体系：采用高精度物联网传感器(如配备 GPS 定位和自动校准功能的土壤温湿度传感器)，建立定期校准维护制度，校准周期缩短至每月一次；制定标准化数据采集流程，对采集人员

进行专业培训并考核上岗；开发自动化数据审核工具，运用卡尔曼滤波等算法对原始数据进行清洗，去除异常值和噪声数据，确保数据准确性[5]。

创新多源数据融合机制：综合运用卫星遥感(如哨兵系列卫星的高分辨率影像)、无人机监测(搭载多光谱相机)和地面传感器数据，构建“空-天-地”一体化数据采集网络。利用时空克里金插值法对缺失数据进行预测填充，结合深度学习算法(如 LSTM 神经网络)对多源数据进行特征提取和融合，提升数据完整性和可用性。

探索低成本数据获取模式：研发低成本传感器，采用微机电系统(MEMS)技术降低硬件成本，单个传感器成本控制在 50 元以内；积极利用政府公开的气象数据(如中国气象数据网)、农业遥感数据(如高分专项数据)等开源资源，建立数据共享平台，通过区块链技术实现数据的安全共享和溯源，提高数据利用效率。

4.2.2. 模型改进与本地化方案

为提升模型适应性，可从理论研究、技术创新、本地化实践等方面实施改进方案：

深化生理生态机制研究：联合农业科研机构 and 高校，开展作物关键生理过程(如光合作用、蒸腾作用)的长期监测实验，建立作物生理生态数据库；基于实验数据，优化作物生长模型的理论框架，完善作物与环境相互作用的数学描述，提高模型的生物学解释性[6]。

引入人工智能优化模型：利用机器学习算法(如随机森林、支持向量机)对大量历史气象、土壤和作物生长数据进行分析，自动优化模型参数；采用深度学习技术(如卷积神经网络)挖掘数据特征，动态调整模型结构，使其适应复杂多变的农业环境，实现模型的智能化改进。

推进模型本地化适配：针对不同地区，组建由农业专家、数据工程师和农技人员构成的本地化团队，收集当地气象、土壤和作物生长数据；运用迁移学习技术，将已有模型在新环境中的参数进行快速调整，如在干旱地区重点优化水分胁迫参数；对于新作物品种，通过田间试验获取生长数据，利用贝叶斯优化算法对模型参数进行精细校准[7]。

建立区域化模型资源库：搭建云平台，存储适配不同地区和作物品种的优化模型；开发可视化模型选择界面，用户可根据地理位置、作物类型等条件快速检索和调用模型，实现模型的便捷化应用。

4.2.3. 推广与培训体系构建

为提高农民对作物生长模型技术的接受度，可构建“宣传-培训-服务”三位一体的推广体系：

立体化宣传教育：制作通俗易懂的科普短视频、图文手册，通过抖音、微信公众号等新媒体平台进行传播；在农村地区举办田间示范活动，现场展示模型指导下的种植效果与传统种植的对比；开发虚拟现实(VR)教学资源，让农民沉浸式体验模型应用过程，增强对技术的认知和信任[8]。

精准化培训赋能：根据农民的年龄、文化程度和种植经验，制定分层培训计划。针对老年农民，采用“一对一”现场教学方式；对年轻农民，提供在线课程和移动学习 APP；建立培训效果评估机制，通过理论考试和实践操作考核，及时调整培训内容和方式，确保培训实效[9]。

专业化服务保障：组建由农业专家、IT 工程师和基层农技人员组成的技术推广团队，定期深入田间地头进行技术指导；搭建线上服务平台，提供 7×24 小时在线答疑，运用远程诊断技术解决农民实际问题；加强与农业合作社、家庭农场等新型农业经营主体合作，打造示范基地，发挥其示范带动作用，推动作物生长模型技术的广泛应用。

5. 未来研究方向展望

随着科技的飞速发展，作物生长模型与新兴技术的融合已成为必然趋势，这将为农作物生产带来革

命性的变化。作物生长模型与人工智能的融合具有巨大的潜力。人工智能技术，如机器学习、深度学习和神经网络等，能够对海量的农业数据进行快速分析和处理，挖掘数据背后的潜在规律，从而优化作物生长模型的参数和结构，提高模型的预测精度和适应性。

在模型改进方面，应进一步深入研究作物生长的生理生态机制，特别是对于一些尚未完全明晰的过程，如作物在逆境条件下的响应机制、根系与土壤微生物的互作关系等，进行更深入的探索和研究，引入更先进的数学方法和计算技术，如并行计算、量子计算等，以完善作物生长模型的理论基础。

在技术融合方面，深化作物生长模型与物联网、大数据、人工智能等新兴技术的融合应用。利用物联网技术实现对作物生长环境和生长状况的实时、全方位监测，为模型提供更丰富、更准确的数据支持；通过人工智能技术，如深度学习、强化学习等，实现模型的智能化升级，提高模型的自学习能力和预测精度。

在应用拓展方面，将作物生长模型应用范围从大田作物进一步拓展到园艺作物、经济作物、药用植物等领域，满足不同类型农业生产的需求。通过不断拓展作物生长模型的应用领域和范围，使其在农业生产和农业科学研究中发挥更大的作用，为实现农业现代化和可持续发展作出更大的贡献。

参考文献

- [1] Weih, M., Adam, E., Vico, G. and Rubiales, D. (2022) Application of Crop Growth Models to Assist Breeding for Intercropping: Opportunities and Challenges. *Frontiers in Plant Science*, **13**, Article 720486. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.720486>
- [2] Han, G.D., Choi, J.M., Choi, I., Kim, Y., Heo, S. and Chung, Y.S. (2022) From Crop Specific to Variety Specific in Crop Modeling for the Smart Farm: A Case Study with Blueberry. *PLOS ONE*, **17**, e0273845. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273845>
- [3] 杨峰团队. 大豆玉米带状复合种植作物生长模拟与监测研究[R]. 成都: 四川农业大学农学院, 2024.
- [4] 江苏省农业科学院智慧农业创新团队. 设施果蔬智能化生产与精准服务模式[R]. 南京: 江苏省农业科学院, 2024.
- [5] 宁夏大学朱磊课题组. 基于“天空地”一体化作物水分诊断与智能灌溉应用研究[R]. 银川: 宁夏大学, 2024.
- [6] 中国电信. “慧种植”产品介绍[R]. 北京: 中国电信, 2023.
- [7] 东北农业大学农业农村部东北智慧农业技术重点实验室. 智慧农场关键技术和装备集成应用研究[R]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2024.
- [8] 冯利平团队. 中国自主作物生长模型研发与应用[R]. 北京: 中国农业大学, 2024.
- [9] 马韞韬. 植物生长的三维建模仿真及其在数字农业中的应用[R]. 北京: 中国农业大学, 2023.