

烤烟生长发育模型研究进展

杨锡坤¹, 叶卫国¹, 廖剑津², 王政仁³, 张胜祥¹, 李淮源¹, 陈建军^{1*} (1. 华南农业大学烟草研究室, 广东广州 510642; 2. 广州新标农业科技有限公司, 广东广州 510600; 3. 中国烟草总公司广东省公司烟叶管理处, 广东广州 510623)

摘要 探讨烤烟形态发育模型是开发现代烟草生产物联网系统的重要内容之一, 并且极为复杂。介绍了烤烟生长模型的研究必要性、分类和当前研究动态, 并对烤烟形态发育模拟模型存在问题及发展趋势进行阐述, 以期推动烤烟模型的深入研究, 促进“互联网+”技术的跨界融合在烤烟生产中推广应用。

关键词 烤烟; 生长模型; 分类; 发展趋势

中图分类号 S572 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)01-0024-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.01.007



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on Growth and Development Models of Flue-cured Tobacco

YANG Xi-kun¹, YE Wei-guo¹, LIAO Jian-jin² et al (1. Tobacco Research Laboratory, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642; 2. Guangzhou Xinbiao Agricultural Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510600)

Abstract The simulation model of flue-cured tobacco morphological development is one of the most important contents in the development of modern tobacco production Internet of things system. Introduces the necessity, classification and current research trends of flue-cured tobacco morphological model, and expounds the existing problems and development trends of the simulation model of flue-cured tobacco morphological development, in order to promote the in-depth study of the model of flue-cured tobacco and promote the cross-border integration of “Internet +” technology in the production of flue-cured tobacco.

Key words Flue-cured tobacco; Growth model; Classification; Development trend

我国是世界第一烤烟生产大国, 烟草种植面积常年在 100 万 hm^2 以上, 年产量 200 万 t 左右^[1]。随着社会经济的进步, 东西部地区发展不平衡导致烟叶生产重心逐渐向动力成本低、耕地资源丰富的西南地区偏移^[2]; 同时农村劳动力大量向城区迁移, 几乎所有烟区都存在劳动力短缺的问题。此外, 提高烟叶质量和烟农收入一直是烟草农业关注的焦点。20 世纪末 21 世纪初, 人类社会迎来了物联网技术时代, 为农业生产转型升级和高质量发展带来了全新的发展机遇。因此, 烟草农业现代化、数字化、信息化是未来发展的必然趋势^[3]。

在农业 4.0 的大背景之下, 烟草农、工业的结合日趋密切。“互联网+”技术的跨界融合是烟草行业发展的一个重要方向, 也符合《国家烟草专卖局关于启动实施烟草科研大数据重大专项》实施方案要求, 具有重要意义。随着作物长势、形态、生长环境监测手段及信息化技术的发展, 计算机图形学、多媒体、传感器、仿真技术、三维扫描技术、人工智能等与作物形态生长发育虚拟技术的融合, 势必会提高对烤烟形态指标模型研究的关注度, 推动烤烟形态生长可视化工作的发展^[3-4]。

作物模型是将作物与影响作物生长发育的环境和技术因子作为一个整体, 对作物的生长发育及其与环境 and 栽培措施的动态关系进行定量描述的数学或计算机语言^[4]。一个准确、通用性强的作物模型依赖于土壤学、作物栽培及保护学、农业经济学、现代化农业信息学等的融合。其发展的标

志性时间节点为 20 世纪 60 年代, 主要经历了萌芽阶段(最早可追溯到 1735 年)、模型基础研制阶段(1961—1980 年)、模型校验阶段(1981—1990 年)、模型综合利用阶段(1990 年以后)并逐渐发展成熟。我国作物模型研究起步较晚, 最早追溯于 20 世纪 80 年代以后, 并在引进国外模型、开展学术交流合作之后取得了较大发展, 并逐渐形成了具有中国特色的专家系统, 其中最典型的是水稻“钟模型”等^[5]。

基于此, 笔者主要综述了烤烟作物模型的分类和研究动态, 并对当前烤烟形态发育模拟模型存在问题及发展趋势进行评述, 试图为开展“互联网+”烟草生产技术的发展趋势提供依据和参考。

1 烤烟生长模型分类

按照研究内容差异可将生长发育模型分为生长模型、形态结构模型、结构-功能模型。生长模型强调对烤烟生长环境及群体指标(产量、叶面积系数、干物质量)的定量描述, 注重烤烟生理生态的研究, 如植烟区区域气象风险评估模型、烟田小气候模型、烤烟产量形成监测模型、叶面积系数监测模型、水肥模型等。形态结构模型是用数学语言描述作物生长发育(形态、颜色等)与环境, 栽培措施之间的定量关系的一类模型, 其注重对烤烟生长形态、颜色变化的描述, 强调作物器官、个体与群体结构的表达。1947 年, Wolf^[6]对香料烟形态发育进行了定量描述, 绘制了各部位叶片叶长、叶宽生长速率曲线; 二者均为 S 型曲线, 是较早的烤烟形态发育模拟模型研究。结构-功能模型注重对作物形态结构、光合产物、生物量、营养元素、常规化学成分的产生和分配以及两者的内在联系进行定量描述。典型的结构-功能模型有 GREENLAB 模型等。

根据数学原理可将烤烟模型分为经验性模型(或称回归

基金项目 广东省烟草专卖局(公司)科技计划项目“‘互联网+’烟草农业智能化生产技术开发与应用研究”(粤烟科项 201805)。

作者简介 杨锡坤(1995—), 男, 白族, 云南大理人, 硕士研究生, 研究方向: 作物栽培学与耕作学。* 通信作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事烟草调控理论与优化工艺研究。

收稿日期 2021-03-04

模型、描述性模型)和动力学模型(机理模型、解释性模型)、半机理模型。经验模型是基于统计方法建立的回归模型,它常以年为时间步长,局限性在于无法展示变量在作物生育期内的变化过程,也未考虑环境对模型系数的影响。最常见为作物产量、长势指标与外界因素(温度、水分、降水量、冠层高光谱等)的主因子分析模型、作物产量指标与水肥量之间的主因子模型。烤烟的统计模型通常关注烤烟产量、烟叶化学成分、烟叶品质形成相关成分与外界环境的关系,并建立相关的多项式回归模型。例如:产量与施肥量、降雨量、施水量等的多项式方程。其大多用以解释烤烟产、质量形成及烤烟生长定形后的长势指标与外界因素的影响强弱^[7-10]。该类模型不能展示生育期内因变量随时间的变化,解释性较弱,通常为静态模型。烤烟动力学模型是专家系统基于回归模型、机理模型和数据库发展起来的另外一类模型,它强调农业管理的综合性,因而比上述两类模型更为复杂、精准^[8-9]。烤烟动力学模型注重定量描述引起变化的过程,通常以时间尺度作为变量,解释性较强^[8-9],主要可分为烟草器官形态发育动态模拟模型、烤烟根系营养吸收动态模拟模型、养分吸收与分配模型、光合产物消耗与分配动态模型、产量形成动态模拟模型、烤烟水分吸收与蒸腾动态模型等^[10]。半机理模型是介于二者之间的一种模型。我国作物专家系统研究起步相对较早,最早开始于20世纪80年代,较典型的有小麦高产技术专家系统、水果果形判别人工神经网络专家系统等^[11]。我国的专家系统研究最早主要依靠借鉴国外的成熟模型,之后逐渐形成了具有中国特色的专家系统,较典型的为水稻钟模型(RCSODS)、小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS)、小麦生长模拟与管理决策支持系统(GMDSS-WMW)等^[12-14]。

按植物生理研究领域差异可分为作物生理生化模型、作物生态模型。前者主要为器官、组织、个体、群体的光合作用,呼吸作用、物质积累及形态发育建成模型。后者主要涉及作物温度、积温、区域气候、田间小气候、冠层小气候、作物水分、营养、土壤水分、养分模型等^[15]。

总之,研究领域差异导致了烤烟模型在分类方式上的区别,无论何种分类方式均能全面概括烤烟模型。因此,可以将烤烟形态建成模型分为3类,即烤烟生长模型、烤烟形态模型、烤烟结构-功能模型。

2 烤烟生长模型研究

作物模型利用模拟技术来探讨作物产量在不同年限、不同土壤及生态背景、不同品种及不同栽培管理技术因子下的形成差异。目前已广泛应用于农业生产、作物生产潜力评估、粮食安全分析等方面,其主要关注方向为烤烟干物质积累、叶面积系数变化等。烤烟生长过程中,光合产物的合理分配是烤烟优质适产的外在表现。对烤烟干物质分配的定量化研究,有助于制定相应的烤烟水肥管理技术,动态调控烤烟的产、质量,而叶面积指数是评价烤烟产量形成的重要指标。烤烟是一种特殊的经济作物,其生长模型的发展趋势与作物模型较为类似,较其他大宗作物起步偏晚。

在时间节点上,呈现经验性模型—机理模型—半机理模型的发展趋势,模型综合性、机理性不断增强。目前,作物模型的发展已经进入了成熟阶段,国内外已经形成了多种较为先进、全面的作物生长模型。王文佳等^[9]对国外主要的作物模型研究现状做了详细介绍。作物模型主要用以探讨作物干物质分配,水分、养分平衡,作物生长(干物质分配、光合、呼吸作用),病虫害,土壤,生态条件等对作物产量、质量形成的影响。而现阶段,烤烟生长模型的研究热点主要涉及以下几方面。

2.1 经典作物模型在烤烟上的适用性研究 目前作物模型的研究已经进入了成熟阶段,对于大宗作物(水稻、小麦等)国内外已建立了比较完备的作物模型^[8,16],可为其他作物模型的研究提供较多的选择性。然而,国内仍缺少关于烤烟模型的相关研究,胡雪琼等^[17]在国内开创性地对WOFOST模型在云南烤烟的适用性进行了评价,结果表明WOFOST模型能较好地模拟云南烤烟的潜在生长过程。但是由于观测数据年限相隔较长,数据项观测较少,未能对模型参数敏感性、不确定性进行分析,也未对参数进行修正。其他国外较经典的作物模型在烤烟上的适应性研究少有报道。

2.2 基于遥感技术的烤烟生长模型研究 高光谱遥感(hyperspectral remote sensing)是指在电磁波谱的4个波段(紫外、可见光、近红外和中红外见光)范围内,从目标物体上获取许多较窄且光谱连续图像数据的技术。由于不同烟草种类、品种、水分、肥料、不同生育期、病虫害等条件下的光谱特征均可被定量化,因此在烟草栽培中有广泛应用。烟草生长模型与高光谱遥感技术的耦合研究起步较晚,但也取得了一些成果。Gu等^[18]对使用3种波长选择方法[连续投影算法(SPA)、提升决策树回归(BRT)和遗传算法(GA)]和4个机器学习技术[(回归树(BRT)、支持向量机(SVM)、随机森林(RF)和分类回归树(CART)]对烟草番茄花叶病毒进行了早期检测,结果表明BRT筛选的波段对烟草病叶鉴别具有重要应用价值。胡玮等^[19]模拟了对不同含水量及不同土温下的烟田土壤氮素的矿化过程,并建立了相应的数学动态模型。Pu等^[20]利用GIS建立了曲靖烟区的气象风险评估模型,并以此规划了曲靖烟区烤烟旱灾、低温风险区。由表1可知,多年来,从事烟草行业的科研工作者已经系统探索了高光谱技术与烤烟胁迫监测、生长信息获取、产质量监测、田间生长信息监测的可能性。但由于监测条件、试验条件以及模型的差异,各类模型距离指导烟草栽培还有一些距离,仍需要不断提高模型精度、适用性,加速推广应用。

2.3 基于遥感数据的烤烟生长模型数据同化研究 数据同化研究是将作物生长模型与遥感数据耦合的重要手段,同化算法的性能直接影响着同化系统的运行效率和精度。目前主要存在两类数据同化方法,分别是基于代价函数的参数优化方法和基于估计理论的集合滤波方法。二者区别在于前者用整个同化窗口内的观测值来重新调整模型参数,而后者观测值是顺序的方式作用于模型,每一次后续的观测值只会影响从当前状态之后的模型变化性质。参数优化的代价

表 1 遥感技术与烤烟生长模型的耦合应用研究现状

Table 1 Research status of coupling between remote sensing technology and flue-cured tobacco growth model

应用分类 Application classification	应用现状 Application status	应用分类 Application classification	应用现状 Application status
生长胁迫监测 Growth stress monitoring	水分亏缺监测 ^[21] 病虫害无损监测(集中于花叶病) ^[22-24] 重金属胁迫 ^[25]	生长信息提取 Growth information extraction	不同烟草品种光谱信息提取 ^[29] 叶片光合色素无损监测 ^[30-31] 叶片烟碱无损监测 ^[32-34] 叶片氮素无损监测 ^[35]
产质量监测 Production quality monitoring	生理生化指标、烤烟品质指标估测(总糖、还原糖、烟碱、钾离子等) ^[26] 烤烟地上生物量估测 ^[27-28]	田间生长信息监测 Field growth information monitoring	移栽面积、种植密度监测 ^[32,36] 烟叶成熟度识别 ^[37-38] 叶面积系数获取 ^[29] 高原山区烟草识别 ^[39]

函数通常有均方根误差、平均误差加权和、最小二乘、变分方法、误差绝对值均值、相对误差等,同化算法通常为单纯型搜索算法、最大似然法、复合型混合演化算法(shuffled complex evolution method developed at the University of Arizona, SCE-UA)、Powell 共轭方向法、粒子群算法(particle swarm optimi-

zation, PSO)、遗传算法、模拟退火法等。集合滤波方法的同化算法主要为:常增益 Kalanan 滤波算法、集合卡尔曼滤波算法、粒子滤波算法^[40]。而在烟草中,相应研究极少,在烟草生长模型的数据同化研究只涉及集合卡尔曼滤波算法的同化研究,其他方法的数据同化研究未见报道(表 2)。

表 2 作物生长模型数据同化主要研究

Table 2 Major studies on crop growth model data assimilation

同化类型 Assimilation type	代价函数 Cost function	生长模型 Growth model	同化算法 Assimilation algorithm	同化变量 Assimilation variable	作物 Crop	参考文献 Reference
参数优化 Parameter optimization	均方根误差	WOFOST	PSO	LAI	水稻	[41]
	平均误差加权和	DSSAT	最大似然法	LAI	小麦	[42]
	最小二乘法	WOFOST	SCE-UA	LAI	水稻	[43]
	变分方法	模拟退火	CERES-Maize	LAI	玉米	[44]
	误差绝对值均值	RiceGrow	PSO	LAI	水稻	[45]
集合滤波方法 Ensemble filtering method	相对误差	WOFOST	PSO	LAI	水稻	[46]
		SWAP	常增益 Kalanan 滤波	LAI	小麦	[47]
		Logistics	集合卡尔曼滤波	LAI	烤烟	[48]
		CERES-Wheat	离子滤波	LAI	小麦	[49]

3 烤烟形态结构模型及可视化研究

烤烟形态模拟模型(morphological dynamic flue-cured tobacco mechanism models)通常以时间(或积温)作为尺度,能动态地模拟烤烟器官的生长发育过程,解释技术因子对器官形态建成的影响。可分为烤烟地上部分和地下部分器官的形态,颜色生长动态模拟。地下部分通常为根系结构,地上部分器官又包括茎、叶、花。

3.1 烤烟地上部分器官形态模拟

3.1.1 烤烟主茎形态生长模拟。烤烟同一节主茎截面面积相差较小,形状为近圆柱体,主茎的生长为增长、增粗过程。徐光辉等^[50]通过确定重新定义烤烟生长周期(以相邻 2 个叶元产生的时间间隔为一个生长周期),通过确定节间形态系数 β 、 k 及节间密度,最终通过节间生物量实现烤烟主茎截面面积及节间长度的模拟。

3.1.2 烤烟叶片生长模拟。叶片是烤烟的主要收获器官,烤烟叶片的生长模拟包括对烤烟叶元数、叶形、叶色的模拟。1947 年, Wolf^[6]绘制了香料烟的质量增长速率的 S 型曲线,烟叶的干重随叶位变化呈现中部叶干重最大的分布曲线。各部位叶片叶长、叶宽生长速率曲线均为 S 型曲线,对烟草

的形态发育进行了定量描述。招启柏等^[51]发现烤烟叶片数与时间(活动积温)的关系模型符合 Richards 曲线特征,方程为 $y = a / (1 + e^{-bx})^{1/d}$,可较准确地模拟烤烟叶片的发生动态。移栽期主要通过调控参数 b 值(初始生长参数)与 d (曲线形状参数)值对整个方程动态调控;方程的模拟准确度(以 k 表示)为 0.996 6~1.111 4;拟合系数 R^2 达到 0.957 7 以上,达到极显著水平。孙延国等^[52]则在此基础上建立了 NC55 叶片发生与活动积温(时间)的 Richards 生长动态模型,解释了移栽期对烟叶发生动态规律的影响。徐光辉等^[50]通过建立叶片重量与叶长、最大叶宽、叶面积的相关关系,对叶片形态发育进行了动态模拟且模拟效果较好,具有明确的生物学意义。王发勇^[53]以生育进程为切入点,建立了优质烤烟的叶龄、株高、叶面积、叶面积系数的非线性曲线模型,并以此检验该阶段烤烟形态指标是否到达优质标准,具有一定的实用性,但未对方程系数含义进行解释,且方程的系数仍需要进一步的优化。Zhang 等^[54]建立了基于 RGB 值的水稻叶色变化模拟模型,将水稻叶色变化划分为 3 个阶段(浅绿转绿色、稳定绿色、绿色转黄色),并分别用线性函数、常数函数、递增线性函数模拟每个阶段的水稻叶色变化。烤烟叶色模拟研

究主要集中于烘烤过程叶色变化模拟,烤后烟叶颜色特征提取,根据图像处理技术建立相应的模型实现烟叶的智能分级、智能烘烤等^[55-56],而对烤烟生育期内各部位叶色模拟研究较少。

3.1.3 烤烟花形态生长模拟。对于生殖生长,王芸芸等^[57-58]构建了烤烟花的雌蕊、雄蕊、花冠、花萼的动态模型及颜色拓扑模型,对烤烟花的形态形成进行了较好的模拟研究,并在此基础上构建了烤烟花序的可视化模型,实现了对烤烟单花的花序发育模拟。此外,烤烟地上部分、地下部分器官均已学者进行了研究,但是模型仍较为粗糙,形态指标仍需要进一步细化,指标参数确立仍需要更精确、合理。

3.2 烤烟根系形态模型研究 根系是作物重要的养分吸收器官,通常由主根、侧根、不定根 3 个部分组成。良好的根系结构是优质烟叶生产的前提。烤烟根系的形态生长动态模拟对实现烟草农业数字化具有重要意义。由于作物根系监测难度大,根系生长模拟研究发展较为迟缓。监测技术的革新推动了作物根系生长模拟研究。作物的根系形态模拟的主流方法为 L 系统、分型理论、参考轴技术 3 种。

3.2.1 基于 L 系统的烤烟根系形态模拟。L 系统通过对作物根系进行抽象和概括(通常为字符串或数学公式),并根据根系的初始形态及系统构建的描述规则进行有限次的迭代,最终生成不同的拓扑图形。马新明等^[59]通过对烤烟根深(根系向下生长相对速率)及根系分布参数,构建了初步的烤烟根系生长模型。之后,杨娟^[60]围绕根系出现、生长、分支 3 个阶段,对根系生长的几何形态参数如:根段分支位置、分支数量、分支方向、分支年龄、分支密度、分支间距等进行模拟,结果表明,根系数量、根长指数、根系干重等对烤烟生长规律的模拟效果较好。席磊等^[61]在此基础上通过构建烤烟根系生长子模型(对根系横向生长、纵向生长、生长速率进行了定量描述)、根系分支子模型(对根段分支数量、方向、年龄、间距等进行了定量描述)实现了烤烟根系生长的三维可视化。除此之外,国内便鲜有烤烟根系形态模拟的相关研究,总体来说,L 系统可用于描述作物根系的几何形状,但描述方式较为复杂,且为单纯的数学公式或字符串,并不具备生物学意义^[8]。

3.2.2 基于分形理论的烤烟根系形态模拟。分形理论是为描述具有相似性的碎片结构及不规则结构而诞生的系统,因此适用于对作物根系形状复杂性进行描述与评估。Li 等^[62]对小麦根系进行拍照、二值化和骨架化以确定分形维数,利用分形维数来估计系统的复杂度。结果表明,与传统的根重测量方法相比,即使在较低的 Cd 和 Cu 浓度下,基于分形理论的根系复杂度测量方法也能显著简化根系统的复杂程度。常见的分形理论系统有迭代函数系统及粒子系统。相对于 L 系统,分形理论引入分形维数来描述作物根系的分生程度,适用于描述作物根系整体发育情况,并以此绘制作物群体根系图像,而不适用于模拟作物不定根系的生长情况。值得关注的是,关于大宗作物(小麦、水稻等)的根系形态模拟的分形理论研究较多,而关于烟草的报道极少。

3.2.3 基于参考轴技术的烤烟根系形态模拟。参考轴技术运用马尔科夫链理论和状态转换图来描述植物的生长、发育及凋亡过程。它与植物生理学理论紧密联系,机理性、解释性较强,实现难度较高。常见的为双尺度自动机模型,例如张吴平等^[63]利用双尺度自动机模型结合小麦种子根和不定根干物质重,并根据 GREENLAB 模型原理模拟干物质分配,建立了小麦苗期根系的结构-功能模型,而在烟草中相关的研究较少。

4 烤烟结构-功能模型研究

作物功能结构模型(crop functional-structural model)是一类对作物形态结构、生物量的产生和分配以及两者的内在联系进行定量描述的作物模型总称^[64]。烤烟的光合作用、同化产物的吸收与分配、营养元素的分配均与其形态结构息息相关,故将二者结合是烤烟模拟的有效途径。Shi 等^[65]利用三维扫描技术对烤烟冠层结构进行了三维模拟,建立了烤烟叶片的静态轮廓模型,并对烤烟的光合潜力等进行了研究,是较为典型的烤烟结构-功能模型。徐照丽等^[66]定量描述了烤烟光合产物的固定及在各个器官的分配,基于源-库理论建立了烤烟 GreenLab 模型,并对其模拟效果进行了评估。其创新点在于对烤烟农艺性状进行了连续测定,以此建立了烤烟叶片发展动态曲线,减少了参数数量,克服了 GreenLab 模型中解不唯一、参数意义不明确的缺点。孟天瑶等^[67]对甬优高产杂交稻的产量形成相关形态生理指标进行了系统研究,建立了水稻的氮素积累、钾积累、磷积累模型,形态生长动态模型,干物质积累与分配模型等。从目前的研究来看,对烤烟营养元素、烟碱、干物质的积累与分配规律研究较多,但缺少积累及分配规律的定量化描述研究。

5 存在问题

(1)从整体上看,烤烟模型研究尚不成熟且发展不平衡。关于水稻、小麦等大宗作物的生长模型研究较为深入,模型系统性、全面性、机理性、适用性较强,而烤烟生长模型研究相对较少。表现为:一方面生长模型研究中基于遥感技术的研究较为系统全面,而缺乏国外先进模型适应性评价研究以及生长模型数据同化研究。另一方面,形态结构模型中烤烟地上器官形态建成模型研究较多,而地下器官形态发育模型研究较少;对烤烟形态结构发展动态研究较多,对烤烟叶片颜色变化研究相对较少。

(2)模型敏感性及其不确定性及参数优化研究较少。主要表现为:模型检验方式单一,缺乏参数对作物模型模拟准确性影响的评估方式研究;参数获取准确性、参数估计、优化研究较少。一般而言,模型参数的敏感性和不确定性通常由模型结构误差、参数模糊性、测量数据误差等导致^[68]。近年来对大宗作物经典模型(SAFY-FAO 模型、AquaCROP 模型、WOFOST 模型、CERES-Wheat 模型等)参数的全局敏感性分析较多^[68-69],而烟草上缺少相应研究。Jabloun 等^[70]利用 Morris 灵敏度筛选法来确定冬小麦 DAISY 模型中的对输出结果影响最大的输入参数。Tan 等^[71]利用广义似然不确定度估计法(GLUE)分析了水稻 ORYZA-V3 模型参数的敏感

性和不确定性,结果表明,模型输出的参数后验分布和95%置信区间对似然测度的选择、不同日期和不同观测类型在似然测度中的权重非常敏感。基于模型误差正态分布的似然函数似然测度和基于数学乘法的组合方法在减少参数值和模型预测不确定性方面的有效性最好。随着烤烟模型机理性研究的深入,引入的模型参数数量也明显增加,各参数对模型输出量的影响程度差异较大,而当前因缺乏明确的参数度量方式往往被忽略。大量模型在确立参数前均未考虑模型参数意义是否明确。

(3) 缺少与数据库、物联网、3S技术、图像处理技术等耦合研究,缺少新型作物形态监测设备(三维扫描设备等)在数据获取上的运用。作物远程监测系统(典型的WMNs系统)的运用可对烤烟形态指标进行远程的实时、无损监测,将加深烤烟形态发育模型的机理性研究。如Paulus等^[72]通过使用高精度的三维扫描设备获取大麦植株的三维形态参数如株高、叶面积,实现了对大麦生长过程的定量形态测量。

(4) 从局部来看,烤烟生长模型的研究主要集中在新型技术手段对烤烟产量形成的模拟研究与基于3S技术烤烟产量远程监测,而对模型参数不确定性、参数敏感性、参数优化研究较少,也缺少对国内外其他较为成熟的作物模型的区域适用性评价研究。从笔者检索的文献来看,国内胡雪琼等^[17]在国内开创性地对WOFOST模型在云南烤烟的适用性进行了评价,之后便少有报道。

(5) 烤烟形态建成模型的精细化与可视化技术研究需进一步深入。目前对于烤烟地上、地下器官得可视化研究均有所报道,但是对烤烟叶色变化动态模拟的模拟较少,对烤烟根系的形态结构模拟研究大多基于L系统,而基于分形理论和参考轴技术的烤烟根系形态模拟研究较少。器官发育模拟较为粗糙、虚拟效果较差,且未实现对整株烤烟生长过程的虚拟显示。张红英等^[8]提出可运用三维扫描设备、核磁共振成像技术、微创技术来对玉米叶面形态进行扫描,完善叶面形态模拟,对烤烟叶片形态模拟亦具有参考意义。张加楠等^[73]提出基于RGB和HSI关系阈值法优化的卷积神经网络(RGBHSICNN)的作物图像分割提取覆盖度方法,以解决作物叶片交叉、变形的问题。

(6) 烤烟结构-功能模型研究主要集中在烤烟冠层光合产物的分配模型,对烤烟营养元素、干物质、内在化学成分(烟碱)的积累与分配规律研究较多,但对其积累及分配规律的定量化研究较少。

6 展望

当前,水稻、小麦等大宗农作物数字化研究已经取得了显著成就,而数字化烟草仍处于起步阶段。生长模型中的数据同化研究仍需开展大量工作,烤烟形态结构模型也仍需要进一步细化。烤烟模型研究是构建数字化烟草系统的必经和关键环节,“互联网+”技术的智慧烟草农业快速发展已成为现实与发展趋势。统计学的进步、模型检验及模型参数优化方法的更新、数据获取手段的更新为烤烟形态模型的构建及完善提供了新的理论基础。计算机图像处理

技术、三维扫描技术、人工智能及烤烟作物数据库与作物虚拟技术的融合为烤烟作物模型的研究与完善提供了技术支持,将极大推进烤烟形态建成模型的研究。促进传统烟草农业与其他学科的融合,提高烟草生产物联网系统的耦合度成为现代烟草农业科技必须关注和重视的重大科技关键问题和研究重点。

参考文献

- [1] 王彦亭,谢剑平,李志宏.中国烟草种植区划[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 邓蒙芝.1978~2012年中国烤烟生产重心演变轨迹及其驱动机制研究[J].中国农业资源与区划,2015,36(4):113-119.
- [3] 刘丹,诸叶平,刘海龙,等.植物三维可视化研究进展[J].中国农业科技导报,2015,17(1):23-31.
- [4] 朱艳,汤亮,刘蕾蕾,等.作物生长模型(CropGrow)研究进展[J].中国农业科学,2020,53(16):3235-3256.
- [5] 高亮之,金之庆,黄耀,等.水稻计算机模拟模型及其应用之一 水稻种植模型——水稻发育动态的计算机模型[J].中国农业气象,1989,10(3):3-10.
- [6] WOLF F A. Growth curves of oriental tobacco and their significance[J]. Bulletin of the torrey botanical club,1947,74(3):199-214.
- [7] 张伟欣,曹宏鑫,朱艳,等.油菜作物模型研究进展[J].中国农业科技导报,2014,16(1):82-90.
- [8] 张红英,李世娟,诸叶平,等.小麦作物模型研究进展[J].中国农业科技导报,2017,19(1):85-93.
- [9] 王文佳,冯浩.国外主要作物模型研究进展与存在问题[J].节水灌溉,2012(8):63-68,73.
- [10] 杨靖民,杨靖一,姜旭,等.作物模型研究进展[J].吉林农业大学学报,2012,34(5):553-561.
- [11] 高美玲,梁非时,寇胜利.作物专家系统发展概况与趋势[J].东北农业大学学报,2003,34(1):105-108.
- [12] 曹卫星,潘洁,朱艳,等.基于生长模型与Web应用的小麦管理决策支持系统[J].农业工程学报,2007,23(1):133-138.
- [13] 刘铁梅,曹卫星,罗卫红,等.小麦物质生产与积累的模拟模型[J].麦类作物学报,2001,21(3):26-30.
- [14] 高亮之,金之庆,郑国清,等.小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS)[J].江苏农业学报,2000,16(2):65-72.
- [15] 廖桂平,官春云,黄璜.作物生长模拟模型研究概述[J].作物研究,1998(3):45-48.
- [16] YANG X, SHAO X H, MAO X Y, et al. Influences of drought and microbial water-retention fertilizer on leaf area index and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco[J]. Irrigation and drainage, 2019, 68(4): 729-739.
- [17] 胡雪琼,徐梦莹,买苗,等. WOFOST模型对于云南烤烟的适用性研究[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2015,7(5):451-457.
- [18] GU Q, SHENG L, ZHANG T H, et al. Early detection of tomato spotted wilt virus infection in tobacco using the hyperspectral imaging technique and machine learning algorithms [J/OL]. Computers and electronics in agriculture, 2019, 167 [2020-11-05]. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105066>.
- [19] 胡玮,邸青,刘吉振,等.毕节烟田土壤氮素矿化动态模拟[J].天津农业科学,2017,23(3):26-31.
- [20] PU J C, CHENG J L, ZHANG M S, et al. Risk regionalization of drought for flue-cured tobacco planting in Qujing City based on GIS[J]. Meteorological and environmental research, 2019, 10(5):119-124.
- [21] 贾方方.不同水分状况对烤烟高光谱特性及生理生化指标的影响[D].郑州:河南农业大学,2010.
- [22] 徐冬云.基于遥感技术的烟草花叶病监测研究:以沂水县为例[D].泰安:山东农业大学,2016.
- [23] 王一丁.烟草花叶病害高光谱特征及其病害程度判别分析模型的研究[D].郑州:河南农业大学,2016.
- [24] 徐冬云,李新举,杨永花,等.基于遥感技术的烟草花叶病监测研究[J].中国烟草学报,2016,22(1):76-83.
- [25] 彭金梅.辐射胁迫对烤烟生理生化特性及光谱特征的影响[D].郑州:河南农业大学,2013.
- [26] 吴秋菊,舒清志,刘延,等.烟草主要生化参数高光谱遥感监测现状[J].绿色科技,2017(14):255-258.
- [27] 刘明芹.基于资源三号遥感影像的复杂山区套种烟草产量估测模型研究[D].泰安:山东农业大学,2016.

- [28] 符勇. 高分辨率星载 SAR 在高原山地烟草产量估测中的应用研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2015.
- [29] 刘国顺, 李向阳, 刘大双, 等. 利用冠层光谱估测烟草叶面积指数和地上生物量[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1763-1771.
- [30] 黄智. 不同种质资源烟草高光谱特征与色素含量关系研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- [31] 邢雪霞, 刘国顺, 贾方方, 等. 烤烟叶片色素含量的高光谱预测模型研究[J]. 中国烟草学报, 2014, 20(1): 54-60.
- [32] 杨艳东, 贾方方, 刘国顺, 等. 基于多时相和多角度的烤烟烟碱密度遥感监测[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(2): 40-47.
- [33] 窦玉青. 基于高光谱技术的烟草含氮化合物估测模型研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [34] 赵文, 刘国顺, 贾方方, 等. 烤烟烟碱含量的高光谱预测模型[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(3): 275-279.
- [35] 李俊丽. 不同氮素水平对烤烟高光谱特性及其生理生化指标的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
- [36] 李富欣, 张利红, 徐敏. 基于 GIS 的河南省烤烟移栽面积遥感监测及产量估算[J]. 江西农业学报, 2014, 26(7): 76-79, 83.
- [37] 郭婷. 不同钾水平和成熟度烟草高光谱特征及其品质估测模型研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
- [38] 梁寅. 基于高光谱遥感的云烟 87 采收成熟度识别研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [39] 胡九超. 基于高分辨率合成孔径雷达(SAR)的高原山区烟草识别方法研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2015.
- [40] 黄健熙, 黄海, 马鸿元, 等. 遥感与作物生长模型数据同化应用综述[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 144-156.
- [41] JIN M, LIU X N, WU L, et al. An improved assimilation method with stress factors incorporated in the WOFOST model for the efficient assessment of heavy metal stress levels in rice[J]. International journal of applied earth observations and geoinformation, 2015, 41: 118-129.
- [42] DENTE L, SATALINO G, MATTIA F, et al. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield[J]. Remote sensing of environment, 2008, 112(4): 1395-1407.
- [43] 陈劲松, 黄健熙, 林琛, 等. 基于遥感信息和作物生长模型同化的水稻估产方法研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(S1): 173-183.
- [44] JIN H A, LI A N, WANG J D, et al. Improvement of spatially and temporally continuous crop leaf area index by integration of CERES-Maize model and MODIS data[J]. European journal of agronomy, 2016, 78: 1-12.
- [45] 朱元勋, 朱艳, 黄彦, 等. 应用粒子群算法的遥感信息与水稻生长模型同化技术[J]. 遥感学报, 2010, 14(6): 1226-1240.
- [46] LIU F, LIU X N, DING C, et al. The dynamic simulation of rice growth parameters under cadmium stress with the assimilation of multi-period spectral indices and crop model[J]. Field crops research, 2015, 183: 225-234.
- [47] VAZIFEDOUST M, VAN DAM J C, BASTIAANSEN W G M, et al. Assimilation of satellite data into agrohydrological models to improve crop yield forecasts[J]. International journal of remote sensing, 2009, 30(10): 2523-2545.
- [48] 陈浩, 樊风雷. 基于集合卡尔曼滤波的南雄烟草 LAI 数据同化研究[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3046-3054.
- [49] 张树誉, 孙辉涛, 王鹏新, 等. 基于同化叶面积指数和条件植被温度指数的冬小麦单产估测[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 266-271, 293.
- [50] 徐光耀, 熊淑萍, 张慧, 等. 烤烟地上部器官形态建成模拟模型[J]. 河南农业大学学报, 2011, 45(4): 395-401.
- [51] 招启柏, 廖文程, 孔光辉, 等. 移栽期对烤烟叶片生长动态的影响及其模型的建立[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(4): 41-47, 54.
- [52] 孙延国, 梁晓芳, 许倩, 等. 移栽期对 NC55 叶片发生进程模拟模型建立[J]. 中国烟草科学, 2016, 37(2): 47-53.
- [53] 王发勇. 优质烟叶生育进程与形态指标研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [54] ZHANG Y H, TANG L, LIU X J, et al. Modeling dynamics of leaf color based on RGB value in rice[J]. Journal of integrative agriculture, 2014, 13(4): 749-759.
- [55] WU J, YANG S X, TIAN F C. A novel intelligent control system for flue-curing barns based on real-time image features[J]. Biosystems engineering, 2014, 123: 77-90.
- [56] WANG L T, CHENG B, LI Z Z, et al. Intelligent tobacco flue-curing method based on leaf texture feature analysis[J]. Optik, 2017, 150: 117-130.
- [57] 王芸芸, 温维亮, 郭新宇, 等. 烟草花几何建模研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 163-167, 173.
- [58] 王芸芸, 温维亮, 郭新宇, 等. 基于分形系统的烟草花序可视化仿真研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(8): 51-54, 58.
- [59] 马新明, 杨娟, 熊淑萍, 等. 烟草根系形态发育模拟模型[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2421-2427.
- [60] 杨娟. 烟草根系生长发育动态模拟模型及其可视化研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2004.
- [61] 席磊, 冀亚丽, 汪强, 等. 烟草根系生长的三维模拟仿真[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(4): 106-110.
- [62] LI T, RAJAGOPLAN U M, KADONO H. Fractal based complexity analysis of wheat root system under different heavy metals[J]. Plant biotechnology, 2019, 36(2): 77-84.
- [63] 张吴平, 郭焱, 李保国. 小麦苗期根系三维生长动态模型的建立与应用[J]. 中国农业科学, 2006, 39(11): 2261-2269.
- [64] 康孟珍. 植物功能结构模型研究的回顾与展望[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(10): 2039-2048.
- [65] SHI T X, MA Y T, WU J, et al. Quantification of light absorption and photosynthesis of tobacco canopy using 3-D modeling[C]//Proceedings of 2012 IEEE 4th International symposium on Plant Modeling, Simulation, Visualization and Applications [PMA 2012]. Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2012.
- [66] 徐照丽, 孙艳, 吴茜, 等. 烟草功能-结构模型 GreenLab-Tobacco 的构建[J]. 中国烟草学报, 2016, 22(3): 52-59.
- [67] 孟天瑶, 葛佳琳, 张徐彬, 等. 甬优中熟灿梗杂交稻栽后植株磷素积累特征与模型分析[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(3): 256-265.
- [68] 张超. 基于高光谱数据与 SAFY-FAO 作物模型同化的冬小麦生长监测与模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [69] 邢会敏, 相诗尧, 徐新刚, 等. 基于 EFAST 方法的 AquaCrop 作物模型参数全局敏感性分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(1): 64-76.
- [70] JABLON M, LI X X, ZHANG X Y, et al. Sensitivity of simulated crop yield and nitrate leaching of the wheat-maize cropping system in the North China Plain to model parameters[J]. Agricultural and forest meteorology, 2018, 263: 25-40.
- [71] TAN J W, DUAN Q Y. Parameter estimation and uncertainty analysis of ORYZA_V3 model using the GLUE method[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(4): 941-949.
- [72] PAULUS S, SCHUMANN H, KUHLMANN H, et al. High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth of cereal plants[J]. Biosystems engineering, 2014, 121: 1-11.
- [73] 张加楠, 张雪芬, 简萌, 等. 先验阈值优化卷积神经网络的作物覆盖度提取算法[J]. 信号处理, 2017, 33(9): 1230-1238.

(上接第 20 页)

- [37] KIM J, NGUYEN S G, GUEVARRA R B, et al. Analysis of swine fecal microbiota at various growth stages[J]. Arch Microbiol, 2015, 197(6): 753-759.
- [38] 张辉, 从立新, 魏园, 等. 不同纤维源日粮下东北梅花鹿瘤胃微生物功能基因的宏基因组分析[J]. 中国兽医学报, 2020, 40(7): 1391-1396.
- [39] 温康. 鹅肠道菌群的宏基因组学分析及其与肥肝形成关系的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019: 50-71.
- [40] DANZEISEN J L, KIM H B, ISAACSON R E, et al. Modulations of the chicken cecal microbiome and metagenome in response to anticoccidial and growth promoter treatment[J]. PLoS One, 2011, 6(11): 1-14.
- [41] 谭振. 不同饲料利用效率的长白猪肠道微生物宏基因组学和肠黏膜转录组学研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 25-62.
- [42] 张孟阳, 毕付提, 李洁, 等. 发酵饲料对仔鸡肠道微生物群落多样性影响[J]. 中国家禽, 2019, 41(13): 30-36.
- [43] 赵玉晓. 新西兰兔在 SPF 与常规饲养环境下盲肠转录组与代谢组以及微生物菌群的比较[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020: 25-41.
- [44] 许会芬, 黄涛, 王亚东, 等. 禁食软粪对新西兰白兔肠道指标及盲肠微生物的影响[C]//中国畜牧兽医学会养兔学分会. 中国畜牧兽医学会养兔学分会第二届学术交流会论文集. 北京: 中国畜牧兽医学会, 2018.
- [45] 段春慧, 王金金, 李婉萍, 等. 基于宏基因组学研究分析黑叶猴肠道微生物的多样性[J]. 中国兽医杂志, 2020, 56(7): 1-4, 134.