

CERES-玉米模拟模式的数值试验及应用[†]

陈怀亮¹⁾ 冯定原²⁾ 毛留喜¹⁾ 张雪芬¹⁾ 付祥健¹⁾

(1) 河南省气象科学研究所, 郑州 450003, 2) 南京气象学院应用气象学系, 南京 210044)

摘要 利用美国的 CERES 玉米模拟模式对河南省伊川县 1992、1993 年共 6 期玉米分期播种资料进行了模拟, 对生育期和籽粒产量的模拟效果较好。经对播种密度、播种日期、播种深度与籽粒产量关系的数值试验, 提出高产密度标准为 8.25(高肥水田块可达 9.75) 株·m⁻², 最佳播期为 5 月 31 日~6 月 5 日和最适播种深度为 6 cm 左右。经对河南省南阳市大田玉米生长发育的模拟验证, 平均相对误差率为 5.6%, 并可用理论计算的逐日太阳辐射代替实测太阳辐射进行生长模拟。所以 CERES 玉米模拟模式作某些参数调整后可应用于业务工作。

关键词 CERES-玉米模式, 分期播种, 数值试验

分类号 S165.27

1 CERES-玉米模拟模式简介

80 年代中期以来, 美国在利用计算机进行农作物生长动态模拟方面取得了显著进展, CERES(作物环境综合系统)系列作物模式便是其中之一。国内对 CERES-小麦、大豆等模式曾作了适应性的试验研究工作^[1,2], 但对玉米模式作全面的验证工作却未见报导。

CERES-玉米模拟模式综合考虑了土壤状况、天气条件、品种特性和栽培措施等因子, 逐日模拟玉米各器官和土壤水分的变化, 主要用于管理决策、风险分析、产量及发育期预报等。使用该模式要求输入品种参数和逐日气象资料两个数据文件, 模式有 3 个输出文件, 包括有大多数用户需要的生长、发育、产量、土壤、作物生长及详细的土壤水分平衡资料。为了了解和验证 CERES-玉米模拟模式的适应性, 我们利用河南省伊川县 1992、1993 年共 6 期的分期播种资料进行了模拟试验, 取得了一些作物参数和土壤参数, 并进行了一些农业技术措施与产量关系的数值试验, 然后又对河南省南阳市大田生长的玉米进行了应用模拟验证。

2 播种试验、资料及处理方法

伊川县的分期播种试验(1992~1993) 每年分 3 个播期, 时间分别在 5 月 27 日、6 月 1 日和 6 月 6 日, 日序分别为 147、152 和 157(从 1 月 1 日起算, 下同), 供试玉米品种为掖单 12, 土壤类型为细砂壤土, 肥力中等, 有灌溉条件。

收稿日期: 1995-01-13; 改回日期: 1995-08-10

第一作者简介: 陈怀亮, 男, 1967 年 6 月生, 硕士, 工程师

[†] 杜明哲, 吴霁参加了部分工作, 赵苗稳, 尚红敏进行了分期播种试验观测

观测地段的土壤有机质含量小于 2%, 土壤反照率为 0.14。由于缺乏完整的土壤分层和根分布资料, 采用了原模式土壤文件库中与试验地段相近似的土壤类型特征资料, 并根据有关实测资料, 对各层土壤的作物有效水分下限、排水上限、饱和含水量等参数作了适当调整。气象资料取自伊川县气象局, 其中逐日太阳辐射资料是根据文献 [3] 介绍的方法。

根据各个播期的有关资料, 初步确定了出苗- 苗期结束的生长度·日(P_1)、抽穗- 生理成熟的生长度·日(P_5)、可能粒数(G_2)和谷粒可能生长速率(G_3), 并确定了掖单 12 玉米品种的光敏感周期系数(P_2)。为了取得较理想的品种特性参数, 对上述 5 个品种特性参数作不同的组合值, 通过循环, 进行调试, 将各项模拟误差百分率的平方和 Q_k 最小的那组组合参数作为最终的品种特性参数。

$$Q_k = \sum_i \sum_j \left(\frac{X_s^{i,j} - X_r^{i,j}}{X_r^{i,j}} \right)^2$$

其中, X_r 和 X_s 分别为某一模拟项的实测值和模拟值; i 代表不同播期; j 代表不同模拟项; k 代表不同的参数组合。模拟时取了吐丝日期、成熟日期、籽粒产量(15%水分)、单籽粒干物重、叶面积指数、干物重等 8 个模拟项。在参数的调试过程中, 采用了 Hodges 等(1987) [4] 提出的 CERES-玉米模拟调试技巧, 先调试参数 P_1 , 使模拟的吐丝期尽可能接近实测值, 再调试 P_5 , 使模拟的成熟期也尽可能正确, 对影响发育期的光周期敏感系数(P_2) 根据有关资料定为 0.52, 即感光性中等, 可能粒数(G_2) 取 6 个播期的平均值, 最后调整谷粒可能生长速率(G_3), 使模拟的籽粒产量与实测值的误差达较小 [5]。

3 模拟结果分析

根据初步确定的品种特性参数, 输入所需的气象、土壤、灌溉等资料后, 模式将输出不同播期的模拟结果(见表 1)。由表 1 可见, 模式对发育期的模拟效果最好, 平均相差 4.2 d, 最多相差 7.0 d, 平均相对误差均小于 3.2%, 但模拟值均大于实测值; 对籽粒产量和单籽粒重的模拟效果也较好, 平均相对误差小于 10%, 但个别发育期的籽粒产量模拟误差大于 20%; 对谷粒数及单穗粒数的模拟平均相对误差分别为 13.6% 和 13.7%, 总的结果是模拟值比实测值偏低; 对叶面积系数的模拟误差较大, 平均达 18.3%; 而对干物重的模拟误差最大, 平均接近 20%, 这可能与每年的第 2、第 3 播期的干物重数值由推算而得有关。在模拟过程中发现, 调整参数 P_1 、 P_5 , 可以使发育期的模拟非常准确, 但此时其他项目的模拟误差会很大, 故在实际模拟中并没有过分追求发育期模拟的高准确性; 调整参数 G_2 , 可以使谷粒数与单籽粒重的模拟值比实测值系统偏小的现象得以改变, 但又会影响籽粒产量与单籽粒重的模拟准确率, 这和“粒数与粒重相互制约”的事实是相符的。

图 1 给出了玉米叶面积指数观测值与模拟值曲线。图中“S”表示模拟结果, “R”表示实测结果, “921”、“922”、“923”分别表示 1992 年第 1、2、3 个播期(“931”...依此类推)。从图 1 可见, 除 1992 年第 2 个播期外, 其余 5 个播期的模拟 LAI 与实测 LAI 的变化趋势均比较一致, 但 1992 年 3 个播期的实测 LAI 在各个发育期几乎全部小于模拟 LAI, 而 1993 年的 3 个播期在生育前期实测 LAI 低于模拟 LAI, 其后, 实测 LAI 比模拟 LAI 有着更快的增加速度, 在高峰期实测值已超过模拟值。

表 1 伊川县玉米分期播种模拟结果与实测值

Table 1 Simulations and observations of maize sown at six different times in Yichuan county, Henan

播期 编号	项目	吐丝日序	成熟日序	籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	单籽粒重 ($\text{g}/\text{粒}$)	谷粒数 ($\text{粒} \cdot \text{m}^{-2}$)	单穗粒数	吐丝期 <i>LAI</i>	干物重 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
921	模拟	218	255	8 917	0.289 9	2 336	442	4.81	18 076
	实测	215	251	10 239	0.335 0	2 740	518	3.50	19 535
	误差率(%)	1.4	1.6	12.9	13.5	14.7	14.7	37.4	7.5
922	模拟	222	265	7 196	0.311 2	1 954	455	4.35	14 816
	实测	216	258	7 529	0.330 0	2 445	569	3.50	15 844
	误差率(%)	2.8	3.1	4.4	5.7	20.1	20.0	24.3	6.5
923	模拟	226	273	7 605	0.247 1	2 696	509	4.80	16 375
	实测	219	268	7 248	0.260 0	2 749	519	3.80	19 561
	误差率(%)	3.2	1.9	4.9	5.0	1.9	1.9	26.3	16.3
931	模拟	219	261	5 385	0.307 4	1 480	372	2.55	10 374
	实测	217	260	6 153	0.309 0	2 122	510	2.90	14 531
	误差率(%)	0.9	0.4	12.5	0.5	30.3	27.1	12.1	28.6
932	模拟	221	264	5 860	0.267 2	1 853	447	2.43	10 723
	实测	218	263	6 117	0.303 0	2 165	522	2.60	15 156
	误差率(%)	1.4	0.4	4.2	11.8	14.4	14.4	6.5	32.2
933	模拟	225	271	6 936	0.323 3	1 995	508	2.33	10 397
	实测	218	267	5 760	0.293 0	2 018	488	2.40	14 367
	误差率(%)	3.2	1.5	20.4	3.0	1.1	4.1	2.9	27.6
平均误差率(%)		2.2	1.3	9.9	6.6	13.6	13.7	18.3	19.8

注: '921'表示 1992 年第 1 个播期, 余类推; 表中误差率均取绝对值

4 CERES 玉米模拟模式的数值试验结果

4.1 播种密度与玉米籽粒产量关系的数值试验

保持品种参数等不变, 仅改变播种密度进行数值试验。试验选用的播种密度有 5.25、6.00、6.75、7.50、8.25、9.00、9.75、10.50、11.25、12.00、12.75 株 $\cdot \text{m}^{-2}$ 共 11 种, 结果见图 2。

图 2 显示伊川县玉米籽粒模拟产量与播种密度近似呈抛物线关系。在 8.25 株 $\cdot \text{m}^{-2}$ 以下, 随着播种密度增加, 籽粒产量也上升; 在 9.75 株 $\cdot \text{m}^{-2}$ 左右, 籽粒产量达到顶峰; 密度大于 10.50 株 $\cdot \text{m}^{-2}$ 后, 籽粒产量随着密度的增加反而开始下降。单从数值试验结果看, 9.75 株 $\cdot \text{m}^{-2}$ 左右的密度也许是获得最高产量的标准, 但由于受栽培措施、管理水平、土壤肥力等一系列因素限制, 目前在伊川县不可能达到如此高的密度(高肥水、高管理水平的地块才有可能达到这个标准)。因此, 在目前的生产水平下, 以高产高效为目的, 可将 8.25 株 $\cdot \text{m}^{-2}$ 左右的密度作为适宜密度标准。事实上, 目前伊川县的玉米实际种植密度只有 3.75 株 $\cdot \text{m}^{-2}$ ~ 4.87 株 $\cdot \text{m}^{-2}$, 产量较低。因此, 在今后一段时间内, 增加播种密度不失为一种争取高产的简单有

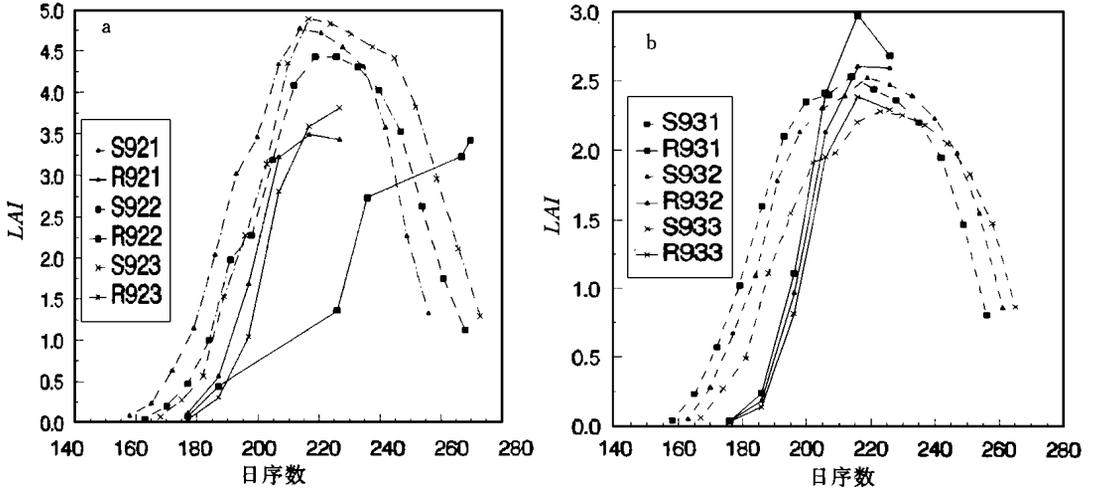


图 1 伊川县玉米叶面积指数的模拟与实测结果

a. 1992 年; b. 1993 年

Fig. 1 LAI simulations versus observations in the study county

a. 1992; b. 1993

效办法。

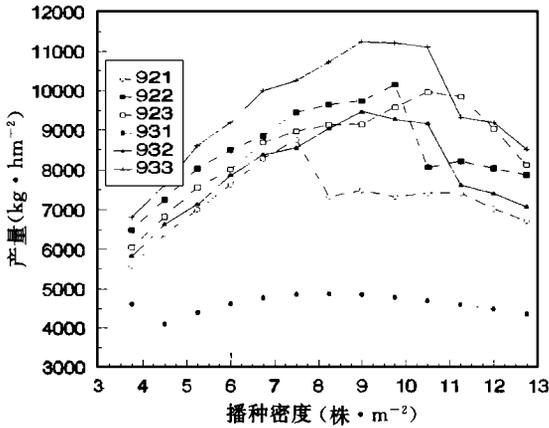


图 2 伊川县玉米播种密度与籽粒产量关系的数值试验结果

Fig. 2 Simulations of sowing density relative to yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

4.2 播种期与玉米产量关系的数值试验

在保持其他条件不变的情况下, 仅改变播种日期进行数值试验。试验选用的播种日期有 5 月 11、16、21、26、31 日和 6 月 5、10、15 日共 8 天, 结果见图 3。从图 3 可以看出, 玉米籽粒产量随播种期基本上呈两高两低的变化, 即在 5 月 11~16 日和 5 月 31 日~6 月 5 日前后播种的玉米产量相对较高(后者又高于前者), 而在 5 月 21~26 日前后播种的产量则明显下降, 因为伊川县在 5 月 21~26 日前后和 6 月 10 日以后播种的玉米, 其需水较多的抽穗-吐丝期(一般在 8 月上旬), 恰为当地“卡脖旱”的多发期, 不利产量的提高; 若推迟或提前 5~10 天播种, “卡脖旱”的发生机率可降低 7% 以上, 就有利于玉米增产^[6]。而目前, 伊川县麦垄套种的玉米大多在 5 月 21~26 日前后播种, 直接影响了产量, 若将播种期推迟至 5 月底将更有利于高产。

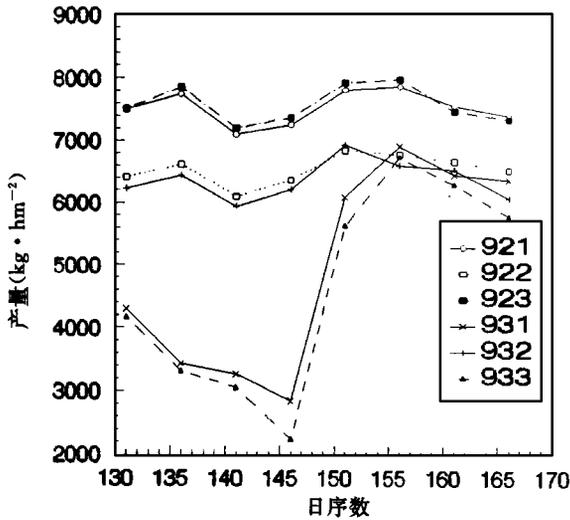


图3 伊川县玉米播种期与籽粒产量关系的数值试验图

Fig. 3 Simulations of sowing time relative to yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

4.3 播种深度与籽粒产量的数值试验

若仅改变播种深度,取 1、2、...、12 cm 不同深度进行数值试验,结果(见图 4)表明,1992 和 1993 年第一个播期呈两高两低的变化规律,其他播期的播种深度小于 4 cm 或大于 8 cm 均不利于高产,6 cm 左右则产量较高。目前,伊川县的播种深度大都为 5 cm,可以加深 1 cm。

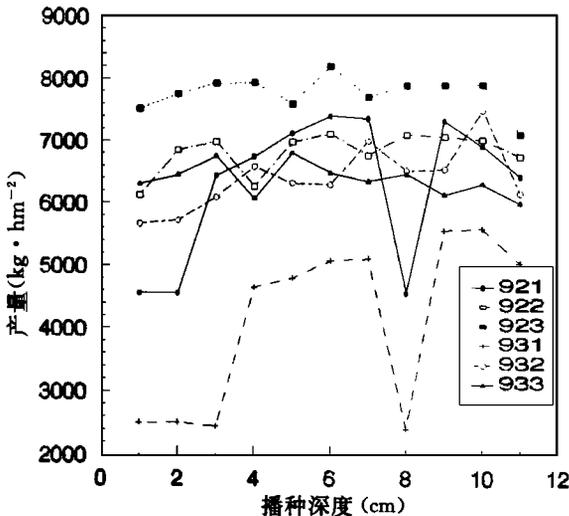


图4 伊川县玉米籽粒产量与播种深度的数值试验图

Fig. 4 Simulations of sowing depth relative to yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

5 CERES-玉米模拟模式的应用模拟验证

为了验证 CERES-玉米模式在大田生长模拟中的适应性,利用伊川县模拟试验所取得的有关参数,对河南省南阳市 1990 年大田生长的玉米进行了应用模拟验证,模拟品种为豫农 704,模拟地块为细砂壤土。模拟时相应调整了有关播种深度、日期、密度和初始土壤水分等参

数, 辐射资料分别用太阳辐射的计算值(模拟 1)和太阳辐射的实测值(模拟 2), 结果见表 2。

表 2 CERES-玉米模式对南阳市 1990 年玉米生长的模拟结果

Table 2 CERES model simulations of 1990 maize growth in Nanyang, Henan

	实测	模拟值 1	误差率 1(%)	模拟值 2	误差率 2(%)
吐丝日序	216	218	0.9	218	0.9
成熟日序	253	254	0.4	254	0.4
籽粒产量(kg · hm ⁻²)	4 313	4 481	3.9	4 460	3.4
单籽粒重(g/粒)	0.296	0.241	18.6	0.242	18.2
谷粒数(粒 · m ⁻²)	1 625	1 612	0.8	1 610	0.9
单穗粒数(粒/穗)	549	545	0.7	546	0.5
吐丝期 LAI	2.40	2.09	12.9	2.48	3.3
干物重(kg · hm ⁻²)	9 815	9 175	6.5	10 083	2.7

注: 误差率均取绝对值

从表 2 可以看出, 两组不同辐射资料的模拟效果除单籽粒重外, 其余项目均比较理想, 特别是对籽粒产量的模拟误差平均小于 4%, 具有产量预报业务推广价值。用理论计算的太阳辐射值进行模拟比用实测太阳辐射值进行模拟误差率高 1.8%, 说明对广大无辐射平衡观测项目的站点来说, 完全可以用理论计算的辐射值进行玉米生长模拟。

6 结 语

(1) 从伊川县玉米分期播种试验模拟和南阳市大田玉米生长应用模拟验证情况看, CERES-玉米模式的大部分结果还是可以接受的, 对指导农业生产有一定参考价值。但模式对干物重、叶面积指数、粒数的模拟效果尚不稳定, 这一方面可能与试验取样或个别参数设置不当等因素有关, 另一方面也可能是模式本身的原因所致。

(2) 由模式得出, 高产密度标准为 8.25(高肥水田可达 9.75)株 · m⁻²、最佳播种期为 5 月 31 日 ~ 6 月 5 日及最适播种深度为 6 cm 左右。在伊川县农业生产上推广以来, 已产生了明显的经济效益。根据对南阳市大田玉米生长的准确模拟验证, 可在产量预报业务中推广应用 CERES 玉米模拟模式。

参 考 文 献

- 1 张 宇, 赵四强. CERES-小麦模式在中国的初步应用. 中国农业气象, 1991, 12(3): 11 ~ 14
- 2 王信理, 王龑棠, 裘国旺. 系统优化理论在 CERES-大豆模式品种参数求解中的应用. 应用气象学报, 1995, 6(增刊): 49 ~ 54
- 3 高国栋, 陆渝蓉. 中国地表面辐射平衡与热量平衡. 北京: 科学出版社, 1982. 1 ~ 86
- 4 Hodges T, Botner D, Sakamoto C, et al. Using the CERES-maize model to estimate production for the U · S · Cornbelt. Agri For Mete, 1987, 40: 293 ~ 303
- 5 Liu W T H, Botner D M, Sakamoto C M. Application of CERES-maize model to yield prediction of a Brazilian maize hybrid. Agri For Mete, 1989, 45(3 ~ 4): 299 ~ 312
- 6 陈怀亮. 气象灾害对河南省夏玉米产量的影响及对策. 中国农业气象, 1993, 14(6): 27 ~ 29

CERES-MAIZE MODEL EXPERIMENT WITH ITS APPLICATION IN HENAN PROVINCE

Chen Huailiang

(Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou 450003)

Feng Dingyuan

(Department of Applied Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

Mao Liuxi Zhang Xuefen Fu Xiangjian

(Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou 450003)

Abstract In the context of US CERES-maize model simulation was conducted of 1992 ~ 1993 data of maize sown at a range of times in Yichuan county, Henan province, resulting in good simulations of growth conditions and yield per hectare and from the relation of stand density and sowing time to the yield were proposed an appropriate density of 8.25 and even 9.25 stands \cdot m⁻² in fields of sufficient fertile and water supply, optimal sowing period from May 31 ~ July 5 and 6 cm depth. Comparison with simulations of open-field maize raised over Nanyang, Henan showed mean relative error of 5.6%. Also, it was demonstrated that theoretical solar radiation could be used in place of measurements on a daily basis so that the model is applicable for operational purpose.

Keywords CERES-maize model, sowing at different times, numerical experiment