



## 作物生长模型(CropGrow)研究进展

朱艳, 汤亮, 刘蕾蕾, 刘兵, 张小虎, 邱小雷, 田永超, 曹卫星

(南京农业大学/国家信息农业工程技术中心/智慧农业教育部工程研究中心/农业农村部农作物系统分析与决策重点实验室/  
江苏省信息农业重点实验室/江苏现代作物生产协同创新中心, 南京 210095)

**摘要:** 农业信息技术是基于信息技术与农业科学的交叉融合而形成的新兴技术, 催生了数字农业和智慧农业的快速发展。作物生长模型作为其核心内容之一, 可以动态模拟作物生长发育过程及其与气候因子、土壤特性和管理技术之间的关系, 从而有效克服传统农业生产管理研究中较强的时空局限性, 为不同条件下的作物生产力预测预警与效应评估等提供量化工具。本文重点介绍笔者团队在作物生长模型的构建与应用方面形成的总体技术方法、最新研究进展及未来发展思考。通过20多年系统深入的探索和实践, 本团队以小麦、水稻等作物为主要对象, 以“生理机制解析-模型算法构建-生产力动态预测-效应定量评估-模拟平台研发”为主线, 综合运用系统分析、动态建模、虚拟现实、情景模拟及决策支持等方法, 开展了作物生长模型CropGrow的构建与应用研究。首先, 利用系统分析方法与动态建模技术, 构建了机理性与预测性兼备的综合性作物生长模型(CropGrow), 包括阶段发育与物候期、器官发生与建成、光合生产与物质积累、同化物分配与产量品质形成、养分动态、水分平衡以及作物三维形态建成与虚拟显示等子模型, 可数字化、可视化表征不同条件下作物生长发育与生产力形成过程; 然后, 结合地理信息系统(GIS)和遥感(RS)技术, 构建了基于模型、GIS和RS有效耦合的区域作物生产力预测技术; 进一步量化了气候变化、品种更新、土壤改良、措施优化对区域作物生产力形成的影响, 拓展了适宜方案生成、理想品种设计、气候效应评估、耕地利用评价以及农业政策制定等应用技术; 最后, 运用构件化程序设计思想, 基于作物生产数据库、作物模型构件库等, 集成开发了基于模型的数字化、可视作物生长模拟系统与决策支持平台, 实现了数据管理、参数优化、生长模拟、遥感耦合、区域预测、方案设计、效应评估、安全预警、产品发布等综合功能。未来作物模拟研究将在完善基础数据库的基础上, 进一步提升预测能力、量化基因效应、拓展智能决策、耦合多功能模型等, 为粮食生产的预测预警、情景效应的量化评估、生产管理的智能决策、作物品种的优化设计等提供数字化支撑, 对于保障国家粮食安全和推进数字农业发展具有重要意义。

**关键词:** 作物生长模型; 算法构建; 生产力预测; 效应评估; 决策支持; 系统平台; 数字农作

## Research Progress on the Crop Growth Model CropGrow

ZHU Yan, TANG Liang, LIU LeiLei, LIU Bing, ZHANG XiaoHu, QIU XiaoLei,  
TIAN YongChao, CAO WeiXing

(Nanjing Agricultural University/National Engineering and Technology Center for Information Agriculture/Engineering Research Center of Smart Agriculture, Ministry of Education/Key Laboratory of Crop System Analysis and Decision Making, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Modern Crop Production, Nanjing 210095)

收稿日期: 2020-02-29; 接受日期: 2020-06-10

基金项目: 国家杰出青年科学基金(31725020)、国家自然科学基金(41961124008, 51711520319, 31872848, 31801260, 31571566)、国家重点研发计划(2019YFA0607404)

联系方式: 朱艳, E-mail: yanzhu@njau.edu.cn. 通信作者曹卫星, E-mail: caow@njau.edu.cn

**Abstract:** Agricultural information technology is formed as the result of integrating information technology and agricultural science, and has further facilitated the rapid development of digital agriculture (DA) and smart agriculture (SA). As one of the core technologies of DA and SA, crop growth model can dynamically simulate crop growth and development processes and their relationships with climate condition, soil characteristics and management strategy, so as to overcome the limitation of the spatial-temporal characteristics of traditional research on agricultural production management. It can provide powerful quantitative tools for crop productivity prediction and early warning and impact evaluation under different conditions. Through over 20-years systematic and profound exploration and practicing in wheat and rice crops, and based on the workflow of “physiological mechanism analysis-model algorithm development-dynamic productivity prediction-quantitative effect assessment-simulation platform development”, our research team has been devoted to the development and application of crop simulation model CropGrow, by integrating the technologies of system analysis, dynamic modeling, virtual reality, scenario simulation, and decision support. Firstly, based on the system analysis method and dynamic modeling technology, the comprehensive and mechanistic crop growth model CropGrow has been developed, including the submodels of phasic development and phenology, organ development and population establishment, photosynthetic production and biomass accumulation, assimilate partitioning and yield/quality formation, nutrient dynamics, and water balance, along with three-dimensional morphological and visual submodels, which could digitalize and visualize the processes of crop growth and productivity formation under different conditions. Further, by coupling geographic information system (GIS) and remote sensing (RS), the model-based regional crop productivity prediction technology has been established. Then, based on the scenario analysis, the contributions of climate change, soil improvement, variety updating, and strategy optimization to regional crop production have been quantified, and applications extended to generation of suitable management plan, design of ideal cultivar, assessment of climate impact, evaluation of land use and decision-making of agricultural policy. Finally, based on the component-based programming technology, a model-based digital and visual crop growth simulation system and decision support platform has been developed by integrating the crop production database and crop model components, further realizing the comprehensive functions of data management, parameter optimization, growth simulation, remote sensing coupling, regional prediction, management strategy design, effect evaluation, safety early warning and product release. In the future, based on the improvement of agro-information database, additional efforts in crop modeling will be made toward enhancing prediction ability, quantifying gene effects, developing intelligent decision-making, and coupling multiple models, which will provide digital support for the prediction and early warning of food production, quantitative evaluation of scenario effects, decision-making on management strategy, and optimal design of new crop cultivars, thus facilitating the security of national food and development of digital agriculture.

**Key words:** crop growth model; algorithm development; productivity prediction; impact assessment; decision support; system platform; digital farming

信息技术与农业科学的快速发展与交叉融合,形成了农业信息技术,进一步催生了数字农业和智慧农业的快速发展,为现代农业提供了量化技术支持和全方位信息服务,也为农业产业技术改造和提升注入了新的活力,带来显著的社会、经济和生态效益<sup>[1]</sup>。农业信息技术在世界农业领域的兴起始于 20 世纪 70 年代末,以作物生长模型(crop growth model)的成功研制和应用为突出代表<sup>[2]</sup>。作物生产系统是一个复杂而独特的动态系统,受气候条件、土壤特性、品种特征、技术措施等多因素的综合影响,具有显著的时空变异性。而作物生长模型以作物生长发育的内在规律为基础,综合作物遗传潜力、环境效应、调控技术之间的因果关系,能够定量描述和预测作物生长发育过程及其与环境和技术动态关系<sup>[3-4]</sup>。因此,构建机理性强、适用性广的作物生长模型可为不同条件下的

作物生产力预测与效应评估等提供有效的定量化工具。

20 世纪 50—60 年代,DE WIT<sup>[5]</sup>及 DUNCAN 等<sup>[6]</sup>相继发表了植物冠层光能截获与群体光合作用模型,标志着作物生理生态过程模拟的问世。目前国外较为优秀的作物生长模型有美国的 DSSAT<sup>[7]</sup>、澳大利亚的 APSIM<sup>[8]</sup>、法国的 STICS<sup>[9]</sup>、荷兰的 GECROS<sup>[10]</sup>、菲律宾国际水稻所的 ORYZA<sup>[11]</sup>等。我国作物模型的研究虽然起步较晚,但发展较快。早期研究在跟踪和借鉴国外研究成果的基础上,针对我国作物生产特点构建了相关模拟模型<sup>[12-13]</sup>。20 世纪 90 年代得到快速发展,涌现了若干各具特点、自主研发的作物生长模型及决策系统<sup>[14-16]</sup>。2000 年以来,南京农业大学、中国农业大学、西北农林科技大学、中国科学院、江苏省农科院等科研院校在作物模拟算法构建、模拟平台搭

建、模型区域应用、情景效应评估等方面开展了较为系统的研究工作，并在国际作物模拟领域产生了积极影响<sup>[17-21]</sup>。

2010 年以来，国际农业系统模拟专家组织启动了农业模型比较与改进项目协作组 (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project, AgMIP)，旨在通过比较与改进世界上现有的不同作物生长模型、家畜生长模型和农业经济模型，并耦合未来气候模型与情景模拟方法等，来量化评估站点、区域、国家及全球等不同尺度农业生产与食品安全 (<https://agmip.org>)。在作物生长模型领域，协作组按照水稻、小麦、玉米等不同作物分别组建了多个国际研究团队，协同开展作物生长模型的比较与改进研究，着力提升模型在不同条件下的模拟与应用能力<sup>[22]</sup>。然而，由于试验数据共享不畅、控制试验条件有限、区域模拟技术发展缓慢、模型研究人员匮乏等方面的综合原因，现有作物生长模型在极端气候效应模拟<sup>[23-24]</sup>、区域生产力预测<sup>[25-26]</sup>、管理方案设计<sup>[18,27]</sup>、环境效应评估<sup>[28-29]</sup>等方面还有待进一步改进和完善，迫切需要提出机理性与预测性兼备的综合性作物生长模型及决策支持系统。

近 20 多年来，南京农业大学以小麦和水稻等作物为主要对象，针对现有作物生长模型存在的问题以及国内外发展趋势，在作物生长过程模拟、极端气候效应量化、区域生产力预测分析、数字化设计与决策支持等方面开展了深入系统的研究，形成了具有中国特色、与国际接轨的作物生长模拟系统及应用技术体系。本文重点介绍笔者团队经过长期努力与探索，在作物生长模型方面形成的总体技术方法、最新研究进展及未来发展思考等。

## 1 总体研究思路

作物生长系统是由作物、土壤、大气等组成的有机系统，综合了作物遗传潜力、环境效应和技术调控之间的因果关系。作物系统模拟就是运用系统分析的原理和方法，对作物生长发育及生产力形成过程与环境、技术、品种之间的动态关系进行定量表达，并构建作物生长模拟算法。因此作物生长模型能够帮助人们理解和认识作物生长发育过程的基本规律和量化关系，并对作物生长系统的动态行为和产量品质进行定量预测，从而辅助作物生长和生产系统的优化管理和定量调控，实现高产、优质、高效、生态、安全的作物生产目标。理想的作物生长模型，不仅具有良好的

机理性和预测性，而且以其较强的动态性和通用性适用于不同生态区域和用户层次。

### 1.1 技术流程

本研究基于系统学理论与方法，综合运用农业气象学、作物生理学、作物生态学、过程建模和软件工程等，以“生理机制解析-模拟算法构建-生产力动态预测-效应定量评估-应用平台研发”为主线，开展系统深入的研究，并集成构建了作物生长模拟与应用技术体系。首先，通过收集已发表的文献资料，结合团队开展的不同类型品种、播期、密度、水分、养分及温度试验等模拟支持研究，综合利用作物生长分析和生理生态分析方法，对作物生长发育的基本规律及其与环境因子和技术措施之间的关系给予解析和综合，明确作物生长发育、产量品质形成对不同环境和技术措施的响应机制；运用系统分析、动态建模及虚拟显示等方法，量化不同条件下作物生长发育和产量品质形成的动态特征，构建基于生理生态过程的综合性作物（水稻、小麦）生长模型 CropGrow，包括阶段发育与物候期、器官发生与群体形成、光合作用与物质生产、物质分配与产量品质形成、养分动态、水分平衡、以及作物三维形态建成和虚拟显示等子模型，可数字化、可视化表征不同条件下作物生长发育与生产力形成过程；进一步探讨模拟模型的动态预测功能与地理信息系统 (GIS) 的空间信息管理功能、遥感 (RS) 技术的实时监测功能相耦合的机制与方法，构建基于模型、GIS 和 RS 耦合的区域作物生产力预测技术；在定量分析作物生产要素时空分布特征的基础上，利用情景模拟技术，量化气候变化、品种更新、土壤改良、措施优化对区域作物生产力的影响，开展适宜方案生成、理想品种设计、气候效应评估、耕地利用评价以及农业政策制定等应用技术研究；最后，运用构件化程序设计思想，研制开发作物生长模型组件，并基于作物生产历史数据库、基础农情数据库、作物模型构件库等，结合决策支持和可视化技术，集成开发基于模型的数字化可视化作物生长模拟系统与决策支持平台。该平台具有生产力预测预警、管理方案动态生成、气候效应量化评估、作物品种优化设计、耕地利用决策评价、农业政策规划制定等综合功能 (图 1)。

### 1.2 数据支撑

模型算法构建所需的数据资料大多来源于试验研究及历史资料。尽管已有的文献资料和数据积累可以提供许多作物生长发育的基本规律及其与环境和技术之间的相互关系，但不少算法的推导和构建还必须依

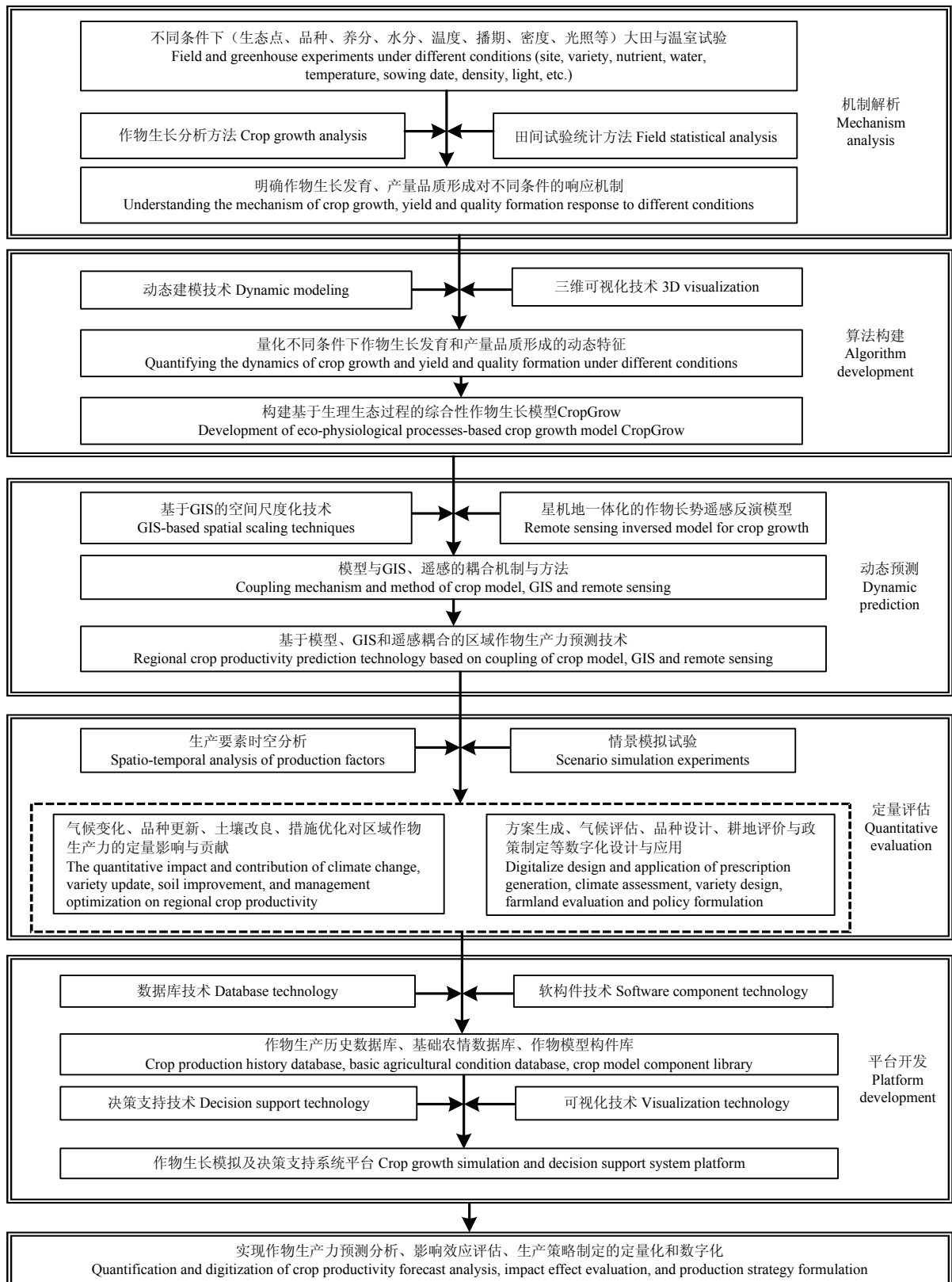


图 1 作物生长模型 CropGrow 的构建与应用技术流程

Fig. 1 Technical flowchart of development and application of the crop growth model CropGrow

赖于逻辑性的理论假说和试验性的研究分析。因此, 需要有针对性地组织实施大量试验研究来服务于作物生长模拟算法的构建, 称之为模拟的支持研究<sup>[3]</sup>。作物生长模拟的支持研究主要有两个方面: 一是已知因果关系或基本模式, 但缺乏特定的量化表达或算法律程序; 二是相对不了解而有待探索的某些过程, 称为黑箱。笔者团队自 1994 年以来, 在收集已有文献资料的基础上, 通过持续实施不同品种、播期、密度、水分、养分等处理的多年多生态点大田试验以及不同处理水平和持续时间的温度、光照、水分等人工气候室试验等, 探究了作物生长发育及产量品质形成的动态规律, 明确并量化了作物生理过程对环境因子及管理措施响应的机理特征, 从而构建了不同因子及其互作与作物生长发育、产量品质形成之间关系的模拟算法, 重点在生育期预测<sup>[30-33]</sup>、形态与器官建成<sup>[32-33]</sup>、干物质分配<sup>[33-35]</sup>、籽粒蛋白质和淀粉形成<sup>[36-39]</sup>、极端温度效应量化<sup>[40-45]</sup>等过程模拟方面实现了突破。

## 2 主要研究进展

### 2.1 作物生长模型 CropGrow 的构建

**2.1.1 作物生长发育与生产力形成过程建模** 作物生长模型 CropGrow 是以小麦和水稻等作物生长发育及生产力形成规律为基础, 以气候条件、土壤特性、品种特征、管理技术等为主要驱动变量, 而构建的基于生理生态过程的作物生长与生产力形成模拟模型, 包括阶段发育与物候期、器官发生与建成、光合生产与物质积累、同化物分配与产量品质形成、养分动态和水分平衡等子模型(图 2)<sup>[3, 33]</sup>, 可动态预测不同条件下作物生长发育与产量品质形成过程(图 3)。其中, 阶段发育与物候期子模型以茎顶端发育为主线, 以作物温光发育过程为基础, 通过动态模拟作物生理发育时间 (physiological development time, PDT) 来精确划分作物发育阶段<sup>[30-31]</sup>。器官发生与建成子模型主要模拟植株不同器官的发生和形成过程, 包括根、茎、叶、穗等器官的发生与建成等, 其中器官发生的时间与阶段发育过程密切相关, 器官发生的数量和大小与同化物的分配和利用有关<sup>[32-33, 46-48]</sup>。光合生产与物质积累子模型是基于一日内到达冠层的光合有效辐射, 采用高斯积分法将冠层分层计算不同叶层反射与吸收的光合有效辐射, 加权计算冠层瞬时同化速率, 同时考虑了反射率随太阳高度角的日变化以及群体消光系数随 PDT 的时序变化, 再按不同时间点加权求和得到每日冠层同化速率, 并通过计算呼吸和物质转化消耗,

得到每日同化物积累量, 同时受到温度、水分、CO<sub>2</sub> 浓度、生理年龄和氮素的影响<sup>[3, 33]</sup>。同化物分配与产量品质形成子模型中, 碳、氮化合物的分配与再分配决定作物收获器官的产量和品质形成, 通过器官间干物质分配来模拟籽粒产量<sup>[33-34]</sup>, 进一步结合植株氮转运与籽粒氮积累动态, 建立了籽粒蛋白质含量与蛋白质产量的模拟模型<sup>[36-37]</sup>, 同时基于植株碳素的积累转运及籽粒碳素的转化利用, 构建了基于花后碳流过程的籽粒淀粉形成模拟模型<sup>[38-39]</sup>。养分动态子模型主要涉及氮、磷、钾 3 种大量元素的模拟, 其中氮素动态模拟包括土壤有机质矿化、硝化与反硝化作用、铵的吸附与解吸、氨的挥发、氮素淋洗及作物氮素吸收与分配等过程<sup>[49]</sup>, 植株从土壤吸收的氮素是通过建立植株及各个器官的临界氮浓度<sup>[50-51]</sup>, 来计算植株和各个器官的氮素需求量和转运量<sup>[52]</sup>。水分平衡子模型是根据土壤水分收支平衡原理, 通过作物根系深度将土壤剖面分成若干层, 并按土层进行土壤水分收支计算, 包括径流、渗漏、土壤蒸发、作物截留、根系吸水、水分再分配等动态过程的模拟<sup>[53]</sup>。

此外, 在评估已有模型对极端温度响应的不确定性基础上<sup>[54-56]</sup>, 基于作物生长发育对极端气候环境的响应机制<sup>[41-43]</sup>, 结合高、低温累积度日及半致死温度等参数, 量化了极端温度对作物生长发育的影响, 进而构建了高温和低温胁迫对稻麦生育进程、光合作用、物质积累与分配、结实率等过程影响的模拟算法<sup>[40, 42, 44-45]</sup>, 提高了 CropGrow 模型在极端温度环境下对作物生长发育及生产力形成的预测精度。

**2.1.2 作物三维形态建成和虚拟显示子模型的构建** CropGrow 模型除了对上述作物生产力形成过程进行模拟外, 还通过定量分析不同条件下作物器官几何形态与空间伸长规律、器官颜色动态特征、器官拓扑结构及其在植株个体上的空间配置、个体间相互作用及其与群体建成的关系等, 构建了作物器官-个体-群体的三维形态建成子模型, 并研发了基于模型的作物生长虚拟仿真平台。首先, 以生长长度日 (GDD) 为尺度, 结合生长模型模拟输出的器官总干重及分配模式获得单个器官的干物质量, 结合各器官的形态建成模式与特征参数, 构建了作物根<sup>[57-58]</sup>、茎<sup>[59-60]</sup>、叶<sup>[61-64]</sup>、穗<sup>[65-66]</sup>等器官的三维形态建成模拟模型, 包括器官几何形态、空间生长曲线、颜色变化特征等子模型; 综合利用不同器官三维形态可视化方法和计算机图形学的真实感绘制技术 (如纹理、颜色、光照处理等), 生成形象逼真的器官图形, 同时结合器官拓扑结构及

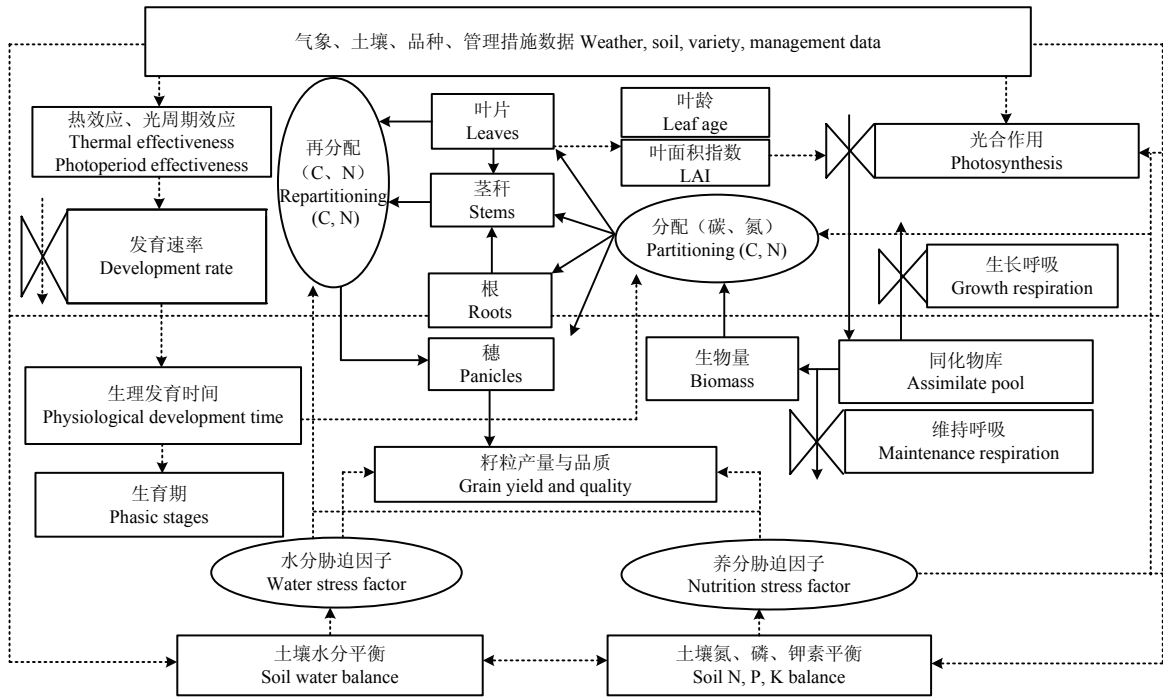


图 2 作物生长模型 CropGrow 的结构流程图  
Fig. 2 Structural flowchart of crop growth model CropGrow

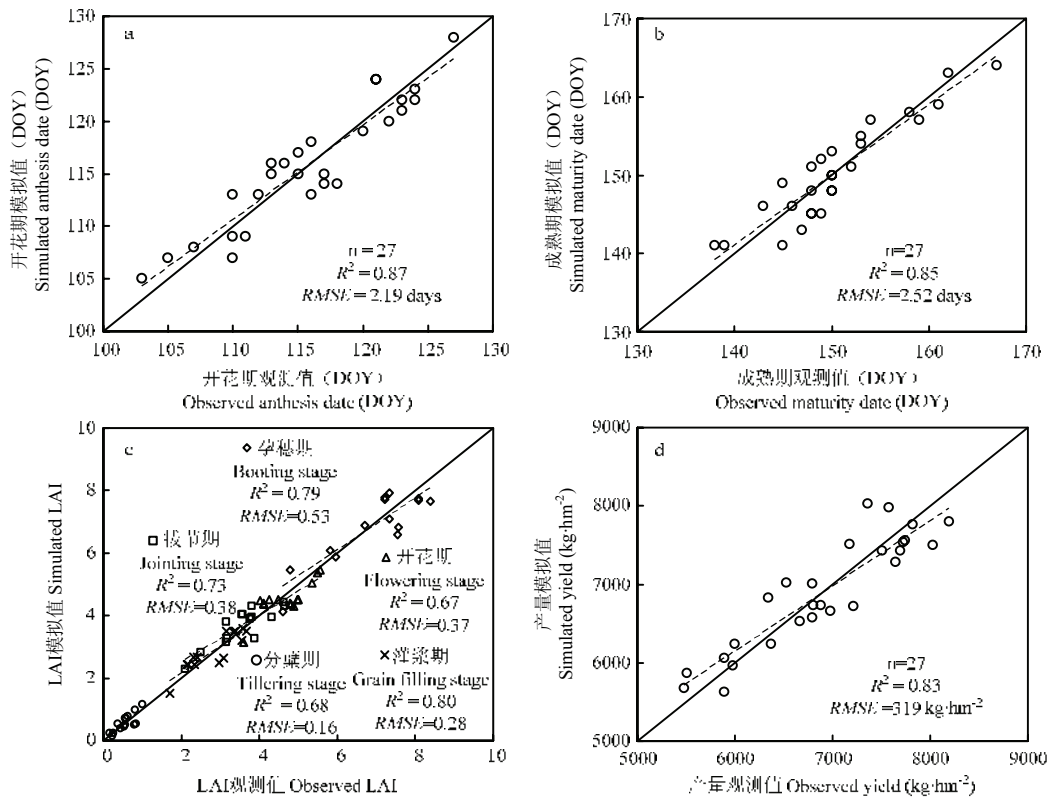


Fig. 3 Comparisons between observed and simulated values of wheat phenology (a, b), LAI (c) and grain yield (d) with WheatGrow

其在植株个体上的空间配置规律等，构建了作物器官和个体三维可视化技术<sup>[57-58,65,67]</sup>；进一步从优化计算速度、降低内存消耗、增强真实感等角度出发，提出了细节层次模型、视域裁剪技术等兼顾速度和多样性的方法，并结合植株间的碰撞检测与响应技术等<sup>[68]</sup>，实现了作物群体生长的可视化<sup>[69]</sup>；最后集成研发了作物生长虚拟仿真平台<sup>[69-70]</sup>，实现了不同条件下作物器官-个体-群体生长动态的三维可视化表达，为基于模型的作物株型优化设计提供了数字化支撑（图 4）。

2.2 作物生长模型 CropGrow 的应用

2.2.1 模型升尺度与区域预测 作物生长模型是基于特定区域内作物生长环境变量一致的假设条件而构建的，属于单点水平的模拟系统。而实际研究区的环境与管理变量（气候、土壤、品种、技术等）普遍存在空间差异<sup>[71-75]</sup>，因此需要结合 GIS 技术将作物生产力预测模型从单点模拟拓展到区域应用。为此，我们研究提出了基于模型与 GIS 耦合实现区域生产力预测的 2 种策略，即基于空间插值的升尺度策略和基于空间分区的升尺度策略。其中，空间插值作为一种重要的“由点到面”数据生成的空间分析方法，常用于观测点数据到区域数据的升尺度转换，可获取作物生长模型运行所需要的输入参数的区域化栅格数据，并逐栅格运行模型获得整个区域的模拟结果（图 5-a）<sup>[25, 76-78]</sup>。空间分区

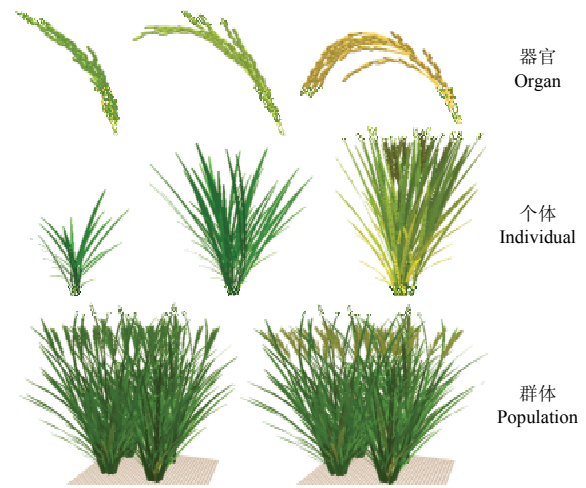


图 4 基于RiceGrow的水稻器官-个体-群体三维形态建成及可视化表达

Fig. 4 Three-dimensional morphological construction and visualization of rice organ, individual and population based on RiceGrow

则是根据研究区环境和管理变量的空间差异将区域划分为多个假定的均质模拟单元，通过每个模拟单元内典型生态点模拟结果“以点代面”，获取整个区域模拟结果（图 5-b）<sup>[79-81]</sup>。由于特定区域空间异

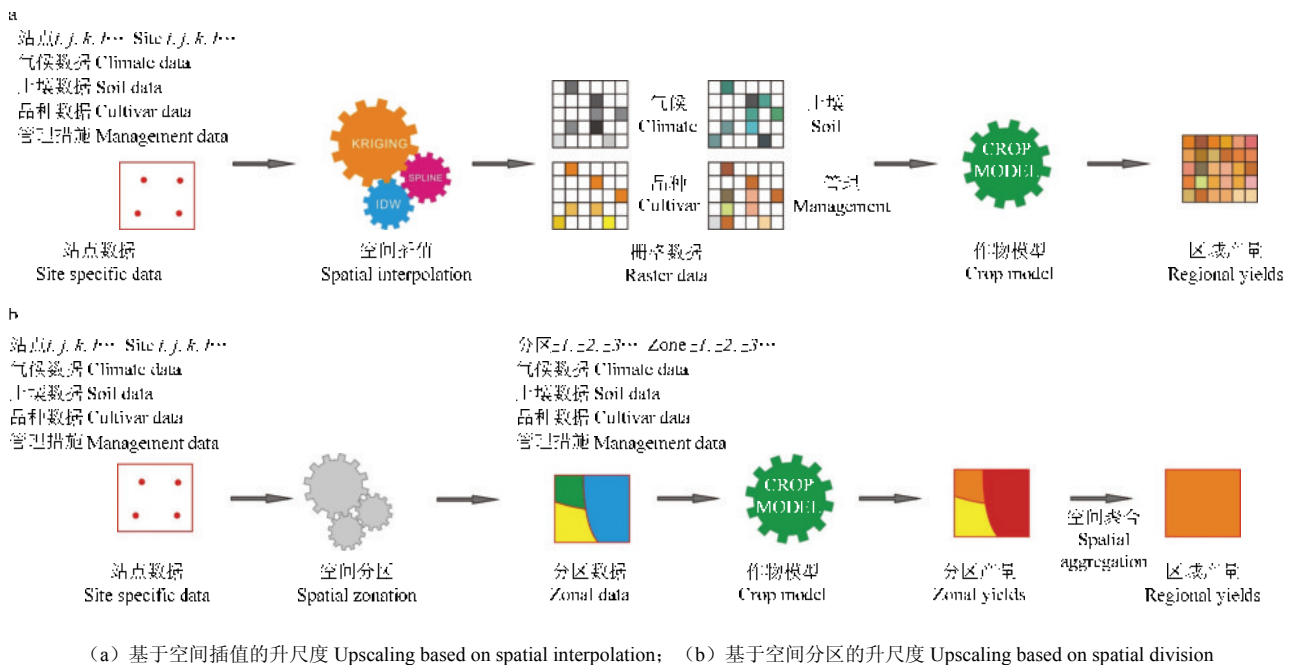
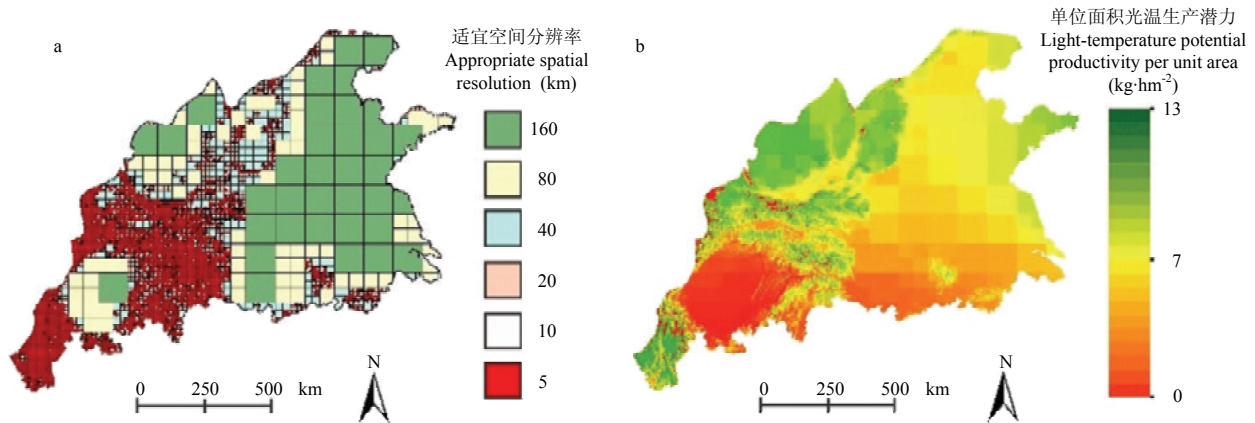


图 5 基于模型与 GIS 耦合的模拟尺度优化策略

Fig. 5 Optimization strategy of simulation scale based on model and GIS coupling

质性的多样化, 空间插值和空间分区普遍存在不确定性, 直接影响了区域生产力模拟的效果。因此, 模型应用中通过比较不同方法对区域模拟结果的影响, 选择适宜的升尺度策略, 从而提高区域模拟的

准确性。例如, 通过研究空间插值过程中不同空间分辨率对模拟精度的影响, 可确定我国冬麦区适宜的插值分辨率, 从而同步提高区域模拟的精度和效率(图6)<sup>[25]</sup>。



(a) 适宜模拟单元分辨率 Optimal simulation grid resolution; (b) 光温生产潜力模拟结果 Simulation results of light-temperature potential productivity

图6 基于空间差值方法的中国冬麦区生产力模拟

Fig. 6 Simulated productivity of winter wheat regions of China based on spatial interpolation

**2.2.2 模型与遥感耦合** 遥感可在田块到区域等不同空间尺度, 利用多种传感器快速实时准确获取作物、土壤等状态信息, 具有突出的时效性和空间性, 而作物生长模型是对作物生长过程及其与环境、技术、品种之间的动态关系进行定量表达, 具有较强的机理性和时序预测性。因此, 遥感信息与作物模型相结合, 可实现遥感实时监测功能与模型时序预测功能的互补, 提升对区域作物生长和产量品质形成的预测精度, 是实现区域作物生长和生产力精确预测的有效路径。遥感信息与作物模型的耦合主要涉及3种策略, 包括直接以遥感观测值替换模型模拟值(中间变量更新策略), 通过调整模型初始输入参数值使得模型模拟值逼近遥感观测值(初始参数反演策略), 以及以某时刻遥感观测值来优化同时刻模型模拟值并改变优化时刻之后的模型模拟状态变量(生长过程同化策略)<sup>[82]</sup>。

遥感与模型耦合过程中, 常用的耦合参数既有作物生长或生理指标, 如叶面积指数、叶片氮含量等, 也可以直接耦合遥感参数如光谱反射率、植被指数等<sup>[83-86]</sup>。例如, 我们利用一种新的粒子群优化算法, 将遥感数据与水稻生长模型(RiceGrow)相结合, 基于初始参数反演策略, 通过光谱遥感和卫星图像获

取水稻叶面积指数和叶片氮积累量作为耦合参数, 进行播种期、播种量和施氮量等初始参数的优化, 进而实现区域水稻产量的可靠预测<sup>[84]</sup>。另外, 我们将遥感与小麦生长模型(WheatGrow)相耦合, 基于生长过程同化策略, 同时加入PROSAIL辐射传输模型, 以不同生育时期的小麦植被指数为信息耦合参数, 通过同化遥感反演的时序性植被指数与WheatGrow-PROSAIL模型模拟的时序性植被指数, 获得了最优的叶面积指数序列, 并以此驱动WheatGrow模型, 从而准确预测了冬小麦生长指标和籽粒产量(图7—8)<sup>[85]</sup>。同时, 利用不同年份不同生态点的试验数据对遥感与WheatGrow耦合的最佳植被指数及最佳生育时期进行了探讨, 发现小麦拔节至孕穗期选用土壤调节植被指数、孕穗后选用增强型植被指数作为耦合参数时生长模型的预测效果最好。如用一个生育时期的遥感数据进行耦合, 孕穗—抽穗期是耦合的最佳窗口; 如有多个生育期遥感数据, 则基于拔节到灌浆期的时序遥感数据预测精度最高<sup>[86]</sup>。

**2.2.3 生产力预测与因子贡献率评价** 粮食安全生产始终是关系国民经济发展、社会稳定和国家自立的全局性重大战略问题。粮食总产的提高主要依靠扩大种植面积或提高单产, 在目前种植面积难以扩增的背

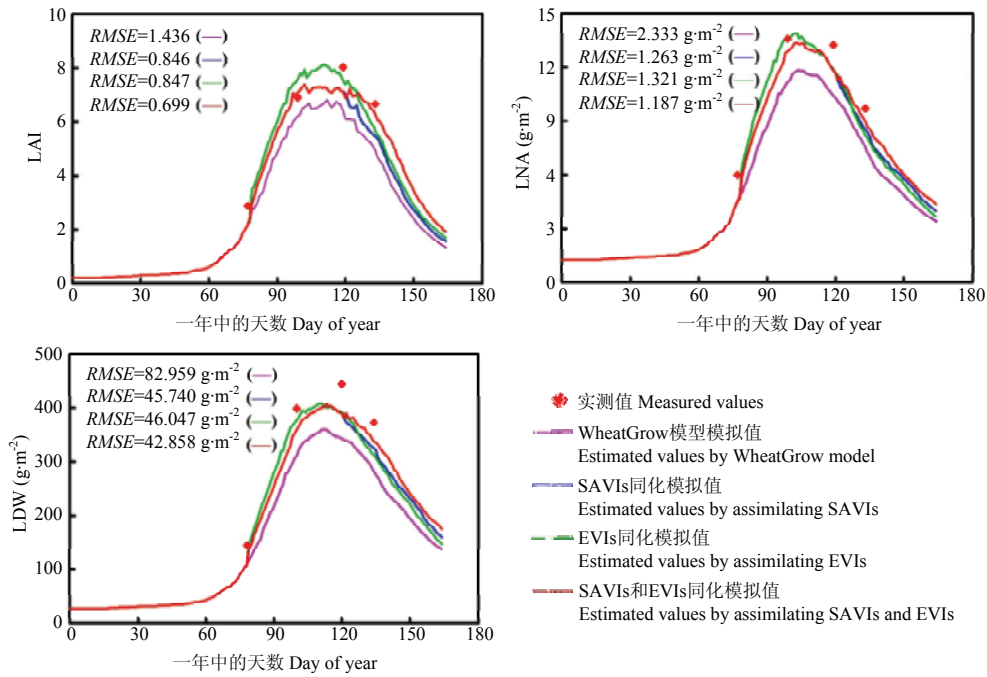


图 7 模型与遥感耦合后预测的小麦叶面积指数 (LAI)、叶片氮积累量 (LNA) 和叶片干物重 (LDW) 和实测值的对比  
 Fig. 7 Comparisons between observed and simulated values of LAI, leaf nitrogen accumulation (LNA) and leaf dry matter weight (LDW) by assimilating WheatGrow model with remote sensing information

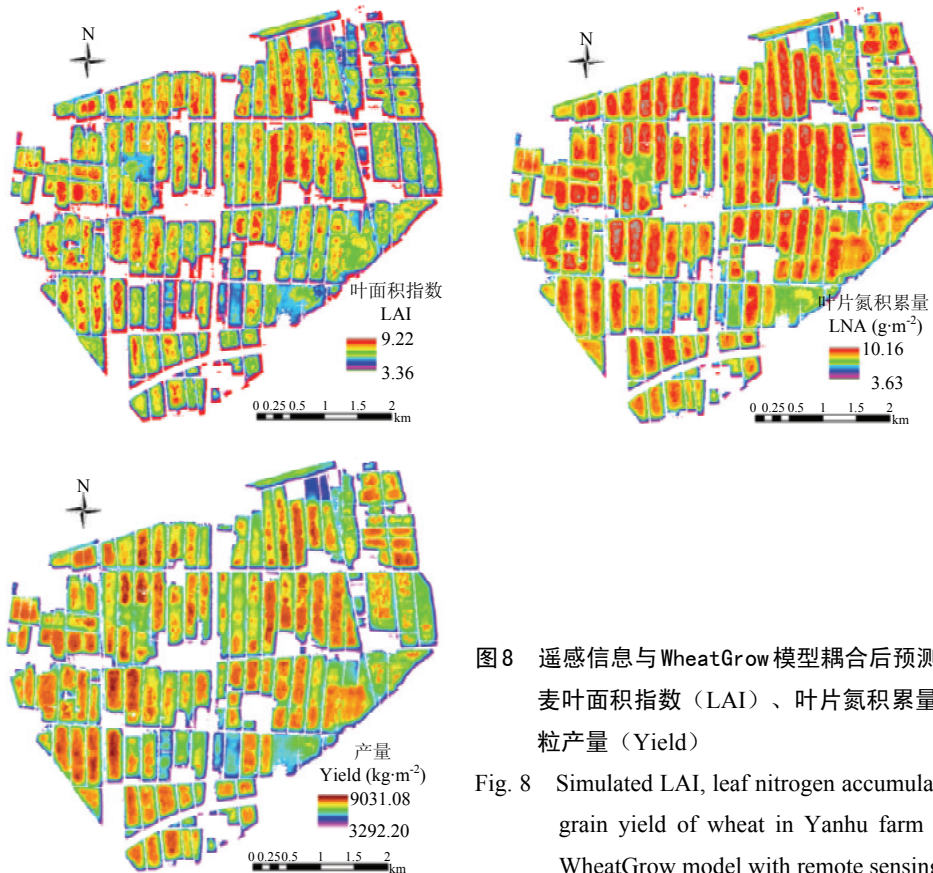
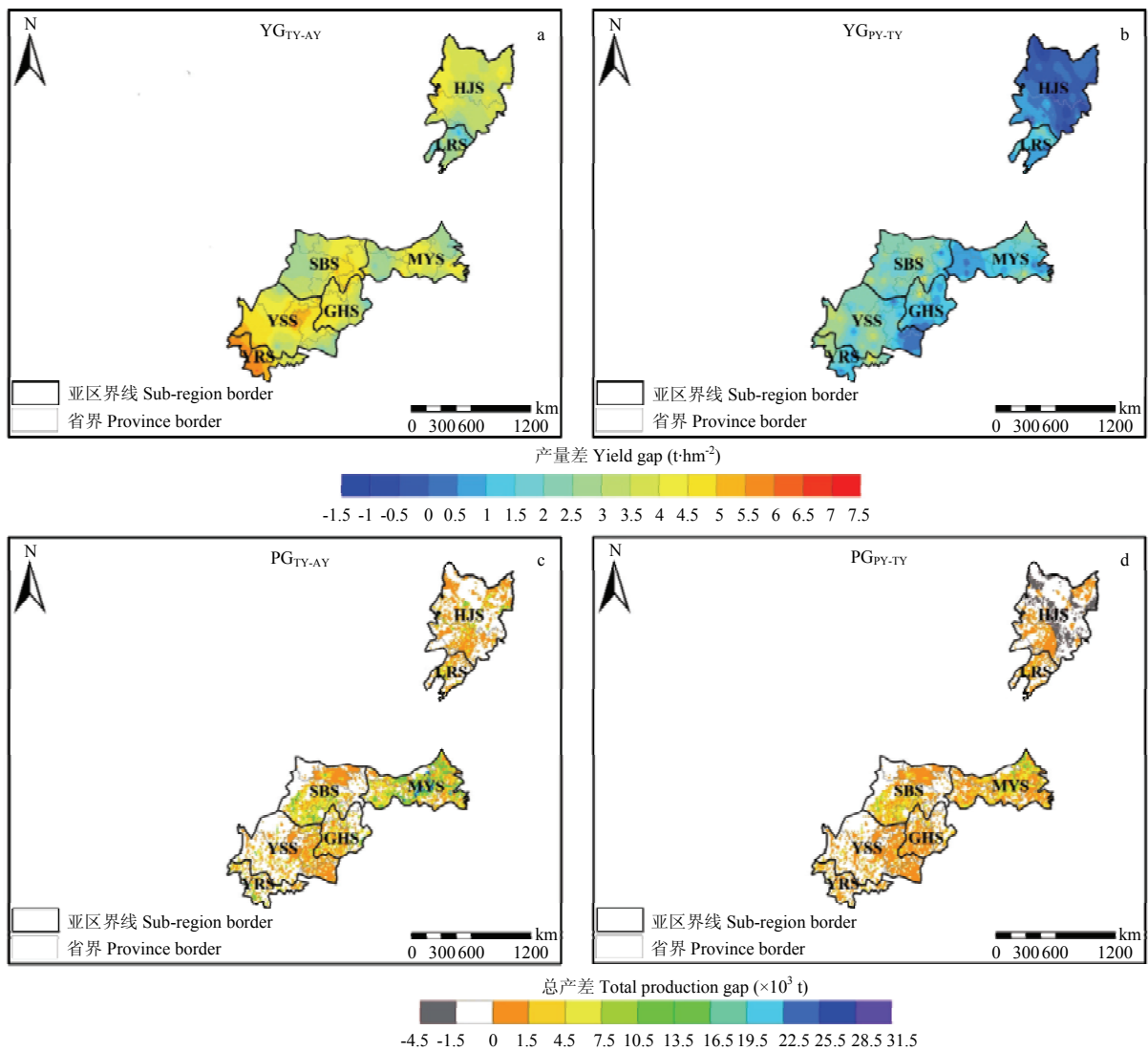


图 8 遥感信息与 WheatGrow 模型耦合后预测的沿湖农场小麦叶面积指数 (LAI)、叶片氮积累量 (LNA) 和籽粒产量 (Yield)  
 Fig. 8 Simulated LAI, leaf nitrogen accumulation (LNA) and grain yield of wheat in Yanhu farm by assimilating WheatGrow model with remote sensing information

景下，提高单产已成为增加作物总产和确保粮食安全的可行途径。因此，迫切需要明确不同区域的作物层次生产力及产量差，并进一步解析产量制约因子，提出作物生产力提升的技术途径。例如，我们利用 WheatGrow 模型和美国的 CERES-Wheat 模型，对我国冬小麦主产区的产量潜力、产量差和水分利用状况进行了评价<sup>[78]</sup>。综合利用 RiceGrow、ORYZA v3 和 CERES-Rice 3 套水稻生长模型集合，估算了中国水稻主产区 294 个站点在 1981—2010 年的潜在产量，并结合区域高产创建目标及实际产量，量化了不同

层次产量差。结果表明，不同层次产量差的空间分布呈现明显的区域差异，但中国水稻生产力仍具有较大的提升空间，其中西南单季稻区增产潜力最大，长江中下游单季稻区次之，东北单季稻区和南方双季稻区的提升空间相对较低（图 9—a、b）；在此基础上，结合水稻种植面积的栅格数据，估算了不同层次总产差及其空间分布特征（图 9—c、d）<sup>[87]</sup>。进一步结合我国水稻播种面积、产量、人口、人均稻米消费量、种子、饲料等数据及其随时间的变化特征，构建了基于经济学模型的全国稻谷需求模型，



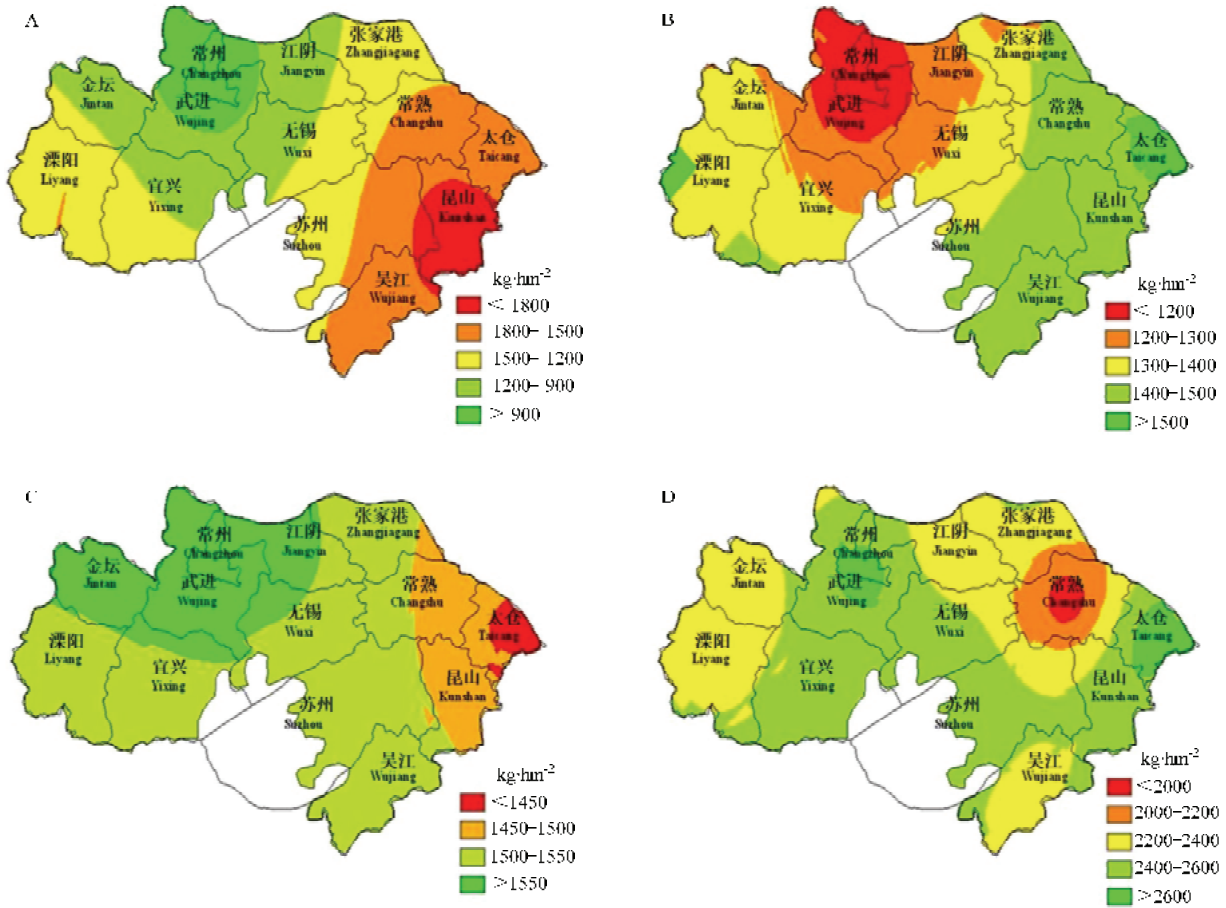
(a)  $YG_{TY-AY}$ , 目标产量-实际产量 Target yield-actual yield; (b)  $YG_{PY-TY}$ , 潜在产量-目标产量 Potential yield - target yield; (c)  $PG_{TY-AY}$ ,  $YG_{TY-AY} \times$  种植面积  $YG_{TY-AY} \times$  planting area; (d)  $PG_{PY-TY}$ ,  $YG_{PY-TY} \times$  种植面积  $YG_{PY-TY} \times$  planting area

图 9 中国水稻主产区不同层次单产和总产产量差的空间分布特征

Fig. 9 Spatial distribution of yield gap and production gap at different levels in main rice production regions of China

并基于市场均衡理论，提出了我国水稻的供需平衡模型，实现了基于模型的粮食生产力预测预警<sup>[88]</sup>。同时，利用情景模拟方法，定量评估了气候变化、土壤改良、品种更新和措施优化等不同要素对作物生产力形成的

贡献，发现我国太湖地区 1980 年到 2010 年间气候变化、土壤改良、品种更新和措施优化等对水稻生产力提升的贡献率分别为-19.5%、12.7%、21.7%和 34.6% (图 10)<sup>[89]</sup>。



A: 气候变化; B: 土壤改良; C: 品种更新; D: 措施优化  
A: Climate change; B: Soil improvement; C: Variety renewal; D: Measurement optimization

图 10 1980–2010 年太湖区域不同要素对水稻产量提升的贡献率

Fig. 10 Contribution of different factors to rice yield increase in Taihu lake region from 1980 to 2010

**2.2.4 数字化设计与决策支持** 随着 CropGrow 模型各个模块的构建与完善，模型的数字化设计与决策支持功能也得到不断拓展，主要涉及适宜管理方案生成、理想品种选择与设计、气候效应定量评估、耕地利用决策评价与农业规划政策制定等。在适宜管理方案生成方面，通过不同播期、密度、氮肥、灌溉等单一或组合方案的多年情景模拟试验，可以确定不同概率下的最适管理方案。例如，基于 RiceGrow 模型，通过情景模拟试验，为我国水稻主产区不同区域设计了现在和未来气候条件下的最适宜播期 (图 11)<sup>[90]</sup>。在理

想品种选择与设计方面，通过评价不同品种遗传参数组合下生育期、株型、光合作用及产量等方面的表现，可以生成理想的品种遗传参数组合，为作物生产中优良品种的选择与选育提供了有效支撑。例如，通过改变小麦品种的消光系数，评估了紧凑型 and 披散型小麦品种的光能利用效率，为设计高光能利用率的理想株型品种奠定了基础 (图 12)<sup>[91]</sup>。

基于多年的历史和未来气象数据，利用作物模型可以开展不同空间尺度的气候变化效应评估<sup>[28, 77-79, 89]</sup>。例如，利用 WheatGrow 模型结合全球气候模型(GCM)，

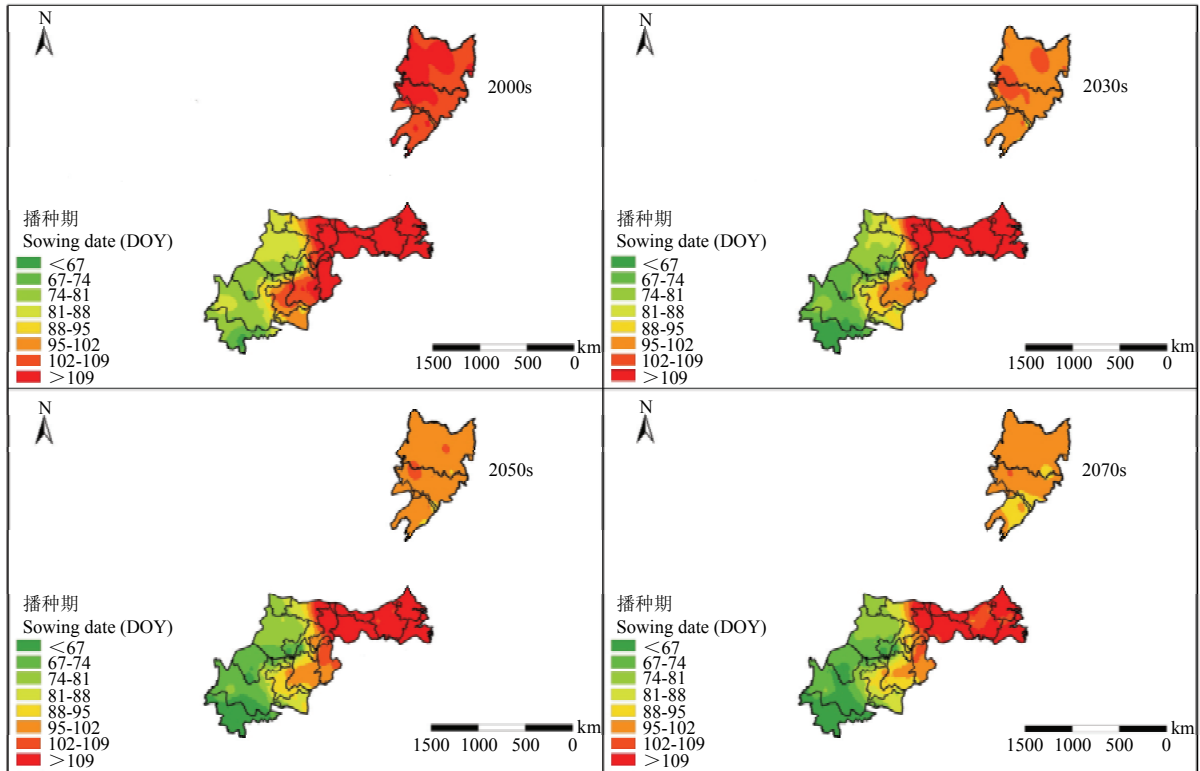


图 11 我国水稻主产区不同气候情景下的适宜播期空间分布特征

Fig. 11 Spatial distribution of suitable sowing dates under different climate scenarios in main rice production regions of China

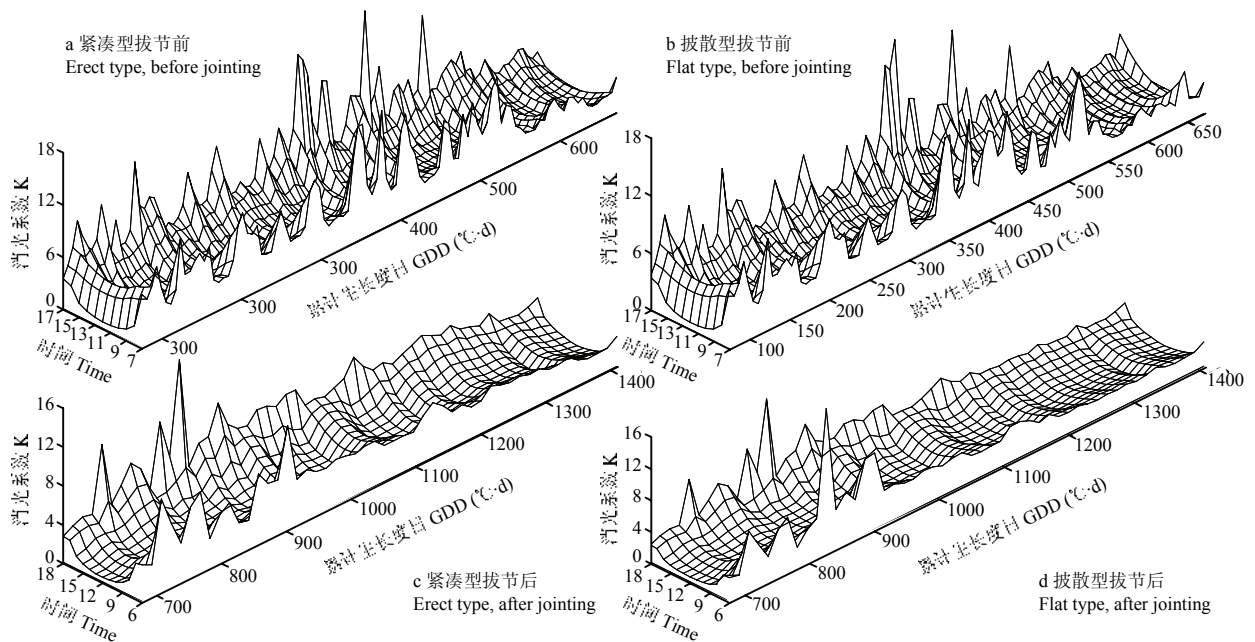


图 12 小麦紧凑型和披散型株型消光系数的动态变化

Fig. 12 The dynamic variation of extinction coefficient of erect and flat types of wheat cultivar

采用栅格模拟方式，评价了我国冬小麦主产区未来不同年代 (2030s、2050s、2070s) 小麦生产力和水分利用效率的变化<sup>[78]</sup>。结合 IPCC 最新气候变化预估结果，综合利用 RiceGrow、ORYZA v3 和 CERES -Rice 3 套水稻模型，评估了全球增温 1.5°C 和 2.0°C 情景下我国水稻主产区的生产力，发现增温在一定程度上可以缓解高纬度地区 (东北单季稻区) 低温胁迫对水稻生长

发育的影响，具有一定的增产效应，然而对于其他地区则呈减产趋势；CO<sub>2</sub> 的肥效不能完全抵消气候变暖对水稻生产带来的负面影响<sup>[92]</sup>。此外，在国际农业模型比较和改进项目 (AgMIP) 框架下，将 WheatGrow 模型与全球其他多套小麦生长模型一起形成多模型集合，模拟了不同气候变化情景下典型站点、国家和全球尺度小麦产量的变化趋势<sup>[56,81]</sup> (图 13)。在耕地利

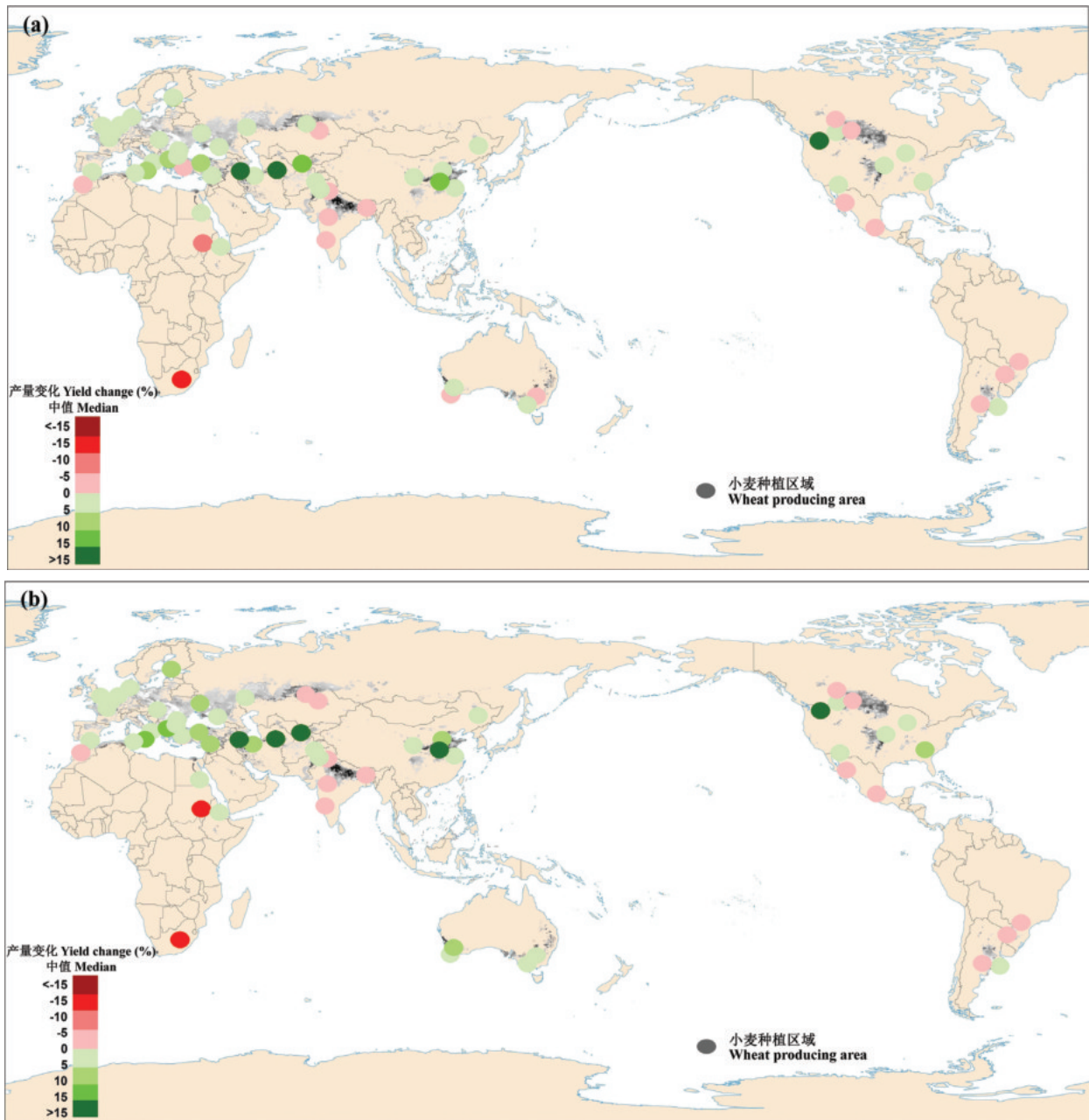


图 13 全球增温 1.5°C (a) 和 2.0°C (b) 情景下基于多模型集合预估的全球 60 个典型生态站点小麦产量的变化

Fig. 13 Impacts of (a) 1.5°C and (b) 2.0°C warming scenarios on wheat grain yield for 60 representative global wheat-growing locations from 31 crop models

用决策评价和农业规划政策制定上,生长模型首先预测单产,进一步结合耕地利用情景,即可估算出区域耕地生产力;同时结合资源投入与耕地利用情况,可以评价作物种植区域的适宜性,可为制定农业耕地利用政策等提供支持。

**2.2.5 生长模拟与决策支持平台** 在作物生长模型构建的基础上,利用计算机软硬件技术封装发育进程、光合同化、物质分配、器官建成、产品形成、养分动态、水分平衡等模块算法,进一步与 GIS、RS 等技术耦合,拓展数据管理、参数生成、策略评价等功能,研制开发了作物生长模拟软件系统<sup>[70,76,93-94]</sup>,并集成开发了作物生长模拟与决策支持平台,实现了数据管理、参数优化、生长模拟、遥感耦合、区域预测、方案设计、效应评估、安全预警、产品发布等综合功能(图 14—15),具有多功能、空间化、数字化、可视化等特点。其中数据管理实现了气象因子、土壤特性、品种参数、管理措施、病虫害害、生产成本、生育进程和产量水平等基础数据的查询与维护,以及相关数据的时空特征分析功能。参数优化实现了品种参数调试、气象数据生成、土壤参数估算以及各农作区常规栽培管理措施配置等。生长模拟包括单点模拟、空间模拟、时序模拟、虚拟显示和模拟验证,其中单点模拟可基于单个生态点定量模拟不同生产条件下的作物生育进程和生产力形成过程(图 15-b),还能基于单点切入模拟,利用特定时期获得的作物实际生长指标(叶面积指数、生物量、叶龄等),修订实时模拟值,改进后期的模型预测结果(图 15-c);空间模拟和时序模拟可以在不同空间尺度和长时间序列上模拟作物生长,并预测作物生产力的时空变化动态;虚拟显示是通过耦合作物三维形态模型及可视化技术,实现不同生长条件下作物生长动态的三维可视化(图 15-d);模拟验证是基于田间实测数据验证模型预测结果的准确性。遥感耦合可以通过初始参数反演、中间变量更新和生长过程同化等 3 类耦合机制,提升对区域尺度作物生长和生产力的预测精度。方案设计和效应评估通过有针对性的情景模拟试验与分析,辅助用户进行管理决策和效应评价。安全预警是通过定量评估环境要素变化对作物生产的影响,结合粮食需求供给模型,实现粮食安全预测预警与应对策略制定。产品发布功能无缝对接 CropGrow 的 WEB 版服务平台([www.cropgrow.net](http://www.cropgrow.net)),实现生长模拟、管理方案、生产潜力、气候效应、要素贡献、农业政策等应用报告的生成及实时在线发布。

## 3 未来发展方向

### 3.1 完善农情基础数据

数字作物的核心在模型,关键在数据<sup>[95]</sup>。在国家大数据战略的支持下,未来需进一步扩充完善数字农业基础设施条件,结合国家重大科技基础设施建设、全国性农业普查和土壤普查,发挥“星-机-地-网”新型传感数据获取与传统试验数据调查的协同作用,获取气候条件、土壤特性、作物参数、管理措施等农业大数据,并利用大数据管理、空间数据管理等技术手段,推进农业数据资源的整合。同时,以政府和科研机构为主导搭建农业信息共享云服务平台,突破数据建设部门的信息孤岛,促进数据生产的协同与应用服务共享,从而为作物模型算法优化、区域生产力模拟及多尺度应用等提供可靠的基础数据支撑。

### 3.2 提升模型预测能力

CropGrow 模型以生理发育时间为尺度,以天为步长预测作物的生长发育进程,可以模拟光温潜在、水分限制和养分限制等不同生产水平下的作物生长发育状况<sup>[33,94]</sup>。然而,影响作物生长发育的主要因子存在时空变异,因此需要深化作物生长模型与 GIS、RS 技术的耦合机制与方法,更好地实现区域粮食生产力的准确预测。同时,随着全球变暖,极端气候事件(如高低温、干旱、寡照等)的发生强度和频率不断增强<sup>[45,73-74,96]</sup>,探讨极端气候条件对作物生长发育与产量品质形成的生理机制,提高模型在极端气候环境下的模拟精度,是作物模型未来关注的重点之一。此外,随着劳动力日益紧张和农业机械化水平的提高,现代作物栽培管理模式也已经由传统的人工栽培转变为轻简化、机械化栽培,因而需要准确模拟不同生产管理模式下的作物生产力形成过程,以更好地适应现代农业的发展形势。

### 3.3 量化遗传基因效应

现代基因测序技术的飞速发展使得作物基因信息的快速获取变成现实,进而为量化作物生长模型中品种遗传参数与基因效应之间的关系奠定了良好基础,有望克服传统作物生长模型中品种遗传参数的机理性不足这一难题<sup>[97-98]</sup>。今后将系统量化作物重要功能基因对主要表型性状与产量品质形成的调控效应,研究创建基于功能基因生理效应和遗传规律的作物遗传参数估算新方法,进一步探索主要性状基因效应与环境效应之间的互作机制与定量方法,揭示不同基因型品种对生态环境及管理措施响应机制,有效提升作物

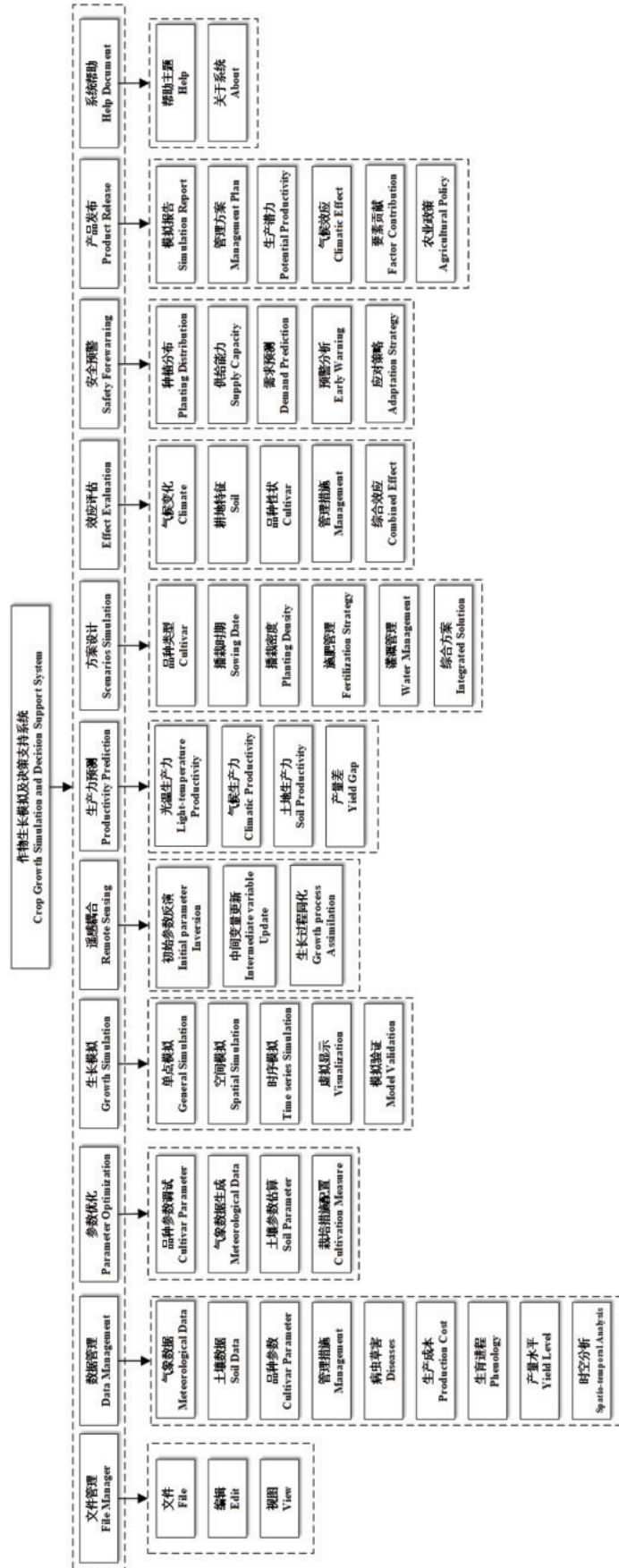


图 14 作物生长模拟及决策支持系统功能结构图  
Fig. 14 Function diagram of crop growth simulation and decision support system

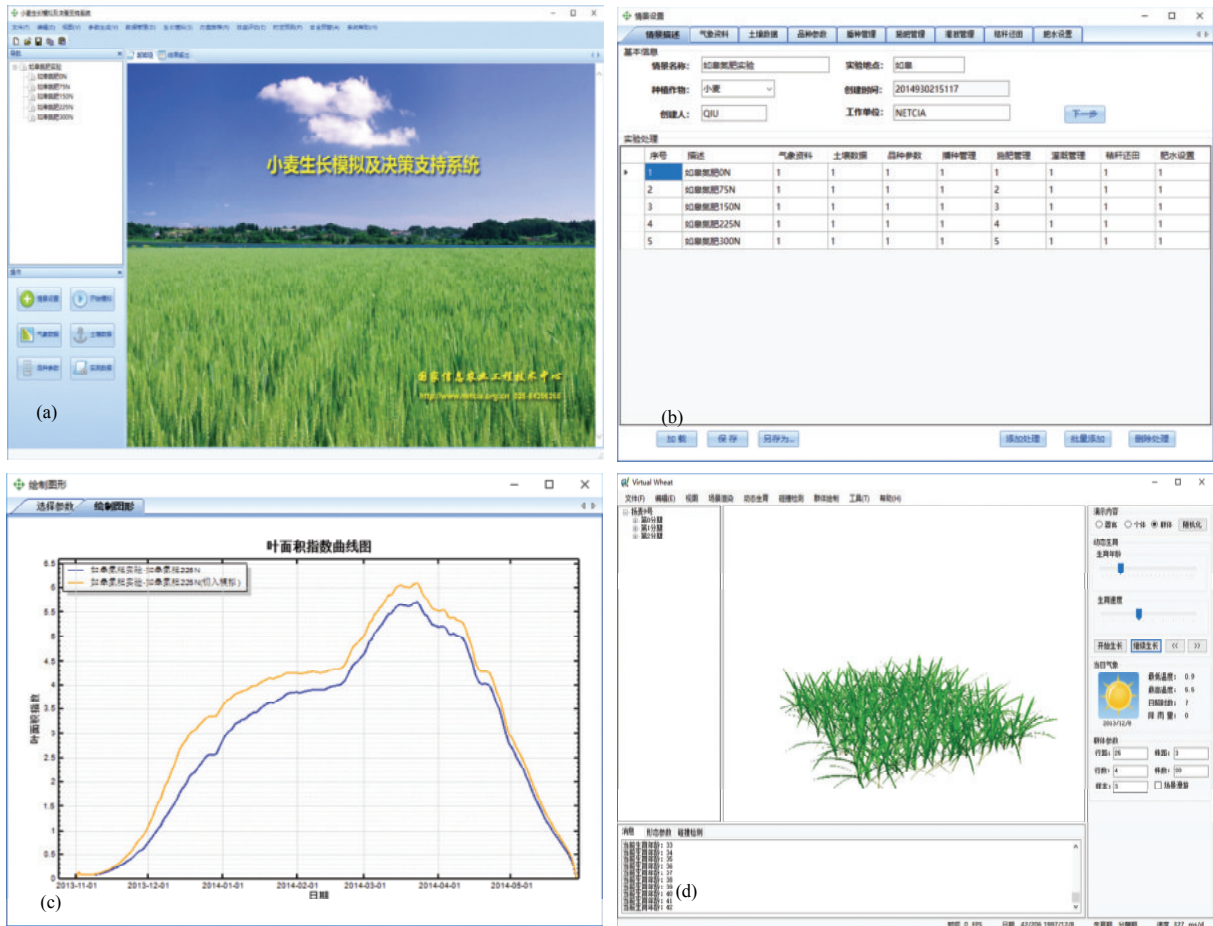


图 15 作物生长模拟与决策支持系统界面

Fig. 15 Interfaces of crop growth simulation and decision support system

生长模型对作物表型特征的预测潜能。通过构建以“基因效应-遗传参数-表型特征-生产力形成”为主线的一体化模拟模型，可以为作物表型特征高效预测与育种性状的快速选择等奠定数字化技术基础。例如，当前水稻分子设计育种研究已取得显著进展，通过耦合基因效应模型与作物三维可视化模型有望为水稻理想株型的分子育种设计提供技术支持。

### 3.4 拓展智能预测决策

作物生长模型的不断完善可进一步拓展决策支持功能。近年来，人工智能技术在农业领域得到快速发展与应用<sup>[99]</sup>，如能将作物生长模型的动态预测功能与人工智能决策的相关算法相结合，构建农业生产智慧管理决策系统，则可提高管理决策的智能化程度。例如，利用作物生长模型进行不同条件下的生育期与产量模拟，为基于卫星遥感影像和人工智能算法的产量预测提供训练数据，可提升区域作物生产力的预测与

决策能力<sup>[100]</sup>。模型参数估算方法也将逐步从手工试错法<sup>[33, 89]</sup>转向基于遗传算法、粒子群算法及蒙特卡罗等人工智能算法的自动估算法<sup>[55, 77, 101]</sup>，进而实现不同应用场景下作物生长模型参数的快速自动估算。另外，作物生长模型结合作物表型监测技术，可应用于高通量作物表型指标的动态模拟预测，为作物表型快速鉴定、作物株型优化设计等提供智能化工具。

### 3.5 耦合多种功能模型

全球气候变暖对未来世界粮食安全和农业可持续发展带来极大威胁，探讨作物生长模型与气候预测模型的耦合机制与方法，以更好地评估气候要素对粮食生产力的影响并制定相应的应对措施，成为当前的研究热点<sup>[23-24, 56]</sup>。同时，为了减少模型参数与模型结构对模拟结果带来的不确定性，将开发集多种生长模型于一体的作物模拟支持系统，采用多模型模拟结果的中值或均值<sup>[102]</sup>，以减少单一模型模拟结果的不确定

性。作物生长模拟系统还将耦合农业经济模型和农田生态模型, 既可实现粮食供需平衡的预测预警, 还能优化农业资源的高效利用。此外, 通过耦合作物生长虚拟技术, 模拟系统也将从传统桌面软件向三维仿真平台拓展, 用户可以直接置身于农田虚拟场景中, 通过改变环境因子及管理措施等输入条件开展情景模拟试验, 实时感知田间作物虚拟生长场景, 为用户带来直观性和沉浸式的模拟体验。

## References

- [1] 赵春江, 杨信廷, 李斌, 李明, 闫华. 中国农业信息技术发展回顾及展望. 农学报, 2018, 8(1): 172-178.
- ZHAO C J, YANG X T, LI B, LI M, YAN H. The retrospect and prospect of agricultural information technology in China. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1): 172-178. (in Chinese)
- [2] BOUMAN B A M, VAN KEULEN H, VAN LAAR H H, RABBINGE R. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*, 1996, 52: 171-198.
- [3] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- CAO W X, LUO W H. *Crop System Simulation and Intelligent Management*. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)
- [4] PENNING DE VRIES F W T, JANSEN D M, TEN BERGE H F M, BAKEMA A.. *Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops*. Wageningen: The Netherlands Pudoc, 1989.
- [5] DE WIT C F. Photosynthesis of leaf canopies. *Agricultural Research Reports 663*. Wageningen, The Netherlands Pudoc, 1965: 1-57.
- [6] DUNCAN W G, LOOMIS R S, WILLIAMS W A, HANAU R. A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, 1967, 38: 181-205.
- [7] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, BOOTE K J, BATCHELOR W D, HUNT L A, WILKENS P W, SINGH U, GIJSMAN A J, RITCHIE J T. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18: 235-265.
- [8] KEATING B A, CARBERRY P S, HAMMER G L, PROBERT M E, ROBERTSON M J, HOLZWORTH D, HUTH N I, HARGREAVES J N G, MEINKE H, HOCHMAN Z, MCLEAN G, VERBURG K, SNOW V, DIMES J P, SILBURN M, WANG E, BROWN S, BRISTOW K L, ASSENG S, CHAPMAN S, MCCOWN R L, FREEBAIRN D M, SMITH C J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18: 267-288.
- [9] BRISSON N, GARY C, JUSTES E, ROCHE R, MARY B, RIPOCHE D, ZIMMER D, SIERRA J, BERTUZZI P, BURGER P, BUSSIÈRE F, CABIDOCHÉ Y M, CELLIER P, DEBAEKE P, GAUDILLÈRE J P, HÉNAULT C, MARAUX F, SEGUIN B, SINOQUET H. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3/4): 309-332.
- [10] YIN X, VAN LAAR H H. *Crop Systems Dynamics: An Ecophysiological Simulation Model for Genotype-by-Environment Interactions*. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2005.
- [11] LI T, ANGELES O, MARCAIDA M, MANALO E, MANALILI M P, RADANIELSON A, MOHANTY S. From ORYZA2000 to ORYZA (v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 237/238: 246-256.
- [12] 高亮之, 金之庆, 黄耀, 张立中. 水稻计算机模拟模型及其应用之一 水稻钟模型——水稻发育动态的计算机模型. 中国农业气象, 1989, 10(3): 3-10.
- GAO L Z, JIN Z Q, HUANG Y, ZHANG L Z. Rice clock model—a computer simulation model of rice development. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1989, 10(3): 3-10. (in Chinese)
- [13] 黄策, 王天铎. 水稻群体物质生产过程的计算机模拟. 作物学报, 1986, 12(1): 1-8.
- HUANG C, WANG T D. Computer simulation of biomass production in rice community. *Acta Agronomica Sinica*, 1986, 12(1): 1-8. (in Chinese)
- [14] 高亮之, 金之庆, 黄耀, 陈华. 作物模拟与栽培优化原理的结合—RCSODS. 作物杂志, 1994(3): 4-7.
- GAO L Z, JIN Z Q, HUANG Y, CHEN H. Rice cultivation computer-simulated optimal decision-making system-RCSODS. *Crops*, 1994(3): 4-7. (in Chinese)
- [15] 殷新佑, 戚昌瀚. 水稻生长日历模拟模型及应用研究. 作物学报, 1994, 20(3): 339-346.
- YIN X Y, QI C H. Studies on the rice growth calendar simulation model (RICAM). *Acta Agronomica Sinica*, 1994, 20(3): 339-346. (in Chinese)
- [16] 贺东祥, 王天铎. 作物生长模型 PGROWTH 微气象模块的实验验证. 作物学报, 1995, 21(7): 419-423.
- HE D X, WANG T D. Experimental validation of micrometeorological subroutines of the PGROWTH model. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(7): 419-423. (in Chinese)
- [17] LIU B, LIU L L, ASSENG S, ZOU X D, LI J, CAO W X, ZHU Y. Modelling the effects of heat stress on post-heading durations in wheat: A comparison of temperature response routines. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 222: 45-58.

- [18] WANG J, WANG E L, YANG X G, ZHANG F S, YIN H. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation. *Climatic Change*, 2012, 113: 825-840.
- [19] YAO N, LI Y, XU F, LIU J, CHEN S, MA H J, CHAU H W, LIU D L, LI M, FENG H, YU Q, HE J Q. Permanent wilting point plays an important role in simulating winter wheat growth under water deficit conditions. *Agricultural Water Management*, 2020, 229: 105954.
- [20] TAO F, YOKOZAWA M, ZHANG Z. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new process-based model development, optimization, and uncertainties analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(5): 831-850.
- [21] 曹宏鑫, 杨余旺, 金之庆, 石春林, 葛道阔, 魏秀芳. 基于 Web 与模拟模型的水稻栽培数字化设计. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 137-140.  
CAO H X, YANG Y W, JIN Z Q, SHI C L, GE D K, WEI X F. Digital design of rice cultivation based on Web and simulation model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(12): 137-140. (in Chinese)
- [22] ROSENZWEIG C, JONES J W, HATFIELD J L, RUANE A C, BOOTE K J, THORBURN P, ANTLE J M, NELSON G C, PORTER C, JANSSEN S, ASSENG S, BASSO B, EWERT F, WALLACH D, BAIGORRIA G, WINTER J M. The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): Protocols and pilot studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 170: 166-182.
- [23] ASSENG S, EWERT F, MARTRE P, RÖTTER R P, LOBELL D B, CAMMARANO D, KIMBALL B A, OTTMAN M J, WALL G W, WHITE J W, REYNOLDS M P, ALDERMAN P D, PRASAD P V V, AGGARWAL P K, ANOTHAI J, BASSO B, BIERNATH C, CHALLINOR A J, DE SANCTIS G, DOLTRA J, FERERES E, GARCIA-VILA M, GAYLER S, HOOGENBOOM G, HUNT L A, IZAURRALDE R C, JABLOUN M, JONES C D, KERSEBAUM K C, KOEHLER A-K, MÜLLER C, KUMAR S N, NENDEL C, O'LEARY G, OLESEN J E, PALOSUO T, PRIESACK E, REZAEI E E, RUANE A C, SEMENOV M A, SHCHERBAK I, STÖCKLE C, STRATONOVITCH P, STRECK T, SUPIT I, TAO F, THORBURN P J, WAHA K, WANG E, WALLACH D, WOLF J, ZHAO Z, ZHU Y. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 2015, 5(2): 143-147.
- [24] MATIU M, ANKERST D P, MENZEL A. Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961-2014. *PLoS ONE*, 2017, 12(5): e0178339.
- [25] ZHANG X H, XU H, JIANG L, ZHAO J Q, ZUO W J, QIU X L, TIAN Y C, CAO W X, ZHU Y. Selection of appropriate spatial resolution for the meteorological data for regional winter wheat potential productivity simulation in China based on WheatGrow model. *Agronomy*, 2018, 8(10): 198.
- [26] ZHAO G, SIEBERT S, ENDERS A, REZAEI E E, YAN C Q, EWERT F. Demand for multi-scale weather data for regional crop modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200: 156-171.
- [27] XIAO D P, TAO F L. Contributions of cultivars, management and climate change to winter wheat yield in the North China Plain in the past three decades. *European Journal of Agronomy*, 2014, 52: 112-122.
- [28] LIU L L, WANG E L, ZHU Y, TANG L, CAO W X. Effects of warming and autonomous breeding on the phenological development and grain yield of double-rice systems in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 165: 28-38.
- [29] FOLBERTH C, SKALSKY R, MOLTCHANOVA E, BALKOVIC J, AZEVEDO L B, OBERSTEINER M, VAN DER VELDE M. Uncertainty in soil data can outweigh climate impact signals in global crop yield simulations. *Nature Communications*, 2016, 7: 11872.
- [30] CAO W X, MOSS D N. Modelling phasic development in wheat: A conceptual integration of physiological components. *The Journal of Agricultural Science*, 1997, 129: 163-172.
- [31] CAO W X, MOSS D N. Vernalization and phyllochron in winter wheat. *Agronomy Journal*, 1991, 83: 178-179.
- [32] 严美春, 曹卫星, 罗卫红, 李存东. 小麦茎顶端原基发育模拟模型的研究. *作物学报*, 2001, 27(3): 356-362.  
YAN M C, CAO W X, LUO W H, LI C D. A simulation model of shoot apex primordium development in wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(3): 356-362. (in Chinese)
- [33] TANG L, ZHU Y, HANNAWAY D, MENG Y L, LIU L L, CHEN L, CAO W X. RiceGrow: A rice growth and productivity model. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 2009, 57: 83-92.
- [34] CAO W X, LIU T M, LUO W H, WANG S H, PAN J, GUO W S. Simulating organ growth in wheat based on the organ-weight fraction concept. *Plant Production Science*, 2002, 5(3): 248-256.
- [35] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 潘洁, 严美春. 小麦茎蘖动态模拟模型的研究. *华中农业大学学报*. 2001, 20(5): 416-421.  
LIU T M, CAO W X, LUO W H, PAN J, YAN M C. Simulation on wheat tillering dynamic. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2001, 20(5): 416-421. (in Chinese)
- [36] PAN J, ZHU Y, JIANG D, DAI T B, LI Y X, CAO W X. Modeling plant nitrogen uptake and grain nitrogen accumulation in wheat. *Field*

- Crops Research*, 2006, 97(2): 322-336.
- [37] 陈洁, 汤亮, 刘小军, 曹卫星, 朱艳. 水稻植株氮素吸收与籽粒蛋白积累模型. 中国农业科学, 2011, 44(10): 1997-2004.  
CHEN J, TANG L, LIU X J, CAO W X, ZHU Y. Modeling plant nitrogen uptake and grain protein accumulation in rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(10): 1997-2004. (in Chinese)
- [38] PAN J, ZHU Y, CAO W X. Modeling plant carbon flow and grain starch accumulation in wheat. *Field Crops Research*, 2007, 101(3): 276-284.
- [39] 陈洁, 汤亮, 刘小军, 曹卫星, 朱艳. 基于植株碳流的水稻籽粒淀粉积累模拟模型. 植物生态学报, 2011, 35(4): 431-440.  
CHEN J, TANG L, LIU X J, CAO W X, ZHU Y. Modeling rice grain starch accumulation based on plant carbon flow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(4): 431-440. (in Chinese)
- [40] SHI P H, TANG L, LIN C B, LIU L L, WANG H H, CAO W X, ZHU Y. Modeling the effects of post-anthesis heat stress on rice phenology. *Field Crops Research*, 2015, 177: 26-36.
- [41] SHI P H, ZHU Y, TANG L, CHEN J L, SUN T, CAO W X, TIAN Y C. Differential effects of temperature and duration of heat stress during anthesis and grain filling stages in rice. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 132: 28-41.
- [42] LIU B, ASSENG S, WANG A N, WANG S H, TANG L, CAO W X, ZHU Y, LIU L L. Modelling the effects of post-heading heat stress on biomass growth of winter wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 476-490.
- [43] JI H T, XIAO L J, XIA Y M, SONG H, LIU B, TANG L, CAO W X, ZHU Y, LIU L L. Effects of jointing and booting low temperature stresses on grain yield and yield components in wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 243: 33-42.
- [44] SUN T, HASEGAWA T, TANG L, WANG W, ZHOU J J, LIU L L, LIU B, CAO W X, ZHU Y. Stage-dependent temperature sensitivity function predicts seed-setting rates under short-term extreme heat stress in rice. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256: 196-206.
- [45] 肖浏骏. 拔节孕穗期低温胁迫对冬小麦生长发育及产量形成影响的模拟研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.  
XIAO L J. Modelling the effects of low temperature stress at elongation and booting stage on growth and yield formation in wheat [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [46] CAO W X, MOSS D N. Temperature and daylength interaction on phyllochron in wheat and barley. *Crop Science*, 1989, 29: 1046-1048.
- [47] CAO W X, MOSS D N. Temperature effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Science*, 1989, 29: 1018-1021.
- [48] CAO W X, MOSS D N. Daylength effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Science*, 1989, 29: 1021-1025.
- [49] 庄恒扬. 作物-土壤系统氮磷钾养分的动态模拟与管理决策[D]. 南京: 南京农业大学, 2001.  
ZHUANG H Y. Study on dynamic simulation and decision support on nitrogen, phosphorus, potassium in crop-soil system[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- [50] ATA-UI-KARIM S T, YAO X, LIU X J, CAO W X, ZHU Y. Development of critical nitrogen dilution curve of japonica rice in Yangtze River Reaches. *Field Crops Research*, 2013, 149: 149-158.
- [51] YAO X, ZHAO B, TIAN Y C, LIU X J, NI J, CAO W X, ZHU Y. Using leaf dry matter to quantify the critical nitrogen dilution curve for winter wheat cultivated in eastern China. *Field Crops Research*, 2014, 159: 33-42.
- [52] TANG L, CHANG R J, BASSO B, LI T, ZHEN F X, LIU L L, CAO W X, ZHU Y. Improving the estimation and partitioning of plant nitrogen in the RiceGrow model. *The Journal of Agricultural Science*, 2018, 156: 959-970.
- [53] HU J C, CAO W X, ZHANG J B, JIANG D, FENG J. Quantifying responses of winter wheat physiological processes to soil water stress for use in growth simulation modeling. *Pedosphere*, 2004, 14: 509-518.
- [54] LIU B, ASSENG S, LIU L L, TANG L, CAO W X, ZHU Y. Testing the responses of four wheat crop models to heat stress at anthesis and grain filling. *Global Change Biology*, 2016, 22: 1890-1903.
- [55] LIU L L, WALLACH D, LI J, LIU B, ZHANG L X, TANG L, ZHANG Y, QIU X L, CAO W X, ZHU Y. Uncertainty in wheat phenology simulation induced by cultivar parameterization under climate warming. *European Journal of Agronomy*, 2018, 94: 46-53.
- [56] LIU B, MARTRE P, EWERT F, PORTER J R, CHALLINOR A J, MUELLER C, RUANE A C, WAHA K, THORBURN P J, AGGARWAL P K, AHMED M, BALKOVIC J, BASSO B, BIERNATH C, BINDI M, CAMMARANO D, DE SANCTIS G, DUMONT B, ESPADAFOR M, REZAEI E E, FERRISE R, GARCIA-VILA M, GAYLER S, GAO Y J, HORAN H, HOOGENBOOM G, IZAURRALDE R C, JONES C D, KASSIE B T, KERSEBAUM K C, KLEIN C, KOEHLER A K, MAIORANO A, MINOLI S, SAN MARTIN M M, KUMAR S N, NENDEL C, O'LEARY G J, PALOSUO T, PRIESACK E, RIPOCHE D, ROTTER R P, SEMENOV M A, STOCKLE C, STRECK T, SUPIT I, TAO F L, VAN DER VELDE M, WALLACH D, WANG E L, WEBBER H, WOLF J, XIAO L J, ZHANG Z, ZHAO Z G, ZHU Y, ASSENG S. Global wheat production with 1.5 and 2.0°C above pre-industrial warming. *Global Change Biology*, 2019, 25(4):

- 1428-1444.
- [57] 徐其军, 汤亮, 顾东祥, 姜海燕, 曹卫星, 朱艳. 基于形态参数的水稻根系三维建模及可视化. 农业工程学报, 2010, 26(10): 188-194.
- XU Q J, TANG L, GU D X, JIANG H Y, CAO W X, ZHU Y. Architectural parameter-based three dimensional modeling and visualization of rice roots. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10): 188-194. (in Chinese)
- [58] 谈峰, 汤亮, 胡军成, 姜海燕, 曹卫星, 朱艳. 小麦根系三维形态建模及可视化. 应用生态学报, 2011, 22(1): 137-143.
- TAN F, TANG L, HU J C, JIANG H Y, CAO W X, ZHU Y. Three-dimensional morphological modeling and visualization of wheat root system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 137-143. (in Chinese)
- [59] 张文宇, 汤亮, 朱相成, 杨月, 曹卫星, 朱艳. 基于过程的小麦茎鞘夹角动态模拟. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1765-1770.
- ZHANG W Y, TANG L, ZHU X C, YANG Y, CAO W X, ZHU Y. Dynamic simulation of wheat stem sheath angle based on process. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1765-1770. (in Chinese)
- [60] 张永会, 汤亮, 刘小军, 曹卫星, 朱艳. 不同品种和氮素条件下水稻茎鞘夹角动态模拟. 中国农业科学, 2012, 45(21): 4361-4368.
- ZHANG Y H, TANG L, LIU X J, CAO W X, ZHU Y. Dynamic simulation of stem and sheath in rice under different varieties and nitrogen conditions. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(21): 4361-4368. (in Chinese)
- [61] ZHU Y, CHANG L Y, TANG L, JIANG H, ZHANG W Y, CAO W X. Modelling leaf shape dynamics in rice. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 2009, 57(1): 73-81.
- [62] 常丽英, 张文宇, 张玉屏, 顾东祥, 姚鑫锋, 朱艳, 曹卫星. 水稻叶色变化动态的模拟模型研究. 作物学报, 2007, 33(7): 1108-1115.
- CHANG L Y, ZHANG W Y, ZHANG Y P, GU D X, YAO X F, ZHU Y, CAO W X. A simulation model on leaf color dynamic changes in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(7): 1108-1115. (in Chinese)
- [63] ZHANG Y H, TANG L, LIU X J, LIU L L, CAO W X, ZHU Y. Modeling curve dynamics and spatial geometry characteristics of rice leaves. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(10): 2177-2190.
- [64] ZHANG Y H, TANG L, LIU X J, LIU L L, CAO W X, ZHU Y. Modeling the leaf angle dynamics in rice plant. *PLoS ONE*, 2017, 12(2): e0171890.
- [65] 雷晓俊, 汤亮, 张永会, 姜海燕, 曹卫星, 朱艳. 小麦麦穗几何模型构建与可视化. 农业工程学报, 2011, 27(3): 179-184.
- LEI X J, TANG L, ZHANG Y H, JIANG H Y, CAO W X, ZHU Y. Geometric model and visualization of wheat spike. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(3): 179-184. (in Chinese)
- [66] ZHANG Y H, TANG L, LIU X J, LIU L L, CAO W X, ZHU Y. Modeling morphological dynamics and color characteristics of rice panicle. *European Journal of Agronomy*, 2014, 52: 279-290.
- [67] 伍艳莲, 曹卫星, 汤亮, 朱艳, 刘慧. 基于 OpenGL 的小麦形态可视化技术. 农业工程学报, 2009, 25(1): 121-126.
- WU Y L, CAO W X, TANG L, ZHU Y, LIU H. Open GL-based visual technology for wheat morphology. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(1): 121-126. (in Chinese)
- [68] TANG L, SONG W G, HOU T C, LIU L L, CAO W X, ZHU Y. Collision detection of virtual plant based on bounding volume hierarchy: A case study on virtual wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(2): 306-314.
- [69] 汤亮, 雷晓俊, 刘小军, 孙传范, 曹卫星, 朱艳. 小麦群体生长状态实时绘制技术及实现. 农业工程学报, 2011, 27(9): 128-135.
- TANG L, LEI X J, LIU X J, SUN C F, CAO W X, ZHU Y. Real-time rendering of wheat population growth status and its realization. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9): 128-135. (in Chinese)
- [70] 刘慧, 汤亮, 张文宇, 伍艳莲, 曹卫星, 朱艳. 基于模型的可视化水稻生长系统的构建与实现. 农业工程学报, 2009, 25(9): 148-154.
- LIU H, TANG L, ZHANG W Y, WU Y L, CAO W X, ZHU Y. Construction and implementation of model-based visual rice growth system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(9): 148-154. (in Chinese)
- [71] LIU L L, ZHU Y, LIU X J, CAO W X, XU M, WANG X K, WANG E L. Spatiotemporal changes in soil nutrients: A case study in Taihu region of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1): 187-194.
- [72] LV Z F, LIU X J, TANG L, LIU L L, CAO W X, ZHU Y. Estimation of ecotype-specific cultivar parameters in a wheat phenology model and uncertainty analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 221: 219-229.
- [73] SHI P H, TANG L, WANG L H, SUN T, LIU L L, CAO W X, ZHU Y. Post-heading heat stress in rice of south China during 1981-2010. *PLoS ONE*, 2015, 10(6): e0130642.
- [74] LIU B, LIU L L, TIAN L Y, CAO W X, ZHU Y, ASSENG S. Post-heading heat stress and yield impact in winter wheat of China. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 372-381.
- [75] 姜晓剑, 汤亮, 刘小军, 黄芬, 曹卫星, 朱艳. 中国主要稻作区水稻生产气候资源的时空特征. 农业工程学报, 2011, 27(7): 238-245.

- JIANG X J, TANG L, LIU X J, HUANG F, CAO W X, ZHU Y. Spatial and temporal characteristics of rice production climatic resources in main growing regions of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(7): 238-245. (in Chinese)
- [76] 石晓燕, 汤亮, 刘小军, 曹卫星, 朱艳. 基于模型和 GIS 的小麦空间生产力预测研究. *中国农业科学*, 2009, 42(11): 3828-3835.
- SHI X Y, TANG L, LIU X J, CAO W X, ZHU Y. Predicting spatial productivity in wheat based on model and GIS. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(11): 3828-3835. (in Chinese)
- [77] LV Z F, LIU X J, CAO W X, ZHU Y. Climate change impacts on regional winter wheat production in main wheat production regions of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171/172: 234-248.
- [78] LV Z F, LIU X J, CAO W X, ZHU Y. A model-based estimate of regional wheat yield gaps and water use efficiency in main winter wheat production regions of China. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6081.
- [79] LIU L L, WANG E L, ZHU Y, TANG L. Contrasting effects of warming and autonomous breeding on single-rice productivity in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 149: 20-29.
- [80] 吕尊富, 刘小军, 汤亮, 刘蕾蕾, 曹卫星, 朱艳. 区域气候模型数据修订方法及其在作物模拟中的应用. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3334-3343.
- LÜ Z F, LIU X J, TANG L, LIU L L, CAO W X, ZHU Y. A method for correcting the meteorological data from regional climate model and its application in crop simulation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3334-3343. (in Chinese)
- [81] LIU B, ASSENG S, MUELLER C, EWERT F, ELLIOTT J, LOBELL D B, MARTRE P, RUANE A C, WALLACH D, JONES J, ROSENZWEIG C, AGGARWAL P K, ALDERMAN P D, ANOTHAI J, BASSO B, BIERNATH C, CAMMARANO D, CHALLINOR A, DERYNG D, DE SANCTIS G, DOLTRA J, FERERES E, FOLBERTH C, GARCIA-VILA M, GAYLER S, HOOGENBOOM G, HUNT L A, IZAURRALDE R C, JABLOUN M, JONES C D, KERSEBAUM K C, KIMBALL B A, KOEHLER A K, KUMAR S N, NENDEL C, O'LEARY G J, OLESEN J E, OTTMAN M J, PALOSUO T, PRASAD P V V, PRIESACK E, PUGH T A M, REYNOLDS M, REZAEI E E, ROTTER R P, SCHMID E, SEMENOV M A, SHCHERBAK I, STEHFEST E, STOCKLE C O, STRATONOVITCH P, STRECK T, SUPIT I, TAO F L, THORBURN P, WAHA K, WALL G W, WANG E L, WHITE J W, WOLF J, ZHAO Z G, ZHU Y. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods. *Nature Climate Change*, 2016, 6(12): 1130-1136.
- [82] JIN X L, KUMAR L, LI Z H, FENG H K, XU X G, YANG G J, WANG J H. A review of data assimilation of remote sensing and crop models. *European Journal of Agronomy*, 2018, 92: 141-152.
- [83] HUANG Y, ZHU Y, LI W L, CAO W X, TIAN Y C. Assimilating remotely sensed information with the WheatGrow model based on the ensemble square root filter for improving regional wheat yield forecasts. *Plant Production Science*, 2013, 16(4): 352-364.
- [84] WANG H, ZHU Y, LI W L, CAO W X, TIAN Y C. Integrating remotely sensed leaf area index and leaf nitrogen accumulation with RiceGrow model based on particle swarm optimization algorithm for rice grain yield assessment. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 83674.
- [85] GUO C L, TANG Y N, LU J, ZHU Y, CAO W X, CHENG T, ZHANG L, TIAN Y C. Predicting wheat productivity: Integrating time series of vegetation indices into crop modeling via sequential assimilation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 272: 69-80.
- [86] ZHANG L, GUO C L, ZHAO L Y, ZHU Y, CAO W X, TIAN Y C, CHENG T, WANG X. Estimating wheat yield by integrating the WheatGrow and PROSAIL models. *Field Crops Research*, 2016, 192: 55-66.
- [87] 刘一江. 中国水稻主产区层次产量差、组分贡献率及增温效应的模拟研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- LIU Y J. Model-based estimates of yield gaps, component contributions and effects of warming across the main rice-growing regions of China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [88] 戴进强. 基于模型的中国水稻生产力供需平衡与安全保障研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- DAI J Q. Research on the balance and security of Chinese rice productivity based on model[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [89] LIU L L, ZHU Y, TANG L, CAO W X, WANG E. Impacts of climate changes, soil nutrients, variety types and management practices on rice yield in East China: A case study in the Taihu region. *Field Crops Research*, 2013, 149: 40-48.
- [90] 王莉欢. 基于作物生长模型的水稻适宜播期模拟研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- WANG L H. Determining optimum sowing date of rice using multiple crop models[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [91] ZHANG W Y, TANG L, YANG X, LIU L L, CAO W X, ZHU Y. A simulation model for predicting canopy structure and light distribution in wheat. *European Journal of Agronomy*, 2015, 67: 1-11.

- [92] LIU Y J, TANG L, QIU X L, LIU B, CHANG X N, LIU L L, ZHANG X H, CAO W X, ZHU Y. Impacts of 1.5 and 2.0°C global warming on rice production across China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 284: 107900.
- [93] 姜海燕, 茅金辉, 胥晓明, 傅兵, 曹卫星, 朱艳. 基于面向服务架构和 WebGIS 的小麦生产管理支持系统. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 159-166.
- JIANG H Y, MAO J H, XU X M, FU B, CAO W X, ZHU Y. Support system for wheat production management based on service-oriented architecture and Web GIS. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 159-166. (in Chinese)
- [94] 曹卫星, 潘洁, 朱艳, 刘晓军. 基于生长模型与 WEB 应用的小麦管理决策支持系统. *农业工程学报*, 2007, 23(1): 133-138.
- CAO W X, PAN J, ZHU Y, LIU X J. Growth model and Web application-based decision support system for wheat management. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(1): 133-138. (in Chinese)
- [95] GRASSINI P, VAN BUSSEL L G J, VAN WART J, WOLF J, CLAESSENS L, YANG H S, BOOGAARD H, DE GROOT H, VAN ITTERSUM M K, CASSMAN K G. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*, 2015, 177: 49-63.
- [96] WANG H S, VICENTE-SERRANO S M, TAO F L, ZHANG X D, WANG P X, ZHANG C, CHEN Y Y, ZHU D H, KENAWY A. Monitoring winter wheat drought threat in Northern China using multiple climate-based drought indices and soil moisture during 2000-2013. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 228: 1-12.
- [97] WANG E L, BROWN H E, REBETZKE G J, ZHAO Z G, ZHENG B Y, CHAPMAN S C. Improving process-based crop models to better capture genotype×environment×management interactions. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(9): 2389-2401.
- [98] YIN X Y, VAN DER LINDEN C G, STRUIK P C. Bringing genetics and biochemistry to crop modelling, and vice versa. *European Journal of Agronomy*, 2018, 100: 132-140.
- [99] FENG P Y, WANG B, LIU L D, WATERS C, YU Q. Incorporating machine learning with biophysical model can improve the evaluation of climate extremes impacts on wheat yield in south-eastern Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 275: 100-113.
- [100] JIN Z N, AZZARI G, YOU C, DI TOMMASO S, ASTON S, BURKE M, LOBELL D B. Smallholder maize area and yield mapping at national scales with Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 228: 115-128.
- [101] 庄嘉祥, 姜海燕, 刘蕾蕾, 王芳芳, 汤亮, 朱艳, 曹卫星. 基于个体优势遗传算法的水稻物候期模型参数优化. *中国农业科学*, 2013, 46(11): 2220-2231.
- ZHUANG J X, JIANG H Y, LIU L L, WANG F F, TANG L, ZHU Y, CAO W X. Parameters optimization of rice development stages model based on individual advantages genetic algorithm. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(11): 2220-2231. (in Chinese)
- [102] MAIORANO A, MARTRE P, ASSENG S, EWERT F, MULLER C, ROTTER R P, RUANE A C, SEMENOV M A, WALLACH D, WANG E L, ALDERMAN P D, KASSIE B T, BIERNATH C, BASSO B, CAMMARAN D, CHALLINOR A J, DOLTRA J, DUMONT B, REZAEI E E, GAYLER S, KERSEBAUM K C, KIMBALL B A, KOEHLER A K, LIU B, O'LEARY G J, OLESEN J E, OTTMAN M J, PRIESACK E, REYNOLDS M, STRATONOVITCH P, STRECK T, THORBURN P J, WAHA K, WALL G W, WHITE J W, ZHAO Z G, ZHU Y. Crop model improvement reduces the uncertainty of the response to temperature of multi-model ensembles. *Field Crops Research*, 2016, 202: 5-10.

(责任编辑 杨鑫浩)