

张伟欣, 吴 茜, 孙传亮, 等. 油菜株型模拟研究进展[J]. 江苏农业学报, 2022, 38( 2 ): 549-557.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.02.031

## 油菜株型模拟研究进展

张伟欣<sup>1,2</sup>, 吴 茜<sup>1</sup>, 孙传亮<sup>1</sup>, 李 红<sup>2</sup>, 张玲玲<sup>1</sup>, 岳延滨<sup>3</sup>, 梁万杰<sup>1</sup>, 宣守丽<sup>1</sup>,  
曹 静<sup>1</sup>, 张美娜<sup>1,4</sup>, 尹迎军<sup>1</sup>, 韩旭杰<sup>1</sup>, 潘 月<sup>1</sup>, 吴 菲<sup>1</sup>, 丁昊迪<sup>1</sup>, 葛道阔<sup>1</sup>,  
曹宏鑫<sup>1</sup>, 张文宇<sup>1,4</sup>

(1.江苏省农业科学院农业信息研究所/农业数字孪生联合实验室、种质资源创新与信息化利用联合实验室, 江苏 南京 210014; 2.江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 3.贵州省农业科学院科技信息研究所, 贵州 贵阳 550006; 4.江苏大学农业工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 株型结构是作物表型组学研究的重要内容之一。油菜株型研究不仅有助于量化株型评价, 选育高光效、适宜机械化作业的品种, 也有利于提高油菜生长模型的机理性, 具有重要的科学意义。本文针对当下国内外作物株型研究现状, 重点从传统作物株型和作物株型模拟两个方面分别进行归纳总结, 并着重综述了油菜株型相关研究进展, 最后概要评述了当前在油菜株型研究中存在的关键问题, 提出相关建议, 并展望了未来油菜株型研究趋势。

**关键词:** 油菜; 株型; 功能-结构作物模型模拟

**中图分类号:** S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)02-0549-09

## Research progress on plant type simulation of rapeseed

ZHANG Wei-xin<sup>1,2</sup>, WU Qian<sup>1</sup>, SUN Chuan-liang<sup>1</sup>, LI Hong<sup>2</sup>, ZHANG Ling-ling<sup>1</sup>, YUE Yan-bin<sup>3</sup>, LI-  
ANG Wan-jie<sup>1</sup>, XUAN Shou-li<sup>1</sup>, CAO Jing<sup>1</sup>, ZHANG Mei-na<sup>1,4</sup>, YIN Ying-jun<sup>1</sup>, HAN Xu-jie<sup>1</sup>, PAN Yue<sup>1</sup>,  
WU Fei<sup>1</sup>, DING Hao-di<sup>1</sup>, GE Dao-kuo<sup>1</sup>, CAO Hong-xin<sup>1</sup>, ZHANG Wen-yu<sup>1,4</sup>

(1. Institute of Agricultural Information/YuanQi-IAI Joint Laboratory for Agricultural Digital Twin, IGRB-IAI Joint Laboratory of Germplasm Resources Innovation & Information Utilization, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Institute of Agricultural Sci-tech Information, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China; 4. School of Agriculture Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The plant type of rapeseed is one of the important contents of crop phenomics, and the research on plant type is of great scientific significance for enhancing the mechanism of rapeseed plant growth model, quantifying the evaluation

收稿日期: 2021-07-08

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31871522, 31601223, 31201127, 31171455, 31471415); 江苏省农业科技自主创新基金项目[ CX(19)2040, CX(20)3070 ]; 江苏省自然科学基金项目(BK20200277); 江苏省农业科学院基金项目(6111648, 6111645)

**作者简介:** 张伟欣(1988-), 女, 河北石家庄人, 硕士, 助理研究员, 主要从事作物系统模拟方向研究。(E-mail) sunnyxin@hotmail.com

**通讯作者:** 曹宏鑫, (E-mail) caohongxin@hotmail.com; 张文宇, (E-mail) research@wvery.cn

of plant type, and breeding rapeseed cultivars with high light efficiency and suitable for mechanized operation.

This paper mainly summarized the traditional plant types of crops and crop plant type simulation respectively, in view of the current crop plant type research status at home and abroad, reviewed the research progress on rapeseed plant type emphatically, commented the main problems existing in rapeseed plant type at present briefly, and then put forward relevant suggestions, and also prospected the research trend for plant type of rapeseed.

**Key words:** rapeseed; plant type; functional-

structural crop model simulation

油菜作为全球四大油料作物之一,不仅营养丰富,还是新型清洁能源——生物柴油的主要原料<sup>[1]</sup>。10年来(2008–2018生长季),全球油菜生产与消费发展极快,种植面积由 $3.120 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 扩大到 $3.681 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,增长率超过18%;总产量由 $5.817 \times 10^7 \text{ t}$ 增加到 $7.299 \times 10^7 \text{ t}$ ,增长率超过25%;菜籽油消费量由 $2.099 \times 10^7 \text{ t}$ 增长到 $2.808 \times 10^7 \text{ t}$ ,增长率超过33%<sup>[2]</sup>。油菜是中国唯一的冬季油料作物,菜籽油也是中国第一大自产食用植物油<sup>[3]</sup>。国家统计局数据显示,2019年中国油菜籽总产量超过 $1.348 \times 10^7 \text{ t}$ ,较2018年小幅增长1.5%,但以菜籽油等为主的食用植物油自给率仍仅40%左右,每年依赖进口的油菜籽超过 $3.50 \times 10^6 \text{ t}$ ,使中国成为世界上最大的植物油原料进口国<sup>[4]</sup>,严重威胁食品安全。因此,顺应农业信息化、机械化发展需要,利用作物模型技术,提高油菜高光效株型育种效率、提升油菜单产水平,对保持油菜生产的稳定和可持续增长、满足人们食用需求、改善膳食结构、提高复种指数、调整种植结构以及保障能源和环境安全均具有重大意义。

品种和配套栽培技术是油菜高产、稳产的重要保证,而高光效株型设计与调控是选育高产品种和提升配套技术的重要手段<sup>[5]</sup>。目前对油菜株型的表达以披散、紧凑及中间型等定性描述为主,尚未实现对各种株型的量化表达与理论解释。这导致育种学家对株型的选择带有较大经验性,这种经验他人不易掌握或难以复制,客观上延长了育种周期。作物模拟模型与虚拟植物技术为作物株型建模提供了理论方法<sup>[6]</sup>,特别是作为作物表型组学重要研究内容和方法的功能-结构植物模型(Functional-Structural Plant Models, FSPMs)<sup>[7]</sup>,将作物生长模型的功能与作物形态模型的结构有机结合,不仅能模拟植株形态对作物生长的影响,还能将这种影响反馈给植株形态结构,形成新的循环,已初步应用于生产实践<sup>[8]</sup>。本文在总结当下国内外关于作物株型研究现状的前提下,重点探讨油菜株型的相关研究进展,并从传统作物株型及作物株型模拟研究等方面进行阐述,总结当前油菜株型研究存在的不足,对油菜株型研究新思路及其未来发展趋势进行展望。

## 1 传统株型相关研究进展

株型通常指作物器官(叶片、茎秆或分枝、根系

等)在不同发育时期群体条件下的整体形态表现及其动态变化,特指叶片和茎秆在植株上的空间分布状态。株型亦可说是植株外观形态和内部生理功能的综合描述,是受群体影响的个体参数<sup>[9]</sup>。许多学者早在株型概念提出之前就致力于作物株型相关研究,发现合理的株型更有利于高产和稳产<sup>[10]</sup>。直到20世纪60年代,作物理想株型(Plant Ideotype)概念才被首次提出<sup>[11]</sup>,此后,许多学者在水稻、小麦等主要粮食作物上开展株型相关研究<sup>[12–13]</sup>,阐述了栽培因素(播期、种植密度等)和环境因子(光照、温度、水分、肥料等)对株型的影响,为高产育种和栽培提供参考,对育种工作提出了有益见解,并取得较好的社会效益和经济效益。近年来,传统作物株型研究表现出对株型机理研究更深入、对株型评价参数的影响研究更全面、更精细等趋势。

### 1.1 栽培因素对株型的影响

作物株型具有一定的可塑性,一般可通过栽培管理措施进行调控。张晓萍等<sup>[14]</sup>认为播期对株高、成穗数、有效小穗数、节间长和叶面积等有显著影响。韦还和等<sup>[15]</sup>比较了甬优12高产、更高产和超高产水稻群体的株型特征,认为株高、穗长、穗粒数、一次和二次枝梗数、倒三叶长宽及卷曲率等指标对产量影响较大。杨峰等<sup>[16]</sup>探明了不同株型玉米与大豆带状套作对大豆生长环境动态及干物质形成和产量变化的影响规律。茆建峰等<sup>[17]</sup>通过分析叶向值等株型评价参数随玉米种植行距的变化,提出了形成最佳群体结构及抗性的种植行距。

油菜株型结构明显不同于禾谷类作物,从花期开始,叶片逐渐变黄脱落,参与光合作用的主要功能区在结角层,植株形态发生巨大改变,造成油菜株型研究相对复杂,因此有学者提出将油菜株型分为花前期、花期和角果形成期分别考虑<sup>[18]</sup>。株型研究的首要目的是获得高产,研究发现,影响油菜单株产量的因素有很多,其中,单株有效角果数是关键<sup>[19–21]</sup>,此外,结角层密度、主花序有效长度、千粒质量和分枝数(一次和二次分枝)也是影响产量的主要因素。种植密度对油菜器官空间分布也有显著影响,主要因为分枝起点和角果层密度的改变影响植株光截获以及光合能力。冷锁虎等<sup>[22]</sup>通过分析3种密度水平下的结角层模式,概括出3种结角层类型,分别为

低密度下的伞式、中密度下的华盖式和高密度下的梭形,并指出华盖式结角层生产力最高。结角层的空间结构是油菜最终产量形成的关键,朱耕如等<sup>[23]</sup>研究发现角果的分布、果轴长度及结角层的光合能力等株型特征与产量密切相关。徐东进等<sup>[24]</sup>认为适当减少下位分枝,有利于提高结角层的光合效率。王俊生等<sup>[25]</sup>提出高密度种植更宜培育油菜理想株型。

传统油菜株型难以实现机械化收割,收割费时费力。宋稀等<sup>[26]</sup>认为机械化高密度种植的油菜理想株型应该是株高和分枝着生高度适中,同时增加结角密度,这与水稻机械化种植的高产株型特征(适中的株高、合理的茎集散度和直立性好等特性)类似<sup>[27]</sup>。孟倩<sup>[28]</sup>通过设置不同播期和密度,研究油菜株型集散度、角果抗裂性及抗倒伏性,发现密植对改变品种株型特性效果显著,而果皮厚度决定了角果抗裂能力。白桂萍<sup>[29]</sup>提出油菜在现有叶型结构下,无法单纯依靠密植追求高产,需要兼顾分枝数和角果数,要实现油菜超高密度增产潜力,叶型与冠层结构需同步改良,以提高光合效率。殷燕等<sup>[30]</sup>认为传统栽培模式下油菜群体光合效率偏低,未充分发挥其生产潜力,可通过密植、增加施氮量提高各生育期油菜植株光截获量和光能利用率,从而促进干物质积累<sup>[31]</sup>。倒伏也是影响油菜实现机械化收割的重要因素,有学者认为抗倒油菜理想株型应为分枝起点高度与株高的比值要适中、重心高度与株高的比值要小、分枝数适中、角果分布均匀、株型紧凑<sup>[32-33]</sup>。

## 1.2 环境因素对株型的影响

作物株型受多种因素影响,除其自身遗传因素外,外部环境对作物株型的影响也很大。因此,探究环境因素(地理位置、温度、光照、养分、水分等)与株型结构之间的定量关系,用以构建理想株型至关重要。

油菜的整个生长季需水量较大,干旱胁迫对油菜株型和产量有明显抑制作用,株高、分枝高度、一次分枝数、主花序长均表现出减少的趋势<sup>[34]</sup>。但如果土壤含水量过大,也会造成株高降低、主花序轴变短、一次和二次有效分枝数减少<sup>[35]</sup>,这一结果与陈玉梁等<sup>[36]</sup>在棉花上的株型研究结果表现一致;而水稻在分蘖期全淹胁迫下其株高、穗长、节间长、高效叶面积等株型参数均受较大影响<sup>[37]</sup>。

同样,温光条件对油菜叶片形态建成也有很大影响。作为同化器官,叶片的生长发育极大程度上反应出植株的光合潜力和光能利用效率。光照条件对油菜总分枝数、有效一次分枝数及二次分枝数均有较大影响,高光照度比低光照度更有助于分枝的形成<sup>[38]</sup>。研究结果表明,开花期花瓣密集于冠层且不具备光合能力,反射和吸收了近60%的太阳有效辐射光,严重影响光合产物的合成,因此有学者基于油菜株型结构及其理想株型的系统研究,提出了无花瓣性状是构建油菜理想株型的重要性状之一<sup>[39]</sup>,但目前尚未应用于生产中,原因可能是无花瓣性状与不良经济性状连锁,品种改良难度较大。

作物生长离不开养分,而氮素在油菜生长发育及产量形成过程中起到至关重要的作用<sup>[40]</sup>。有研究结果表明,合理增施氮肥能显著增加分枝数和单株有效角果数<sup>[41]</sup>。同样,株型也会随营养物质在植株体内分配比例的改变而发生变化。作物获取养分和水分的主要器官是根系,它在土壤中的分布形态直接决定着植株获取养分和水分的能力,进而影响地上部器官形态结构建成和生理功能的发挥。与其他养分相比,氮素对油菜根系的生长、分布影响最显著<sup>[42]</sup>。一般而言,作物在缺氮情况下,通常会增加根体积来促进养分吸收<sup>[43]</sup>,但氮素供应过多也会对根系生长产生抑制作用,Seith等<sup>[44]</sup>研究结果表明当氮素供应过多时,根系的生长量相对降低,分析其原因可能是由于高氮限制了根系向深层延伸的能力,从而降低其对深层养分的吸收。

而环境因素对水稻、小麦作物株型影响的研究角度则更广。比如,Li等<sup>[45]</sup>分析了不同生态点水稻叶片角度和叶面积指数等株型特征的区别,认为较小的叶角和较大的叶面积指数有助于高产;Li等<sup>[46]</sup>通过分析不同生态点水稻抽穗期叶长、叶角、叶弯曲度等株型参数的差异,认为冠层厚度、叶片密度等可较好地评价高产株型;金峰等<sup>[47]</sup>认为生态环境对株高、穗弯曲度、穗长及剑叶长、宽、张角等水稻株型参数有明显影响。研究发现,减氮后中日粳稻品种剑叶基角显著变小、叶宽变窄、一次枝梗数显著降低<sup>[48]</sup>。王建永等<sup>[49]</sup>从减少生长冗余的角度,分析了旱地小麦理想株型与生长冗余的相互关系,认为必须以基因型和环境互作关系为基础,减少个体间竞争强度和个体大小不整齐性,促进物质和能量更多地向籽粒迁移,最终提高种群产量。相比之下,



环境因素对油菜株型影响的研究多集中于对产量构成要素等株型指标的研究,较少研究叶型对产量的影响。

与稻、麦相比,棉花和大豆同属双子叶植物,均有分枝与油菜株型更为类似。目前棉花理想株型研究主要侧重于提高水分利用率及机械化收割。有学者研究发现,棉花水分利用率高的理想株型为果节间长度适中、果枝粗、果枝弯曲度小、果枝向值大<sup>[50]</sup>。肖松华等<sup>[51]</sup>对棉花适宜机械化收割的理想株型进行了量化,认为自然株高 75 cm 左右,果枝始于 8 节以上,第一果枝距地面高度大于 20 cm,下部果枝节间平均长度 7.9~9.5 cm,中部果枝节间平均长度 5.4~6.6 cm,上部果枝节间长度 5.2~5.8 cm。果枝是棉花株型重要组成部分,果枝结构影响产量形成。研究发现,株高 90 cm 左右、果节分枝比 2.5 以及果枝弯曲度大于 10°有利于提高籽棉产量<sup>[52]</sup>;刘皓然等<sup>[53]</sup>认为短季直播栽培模式能显著提高棉花植株光能利用率,进而提高产量。唐利忠等<sup>[54]</sup>通过研究播种量与施肥量对春大豆株型、产量构成及机械收割质量的影响,发现大豆株高、底荚高度、倒伏率随播种量和施肥量的增加而增大,单株有效荚数随着播种量的增大而减少,施肥量的增加能有效提高每荚果粒数。

## 2 株型模拟相关研究进展

随着株型研究日趋深入,现代株型概念已拓展至作物自身遗传特性与外部环境因子共同作用后的空间分布形态及其与作物光合潜力直接相关的生理、生态方面的功能性状<sup>[55]</sup>。因此,传统株型研究难以精确直观描述株型。随着作物信息学,特别是作物生长模拟技术的兴起,株型研究开始从定性描述向定量模拟转变<sup>[6]</sup>。Monsi 等<sup>[56]</sup>发展了 Jensen 的株型思想,较早创立了植物冠层结构和功能的定量理论,包括冠层光分布模型、单叶及冠层光合作用模型和最适叶面积模型。此后,许多国内外学者从叶型及冠层结构、基于株型的光分布与光合作用以及株型评价、设计与改良等各个角度开展研究,现分述如下。

### 2.1 叶型及冠层结构模拟

叶片是作物主要的光合器官,叶型也是研究最多的株型指标。早期叶型研究主要通过分析叶片二维形态指标随热时间的变化规律,模拟叶片生长过

程。陈国庆等<sup>[57]</sup>采用 Logistic 方程模拟了 5 个不同株型的冬小麦品种的叶片、叶鞘和节间的伸长动态过程;谭子辉<sup>[58]</sup>通过连续观测不同处理条件下小麦主茎和分蘖叶片形态指标,分析了小麦叶片形态指标随生育进程和环境条件的变化规律,构建了基于生长度日的冬小麦叶片生长过程动态模拟模型。Zhu 等<sup>[59]</sup>通过分析水稻叶片随生育进程的变化规律,模拟了水稻主茎和分蘖叶长和叶宽随生长度日的动态变化。虽然以热时间驱动模型能够精确模拟叶型动态变化,但不易与生长模型结合,难以体现作物生理功能对形态结构的影响。基于生物量的器官形态结构模型解决了这一难题。刘岩等<sup>[60]</sup>和 Cao 等<sup>[61]</sup>通过分析叶片生物量与形态参数间关系,分别构建了基于生物量的水稻叶型模型,体现了同化物分配过程对叶型的影响。陈昱利等<sup>[62]</sup>通过定量分析冬小麦越冬前叶片形态结构参数与生物量关系,构建了基于生物量的冬小麦越冬前叶片形态结构模型。刘永霞等<sup>[63]</sup>通过分析香蕉比叶重与叶位、主茎不同叶位最大叶长与生物量、最大叶长与最大叶宽的关系,构建了基于生物量的香蕉叶片主要几何属性模型。

冠层结构是地上部形态结构和空间分布的整体概念,较为抽象,通常以函数拟合叶倾角分布的形式表达。Kuroiwa<sup>[64]</sup>提出了冠层叶片角度的理想分布,即叶片角度从冠层顶部垂直向底部水平方向变化。申广荣等<sup>[65]</sup>认为水稻叶倾角分布函数峰值区间在 70°~90°,可用双参数椭圆函数模拟。赵星等<sup>[66]</sup>通过在双尺度自动机模型中引入“同步生长机制”和“重复生长机制”,实现了模拟所有植物花序类型。李云梅等<sup>[67]</sup>利用椭圆函数结合 Powell 寻优法,模拟了水稻叶倾角分布。该方法从数学角度对作物叶型及冠层结构进行描述,理论性强,能准确模拟出作物叶型分布状态及冠层结构。

油菜冠层结构与其他作物不同,特别是花后,角果成为主要光合器官。本团队近年来致力于油菜功能-结构模型研究。通过分析同化物分配过程对油菜叶型的影响,除分别从不同角度构建了基于生物量的叶型模型<sup>[68-71]</sup>外,还构建了包括主茎和花序轴、分枝、角果模型<sup>[72-74]</sup>在内的基于生物量的油菜植株地上部器官形态结构模型,这些研究都体现了油菜功能对株型结构的影响,这为后期的油菜功能与结构相互影响及其对环境及栽培措施的响应模拟

并为最终理想株型模拟奠定了研究基础。

相对于稻、麦等作物,单独的油菜冠层结构模拟研究较少,多包含在生长模型中。本世纪前,油菜模型研究主要集中在国外。上世纪 90 年代前,油菜模拟多处于统计模型阶段,90 年代后半叶,先后出现了 EPIC-Rape、DAISY-Rape、LINTUL-BRASNAP、CECOL、CERES-Rape 和 APSIM-Canola 等油菜生长模型<sup>[75]</sup>。进入本世纪以来,国内开始有了自主研制的油菜模型,如:廖桂平等<sup>[76]</sup>采用 Logistic 方程模拟了冬油菜干物质积累、分配与转移;张春雷等<sup>[77]</sup>构建了长江流域油菜生长模型,并开发了优化决策系统;刘铁梅等<sup>[78]</sup>构建了基于生理发育时间的油菜器官干物质分配模型;刘洪等<sup>[79]</sup>在国内较早开展了油菜发育模型研究,此后曹宏鑫等借鉴水稻/小麦模型思路,建立了油菜生长发育模拟模型,并开发了油菜栽培模拟优化决策系统<sup>[80]</sup>;通过利用作物生长模拟技术、计算机软件技术,汤亮等<sup>[81]</sup>研制了油菜生长模型及相应的管理决策支持系统。以上这些生长模型中,油菜的冠层结构均以由其决定的消光系数、分层叶面积指数等参数表示,最终往往被简化为品种参数。

## 2.2 基于株型的光分布与光合作用模拟

随着 FSPMs 的发展,模型机理性逐渐增强,呈现出生长模型的功能与形态模型的结构结合日趋紧密之势。基于株型结构进行光分布与光合作用动态模拟,是功能和结构结合的关键一环。Stewart 等<sup>[82]</sup>通过分析玉米冠层结构、光分布和光合作用,认为冠层叶面积和叶角分布决定了光合有效辐射的截获方式,进而影响产量。Chelle 等<sup>[83]</sup>利用多边形面元和蒙特卡罗框架程序分别模拟了冠层器官的三维结构及其光分布。孟军等<sup>[84]</sup>通过研究直立和半直立穗型水稻群体垂直入射光分布及其对光合作用的影响,认为穗型在决定群体内的垂直入射光分布和顶三叶总光合作用上起到关键性作用。马韞韬等<sup>[85]</sup>利用虚拟相机计算玉米植株各器官太阳直射光分布,显著提高了现有模型在作物冠层光分布的计算时间。郭炎等<sup>[86]</sup>利用空间坐标仪确定玉米冠层的空间坐标,实现了玉米冠层空间结构及其对冠层光分布影响的分析,以及玉米冠层的三维可视化。李艳大等<sup>[87]</sup>利用基于冠层光分布的光合作用模型,分析了不同株型水稻品种在不同氮素水平下冠层光合有效辐射的时空分布及干物质重分配动态,认为叶面积指数、叶片光合效能、太阳高度角和太阳辐射强

度是直立型品种增产的决定因素。高亮之等<sup>[6]</sup>通过模拟水稻最佳株型群体受光量与光合量,提出了可利用日照百分率推算直射光与散射光的方法,进而计算任一日每小时直射光与散射光的消光系数、水平受光量、叶面受光量和群体光合量,认为不同株型水稻品种的群体光合量在不同生育时期表现不一,株型效应在较高纬度地区更明显,而籼稻的株型效应比粳稻更明显。张文字等<sup>[88]</sup>利用冠层切割、叶面积积分、组合形态参数等方法分析并模拟了小麦分层叶面积指数、株高构成指数和叶向值的动态变化规律及播种密度对其的影响,构建了可综合体现叶型和茎型动态变化的株型构成指数,最终构建了基于冠层结构的小麦光分布模型<sup>[89]</sup>,体现了株型结构对光能利用的影响。

基于株型的油菜光分布和光合作用模型相对较少,主要集成在功能-结构油菜模型中。如:Groer 等<sup>[90]</sup>利用基于 L-System 的 XL 建模语言,并借鉴 LEAFC3-N 模型的光合部分和 GREENLAB 模型的源-库系统,构建了油菜动态 3D 模型,使形态模型可响应不同氮素水平;Jullien 等<sup>[91]</sup>利用 GREENLAB 明确了源-库关系与油菜形态之间的相互作用,通过叶面积与生物量的关系,构建了较完整的功能-结构油菜模型。

## 2.3 株型评价与设计

利用作物模型、虚拟现实等技术,实现对不同品种和环境条件下作物株型的定量评价、优化设计与品种改良,从而更利于指导育种工作。尹田夫<sup>[92]</sup>通过分析大豆模拟株型顶、中、底部叶面积指数和光分布特征与产量性状形成的多元回归效应,提出了大豆品种改良建议。Vries<sup>[93]</sup>采用作物模拟技术,对“超高产水稻”株型进行了量化分析。于强等<sup>[94]</sup>根据冠层结构模型,采用情景模拟方法,比较了不同玉米株型冠层光分布、光合作用日变化等方面的差异,认为直立株型的增产潜力较大,并给出了定量模拟方法。米湘成等<sup>[95]</sup>以 Visual C++ 6.0 为工具,利用图像识别技术,经图像的二值化、细线化处理,提取了株型骨架信息,研究结果可结合专家系统对株型进行识别和评判。赵春江等<sup>[96]</sup>通过叶片大小、角度等分析描述了小麦冠层结构,模拟了小麦叶型的空间分布,评价了小麦株型。邹江石等<sup>[97]</sup>以两优培九和汕优 63 等 7 个水稻品种为试验材料,分析了 20 项株型评价参数的相关关系,建立了水稻株高生态预测模型,认为培



育超高产株型品种的两个最关键评价参数是株高和顶三叶角度。苏中滨等<sup>[98]</sup>基于大豆可视化模拟,利用植物功能-结构模型搭建高光效植物株型设计平台,可生成具有高产能力的作物株型。丁维龙等<sup>[99]</sup>基于功能-结构水稻模型和优化算法开发了水稻株型优化设计系统。Dornbusch 等<sup>[100]</sup>在 FSPMs 框架下,利用自己编写的 Matlab 计算机程序,实现了禾本科植物器官级别的可视化描述和显示。孟军等<sup>[101]</sup>通过对小麦植株形态及拓扑结构的观测分析,构建了叶、穗和茎等地上部器官的集合造型算法,并利用 OpenGL 图形库实现了可视化显示。

油菜株型评价尚处在起步阶段,早期有少量器官可视化方面的研究,如:廖桂平等<sup>[102]</sup>提出了甘蓝型油菜花朵和花序可视化生长的 L-系统模型框架,并实现了花朵与花序生长可视化;岳延滨<sup>[103]</sup>构建了基于生长度日的油菜形态模型,并实现了花和角果的可视化。目前正逐步将其他作物上高通量表型获取技术应用于油菜上,实现植株高精度三维重建,如: Xu 等<sup>[104]</sup>开发出可自动测量油菜株高、茎粗、主花序长度、分枝角度等株型参数,与人工测量结果拟合较好;史蒲娟等<sup>[105]</sup>分别采用单目视觉技术和激光扫描技术对油菜植株进行了 3D 重建,并实现了对株高、叶长、叶柄长和叶面积等株型参数的测量,结果能真实地表现油菜植株的整体形态。但这些研究都尚未实现基于虚拟油菜的株型评价和设计。

### 3 油菜株型研究的不足之处

综上所述,前人在株型方面已进行了大量深入地细致地研究,相对于稻、麦等作物,油菜株型研究较少,且仍存在以下不足:(1) 缺乏全生育期动态定量模型。现有株型研究多为针对生育后期特定株型指标的定性描述,鲜见对全株整个生育过程连续而系统的定量模拟;(2) 株型形成机理和作用机制研究较少。油菜株型定量研究以统计分析居多,在光合作用及同化物分配对株型的影响,即株型形成机理方面研究较少;株型对产量形成的影响研究较多,但在株型对光分布、干物质形成等的影响,即株型对产量形成的作用机制研究较少;(3) 缺少综合评价参数。目前已有的株型评价参数大致可概括出以下特征:或针对茎型,如株高构成指数、茎集散度等;或针对叶型,如叶面积指数、叶向值等;或只单独考虑某个方向上的株型特点,如冠层厚度、幅宽等。这些株

型评价参数均各有特色却都不能全面的评价株型。

### 4 研究展望

作物株型定义较为宏观,难以整体定量表达,然而作为表型研究的重要内容,株型研究对遗传育种和高产高效栽培至关重要。结合国内外关于油菜株型模拟研究现状以及本团队在油菜株型方面的多年探索,我们认为未来油菜株型研究将在以下 3 个方面突破:

(1) 研究工具和研究方法的升级与改进。利用三维扫描仪和多方位图像序列进行三维重建的技术已有较多报道,但尚未攻克 2 方面难题:①设备成本高,针对性不强。②分析手段不能满足精细表型参数提取需要。针对这一研究现状,探索一种低成本、易操作、准确高效、能够满足不同作物需求的表型研究工具和研究方法将成为新趋势。与其他作物不同,油菜植株结构复杂,难以准确提取表型特征,通过自主研发基于多视角的自动成像设备可以实现多角度、全方位、高通量的图像采集,极大提高图像获取效率,同时引入并行计算方法,促进三维建模与人工智能的深度融合,改进株型研究方法和工具,进而提升株型研究的效率和精度。

(2) 株型参数和指标的全面性与整体性。株型是植物结构的一部分,植物功能和结构在不断地相互影响,因此,需先以光分布-光合作用-同化物分配过程为纽带,构建从同化物分配到器官形态、株型结构、群体光分布、光合作用及同化物生成,再到器官形态和株型结构的模型链,建立功能-结构油菜模型。在此基础上,将表达特定株型特征的传统株型评价参数在功能-结构模型框架下重新表达,进而提炼并筛选可整体评价株型特征的指标参数,实现较为全面和整体的株型定量。

(3) 理想株型设计与辅助育种。当今油菜生产成本偏高、产量较低、收益偏少,且菜籽油价格受国际市场影响明显。因此,培育适宜机械化作业和油蔬两用等多功能油菜新品种对于降低油菜生产成本,提高油菜种植效益、增加种植者收入具有重要意义。基于数字孪生技术,利用已有功能-结构油菜模型在功能-结构相互影响,以及响应环境和栽培措施等优势,通过分析特定株型油菜的机械化效率和光能利用率,设计适宜不同生产要求的理想株型,甚至与基因组学结合,提供特定株

型的可能基因位点,可为育种工作提供明确直观评价指标,从而更快选育出高光效、适合油蔬两用或机械化收割的油菜新品种,促进数字化、规模化育种工作的发展。

## 参考文献:

- [1] HU Z Y, HUA W, ZHANG L, et al. Wang. Seed structure characteristics to form ultrahigh oil content in rapeseed[J]. Plos One, 2013, 8(4): E62099.
- [2] Foreign Agricultural Service. Oilseeds: World markets and trade [J]. Global Market Analysis, 2020, 20(11): 1-42.
- [3] 熊秋芳,张效明,文 静,等. 菜籽油与不同食用植物油营养品质的比较——兼论油菜品质的遗传改良[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(6): 122-128.
- [4] 王汉中. 我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(2): 300-302.
- [5] 浦惠明,龙卫华,高建芹. 油菜全程机械化生产配套农艺技术研究Ⅱ. 不同种植方式对油菜株型结构及经济性状的影响[J]. 江苏农业科学, 2009(4): 79-81.
- [6] 高亮之,金之庆,张更生,等. 水稻最佳株型群体受光量与光合量的数值模拟[J]. 江苏农业学报, 2000, 16(1): 1-9.
- [7] 陈显利,杨 平,张文宇,等. 基于生物量的冬小麦越冬前植株地上部形态结构模型[J]. 作物学报, 2016, 42(5): 743-750.
- [8] 曹宏鑫,赵锁芳,葛道阔,等. 作物模型发展探讨[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3520-3528.
- [9] 吴兆苏. 小麦育种学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1990.
- [10] ENGLENDOW F L, WADHAM S M. Investigations on yield in the cereals[J]. Journal of Agricultural Science, 1923, 13: 390-439.
- [11] DONALD C M. The breeding of crop ideotypes[J]. Euphytica, 1968, 17(3): 385-403.
- [12] 杨守仁,陈温福,张龙步. 水稻理想株型育种新动向(英文)[J]. 中国水稻科学, 1988, 2(3): 129-135.
- [13] LAWN R J, IMRIE B C. Crop improvement for tropical and sub-tropical australia: Designing plants for difficult climates[J]. Field Crops Research, 1991, 26(2): 113-139.
- [14] 张晓萍,杨慎骄,张笑培,等. 不同播期冬小麦株型构建及其生育特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 915-920.
- [15] 韦还和,李 超,张洪程,等. 水稻甬优 12 不同产量群体的株型特征[J]. 作物学报, 2014, 40(12): 2160-2168.
- [16] 杨 峰,崔 亮,黄 山,等. 不同株型玉米套作大豆生长环境动态及群体产量研究[J]. 大豆科学, 2015, 34(3): 402-407.
- [17] 裴建峰,张海红,李鸿萍,等. 不同行距配置方式对夏玉米冠层结构和群体抗性的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(1): 104-112.
- [18] 曾 川,刘成家,徐洪志,等. 油菜株型育种研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(12): 14-18.
- [19] 景尚友. 甘蓝型春油菜主要农艺性状与单株产量的通径分析[J]. 黑龙江农业科学, 2002(3): 16-19.
- [20] 邓武明,阳小虎,文凤君,等. 甘蓝型油菜产量性状的遗传及相
- 关与通径分析[J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(4): 27-30.
- [21] 沈金雄,傅廷栋,杨光圣,等. 甘蓝型油菜杂种优势及产量性状的遗传改良[J]. 中国油料作物学报, 2005, 27(1): 5-9.
- [22] 冷锁虎,朱耕如,徐东进,等. 油菜结角层模式栽培理论与技术的研究Ⅱ. 施肥与春油菜结角层构型的关系[J]. 中国油料, 1992(4): 20-24.
- [23] 朱耕如,邓秀兰. 油菜结角层的结构[J]. 江苏农业学报, 1987, 3(3): 16-22.
- [24] 徐东进,冷锁虎,朱耕如,等. 春油菜高光效结角层结构的研究[J]. 中国油料, 1990(3): 45-49.
- [25] 王俊生,李少钦,张耀文. 不同栽培密度对紧凑型油菜产量和主要性状的影响[J]. 耕作与栽培, 2006(3): 25-26.
- [26] 宋 稀,刘凤兰,郑普英,等. 高密度种植专用油菜重要农艺性状与产量的关系分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1800-1806.
- [27] 雷小龙,刘 利,刘 波,等. 机械化种植对杂交籼稻 F 优 498 产量构成与株型特征的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(4): 719-730.
- [28] 孟 倩. 筛选适合于机械化收获的油菜品种研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [29] 白桂萍. 密植条件下油菜理想冠层结构研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [30] 殷 艳,陈兆波,余 健,等. 我国油菜生产潜力分析[J]. 中国农业科技导报, 2010, 12(3): 16-21.
- [31] 蒯 婕,左青松,陈爱武,等. 不同栽培模式对油菜产量和倒伏相关性状的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(6): 875-884.
- [32] 陈新军,戚存扣,浦惠明,等. 甘蓝型油菜抗倒性评价及抗倒性与株型结构的关系[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(1): 54-57.
- [33] 马 霓,李 玲,徐 军,等. 甘蓝型油菜抗倒伏性及农艺性状研究[J]. 作物杂志, 2010(6): 36-41.
- [34] 熊 洁,邹晓芬,邹小云,等. 耐旱性油菜品种的筛选及干旱胁迫对油菜生理特性的影响[C]// 中国作物学会. 2014 年全国青年作物栽培与生理学术研讨会论文集. 扬州: 中国作物学会, 2014: 93.
- [35] 陈 洁. 甘蓝型油菜对湿害胁迫的适应机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [36] 陈玉梁,石有太,罗俊杰,等. 干旱胁迫对彩色棉花农艺、品质性状及水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(11): 2074-2082.
- [37] 张亚洁,王振省,李 磊,等. 分蘖期全淹胁迫对水稻株型及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(6): 51-53.
- [38] 王锄非,陈金湘. 光照强度对油菜器官建成及产量形成的影响[J]. 湖南农业学报, 1987, 32(S1): 29-35.
- [39] 张洁夫,傅寿仲,陈玉卿,等. 油菜株型结构及其理想型研究Ⅲ. 若干高产品种的株型及冠层结构[J]. 中国油料作物学报, 1998, 20(3): 36-41.
- [40] BUTTAR G S, THIND H S, AUJLA M S. Methods of planting and irrigation at various levels of nitrogen affect the seed yield and water use efficiency in transplanted oilseed rape [J]. Agricultural

- Water Management, 2006, 85(3): 253-259.
- [41] 任廷波,赵继献. 氮肥和多效唑喷施时期互作对优质杂交油菜株型及产量性状的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(24): 11993-11995.
- [42] KAMH M, WIESLER F, ULAS A, et al. Root growth and N uptake activity of oilseed rape (*Brassica napus* L.) cultivars differing in nitrogen efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, 168: 130-137.
- [43] 王小娟,宋海星. 不同供氮水平下油菜根系的反应差异[J]. 湖南农业大学学报, 2011, 37(6): 592-597.
- [44] SEITH B, GEORGE E, MARSCHNER H, et al. Effect of varied soil nitrogen supply on norway spruce[J]. Plant and Soil, 1996, 184: 291-298.
- [45] LI G H, XUE L H, GU W, et al. Comparison of yield components and plant type characteristics of high-yield rice between taoyuan, a 'special eco-site' and nanjing, China[J]. Field Crops Research, 2009, 112(2/3): 214-221.
- [46] LÜ C G, HU N, YAO K M, et al. Plant type and its effects on canopy structure at heading stage in various ecological areas for a two-line hybrid rice combination, Liangyoupeijiu [J]. Rice Science, 2010, 17(3): 235-242.
- [47] 金峰,徐海,江奕君,等. 生态环境对籼粳交后代株型特性和产量构成的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(1): 49-55.
- [48] 杜志敏,刘晓琳,邵丹蕾,等. 减氮后中日粳稻品种杂交后代株型、产量和米质的变化及其相互关系[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(2): 171-180.
- [49] 王建永,李朴芳,程正国,等. 旱地小麦理想株型与生长冗余[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2428-2437.
- [50] 郑曙峰,唐胜,徐道青,等. 高水分利用率棉花株型特征及生理生态基础研究[J]. 安徽农业科学, 2005(7): 1162-1164.
- [51] 肖松华,吴巧娟,刘剑光,等. 棉花机采品种理想株型模式研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(8): 1-4, 8.
- [52] ZHANG X, RUI Q Z, YUAN L I, et al. Architecture of stem and branch affects yield formation in short season cotton[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(3): 680-689.
- [53] 刘皓然,刘爱玉,谢陈灵,等. 短季直播栽培对棉花株型结构及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(4): 41-45.
- [54] 唐利忠,谢宜芝,孙小成,等. 播种量和施肥量对南方春大豆产量形成和机收质量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(8): 1-7.
- [55] 熊洁,封超年,郭文善,等. 高产小麦株型的指标体系[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 1998, 1(4): 24-30.
- [56] MONSI M, SAEKI T. Über den lichtfaktor in den pflanzen-gesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion[J]. Japanese Journal of Botany, 1953, 14(1): 22-52.
- [57] 陈国庆,朱艳,曹卫星. 冬小麦叶片生长特征的动态模拟[J]. 作物学报, 2005, 31(11): 1524-1527.
- [58] 谭子辉. 小麦植株形态建成的模拟模型研究[D]. 南京:南京农业大学, 2006.
- [59] ZHU Y, CHANG L Y, TANG L, et al. Modelling leaf shape dynamics in rice[J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2009, 57(1): 73-81.
- [60] 刘岩,陆建飞,曹宏鑫,等. 基于生物量的水稻叶片主要几何属性模型研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 4093-4099.
- [61] CAO H X, LIU Y, LIU Y X, et al. Biomass-based rice (*Oryza sativa* L.) aboveground architectural parameter models[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(10): 1621-1632.
- [62] 陈显利,杨平,张文字,等. 基于生物量的冬小麦越冬前植株地上部形态结构模型[J]. 作物学报, 2016, 42(5): 743-750.
- [63] 刘永霞,何应对,连子豪,等. 基于生物量的香蕉叶片主要几何属性研究[J]. 中国南方果树, 2021, 50(3): 68-75.
- [64] KUROIWA S, SETLÍK I. Total photosynthesis of a foliage in relation to inclination of leaves. prediction and measurement of photosynthetic productivity[C]//SETLÍK I. Proceedings of the IBP/PP technical meeting. Czechoslovakia: Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1970: 79-89.
- [65] 申广荣,王人潮,李云梅,等. 水稻群丛结构和辐射传输分析[J]. 作物学报, 2001, 27(6): 769-775.
- [66] 赵星,REFFYE P D,熊范纶,等. 基于双尺度自动机模型的植物花序模拟[J]. 计算机学报, 2003, 26(1): 116-124.
- [67] 李云梅,王人潮,王秀珍,等. 椭圆分布函数模拟水稻冠层叶倾角分布[J]. 生物数学学报, 2003, 18(1): 105-108.
- [68] CAO H X, ZHANG W Y, ZHANG W X, et al. Biomass-based rapeseed (*Brassica napus* L.) leaf geometric parameter model [C]//SIEVÄNEN R, NIKINMAA E, GODIN C, et al. Proceedings of the 7th international conference on functional-structural plant models. Saariselkä, Finland: Lintunen A, 2013: 26-29.
- [69] 张文字,张伟欣,葛道阔,等. 基于生物量的油菜主茎叶片形态参数模拟研究[J]. 作物学报, 2015, 41(9): 1435-1444.
- [70] 张伟欣,曹宏鑫,朱艳,等. 基于生物量的油菜越冬前植株叶片空间形态结构模型[J]. 作物学报, 2015, 41(2): 318-328.
- [71] ZHANG W Y, ZHANG W X, GE D K, et al. Biomass-based leaf curvilinear Model For Rapeseed (*Brassica Napus* L.) [C] //LI D L, LIU Y D, CHEN Y Y. Computer and computing technologies in agriculture IX: 9th IFIP WG 514 international conference. Beijing: Springer International Publishing, 2016: 459-472.
- [72] ZHANG W Y, LIU Y, ZHANG W X, et al. Biomass-based rapeseed (*Brassica Napus* L.) stem and rachis geometric parameter model [C]//PRUSINKEWICZ P, HANAN J, LANE B. 2016 IEEE international conference on functional-structural plant growth modeling, simulation, visualization and applications (FSPMA). Qingdao:IEEE, 2016: 233-241.
- [73] ZHANG W X, CAO H X, ZHANG W Y, et al. Rapeseed (*Brassica napus* L.) primary ramification morphological structural model based on biomass [C]//LI D L, LIU Y D, CHEN Y Y. Computer & computing technologies in agriculture IX: 9th IFIP WG 514 International conference. Beijing: Springer International Publishing, 2016:502-518.
- [74] ZHANG W X, CAO H X, ZHANG W Y, et al. Biomass-based rapeseed (*Brassica napus*) pod morphological model[J]. Interna-



- tional Journal of Agriculture & Biology, 2018, 5 (20): 1193-1200.
- [75] 张伟欣,曹宏鑫,朱 艳,等. 油菜作物模型研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(1): 82-90.
- [76] 廖桂平,官春云. 甘蓝型冬油菜 (*Brassica napus*) 干物质积累、分配与转移的特性研究[J]. 作物学报, 2002, 28(1): 52-58.
- [77] 张春雷,曹宏鑫,李光明. 长江流域冬油菜生长发育模拟模型研究与应用[C]// 中国作物学会. 中国作物学会油料作物专业委员会第5届学术年会. 上海: 万方数据电子出版社, 2004: 415-416.
- [78] 刘铁梅,胡立勇,赵祖红,等. 油菜发育过程及生育期机理模型的研究 I. 模型的描述[J]. 中国油料作物学报, 2004, 26(1): 28-32.
- [79] 刘 洪,金之庆. 油菜发育动态模拟模型[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 634-640.
- [80] CAO H X, ZHANG C L, ZHANG B J, et al. Research and application of cultivation-simulation-optimization decision making system for rapeseed (*Brassica napus* L.) [C]//LI D L, LIU Y D, CHEN Y Y. Computer and computing technologies in agriculture IV. Nanchang: IFIP Advances in information and Communication Technology, 2010:441-456.
- [81] 汤 亮,曹卫星,朱 艳. 基于生长模型的油菜管理决策支持系统[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 160-164.
- [82] STEWART D W, COSTA C, DWYER L M, et al. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(6): 1465-1474.
- [83] CHELLE M, SAINT-JEAN S. Taking into account the 3D canopy structure to study the physical environment of plants: the monte carlo solution[C]//GODIN C, HANAN J, KURTH W, et al. 4th international workshop on functional-structural plant models. Montpellier, France: Environmental Science, 2004: 176-180.
- [84] 孟 军,陈温福. 不同穗型水稻群体垂直入射光分布及其对光合作用的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36(1): 9-13.
- [85] 马镭韬,文美平,李保国,等. 基于器官尺度虚拟玉米冠层直射光分布的快速计算模型[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 151-155.
- [86] 郭 炎,李保国. 玉米冠层的数学描述与三维重建研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 39-41.
- [87] 李艳大,朱相成,汤 亮,等. 基于株型的水稻冠层光合生产模拟[J]. 作物学报, 2011, 37(5): 868-875.
- [88] 张文宇,汤 亮,姚鑫锋,等. 基于过程的小麦株型指标动态模拟[J]. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2364-2374.
- [89] ZHANG W Y, TANG L, YANG X, et al. A simulation model for predicting canopy structure and light distribution in wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 67: 1-11.
- [90] GROER C, KNIEMEYER O, HEMMERLING R, et al. A dynamic 3D model of rape (*Brassica napus* L.) computing yield components under variable nitrogen fertilization regimes [C]// PRUSINKEWICZ P, HANAN J, LANE B. 5th international workshop on functional-structural plant models. Napier, New Zealand: Print Solutions, 2007: 4.1-4.3.
- [91] JULLIEN A, MATHIEU A, ALLIRAND J M, et al. Characterization of the interactions between architecture and source-sink relationships in winter oilseed rape (*Brassica napus*) using the greenlab model[J]. Annals of Botany, 2011, 107(5): 765-779.
- [92] 尹田夫. 大豆模拟株型的研究[J]. 作物学报, 1983, 9(3): 205-211.
- [93] VRIES P D, BANOS L, LAGUNA P. Improving yields: Designing and testing vhyvs [Very high-yielding varieties] [J]. IRRI Research Paper Series-International Rice Research Institute, 1991, 151: 13-19.
- [94] 于 强,王天铎,孙菽芬,等. 玉米株型与冠层光合作用的数学模拟研究——II. 数值分析[J]. 作物学报, 1998, 24(3): 272-279.
- [95] 米湘成,邹应斌,赵炳然,等. 超级杂交水稻理想株型图像识别的探讨[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2001, 27(2): 151-153.
- [96] 赵春江,王纪华,吴华瑞,等. 小麦叶形空间分布的模拟模型及推理系统(英文)[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5): 221-225.
- [97] 邹江石,姚克敏,吕川根,等. 水稻两优培九株型特征研究[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 652-657.
- [98] 苏中滨,战守义,郑 萍,等. 作物高光效株型数字化设计方法研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 203-207.
- [99] 丁维龙,徐利锋,危 扬,等. 水稻株型优化设计系统的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(10): 2467-2474.
- [100] DORNBUSCH T, WERNECKE P, DIEPENBROCK W. Description and visualization of graminaceous plants with an organ-based 3D architectural model, Exemplified for spring barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. Visual Computer, 2007, 23(8): 569-581.
- [101] 孟 军,郭新宇,赵春江. 小麦地上部器官几何造型与可视化研究[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1): 106-109.
- [102] 廖桂平,李锦卫,欧中斌,等. 基于参数 L-系统的油菜花朵与花序生长可视化研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 150-156.
- [103] 岳延滨. 油菜植株形态结构模型及可视化[D]. 南京:南京农业大学, 2010.
- [104] XU S Y, WANG J M, TIAN H, et al. Automatic measuring approach and device for mature rapeseed's plant type parameters [J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2019(1): 1-10.
- [105] 史蒲娟,翟瑞芳,常婷婷,等. 基于单目视觉和激光扫描技术的油菜植株模型重建及株型参数测量[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(3): 63-68.

(责任编辑:张震林)