

## 黑土农田大豆产量形成过程的模拟验证\*

商磊<sup>1</sup> 赵军<sup>2\*\*</sup> 祁广云<sup>1</sup> 韩晓增<sup>2</sup> 宁海龙<sup>3</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学 大庆 163319; 2. 海伦农业生态系统国家野外科学观测研究站 中国科学院  
东北地理与农业生态研究所 哈尔滨 150081; 3. 大豆生物学教育部重点实验室 哈尔滨 150030)

**摘要** 以中国科学院海伦农业生态站长期定位水肥耦合试验数据为依据,模拟大豆产量形成过程。首先建立大豆品种遗传属性数据库和相应的模型参数,利用 DSSAT 模型系列中的 CropGro-Soybean 模型,对大豆品种遗传属性、作物产量和生长过程中土壤水分进行了模拟验证。模拟结果表明,CropGro-Soybean 模型能够准确地模拟大豆生育期,相对误差在  $-2\% \sim 3\%$  之间,均方根误差  $RMSE$  为 2.3。对不同年际不同田间处理的大豆产量模拟结果分析的相对误差在  $-7\% \sim 9\%$  之间,均方根误差  $RMSE$  为 75.9,模型性能指数  $EF$  为 0.8。模型对不同层次土壤水分变化的模拟效果也较好。

**关键词** 作物生长 大豆产量 品种遗传属性 大豆模拟模型 DSSAT 模型

**中图分类号**: S565.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1671-3990(2008)04-0869-05

## Simulation and validation of soybean yield formation process in black-soil

SHANG Lei<sup>1</sup>, ZHAO Jun<sup>2</sup>, QI Guang-Yun<sup>1</sup>, HAN Xiao-Zeng<sup>2</sup>, NING Hai-Long<sup>3</sup>

(1. Heilongjiang August First Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Hailun National Field Station for Scientific Research and Observation, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 3. Key Laboratory for Soybean Biology, Ministry of Education, Harbin 150030, China)

**Abstract** Soybean yield and growth processes were simulated based on long-term effects of water and fertilizer application at the Hailun Experimental Station of Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences. A database for the soybean cultivar genetic characters and related model parameters were established for the modeling. The soybean phenology, yield and soil water for different growth stages were validated with DSSAT-CropGro-Soybean model. The analysis indicates that the model simulates phenological stages of soybean with only  $-2\% \sim 3\%$  relative error and a  $RMSE$  of 2.3. Crop yield for different years and different field treatments has a relative error range of  $-7\% \sim 9\%$ , 75.9  $RMSE$  and 0.8  $EF$ . The model result for soil water content in different soil layers is good.

**Key words** Crop growth, Soybean yield, Cultivar genetic character, CropGro-Soybean, DSSAT

(Received Jan. 29, 2007; accepted Aug. 31, 2007)

作物生长过程是涉及气候、土壤、作物品种遗传属性及田间管理等众多因素的复杂系统过程。由于随机因素众多,加之气候寒冷,作物 1 年 1 季生长周期长,东北地区作物生长过程的研究难度较大。随着农业信息技术和计算机模拟技术的发展,作物生长模拟模型已经成为近年来国际学术界的研究热点,是当今最为活跃的农业前沿性研究领域之一,也是数字农业的重要基础和关键技术。作物生长模拟模型极大地促进了科学研究的进程,可在

尽可能短的时间,用最少的成本实现辅助科学研究、辅助农业决策的目标。目前,国内外研制和开发了众多作物模型,如 MACROS 模型、SUCROS 模型等<sup>[1-4]</sup>,作物模型中应用年限长效果较好的是 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, 美国农业技术推广决策支持系统) 模型系列。该模型系统由 IBISAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) 开发研制,由美国、加拿大等多所大学和国际农业系统

\* 国家科技支撑计划(地球科学共享网 2006DKA32300-04)和现代化农村信息化关键技术研究示范项目(2006BAD10A16-0101)资助

\*\* 通讯作者: 赵军(1958~),女,研究员,主要研究方向为 GIS 和作物模型。zhaojun@mail.neigaeherb.ac.cn

商磊(1982~),男,硕士研究生,主要研究方向为农业模型和信息技术。E-mail: shanglei82192@yahoo.com.cn

收稿日期:2007-01-29 接受日期:2007-08-31

应用协会联合应用和升级改进,该模型目前已开发到第 4 版本(DSSAT V4)。DSSAT 集成了众多优秀软件模块如 CERES、CROPGRO 等,定义了输入输出数据的标准,能够模拟 9 大类 26 种作物<sup>[5-10]</sup>。CropGro-Soybean 模型是一个过程模型,模型基于作物品种遗传属性和生理生态机理而建立,比采用“积温法”模拟作物物候期的模型,如 WOFOST 模型和 CropSyst 模型更具有优越性和准确性,该模型充分考虑了作物的生长特性,经过参数校正后可在世界各地应用而不用修改源程序。但 CropGro-Soybean 模型运行需要的参数较多,实际应用中还有一定的难度,若与 GIS 技术结合,将会在实际应用中起到重要作用。

本文以中国科学院海伦农业生态实验站水肥耦合试验为数据基础,应用 DSSAT-CropGro-Soybean 模型,对不同田间处理大豆产量和土壤含水量进行了参数校正和模拟验证,建立了基于长期定位试验的大豆产量形成过程模拟模型,为大豆高产研究提供新的技术和手段。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

田间施肥试验在海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站(中国科学院海伦农业生态试验站)的实验区内进行,该站行政区属黑龙江省海伦市,地理位置为北纬 47°26′,东经 126°38′,海拔 240 m。地处中国东北黑土分布区中部,按中国土壤分类标准为典型黑土。半湿润温带大陆季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,雨热同期。1 月最冷,月平均气温为 -25 ~ -22 °C,极端最低气温 -39.5 °C,7 月最热,平均气温为 20 ~ 22 °C,极端最高气温为 37 °C。全年降水量为 500 ~ 600 mm,88% 集中在 5 ~ 9 月。一般 4 月 25 日 ~ 5 月 5 日日平均气温可上升 10 °C 以上,开始播种玉米和大豆。全年作物有效积温( $\geq 10$  °C) 2 400 ~ 2 500 °C,作物生长季约 125 d。全年日照时数 2 600 ~ 2 800 h。

### 1.2 研究方法

田间试验为中国科学院海伦农业生态实验站长期定位水肥耦合试验。小区面积 50.4 m<sup>2</sup>(长 12 m,宽 4.2 m),随机排列,小区与小区间用防水材料隔离,小区池壁用钢筋水泥修建。种植模式为小麦、玉米和大豆 3 区轮作,大豆的前茬为玉米。田间试验设水分和养分两个因素。水分 3 个处理:自然降水、适宜水分(田间持水量的 60% ~ 75%)、充足水分(田间持水量的 75% 以上);养分 3 个水平:

无肥、中肥(施 N 13.5 kg · hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 34.5 kg · hm<sup>-2</sup>)、高肥(施 N 20.25 kg · hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 51.75 kg · hm<sup>-2</sup>)。3 次重复。供试大豆品种为当地主栽品种“黑农 35”。使用的模型为 DSSATCropGro-Soybean 模型。

DSSAT 模型系列的设计和开发基于系统工程的设计思想和系统动力学的方法。模型的运算需建立气候、土壤、品种遗传属性、病虫害、田间管理和经济因子数据库,通过模型的主模块 CSM(Cropping System Model)作物系统模型的驱动程序来调用数据库中的数据和各种分析工具(图 1)<sup>[10]</sup>。DSSAT 模型主要包括 4 个程序模块:数据模块、模型模块、分析模块和其他辅助模块。

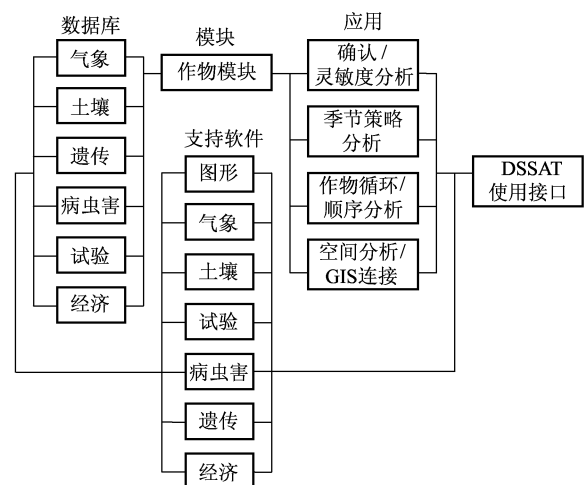


图 1 DSSAT 模型流程图

Fig. 1 Flow chart of DSSAT model

数据模块包括气候数据库、土壤属性数据库、作物品种遗传基因数据库、病虫害数据库、田间管理数据库和经济指标数据库。可进行数据文件的生成、编辑与贮存管理。

模型模块包括谷类作物、豆类作物、块根块茎类作物、油料类作物、蔬菜类作物、纤维类作物、草料类作物、果实类作物和其他类作物等 9 大类作物模型。具有模拟文件生成、输入、模拟、输出与作图等功能。

分析模块包括季节分析、时间序列分析和空间 GIS 分析。

软件模块包括作物管理数据编辑程序、土壤数据编辑程序、天气数据编辑程序、试验数据编辑程序、绘图显示程序、季节分析程序和轮作分析程序。数据模块与模型模块是 DSSAT 模型的核心部分。模型以天为步长进行运算。

本研究利用回归分析的方法、均方根误差法和模型性能指数对模拟结果进行检验。均方根误差计算按下式计算:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (1)$$

模型性能指数按下式计算:

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 - \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (\leq 1) \quad (2)$$

式中,  $n$  为试验对比个数,  $Y_i$  为模拟值,  $X_i$  为观测值。

### 1.3 数据来源和数据库的建立

气象数据来源于中国科学院海伦农业生态实验站自动观测气象站,主要有最高、最低气温,降雨,太阳辐射和风速数据。土壤数据库数据来源于实验站长期定位试验的观测数据,主要有土壤物理

性状,包括:土壤质地、土壤水热特征、土壤机械组成、土壤容重等;土壤化学性状,包括:土壤有机质、土壤全氮、有效磷和速效钾含量等,土壤参数见表1。作物品种遗传数据来源于田间观测和大豆遗传育种等文献<sup>[11]</sup>,主要属性有:大豆各生育期光热天数、光周期,大豆叶面积指数、荚重、粒重等。田间管理数据来自于田间试验,主要有小区面积、排水、地形、栽培行间距、前茬作物、各种田间管理和栽培措施、施肥方式、灌溉方式和数量等等。模拟年限选择1995年、1998年和2001年的大豆轮作3个水分处理和3个养分处理。并采用以上数据建立模型数据库和参数检验数据库。

## 2 结果与分析

### 2.1 品种遗传属性参数的确定

建立品种遗传属性数据库是模拟模型最重要的步骤,确定品种遗传属性参数有几种方式:一是通

表1 模型模拟初始年份(1995年)土壤参数

Tab. 1 Soil parameters in initial year (1995) of model simulation

土层 Soil layer	土层厚度 Thickness of soil layer (m)	粘粒 Clay (g·kg <sup>-1</sup> )	粉砂 Silt (g·kg <sup>-1</sup> )	有机碳 Organic carbon (g·kg <sup>-1</sup> )	pH	全氮 Total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )
1	0.28	315	539	29.3	6.38	2.4
2	0.35	337	499	15.4	6.71	1.1
3	0.34	439	434	14.0	6.56	1.1
4	0.53	460	398	9.0	6.40	0.8

过田间试验观测获得;二是参考前人有关大豆遗传育种的数值,利用试差法通过模型模拟校正得到;三是参考品种的遗传属性通过回归等数学方法计算得出。本文采用田间试验和参考大豆遗传育种学<sup>[11]</sup>的参数值,通过DSSAT中GENETICS模块建立属性参数,利用试差法对参数不断校正,直到模拟的参数值最接近实际值时,确定总结得出品种的遗传属性参数。以供试品种“黑农35”为例,模拟的物候期和观测值拟合较好,能够较真实地反映该品种生长发育状况;但模拟的花期比观测值晚1~3d,可能因为出苗与积温和土壤水分相关性较大,如果不能满足一定的阈值,会影响作物的生长属性,并导致作物产量模拟的误差。

### 2.2 不同年际间不同试验处理大豆产量的模拟

在确定了品种遗传属性后,CropGro-Soybean可以较好地模拟大豆作物的产量,模拟值与观测值拟合较好。1995年适宜水分和充足水分中、高肥处理均比自然降水产量低,可能的原因是1995年雨季比正常年早;1998年中肥处理比无肥处理产量低,可

能由于1998年黑龙江洪水暴发,天气变化异常,降雨量大,温度偏高,影响了土壤肥力发挥。模型能够跟随以上几个年际间较特殊的变化并进行了很好的模拟。但总的模拟值在无肥情况下略低于实测值,可能是由于黑土土壤有机质较其他地区高,而模型还不能够充分反映这一特点,这需要结合田间试验对模拟的重要参数进行更深入细致的改进和调整。

### 2.3 土壤水分的模拟

模型模拟了大豆生长期耕层10~20cm、20~30cm和30~40cm的土壤水分状况,取得了较好的模拟效果(图2)。从图2可以看出,生育期开始阶段10~20cm土壤含水量模拟值高于观测值,而生育中后期30~40cm土壤含水量的模拟值低于观测值。但总趋势与实际值基本吻合,20~30cm模拟误差较小,效果较好。

### 2.4 模拟结果检验

为检验模型的模拟效果,利用回归分析方法和均方根误差法对所有模拟结果进行了验证。

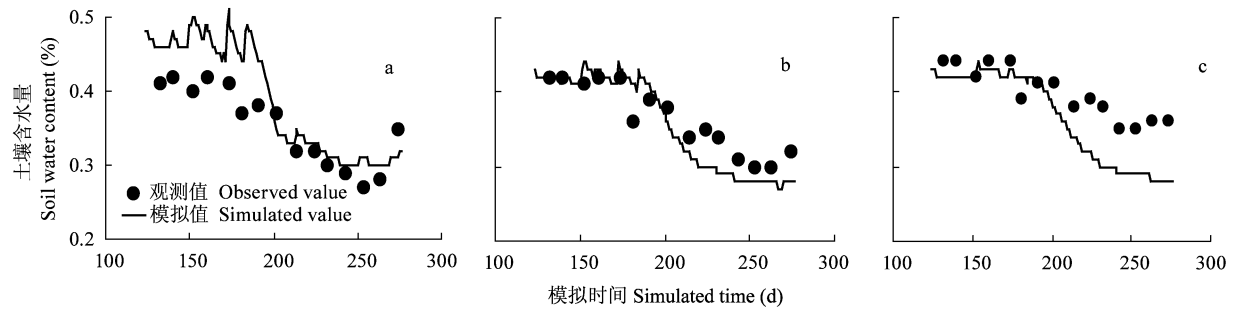


图 2 10 ~ 20 cm (a)、20 ~ 30 cm (b)、30 ~ 40 cm (c) 土层土壤水分模拟值与观测值

Fig. 2 Simulated and observed values of soil water contents of 10 ~ 20 cm (a), 20 ~ 30 cm (b), 30 ~ 40 cm (c) layers

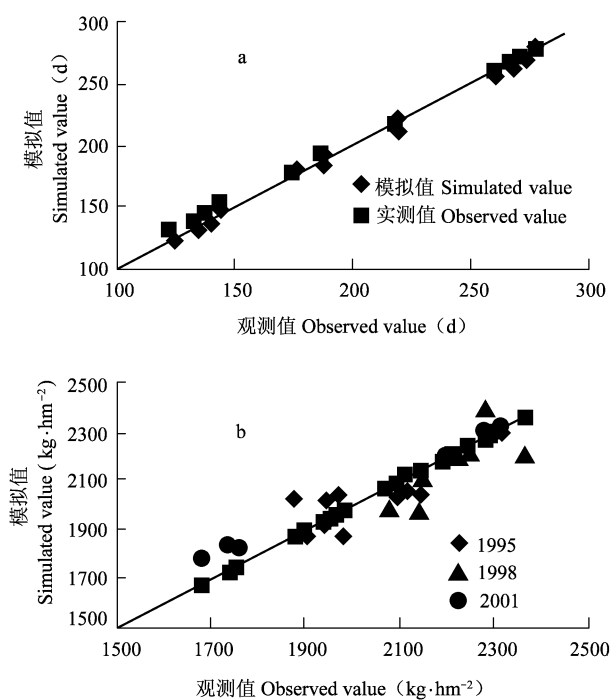


图 3 不同水分、养分条件下大豆生育期 (a)、产量 (b) 模拟值与实测值

Fig. 3 Simulated and observed values of soybean bearing period (a) and yield (b) under different water and nutrient treatments

根据当地情况,大豆出苗期一般为模拟开始后的第 135 ~ 144 d、开花期为第 175 ~ 179 d、结荚期为第 186 ~ 189 d、鼓粒期为第 215 ~ 220 d、成熟期为第 257 ~ 268 d 和收获期为第 265 ~ 276 d。模拟值与实际值较为接近,误差在 1 ~ 3 d。生育期模拟的回归分析见图 3a,统计分析表明,相对误差在 -2% ~ 3% 之间,均方根误差 ( $RMSE$ ) 为 2.3 > 0,  $RMSE$  越小,表明模拟效果越好。说明本模型模拟“黑农 35”大豆的生育期各个阶段效果较好。

大豆产量模拟的检验结果见图 3b。1995 年、1998 年和 2001 年大豆产量的模拟验证分析表明,模型对田间试验的 3 种水分处理和 3 个养分处理的作物产量模拟结果较好,能够模拟不同处理产量的变化,反映了模型的可信度较高。统计分析结果表明,相对误差在 -7% ~ 9% 之间,均方根误差  $RMSE$  为 75.9,模型性能指数  $EF$  为 0.8,  $EF$  越接近 1,表明模拟的效果越好。

土壤水分模拟的验证分析见图 4。分析结果表明 10 ~ 20 cm 土层  $RMSE$  为 0.05,  $EF$  为 0.5; 20 ~ 30 cm 土层  $RMSE$  为 0.03,  $EF$  为 0.55; 30 ~ 40 cm 土层  $RMSE$  为 0.05,  $EF$  为 0.88。表明模型对不同层次土壤水分变化的模拟效果较好。

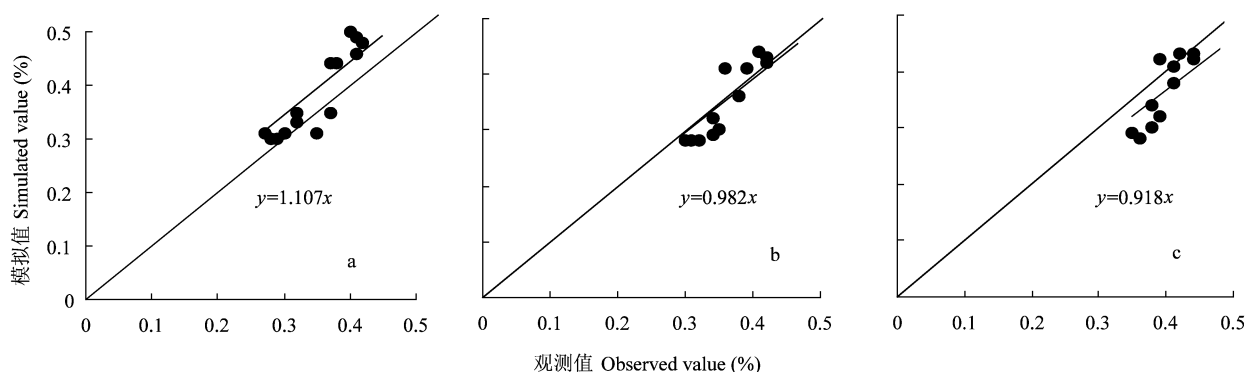


图 4 10 ~ 20 cm (a)、20 ~ 30 cm (b)、30 ~ 40 cm (c) 土层土壤水分模拟灵敏度分析

Fig. 4 Sensitive analysis for soil water contents of 10 ~ 20 cm (a), 20 ~ 30 cm (b), 30 ~ 40 cm (c) layers



### 3 结论

本研究对模型在大豆各生育期的模拟值与观测值的比较表明,对作物遗传属性模拟参数校正后,模型能够很好地模拟作物的物候期,作物品种遗传属性参数的确定是模型取得正确结果的首要因素。本研究在作物产量的模拟中能够较好地模拟不同年际间不同试验处理所形成的大豆产量,观测值与实际值的一致性较好,误差在合理范围内。该模型能够在松嫩平原黑土区域应用,在模拟大豆作物产量形成过程中所表述的各种因素构成对于科学研究具有重要的价值。

由于数据和资料限制,本文尚未对土壤养分变化、作物养分含量及生物量变化以及其他大豆品种产量形成过程中的重要参数进行验证和评价,这将在进一步的研究中逐步完成。

作物模型模拟为作物产量形成过程研究提供了很好的平台和方法,模型技术和田间试验方法相结合,可节省大量人力物力,缩短研究周期,提升科研水平,促进农业研究的进步。

**致谢** 对中国科学院海伦农业生态实验站和东北黑土农业生态数据库提供的数据支持和杨靖一教授的指导表示感谢,同时对王宽诚科研奖金项目的资助表示谢意。

### 参考文献

[1] 林忠辉,莫兴国,项月琴,等.作物生长模型研究综述

[J].作物学报,2003,29(5):750-758

- [2] 李晓明,孙红敏.作物生长模拟模型的研究与应用[J].东北农业大学学报,2005,36(6):812-815
- [3] 曹宏鑫,任德昌,王旭清,等.作物生长发育过程的计算机模拟决策研究概述[J].山东农业科学,2001(3):51-54
- [4] 李军,邵明安,王立祥,等.黄土高原典型地区种植模式产量效应模拟与效益评价研究[J].中国农业科学,2003,36(12):1599-1603
- [5] Welch S. M., Jones J. W., Brennan M. W., et al. PC Yield: model-based decision support for soybean production[J]. Agricultural Systems,2002,74:79-98
- [6] 赵军.SOYGRO模型在大豆产量预测中的应用[J].大豆科学,1999,18(1):67-71
- [7] 李军,邵明安,樊廷录,等.黄土高原作物生长模型 DSSAT3 数据库组建[J].干旱地区农业研究,2001,19(1):120-126
- [8] 李军,王立祥,邵明安,等.黄土高原地区秋粮作物生产潜力模拟研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2001,29(5):56-60
- [9] 姚凤梅,许吟隆,冯强,等.CERES-Rice模型在中国主要水稻生态区的模拟及其检验[J].作物学报,2005,31(5):545-550
- [10] Jones J. W., Hoogenboom G., Porter C. H., et al. The DSSAT cropping system model[J]. Europ. J. Agronomy,2003,18:235-265
- [11] 王连铮,王金陵.大豆遗传育种学[M].北京:科学出版社,1992