

田间不同施肥处理大豆生长过程模拟验证研究

赵军¹, 商磊², 王毅博³, 宁海龙⁴, 韩晓增¹, 杨靖一⁵

(¹中国科学院东北地理与农业生态研究所, 黑龙江哈尔滨 150081; ²黑龙江八一农垦大学, 黑龙江大庆 163319; ³黑龙江大学, 黑龙江哈尔滨 150080; ⁴大豆生物学教育部重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150030; ⁵Agriculture and Agricultural Food Canada, Greenhouse Processing and Crop Research Centre, Harrow, Ontario, N0R 1G0, Canada)

摘要:大豆是东北的主要农作物之一, 准确地应用模型技术可以辅助田间试验来研究如何提高和改善大豆产量和品质。利用 CSM-CROPGRO-Soybean 模型, 在海伦农业生态站 1993~1996 年长期定位不同施肥处理实验数据的基础上, 建立大豆品种遗传属性和相应数据库, 对大豆产量和物候期等重要生长过程和结果进行模拟和验证。结果表明, 在对 4 年不同施肥处理的模拟中, 大豆物候期的模拟 RMSE 为 0.58 d, EF 为 0.92。大豆产量模拟 RMSE 为 101.6 kg hm⁻², EF 为 0.7, 取得了较好的模拟效果。模型的方法可以为大豆优化种植提供有效的信息技术手段。

关键词:作物生长模型; 大豆品种; 遗传属性; CSM-CROPGRO-Soybean

Simulation of Soybean Growth with Different Fertilizer Treatments in Northeast China

ZHAO Jun¹, SHANG Lei², WANG Yi-bo³, NING Hai-long⁴, HAN Xiao-zeng¹, and YANG Jing-yi⁵

(¹ Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, Heilongjiang, China; ² Heilongjiang August 1st Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China; ³ Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China; ⁴ Key Laboratory of Soybean Biology of Ministry of Education, Harbin 150030, Heilongjiang, China; ⁵ Agriculture and Agri-Food Canada, Greenhouse Processing and Crop Research Centre, Harrow, Ontario, N0R 1G0, Canada)

Abstract: Soybean is one of the most important crops in the Northeast of China. The efficient use of crop simulation models is an effective complement to experimental research for improving soybean productivity. The objectives of this study were to evaluate the Cropping System Model CSM-CROPGRO-Soybean for its ability to simulate phenology, grain yield and biomass with different fertilizer treatments in 1993-1996 year at Hailun Agro-Ecological Experimental Station. And a soybean model database included genetic characteristics of variety, soil, weather and field managements was established for the model performance. The evaluation of the CSM-CROPGRO-Soybean showed that the model was able to simulate the phenology and grain yield and so on with different treatments accurately, with RMSE equals 0.58 and EF equals 0.92 for phenology, and RMSE equals 101.6 kg ha⁻¹ and EF equals 0.70 for soybean yield. These results are promising for farmers and decision makers, as they could have access to accurate yield forecasts prior to final harvest. However, to be able to make practical decisions for soybean productivity and quality, it is necessary to further tested and developed with long-term experimental practices.

Key words: Crop growth model; Soybean varieties; Genetics characteristics; CSM-CROPGRO-Soybean

大豆是东北的主要农作物之一, 种植面积约占到耕地面积的 50%~70%, 是全国大豆种植面积和产量的三分之一, 并形成了较大的加工能力, 是农民的主要收入来源。但是, 目前东北大豆生产出现了严重的问题: 品质差, 产量低, 栽培方式单一, 重迎茬面积不断加大, 病虫害加剧; 农药和施肥的不合理造成环境污染严重, 致使我国大豆及大豆制品进口量

逐年有增无减, 已由世界上最大的大豆生产国退居第四位, 成为世界上最大的进口国。作物生长过程是非常复杂的过程, 受限于气候条件、品种、田间管理等众多影响因子, 而且彼此之间存在不确定性互动和异动。从根本上理解多种因素之间的交互作用和相互影响, 是提高产量保护生态环境的关键。模型的方法为作物生长过程的研究提供了一个很好手

收稿日期 (Received): 2007-11-02; 接受日期 (Accepted): 2007-12-11

基金项目: 国家科技基础条件平台建设项目 (2006DKA32300-04); 中国科学院王宽诚科研奖金项目

作者简介: 赵军 (1958-), 女, 研究员, 硕士生导师, 从事作物模型, GIS 和信息技术研究。E-mail: zhaojun1@yahoo.com

段,可以节省大量人力物力,用较短时间得到需要的结果。目前,作物生长模拟模型已经成为国内外可持续农业发展中的一个新的研究热点,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。

多年来,国内外研制和开发了一些较好用的作物模型,例如 MACROS 模型、SUCROS 模型等(林忠辉等,2003;李晓明和孙红敏,2005;曹宏鑫等,2001;李军等,2003)。在众多作物模型中,应用年限长、范围大应属美国的农业技术推广决策支持模型系统 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)。该模型系统是由国际农业技术推广网络 IBSSAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) 开发研制的。迄今为止已经有 30 多年的历史,4 个升级版本。DSSAT4 版本整合了多个国家的模型资源,定义了输入输出数据的标准,是能够根据不同的作物品种遗传属性进行模拟的组件式模型系统,能模拟 9 大类 26 种作物 (Welch et al., 2002; 赵军, 1999; 居辉等, 2005)。目前, DSSAT 模型系统在世界范围内大约有 1500 多位科学家在使用,研究作物生长过程。在中国,李军等(2001)模拟了黄土高原小麦和玉米生产潜力,姚凤梅等(2005)验证了水稻的模拟。但是对大豆生长过程的模拟研究几乎未见报道。

本研究在中国科学院海伦农业生态实验站多年田间试验数据积累的基础上,建立模型数据库,利用 DSSAT 系列中的 CSM-CROPGRO-Soybean 模型,通过对大豆模拟参数的校准确定品种遗传属性,模拟和验证不同田间施肥处理对大豆产量等要素的影响,探讨大豆生长过程模拟研究模式,为提高大豆产量和品质提供数据支持。

1 材料和方法

1.1 研究区基本概况

田间不同施肥处理设置于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,该站行政区属于黑龙江省海伦市境内,位于中国东北黑土分布区中部,按中国土壤发生分类标准,为典型黑土。半湿润温带大陆季风气候类型,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,雨热同期。1 月份最冷,月平均气温为 $-22 \sim -25^{\circ}\text{C}$, 极端最低气温 -39.5°C , 7 月份最热,平均气温为 $20 \sim$

22°C , 极端最高气温为 37°C 。全年降水量为 $500 \sim 600 \text{ mm}$, 88% 集中在 $5 \sim 9$ 月。一般 4 月 25 日~5 月 5 日日平均气温即可上升为 10°C 以上,开始播种玉米和大豆。全年作物有效积温 ($\geq 10^{\circ}\text{C}$) $2400 \sim 2500^{\circ}\text{C}$, 作物生长季约 125 d。全年日照时数 $2600 \sim 2800 \text{ h}$ 。

1.2 田间试验方法

各处理的小区面积宽 5.6 m, 长 40 m, 分 3 行排列。横向间隔 1.4 m 保护行,纵向间隔 4 m 宽。小麦、玉米、大豆 3 区轮作,大豆的前茬作物是玉米。田间试验处理为自然降水,4 个处理:①无肥、②施氮肥加猪粪 (36.8 kg hm^{-2}), ③施氮肥 (71.5 kg hm^{-2}), ④施氮肥加猪粪 (116.9 kg hm^{-2}), 3 次重复,随机区组排列。供试作物品种为当地主栽品种黑农 35。模拟年度为 1993, 1994, 1995 和 1996。应用的作物模型为 CSM-CROPGRO-Soybean。

1.3 模拟分析方法

所利用的 DSSAT 系统中 CSM-CROPGRO-Soybean 模型是基于系统动力学仿真的设计思想,作物生理生态学原理开发完成的。模型的运算需要气候、土壤、品种遗传属性、田间管理等数据支持。模型的主模块是 CSM (Cropping System Model), 由 CSM 驱动和调用各数据库中的数据和分析工具完成模拟的运行,工作流程如图 1 所示 (Jones et al., 2003)。模型以天为步长进行运算。

模型应用的数据转换公式和统计学分析方法如下:

$$Q = S_0 (0.16 + 0.612X_1 + 0.0384X_1X_2 - 0.00313X_1X_3 - 0.000469X_2X_3) \quad (1)$$

公式 (1) 为太阳总辐射计算公式 (左大康, 1991), 式中 X_1 为逐日日照百分率 (%); X_2 为海拔高度 (km); X_3 为平均绝对湿度 (mb); S_0 为各地区天文辐射值 (MJ m^{-2})。由于观测数据只有日照没有辐射数据需要通过公式 (1) 进行转换。

对模型模拟的结果进行检验和评价的统计学方法是利用均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error), 平均误差 ME (Mean Error) 和模型预报效率系数 EF (Efficiency of Forecasting)。公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\sum (y_i - x_i)^2 / n} \geq 0 \quad (2)$$

$$ME = \frac{\sum (y_i - x_i)}{n} \quad (3)$$

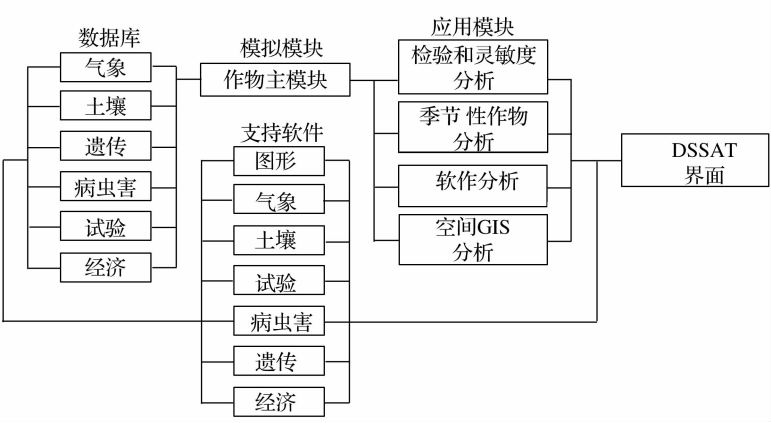


图 1 DSSAT 工作流程图
Fig.1 Lavout of DSSAT

$$EF = 1 - \frac{\sum (y_i - x_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \leq 1 \tag{4}$$

公式(2)~(4)中 x_i 为模拟值, y_i 为观测值, \bar{y} 为观测均值, n 为数据对的数目。公式(2)~(3)通常用于评价模拟的准确程度, 输出值越小, 表明模拟效果越好 (Yang et al., 2000)。公式(4), EF 越接近 1, 表明总体模拟效果越好。

1.4 数据库的建立

气象数据来源于海伦站, 主要数据有: 最高气温、最低气温、降雨量、太阳辐射、风速, 以天为步长。土壤数据库来源于长期定位实验站观测数据和参考第 2 次土壤普查数据。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: 土壤有机质含量、土壤全氮、有效磷和速效钾等; 大豆物候期和遗传属性, 物候期数据来自于田间试验, 品种遗传属性参考大豆遗传育种相关文献 (王连铮和王金陵, 1992)。主要参数有: 大豆各生育期的光热天数、光周期、叶面积指数、荚重、粒重等等; 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、播种密度、播种期、收获期、施肥期和施肥方法、栽培措施、灌溉量和方法等。根据不同模拟年限和相关信息, 分别建立不同的模型输入/输出数据库 (见表 1) 和参数文件 (见表 2)。

表 1 作物系统模型需要建立输入/输出数据库
Table 1 The I/O ddatabase of the CSM-CROPGRO-Soybean model

数据库名称 Name of database	文件名代码 Code file names	状态变量或属性 State variables or characters	来源 Sources
气象数据库 Climate database	*****. WTH	每日最高、最低气温、降水、辐射 Daily highest and lowest temperature, precipitation and radiation	海伦站气象观测 Climate observation at Hailun station
土壤数据库 Soil database	*****. SOL	土壤理化性状 Physical and chemical characters of soil	实验观测和相关文献 Observation of experiment and related documents
田间管理数据库 Field management database	*****. SBX	播种日期, 密度, 行距, 施肥, 灌溉, 耕作, 收获 Sowing date, density, row space, fertilization, irrigation, tillage and harvest	实验观测 Observation of experiment
品种遗传属性数据库 Variety inheritance attribute database	*****. CUL (ECO, SPE)	涉及大豆物候期的光热天数, 光周期等 Photo - thermal days and photoperiod of soybean related to phenology	试验观测和相关文献 Observation of experiment and related documents
输出文件库 Output file of database	*****. OUT	土壤养分、作物养分、所有模拟值输出 Soil nutrient, plant nutrient and so on	模拟结果 Simulation results
验证文件库 Validation of database	*****. SBT (SBA)	产量, 地上干物重, 根重, 土壤水含量, 土壤 N 等等 Yield, top dry weight of plant, root weight, soil water content, soil N content and so on	实验观测数据 Observation data of experiment

表 2 模型模拟初始年份土壤主要参数
Table 2 Main basic soil parameters of experimental plot in the station

试验地 Sites of experiments	土层 Soil layer/cm	pH	有机碳 Soil organic carbon/g kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/g kg ⁻¹	粘粒 Silt/%	饱和水 Saturated water/%
1	0 - 15	6.35	3.13	0.39	31.5 - 34.9	46.3 - 49.0
	15 - 30	6.60	2.36	0.30	33.7 - 42.0	32.2 - 44.9
2	0 - 15	6.29	3.87	0.43	31.5 - 34.9	46.3 - 49.0
	15 - 30	6.31	3.79	0.43	33.7 - 42.0	32.2 - 44.9
3	0 - 15	6.22	3.70	0.45	31.5 - 34.9	46.3 - 49.0
	15 - 30	6.30	3.76	0.46	33.7 - 42.0	32.2 - 44.9

2 结果与分析

2.1 大豆物候期模拟

大豆物候期的模拟是检验大豆品种遗传属性的关键步骤。而建立品种遗传属性参数数据库是模拟运算最重要的步骤,确定品种遗传属性参数有几个步骤:1)通过田间试验观测方法获得物候期和光周期的基础数据;2)参考大豆遗传育种数据;3)利用 GENETICS 遗传属性模型和试差法(try and error)校正得到。本研究在利用连续 3 年的田间试验数据(该部分试验数据不参加模拟验证),结合大豆遗传育种多年试验观测数据,计算、模拟校正得出大豆品种的遗传属性参考数值。作物品种遗传属性参数中的 CSDL(临界短日照)和参数 PPSEN(随时间变化的光周期反映相关性斜率)对大豆物候期影响较大,也是最难以确定的参数值。经校正后,针对供试品种黑农 35,利用确定的品种遗传属性参数值对大豆物候期进行了模拟,模拟值和实测值误差较小,为 2~3 d(图 2)。误差原因不排除田间试验和模型定义的精度存在差异的可能性。决定系数 R^2 为 0.92,模拟误差在允许范围内,取得了较好的结果,对物候期模拟的准确性校正了大豆品种遗传属性参数,使其能比较真实地反映出该品种的生长发育状况。

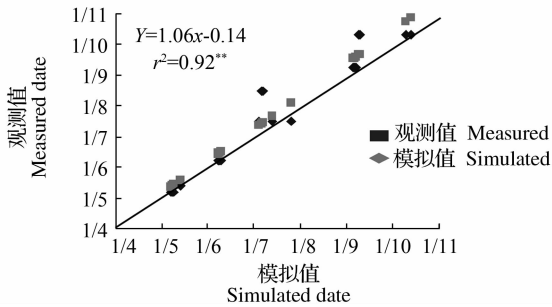


图 2 观测和模拟的大豆生育期
Fig. 2 Observed and simulated values of soybean growth period in 1993,1994,1995 and 1996

2.2 大豆产量模拟

在输入正确的品种遗传属性参数、土壤数据、气候数据和田间管理数据后,模型生成不同的运算控制文件,由 CSM 调用,分别运行得出不同年份各处理的模拟结果。通过模拟值和实测值的线性回归分析可知,模型较好地模拟了大豆产量,模拟值与观测值拟合较好(图 3-a)。 R^2 为 0.6,达到 0.01 水平下显著相关。存在的问题是,处理 1 无肥时,模拟值普遍低于实际值。可能的原因是海伦站位于松嫩平原黑土区中心地带土壤类型属于中厚黑土,自然肥力好,土壤有机质含量高,因此无肥时大豆的产量也较高。而模型还不能完全反映出这种状况,需要

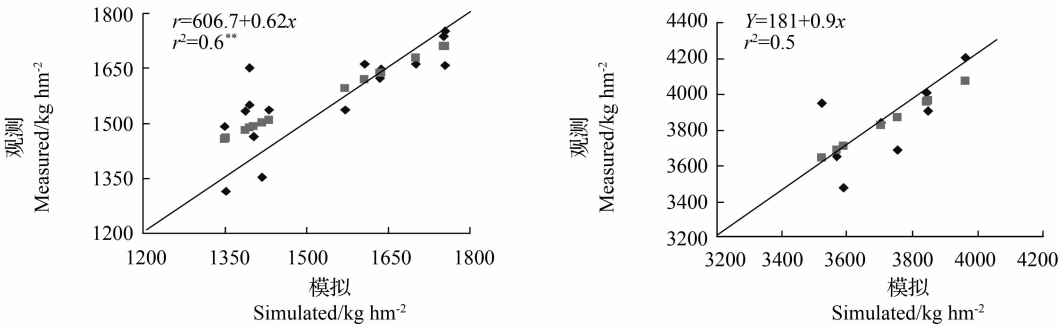


图 3 (a) 观测和模拟的大豆产量 (b) 模拟和观测的地上部生物量
Fig. 3 (a) Observed and simulated value of soybean yield; (b) Observed and simulated value of aboveground biomass

对模型的计算公式或者某些重要参数进行修正,这些还有待于进一步的田间试验进行配合研究。在施入氮肥的情况下,模型反映比较敏感,模拟值随着施肥量的增加而增加,能够反映出施氮肥对产量变化的影响趋势,模拟值和实测值较为接近。

2.3 地上生物量模拟结果

作物生物量反映了收获指数的合理性和干物质分配的可靠性,模拟的正确与否,是对模型验证的重要指标。本研究由于数据的原因,仅模拟了两个处理的大豆地上部生物量(处理1和4)如图3-b所示。观测值和模拟值总的模拟趋势表现较好,但基本上低于实测值。地上部秸秆生物量的模拟误差较大,影响了模拟精度,不排除观测数据的误差。决定系数 R^2 为 0.5。

3 讨论

为了检验模型模拟的效果,利用统计学分析方法对模拟结果进行了验证,见公式(2)~(4)。

大豆物候期的统计学分析表明(见表3)模拟值与实际值较为接近,均方根误差 $RMSE > 0$, 误差为 0.58 d, ME 为 0.24 d, 这两个指标值越小,表明模拟的效果越好; EF 为 0.92, 取得了较好的结果。品种的物候期和品种的遗传属性密切相关,如果品种遗传属性的 14 个参数建立正确,能够保证模拟物候期的准确性。

表3 模型灵敏度分析

Table 3 Sensitive analysis of simulation

模拟项 Simulated item	均方根误差 Root mean square error	平均误差 Mean error	预报效率系数 Efficiency of forecasting
物候期 Phenology/d	0.58	0.24	0.92
产量 Grain yield /kg hm ⁻²	101.6	38.6	0.7
地上生物量 Top biomass/kg hm ⁻²	197.8	115	0.2

对于田间试验 4 种施肥处理所模拟的产量和实测值误差 $RMSE$ 为 101.6 kg hm⁻², ME 为 38.6 kg hm⁻², EF 为 0.7, 其模拟误差在允许的误差范围内,模拟的效果较好。地上生物量的模拟误差较大, $RMSE$ 为 197.8 kg hm⁻², ME 为 115 kg hm⁻², EF 为 0.2。由统计学的方法可以判定其模拟地上生物量误差在允许的误差范围内。但是 EF 值较小,说明有一些特异值(过高或过低的测量了生物量)对它

模拟的影响权重很大,究竟是哪些特异值和原因还有待于进一步研究和分析。从总体上讲,模型模拟的产量、地上部生物量和物候期具有可信性和准确性,误差也在允许的范围以内。

下面以产量的模拟为例,讨论不同年际间和不同处理模拟的精度。当年代变化,而施肥处理不变的情况下,分别比较 4 年同一个施肥处理模拟值和实测值的平均误差后发现:不同的施肥处理(按顺序排列),其平均误差分别为 28、247、-21 和 364 kg hm⁻²。模拟值除了处理 3 外都略低于实际值,而处理 1 和处理 3 误差相对较小,基本接近实际值。误差的原因可能是处理 2 和处理 4 增加了一部分猪粪还田,除去氮肥以外,可能还有其他的养分因素促进了产量的增加,而模型还无法模拟,所以模拟的产量相对较低。另外从比较同一年际间不同处理的模拟结果看(图4),1993 年和 1994 年模拟值和实测值误差不大;1995 年模拟误差较大,从而也影响了模型整体的模拟精度。分析气象数据 1995 年大豆生长季节降水偏少,气温偏高可能是原因之一;1996 年试验数据中各处理波动较大,增施猪粪明显地增加了作物的产量,而按照处理的总含氮量来模拟产量出现了误差。目前该模型只能模拟田间施氮肥的处理,这也是模型今后应该改进的地方。总之,在大豆生长的过程中,除了主要受气候因素的变化影响而外,还受土壤环境、品种、人为的田间管理等众多因素的影响,因此,如果利用模型进行模拟和分析还需要不断地探索和更加深入地研究。如果一个模型可以很好的应用和模拟预测,就可以预测气候条件改变、播期改变、行距的改变、增加灌溉、增加施肥量等因素在大豆生长过程中起到的作用,并提出更好的控制和改进方案和技术。模型的方法可以节省田间试验的开支,并能够获得田间试验无法得到的结果

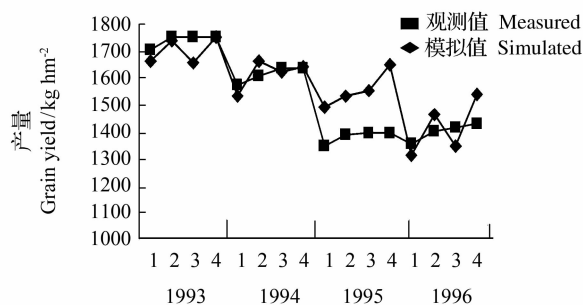


图4 不同年际不同施肥处理模拟数据拟合图

Fig. 4 Curve with different treatments and years

和信息。

4 结论

利用 1993 ~ 1996 年海伦站长期定位试验数据,针对大豆品种黑农 35 校准了模型的模拟运行参数,并验证了大豆产量、地上部生物量和物候期。通过此次模拟认为,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,需要至少 2 年的田间试验调查和多次模拟才能确定。在模型能够被应用之前,还需要进一步的对作物生长曲线、土壤碳氮含量的变化,土壤水分的变化等等进行细致的研究和测试。

由于 CSM-CROPGRO-Soybean 模型是通过计算每一天作物生长发育过程碳氮平衡和干物质积累,并利用系统动力学仿真的方法,把气候-作物-土壤-田间管理作为一个系统进行设计和模拟的,所以较之统计学模型和经验型模型有更高的准确性。但是该模型需要的参数较多,因此,适当地增加各生育期观测次数,可以更好地满足模型的需要。CSM - CROPGRO-Soybean 模型能够作为一个非常有利的辅助工具在东北寒冷地区应用来模拟大豆生长过程中的重要因素变化,对于提高大豆的产量和品质都有着重要的意义。

致谢:感谢海伦农业生态实验站提供的长期实验和观测数据,感谢张之一先生对土壤属性数据的指导,感谢 G. Hoogenboom 教授对 DSSATV4.0 模型使用中所给予的帮助。The author gratefully acknowledges the support of K. C. Wong Education Foundation, Hong Kong.

References

- Cao H X, Ren D C, Wang X Q, Dong Y H, Wang F H, Gao L Z, and Jin Z Q. 2001. The summary of computer simulation decision study on the crops growth process. *Shandong Agriculture Science*, 3: 51-54 (曹宏鑫, 任德昌, 王旭清, 董玉红, 王法宏, 高亮之, 金之庆. 2001. 作物生长发育过程的计算机模拟决策研究概述. *山东农业科学*, 3: 51-54)
- Jones J W, Hoogenboom G, and Porter C H. 2003. The DSSAT cropping system model. *Europe Journal Agronomy*, 18: 235-265
- Ju H, Xiong W, Xu L L, and Lin E D. 2005. Impacts of climate change on wheat yield in China. *Acta Agronomica Sinica*, 31 (10): 1340-1343 (居辉, 熊伟, 许吟隆, 林而达. 2005. 气候变化对我国小麦产量的影响. *作物学报*, 31 (10): 1340-1343)
- Li X M, and Sun H M. 2005. The study and application of crop growth simulative model. *Journal of Northeast Agricultural University*, 36 (6): 812-815 (李晓明, 孙红敏. 2005. 作物生长模拟模型的研究与应用. *东北农业大学学报*, 36 (6): 812-815)
- Li J, Shao M A, and Wang L X. 2003. Yield simulation and effect evaluation of cropping patterns of typical areas on loess plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 36 (12): 1599-1603 (李军, 邵明安, 王立祥. 2003. 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. *中国农业科学*, 36 (12): 1599-1603)
- Li J, Wang L X, Shao M A, and Fan Y L. 2001. Simulation of autumn grain crop productive potential on Loess Plateau region of China. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Nature Science Edition)*, 29 (5): 56-60 (李军, 王立祥, 邵明安, 樊延录. 2001. 黄土高原地区秋粮作物生产潜力模拟研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 29 (5): 56-60)
- Lin Z H, Mo X G, and Xiang Y Q. 2003. Research advances on crop growth models. *Acta Agronomica Sinica*, 29 (5): 750-758 (林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 2003. 作物生长模型研究综述. *作物学报*, 29 (5): 750-758)
- Wang L Z, and Wang J L, eds. 1992. Genetic breeding of soybean. Science Press, China, Beijing, pp. 268-305 (王连铮, 王金陵. 主编. 1992. 大豆遗传育种学. 科学出版社, 中国, 北京, pp. 268-305)
- Welch S M, Jones J W, Brennan M W, Reeder G, and Jacobson B M. 2002. PCYield: model-based decision support for soybean production. *Agricultural Systems*, 74: 79-98
- Yao F M, Xu L Q, Feng Q, Lin E D, and Yan X D. 2005. Simulation and validation of CERES-Rice model in main rice ecological zones in China. *Acta Agronomica Sinica*, 31 (5): 545-550 (姚凤梅, 许吟隆, 冯强, 林而达, 延晓冬. 2005. CERES-Rice 模型在中国主要水稻生态区的模拟及其检验. *作物学报*, 31 (5): 545-550)
- Yang J, Greenwood D J, Rowell D L, Wadsworth G A, and Burns I G. 2000. Statistics methods for evaluating a crop nitrogen simulation model, N-ABLE. *Agricultural Systems*, 64 (1): 37-53
- Zhao J. 1999. The application of SOYGRO model in soybean yield prediction. *Soybean science*, 18 (1): 67-71 (赵军. 1999. SOYGRO 模型在大豆产量预测中的应用. *大豆科学*, 18 (1): 67-71)
- Zuo D K, ed. 1991. The study of radiation on earth surface. Science Press, China, Beijing, pp. 34-51 (左大康, 著. 1991. 地球表层辐射研究. 科学出版社, 中国, 北京, pp. 34-51)