

CropSyst 作物模型在松嫩平原典型黑土区的校正和验证

王宗明, 张 柏, 宋开山, 段洪涛

(中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘 要: 通过对 CropSyst 作物模拟模型进行修订和验证, 应用该模型对松嫩平原黑土区主要作物的生产潜力进行了模拟, 并对作物生产力模拟的有效方法进行了初步探索。模拟结果表明, 对于主要作物的经济产量、全生育期蒸散量、收获时的地上生物量, 模拟值与实测值较为接近。模拟值和实测值的均方根误差 $RMSE$ 为 3.59% (小麦地上生物量)~ 8.02% (小麦产量), 模拟性能指数 EF 最小为 0.76 (玉米蒸散量), 最大为 0.90 (小麦产量)。

关键词: 作物生产力; 作物模拟模型; CropSyst 模型; 松嫩平原黑土区

中图分类号: 65.228

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)05-0047-04

王宗明, 张 柏, 宋开山, 等. CropSyst 作物模型在松嫩平原典型黑土区的校正和验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 47-50

Wang Zongming, Zhang Bai, Song Kaishan, et al. Calibration and validation of crop model CropSyst in typical black soil zone of Songnen Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 47-50 (in Chinese with English abstract)

0 引 言

一个地区的作物生产力水平和产量潜势是评价该地区粮食生产能力、发展前景和提高生产能力的重要指标^[1]。由于作物生长发育和产量形成的过程受气候、土壤、水文、作物生理特性和耕作管理等诸多因素的影响, 使得农田生态系统非常复杂, 因此有必要将这些因素综合起来进行研究。田间试验方法需要耗费大量的时间和财力, 随着农业信息技术和计算机模拟技术的发展, 作物模拟模型已经成为作物生产力模拟的主要工具^[2]。作物模拟模型指能定量和动态地描述作物生长、发育和产量形成过程以及作物与环境相互作用关系的计算机模拟模型, 是作物生态学和计算机科学等学科交叉的产物, 是当前作物生产力研究的热点^[1,3]。国外作物模拟研究以美国和荷兰开始时间最早(20 世纪 60 年代), 研究水平最高。迄今为止, 全世界已开发出各种作物模型百余种, 较著名的有荷兰的 MACROS 和 SU CROS 模型, 美国的 CERES 系列模型(DSSAT)、CROPSYST 模型、GOSSYM 及 EPIC 等。中国作物模拟模型研究开始于 20 世纪 80 年代中期, 机理性较强的有高亮之的水稻模型 RICEMOD、戚昌翰的水稻模型 RICAM、冯利平的小麦模型 WHEATSM、潘学标的棉花模型 COT-GROW 及尚宗波的玉米模型 MPESM 等。目前作物模拟模型已被广泛地应用于世界各地, 中国学者也进行了许多应用与开发工作^[4-6], 但在不同气候和土壤条件下对成熟的作物模拟模型进行验证与应用仍十分必要。

松嫩平原是中国重要的商品粮基地, 横贯其中部的黑土区是世界三大黑土区之一, 因地势平坦、土壤肥沃

而成为中国最好的一熟制作物种植区。区内雨热同步, 具有可观的气候生产潜力, 但长期以来, 由于农业生产经营粗放, 农业基础设施差, 粮食产量波动较大。由于缺乏对土地生产潜力和开发空间的充分认识, 目前该区生产潜力尚未发挥其应有水平, 农业现实生产力水平与生产潜力相比仍有不小的差距^[7]。准确地估计作物生产力有助于选择合理的管理策略, 对农业决策和规划具有重要意义。本文引入作物模拟模型 CropSyst (Cropping system simulation model)^[8-10], 经过参数修正和校准, 对该模型的区域适用性进行验证, 模拟了不同水分和养分条件下, 黑土区典型耕作系统的作物生产力。

1 研究区概况与研究方法

1.1 自然概况

本研究中模型校正和验证工作在中国科学院海伦农业生态试验站进行。海伦站地处海伦市西郊, 平均海拔为 234 m, 地理位置为北纬 47°26', 东经 126°38', 在松嫩平原黑土区有很好的代表性。属温带大陆性季风气候区, 冬季寒冷干燥, 夏季高温多雨, 雨热同季, 一月份平均气温为 -22 ~ -25, 极端最低气温为 -39.5, 七月份平均气温为 20 ~ 22, 极端最高气温 37。全年降水量为 500~600 mm, 88% 集中在 5~9 月。作物有效生长季为 120~130 d, 生长季 10 有效积温为 2400~2500, 全年日照时数 2600~2800 h。土壤类型为典型的中厚层黑土, 土壤肥力条件较好, 土壤基本农化性质如表 1 所示。主要种植作物为玉米、小麦、大豆、甜菜、亚麻等^[11]。

1.2 研究方法简介

本文应用作物模拟模型 CropSyst (Version 3.03) 进行作物生产力模拟。CropSyst 模型是多年份、多作物, 以 1 d 为时间步长的作物系统模拟模型, 用于分析气候、土壤、耕作管理措施对作物生产力和环境的影响。该模型可用于作物生产潜力的模拟、栽培方案的优化、复种及轮作方式的产量模拟及分析气候变化对作物布

收稿日期: 2004-02-16 修订日期: 2004-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40401003)和中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-19)

作者简介: 王宗明(1976-), 男, 内蒙古赤峰市人, 博士, 副研究员, 从事生态遥感与生态系统模型研究。长春 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 130012。E-mail: wangzongming@126.com

局、熟制及产量的影响。模型包括耕作系统模拟模块、天气发生模块、流域系统模拟模块、GIS 操作模块等。

CropSyst 模型自 1992 年由美国华盛顿大学开发成功以来,已经在许多国家和地区得到验证。

表 1 试验站 0~20 cm 土壤基本农化性质

Table 1 Basic agro-chemical properties of experimental plot soil in experimental station

有机质 /g · kg ⁻¹	全氮 /g · kg ⁻¹	全磷 /g · kg ⁻¹	全钾 /g · kg ⁻¹	速效氮 /g · kg ⁻¹	速效磷 /g · kg ⁻¹	速效钾 /g · kg ⁻¹	pH 值
50.64	2.56	0.61	26.0	229.8	9.45	180	6.80

1.3 数据来源

所用气象数据来自中国农科院海伦农业生态试验站气象观测记录,土壤性质数据、耕作管理数据、作物产量数据来自海伦农业生态站记录数据及参考文献[11]。模型参数修正和验证所需数据来自海伦试验站小麦和玉米水肥耦合定位试验记录。试验指示作物为小麦(1990年、1992年、1993年)和玉米(1991年和1994年),供试品种小麦为龙麦19,玉米为海玉6号。试验处理如下:水分处理包括S₁自然降水,S₂适宜水分(田间持水量的60%~75%),S₃充足水分(田间持水量的75%以上);肥料处理(kg/hm²)包括F₁无肥,F₂中肥(小麦N 48.00,P₂O₅48.00;玉米N 96.00,P₂O₅34.50),F₃高肥(小麦N 69.00,P₂O₅46.05;玉米N 138.00,P₂O₅69.00),F₄有机+无机肥(小麦N 69.00,P₂O₅46.05,腐熟农家肥15000;玉米N 138.00,P₂O₅69.00,腐熟农家肥15000)。水肥耦合共12个处理,随机排列,4次重复。小区与小区之间用防水材料隔离,在自然降雨区一端设有径流场。

2 主要作物生产力模拟

2.1 模型输入数据的准备

2.1.1 气象数据

气象资料来自海伦站逐日气象记录,包括逐日最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、风速。因中国现有的多数气象台中没有总太阳辐射记录值,因此需根据逐日日照时数的记录和查表得到的农业气象数据计算得到。计算公式采用左大康提出的根据全国各地实测资料建立的总太阳辐射空间分布回归方程^[12]:

$$Q = S_0 \times (0.160 + 0.612X_1 + 0.0384X_1X_2 - 0.00313X_1X_3 - 0.000469X_2X_3) \quad (1)$$

式中 X₁——逐日日照百分率,%; X₂——海拔高度,km; X₃——平均绝对湿度,m b; S₀——各地天文辐射值,MJ/m²;逐日日照百分率X₁=逐日日照时数/逐日可照时数。

2.1.2 土壤特性资料

因试验区地势平坦,坡度和坡长分别取0.02%和20m。输入模型运行所需的初始土壤特性数据,包括土层数目、各层土壤的厚度、机械组成(砂粒、粉粒和粘粒含量)、pH值、阳离子代换量、土壤永久萎蔫点、田间持水量、容重、饱和水导率、播前土壤含水量、播前硝态氮含量、播前铵态氮含量、有机质含量等。以上数据主要来自文献[11]和[13],以及海伦站长期定位数据。模型输入的土壤参数如表2所示。

表 2 CropSyst 模型所需的研究地点土壤初始参数

Table 2 Initial parameters in the study area for CropSyst model

土层	1	2	3	4
土层厚度/m	0.20	0.20	0.30	0.30
砂粒含量/%	31.47	32.80	36.00	37.56
粘粒含量/%	30.45	24.00	21.10	18.52
粉粒含量/%	38.08	43.20	42.90	43.92
pH 值	6.80	6.80	6.80	6.80
阳离子交换量/meq · (100 g) ⁻¹	21.71	21.92	20.61	19.80
永久萎蔫点/m ³ · m ⁻³	0.176	0.144	0.132	0.122
田间持水量/m ³ · m ⁻³	0.325	0.296	0.280	0.271
土壤容重/g · cm ⁻³	1.080	1.240	1.290	1.320
饱和水导率/m · d ⁻¹	0.490	0.377	0.397	0.479
播前土壤水分含量	0.320	0.290	0.290	0.300
播前土壤硝态氮含量/kg N · hm ⁻²	5.00	65.00	5.00	5.00
播前土壤铵态氮含量/kg N · hm ⁻²	5.00	79.00	5.00	5.00
土壤有机质含量/%	3.00	3.00	3.00	3.00

2.2 模型参数校正

在已有小区试验数据的基础上,对CropSyst模型进行校正。CropSyst模型本身提供了典型作物的一系列生理参数,但是针对不同的作物品种,需要对某些参数进行小范围的调整,以使模拟结果与观测值更为吻合,其中与作物品种特征相关的作物各生长期的有效积温需根据实际物候期记录结合至少3~5a的逐日气象数据计算得到。本文选择1993年小麦和1994年玉米充足供肥和充足灌水处理的试验结果(这部分试验结果不参与模型的验证工作)调整模型中作物的校准参数,进

表 3 CropSyst 模型中部分参数

Table 3 Some parameters for calibration of CropSyst model

数据来源	模型参数	小麦	玉米
试验观测数据	最大收获指数	0.48	0.43
	无胁迫的最大叶面积指数	5.00	5.00
相关文献	植物生长最适宜温度/	20.00	25.00
	植物生长最低温度/	2.00	6.00
	最大根深/m	1.70	2.00
	植物生长速率降低的最高温度/	30.00	30.00
通过观测数据计算得到	播种到出苗的有效积温/ · d ⁻¹	60	80
	播种到开花的有效积温/ · d ⁻¹	740	960
	播种到灌浆的有效积温/ · d ⁻¹	850	1270
	播种到生理成熟的有效积温/ · d ⁻¹	1340	1750
校准参数	光能转换系数/g · MJ ⁻¹	3.00	4.00
	比叶面积/m ² · kg ⁻¹	24.00	22.00
	作物蒸腾系数	1.05	1.10
	生物量/呼吸系数	5.00	10.00

行模型校准,直到模拟值与实测值最为接近,校准完成。模型所用的部分参数取值及其来源见表 3。

2.3 模型验证

为验证模型的模拟效果,以田间小区小麦和玉米定位试验数据为基础,根据各年份不同的气象文件、小区试验记录中的不同水分、养分及耕作方式处理,生成不同的控制文件,分别运行,得到各年份作物不同处理的模拟结果。实测值与模拟值之间的线性回归关系如图所示,模拟结果包括作物产量(图 1)、全生育期蒸散量(图 2)和收获时地上生物量(图 3)。

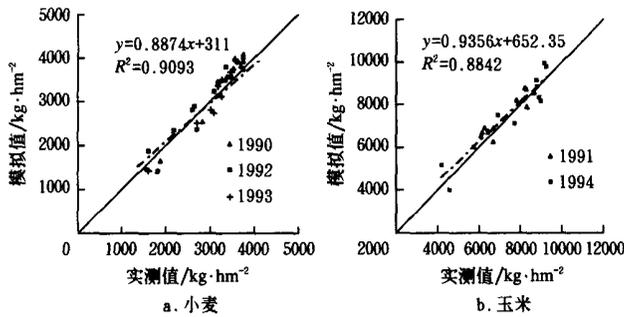


图 1 不同水分、养分条件下作物产量模拟值与实测值
Fig 1 Simulated and observed values of crop yield under different water and nutrient treatments

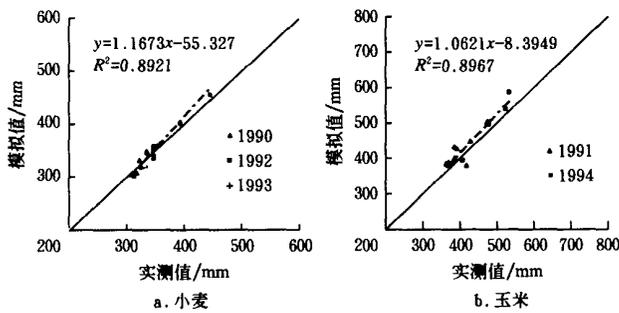


图 2 不同水分、养分条件下作物蒸散量模拟值与实测值
Fig 2 Simulated and observed values of ET under different water and nutrient treatments

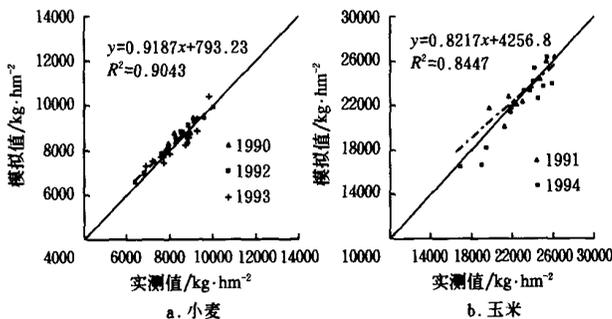


图 3 不同水分、养分条件下作物地上生物量模拟值与实测值
Fig 3 Simulated and observed values of aboveground biomass under different water and nutrient treatments

从图 1~ 图 3 可以看出, CropSyst 模型经过校准后,对于作物产量的模拟效果较为理想,确定性系数 R^2 分别为 0.9093(小麦)和 0.8842(玉米);对于作物全生育期总蒸散量 ET 而言,确定性系数 R^2 分别为 0.8635(小麦)和 0.8967(玉米);对于作物收获时的地上生物量确定性系数为 0.9043(小麦)和 0.8447(玉米)。从模拟结果可以看出,对于小麦和玉米的经济产量、全生育期蒸散量、收获时的地上生物量,模拟值与实测值较为接近。

2.4 模拟结果精度分析

为进一步分析模拟效果,现将实测数据与模拟数据进行分析,统计参数 $RMSE$ 、 EF 和 CRM 的含义和取值范围见表 4。

表 4 部分统计参数含义及取值范围
Table 4 Meanings and their ranges of some statistical parameters

参数名	参数定义	计算公式	取值范围	最佳值	注释
$RMSE$ / %	均方根误差	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$	0	0	$RMSE$ 越小,表明模拟效果越好
EF	模型性能指数	$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	1	1	EF 越接近 1,表明总体模拟效果越好
CRM	残差聚集系数	$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i}$	1	0	$CRM < 0$, 表明模型模拟值偏高; $CRM > 0$, 表明模型模拟值偏低

注:表中 P_i 为模拟值, O_i 为实测值, \bar{O} 为实测平均值, n 为数据对的数目。

统计分析结果见表 5。可见,对于小麦和玉米产量的模拟效果较好,平均相对误差分别为 8.12% 和 6.65%,均方根误差为 8.02% (小麦)和 6.94% (玉米);而对于反映模型整体模拟能力的模拟性能指数 EF ,其值为 0.90 和 0.87。对于全生育期蒸散量的模拟,平均相对误差分别为 3.33% (小麦)和 5.78% (玉米),均方根误差为 3.77% 和 6.35%,模拟性能指数 (EF) 为 0.80 和 0.76。对于小麦和玉米地上生物量,模拟的平均相对误差为 3.23% 和 3.59%,均方根误差为 3.59% 和 3.89%,模拟性能指数为 0.89 和 0.80。

可以看出,对于作物产量、全生育期蒸散量和地上生物量的模拟性能指数 EF ,小麦的模拟效果要高于玉米。对残差聚集系数 CRM 进行对比分析表明,模型对于小麦产量、玉米地上生物量的模拟值偏低,而对于小麦蒸散量、地上生物量,玉米产量、蒸散量,模型则表现出过高估计的趋势。

表 5 模型初步模拟结果精度分析

Table 5 Accuracy analysis of simulated results by CropSyst model

作物	检验项	<i>n</i>	平均相对误差 /%	实测平均值 /kg·hm ⁻²	模拟平均值 /kg·hm ⁻²	<i>RMSE</i> (均方根误差)/%	<i>EF</i> (模拟性能指数)	<i>CRM</i> (残差聚集系数)
小麦	产量	36	8.12	3146.86	3046.65	8.02	0.90	0.0318
	蒸散量	24	3.33	344.49	346.79	3.77	0.80	-0.0067
	地上生物量	36	3.23	8298.69	8416.99	3.59	0.89	-0.0413
玉米	产量	24	6.65	7445.88	7619.04	6.94	0.87	-0.0233
	蒸散量	16	5.78	428.88	447.13	6.35	0.76	-0.0426
	地上生物量	24	3.59	22862.29	22641.91	3.89	0.80	0.0096

3 结论与讨论

作物生产力的计算早期以公式推导为主,不仅结果普遍偏高,而且采用不同公式计算时,结果相差悬殊,难以定论^[1,3]。作物模拟模型能够把“作物—土壤—气候—管理”作为一个整体加以描述;通用性强,覆盖面广,可节省大量人力与物力。松嫩平原黑土区是中国重要的粮食产区,作物模拟技术作为新兴的技术手段,在该地区农业信息化的进程中应发挥更大的作用。本文的研究表明,CropSyst模型能较为精确地描述光、温、水状况(包括极端状态)对作物生长发育的影响,较通常的公式概算法精确度高,操作方便。模型验证结果表明,模型对于作物经济产量、全生育期蒸散量和地上生物量都有足够的模拟精度。经过修正和校准后的CropSyst模型可用于进行广大东北平原地区作物生产力的模拟,作物品种引进和最佳农艺措施选择等。但是,由于缺乏各作物生育期详细的作物生理参数,如叶面积指数、地上和地下生物量、作物N、P、K养分含量,以及缺乏土壤作物系统水分动态的数据,收集和测定大量精确细致的数据对模型进行模型验证仍是非常必要的。另外,本文未考虑不同耕作制度和耕作措施对作物生产力的作用,而田间试验表明,这两个因素对作物生产力的形成也有很大影响,因此,需进一步探索耕作制度和管理措施对作物生产力影响的模拟方法。

致谢:本文在数据收集过程中,得到中国科学院海伦农业生态系统试验站站长韩晓增研究员、李艳华副研究员、宋春雨老师和乔云发老师的大力帮助,在此致以衷心的感谢。

[参 考 文 献]

- [1] 李 军,王立祥,邵明安,等.黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J].自然资源学报,2001,16(2):28-33
- [2] 邱建军,肖荧南,戴逸民,等.基于模拟模型的棉花生产管理系统研究[J].农业工程学报,2002,18(6):161-164
- [3] 王宗明,梁银丽.应用EPIC模型进行黄土塬区作物生产潜力模拟的初步尝试[J].自然资源学报,2002,(4):481-487.
- [4] 于 强,王天铎.农田生态系统模型与农业资源高效利用[J].世界科技研究与发展,2001,22(5):22-27.
- [5] 刘建栋,于 强,傅抱璞.黄淮海地区夏玉米气候生产力的数值模拟研究[J].地理科学进展,2001,12(S):63-68
- [6] 徐春达,高晓飞.作物生产潜力模型在中国的应用[J].干旱区资源与环境,2003,17(6):108-111.
- [7] 刘兴土,何 岩,邓 伟.东北区域农业综合发展研究[M].北京:科学出版社,2002:62-65.
- [8] Donatelli M, Stockle C, Ceotto E, et al. Evaluation of CropSyst for cropping systems at two locations of northern and southern Italy[J]. Eur J Agron, 1997, 6: 35-45.
- [9] Pannuk C D, Stockle C O, Papendick R I. Evaluating CropSyst simulations of wheat management in a wheat-fallow region of the U S Pacific northwest[J]. Agric Syst, 1998, 57: 121-134.
- [10] Stockle C O, Donatelli M, Nelson R L. CropSyst, a cropping system simulation model [J]. Eur J Agron, 2003, 18: 289-307.
- [11] 王建国.松嫩平原农业生态系统研究[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1995.
- [12] 左大康.地球表层辐射研究[M].北京:科学出版社,1991.
- [13] 全国土壤普查办公室.中国土种志(第二卷)[M].北京:中国农业出版社,1991:276-302.

Calibration and validation of crop model CropSyst in typical black soil zone of Songnen Plain

Wang Zongming, Zhang Bai, Song Kaishan, Duan Hongtao

(Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract The crop simulation model, CropSyst, was revised and validated in this paper. The potential productivity of main crops in the black soil zone of Songnen Plain was simulated by using CropSyst model. In addition, effective methods for simulation of crop productivity were explored. Study results show that the simulated values approach the measured values of some indexes for wheat and maize, such as yield, *ET* and aboveground biomass. The *RMSE* between simulated data and observed data ranged from 3.59% for aboveground biomass of wheat, to 8.02% for wheat yield. The modeling efficiency, *EF* were from 0.76 for maize *ET*, to 0.90 for wheat yield.

Key words: crop productivity; crop simulation model; CropSyst model; black soil zone of Songnen plain