

大豆茎秆、叶片及豆荚生长的动态模拟

徐寿军¹, 李志刚¹, 杨恒山¹, 陈传梅¹, 赵 达¹, 郭艳锋²

(1. 内蒙古民族大学 农学院, 通辽 028043; 2. 沈阳农业大学 园艺学院, 沈阳 110866)

摘要:以疆莫豆1号、蒙豆30、北豆5号为试材,在系统观测的基础上,构建了大豆茎秆、叶片和豆荚等器官的形态建成模型。模型以生理发育时间为时间步长,以生理发育日来衡量茎秆、叶片和豆荚的生长进程与生长次序,以品种遗传参数为基础来确定其他的模型参数,引入了最小含氮量、最大含氮量和临界含氮量来订正氮素的影响。不同品种不同播期的检验结果表明,节间长度的模拟误差在0.08~0.59 cm, RMSE在0.25~0.28 cm;节间粗度的模拟误差在0~0.10 cm, RMSE在0.04~0.05 cm;叶片长度的模拟误差在0.28~0.58 cm, RMSE为0.47 cm;叶片宽度的模拟误差在0.31~0.39 cm, RMSE在0.35~0.36 cm;豆荚长度的模拟误差在0.14~0.39 cm, RMSE在0.24~0.39 cm;豆荚宽度的模拟误差在0.09~0.21 cm, RMSE在0.14~0.17 cm;豆荚厚度的模拟误差在0.04~0.09 cm, RMSE在0.06~0.07 cm。模型表现出较好的预测性和可靠性。该研究可为大豆器官形态的虚拟显示提供参考。
关键词:作物,数值模拟,模型,大豆,器官,形态建成

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.20.021

中图分类号: S565.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-20-0151-09

徐寿军,李志刚,杨恒山,等.大豆茎秆、叶片及豆荚生长的动态模拟[J].农业工程学报,2013,29(20):151-159.

Xu Shoujun, Li Zhigang, Yang Hengshan, et al. Dynamic simulation of stem, leaf and pod development on soybean[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(20): 151-159. (in Chinese with English abstract)

0 引言

器官形态建成是作物生长发育的基础。作物的形态结构在很大程度上决定了作物的竞争能力和资源获取强度^[1]。作物器官形态建成的模拟是作物生长模拟中的重要部分,明确作物的外部形态变化规律,量化研究作物形态建成过程,对作物产量、品质形成具有重要的理论意义和实际应用价值,同时,也是虚拟作物和作物可视化研究的前期基础。目前,关于作物器官形态建成的动态模拟,国外学者已在多种作物展开^[2-5]。在国内,常丽英等^[6]、石春林等^[7]模拟了水稻叶片叶鞘和节间的生长过程,陈国庆等^[8]、王声锋等^[8]、谭子辉等^[10]、张文宇等^[11]、胡军成等^[12]分别模拟了小麦叶片、叶鞘和节间、株高、茎鞘夹角、麦穗、根的生长过程。周娟等^[13]、陈超等^[14]分别模拟了棉花的茎、枝、叶、果节、棉铃的生长过程。徐寿军等^[15]模拟了大麦叶片、茎秆、穗的生长过程。关于大豆形态建成的动态模拟,鲜

见报道^[16-17]。本研究通过对大豆的茎秆、叶片、豆荚生长过程的系统观测,在定量研究的基础上,构建了大豆节间伸长和增粗、叶片扩展、豆荚生长的动态模型,为构建大豆生长决策支持系统奠定基础,也为实现大豆从器官到个体形态的虚拟显示、可视化研究提供关键技术。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试品种为疆莫豆1号、蒙豆30、北豆5,由黑龙江省农业科学院提供。各供试品种均为亚有限结荚习性,其中蒙豆30株高120 cm左右,茎秆较粗,豆荚较大;北豆5株高70 cm左右,茎秆较细,豆荚较小;疆莫豆1号株高90 cm左右,茎秆粗细和豆荚大小均为中等。

1.2 试验设计

试验1于2010年在内蒙古民族大学实验农场进行,土壤类型为灰色草甸土,pH8.3,有机质15 mg/kg,碱解氮62 mg/kg,速效磷35 mg/kg,速效钾140 mg/kg。试验地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年有效积温在2500~3200 $^{\circ}\text{C}$ 之间,无霜期110~130 d。试验设2个播期,分别于5月2日、5月14日播种。肥料以基肥一次性施入,尿素(纯氮46%)30 kg/hm²,P肥(含P₂O₅46%)150 kg/hm²,氯化钾(含K₂O 60%)

收稿日期: 2013-03-25 修订日期: 2013-09-23

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJ09098),公益性行业(农业)科研专项经费项目(201103001),内蒙古民族大学创新团队建设计划项目(NMD1003)。

作者简介: 徐寿军(1969-),男,教授,博士。主要从事农业信息及作物模拟研究。通辽 内蒙古民族大学农学院,028043。

Email: shoujun-xu@163.com

150 kg/hm²。试验采用随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 9 m²。栽培管理措施同大田。

试验 2 于 2011 年在内蒙古民族大学试验农场进行, 土壤类型为灰色草甸土, pH8.4, 有机质 14.4 mg/kg, 碱解氮 64.1 mg/kg, 速效磷 33.8 mg/kg, 速效钾 145.6 mg/kg。试验设 0, 15, 30, 45 kg/hm² 尿素 (纯氮 46%) 4 个氮肥水平, 各处理均施 P 肥 (含 P₂O₅ 46%) 150 kg/hm², 氯化钾 (含 K₂O 60%) 150 kg/hm², 以基肥一次性施入, 5 月 4 日播种, 试验采用随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 9 m²。栽培管理措施同大田。

试验 3 于 2010 年在内蒙古扎兰屯市农业推广中心试验农场进行, 土壤类型为草甸土, pH7.6, 有机质 60.25 g/kg, 全氮 23 mg/kg, 有效磷 30.25 mg/kg, 速效钾 163.26 mg/kg, ≥10℃ 年有效积温在 2100~2400℃ 之间, 无霜期 120~130 d。施肥水平同试验 1。5 月 5 日播种。试验采用随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 15 m²。栽培管理措施同大田。

1.3 观测项目及方法

因大豆第 1 节位的叶片为 1 对子叶, 第 2 节位的叶片为 1 对真叶, 从第 3 节间开始才是三出复叶, 前 2 个节位均不会开花结荚, 节间长度较短且品种间差异不大, 所以本研究中所有指标的模拟和观测都从第 3 节间开始。自主茎第 3 节出现开始, 每小区选长势相同的大豆挂牌标记。

1.3.1 茎秆生长的观测

每隔 2 d 定点定株测量标记大豆主茎第 3 节及其以上各节的节间长度和粗度, 节间粗度使用游标卡尺测量, 测量部位为节间最粗处。

1.3.2 叶片扩展的观测

从第 3 片三出复叶露尖开始, 每隔 2 天测量 1 次第 3 片三出复叶某小叶的长度和宽度, 直至叶片定型, 叶片长度和宽度均取中部最大值。

1.3.3 豆荚生长的观测

自主茎第 3 节出现第一个豆荚开始, 每隔 2 d 测量 1 次该豆荚的长度、宽度、厚度, 各项均记录其最大值, 豆荚宽度和厚度用游标卡尺测量。

1.3.4 植株含氮量的测定

各试验分别在大豆苗期、开花期、结荚期、鼓粒期和成熟期取样, 烘干后测植株干物质量及含氮量。含氮量用凯氏定氮一半微量蒸馏法测定^[18]。

1.3.5 数据处理

试验 1 中第 1 播期的数据和试验 2 的数据用于模型构建和参数调试, 试验 1 中第 2 播期和试验 3 的数据用于模型检验。

2 模型构建

本研究以生理发育时间为时间步长, 大豆各发育阶段的生理发育时间的计算见文献^[19]。

2.1 茎秆生长动态模型

2.1.1 节间伸长的动态模型

根据本试验结果, 大豆各节间从开始伸长到定长需要 15.43 个生理日, 各节间开始伸长的时间间隔为 2.2 个生理日。本研究中大豆第 3 节间开始伸长的生理发育时间为 9.43 d^[18]。各节间伸长的动态方程如下

$$INL(PDT)_n = \begin{cases} 0 & PDT < 9.43 + 2.2(n-3) \\ \frac{INL_{\max} n}{\left(1 + b_{n1} e^{-k_{n1}(PDT - (9.43 + 2.2(n-3)))}\right)^{m_1}} \times NDF & 9.43 + 2.2(n-3) \leq PDT \leq 24.86 + 2.2(n-3) \\ INL_{\max} n & PDT > 24.86 + 2.2(n-3) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $INL(PDT)_n$ 为大豆在某一生理发育时刻的第 n 节的节间长度, cm; PDT 为生理发育时间, 9.43 为大豆第 3 节间开始伸长的生理发育时间, d。 $INL_{\max} n$ 为大豆第 n 节节间潜在长度, cm。 b_{n1} 、 k_{n1} 、 m_1 均为模型参数。 NDF 为氮肥效应因子, 其计算见公式 (18)。

根据本研究结果, 随着大豆节间数的增加, 其各节节间潜在长度 $INL_{\max} n$ 逐渐增加, 均在第 9 节间达到最大值, 然后又逐渐下降 (图 1)。因此, 其各节节间潜在长度可以用下式计算

$$INL_{\max} n = \begin{cases} \frac{INL_{\max} 9}{\left(1 + 26316300 e^{-2.22699n}\right)^{0.0617}} & 3 \leq n \leq 9 \\ 131.6133 INL_{\max} 9 \times e^{-0.5509n} & n > 9 \end{cases} \quad (2)$$

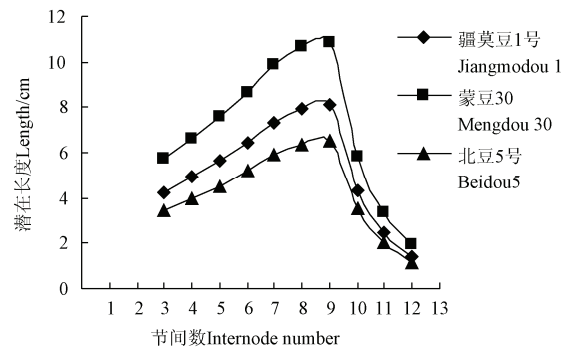


图 1 各节间潜在长度随节间数的动态变化

Fig.1 Change in internode length with internode number

INL_{max9} 是大豆第 9 节间潜在长度, cm, 是品种遗传参数。

$$b_{n1}=1736.7e^{0.0034889INL_{max}n} \quad (R^2=0.9994) \quad (3)$$

$$k_{n1}=0.5489e^{0.0015145INL_{max}n} \quad (R^2=0.9336) \quad (4)$$

m_1 为常量, 在方程中取值 0.1570。

2.1.2 节间增粗的动态模型

本研究观测结果表明, 大豆节间增粗是一个由慢到快再到慢的过程, 大豆各节间从开始增粗到粗度固定需要 15.43 个生理日, 各节间开始增粗的时间间隔为 2.2 个生理日。各节间增粗的动态方程如下

$$INL(PDT)_n = \begin{cases} 0 & PDT < 9.43+2.2(n-3) \\ \frac{INT_{max}n}{\left(1+b_{n1}e^{k_{n1}(PDT-(9.43+2.2(n-3)))}\right)^{m_1}} \times NDF & 9.43+2.2(n-3) \leq PDT \leq 24.86+2.2(n-3) \\ INT_{max}n & PDT > 24.86+2.2(n-3) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $INL(PDT)_n$ 为大豆在某一生理发育时刻的第 n 节的节间粗度, cm; PDT 为生理发育时间, 9.43 为大豆第 3 节间开始增粗的生理发育时间。 $INT_{max}n$ 为大豆第 n 节节间的潜在粗度, 是品种遗传参数。 b_{n1} 、 k_{n1} 、 m_1 均为模型参数, NDF 为氮肥效应因子。

根据本研究结果, 随着大豆节间数的增加, 其各节节间潜在粗度 $INT_{max}n$ 逐渐增加, 在第 7 节间达到最大值, 然后又逐渐下降 (图 2)。因此, 其各节节间潜在粗度可以用下式计算

$$INT_{max}n = \begin{cases} \frac{INT_{max}7}{\left(1+0.3723e^{-1.4412n}\right)^{7.0686}} & 3 \leq n \leq 7 \\ 1.8666INT_{max}7 \times e^{-0.1229n} & n > 7 \end{cases} \quad (6)$$

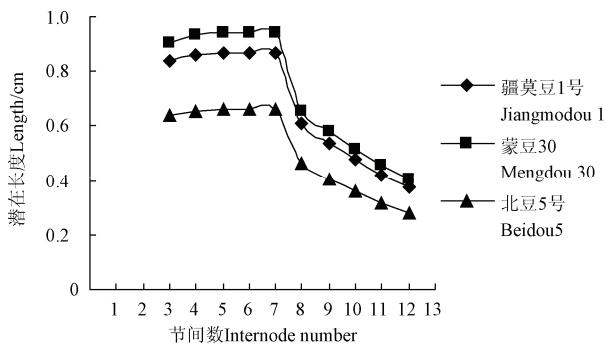


图 2 各节间潜在粗度随节间数的动态变化

Fig.2 Change in internode thickness with internode number

$INT_{max}7$ 是大豆第 7 节间潜在粗度, 是品种遗传参数。

传参数。

$$b_{n1}=1487.8e^{0.0024533INL_{max}n} \quad (R^2=0.9753) \quad (7)$$

$$k_{n1}=0.7562e^{0.0036278INL_{max}n} \quad (R^2=0.9542) \quad (8)$$

m_1 为常量, 在方程中取值 0.1570。

2.2 叶片扩展的动态模拟

2.2.1 叶长的动态模型

因同一品种大豆各个节位复叶的形态差异不大, 所以本研究选取第 3 复叶某小叶伸展动态进行模拟。

叶片伸长符合慢—快—慢的增长规律 (图 3), 其增长动态可用方程 (9) 进行定量描述:

$$LLEN(PDT)_3 = \frac{LLEN_{max}3}{(1+b_{3l}e^{-k_{3l}(PDT-14.65)})^{m_{3l}}} \times NDF \quad (14.65 \leq PDT \leq 21.06) \quad (9)$$

式中, $LLEN(PDT)_3$ 为大豆在某一生理发育时刻的第 3 复叶某小叶的长度, cm; PDT 为生理发育时间, 14.65 为第 3 复叶叶片出现的生理发育时间, 21.06 为第 3 复叶叶片定长的生理发育时间, $LLEN_{max}3$ 为大豆第 3 复叶某小叶的潜在长度, cm, 是品种遗传参数。 NDF 为氮肥效应因子。

$$b_{3l} = \frac{24.1222}{1-1.7542e^{-4.5431LLEN_{max}3l}} \quad (R^2=0.9854) \quad (10)$$

$$k_{3l} = \frac{0.5432}{1-1.1237e^{-3.6907LLEN_{max}3l}} \quad (R^2=0.9762) \quad (11)$$

M_{3l} 为常量, 在方程中取值 0.73。

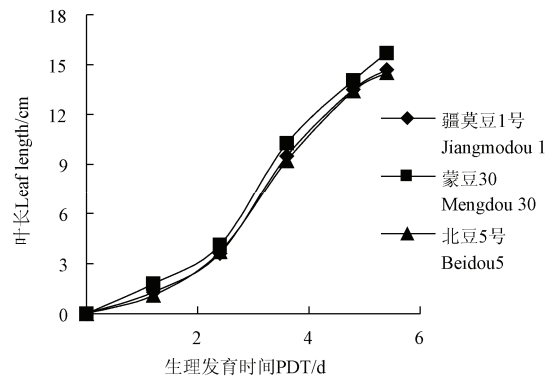


图 3 叶片长度随生理发育时间的动态变化

Fig.3 Change in leaf length with PDT

2.2.2 叶宽的动态模型

大豆第 3 复叶某小叶叶片宽度增加的动态变化见图 4, 动态方程如下

$$LLEN(PDT)_3 = \frac{LWID_{max}3}{(1+b_{3l}e^{-k_{3l}(PDT-14.65)})^{m_{3l}}} \times NDF \quad (14.65 \leq PDT \leq 21.06) \quad (12)$$

式中, $LLEN(PDT)_3$ 为大豆在某一生理发育时刻的第 3 复叶某小叶的宽度, cm; PDT 为生理发育时间, $LWID_{max}3$ 为大豆第 3 复叶某小叶的潜在宽度, cm,

是品种遗传参数。 NDF 为氮肥效应因子。

$$b_{3t} = \frac{38.88}{1 - 1.7086e^{-8.167LWID_{max}^3}} \quad (R^2=0.9918) \quad (13)$$

$$k_{3t} = \frac{1.023}{1 - 1.7584e^{-18.185LWID_{max}^3}} \quad (R^2=0.9887) \quad (14)$$

m_{3t} 为常量，在方程中取值 0.59。

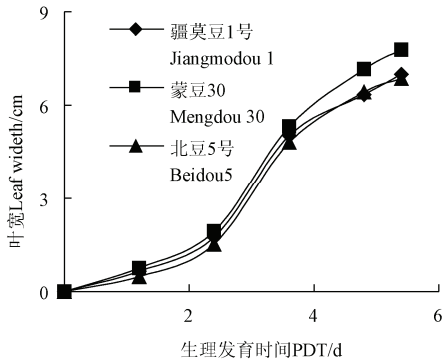


图4 叶片宽度随生理发育时间的动态变化
Fig.4 Change in leaf width with PDT

2.3 豆荚生长的动态模型

2.3.1 豆荚伸长的动态模型

基于大豆的形态特性，本研究选取第3节间首先出现的豆荚生长状态进行模拟。根据试验观测结果，大豆第3节间首先出现的豆荚长度变化的动态(图5)方程如下

$$BLEN(PDT) = \frac{BLEN_{max}}{(1 + 5807.67e^{-1.08(PDT-27.88)})^{0.55}} \times NDF(27.88 \leq PDT \leq 41.50) \quad (15)$$

式中， $BLEN(PDT)$ 为大豆在某一生理发育时刻的大豆主茎第3节首先出现的豆荚的长度，cm； $BLEN_{max}$ 为大豆豆荚潜在长度，cm，是品种遗传参数， PDT 为生理发育时间，27.88为该豆荚开始生长的生理发育时间，41.5为该豆荚生长结束的生理发育时间。 NDF 为氮肥效应因子。

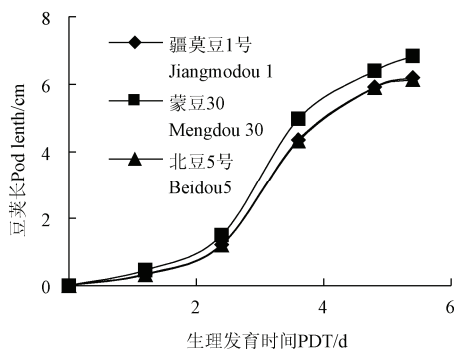


图5 豆荚长度随生理发育时间的动态变化
Fig.5 Change in pod length with PDT

2.3.2 豆荚增宽的动态模型

随着豆荚的伸长，豆荚宽度也在同步增加(图6)，可用方程(16)表示

$$BWID(PDT) = \frac{BWID_{max}}{(1 + 50.46e^{-0.69(PDT-27.88)})^{1.89}} \times NDF(27.88 \leq PDT \leq 41.50) \quad (16)$$

式中， $BWID(PDT)$ 为大豆在某一生理发育时刻的大豆主茎第3节首先出现的豆荚的宽度，cm； $BWID_{max}$ 为大豆豆荚潜在宽度，cm，是品种遗传参数， PDT 为生理发育时间，27.88为该豆荚开始生长的生理发育时间，41.5为该豆荚停止生长的生理发育时间。 NDF 为氮肥效应因子。

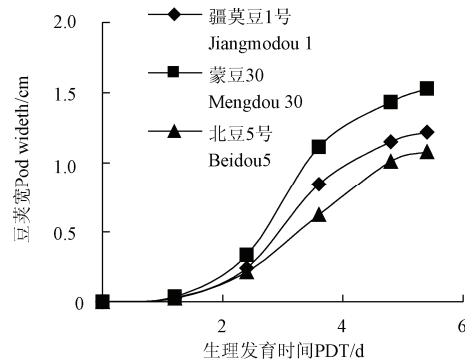


图6 豆荚宽度随生理发育时间的动态变化
Fig.6 Change in pod width with PDT

2.3.3 豆荚增厚的动态模型

豆荚厚度随着豆荚伸长、增粗而同步增加(图7)，其变化动态可用方程(17)表示

$$BTHI(PDT) = \frac{BTHI_{max}}{(1 + 0.12511e^{-0.48(PDT-27.88)})^{163.65}} \times NDF(27.88 \leq PDT \leq 41.50) \quad (17)$$

式中， $BTHI(PDT)$ 为某一生理发育时刻的大豆主茎第3节首先出现的豆荚的厚度，cm； $BTHI_{max}$ 为大豆豆荚潜在厚度，cm，是品种遗传参数； PDT 为生理发育时间，27.88为豆荚出现的生理发育时间，41.5为豆荚生长结束时的生理发育时间。 NDF 为氮肥效应因子。

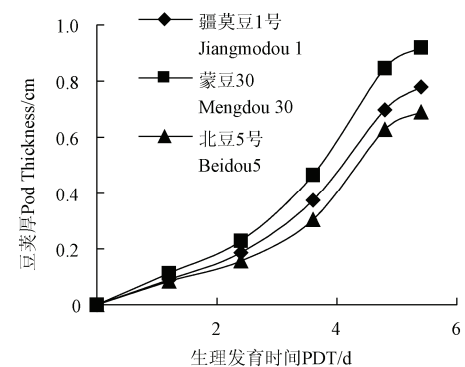


图7 豆荚厚度随生理发育时间的动态变化
Fig.7 Change in pod thickness with PDT

2.3.4 氮肥效应因子

大豆器官的形态建成受到养分尤其是氮肥效

应的影响较大。随着施氮量的变化，其器官形态大小不同。氮肥对大豆器官形态建成的影响可用氮肥效应因子来订正，其计算如下

$$NDF = \begin{cases} \frac{TANC - TMNC}{TCNP - TMNC} & TMNC < TANC < TCNP \\ 1 & TANC = TCNP \\ \frac{TBNC - TANC}{TBNC - TCNP} & TCNP < TANC < TBNC \end{cases} \quad (18)$$

式中， $TMNC$ 为大豆地上部植株最小含氮量， $g/100g$ ； $TCNP$ 为植株临界含氮量， $g/100g$ ； $TANC$ 为植株实际含氮量， $g/100g$ ； $TBNC$ 为植株最大含氮量， $g/100g$ 。

在本试验条件下，大豆植株最高含氮量、临界含氮量和最小含氮量均与生理发育时间呈函数关系（图 8）。

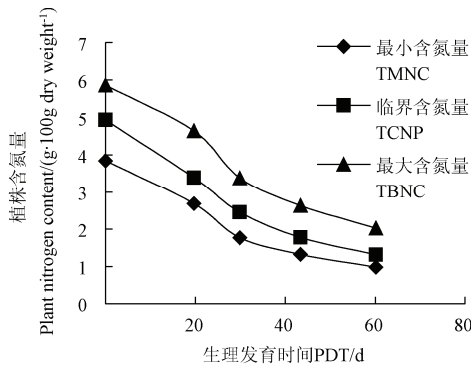


图 8 大豆地上部植株临界和最大、最小含氮量随生理发育时间动态变化

Fig.8 Change in critical nitrogen contents ,minimum contents and maximum contents of plant in soybean

$$TMNC_{(PDT)} = 3.9045 \times 0.98^{PDT} \quad R^2 = 0.991 \quad (19)$$

$$TCNP_{(PDT)} = 4.9996 \times 0.98^{PDT} \quad R^2 = 0.997 \quad (20)$$

$$TBNC_{(PDT)} = 6.0079 \times 0.98^{PDT} \quad R^2 = 0.998 \quad (21)$$

3 品种遗传参数的确定及模型的检验

3.1 品种遗传参数的确定

根据本试验数据，3 个供试大豆品种的叶片潜在长度、叶片潜在宽度，豆荚潜在长度、豆荚潜在宽度、豆荚潜在厚度见表 1。

3.2 模型的检验

采用根均方差 RMSE 来对模型进行检验，RMSE 用以下的方程^[23]计算：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (22)$$

式中， OBS_i 为观测值， SIM_i 为模拟值， n 为样本容量。

选择通辽试验点灌浆期的观测数据，对大豆主茎节间的生长动态模型进行检验，结果见表 2、表 3。

选择通辽试验点苗期的观测数据，对大豆主茎第 3 复叶的生长动态模型进行检验，结果见表 4。

选择通辽试验点灌浆期的观测数据，对大豆主茎第 3 节上首次出现的豆荚生长动态模型进行检验，结果见表 5。

选择扎兰屯试验点大豆主茎灌浆期的观测数据，对叶片、豆荚的生长动态模型进行检验，结果见表 6。

表 1 3 个大豆品种的遗传参数值

Table 1 Genetic coefficients of 3 types of soybean genotypes

品种 Genotype	第 9 节间潜在长度 9th internode length	第 7 节间潜在粗度 7th internode thickness	叶片潜在长度 Leaf length	叶片潜在宽度 Leaf width	豆荚潜在长度 Pod length	豆荚潜在宽度 Pod width	豆荚潜在厚度 Pod thickness
疆莫豆 1 号 Jiangmodou 1hao	8.12	0.87	14.70	7.00	6.20	1.20	0.78
蒙豆 30 Mengdou 30	10.93	0.94	15.68	7.78	6.84	1.53	0.92
北豆 5 号 Beidou 5	6.54	0.66	14.50	6.86	6.14	1.08	0.69

表 2 通辽试验点大豆不同节间长度的预测误差

Table 2 Prediction errors for internode length with various genotypes on Soybean in Tongliao

品种 Genotypes	项目 Item	第 3 节	第 4 节	第 5 节	第 6 节	第 7 节	第 8 节	第 9 节	第 10 节	第 11 节	RMSE
		3th internode	4th internode	5th internode	6th internode	7th internode	8th internode	9th internode	10th internode	11th internode	
疆莫豆 1 号 Jiangmo 1	模拟值 Simulated value	4.27	4.90	5.62	5.31	5.38	4.97	4.24	1.89	0.90	0.28
	观测值 Observed value	4.04	4.68	5.46	5.62	5.68	4.38	4.10	1.72	0.82	
	误差 Errors	+0.23	+0.22	+0.16	-0.31	-0.30	+0.59	+0.14	+0.17	+0.08	
蒙豆 30 号 Mengdou 30	模拟值 Simulated value	5.75	6.60	7.57	7.15	7.25	6.71	5.71	2.54	1.21	0.25
	观测值 Observed value	5.42	6.32	7.34	6.90	7.08	6.82	6.04	2.24	1.08	
	误差 Errors	+0.33	+0.28	+0.23	+0.25	+0.17	-0.11	-0.33	+0.3	+0.13	
北豆 5 号 Beidou 5	模拟值 Simulated value	3.44	3.95	4.53	4.27	4.33	4.00	3.41	1.52	0.72	0.25
	观测值 Observed value	3.12	3.74	4.28	4.56	4.64	3.84	3.26	1.78	0.98	
	误差 Errors	+0.32	+0.21	+0.25	-0.29	-0.31	+0.16	+0.15	-0.26	-0.26	

表3 通辽试验点大豆不同节间粗度的预测误差

Table 3 Prediction errors for internode thickness with various genotypes on Soybean in Tongliao cm

品种 Genotypes	项目 Item	第3节	第4节	第5节	第6节	第7节	第8节	第9节	第10节	第11节	RMSE
		3th internode	4th internode	5th internode	6th internode	7th internode	8th internode	9th internode	10th internode	11th internode	
疆莫豆1号 Jiangmo 1	模拟值 Simulated value	0.84	0.86	0.87	0.78	0.76	0.49	0.36	0.25	0.17	
	观测值 Observed value	0.74	0.78	0.80	0.78	0.72	0.52	0.40	0.20	0.16	
	绝对误差 Errors	+0.10	+0.08	+0.07	0	+0.04	-0.03	-0.04	+0.05	+0.01	0.06
蒙豆30号 Mengdou 30	模拟值 Simulated value	0.91	0.93	0.94	0.84	0.82	0.53	0.39	0.27	0.18	
	观测值 Observed value	0.86	0.88	0.90	0.80	0.76	0.57	0.42	0.24	0.20	
	绝对误差 Errors	+0.05	+0.05	+0.04	+0.04	+0.06	-0.04	-0.03	+0.03	-0.02	0.04
北豆5号 Beidou 5	模拟值 Simulated value	0.64	0.65	0.66	0.59	0.58	0.37	0.27	0.19	0.13	
	观测值 Observed value	0.58	0.60	0.62	0.56	0.52	0.41	0.30	0.24	0.12	
	绝对误差 Errors	+0.06	+0.05	+0.04	+0.03	+0.06	-0.04	-0.03	-0.05	+0.01	0.04

表4 通辽试验点不同品种大豆叶片长度和宽度的预测误差

Table 4 Prediction errors for leaf length and leaf width with various genotypes in Soybean in Tongliao cm

品种 Genotype	项目 Item	长度 Length	宽度 Width
		长度 Length	宽度 Width
疆莫豆1号 Jiangmodou 1	模拟值 Simulated value	10.6	5.48
	观测值 Observed value	10.02	5.86
	误差 Errors	+0.58	-0.38
蒙豆30号 Mengdou 30	模拟值 Simulated value	11.16	6.18
	观测值 Observed value	10.88	5.82
	误差 Errors	+0.28	+0.36
北豆5号 Beidou 5	模拟值 Simulated value	10.46	5.16
	观测值 Observed value	10.96	5.50
	误差 Errors	-0.50	-0.34
RMSE		0.47	0.36

表5 通辽试验点不同品种大豆豆荚长度、宽度和厚度的预测误差

Table 5 Prediction errors for pod length, width and thickness with various genotypes in Soybean in Tongliao cm

品种 Genotype	项目 Item	长度 Length	宽度 Width	厚度 Thickness
		长度 Length	宽度 Width	厚度 Thickness
疆莫豆1号 Jiangmodou 1	模拟值 Simulated value	4.10	0.83	0.49
	观测值 Observed value	4.28	0.94	0.40
	绝对误差 Errors	-0.18	-0.11	+0.09
蒙豆30号 Mengdou 30	模拟值 Simulated value	4.52	1.06	0.58
	观测值 Observed value	4.38	1.26	0.64
	绝对误差 Errors	+0.14	-0.20	-0.06
北豆5号 Beidou 5	模拟值 Simulated value	4.06	0.75	0.44
	观测值 Observed value	4.40	0.66	0.48
	绝对误差 Errors	-0.34	+0.09	-0.04
RMSE		0.24	0.14	0.07

表6 扎兰屯试验点不同品种大豆叶片和豆荚生长的预测误差

Table 6 Prediction errors for leaf and pod development with various genotypes in Soybean in Zhalantun cm

品种 Genotype	项目 Item	叶片长度	叶片宽度	豆荚长度	豆荚宽度	豆荚厚度
		Leaf length	Leaf width	Pod length	Pod width	Pod thickness
疆莫豆1号 Jiangmodou 1	模拟值 Simulated value	13.84	6.83	5.83	1.11	0.69
	观测值 Observed value	14.23	6.52	5.44	1.28	0.64
	绝对误差 Errors	-0.39	+0.31	+0.39	-0.17	+0.05
蒙豆30号 Mengdou 30	模拟值 Simulated value	14.61	7.55	6.43	1.41	0.81
	观测值 Observed value	15.12	7.16	6.82	1.62	0.76
	绝对误差 Errors	-0.51	+0.39	-0.39	-0.21	+0.05
北豆5号 Beidou 5	模拟值 Simulated value	13.67	6.68	5.77	1.00	0.61
	观测值 Observed value	13.18	6.32	5.38	0.90	0.54
	绝对误差 Errors	+0.49	+0.36	+0.39	+0.10	+0.07
RMSE		0.47	0.35	0.39	0.17	0.06

4 讨 论

构建作物器官建成模型, 时间坐标的选择是首先要解决的问题。目前, 作物器官形态建成模型的时间步长有 3 种, 一是作物生长发育的实际天数^[20], 二是生长度日^[21-22], 三是生理发育时间^[23]。3 种选择各有利弊。采用作物生长发育的实际天数为时间步长, 尽管简单方便, 但因为各年际和地区间的气象条件不同, 其器官建成进程与作物实际生长天数的对应关系会有所差异, 最终导致模型的精度降低。以生长度日为时间步长, 反应了积温与作物器官建成进程的对应关系, 模型相对稳定, 但因作物发育进程与积温的关系并非简单的线性关系^[24], 将给模型的精度带来影响。以生理发育日为步长, 尽管在运用的时候需要计算, 但其反应的对应关系最稳定, 所以模型也最可靠。

与小麦等禾本科作物不同, 大豆的节间、叶片、豆荚数多, 且有无限生长的习性, 形态建成较为复杂, 受养分、水分等外界因子的影响较大, 这使其生长模拟的研究较为困难。本研究对大豆节间生长的动态模拟较为详细, 在系统观察的基础上, 量化了各节间同步生长以及与生理发育时间的关系, 根据观测结果, 以固定的潜在节间长度和粗度来推算其他模型参数, 与曾经构建的大麦茎秆生长动态模型相比^[15,25], 减少了模型参数。本研究考虑了养分对大豆器官形态建成的影响, 引入了最小含氮量、最大含氮量和临界含氮量来订正氮素的影响。水分对大豆器官形态建成也有较大影响, 因试验条件所限, 本研究没有建立水分影响因子模型, 建立水氮耦合的大豆器官形态建成模型, 是下一步的研究计划。因大豆各节位叶片和豆荚的大小差异不大, 所以本研究对叶片和豆荚生长的模拟较为简单, 仅确定了第 3 复叶叶片潜在长度、潜在宽度和第 3 节位首先出现的豆荚的潜在长度、潜在宽度和潜在厚度作为遗传参数, 模拟了大豆第 3 复叶叶片的伸展过程和第 3 节位首先出现的豆荚的生长过程, 而没有采取模拟茎秆时通过固定的潜在节间长度和粗度来推算其他模型参数的处理方法。其是否能代表所有叶片和豆荚的生长动态, 尚需进一步检验; 如何构建所有节位叶片和豆荚的生长发育模拟模型, 是今后主要的研究内容。

5 结 论

本研究在探明生理发育时间(PDT)与大豆茎秆、叶片和豆荚生长关系的基础上, 运用 Richards 方程, 以生理发育日为时间步长, 描述了常规栽培条件下大豆茎秆、叶片和豆荚的动态变化过程, 建

立了大豆茎秆、叶片和豆荚生长的动态模型。该模型以生理发育日来衡量茎秆、叶片和豆荚的生长进程与生长次序, 考虑了光照和温度等对大豆生长发育的影响, 突出了模型的机理性。以品种遗传参数为基础来确定其他的模型参数, 且赋予模型参数一定的生物学意义, 将经验性和机理性有机地结合起来。不同品种不同地域的检验结果表明, 模型具有较好的预测性和可靠性。

[参 考 文 献]

- [1] 季青, 郭新宇, 王纪华, 等. 玉米形态建成研究进展[J]. 玉米科学, 2004, 12(增刊 2): 31—34.
Ji Qing, Guo Xinyu, Wang Jihua, et al. The development of maize morphological architecture research[J]. Journal of maize sciences, 2004, 12(Supp 2): 31—34. (in Chinese with English abstract)
- [2] Tobias Johnen, Ulf Boettcher, Henning Kage. A variable thermal time of the double ridge to flag leaf emergence phase improves the predictive quality of a CERES-Wheat type phenology model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 89: 62—69.
- [3] Masle J, Doussinault G, Farquhar G D, et al. Foliar stage in wheat correlates better to photothermal time than to thermaltime[J]. Plant Cell and Environ, 1989, 12(3): 235—247.
- [4] Watanabe T, Hanan J S, Room P M, et al. Rice morphogenesis and plant architecture: measurement, specification and the reconstruction of structural development by 3D architectural modelling[J]. AnnBot, 2005, 95(7): 1131—1143.
- [5] Hanan J S, Hearn A B. Linking physiological and architectural models of cotton[J]. Agricultural System, 2003, 75(1): 47—77.
- [6] 常丽英, 顾东祥, 张文宇, 等. 水稻叶片伸长过程的模拟模型[J]. 作物学报, 2008, 34(2): 311—317.
Chang Liying, Gu Dongxiang, Zhang Wenyu, et al. A simulation model of leaf elongation process in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(2): 311—317. (in Chinese with English abstract)
- [7] 石春林, 朱艳, 曹卫星. 水稻叶曲线特征的机理模型[J]. 作物学报, 2006, 5(32): 656—660.
Shi Chunlin, Zhu Yan, Cao Weixing. A quantitative analysis on leaf curvature characteristics in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(5): 656—660. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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.
Chen Guoqing, Zhu Yan, Cao Weixing. Modeling leaf growth dynamics in winter wheat[J]. Acta Agronomica

- Sinica, 2005, 31(11): 1524—1527. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王声锋, 段爱旺, 徐建新. 冬小麦株高和叶面积指数变化动态分析及模拟模型[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 97—100.
Wang Shenfeng, Duan Aiwang, Xu Jianxin. Dynamic changes and simulation model of plant height and leaf area index of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(4): 97—100. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张文字, 汤亮, 朱相成, 等. 基于过程的小麦茎鞘夹角动态模拟[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1765—1770.
Zhang Wenyu, Tang Liang, Zhu Xiangcheng, et al. Dynamic simulation of wheat stem sheath angle based on process[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7): 1765—1770. (in Chinese with English abstract)
- [11] 谭子辉, 朱艳, 姚霞, 等. 冬小麦麦穗生长过程的模拟研究[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(4): 93—97.
Tan Zihui, Zhu Yan, Yao Xia, et al. Modeling spike growth dynamics in winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(4): 93—97. (in Chinese with English abstract)
- [12] 胡军成, 汤亮, 刘小军, 等. 小麦根系长度的估算方法与参数分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 112—117.
Hu Chengjun, Tang Liang, Liu Xiaojun, et al. Estimation method and parameter analysis on root length in wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(10): 112—117. (in Chinese with English abstract)
- [13] 周娟, 姜爽, 陈兵林, 等. 棉花茎枝叶形态模型研究[J]. 棉花学报, 2009, 21(3): 206—211.
Zhou Juan, Jiang Shuang, Chen Linbing, et al. Study of morphologic model of stem, branch and leaf in cotton[J]. Cotton Science, 2009, 21(3): 206—211. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈超, 潘学标, 张立祯, 等. 棉花地上部生长的功能-结构模型研究[J]. 作物学报, 2012, 38(12): 2237—2245.
Chen Chao, Pan Xuebiao, Zhang Lizhen, et al. Functional and structural model for above-ground growth in cotton[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(12): 2237—2245. (in Chinese with English abstract)
- [15] 徐寿军, 顾小莉, 许如根, 等. 大麦穗和茎秆生长的动态模拟[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(2): 282—287.
Xu Shoujun, Gu Xiaoli, Xu Rugen, et al. Modeling spike and internode growth dynamics in barley[J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(2): 282—287. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙红敏, 郑萍, 张继成. 大豆叶片生长特征的动态模拟研究[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(4): 446—448.
Sun Hongmin, Zheng Ping, Zhang Jicheng. Dynamic simulation research of soybean leaf growth characteristic[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2007, 38(4): 446—448. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈传梅. 大豆生育期及形态建成的模拟研究[D]. 通辽: 内蒙古民族大学, 2012.
Chen Chuanmei. Modeling Phenological Stages and Morphological Formation in Soybean[D]. Tongliao: Inner Mongolia University for Nationalities, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao Shidan. Soil Agricultural Chemistry Analysis (3rd Edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈传梅, 赵达, 李志刚, 等. 大豆花芽分化和物候期的机理模型[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(5): 502—507.
Chen Chuanmei, Zhao Da, Li Zhigang, et al. Mechanism model for flower bud differentiation and phenophase of soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2012, 34(5): 502—507. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈国庆, 朱艳, 曹卫星. 小麦叶鞘和节间生产过程的模拟研究[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(1): 71—74.
Chen Guoqing, Zhu Yan, Cao Weixing. Modeling leaf sheath and internode growth dynamics in wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2005, 25(1): 71—74. (in Chinese with English abstract)
- [21] 常丽英, 汤亮, 顾东祥, 等. 水稻叶鞘和节间生长过程的动态模拟[J]. 南京农业大学学报, 2008, 31(3): 19—35.
Chang Liying, Tang Liang, Gu Dongxiang, et al. A process-based simulation model of leaf sheath and internode elongation dynamics in rice[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2008, 31(3): 19—35. (in Chinese with English abstract)
- [22] 郭银巧, 赵传德, 朱艳, 等. 棉花地上部形态建成的光温模型[J]. 作物学报, 2009, 35(11): 2101—2106.
Guo Yinqiao, Zhao Chuande, Zhu Yan, et al. Morphogenesis model with relation to light and temperature condition for above-ground organs in cotton[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(11): 2101—2106. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李红岭, 高晓阳, 张明艳, 等. 大麦茎秆生长动态模拟模型[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 129—132.
Li Hongling, Gao Xiaoyang, Zhang Mingyan, et al. Simulation models of internode dynamic growth in

- barley[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 129—132. (in Chinese with English abstract)
- [24] 殷新佑. 对预测作物发育的积温法的评价[J]. *作物学报*, 1999, 25(4): 475—482.
- Yin Xinyou. A critical appraisal of thermal time approach for predicting crop development[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(4): 475—482. (in Chinese with English abstract)
- [25] 顾小莉. 大麦生育期和形态建成的动态模拟[D]. 扬州: 扬州大学, 2007.
- Gu Xiaoli. Modeling Phenological Stages and Morphological Formation in Barley[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2007. (in Chinese with English abstract)

Dynamic simulation of stem, leaf and pod development on soybean

Xu Shoujun¹, Li Zhigang¹, Yang Hengshan¹, Chen Chuanmei¹, Zhao Da¹, Guo Yanfeng²

(1. *Colleg of Agronomy, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028042, China;*

2. *College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China*)

Abstract: Based on systematic observation, the organ morphogenesis model was established on soybeans. In the model, the time step was physiological development time, the growth process and the growth of the order of the stem, leaves and pods were measured by physiological development day, the model parameters were determined by genetic parameters, and the minimum nitrogen content, maximum nitrogen content, and critical nitrogen content were used to express the impact of nitrogen. In the model, internode potential length and potential thickness increased gradually with the increase of the number of soybeans internode, and reached a maximum at the ninth and seventh internode, and then decreased gradually. Therefore, the potential length of the ninth internode and potential thickness of the seventh internode were determined as potential genetic parameters that can calculate the other internodes' potential length and potential thickness. Because of similar leaf morphology on each internode on soybeans, this study only modeled the dynamic of the third fronds. Based on soybean morphological characteristics, this study simulated the pods which first appeared on the third internode. The results showed that the absolute prediction errors ranges of internode length, internode thickness, leaf length, leaf width, pod length, pod width, and pod thickness were 0.08-0.59, 0-0.10, 0.28-0.58, 0.31-0.39, 0.14-0.39, 0.09-0.21, 0.04-0.09 cm respectively with the root mean square errors (*RMSE*) being 0.25-0.28, 0.04-0.05, 0.47, 0.35-0.36, 0.24-0.39, 0.14-0.17, 0.06-0.07 cm, respectively. The model reflected a satisfactory prediction. Moisture had a greater impact on soybean organ morphogenesis. Because of the test conditions, this study did not establish a moisture influence factor model. The model establishment of water and nitrogen coupling soybean organ morphogenesis is the next research program. The models also need to be tested at a greater variety and a wider geographical scope.

Key words: crops, computer simulation, models, soybean, organs, morphogenesis

(责任编辑: 信世强)