

南京農業大學

CropGrow 模型原理、算法与应用案例



国家信息农业工程技术中心

目录

一、 作物生长模型基本原理	1
1. 作物生长模型的概念	1
2. 作物生长模型的特征	2
3. 作物生长模型的作用	2
4. 作物生长模型的构建方法	3
5. 模型构建的主要步骤	5
5.1 模型选择与系统定义.....	5
5.2 资料获取与算法构建.....	5
5.3 模块设计与模型实现.....	6
5.4 模型检验与改进.....	6
6. 影响因子的定量表达	7
二、 CropGrow 模型算法.....	9
1. 阶段发育与物候期模型	12
1.1 热效应模拟.....	12
1.2 每天热敏感性模拟.....	13
1.3 春化效应模拟.....	13
1.4 光周期效应模拟.....	15
2. 形态发生与器官建成模型	17
2.1 顶端原基的分化.....	17
2.1.1 叶原基分化.....	17
2.1.2 小穗原基分化.....	18
2.1.3 小花原基分化.....	18
2.2 叶片的出现与叶面积.....	19
2.2.1 叶片的出现.....	19
2.2.2 叶片的扩展与单茎叶面积.....	19
2.2.3 群体叶面积指数.....	20

2.2.3.1 比叶面积的模拟.....	20
2.2.3.2 叶面积指数的模拟.....	21
2.3 分蘖动态与成穗.....	22
2.3.1 分蘖动态.....	22
2.3.2 分蘖的成穗.....	23
2.4 根系与茎秆的生长.....	24
2.4.1 根系生长.....	24
2.4.2 茎的生长.....	24
3. 光合生产与物质积累模型	25
3.1 光能分布和截获.....	25
3.1.1 大气上界的光合有效辐射.....	25
3.1.2 冠层顶部的光合有效辐射.....	25
3.1.3 冠层内光的分布与吸收.....	25
3.2 叶片和冠层光合作用.....	26
3.2.1 单叶光合作用.....	26
3.2.2 冠层光合作用.....	27
3.3 环境因子对光合作用的影响.....	28
3.3.1 温度.....	29
3.3.2 CO ₂ 浓度.....	30
3.3.3 水分.....	30
3.3.4 氮素.....	31
3.3.5 生理年龄.....	31
3.4 呼吸作用.....	31
3.4.1 维持呼吸.....	31
3.4.2 生长呼吸.....	32
3.4.3 光呼吸.....	32
3.5 同化物积累与生物量.....	32
3.5.1 群体净同化量.....	32
3.5.2 群体干物质积累.....	32

4. 同化物分配与产量品质形成模型	33
4.1 干物质在地上与地下部分的分配	33
4.2 干物质在地上部各器官间的分配	34
4.3 影响干物质分配的因子	35
4.4 产量形成的模拟	36
三、CropGrow 模型应用	37
1. 模型升尺度与区域预测	37
2. 模型与遥感耦合	38
3. 生产力预测与因子贡献率评价	39
4. 数字化设计与决策支持	41
5. 生长模拟与决策支持平台	43

一、作物生长模型基本原理

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，从而能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。作物生长模拟研究自 20 世纪 60 年代由荷兰的 De Wit 和美国的 Duncan 开创以来，随着系统科学和计算机技术的渗透及作物学知识的积累，发展十分迅速，经历了从定性的概念模型到定量的模拟模型、从单一的生理生态过程模拟到完整的作物生长与产量形成的综合性模拟模型，并逐步协调了模型的机理性、系统性与通用性之间的矛盾，使作物生长模拟从萌芽逐步走向成熟。进入 90 年代以来，作物生长模型开始与其他农业信息技术如 3S 技术、决策支持技术及网络技术相互耦合，在现代农业研究与应用领域中日益发挥重要的作用，呈现出广阔的发展前景。

1. 作物生长模型的概念

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。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，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量化工具，实现高产、优质、高效的作物生产目标。

作物生长模拟是利用系统分析方法和计算机模拟技术，综合作物生理学、生态学、气象学、土壤学和农学等学科的研究成果，对作物生长发育过程及其与环境和管理技术的动态关系进行定量描述和预测。其中作物生理生态知识是建立模型的关键，系统分析方法是模拟研究的基础，而计算机技术则是模型实现不可缺少的辅助工具。作物生长模拟研究的核心是对整个作物生长和生产系统进行知识

综合，并对作物生理生态过程进行量化表达。

作物生长模型把作物生长过程的各种生理生态机制概括为数学表达式，把其中非结构性问题表达为知识规则或逻辑关系，通过程序设计形成综合的计算机仿真系统。作物生长模型具有较强的机理性、系统性和通用性，作物生长模型的成功开发和应用促进了对作物生长发育规律由定性描述向定量分析的转化过程，为作物生产决策支持系统的开发与应用奠定了量化基础，特别是为数字农业和精确农业的研究提供了科学的智能化工具。

2. 作物生长模型的特征

作物生长模型是对作物生长和发育过程的基本规律及其与环境关系的量化表达，具有基础性和一般性的意义。较理想的作物生长模型应具有以下八个特征，其中，动态性和预测性是作物生长模型最显著和最重要的特征。

- (1) 系统性：对作物生育过程进行系统的、全面的分析与描述。
- (2) 动态性：包括受环境因子和品种特性驱动的生育过程变化及过程间的动态关系。
- (3) 机理性：模拟较为深入的系统水平，能够提供对主要生理过程的理解或解释。
- (4) 预测性：通过建立动态模型，对不同条件下的系统行为提供可靠的定量描述。
- (5) 通用性：原则上适用于任何地点、时间和品种。
- (6) 使用性：可为非专家操作应用，可利用一般的气候、土壤及作物资料。
- (7) 灵活性：可容易地进行修改和扩充以及与其他系统相耦合。
- (8) 研究性：可用于相关领域的模拟研究，作为实验研究的探索、补充、拓展。

3. 作物生长模型的作用

(1) 模型的意义

作物生长模型最重要的意义是对整个作物生育系统的知识进行综合，并量化生理生态过程及其相互关系，即综合知识和量化关系。作物生长模型是利用计算机强大的信息处理和计算功能，对不同生育过程进行系统分析和合成，其实质上相当于所研究系统的最新知识的积累和综合。在这种知识合成的过程中，还能鉴

定知识空缺，从而明确新的研究方向。同时，作物生长模拟研究在理解作物生理生态过程及其变量间关系的基础上，量化分析和数理模拟，从而促进了对作物生育规律由定性描述向定量分析的转化过程，深化了对作物生育过程的定量认识。

（2）模型的功能

成功的作物生长模型之所以受到作物科学家的肯定和重视，是因为模拟模型具有其他研究手段不可替代的功能：理解、预测、调控。作物生长模型能够帮助人们理解和认识作物生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最后产量进行预测，从而辅助作物生长和生产系统的适时合理调控，实现高产、优质、高效和持续发展的目标。

（3）模型的应用

作物生长模型的主要应用有四个方面，即教学、研究、管理、评估。较理想的作物生长模型，不仅具有良好的机理性和预测性，并且以其较强的通用性和灵活性而适用于不同的生态地区和各种层次的用户。

1) 应用作物生长模型开展作物学的辅助教学和科技推广活动，提供有关作物生物学过程及其与环境和技术关系的直观动态教学及科普工具。

2) 利用作物生长模型在计算机上进行假设测验和模拟试验，研究生理生态过程的响应模式、栽培管理的技术途径及品种改良的目标性状等，已成为作物学科一种有效的研究手段。这样可以成功地避免实验研究中干扰因素多、周期长、费用高等不足。

4. 作物生长模型的构建方法

（1）作物生长模型的结构

任何一个模拟模型均可以根据其自身的特性分解成相互关联的结构成分。例如整个作物生育及其环境系统一般可分解成六个相互关联的亚系统。

第一亚系统为作物的阶段发育与物候期，主要是有关以温光反应为基础的茎顶端发育阶段以及以外部形态特征变化为标志的生育时期，如小麦的小穗分化期、小花分化期等，以及分蘖期、拔节期、抽穗期等。

第二亚系统为作物植株的形态发生与器官建成过程，包括根系、叶片、茎秆、小穗、小花、籽粒等器官发生与形成的规律、数量与质量等。

第三亚系统为植株的光能利用与同化物生产，包括叶片和冠层的光合作用、

呼吸作用、碳水化合物积累及生物量的计算等。

第四亚系统为不同器官间的物质分配与利用,包括同化物分配系数或分配指数和分配量的实时变化、器官的生长和大小、产量和品质的决定等。

第五亚系统为土壤—植物—大气水分关系,包括土壤水分的移动、吸收、蒸发蒸腾、植物组织的水分平衡等。

第六亚系统为土壤养分(氮素)动态与植株利用,包括主要养分元素在土壤中的转化、根系吸收、体内分配和利用等。

以上第一至第四亚系统为作物生长模型的基础成分,且不同作物的生长发育过程有很大的区别,其中温光条件为贯穿于各亚系统的主导因子,直接作用于不同的生理过程,作物基因型差异则是系统运行的内在动力。因此,第一至第四亚系统的研究被认为是作物生长模拟研究的重点。第五和第六亚系统受气候和土壤环境因子影响较大,且通过土壤与根系过程间接地作用于作物的生育过程,同时在很大程度上受到技术措施的调控,故需作为并行的亚系统单独进行模拟。对水分和养分调控系统的模拟,特别需要作物科学家与土壤及气象科学家的密切合作。另外此类生态模型,对于不同的作物具有一定的共性,一般经适当修改参数调整后适用于不同类型作物。

以上各结构成分通过物质和信息的交流联成一个作物生长的动态平衡系统,禾谷类作物生长模型的结构框架。因此,作物生长模拟研究中最主要的工作就是对特定作物的生长发育过程及其与环境和技术动态关系进行系统分析和定量描述,从而预测作物的阶段发育、形态发生、物质积累、分配与产量形成等。

(2) 输入输出资料

模型的输入资料以尽量少为原则,既可容易获得,又可简化模拟运算。例如,作物生长模型的输入资料,总体上可分为气象、土壤、品种、管理四大类。其中气象资料一般要求逐日资料,主要包括日最高气温、日最低气温、日照时数或日辐射量、日降水量等,有些机理性模型还要求风速和相对湿度等气象资料。土壤资料指土壤的基本理化特性及不同深度土层的养分含量等,一般包括耕层厚度、物理性粘粒含量、容重、凋萎系数、田间持水量、饱和含水量以及作物生长季开始时不同深度土层水分和养分状况,包括土壤实际含水量、有机质含量、全氮含量、矿化无机氮含量、速效磷含量、速效钾含量以及盐分含量等。品种资料指与

品种相关的主要遗传系数。管理措施指农业生产过程中所实施的栽培方案及技术措施，例如作物模拟模型中一般包括播期（或移栽期）、播种量、施肥量、施肥日期、灌水量、灌水日期等。

模型的输出要求动态、完整、易于理解，具有先进的可视化及多媒体特点。可利用表格、图形、图像、声响等多种形式来综合实现，结果可同时输出到屏幕、文件、打印机等。输出的步长一般以天为单位。同时，模型输出步长和方式都可由用户根据需求而设定。

5. 模型构建的主要步骤

作物模拟模型研制的步骤可简要概括为模型选择与系统定义，资料获取与算法构建，模块设计与模型实现，模型检验与改进等四个方面。其中，工作的重点和难点是在深入解吸和科学把握系统内涵与特征的基础上，研究和建立农业模拟模型的算法结构。

5.1 模型选择与系统定义

对所模拟的农业系统进行明确定义和综合分析是建立一个概念模型，直至量化模型的关键。首先要弄清模拟研究的目的、水平及对象，以明确模拟研究的范围和成分。如果建模的主要目的是为了研究和机理解释，那么模拟的系统水平和层次就应该低一些，模拟的对象可能包括器官及亚器官。反之，对于一个应用性较强或注重宏观预测的模型而言，研究的系统水平就可以高一些，系统的成分简单一些。通过这项工作，可以先建立一个描述系统结构与关系的概念模式或概念模型。

5.2 资料获取与算法构建

资料获取大概有 3 个方面的来源：一是已有的工作或文献资料，其中文献资料主要包括国内外在相关领域所取得的科研成果、出版的专著与教材、科技期刊及学术会议上发表的论文等，以及各地的土壤志、品种志、气象资料等；二是通过合作途径，可以从同行科学家那里获取相关资料；三是通过补充试验或支持研究，围绕某个方面获得全新的资料。其中，文献资料主要用于模型的构建；合作途径所获得的资料主要用于模型参数的确定及系统的测试；补充试验或支持研究一部分用于模型的构建，另一部分用于模型参数的确定及系统的测试。

在资料获取的基础上，即可进行数理统计分析，构建算法方程。对于一些暂

时无法获得的资料或难以量化的过程，必须采用黑箱模拟的方法，借助于逻辑性的合理假设和数学推导，得出描述系统过程的理论方程。应当指出的是，黑箱模拟运用的程度，完全取决于对系统的正确理解和可靠把握。如果信心不足，则尽量减少黑箱模拟。

5.3 模块设计与模型实现

首先要选择恰当的编程语言来组织系统，包括模拟算法编程语言和界面编程语言。应用比较广泛的模拟算法编程语言主要有 VC++、VB、C#和 Fortran 等。

模块设计与编程须注意几个问题：1) 将主程序和亚程序设置成合理的模块化结构；2) 突出模块的可读性与解释性，以及可改性与灵活性；3) 表现友好的人机界面和可操作性；4) 将模型的运行时间降低到最少，提高模型的运算效率。

此外，模型的实现还须研究模型的输入输出内容和形式。模型的输入资料要求容易、可获取，特别是天气、土壤、作物遗传资料等。对于输入误差较大的资料，要尽量少用。模型的输出结果要求直观、综合、易分析比较，一般采用表格和图形两种主要形式。随着计算机技术的快速发展，更直观的作物生长模型输出形式，如图象输出、可视化动态生长、以及其他多媒体技术等会逐步实现。

5.4 模型检验与改进

模型的检验包括对模型的敏感性分析、校正、核实、测验等四个主要过程；模型的改进则是在检验模型的过程中，对模型进行必要的改进与完善。

1) 敏感性分析

敏感性分析是对模型灵敏度和动态性的测验，分析模型对主要参数和变量反应的灵敏度，测验模型的结构与过程以及系统的成分。它可以看成是某种形式的假设模拟试验。

2) 校正

校正是调整模型的参数，使得模型符合模拟者特定的环境和资料参数，主要检验模型系统的综合表现及对综合变量的反应。

3) 核实

核实是指决定模型是否适用于模型研制以外的完全独立的资料，是多年、多点、多试验观测值与模拟值的比较。可采用如下方法：一是将模拟结果与实际结

果进行回归分析,但模拟值与观测值的显著相关不足以证明模型的可靠性和预测性,因为当模型的模拟结果与观测值都显著相关时,二者之间的差异有可能变化很大;二是将实际结果与模拟结果按同一时间坐标绘 1:1 图进行比较;三是检验模拟与实际值的平均误差。

4) 测验

测验是比较各种环境下的模拟值与预测值,可看作是一个持续的模型核实过程。如果在测验过程中发现明显的偏差,可能还得重复上述模型校正和核实的整个过程,并对模型算法进行必要的修订和改进。

6. 影响因子的定量表达

作物生长发育与产量形成是品种遗传特征、气候因子、土壤特性及管理措施综合作用的结果,涉及复杂的过程和众多的因子。为了简化因子的相互作用,可以采用建模的层次性理论,首先建立由太阳辐射、CO₂ 浓度、温度和作物特性所决定的潜在生长状况下的生长过程模型;然后在潜在生长模型的基础上依次添加氮素、水分、磷钾、杂草等影响因子的限制效应,进而得到实际生长条件下的生长过程模型。

在处理各环境因子的关系时,利用析因法定量各因子的单独效应及其互作效应,即以系数(取值在 0~1 之间)的形式分别建立不同单因子的效应模型,然后再以乘积法或最小因子法定量这些系数间的互作。单因子效应模型应尽可能地基于生理生态和生物学规律。对于暂时难以获取详细资料的部分,可采用经验性较强的方法代替,以使模型的分辨能力大体上与观测资料的精细程度相匹配。

此外,需要选用适当的一组遗传参数来表达不同品种的典型遗传性状,从而使得模型能应用于不同的基因型。遗传参数是指描述非逆境下种或品种基本遗传性状的一组特征值。一个品种的遗传系数一般以 10~15 个左右为最适,最多不超过 20 个。遗传参数既要符合作物(动物)生理学的认识和规律,又要为作物(动物)育种学家所理解和接受,主要是量化品种间最基本的遗传性状差异,例如在小麦作物的发育模型中,一般包括生理春化时间、光周期敏感性因子、灌浆持续期因子、基本早熟性因子 4 个品种遗传参数,分别体现了不同品种小麦在春化作用、光周期反应及灌浆期长短、热效应方面的遗传特性。遗传参数一般依据试验数据通过试错法、最小二乘法等决定。在条件允许的情况下,也可直接通过

控制环境下的试验研究获得，如不同小麦品种的生理春化要求。

WWW.CROPGROW.NET

二、CropGrow 模型算法

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的规律为基础，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、形态发生与器官建成、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 2.1），可动态预测不同条件下作物生长发育与产量品质的形成过程（图 2.2）。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，提出了以作物生理发育时间（Physiological Development Time，简称 PDT）划分作物发育阶段的新思路。形态发生与器官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、穗等器官的发生与形态变化等，器官发生的时间与阶段发育过程密切相关，发生的数量和大小与同化物的分配和利用有关。光合生产与物质积累子模型以单叶光合速率为基础，采用高斯积分法来模拟每日的冠层光合速率，综合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，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、CO₂ 浓度、生理年龄和氮素的影响。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模拟出籽粒产量，结合植株氮转运与籽粒氮积累动态，建立籽粒蛋白质含量与蛋白质产量的模拟模型，同时基于植株碳素的积累转运及籽粒碳素的转化利用，构建基于花后碳流过程的籽粒淀粉形成模拟模型。养分动态子模型主要涉及氮、磷、钾三种大量元素的模拟，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，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，来计算植株和各个器官的氮素需求量和转运量。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、水分再分配等水分动态过程的模拟。

近年来，在评估已有模型对极端温度响应的不确定性基础上，基于作物生长发育对极端气候环境的响应机制，结合高温累积度日、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、干物质积累与分配、结实率等过程影响的模拟算法，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。

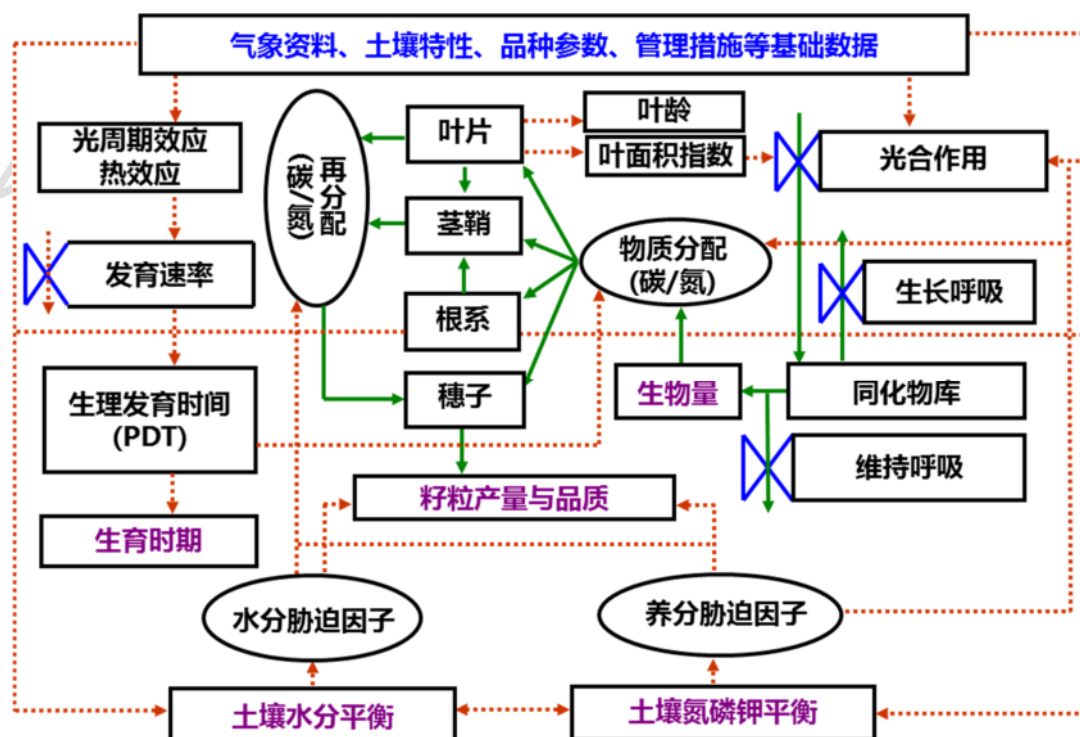


图 2.1 作物生长模型 CropGrow 的结构流程图

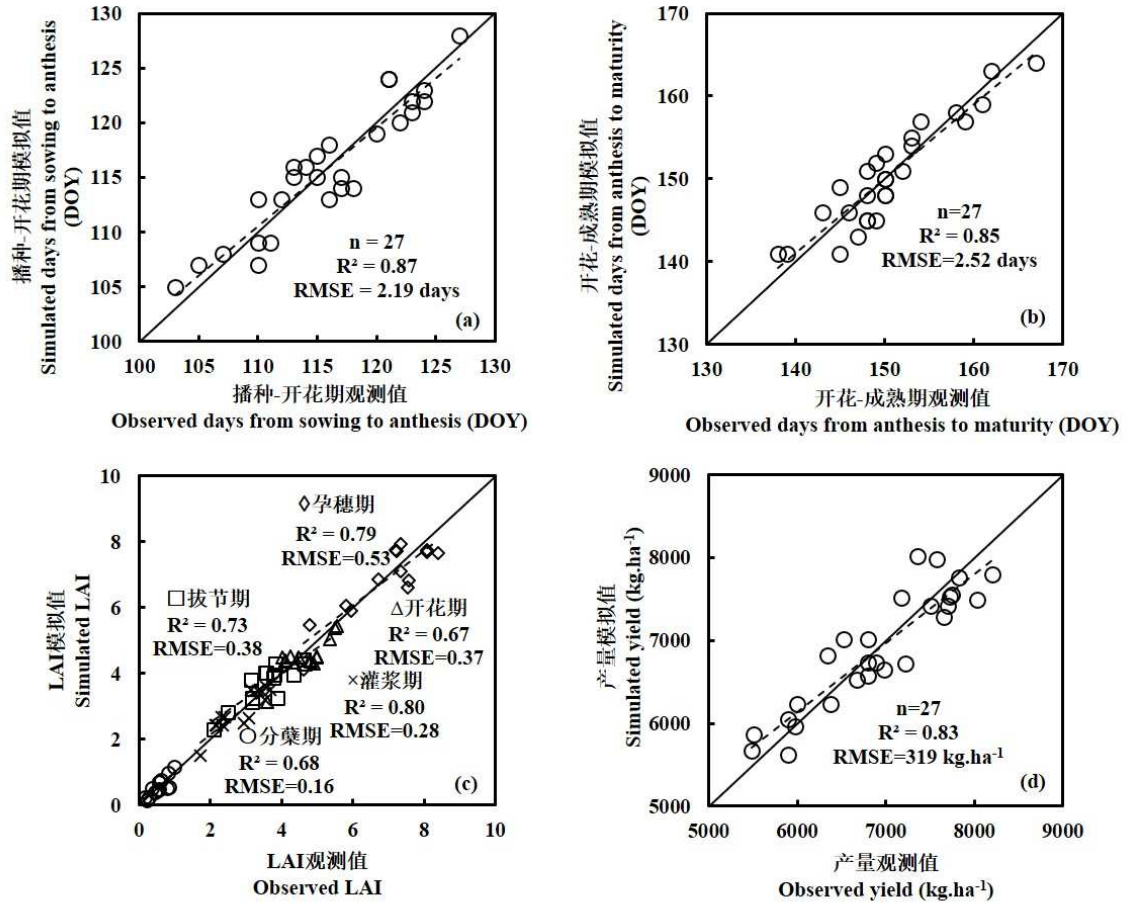


图 2.2 基于 WheatGrow 的小麦生育期 (a, b)、LAI (c)、籽粒产量 (d) 模拟值与实测值的 1:1 图

CropGrow 模型的主要品种参数如表 2.1 所示。

表 2.1 WheatGrow 模型需要校正的主要品种参数

参数名称	参数定义
Parameter name	Parameter definition
TS	温度敏感性 Temperature sensitivity
PS	光周期敏感性 Photoperiod sensitivity
IE	基本早熟性 Intrinsic earliness
PVT	生理春化时间 (d) Physiological vernalization time
FDF	灌浆因子 Grain filling duration factor
HI	收获指数 Harvest index
AMX	理想条件下的最大光合速率 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) Maximum photosynthetic rate under optimum condition
SLA	比叶面积 ($\text{ha}\cdot\text{kg}^{-1}$) Specific leaf area
GW	千粒重 ($\text{g}\cdot 1000\text{ grain}^{-1}$) 1000-grain weight
TA	潜在分蘖能力 Potential tillering ability

CropGrow 模型中阶段发育与物候期、形态发生与器官建成、光合生产与物质积累、同化物分配与产量品质形成主要模拟算法如下：

1. 阶段发育与物候期模型

在 CropGrow 模型中基于生理发育时间(PDT)来量化作物的发育阶段。PDT, 又称生理发育日, 是一种最适宜发育环境下的时间尺度。如果将对作物发育最适的温光条件下的一天定义为一个生理日, 到达某一生育阶段所需的 PDT 是固定不变的, 例如, 小麦不同阶段所需的 PDT 大概为, 二棱期 10; 小花原基分化期 15; 四分体期 21; 抽穗期 27; 开花期 31, 灌浆始期 39, 成熟期 56。而对于水稻, 0、8、18、32、57 分别为到达出苗、光敏感开始、光敏感终止、抽穗及生理成熟期所需的生理发育时间。在 CropGrow 模型中, 每天的热效应 (DTE) 和热敏感性(DTS)的互作决定了每日生理效应(DPE), 其累积形成了生理发育时间(PDT)。

$$DPE = DTE \times DTS \quad (1)$$

$$PDT = \text{SUM} (DPE) \quad (2)$$

1.1 热效应模拟

每日热效应(DTE)的计算依据于作物生长的基点温度(T_b)、最适温度(T_o)、最高温度 (T_m) 以及实际温度 (T)。实际温度值可以是日平均温度 T_{mean} 或一日不同时段温度值 T_i 。如果是不同时段温度值, 则热效应的平均值即为每天的基本热效应。

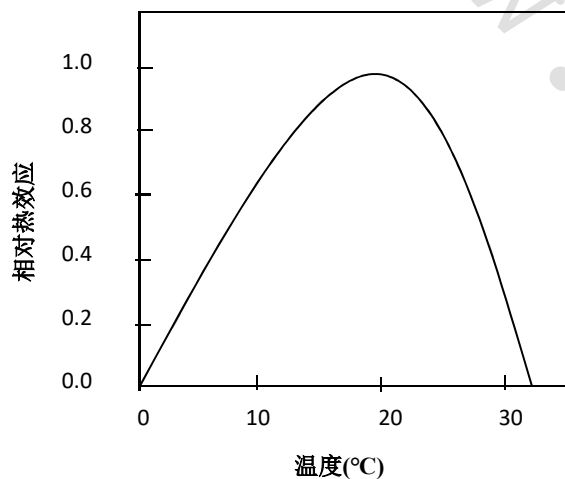


图 2.3 小麦的相对热效应与温度的两段线性关系及曲线关系

采用正弦指数方程将热效应与温度的两段线性关系曲线化 (图 2.3), 如下式所示。

$$TEi = \begin{cases} \left[\text{SIN} \left(\frac{Ti - Tb}{To - Tb} \times \frac{\pi}{2} \right) \right]^{ts} & (Tb \leq Ti \leq To) \\ \left[\text{SIN} \left(\frac{Tm - Ti}{Tm - To} \times \frac{\pi}{2} \right)^{\frac{(Tm - To)}{(To - Tb)}} \right]^{ts} & (To \leq T \leq Tm) \end{cases} \quad (3)$$

$$DTE = \frac{1}{8} \times \sum_{i=1}^8 TEi \quad (4)$$

上式中， ts 为基因型特定的温度敏感性。基点温度 (Tb)、最适 (To) 及最高温度 (Tm) 可随作物类型及生育期而变。如小麦的基点温度、最适及最高温度在二棱期以前分别为 0 、 20 、 32°C ，二棱期到抽穗期分别为 3.3°C 、 22°C 、 32°C ，抽穗期到成熟期分别为 8°C 、 25°C 、 35°C 。

1.2 每天热敏感性模拟

热敏感性代表了作物对热效应的生理敏感程度，实际上是一种没有考虑热效应因子的生理发育速率。对于暖季作物来说，热敏感性主要取决于光周期效应 (PE)；对于冷季作物而言，热敏感性取决于每天春化进程 (VP) 与光周期效应 (PE) 的互动。冷季作物在出苗后，随着生育进程的推移，春化量逐渐积累，春化进程逐渐增大直至为 1，春化作用完成。此前，光周期效应对每天热敏感性的影响受到每天春化进程的调节；此后，光周期效应成为影响每天热敏感性的主导因子，至接近孕穗期时，光周期反应逐渐减弱，即对光周期的敏感性逐渐下降，光周期对每天热敏感性的影响也越来越小，而每天热敏感性的实际值则在逐步增加，到抽穗期增加到最大值 1。此时，作物的阶段发育完成，之后作物的生长主要受热时间的调控。

对于小麦来说，每天热敏感性 (DTS) 可采用下述算法获得。

$$DTS = \begin{cases} PE \times VP & VD < PVT \\ PE & VD \geq PVT \text{ \& } PDT \leq PDTTS \\ PE + (1 - PE) \times \frac{PDT - FTTS}{PDTHD - PDTTS} & PDTTS < PDT < PDTHD \end{cases} \quad (5)$$

上式中， PDT 为累积的生理发育时间， $PDTTS$ 和 $PDTHD$ 分别为顶小穗形成期和抽穗期对 PDT 的要求。

1.3 春化效应模拟

春化作用是冷季作物完成发育所必需的一种低温反应。春化效应的大小取决于品种的内在春化要求及环境中适宜春化的温度范围与持续期。

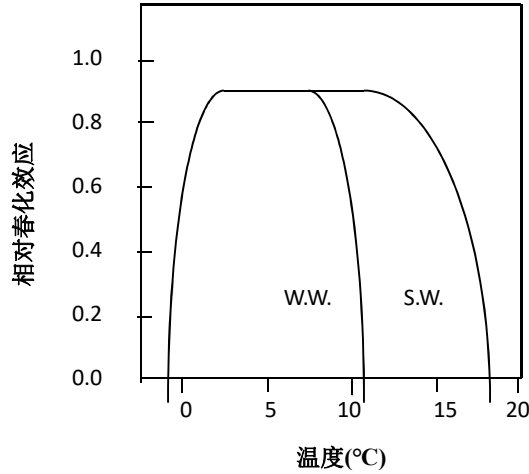


图 2.4 小麦的相对春化效应与温度的曲线关系

一天中春化作用的强弱以春化效应 (VE) 来表示。因为春化作用对温度的反应是非线性的, 所以春化效应与温度关系的曲线化则能更准确地量化春化作用的温度效应 (图 2.4)。例如小麦的春化效应可用正弦指数函数、线性函数以及正弦指数函数三段函数来量化描述 (方程 6)。

$$VE(I) = \begin{cases} \left[\text{SIN} \left(\frac{T - T_{bv}}{T_{ol} - T_{bv}} \times \frac{\pi}{2} \right) \right]^{0.5} & (T_{bv} \leq T \leq T_{ol}) \\ 1 & (T_{ol} \leq T \leq T_{ou}) \\ \left[\text{SIN} \left(\frac{T_{mv} - T}{T_{mv} - T_{ou}} \times \frac{\pi}{2} \right) \right]^{vef} & (T_{ou} \leq T \leq T_{mv}) \\ 0 & (T_{mv} \leq T, \text{ or } T \leq T_{bv}) \end{cases} \quad (6)$$

上式中, T 为每天实际温度, T_{bv} 表示春化最低温度, T_{ol} 为春化最适温度范围的下限值, 如小麦分别为 -1°C 和 1°C ; 而 T_{ou} 为春化最适温度范围的上限值, T_{mv} 为春化最高温度, vef 为春化效应因子, 它们的值均随不同品种生理春化时间 (PVT) 的不同而连续变动, 对于小麦作物, 这种关系可用下列方程表示。

$$T_{ou} = 10 - PVT/20 \quad (7)$$

$$T_{mv} = 18 - PVT/8 \quad (8)$$

$$vef = \frac{1}{2 - 0.0167 \times PVT} \quad (9)$$

此外, 如用一日不同时段温度值, 如 8 个时段温度值来计算春化效应,

则每日的春化效应为这 8 个相对春化效应的平均值。

生理春化时间是发育模型中出现的另一个品种特定的遗传参数, 在小麦中的变化范围为 0~60 天。即对于极强春性品种来讲, 其生理春化时间为 0, 而极强冬性品种则为 60。因此, 强春性小麦品种春化的最适上限温度及最高温度分别为 10°C和 18°C, 强冬性小麦品种为 7°C和 10.5°C, 而春化效应因子 v_{ef} 的变化范围则为 0.5~1。

春化天数 (VD) 为每日生理春化效应的累积值。对于小麦来说, 当春化天数累积不超过特定品种春化生理时间的三分之一左右时, 若温度高于 27°C, 就会发生脱春化作用, 且脱春化效应 (DVE) 随温度的升高而加强。有资料表明气温每升高 1°C, 减少 0.5 个春化日。当春化天数累积达到某一特定品种生理春化时间的三分之一后, 则不会再发生脱春化作用。

$$DVE = (T - 27) \times 0.5 \quad (T > 27) \quad (10)$$

因此, 实际春化天数受到每天的春化效应和脱春化效应的共同影响, 而春化进程 (VP) 则用累积的春化天数占生理春化时间的分数来表示 (图 2.5)。

$$VD1 = \text{SUM}(VE - DVE) \quad (PVT < VD < 0.3PVT) \quad (11)$$

$$VD2 = \text{SUM}(VE) \quad (0.3PVT \leq VD \leq PVT) \quad (12)$$

$$VP = (VD1 + VD2) / PVT \quad (\text{当 } PVT = 0 \text{ 时, } VP = 1) \quad (13)$$

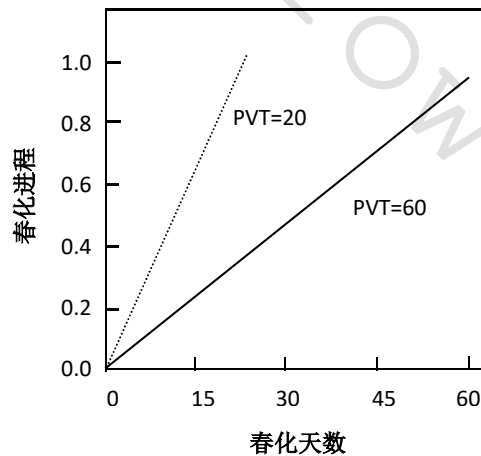


图 2.5 春化进程与春化天数 (PVT) 及品种生理春化要求的关系

1.4 光周期效应模拟

光周期效应取决于光周期的长短及基因型的光周期敏感性。冷季作物如小麦一般表现为长日照对发育速率的促进作用, 而暖季作物如水稻则表现为短日照的

促进作用（图 2.6）。因此，对于不同的作物类型需采用不同的算法方程来量化光周期的效应。

对于小麦等冷季作物而言，20 小时光周期是发育的临界日长，低于 20 小时，发育开始受到抑制，短日抑制发育的程度随品种的光周期敏感性（PS）而变化。PS 是 CropGrow 模型中另一个品种特定的遗传参数。光周期随季节（DAY）和纬度（LAT）而规律性地改变，光周期的变化模式及光周期效应（PE）可由下述算法获得：

$$PE = 1 - PS(20 - DL)^2 \quad (14)$$

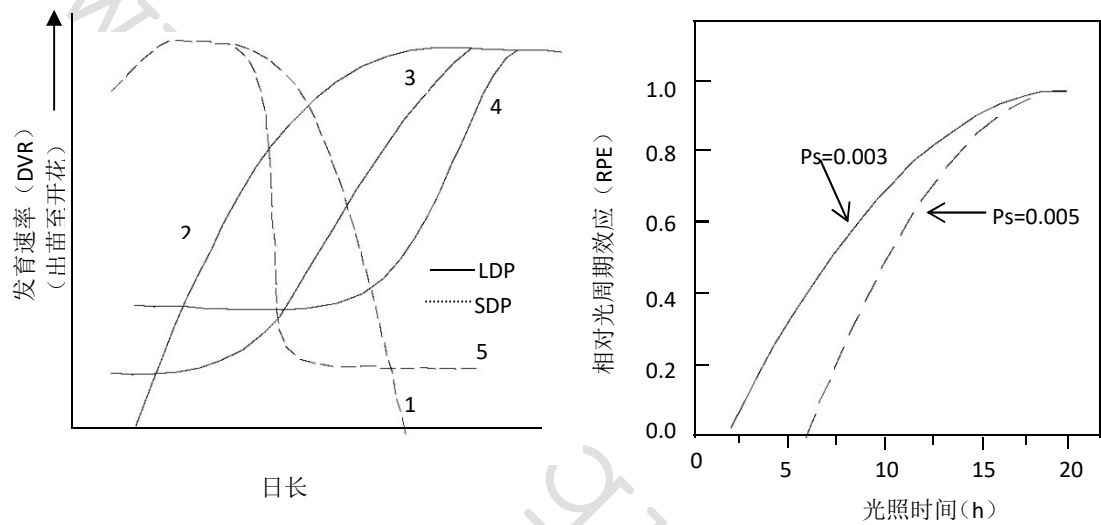


图 2.6 光周期对不同日长类型作物发育的效应（LD—长日照作物 SD—短日照作物）

对于水稻而言，用二次曲线函数拟合 RPE 与光周期的关系（图 2.7）：

$$RPE_i = \begin{cases} 1 & P \leq P_o \\ 1 - PS \times (P - P_o)^2 & P_o < P \leq P_c \end{cases} \quad (15)$$

$$P_c = P_o + (1/PS) 1/2 \quad (16)$$

其中，P 为每天的日长，随季节和纬度而变化；P_o 为光诱导的最适日长，一般为 9.0~11.5h，在此固定为 10.5h；PS 为品种特定的光周期敏感性参数，即方程的二次项系数；P_c 是抽穗临界日长，品种的感光性越强，PS 越大，P_c 则越小（公式 16）。

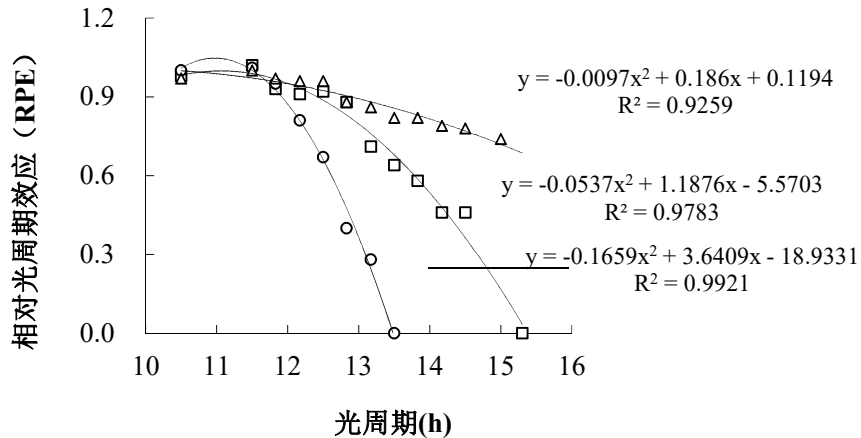


图 2.7 水稻品种相对光周期效应与光周期的关系

玻璃占 □黄壳早甘日 青骨种

2. 形态发生与器官建成模型

作物器官发育主要指植株上不同器官的发生和形成过程，决定了植物的形态特征。器官发生的时间与阶段发育过程密切相连，发生的数量和大小与同化物的分配和利用相关。对于多数农作物如禾谷类来说，植株上的器官主要包括根、叶、茎、穗、花、粒等部分。其中，根、叶、茎的发生和发育决定了植株的营养生长，而穗、花、粒的分化和发育决定了植株的生殖生长。

2.1 顶端原基的分化

2.1.1 叶原基分化

叶原基在种子形成时就开始了分化，在禾谷类作物中，叶原基的分化一直延续到茎顶端发育的单棱期。叶原基分化速率可采用叶原基间距（Plastochron，简称 PLCH），即连续两个叶原基分化之间的热时间间隔，它有别于叶热间距（PHYLL），后者是衡量叶片出现速率快慢的尺度。每天分化的叶原基数（DLPN）可通过叶原基间距和生长度日来预测（图 2.8）。

$$DLPN = \frac{1}{PLCH} \times GDD \times RAI \quad (17)$$

$$PLCH = \frac{PHYLL}{2.5} \quad (18)$$

上式中的 RAI 为资源有效指数或资源丰缺因子，是反映土壤氮素和水分丰缺程度的因子，取值范围为 0~1。

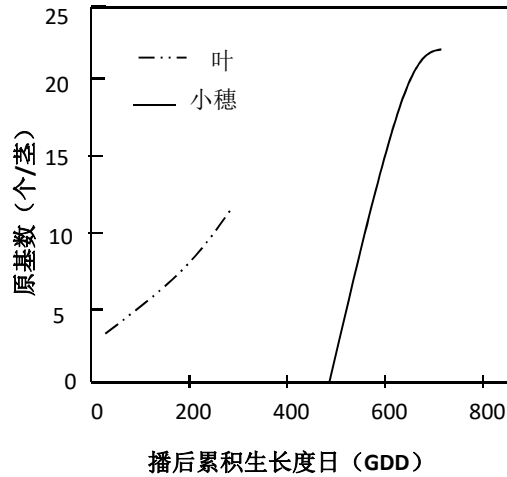


图 2.8 小麦叶原基分化、小穗原基分化与生长度日的关系

2.1.2 小穗原基分化

在禾谷类作物中，叶原基分化结束后即开始小穗原基的分化。因此，小穗原基分化的持续期为二棱期到顶小穗形成期。在小麦作物中，小穗原基的分化速率是叶原基分化速率的 3.5 倍。假定同一品种所有茎秆的小穗原基分化速率相同，且分化速率恒定，而且每天每穗分化的小穗原基数（DSPN）受到土壤氮素和水分的调节。

$$DSPN = \frac{1}{PLCH} \times 3.5 \times GDD \times RAI \quad (19)$$

2.1.3 小花原基分化

穗上分化的小穗数能否结实主要在于小花发育的程度。研究表明，分化的小花原基数主要受到阶段发育进程的调控，而水肥条件的影响较小。每天每穗分化的小花原基数（DFLN）可用下列方程来描述。

$$DFLN = \frac{MAXFLNUM}{PT_TETRAD - PT_FLORET} \times DPE \times RAI \times DSPN \quad (20)$$

上式中 MAXFLNUM 为每个小穗分化的最大小花原基数，一般为 10，随基因型变化较小。DSPN 为每穗分化的小穗原基数，在小穗原基分化子模型中已计算，以下同。PT_TETRAD 为到达四分体期的生理发育时间，PT_FLORET 为到达小花原基分化期的生理发育时间，DPE 为每天生理效应，它们的值在小麦发育期模型中已确定。

2.2 叶片的出现与叶面积

2.2.1 叶片的出现

在现有的生长发育模拟模型中，预测叶片和节间等器官生长速率时，主要采用叶热间距这一方法。如图 2.9 所示，叶热间距可由如下算法获得：

$$\text{PHYLL} = \text{MAXPHYLL} - \text{DEVEDIFFER} \times \text{DPE} \quad (21)$$

上式中，PHYLL 为叶热间距，DPE 为每日生理效应，其值在小麦生育期模型中已计算。MAXPHYLL 为品种参数，表示最大叶热间距。DEVEDIFFER 为发育差异性，反映小麦生长前期和后期的阶段发育速率差异，由于春性品种阶段发育后期光周期敏感性较强，阶段发育速率相对缓慢，因而，春性品种的 DEVEDIFFER 值比冬性品种的大。这一关系可由下式表达：

$$\text{DEVEDIFFER} = 98.9 - 0.23 \times \text{PVT} \quad (22)$$

上式中，PVT 为数量春化时间，反映不同类型品种冬性强弱的品种参数，在阶段发育模型中已确定。

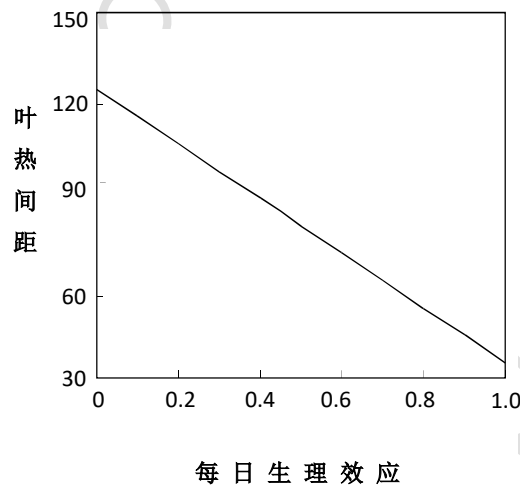


图 2.9 小麦叶热间距与每日生理效应的关系

2.2.2 叶片的扩展与单茎叶面积

模拟单茎上叶片的生长主要包括每天主茎叶龄 (DMSLA)、每天叶长 (DLLen)、每天叶宽 (DLWid)、每天叶面积 (DLA) 以及主茎绿叶数 (MSGLN)。

预测主茎的叶龄首先要模拟主茎叶片出现的速率。利用叶热间距子模型中计算的叶热间距 (PHYLL) 来表示叶片出现速率，以热时间 (GDD) 为基础即可计

算出每天的主茎叶龄。叶片出现速率在一般生产条件下不受土壤水分和氮素胁迫的影响。

$$DMSLA = \frac{1}{PHYLL} \times GDD \quad (23)$$

叶片的生长意味着叶片在长度和宽度两方面的增加,一般与温度呈线性相关。在小麦模型中,采用如下方法模拟每天叶长(DLLen)和每天叶宽(DLWid)。

$$MAXLLen(\text{mm})=86 \times e^{0.15x} \quad (24)$$

$$MAXLWid(\text{mm})=3.44 \times e^{0.15x} \quad (25)$$

$$DLLen(\text{mm})=MAXLLen/PHYLL \times GDD \times RAI \quad (26)$$

$$DLWid(\text{mm})=MAXLWid/PHYLL \times GDD \times RAI \quad (27)$$

上述方程中,MAXLLen为最大叶长,MAXLWid为最大叶宽,x为单茎上总叶片数,取值范围依品种而定。

由每天的叶长和叶宽以及校正系数可以计算每天的叶面积(DLA),如下列方程所示:

$$DLA(\text{mm}^2)=DLLen \times DLWid \times 0.74 \quad (28)$$

对于主茎第一片叶子,由于其叶尖较钝,故而叶面积的校正系数为0.83。

通常,没有环境胁迫下的主茎最多维持6.5片绿叶数,其它的叶片则相继死亡。而在环境条件并不是最佳状态时,主茎上的绿叶数就会减少。可以用土壤水分和氮素的综合资源有效因子来计算主茎上实际的绿叶数:

$$MSGLN=6.5 \times RAI \quad (29)$$

2.2.3 群体叶面积指数

2.2.3.1 比叶面积的模拟

比叶面积是作物生长模型一个重要指标,在以往的生长模型中,一般将比叶面积作为一个定值进行模拟。研究发现,比叶面积是一个非常敏感的参数,随着生育进程表现出显著的动态变化。例如,对于水稻的比叶面积的模拟,首先确定水稻某个品种在不受N营养水平限制条件下的潜在比叶面积(SLAP),SLAP为GDD的函数,当GDD小于1200时,SLAP随GDD的增加而逐渐降低;当GDD大于1200后,SLAP稳定为一恒定值(图2.10),而且随着氮素水平的变化呈现一定的变化规律(图2.10):

$$SLA_p = \begin{cases} aGDD^2 - bGDD + c & GDD \leq 1200 \\ 200 & GDD > 1200 \end{cases} \quad (30)$$

式中，a、b、c 均为曲线系数。

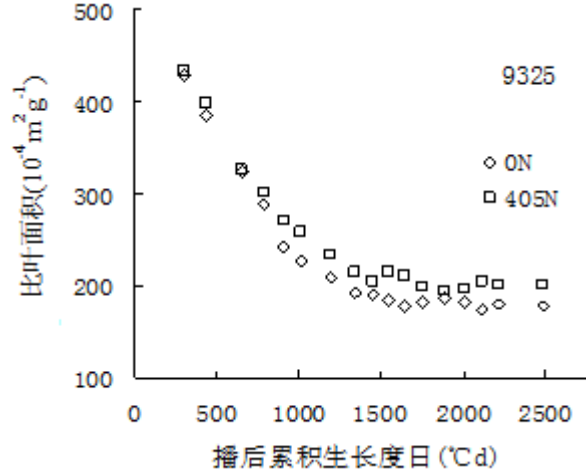


图 2.10 水稻品种 9325 在不同 N 水平下比叶面积与播后累积生长度日的关系

2.2.3.2 叶面积指数的模拟

作物叶面积指数在增长过程中直接受到库、源关系的影响，库或者源限制下的叶面积增长模式不同。在 CropGrow 模型中，一般采用库源限制下的两种模拟相结合的方法进行。

A) 库限制下的叶面积指数模拟

一般作物在生长的初期，不受到源的限制能够得以充分的生长。在此时期，水分、养分、密度及病虫害等条件都不会限制作物的生长，叶片的增长主要由温度驱动，温度是影响叶片细胞分裂和扩大的主要因素。在这一阶段叶片的增长有充足的同化物供应，主要是受到作物类型、品种和叶片发生速度等的影响，其呈指数形式增长。但随着叶面积指数的增加，遮荫效应逐渐增大，当叶面积指数增加到某一最大叶面积指数 (LAIMAX) 时，停止增加。这一关系可以用方程 (31) 和 (32) 来描述：

$$\Delta LAI = rg \times LAI \times (1 - LAI / LAIMAX) \quad (31)$$

$$LAI_{i+1} = LAI_i + \Delta LAI \quad (32)$$

式中， ΔLAI 、 LAI_i 和 LAI_{i+1} 分别是第 i 天增加的叶面积指数、第 i 天叶面积指数和第 $i+1$ 天的叶面积指数； rg 为叶面积指数潜在相对生长速率，不同作物、

品种以及管理方式都会导致取值不同。

B) 源限制下的叶面积指数模拟

随着作物的生育进程的推进,叶片不再是生长中心,分配到叶片的光合同化物随之减少,叶面积指数的增长受到源的限制。此时,由于叶片增长到了一定的程度后互相开始遮荫而出现衰亡,叶面积指数的增长不再是指数增长。由于这一阶段主要是受碳水化合物源供应不足的限制,所以采用比叶面积法来模拟叶面积指数的增长过程,可以用方程(33):

$$LAI = SLA \times AWGL \quad (33)$$

式中,AWGL 是实际绿色叶片干重 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 由于物质积累和分配子模型提供; SLA 是比叶面积 ($\text{hm}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)。

作物的营养生长和生殖生长在很长的时间内会共同发生,库、源限制下的两种叶面积增长模式没有明显的时间界限,因而难以单纯以发育时期来区分哪种增长模式,所以综合这两种增长模式,使最终的叶面积指数取两种增长模式下的最小值。

2.3 分蘖动态与成穗

2.3.1 分蘖动态

正常条件下,禾谷类作物主茎上分蘖的发生与主茎叶片数保持 $n-3$ 同伸关系,以后分蘖叶的出生也与主茎叶龄保持同步关系。在水肥环境特别适宜的条件下,分蘖与主茎的同步关系可能会缩短到 $n-2.5$,称为超同伸现象。根据上述同伸关系,可推算出单株理论茎蘖数,即单株理论茎蘖数(STCN)与主茎叶龄(i)的关系呈菲波拉奇数列(方程34):

$$STCN(i)=STCN(i-1)+STCN(i-2) \quad (i\geq 2.5) \quad (34)$$

上式表明,主茎第 i 片叶时的单株理论茎蘖数是主茎第(i-1)片叶和第(i-2)片叶的单株理论茎蘖数之和,当 $i<2.5$ 时, $STCN(i)=1$ 。

以上同伸关系只有在播期播量适宜、肥水条件满足时才可能出现。一般情况下,在大田生产中单株实际茎蘖数(SACN)由于水肥条件不适,因而常常少于理论茎蘖数,这种环境效应可采用资源有效指数来(RAI)调节。

$$SACN(i) = STCN(i) \times RAI \quad (35)$$

还有群体大小的影响,如水稻的 LAI 大于 1.6 后,分蘖的自然发生逐渐下

降，至 4.5 左右时不再发生，见公式（36）

$$FL = \begin{cases} 1 & LAI \leq 1.6 \\ 18.91 \times EXP(-1.84 \times LAI) & 1.6 < LAI \leq LAI_c \\ 0 & LAI > LAI_c \end{cases} \quad (36)$$

式中，FL 为 LAI 对分蘖反生的影响因子，1.6 为叶片开始相互遮荫时的 LAI，在此之前，LAI 对茎蘖增长没有影响；LAI_c 为分蘖停止发生时的 LAI，即临界 LAI，取值为 4.5；FL 取值在 0-1 之间。

植株从开始分蘖起，随着主茎叶龄的增加，分蘖数量不断增加，到拔节后，分蘖大量消亡，因而拔节期分蘖数达到最高峰，即在拔节期叶龄时，分蘖达到最大值。拔节期叶龄（ $\dot{i}_{jointing}$ ）计算采用以下的方法：

$$\dot{i}_{jointing} = N - n + 2 \quad (37)$$

上式中，N 为主茎总叶数，n 为地上部伸长节间数，可以是模型的输入数据，属于品种遗传参数。

2.3.2 分蘖的成穗

分蘖能否成穗，其内在的生理基础是分蘖有无足够的生长发育时间，形成自身的独立根系和自养能力。以有效分蘖可靠叶龄期作为植株发生有效分蘖的终止期，即有效分蘖可靠叶龄期前发生的分蘖为有效分蘖，以后发生的分蘖均为无效分蘖。有效分蘖可靠叶龄期的算法如下。

$$\dot{i}_{availtiller} = N - n - tN + 3 \quad (38)$$

上式中，tN 为植株拔节期有效分蘖可靠叶片数，其值随品种类型和土壤水肥状况而异。

对于小麦而言，9 及 10 叶品种的 tN 值为 3，11 及 12 叶的品种为 4，13 及 14 叶的品种为 5，15 及 16 叶的品种为 6。这种一般性量化关系可进一步用以下方程来表示。

$$tN = (0.5 \times N - 2) / RAI \quad (RAI = 0.5 - 1.0) \quad (39)$$

$$tN = N - 4 \quad (RAI < 0.5) \quad (40)$$

作物生理生态研究表明，分蘖的消亡取决于植株个体同化物的供需平衡以及群体冠层的透光性。因此，分蘖衰老的模拟既要考虑到植株个体的大小及成穗能力，又要考虑到群体的大小及光能利用率。如水稻单株的分蘖成穗数与孕穗期冠

层底部的透光率呈显著负相关。

2.4 根系与茎秆的生长

2.4.1 根系生长

根系的生长动态可由根深和根分布特征来描述。根深是衡量根系生长活力的一个重要指标，有效根深指作物有效地吸收水分的深度，而不是指少量根能达到的极限深度。

从发芽开始，根系不断生长，通常在开花时停止生长。每天的根深(DRTDEP)与根向下生长的速率(RTGR)、土壤水分(WAI)以及每天的热时间(GDD)有关。

$$DRTDEP=RTGR \times GDD \times WAI \quad (41)$$

方程中,RTGR为作物根系向下生长的速率,如小麦根的平均生长速率是0.22厘米·GDD⁻¹。

除了根深以外，根长密度是描述根系分布的重要指标。以小麦为例，根长密度可通过以下方程来量化。

$$RLV=WAI \times WR \times RLNEW / TRLDf - 0.01 \times RLV \quad (42)$$

$$RLNEW=GRORT \times PLANTS \times 1.05 \quad (43)$$

$$TRLDF=\text{SUM}(WAI \times WR \times DLAYER) \quad (44)$$

其中，RLV为根长密度，WR为不同土层的根系偏好因子，取值范围在0—1之间，RLNEW为每天增加的根长(厘米)，TRLDF是总根长密度因子，GRORT每天分配到根中的生物量(克)，PLANTS为每平方米的植株数，系数1.05表示分配到根中的生物量转换为每平方米土壤的根长参数，DLAYER是每层土壤的深度(厘米)。

2.4.2 茎的生长

茎的生长是节间伸长生长的结果，茎长不仅与品种特性有关，而且还受土壤氮素和水分的影响。以小麦为例，每天节间长度(DINLen)可采用下列方法计算。

$$\text{MAXINLen}(\text{mm})=10.89 \times s \times n^{1.73} \quad (45)$$

$$\text{DINLen}(\text{mm})=\text{MAXINLen} / \text{PHYLL} \times \text{GDD} \times \text{RAI} \quad (46)$$

$$s=1.57+2.22 \times \text{PHT} \quad (47)$$

方程中 n 表示地上部伸长节间数, $MAXINLen$ 为特定节间的最大节间长度, 它随节间不同而变, s 为品种参数, 表明该品种的株高特性, 它与株高 (PHT) 呈线性关系。

3. 光合生产与物质积累模型

3.1 光能分布和截获

3.1.1 大气上界的光合有效辐射

冠层顶部的辐射是日长、大气上界的辐射量和辐射穿过大气的损失量三者的函数。大气上界的光合有效辐射 (PAR) 计算式为:

$$PAR=0.5 \times [SC \times 1 + 0.033 \times \cos(2\pi \times DAY / 365)] \times RDN \quad (48)$$

式中, PAR 为大气上界的光合有效辐射 ($J m^{-2} s^{-1}$), SC 为太阳常数 ($SC=1395 J m^{-2} s^{-1}$), DAY 为自 1 月 1 日起的日序, RDN 为某日 (DAY) 某纬度 (LAT) 的太阳常数分数, 其计算式如下:

$$RDN = SSIN + 24 \times CCOS \times (1 - SSCC^2)^{0.5} / (DL \times \pi) \quad (49)$$

$$\text{其中, } SSCC = SSIN / CCOS \quad (50)$$

$$SSIN = \sin(LAT \times RAD) \times \sin(\delta \times RAD) \quad (51)$$

$$CCOS = \cos(LAT \times RAD) \times \cos(\delta \times RAD) \quad (52)$$

$$DEC = -ASIN(\sin(23.45 \times RAD \times \cos(2\pi \times DAY + 10) / 365)) \quad (53)$$

式中, SSCC, SSIN, CCOS 为中间变量, RAD 为度转换为弧度的转换因子 ($RAD=\pi/180$), δ 为太阳赤纬 (度), LAT 为地理纬度 (度)。

此外, DL 为日长, 它是一年中某天 and 所处地理纬度的函数:

$$DL = 12 \times [\pi + 2 \times ASIN(SSCC)] / \pi \quad (54)$$

3.1.2 冠层顶部的光合有效辐射

到达冠层顶部的光合有效辐射 (PARCAN) 受大气透明度的影响, 一般可按下列式计算:

$$PARCAN = PAR \times (0.25 + 0.45 \times SSH / DL) \quad (55)$$

式中, PARCAN 为冠层顶部的光合有效辐射 ($J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), SSH 为实际日照时数 (h)。

3.1.3 冠层内光的分布与吸收

太阳辐射在作物冠层中的分布一般可认为服从指数递减规律, 则在作物冠层深度 L 处的光合有效辐射强度可描述如下:

$$I_L = (1 - \rho) \times PARCAN \times e^{-k \times LAI(L)} \quad (56)$$

其中, k 为消光系数, $LAI(L)$ 为冠层顶至冠层深度 L 处的累积叶面积指数, ρ 为冠层对光合有效辐射的反射率。其中, 消光系数 k 依作物的生育期、群体密度及株型不同而有所变化, k 由直立叶冠层的 0.6 变为水平叶冠层的 0.8。

冠层反射率 ρ 可由下式计算:

$$\rho = [(1 - (1 - \delta)^{1/2}) / (1 + (1 - \delta)^{1/2})] (2 / (1 + 1.6 \times \sin \beta)) \quad (57)$$

式中, δ 为单叶的散射系数 (可见光部分为 0.2), β 为太阳高度角, 由下式获得。

$$\sin \beta = \sin(\text{RAD} \times \text{LAT}) \sin \delta + \cos(\text{RAD} \times \text{LAT}) \cos \delta \cos[15(t_h - 12)] \quad (58)$$

$$\sin \delta = -\sin(23.45) \cos[360(\text{DAY} + 10) / 365] \quad (59)$$

$$\cos \delta = (1 - \sin \delta \times \sin \delta)^{0.5} \quad (60)$$

上式中 t_h 为真太阳时 (小时), LAT 为地理纬度 (度), δ 为太阳赤纬 (弧度), DAY 为一年中自 1 月 1 日起的日序。

由于一天中太阳高度角 β 随着太阳时间而变化, 从而导致冠层对光的反射率 ρ 和群体吸收的光合有效辐射也发生相应的变化。

冠层顶至冠层深度 L 处作物层所吸收的光合有效辐射 I_i ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 可计算如下:

$$I_i = (1 - \rho) \times \text{PARCAN} \times k \times e^{-k \times \text{LAI}(L)} \quad (61)$$

3.2 叶片和冠层光合作用

3.2.1 单叶光合作用

叶片光合作用速率可以简便地以单位叶面积 (仅指上表面) 上的光合速率表示。CropGrow 模型以负指数型模型来描述单叶的光合作用特征 (图 2.11)。

$$\text{FG} = \text{PLMX} \times [1 - e^{-\varepsilon \times \text{PAR} / \text{PLMX}}] \quad (62)$$

式中, FG 为单叶光合作用速率 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), PLMX 为单叶最大光合作用速率 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), 是一个基因型特定的遗传参数。 ε 为光转换因子即吸收光的初始利用效率, 小麦中可取值为 $0.45 \cdot \text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} / (\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$, PAR 为吸收的光合有效辐射。

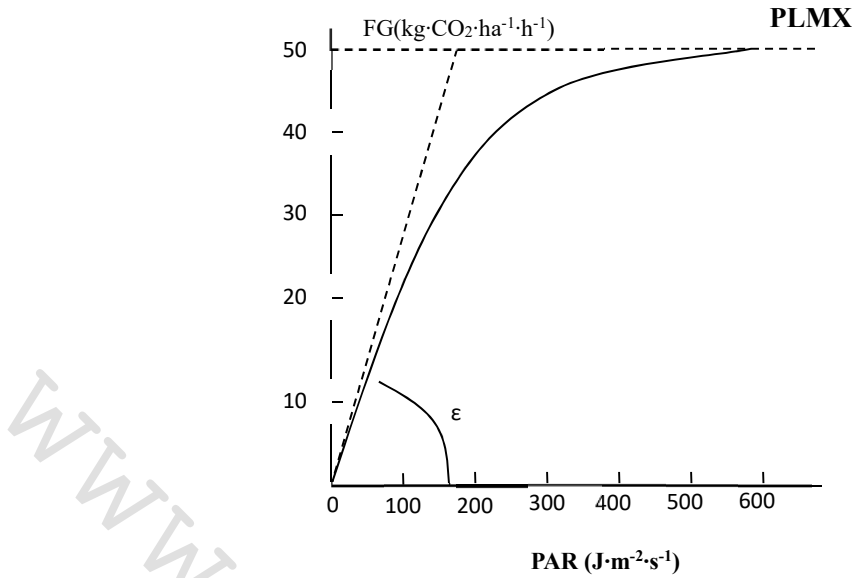


图 2.11 小麦植株单叶总光合作用速率 (FG) 对吸收的光合有效辐射强度 (PAR) 的反应曲线

3.2.2 冠层光合作用

冠层光合作用是指所有叶片、茎及后期的生殖器官的光合作用速率的总和。每天的光合生产量可由单叶光合作用速率对叶面积指数和日长进行积分求得。研究表明,采用高斯积分法来计算每日冠层的光合作用速率,可在保证计算精度的前提下,大大减少计算量。为计算冠层光合作用,可以把冠层分为相对较薄的叶层。冠层接受的光强随冠层深度而减弱。

CropGrow 模型高斯积分方法是将叶片冠层分为五层,将每层的瞬时同化速率加权求和得出瞬时整个冠层同化速率,在此基础上再计算每日的冠层同化速率。通过选取从中午到日落期间的三个时间点,求取在 3 个时间点上的冠层同化速率进行加权求和,从而得出每日冠层的同化速率。

冠层的分层计算公式为:

$$LGUSS[i]=DIS[i] \times GAI \quad (i=1, 2, 3, 4, 5) \quad (63)$$

式中, $LGUSS[i]$ 为高斯分层的冠层深度, GAI 为植株绿色面积指数, $DIS[i]$ 为高斯五点积分法的距离系数, 其值见表 1。

按照从中午到日落期间选择的三个时间点为:

$$t_h[j]=12 + 0.5 \times DL \times DIS[j] \quad (j=1,2,3) \quad (64)$$

式中, $t_h[j]$ 为真太阳时 (h), DL 为日长 (h), $DIS[j]$ 为高斯三点积分法的距离系数, 其值见表 2.2。

表 2.2 高斯积分三点法和五点法的权重值 (WT) 和距离系数 (DIS)

I	1	2	3	4	5
WT[j]	0.277778	0.444444	0.277778		
WT[i]	0.1184635	0.2393144	0.284444444	0.2393144	0.1184635
DIS[j]	0.112702	0.5	0.887298		
DIS[i]	0.0469101	0.2307534	0.5	0.7691465	0.9530899

在冠层的各层中每层吸收的光合有效辐射量是不同的, 其计算式为:

$$I_{L,a}[i] = \text{PARCAN} \times (1-\rho) \times k \times e^{-k \times \text{LGUSS}[i]} \quad (65)$$

依据选取的不同的时间点, 可以计算出相应的冠层对光合有效辐射的反射率 ρ 值, 然后计算出不同的冠层层次在指定的时间点上吸收的辐射量 $I_{L,a}[i]$ 。冠层各层的光合作用速率 $\text{FGL}[i]$ 可根据负指数型光合作用模型计算:

$$\text{FGL}[i] = \text{PLMX} \times (1 - \text{EXP}(-\varepsilon \times I_{L,a}[i] / \text{PLMX})) \quad (66)$$

式中 $\text{FGL}[i]$ 为冠层中第 i 层的瞬时的光合作用速率 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), $I_{L,a}[i]$ 为冠层中第 i 层所吸收的光合有效辐射 ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

整个冠层的瞬时光合作用速率为冠层中五个层面上光合速率的加权求和:

$$\text{TFG} = (\sum (\text{FGL}[i] \times \text{WT}[i])) \times \text{GAI} \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (67)$$

式中, TFG 为整个冠层的瞬时光合作用速率 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), $\text{WT}[i]$ 为高斯五点积分法积分的权重, 其值见表 1, GAI 为绿色面积指数。

在求取瞬时冠层光合作用速率对日长积分的过程中, 选取了从中午到日落的三个时间点 ($t_h[i]$, $i=1, 2, 3$), 对应着三个不同的反射率 ρ 值, 从而可得到在这三个时间点上的瞬时冠层光合速率 ($\text{TFG}[i]$, $i=1, 2, 3$), 然后用 $\text{TFG}[i]$ 用高斯三点积分法对日长进行积分, 最终计算出每日冠层的总光合作用量:

$$\text{DTGA} = (\sum (\text{TFG}[j] \times \text{WT}[j])) \times \text{DL} \quad (j=1,2,3) \quad (68)$$

式中, DTGA 为每日冠层的总光合作用量 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), DL 为日长 (h), $\text{TFG}[j]$ 为对应于第 j 个时刻的冠层的瞬时光合速率 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), $\text{WT}[j]$ 为高斯三点积分法积分的权重, 其值见表 2-2。

3.3 环境因子对光合作用的影响

影响光合作用的环境因子主要有温度、 CO_2 浓度、水分、氮素营养等。这些因子对光合作用都有显著的影响。CropGrow 模型通过建立不同环境因子对光合

作用影响的效应因子来量化单个环境因子的影响程度,然后利用影响因子进一步对光合作用进行修订,其中,温度和 CO₂ 的效应因子直接修订叶片光合作用最大速率,水分和氮素的效应因子用来修订冠层每日总同化量。一般表达式为:

$$PLMAX=PLMX \times FT \times FC \quad (69)$$

$$FDTGA=DTGA \times \text{MIN}(FH, FN) \quad (70)$$

上述方程中, PLMAX 为实际光合作用最大速率 (kg·CO₂·ha⁻¹·h⁻¹); PLMX 为理想条件下的光合作用最大速率,它是品种的遗传参数,不同品种有一定的变化,如小麦中一般取值为 40 kg·CO₂·ha⁻¹·h⁻¹; FDTGA 为每日实际总同化量 (kg·CO₂·ha⁻¹·d⁻¹); DTGA 为每日总同化量 (kg·CO₂·ha⁻¹·d⁻¹); FT、FC 分别为温度和 CO₂ 对光合作用最大速率的影响因子; FH 和 FN 分别为水分和氮素对每日同化量的修正因子。

3.3.1 温度

温度主要对光合作用中的叶片最大光合速率有较大的影响(图 2.12)。此外,随着植株的衰老,最大光合速率也有一定的降低。以小麦为例,可采用三段线性函数来描述温度对 PLMX 的影响因子:

$$FTMP = \begin{cases} 0 & -10 \leq T_{24H} < T_b \text{ or } T_{24H} \geq T_{\max} \\ \sin \left((T_{24H} - T_b) / (T_{ol} - T_b) \times \pi / 2 \right) & T_b \leq T_{24H} < T_{ol} \\ 1 & T_{ol} \leq T_{24H} < T_{ou} \\ \cos \left((T_{24H} - T_{ou}) / (T_{\max} - T_{ou}) \times \pi / 2 \right) & T_{ou} \leq T_{24H} < T_{\max} \end{cases} \quad (71)$$

式中, T_{24H} 为日平均温度 (°C); T_b 为基点温度,取值为 0°C; T_{ol} 为最适温度的下限值,取值为 10°C; T_{ou} 为最适温度的上限值,取值为 30°C; T_{max} 为最高温度,取值为 40°C。

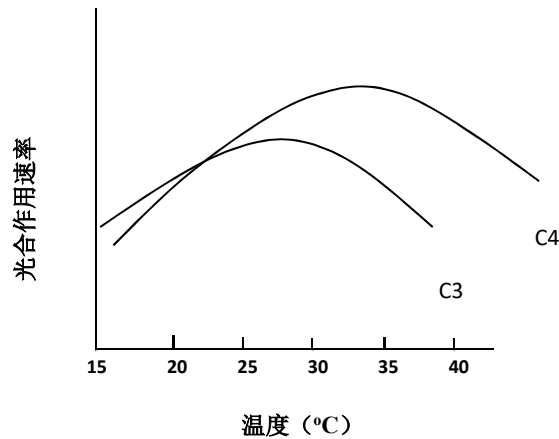


图 2.12 温度对 C3 和 C4 作物光合作用速率的影响

3.3.2 CO₂ 浓度

正常大气环境中的 CO₂ 浓度为 340 ppm 左右，但随着全球气候变化，大气中 CO₂ 浓度呈现升高的趋势。此外，在设施环境中或控制环境下 CO₂ 浓度可能明显高于或低于 340 ppm。空气中 CO₂ 浓度直接影响光合作用强度，随着 CO₂ 浓度的增加，光合作用强度增加（图 2.13）。

高浓度或低浓度 CO₂ 对作物的影响可根据变化的 CO₂ 浓度与 340 ppm 之比来校正光合作用最大速率 PLMX，其订正因子计算如下：

$$FC = (1 + \alpha \ln(C_x / C_o)) \quad (72)$$

式中，C_x 为变化的 CO₂ 浓度（ppm），C_o 为参照 CO₂ 浓度（即 340 ppm），α 为经验系数，对 C3 作物 α 取值 0.8。

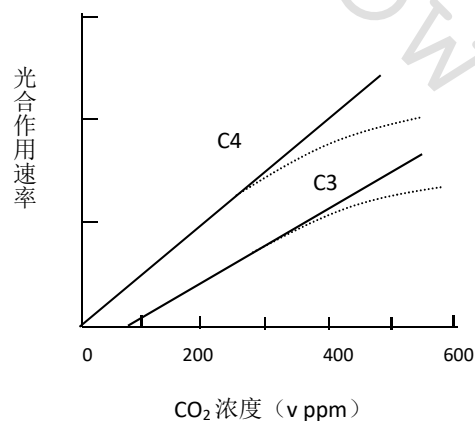


图 2.13 CO₂ 浓度（容积浓度 v ppm）对 C3 和 C4 作物叶片光合作用速率的影响

3.3.3 水分

植株体内的水分含量直接影响着绿色器官光合作用速率，可采用水分效应因

子来描述水分对光合作用的影响，公式如下：

$$FH = \begin{cases} 0 & \theta_I < \theta_{WP} \\ (\theta_I - \theta_{WP}) / (\theta_{O,L} - \theta_{WP}) & \theta_{WP} \leq \theta_I < \theta_{O,L} \\ 1 & \theta_{O,L} \leq \theta_I \leq \theta_{O,H} \\ 0.5 + 0.5 * (\theta_I - 1) / (\theta_{O,H} - 1) & \theta_I > \theta_{O,H} \end{cases} \quad (73)$$

式中， θ_I 为 0—30cm 土层平均含水量 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)， $\theta_{O,L}$ 为最适土壤水分含量下限， $\theta_{O,H}$ 为最适土壤水分含量上限， θ_{WP} 为凋萎点土壤水分含量。

3.3.4 氮素

植株的 N 含量对光合作用过程中的一些反应和酶活性都有不同程度的影响，因而采用氮素效应因子，订正光合作用速率以及其它过程。以小麦为例，其公式如下：

$$FN = 1 - (NA - NC) / (NC - NL) \quad (74)$$

式中，FN 为氮素因子，NA 为小麦植株实际含氮量，NC 为小麦植株临界含氮量，NL 为小麦植株最小含氮量。

3.3.5 生理年龄

作物叶片光合能力随叶片衰老而逐渐下降，叶片含 N 量的降低仅是叶片光合能力下降的原因之一。其它衰老因素诸如 Rubisco 的活性与数量的降低、非结构碳水化合物浓度的降低以及气孔功能的敏感性下降等对此也有一定影响。因此叶片生理年龄对 PLMX 的影响应区别与叶片含 N 量而单独予以考虑，可以建立生理发育时间对 PLMX 的效应因子模型。例如，以下是水稻生理发育时间对 PLMX 的效应因子模型：

$$FA = \begin{cases} 1 & PDT < 28 \\ EXP[-a \times (PDT - 28)] & 28 \leq PDT \leq 57 \end{cases} \quad (75)$$

3.4 呼吸作用

呼吸作用包括光呼吸和暗呼吸，其中暗呼吸又包括生长呼吸和维持呼吸。

3.4.1 维持呼吸

活的有机体不断地利用能量，维持其现有的生化和生理状态，这种能量由维持呼吸提供。维持呼吸的强度与生物量或蛋白质含量成正比，同时对温度较敏感。

$$RM = Rm(T_0) \times FDTGA \times Q_{10}^{(T_{mean} - T_0) / 10} \quad (76)$$

式中，RM 为维持呼吸消耗量 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)；FDTGA 为每日冠层总同化量 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$)； T_0 为作物呼吸的最适温度，对小麦， $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ； Q_{10} 为呼吸作用的温度系数，取 $Q_{10} = 2$ ； T_{mean} 为日平均气温； $R_m(T_0)$ 为 T_0 时的维持呼吸系数，小麦取 $R_m(T_0) = 0.015$ ($\text{g} \cdot \text{CO}_2 / \text{g} \cdot \text{CO}_2$)。

3.4.2 生长呼吸

生长呼吸与作物的有机质合成、植株体的增长以及新陈代谢活动有关，它依赖于植株的光合速率，对温度不敏感。

$$RG = R_g \times \text{FDTGA} \quad (77)$$

式中，RG 为生长呼吸消耗量 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)， R_g 为生长呼吸系数，取 $R_g = 0.39$ ($\text{g} \cdot \text{CO}_2 / \text{g} \cdot \text{CO}_2$)，FDTGA 为当天的光合同化量 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

3.4.3 光呼吸

光呼吸与光合反应等生理过程有关，C3 作物的光呼吸明显，并且由光呼吸导致的同化损失随着温度升高和光强增大而增加。C4 作物中的光呼吸几乎被完全抑制，因此可以忽略不计。

$$RP = \text{FDTGA} \times R_p(T_0) \times Q_{10}^{(T_{\text{day}} - T_0) / 10} \quad (78)$$

式中，RP 为光呼吸消耗量 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)；FDTGA 为当天的总光合同化量 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)， $R_p(T_0)$ 为温度 T_0 时的光呼吸系数，取值为 0.33； T_{day} 为白天的温度；其余符号含义同前。

3.5 同化物积累与生物量

3.5.1 群体净同化量

群体的净同化量等于光合作用的生产量减去呼吸作用的消耗量。计算如下：

$$\text{PND} = \text{FDTGA} - \text{RM} - \text{RG} - \text{RP} \quad (79)$$

式中，PND 为群体的净同化量，FDTGA 为每日总同化量 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)，RM 为群体维持呼吸消耗量 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)，RG 为群体生长呼吸消耗量 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)，RP 为群体光呼吸消耗量 ($\text{kg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。

3.5.2 群体干物质积累

作物通过光合作用生产的最初同化物主要为葡萄糖和氨基酸，二者随后用于形成植株干物质，在最初的 CO_2 同化到转化成碳水化合物及干物质，存在着几个转换系数。群体干物质的日增量公式可表达为：

$$\text{TDRW} = \xi \times 0.95 \times \text{PND} / (1 - 0.05) \quad (80)$$

式中，TDRW 为作物植株干物质的日增量 ($\text{kg}\cdot\text{DM}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)； ξ 为 CO_2 与碳水化合物 (CH_2O) 的转换系数， $\xi = (\text{CH}_2\text{O})$ 分子量 / CO_2 分子量 = $30/44=0.682$ ；0.95 为碳水化合物转换成干物质的系数，0.05 为干物质中的矿物质含量。

4. 同化物分配与产量品质形成模型

同化物在不同器官间的分配与再分配模式随作物种类和生育进程而变。CropGrow 模型采用物质分配指数方法模拟同化物分配，以生理发育时间(PDT)为尺度表示发育进程，建立作物各器官干物质分配指数与生理发育时间关系的模拟模型，以提高模型对干物质分配预测的精度和对环境条件的适应性。

4.1 干物质在地上与地下部分的分配

假设植株冠层光合生产累积的生物量首先在地上部与地下部之间进行分配，然后以地上部分分配量为基础，再进一步向叶、茎鞘和穗中进行分配。用分配指数来描述总干物质在植株地上部与地下部之间的分配比率。

将地上部与地下部的分配指数定义为植株地上部分或地下部分干重占整株干重的比例：

$$\text{PIS} = \text{TOPWT} / \text{BIOMASS} \quad (81)$$

$$\text{PIR} = \text{ROOTWT} / \text{BIOMASS} \quad (82)$$

式中，PIS、PIR 分别为地上和地下部分的分配指数，TOPWT、ROOTWT 分别为地上和地下部分的干物重，BIOMASS 为群体生物量。

作物在生长不受营养、水分等限制的条件下，出苗后随植株的生长，生物量向地上部的分配逐渐增多。以水稻为例，地上部的生物量分配指数由生育初期的 0.63 逐渐增加到成熟时的 0.92 左右，可用一个二次曲线函数对其进行拟合，由此初步建立水稻地上部与地下部生物量分配指数随生理发育时间变化的基本模式 (图 2.14)：

$$\text{PISH} = -8.42 \times 10^{-5} \times \text{PDT}^2 + 0.01 \times \text{PDT} + 0.63 \quad (83)$$

$$\text{PIRO} = 1 - \text{PISH} \quad (84)$$

式中，PISH、PIRO 分别为地上部与地下部的生物量分配指数，定义为植株地上部或地下部干重占植株总干重的比例；PDT 为描述水稻发育进程的生理发育时间。

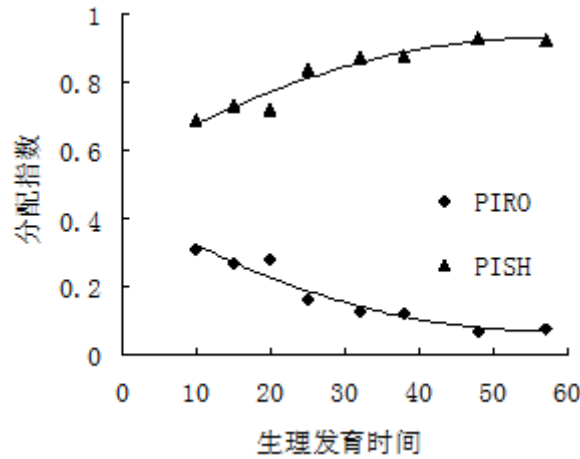


图 2.14 水稻地上部与地下部干物质分配指数随生理发育时间(PDT) 的变化动态

4.2 干物质在地上部各器官间的分配

地上部分中绿叶、茎、果实（穗）的分配指数的定义如下：

$$FLVG = WLVG / TOPWT \quad (85)$$

$$FST = WST / TOPWT \quad (86)$$

$$FSP = WSP / TOPWT \quad (87)$$

式中，FLVG、FST、FSP 分别为绿叶、茎和果实（穗）的分配指数，WLVG、WST、WSP 分别为绿叶、茎和果实的干重，TOPWT 为地上部干重。

以水稻为例，通过试验发现，叶片、茎鞘及穗的干重占地上部干重的比例，即分配指数，随生理发育时间的变化动态遵循一个基本模式，那就是各器官的分配指数均为生理发育时间（PDT）的函数。绿叶的干物质分配指数（PIGL）在出苗时最高，以后则随 PDT 的增加而逐渐降低，其降低过程明显分为两段，以 PDT = 26 时为转折点，PDT = 26 约为穗分化末期，接近孕穗（PDT = 28）。在此之前植株生长中心由叶片逐渐向茎鞘转移，PIGL 以较小速率线性下降，由出苗时的 0.54 降为 PDT = 26 时的 0.42 左右；在此之后进入茎鞘干重迅速增长期和幼穗干重增长初期，茎鞘成为植株生长中心，并逐渐向穗转移，致使 PIGL 以较快速率、指数式下降，一直降低到成熟时的 0.10 左右。茎鞘的分配指数在抽穗前随 PDT 的增加逐渐增大，灌浆初期（PDT 为 35）达到最大值 0.55-0.60，此后随生长中心向穗的转移而迅速下降。穗的分配指数由 PDT = 24 时开始随 PDT 的增加而迅速增大，其动态轨迹呈典型的 Logistic 函数模式。建立各器官干物质分配指数随 PDT 变化的基本模式：

$$PIGL = \begin{cases} 0.54 - 0.0046 \times PDT & PDT < 26 \\ 1.4532 \times \exp(-0.0492 \times PDT) & PDT \geq 26 \end{cases} \quad (88)$$

$$PIP = \begin{cases} PPIP \times \frac{1}{1 + \exp[-0.2804 \times (PDT - 39)]} & PDT \geq 24 \\ 0 & PDT < 24 \end{cases} \quad (89)$$

$$PIS = 1 - PGIL - PIP \quad (90)$$

式中，PIGL、PIPA 和 PIS 分别为绿叶、穗和茎鞘的干物质分配指数；PPIP 为潜在穗分配指数，与品种潜在收获指数 PHI 有比例关系，PHI 为品种特定的遗传参数。

$$PHI = PPIP \times 0.87 \quad (91)$$

4.3 影响干物质分配的因子

植株干物质在各器官间的分配指数均为生理发育时间的函数，基因型、播期及 N 营养水平对各器官干重分配指数的基本模式没有显著影响，但影响分配指数值的大小。

在实际生产条件下，当植株发生水分亏缺时，分配到地上部的干物质减少，而分配到地下部的干物质质量则相应增加，因此需用水分亏缺因子调节地上部的干物质分配量。

$$ASHOOTWT_i = ASHOOTWT_{i-1} + (SHOOTWT_i - SHOOTWT_{i-1}) \times WDF \quad (92)$$

$$AROOTWT_i = ABIOMASS_i - ASHOOTWT_i \quad (93)$$

$$WDF = \min(1.0, 0.5 + AEVC / PEVC) \quad (94)$$

式中，ASHOOTWT_i、ASHOOTWT_{i-1} 分别为第 i 天、第 i-1 天的地上部实际干重 (kg·hm⁻²)；AROOTWT_i 为第 i 天地下部的实际干重 (kg·hm⁻²)；WDF 为水分亏缺对分配指数的影响因子，其值在 0~1 间；AEVC 与 PEVC 分别是冠层实际蒸腾与潜在蒸腾，由土壤水分平衡模型计算。

在实际生产条件下，环境因子对绿叶和穗的每日干物质分配量进行调节：

$$AWGL_i = AWGL_{i-1} + (WGL_i - WGL_{i-1}) \times \min(WDF, NNI) \quad (95)$$

$$AWPA_i = AWPA_{i-1} + (WPA_i - WPA_{i-1}) \times \min(HTF, LTF) \quad (96)$$

$$AWST_i = ASHOOTWT_i - AWGL_i - AWPA_i \quad (97)$$

式中，AWGL_i、AWPA_i、AWST_i 分别为第 i 天绿叶、穗和茎鞘的实际干物质质量 (kg·hm⁻²)；AWGL_{i-1}、AWPA_{i-1} 分别是第 i-1 天绿叶和穗的实际干物质质量

($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); 而 WGLi-1 、 WPAi-1 则分别为第 $i-1$ 天绿叶和穗的潜在干物质量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); WDF 是水分亏缺因子; NNI 为 N 营养指数; HTF 和 LTF 分别为不利高温和低温对结实率的影响因子, 由 Horie 等的研究结果得到, 其计算公式如下:

$$\text{HTF}=1/\{1+\exp[-0.853\times(\text{Tm}-36.6)]\} \quad 32\leq\text{PDT}\leq 39 \quad (98)$$

$$\text{LTF}=1-(4.6+0.054\times\text{Qt}^{1.56})/100 \quad 26\leq\text{PDT}\leq 39 \quad (99)$$

$$\text{Qt}=\sum(22-\text{T}) \quad \text{T}\leq 22^{\circ}\text{C} \quad (100)$$

式中, Tm 为抽穗至灌浆初期的日最高温度; T 为光敏感阶段结束至开花后 4 天内的日平均温度。

4.4 产量形成的模拟

产量的计算需要考虑作物成熟时籽粒干重占穗重的比例, 以及籽粒水分对产量的修订因子, 水稻成熟时稻谷干重占穗重的比例一般约为 0.82~0.92, 平均为 0.87, 小麦为 0.8; 水稻水分含量对产量的修订系数为 1.14, 小麦为 1.125。若籽粒产量以烘干重表示, 则不需再用水分修订系数。例如水稻产量的计算方程为:

$$\text{YIELD}=\text{AWPA}\times 0.87\times 1.14 \quad (101)$$

三、CropGrow 模型应用

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，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。例如，通过构建尺度效应指数 S ，分析中国冬小麦主产区 2000-2009 年不同空间分辨率气象数据对 WheatGrow 区域光温产量潜力模拟的影响，并采用尺度效应指数 S 阈值确定研究区域光温产量潜力模拟所需气象数据适宜空间分辨率 ASR^S （图 3.1）。同时，对 DEM 进行半方差函数分析，利用尺度效应指数 S 与 DEM 半方差函数基台值 ζ 之间的关系，基于地形空间异质性获取气象数据适宜空间分辨率 ASR^S （图 3.2）。并对比两种方法所得结果，探讨地形空间异质性对区域光温资源分布的影响及利用地形空间异质性获取 WheatGrow 区域光温产量潜力模拟所需气象数据适宜空间分辨率的效果和可行性。通过研究空间插值过程中不同分辨率对模拟结果精度的影响，可确定我国冬小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 3.3）。

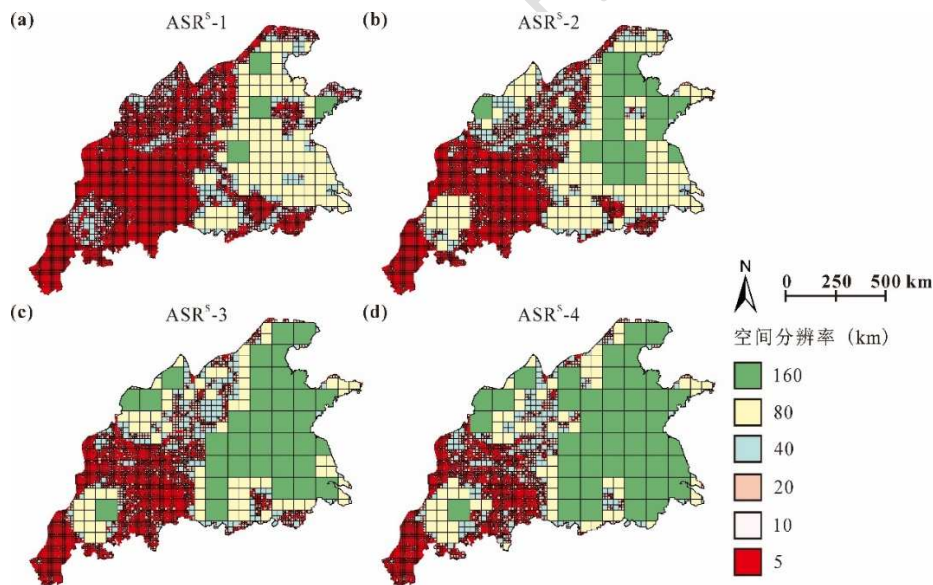


图 3.1 基于尺度效应指数 S 的区域光温产量潜力模拟气象数据适宜空间分辨率

(a) 尺度效应指数 S 阈值为 $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 的适宜空间分辨率 ASR^S-1 ；(b) 尺度效应指数 S

阈值为 $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 的适宜空间分辨率 ASR^S-2 ；(c) 尺度效应指数 S 阈值为 $300 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 的适宜空间分辨率 ASR^S-3 ；(d) 尺度效应指数 S 阈值为 $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 的适宜空间分辨率 ASR^S-4

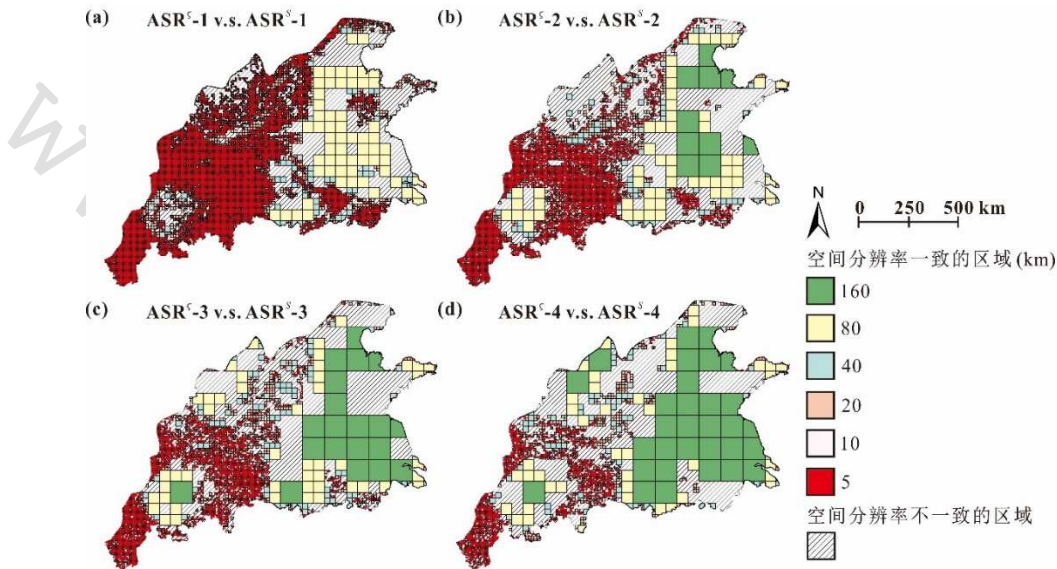


图 3.2 基于尺度效应指数 S 与 DEM 半方差函数基台值 ζ 所得气象数据适宜空间分辨率对比分布

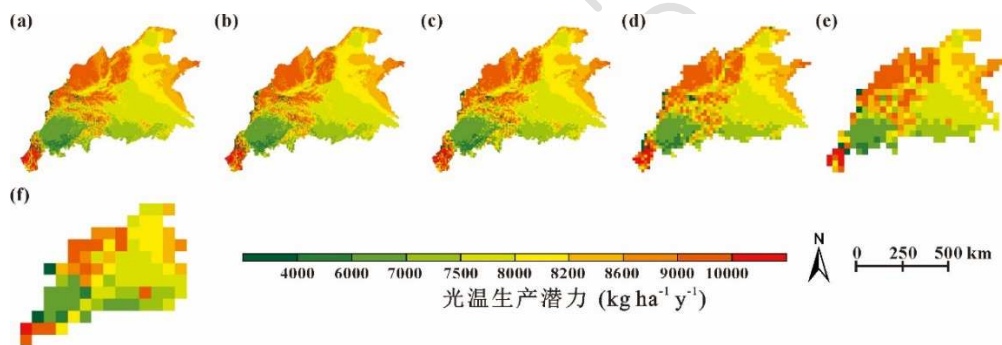


图 3.3 研究区域多分辨率光温产量潜力模拟结果空间分布

(a)-(f)分别为空间分辨率分 5km, 10km, 20km, 40km, 80km, 160km

2. 模型与遥感耦合

遥感可在田块到区域等不同尺度，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，遥感信息与作物生长模型相结合，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，是实现区域化作物生长和生产力精确预测的有效路径。

遥感与模型的耦合过程中，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。例如，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融合参数，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（图 3.4 和图 3.5）。

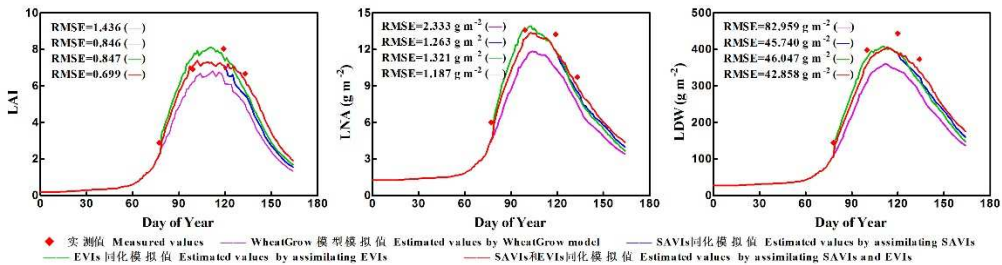


图 3.4 模型与遥感耦合后预测的小麦叶面积指数（LAI）、叶片氮积累量（LNA）和叶片干物重（LDW）和实测值的对比

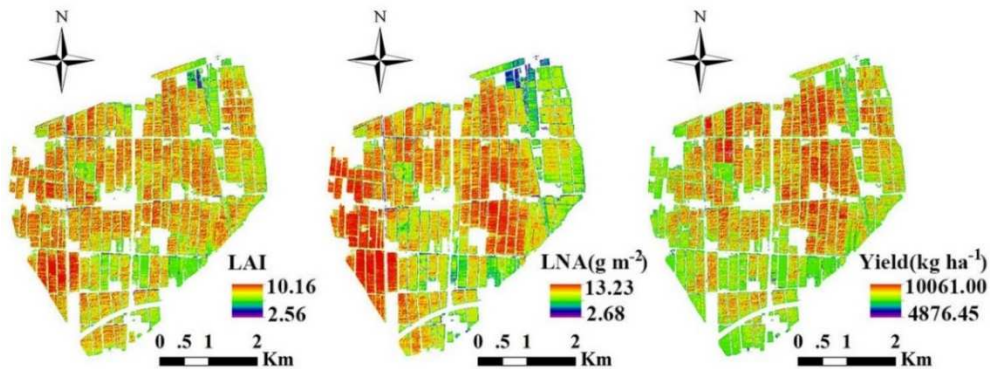


图 3.5 遥感信息与 WheatGrow 模型耦合后预测的沿湖农场小麦叶面积指数（LAI）、叶片氮积累量（LNA）和籽粒产量（Yield）

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和应对措施。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、产量差和水分利用状况进行了评价。综合利用 RiceGrow、CERES-Rice、ORYZA v3 三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（图 3.6a 和 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 3.6c 和 d）。

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，并基于市场均衡理论，提出了我国水稻的供需平衡估算模型，实现了基于模型的粮食生产力预测预警，为国家粮食安全生产提供了数字化支持。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率。例如，以我国太湖地区为研究对象，定量了 1980 年到 2010 年间气候变化、土壤改良、品种更新和措施优化对水稻生产力提升的贡献分别为-19.5%、12.7%、21.7%和 34.6%（图 3.7）。

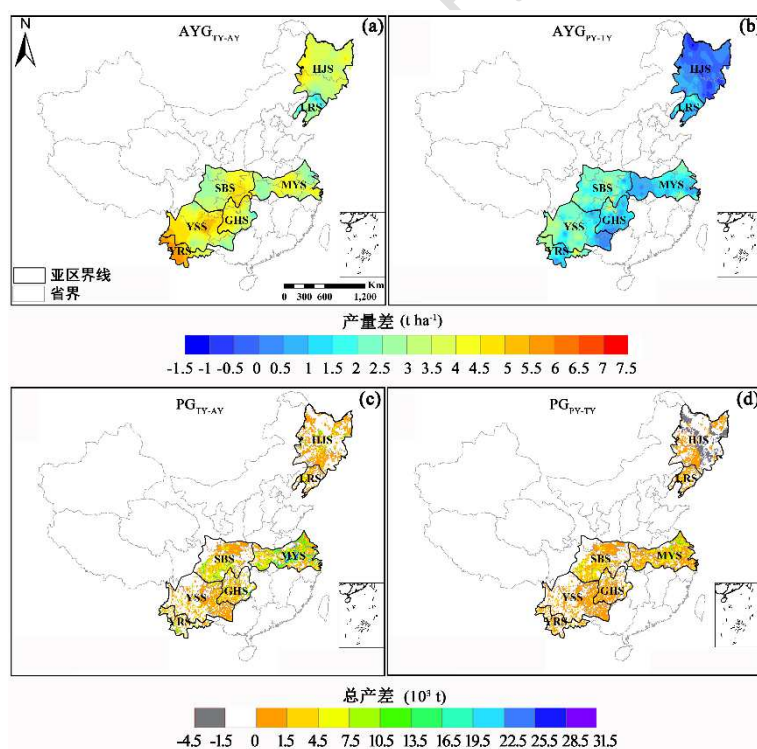


图 3.6 中国水稻主产区不同层次单产和总产量差的空间分布特征。(a) YG_{TY-AY} : 目标产量-实际产量; (b) YG_{PY-TY} : 潜在产量-目标产量; (c) PG_{TY-AY} : $YG_{TY-AY} \times$ 种植面积; (d) PG_{PY-TY} : $YG_{PY-TY} \times$ 种植面积

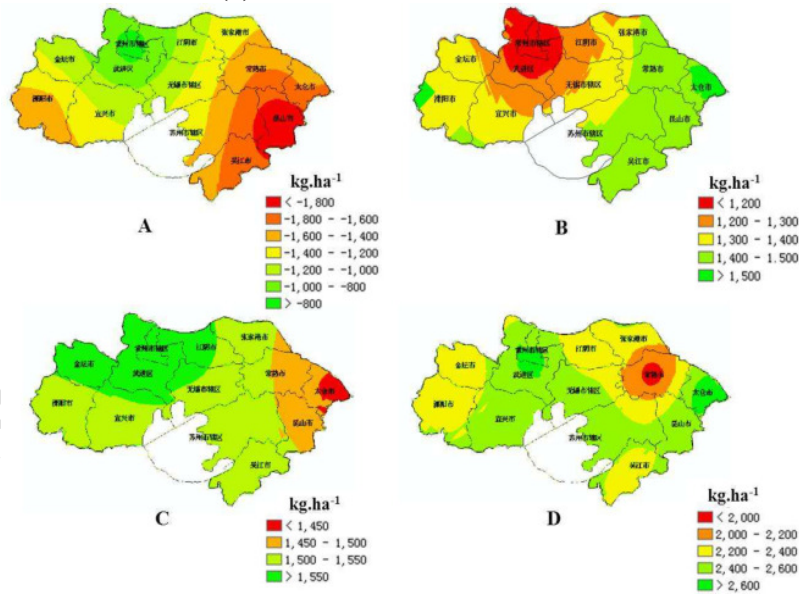


图 3.7 1980-2010 年太湖区域不同要素对水稻产量提升的贡献率 (A: 气候变化; B: 土壤改良; C: 品种更新; D: 措施优化)

4. 数字化设计与决策支持

随着 CropGrow 模型各个模块的建立与完善, 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 3.8)。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 3.9)。

基于多年的历史和未来气象数据, 利用作物生长模型可以开展不同空间尺度的气候变化效应评估。例如, 利用 WheatGrow 模型结合全球气候模型 (GCM), 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。结合 IPCC 最新气候变化预估结果，综合利用 RiceGrow、ORYZA2000 和 DSSAT-Rice 三套水稻模型，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。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（图 3.10）。在耕地利用决策评价和农业规划政策制定上，利用作物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。

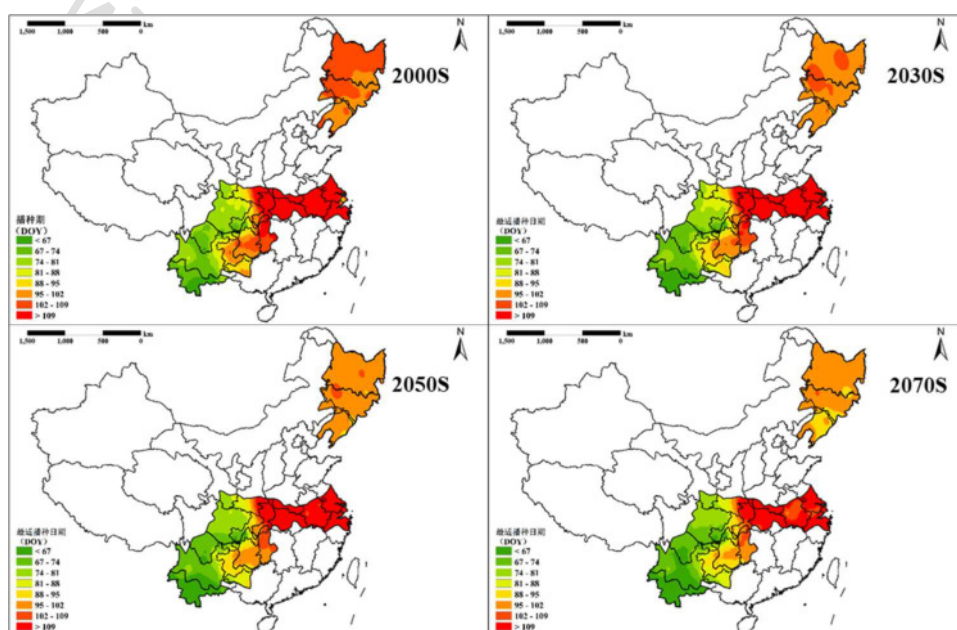


图 3.8 我国水稻主产区不同气候情景下的适宜播期空间分布

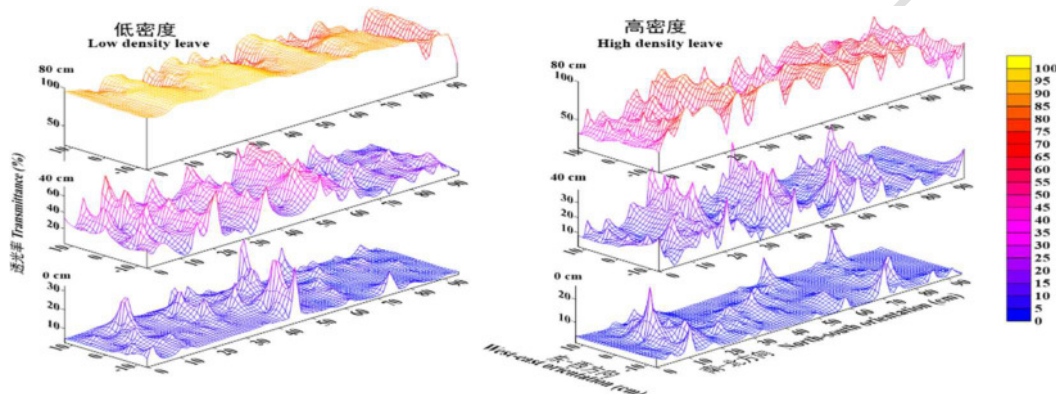


图 3.9 小麦紧凑型 and 披散型株型消光系数的动态变化

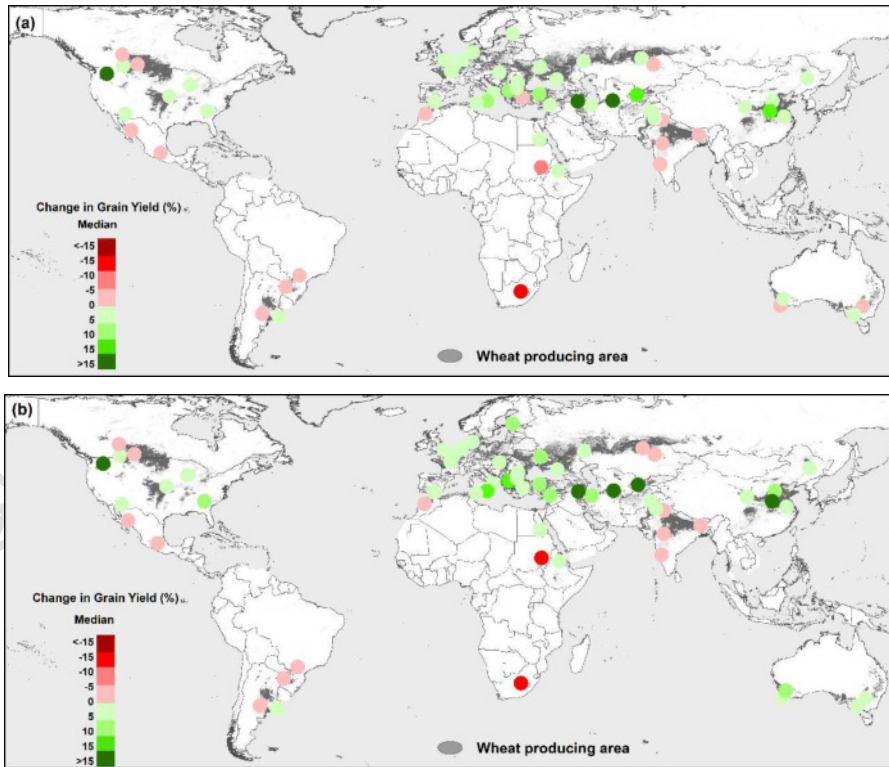


图 3.10 全球增温 (a) 1.5°C 和 (b) 2.0°C 情景下基于多模型集合预估的全球 60 个典型生态站点小麦产量的变化

5. 生长模拟与决策支持平台

在 CropGrow 模型构建的基础上，利用计算机构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，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 3.11），具有多功能、空间化、数字化、可视化等特点。例如，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 3.11b），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 3.11c）；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 3.11d）；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是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，实现粮食安全保障的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)，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。

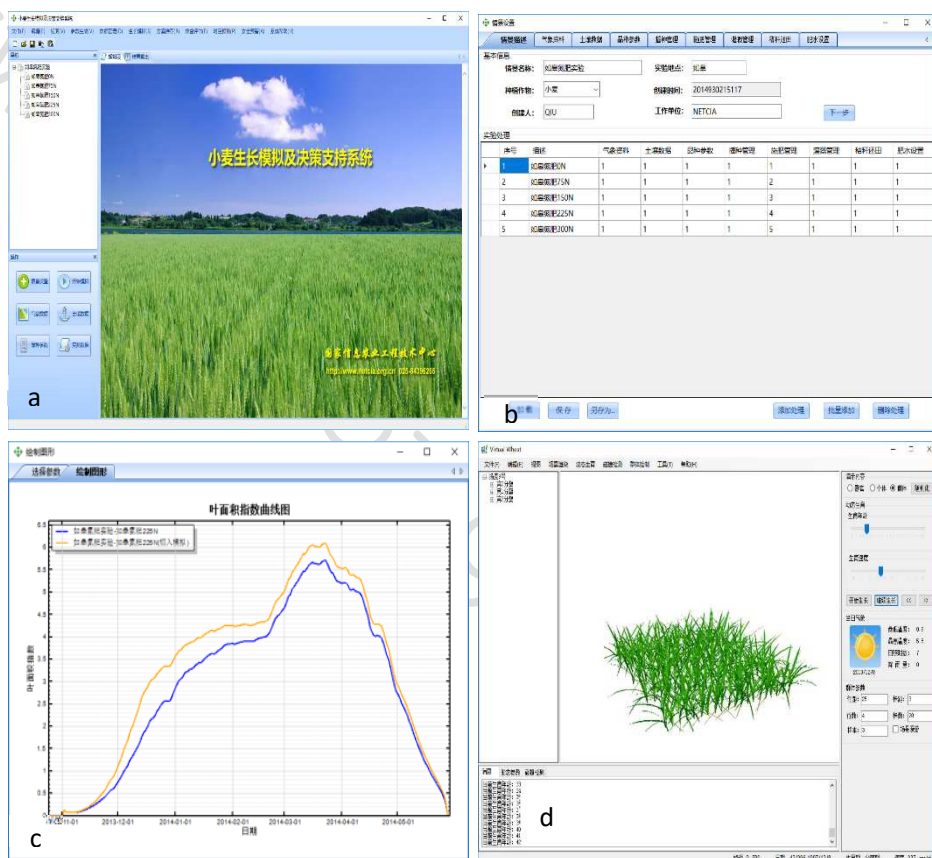


图 3.11 作物生长模拟与决策支持系统界面

参考文献

1. 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.
2. 曹卫星. 数字农作技术. 北京: 科学出版社, 2008.
3. 朱艳, 汤亮, 刘蕾蕾, 刘兵, 张小虎, 邱小雷, 田永超, 曹卫星. 作物生长模型 (CropGrow) 研究进展. 中国农业科学, 2020, 53(16): 3235-3256.
4. PENNING DE VRIES F W T, JANSEN D M, TEN BERGE H F M, BAKEMAA . .
Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops.
Wageningen: Pudoc, 1989.
5. TANG L, ZHU Y, HANNAWAY D, MENG Y, LIU L, CHEN L, CAO W. RiceGrow:
A rice growth and productivity model. NJAS- Wageningen Journal of Life Sciences,
2009, 57: 83-92.