油菜绿色面积指数动态模拟模型

汤亮 朱艳* 曹卫星

(南京农业大学/江苏省信息农业高新技术研究重点实验室 南京 210095)

摘要 准确模拟绿色面积指数是作物生长模拟模型可靠预测作物生长和产量的关键。该研究的目的是以生理生态过程为基础,构建油菜(*Brassica napus*)叶面积指数和角果面积指数变化动态的模拟模型。油菜叶面积指数模型综合考虑了库或源限制下的叶面积增长模式,其中库限制下叶面积指数的增长呈指数方程,且受到温度、水分和氮素因子的影响,源限制下叶面积指数增长用比叶面积法来模拟。油菜角果面积指数由比角果面积和角果干物重来决定。比叶面积和比角果面积均为生理发育时间的函数。利用不同类型品种的播期试验及氮肥试验资料分别对模型进行了校正和检验,结果表明模型能较好地模拟不同条件下油菜叶面积指数和角果面积指数。

关键词 叶面积指数 角果面积指数 比角果面积 比叶面积 模拟模型 油菜

A SIMULATION MODEL FOR DYNAMIC GREEN AREA INDEX IN WINTER RAPESEED (*BRASSICA NAPUS*)

TANG Liang, ZHU Yan*, and CAO Wei-Xing

Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture of Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract Aims Accurate simulation of green area index is critical for reliable prediction of crop growth and yield using a crop growth model. Our study was undertaken to develop a process-based simulation model for predicting dynamic green area index, including leaf area index (*LAI*) and pod area index (*PAI*), in winter rapeseed (*Brassica napus*).

Methods Leaf area expansion was simulated through the relationship between *LAI* and source- or sink-limited dry matter. Daily leaf expansion rate increased in an S-shaped growth curve under source limitation, as influenced by temperature, water and nitrogen levels. Under the sink limitation, leaf area expansion was quantified on the basis of specific leaf area. Pod area was calculated from specific pod area and pod dry matter. The specific leaf area and specific pod area were determined from physiological development time and genotype. We calibrated and validated the model using experimental data from different varieties, sowing dates and nitrogen fertilization rates.

Important findings Root mean square error (*RMSE*) values of *LAI* were 11.15%, 15.57% and 16.87% at three N levels, and the average *RMSE* value of *PAI* in two varieties was 12.92%. Plotting the 1:1 relationship between the simulated and observed values in *LAI* and *PAI* growth dynamics indicated a good fit. Our model of green area index in winter rapeseed shows a high accuracy and applicability under different conditions.

Key words leaf area index (*LAI*), pod area index (*PAI*), specific pod area, specific leaf area, simulation model, rapeseed

油菜(*Brassica napus*)绿色面积指数是油菜高产群体质量的重要指标(凌启鸿, 2000),光截获和碳同化都是由冠层绿色面积所完成,因此准确有效地模拟绿色面积指数是作物生长模型精确预测作物生长动态和产量形成的关键。一直以来,绿色面积指数的模拟是作物生长模型的薄弱环节,而油菜绿色面

积指数从叶片到角果的逐步变化更替,准确模拟油菜绿色面积指数显得更为重要。

有关作物叶面积动态模拟的方法主要有两种。一种方法是基于作物冠层的总叶面积(Spitters *et al.*, 1989; Habekotte, 1997),一般直接基于时间尺度(生长期日、物理天数等)用指数、二次函数等方程进

行回归分析,这种方式经验性强,难以解释油菜叶面积变化与生长过程的关系;或是采用比叶面积法,即通过比叶面积(Specific leaf area, *SLA*)将叶片干物重转化成叶面积来模拟叶面积指数(Leaf area index, *LAI*)。这种方式依赖于对 *SLA* 的准确定量。第二种方法是基于模拟单株的叶面积来模拟整个冠层的 *LAI*(Villalobos *et al.*, 1996; Lizaso *et al.*, 2003),包括叶片的出生、伸展和死亡,同时充分考虑植株冠层内光线、营养和水分的竞争关系。这种模拟方式机理性强,但涉及的参数多,关系比较复杂,且由于缺乏对叶片生长和衰老机理性的理解,难以确保模型的精度。

关于油菜角果面积指数(Pod area index, *PAI*)的模拟,国内外研究比较少。代表性的工作是 CERES-RAP(Gabrielle *et al.*, 1998)模型,提出了油菜 *PAI* 与生长度日的线性关系,同时考虑氮素影响因子,但忽略了角果衰亡对 *PAI* 的影响。DAISY-RPAE(Petersen *et al.*, 1995)把绿色面积(包括叶、角果和茎秆面积)作为整体来模拟,通过积温、地上干物重与经验性系数的乘积来模拟油菜绿色面积指数,经验性较强而机理性不足,同时冠层绿色面积分布过于模糊,影响光合生产的精确模拟。

为此,本研究借鉴其它作物的模拟模型(刘铁梅等, 2001; 张立桢等, 2004)优点,基于油菜生长发育的库源关系,构建油菜 *LAI* 和 *PAI* 动态的模拟模型,以期发展为油菜光合生产和产量形成的模拟模型奠定基础。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验 1: 于 2002 ~ 2003 年在南京农业大学江浦试验站进行,为播期和品种二因子的田间试验。土壤为重粘土,有机质为 2.09%,全氮为 0.12%,速效氮为 43.02 mg·kg⁻¹,速效磷为 23.3 mg·kg⁻¹,速效钾为 97.2 mg·kg⁻¹。供试品种为‘宁杂 3 号’和‘蓉油 5 号’,设 3 个播期(9 月 11 日、9 月 25 日、10 月 9 日)随机区组设计,3 次重复,每个小区 20 m²。每小区施纯氮 180 kg·hm⁻²,基肥:腊肥:薹肥为 5:2:3。种植密度为 12 万株·km⁻²。其它管理措施同高产大田栽培。详细观测记载物候期,每隔 10 ~ 20 d 左右取样 3 ~ 10 株,分叶片、叶柄、茎枝、角果在 80 °C 下 48 h 烘干称重,各主要时期样粉碎后采用凯氏定氮法测定各部分含氮量。

试验 2: 于 2003 ~ 2004 年在南京农业大学校内

试验站进行,为氮肥和品种二因子的试验。土壤为重粘土,有机质为 1.21%,全氮为 0.13%,速效氮为 80.2 mg·kg⁻¹,速效磷为 11.03 mg·kg⁻¹,速效钾为 100.5 mg·kg⁻¹。供试品种和试验 1 相同;宁杂 3 号,设 3 个施氮水平,分别为纯氮 300、180 和 60 kg·hm⁻²,基肥:腊肥:薹肥为 5:2:3。随机区组设计,3 次重复。蓉油 5 号设 1 个施氮水平:180 kg·hm⁻²,3 次重复。每个小区 8 m²。9 月 26 日播种,种植密度为 12 万株·hm⁻²。其它管理措施同高产大田栽培。详细观测记载物候期,各主要时期取样 3 ~ 10 株,分叶片、叶柄、茎枝、角果在 80 °C 下 48 h 烘干称重,粉碎后采用凯氏定氮法测定各部分含氮量。

1.2 绿色面积测定

采用 CI-203 型激光叶面积仪测定取样的植株各部位代表性叶片(10 张左右)的面积,通过总的叶面积与其干物重的比值计算 *SLA*,然后利用比叶面积法进一步计算出各小区的 *LAI*。此外,随机取出 30 ~ 100 个角果,测量各个角果的长度和平均宽度,利用克拉克公式(刘后利, 1987)计算其总角果面积,通过其干物重获得比角果面积,然后根据总角果干重与比角果面积进一步计算出各小区的总 *PAI*。

估算角果面积的克拉克公式为:

$$Sa = \pi d \times (h_1 + 1/3 \times h_2) \quad (1)$$

式中, *Sa* 为角果皮面积; *h*₁ = 0.8 *H*, *h*₂ = 0.2 *H*, *H* 为角果长度; *d* 为角果平均宽度。

1.3 模型构建与检验

本研究以试验 1 的数据为基础,通过分析和提炼油菜 *LAI* 增长规律,构建在库源限制下两种叶面积增长模式相结合的叶面积动态模拟模型。同时,借鉴比叶面积法模拟 *LAI* 的方法,利用油菜比角果面积与生理发育时间的关系,建立 *PAI* 变化的模拟模型。生理发育时间(Physiological development time, *PDT*)定义为最适温光条件下的发育日数(曹卫星和罗卫红, 2003),是由热效应、光周期效应、春化效应等因子的互作共同决定。通过分析试验资料和文献资料(刘后利, 1987),油菜主要生育时期的 *PDT* 值确定:抽薹为 16.9,初花为 22,终花为 31,成熟为 51。

利用试验 2 的观察资料对所建模型进行初步检验。采用国际上常用的观测值与模拟值之间的根均方差(Root mean square error, *RMSE*)对模拟值与观测值之间的符合度进行统计分析,见方程(2)。 *RMSE* 值越小,表明模型的预测精度越高。同时,用观测值与模拟值之间 1:1 关系的直方图来直观显示模型的拟合度和可靠性。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \times \frac{100}{O} \quad (2)$$

式中 P_i 、 O_i 和 N 分别表示预测值、观测值和样本容量， $\bar{O}$ 为观测值的平均值。 $RMSE$ 值小于 10% 表明模拟值与预测值一致性非常好，10% ~ 20% 之间较好，20% ~ 30% 表明模拟效果一般， $RMSE$ 大于 30% 表明模拟值与实际值偏差大，模拟效果差 (Michele *et al.* , 2003)。

2 模型的描述

2.1 LAI 的模拟

油菜的生长发育过程直接受到库源关系的影响。本研究从库和源的角度出发，利用 LAI 在库源限制条件下不同的增长方式，构建 LAI 变化的模拟模型。

2.1.1 库限制下的 LAI 增长模式

在库限制条件下，也就是相对于源不受限制的情况下，油菜得以充分生长。在生育前期，油菜生长不受密度、水分、营养及病虫害等条件限制时，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。由于叶片是油菜苗期的生长中心，因而叶片生长有充足的同化物供应，主要是受到叶片发生速度等自身生长因子的限制。因此，在此阶段，油菜 LAI 的增加呈 Logistic 增长。然后，随着 LAI 的增加，冠层叶片遮阴效应增加，当 LAI 增加到一定值时，LAI 即停止增长，这个值可定为库限制下的最大叶面积指数 (LAI_{max})，通过试验观察和文献资料确定其值为 7 (刘后利, 1987)。这一关系可由方程 (3) 和 (4) 来描述：

$$LAI_{\Delta} = RG \times LAI \times (1 - LAI/LAI_{max}) \quad (3)$$

$$LAI_{i+1} = LAI_i + LAI_{\Delta} \quad (4)$$

式中， LAI_{Δ} 、 LAI_i 和 LAI_{i+1} 分别为第 i 天增加的 LAI、第 i 天的 LAI 和第 $i+1$ 天的 LAI； RG 为 LAI 潜在相对生长速率。

在实际生长条件下，油菜的 LAI 还会受到氮素与水分不足的制约，因此模型用温度影响因子 (Temperature effectiveness, TE)、氮素营养指数 (Nitrogen nutrition index, NNI) 和水分亏缺因子 (Water deficient factor, WDF) 对潜在叶面积增长速率进行修订。这样，实际条件下 LAI 的增长可以由方程 (5) 来计算：

$$LAI_{\Delta} = RG \times LAI \times (1 - LAI/LAI_{max}) \times TE \times MIN (NNI, WDF) \quad (5)$$

1) 温度影响因子

本模型借用 Justes 等 (2000) 建立的油菜光合作用与温度关系来描述温度对 LAI 潜在生长的影响，见方程 (6)。

$$TE = 1 - 13.1 \times \exp(-0.6 \times TAV) \quad (6)$$

式中， TAV 为当天的平均温度。

2) 氮素营养指数

NNI 是指作物地上部分实际氮浓度 (N_A) 与临界氮浓度 (N_c) 的比值，见方程 (7)。临界氮浓度 (N_c) 是指作物干物质生产的最适氮浓度，又可定义为作物达到地上部最大生物量所必需的最小氮浓度，它随着作物地上部分干物质增加而减少，在 C_3 作物中存在一个几乎一致的关系 (Greenwood *et al.* , 1990)。本模型针对油菜，采用类似于 Colnenne 等 (1998) 建立的公式，见方程 (8)。

$$NNI = N_A/N_c \quad (7)$$

$$N_c = 4.48 \times DM^{-0.25} \quad DM \geq 0.88 \quad (8)$$

$$N_c = 4.63 \quad DM < 0.88$$

式中， N_A 是地上部组织中的实际氮浓度 ($\%$ ， $w \cdot w^{-1}$)，由本实验室建立的氮素平衡模型 (庄恒扬等 2004) 计算； N_c 是地上部组织中的临界氮浓度 ($\%$ ， $w \cdot w^{-1}$)， DM (Dry matter) 为地上部的干物质质量 ($t \cdot hm^{-2}$)，由本实验室的物质生产和分配子模型提供。该模型采用“三层模型”法，即通过对花、角果、叶 3 层分别计算光能截获和光合作用，利用高斯积分法计算每层的光合量而得出每日的冠层总同化量，同时考虑了维持呼吸与生长呼吸的消耗。然后利用油菜器官生长与发育进程和环境因子之间的关系，以生理发育时间为尺度来描述各器官分配指数的动态变化，进而以分配指数来预测总干物质在油菜各器官间的动态分配 (汤亮 2006；汤亮等 2007)。

3) 水分亏缺影响因子

WDF 可用油菜每天的实际蒸散量 (Actual evaporation capacity, AEC ；单位 $mm \cdot d^{-1}$) 与潜在蒸散量 (Potential evaporation capacity, PEC ；单位 $mm \cdot d^{-1}$) 的比值表示，由本实验室建立的水分平衡模型 (朱艳等 2005) 计算。

2.1.2 源限制下的叶面积指数增长模式

随着油菜生长的推进，叶片不再是生长中心，花芽分化、现蕾、抽薹等一系列的生理过程开始出现，分配到叶片的光合同化物随之开始减少，LAI 的增长受到源的限制。此时，由于叶片增长到了一定程度后开始互相遮阴而受光不足出现衰亡，LAI 的增长不再是指数增长。由于叶片衰亡的机理复杂，涉

及参数多且不易估计,本研究采用比叶面积法来模拟此时期 LAI 的增长过程,见方程(9)。

$$LAI = AWLV \times SLA \tag{9}$$

式中, $AWLV$ (Actual weight of green leaves)是实际绿色叶片干重($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),由本实验室的物质生产和分配子模型提供(汤亮 2006; 汤亮等 2007)。

在抽薹以前,油菜 SLA 的变化不大,本模型假设 SLA 为一个恒定值,定义为油菜特征比叶面积,为品种参数。抽薹以后, SLA 随抽薹(PDT 为 16.9)后累积的生理发育时间的增加而逐渐升高,见方程(10)。

$$SLA = \begin{cases} SLA_v & PDT \leq 16.9 \\ SLA_v(a(PDT - 16.9)^2 - b(PDT - 16.9) + c) & PDT > 16.9 \end{cases} \tag{10}$$

式中, a 、 b 、 c 为曲线系数, SLA_v 为油菜品种的特征比叶面积。

由于油菜的营养生长和生殖生长在很长时期内共同发生,库和源限制下的两种叶面积增长模式没有明显的界限,因而难以单纯以发育时期来区分哪个增长模式。所以本模型通过综合两种增长模式,使最终的 LAI 取两种增长模式下的最小值。

2.2 角果面积指数的模拟

本研究提出比角果面积(Specific pod area, SPA)这个概念来模拟油菜 PAI 的变化动态。 SPA 参照了 SLA 的概念,即单位重量角果的角果表面积大小。角果出生以后,不断生长和扩大,使 SPA 不断降低,至成熟时角果生长定型。品种间角果的大小与重量存在一定的差异,因此成熟期的 SPA 可以作为油菜品种的特征 SPA , 为品种参数。

总体上,油菜比角果面积呈现随初花(PDT 为 22)后累积的生理发育时间而降低的趋势,见方程(11)。

$$SPA = SPA_v \times (f1(PDT - 22)^2 - f2(PDT - 22) + f3) \tag{11}$$

式中 $f1$ 、 $f2$ 和 $f3$ 为方程的系数, SPA_v 为油菜品种的特征比角果面积。

模型通过 SPA 和角果重(Actual weight of pods, AWP)的乘积来模拟 PAI ,见方程(12)。其中,角果重由本实验室的物质生产和分配子模型提供(汤亮, 2006; 汤亮等 2007)。

$$PAI = AWP \times SPA \tag{12}$$

3 模型的参数化

3.1 比叶面积模型参数的确定

利用不同播期的田间试验(试验 1)结果,对油菜比叶面积生长动态模型进行校正,得出相应的模型参数。‘蓉油 5 号’与‘宁杂 3 号’品种的特征比叶面积分别为 $160(10^{-4} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ 和 $153(10^{-4} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ 。在油菜生育初期,叶面积指数呈指数增长阶段,相对生长速率(Relative growth rate, RGR)在 0.09~0.20 之间变化;‘蓉油 5 号’和‘宁杂 3 号’的 RGR 取值分别为 0.140 和 0.135。对‘蓉油 5 号’和‘宁杂 3 号’比叶面积与其特征比叶面积的比值(SLA/SLA_v)和抽薹后累积的 PDT 做综合回归分析,建立了二次函数(图 1),确定了 a 、 b 、 c 的值分别为 -0.000 9、0.068 6 和 1.177 0,其决定系数 R^2 为 0.837 4。

图 1 不同油菜品种的 SLA/SLA_v 与抽薹后累积生理发育时间的关系(试验 1)

Fig.1 Relationship between SLA/SLA_v and PDT_e after stem elongation for two rapeseed varieties (Experiment 1)
 SLA 比叶面积 Specific leaf area SLA_v : 特征比叶面积 Specific leaf area of variety PDT_e : 抽薹后累积的生理发育时间 Physiological development time after elongation

3.2 角果面积模型参数的校正

利用不同播期的田间试验(试验 1)资料,对油菜 PAI 的动态模型进行校正。‘蓉油 5 号’和‘宁杂 3 号’的特征 SPA 分别确定为 0.000 6 和 0.000 65 $\text{hm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对‘蓉油 5 号’和‘宁杂 3 号’的比角果面积与特征比角果面积的比值(SPA/SPA_v)与开花后累积的 PDT 做综合回归分析(图 2),确定 $f1$ 、 $f2$ 、 $f3$ 的值分别为 -0.000 5、0.035 8 和 2.421 6,决定系数 R^2 达到 0.952 7。

4 模型的验证

利用不同氮素水平的试验(试验 2)资料对模型进行初步的核实验证,结果表明模拟值与观测值之间具有较好的一致性。为了排除其它过程的误差对绿色面积指数模拟的累加影响,叶片重、角果重以及

图2 不同油菜品种的 SPA/SPA_v 与开花后累积生理发育时间的关系(试验1)

Fig.2 Relationship between SPA/SPA_v and PDT_f after onset of flowering for two rapeseed cultivars (Experiment 1)

SPA : 比角果面积 Specific pod area SPA_v : 特征比角果面积 Specific pod area of variety PDT_f : 开花后累积生理发育时间 Physiological development time after flowering

植株地上部组织实际氮浓度的实测值作为已知条件输入。图3为两个油菜品种 LAI 和 PAI 模拟值与观测值的1:1关系图。其中,在3个氮素水平下‘宁杂3号’ LAI 的预测误差 $RMSE$ 分别为11.15%、15.57%和16.87%,平均 $RMSE$ 为14.01%。预测误差随施氮水平提高而有所上升,可能是由于氮素对油菜 SLA 有调节作用,尤其是较低氮素供应水平下 SLA 的变化需要进一步校正。同样的测试表明,两个品种 PAI 的平均预测误差 $RMSE$ 为12.92%。由此可见,本模型对油菜 LAI 和 PAI 的模拟都达到了较好的预测水平,具有一定的可靠性和适用性。

5 讨 论

目前,能够精确模拟生物量或者产量的油菜生长模型尚没有形成(Diepenbrock, 2000),其中一个重要原因就是对于绿色面积指数的模拟仍然比较薄

图3 不同油菜品种及施氮水平下主要生育期的 LAI 和 PAI 观测值与模拟值的比较(试验2)

Fig.3 Comparison between observed and simulated LAI and PAI at main growth stages under different N rates and rapeseed cultivars (Experiment 2)

LAI : 叶面积指数 Leaf area index PAI : 角果面积指数 Pod area index N_4 : 实际氮浓度 Actual nitrogen rate

弱。影响油菜绿色面积指数的因素很多,由于对绿色面积增长和衰亡的机理研究不足,单纯从机理性出发来模拟绿色面积,涉及参数多,因而难以准确模拟其动态变化。因此,采用机理性和经验性并重的方法,来模拟油菜绿色面积指数是目前较为有效的方法。

比叶面积法仍然是目前作物生长模型中广泛采用的一种叶面积预测方法,这种方法取决于对 SLA 的准确预测。LINTUL-BRASNA(Habekotte, 1997)也是将 LAI 分为指数和非指数两段模拟的方法,但是将 SLA 在模拟过程中设置为固定值,因而会造成叶面积指数的较大预测误差。CERES-RAPE(Gabrielle et al., 1998)定量了叶面积指数与生长期日(Growing

degree days, GDD)的动态变化关系,同时考虑了氮素、遮阴等对 LAI 的调节过程,模拟结果相对较为准确,但这种方法经验性强,难以准确预测不同地点、不同品种的叶面积指数动态。本模型基于油菜的库源关系,综合模拟了库或源不足条件下 LAI 的指数和非指数变化过程,同时简单有效地模拟了比叶面积的变化动态,从而保证了 LAI 模拟机制的解释性和结果的准确性。

国内外对油菜角果的模拟比较少,主要原因有两个:一是 PAI 的测定存在一定的困难:要在短期内做频繁的取样和细致的测量工作;二是由于油菜生长模型大多是源于其它的作物模型,而没有单独针对 PAI 进行模拟,所以 PAI 模拟一般比较粗糙,

或者根本没有模拟。与 *SLA* 相比,油菜的 *SPA* 比较稳定,可能是由于油菜在营养不足条件下同化物优先供给角果,角果在逆境条件下受到的影响较小,所以比角果面积变化不大。本模型采用比角果面积法来模拟油菜角果面积指数,建立了比角果面积与生理发育时间的动态关系,具有参数少、易确定、简便实用的特点。

利用不同品种、不同播期、不同氮素水平的试验资料对本研究建立的 *LAI* 和 *PAI* 模型进行了初步的核实验证。结果表明,模型能较好地预测不同条件下的油菜绿色面积指数变化动态,因而模型具有较强的适应性和可靠性。但由于受试验资料的限制,本模型尚未充分考虑油菜比叶面积和比角果面积随氮素营养水平的变化规律。因此,以后还需通过严格控制的试验研究,对本研究提出的模型作进一步的改进和完善。

参 考 文 献

- Cao WX (曹卫星), Luo WX (罗卫红) (2003). *Crop System Simulation and Intelligent Management* (作物系统模拟及智能管理). Higher Education Press, Beijing, 22–31. (in Chinese)
- Colnenne C, Meynard JM, Reau R, Justes E, Merrien A (1998). Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Annals of Botany*, 81, 311–317.
- Diepenbrock D (2000). Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Field Crop Research*, 67, 35–49.
- Gabrielle B, Denoroy P, Gosse G, Justes E, Andersen MN (1998). A model of leaf area development and senescence for winter oilseed rape. *Field Crops Research*, 57, 209–222.
- Greenwood DJ, Lemaire G, Gosse G (1990). Decline in percentage N of C_3 and C_4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botany*, 425–436.
- Habekotte B (1997). Evaluation of seed yield determining factors of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) by means of crop growth modelling. *Field Crops Research*, 54, 137–151.
- Justes E, Denoroy P, Gabrielle B, Gosse G (2000). Effect of crop nitrogen status and temperature on the radiation use efficiency of winter oilseed rape. *European Journal of Agronomy*, 13, 165–177.
- Ling QH (凌启鸿) (2000). *Crop Population Quality* (作物群体质量). Shanghai Scientific and Technology Press, Shanghai, 402–415. (in Chinese)
- Liu HL (刘后利) (1987). *Rapeseed Practical Cultivation* (油菜实用栽培学). Shanghai Scientific and Technology Press, Shanghai. (in Chinese)
- Liu TM (刘铁梅), Cao WX (曹卫星), Luo WH (罗卫红), Guo WS (郭文善) (2001). Simulation on leaf area index in wheat. *Journal of Triticeae Crop* (麦类作物学报), 21(2), 38–41. (in Chinese with English abstract)
- Lizaso JJ, Batchelor WD, Westgate ME (2003). A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. *Field Crops Research*, 80, 1–17.
- Michele R, Nicola L, Zina F (2003). Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. *Agricultural Systems*, 78, 17–30.
- Petersen CT, Jørgensen U, Svendsen H, Hansen S, Jensen HE, Njelsen NE (1995). Parameter assessment for simulation of biomass production and nitrogen uptake in winter rape. *European Journal of Agronomy*, 4, 77–89.
- Spitters CJT, van Keulen H, van Kraalingen DWG (1989). A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: Rabbinge R, Ward S, van Laar HH eds. *Simulation and System Management in Crop Protection*. Simulation Monograph Vol. 32, Pudoc, Wageningen, the Netherlands, 147–181.
- Tang L (汤亮) (2006). *Study on Rapeseed Growth Simulation and Decision Support System* (油菜生长模拟与决策支持系统研究). PhD dissertation, Nanjing Agricultural University, Nanjing, 42–58. (in Chinese with English abstract)
- Tang L (汤亮), Zhu Y (朱艳), Sun XF (孙小芳), Cao WX (曹卫星) (2007). Dynamic simulation model for photosynthesis and dry matter accumulation in rapeseed. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 33, 189–195.
- Villalobos FJ, Hall AJ, Ritchie JT, Orgaz F (1996). OILCROP-SUN: a development, growth, and yield model of the sunflower crop. *Agronomy Journal*, 88, 403–415.
- Zhang LZ (张立桢), Cao WX (曹卫星), Zhang SP (张思平), Zhou ZG (周治国) (2004). A simulation model for morphogenesis and *LAI* in cotton. *Cotton Science* (棉花学报), 16(2), 77–83. (in Chinese with English abstract)
- Zhu Y (朱艳), Hu JC (胡继超), Cao WX (曹卫星), Zhang JB (张佳宝) (2005). A decision support system for field water management based on crop growth model. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 19, 160–162. (in Chinese with English abstract)
- Zhuang HY (庄恒扬), Cao WX (曹卫星), Jiang SX (蒋思霞), Wang ZG (王志刚) (2004). Simulation on nitrogen uptake and partitioning in crops. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture* (农业系统科学与综合研究), 20, 5–11. (in Chinese with English abstract)