

设施农业环境下作物生长模型的构建与优化

赵世豪 陈世静 魏瑞阳 陈士姣
上海春昌蔬果专业合作社 上海 201706

摘要：随着设施农业的快速发展，构建精确的作物生长模型并进行优化对于实现高效、精准的设施农业生产至关重要。基于此，本文深入探讨了设施农业环境下作物生长模型的构建方法，包括对作物生理生态过程的数学描述、环境因子的纳入以及模型参数的确定。并在此基础上，详细阐述了模型的优化策略，涵盖数据驱动的优化、多目标优化以及模型的验证与校准等方面。利用实际案例分析展示了模型在设施农业生产中的应用效果，为设施农业的智能化、精准化发展提供了有力的理论支持和技术参考。

关键词：设施农业；作物生长模型；模型构建与优化

引言：设施农业作为一种高效的农业生产方式，通过人为创造适宜的环境条件，能够有效减少自然环境对作物生长的不利影响，实现作物的周年生产和高产优质。在设施农业环境中，精确掌握作物的生长规律并进行科学调控是提高生产效益的关键。作物生长模型作为一种量化描述作物生长发育过程及其与环境因子相互关系的工具，在设施农业生产管理中发挥着越来越重要的作用。通过构建和优化作物生长模型，可以对设施内的环境因子进行精准调控，根据作物不同生长阶段的需求提供适宜的光、温、水、肥等条件，从而提高资源利用效率，降低生产成本，提升农产品的产量和质量。因此，深入研究设施农业环境下作物生长模型的构建与优化具有重要的理论和现实意义。

1 设施农业环境特征

1.1 光照环境

光照方面，设施覆盖材料削弱自然光，使内部光照强度仅为外界40%-70%。材料老化、灰尘堆积及内部立柱、横梁等结构，进一步降低光强并造成分布不均，如连栋温室南侧和顶部光照较强，北侧和底部较弱。除此之外，季节与天气变化同样显著影响光照条件，冬季短日照与阴雨雪天导致光照不足，抑制作物光合作用，使光合关键物质RuBP含量及碳水化合物再生效率下降，进而降低净光合速率，减缓生长，大幅度减少花数与坐果率。

1.2 温度环境

温度环境呈现特殊变化规律。白天太阳辐射使设施内热量快速积累，夏季通风不良时，塑料大棚内温度可达40℃以上，进而引发热害，导致气孔关闭、二氧化碳吸收受阻，影响光合作用^[1]。夜间无太阳辐射，热量经覆盖材料散失，冬季保温不足则易使温度低于作物生长下限，造成冷害或冻害，破坏细胞结构。设施内温度空间

分布不均，通常上部高于下部、中部高于边缘。

1.3 湿度环境

湿度环境受作物蒸腾与灌溉影响，空气湿度常达70%-90%，低温时昼夜温差大，水汽凝结形成露珠，为病原菌滋生创造条件，增加黄瓜霜霉病、番茄晚疫病等病害风险。而高温时高湿度阻碍作物蒸腾散热，导致生理紊乱，同时水汽散射吸收光线，降低光照强度。因此，土壤湿度需精准控制，过湿会使土壤通气性变差、根系缺氧腐烂，过干则抑制作物生长，造成植株矮小、叶片发黄卷曲。

1.4 气体环境

气体环境中，二氧化碳作为光合原料，设施内自然浓度（300-400 $\mu\text{mol/mol}$ ）常低于作物最适浓度（800-1500 $\mu\text{mol/mol}$ ），需利用施肥补充以增强光合作用。通风不良易导致氨气、二氧化氮等有害气体积累，毒害作物。另一方面，土壤氧气含量直接影响根系呼吸与养分吸收，紧实土壤或过高湿度会降低氧气含量，从而抑制根系生长甚至引发病害。

2 作物生长模型构建

2.1 模型构建的理论基础

2.1.1 作物生理生态过程

作物生长发育是一个复杂的生理生态过程，涉及到光合作用、呼吸作用、蒸腾作用、物质运输与分配以及形态建成等多个方面。光合作用是作物生长的基础，在设施农业环境下，光照强度、温度、二氧化碳浓度等环境因子会显著影响作物的光合作用速率。如，在弱光环境下，作物光反应产生的ATP和NADPH不足，严重限制了暗反应中三碳化合物的还原，导致光合产物积累减少。呼吸作用则是作物消耗有机物、释放能量维持生命活动的过程，有氧呼吸与无氧呼吸的平衡直接影响作物

能量供应与有害物质积累。蒸腾作用不只是能调节作物体温，还能促进水分和养分的吸收与运输，在高湿的设施环境中，气孔导度下降会削弱蒸腾作用，进而影响作物对养分的吸收效率。并且，作物的物质运输与分配过程，会根据生长需求动态调整光合产物流向，如在生殖生长阶段，更多光合产物会向花、果实等生殖器官运输。而形态建成过程，从种子萌发到开花结果，受到遗传和环境因素共同调控，例如短日照作物在长日照环境下会延迟开花。

2.1.2 环境因子对作物生长的影响

环境因子对作物生长的影响相互关联且复杂。光照除了为光合作用提供能量，其光质也会影响作物生长，如蓝光促进茎叶生长，红光利于开花结果^[2]。温度通过影响酶活性调控作物生理生化反应，不同作物对温度的敏感性不同，喜温作物如黄瓜在低温下生长缓慢，甚至遭受冷害。水分方面，土壤水分含量影响根系吸水，干旱胁迫下，作物会关闭气孔减少水分散失，但同时也限制了二氧化碳吸收；空气湿度则与病害发生密切相关，高湿环境易滋生真菌病害。二氧化碳浓度对光合作用影响显著，设施内增施二氧化碳可提高光合速率，但过高浓度可能导致气孔关闭。另一方面，土壤养分中，氮磷钾比例失衡会影响作物生长，如缺氮导致叶片发黄、植株矮小，缺磷影响根系发育和花芽分化。

2.2 模型构建的方法与步骤

2.2.1 确定模型目标和范围

构建作物生长模型前，需明确模型的具体目标，如预测作物产量、模拟生长过程或优化环境调控策略。以预测温室番茄产量为例，模型需聚焦番茄从定植到收获期内，光照、温度、湿度等环境因子对产量形成相关生理过程的影响。与此同时，更要考虑模型的应用场景，小型农户设施栽培管理更注重操作简便性，而大型农业园区智能化生产调控则需要高精度、复杂的模型。此外，还需确定模型涵盖的空间范围，是单栋温室还是整个园区，以及时间范围，如短期生长预测或全生育期模拟。

2.2.2 选择模型结构和参数

基于作物生理生态特性和模型目标，可选择合适的模型结构。基于过程的机理模型虽然通用性强，但参数众多，例如WOFOST模型需确定作物品种参数、土壤参数、气象参数等上百个参数；经验模型结构简单，如通过回归分析建立的产量与环境因子关系模型，但外推性差；数据驱动模型如神经网络，对复杂非线性关系拟合能力强，但可解释性弱。确定模型结构后，通过查阅文献、田间试验、参数优化算法等获取和校准参数。而对

于难以测量的参数，如根系对养分的吸收效率，可利用敏感性分析确定其对模型输出的影响程度，再通过遗传算法等进行优化。

2.2.3 数据收集与整理

准确丰富的数据是模型构建和验证的基础。作物生长数据收集包括形态指标（株高、叶面积等）、生理指标（光合速率、气孔导度等）、产量指标及物候期数据，可通过定期田间观测和专业仪器测定获取。环境数据则借助传感器实时采集光照强度、温度、湿度等信息。在数据收集时，尤其要保证数据的准确性、完整性和代表性，以避免传感器故障、数据缺失等问题。对收集的数据进行预处理，利用插值法填补缺失值，利用标准化处理使数据具有可比性，例如将不同量级的温度和光照强度数据统一到0-1区间。

2.2.4 模型的建立与求解

完成模型结构选择、参数确定和数据整理后，建立作物生长模型。基于过程的机理模型常包含微分方程和代数方程，采用有限差分法、龙格-库塔法等数值计算方法求解，将连续的时间和空间变量离散化，逐步计算作物生长状态^[3]。经验模型通过回归分析建立变量关系方程后即可进行预测。数据驱动模型如神经网络，利用训练数据调整网络权重和阈值，在训练过程中，通过反向传播算法不断优化模型参数，使模型输出与实际观测数据误差最小化。求解过程中要确保计算方法稳定准确，对结果进行合理性检查，排除异常模拟值。

2.3 常见作物生长模型介绍

2.3.1 基于过程的机理模型

WOFOST模型通过模拟作物光合作用、呼吸作用、同化物分配等生理过程，结合光照、温度等环境因子，能够准确预测作物生长和产量。在实际应用中，可根据不同作物品种调整模型参数，模拟其不同环境条件下的生长过程。DSSAT模型则集成多个作物和土壤模块，能模拟不同土壤类型和气候条件下作物生长、产量形成及养分循环，为农业科研、生产决策和气候变化影响评估提供支持，例如可用于评估不同灌溉策略对作物产量和水资源利用效率的影响。

2.3.2 经验模型

通过线性或非线性回归建立的经验模型，如小麦产量与平均温度、降雨量、光照时长的关系模型，虽然在特定地区和时间段内有一定实用性，但通用性差。这类模型依赖大量历史数据，当应用场景发生变化，如气候条件改变或作物品种更换，模型准确性会大幅下降。此外，基于作物生理指标与环境因子关系建立的经验模

型,如叶片生长速率与温度、光照强度的关系,也仅适用于特定研究和应用场景。

2.3.3 数据驱动模型

神经网络模型如多层感知器(MLP),通过输入环境数据和作物初始生长状态,经隐藏层特征提取,在输出层预测作物生长指标。同时,卷积神经网络(CNN)可处理设施内环境因子的空间分布数据,用于预测作物生长的空间差异。循环神经网络(RNN)及其变体LSTM、GRU擅长处理时序数据,能准确预测作物生长的动态变化。

3 作物生长模型的优化

3.1 数据驱动的优化

数据驱动优化以实时、多元的数据为基础,利用动态采集与智能处理,能够提升模型适应性及预测精度。在设施内部署高密度传感器网络,可成功实现环境与作物生理数据的分钟级采集,如光照强度、温度等信息。边缘计算设备实时剔除异常值,有效数据传输至云端参与模型训练,配合每周数据集更新机制,使模型能快速适应季节与气候变化,显著降低预测误差。

针对数据缺失问题,综合运用插值法与生成对抗网络(GAN)。线性插值、三次样条插值可填补时间序列数据缺口,GAN则模拟不同环境下的作物生长数据,扩充数据集的多样性,增强模型训练稳定性,减少过拟合风险。主动学习策略通过评估样本信息价值,优先标注分类模糊的病害图像等关键样本,在降低标注工作量的同时,大幅提升作物病害识别模型的准确率。另一方面,融合传感器实时数据、遥感影像与农户经验的多源数据框架,整合多维信息,为模型提供更全面的输入,显著提升预测精度。

3.2 多目标优化算法的应用

设施农业生产需平衡产量、成本、能耗与品质等多重目标,这些目标间常存在冲突,如增产可能伴随资源消耗增加。多目标优化通过明确目标函数与约束条件,构建数学模型描述目标与环境、管理措施的关系。多目标进化算法(如NSGA-II、MOEA/D)模拟生物进化机

制,在解空间中搜索帕累托最优解集。以温室调控为例,NSGA-II算法可同步优化温度、光照、二氧化碳浓度等策略,生成兼顾产量、能耗与品质的多组非支配解,为生产者提供灵活的决策方案。

3.3 模型的验证与校准

模型验证与校准是确保其可靠性的关键环节。常用RMSE、 R^2 、MAE等指标评估模型性能,RMSE衡量预测值与实测值的平均误差, R^2 反映模型对变量变异的解释能力,MAE表示误差平均绝对值。通过独立测试数据对比,可精准评估模型预测的准确性。

校准过程依赖贝叶斯网络、粒子群优化(PSO)等技术。PSO算法模拟鸟群觅食,搜索使预测误差最小化的参数组合,不断调整模型参数直至模拟结果与实测数据高度吻合。敏感性分析则确定参数对模型输出的影响程度,识别关键参数进行重点校准,非关键参数采用经验值,提高校准效率。

结束语:综上所述,设施农业环境下作物生长模型的构建与优化对农业发展意义深远。构建模型时,需充分考虑设施农业独特的环境特征,基于作物生理生态过程和环境因子影响,合理确定目标、选择结构、收集数据并求解模型;优化阶段,数据驱动、多目标算法、验证校准等策略协同发力,显著提升模型性能。未来,随着物联网、人工智能等技术与农业深度融合,作物生长模型将向更智能化、精准化方向发展。通过与智能装备结合,实现环境实时动态调控;利用大数据与深度学习挖掘更多潜在关系,进一步优化模型。

参考文献

- [1]余晶晶.设施农业中作物生长周期管理与优化策略研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)农业科学,2025(5):028-031.
- [2]郭金芬.设施农业环境下西兰花与樱桃番茄轮作栽培模式的效益分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)农业科学,2025(5):005-008.
- [3]陈禹霏,聂鹏程.基于CFD的温室环境控制方法研究现状分析与展望[J].中国农业信息,2024,36(2):60-72.