

# 玉米产量形成模拟模型研究

尹红征<sup>1</sup>, 吕冰清<sup>2</sup>, 郑国清<sup>3</sup>, 段韶芬<sup>3</sup>, 高亮之<sup>4</sup>

(1. 河南农业大学 现代教育技术部, 河南 郑州 450002; 2. 河南工业职业技术学院, 河南 南阳 473009;  
3. 河南省农业科学院农业经济信息研究所, 河南 郑州 450002; 4. 江苏省农业科学院农业现代化研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:**根据“物质-能量转化-能量平衡”理论及作物生理生态学和农业气象学的基本原理,以田间试验数据和搜集相关区试资料为基础,借助计算机模拟技术和数学物理方法等手段,首先建立了玉米群体光合生产动态模拟模型,模型考虑了光合作用、呼吸作用、同化物向各器官的分配及干物质积累等主要生理过程,然后以此为基础,建立了玉米产量形成模拟模型。利用江苏省大面积栽培品种掖单 13 和苏玉 9 号的田间试验数据和区试资料对产量模型进行验证,结果表明,模型具有较好的模拟精度。

**关键词:**玉米;光合生产;产量;模拟模型

**中图分类号:**S126 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2004)03-0073-04

## Simulation Models of the Maize Yield Formation

YIN Hong-zheng<sup>1</sup>, LÜ Bing-qing<sup>2</sup>, ZHENG Guo-qing<sup>3</sup>, DUAN Shao-fen<sup>3</sup>, GAO Liang-zhi<sup>4</sup>

(1. Department of Modern Technology Education, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan College of Vocational Techniques in Industry, Nanyang 473009, China;  
3. Institute of Agricultural Economy and Information, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 4. Institute of Agricultural Modernization, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The simulation models for maize photosynthetic production dynamic were firstly established based on both the theory of “matter-energy transform-energy balance” and the fundamental principia of crop physiological-ecology and agro-meteorology, by means of computer simulation technology and math-physics method. The models, based on datum from our field experiments and others’ maize regional experiments, concerned physiological processes such as photosynthesis, respiration, assimilate distribution among organs and accumulation of dry matter in maize. Then maize yield formation simulation models were developed based on our established photosynthetic production dynamic simulation models. Verified by the datum from field experiments with varieties Yedan no. 13 and Suyu no. 9 that were widely cultivated over Jiangsu province of China, these models gave reasonable simulation precision.

**Key words:** Maize; Photosynthetic production; Yield; Simulation model

我国玉米模拟模型研究开始于 20 世纪 80 年代末。10 多年来,在玉米光合生产及产量形成模式等方面,我国学者开展了大量而又细致的研究工作<sup>[1~7]</sup>。但是,所有这些研究多是从某一方面研究光合产量与环境生态因子的关系,所建立的模型经

验性强,缺乏机理性和系统性;建立的玉米产量气候模式,多是一般统计回归模型,没有从玉米产量形成的内在机理出发考虑产量与各种生理生态因子之间的内在关系,更没有考察其内在的数量关系,人们很难理解产量究竟是怎样形成的。

收稿日期:2004-03-19

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(0111010600);河南省科技攻关项目(0224050036;0324050009)

作者简介:尹红征(1966-),男,吉林前郭人,本科,讲师,主要从事农业计算机教学与科研工作;郑国清为通讯作者。

本研究以田间试验数据和搜集相关区试资料为基础,基于“物质-能量转化-能量平衡”理论,系统地建立了玉米的光合生产动态模拟模型。根据“玉米子粒的干物质约有 1/3 来自吐丝前茎、鞘、叶等器官中的贮藏物质,其余为吐丝后光合产物的积累”这一原理构建玉米产量形成模拟模型,能够很好地理解玉米产量形成的内在机理,进而模拟出收获前一定时段内的逐日产量,为“精准农业”确定“精准收获”日期提供了决策依据(不同收获日期,效益不同),同时为开发基于玉米生理生态机理性模型的玉米精准栽培智能专家系统奠定基础。

## 1 材料和方法

选用江苏省大面积栽培的晚熟玉米品种掖单 13 和中早熟品种苏玉 9 号为试验材料。试验地点设在江苏省农业科学院试验田。春播在 4 月 20 日,夏播在 6 月 10 日。每播期 3 个密度(82 500 株/hm<sup>2</sup>, 75 000 株/hm<sup>2</sup>, 67 500 株/hm<sup>2</sup>), 4 次重复,小区面积 12.0 m<sup>2</sup>。完全随机区组设计。按中国作物学会第三届研究会制订的作物高产栽培研究的观测记载标准获取数据。

通过田间试验和广泛搜集资料,经大量的数据分析,借助计算机模拟技术和数学物理方法等手段,从玉米生长的生物机理出发,建立玉米光合生产动态和产量形成模拟模型。

## 2 玉米光合生产动态模型

本研究在建立玉米光合生产模拟模型时,假定玉米的生长发育不受肥力条件的影响。

### 2.1 单叶光合作用

于强等<sup>[5]</sup>报道了单叶光合作用的光响应曲线模型且被广泛采用,本研究亦采用这种形式。

$$P = \frac{\alpha P_{\max} Q_{\text{PAR}}}{P_{\max} + \alpha Q_{\text{PAR}}} \quad (1)$$

考虑到  $P_{\max}$  并不是一个常数,与叶片温度及厚度密切相关<sup>[8]</sup>,对其进行订正:

$$P'_{\max} = P_{\max} \cdot f_1(T) \cdot f_2(\text{SLA}) \quad (2)$$

式(1)~(2)中  $P$  为叶片光合速率; $Q_{\text{PAR}}$  为光合有效辐射; $\alpha$  为  $P(Q_{\text{PAR}})/Q_{\text{PAR}}$  的初始斜率,其意义是在弱光下的光合能力,可认为是一常数,取值在 10~15(g/MJ)之间,本研究取  $\alpha = 13.6$ ;  $P_{\max}$  为  $Q_{\text{PAR}} \rightarrow \infty$  时  $P$  的近似值,即在光饱和点下的作物最大光合强度,本研究取  $P_{\max} = 6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $Q$  为太阳总辐射。

参数  $\alpha$  和  $P_{\max}$  的取值以文献<sup>[8]</sup>中的取值作为初始值(本文进行了单位换算),又经试验数据调试后,确定出上述参数终值。 $f_1(T)$  为温度影响函数,由于叶片温度可以比气温高或低<sup>[8]</sup>,为简便起见,假定叶片平均温度与平均气温相等; $f_2(\text{SLA})$  为叶片厚度影响函数。

### 2.2 群体光合作用

一日内玉米群体光合总量,是单位叶面积光合作用对叶面积和日长的二重积分:

$$\text{PCG} = \int_0^{\text{DL}} \int_0^{\text{LAI}} P \cdot d(\text{LAI}) \cdot d(\text{DL}) \quad (3)$$

式(3)中  $\text{DL}$  为日长; $\text{PCG}$  表示群体光合日总量。将其转换后得:

$$\text{PCG} = \frac{P'_{\max} \cdot \text{DL}}{k} \times \ln \frac{(1-m) \cdot P'_{\max} + 0.47 \cdot k \cdot \alpha (1-r) \cdot S}{(1-m) \cdot P'_{\max} + 0.47 \cdot k \cdot \alpha (1-r) \cdot S \cdot e^{-k \cdot \text{LAI}}} \quad (4)$$

$r$  为叶片的反射率(取 0.13),  $m$  是叶片的透射率(取 0.04)<sup>[4]</sup>;  $S$  为日太阳总辐射与日长  $\text{DL}$  的比值( $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ),即为每小时平均生理辐射强度;从而得玉米群体光合日总量为

$$\text{PCG} = \sum_{i=1}^3 \text{PCG}_i \quad (5)$$

## 3 干物质积累动态模型及同化物分配

### 3.1 呼吸作用模型

关于作物暗呼吸的模型多有报道<sup>[8,9]</sup>,本研究采用以下形式:

$$\text{RD} = \text{RG} + \text{RM} \quad (6)$$

$$\text{RM} = R_m \cdot W(t) \quad (7)$$

$$\text{RG} = R_g \cdot (\text{PCG} - \text{RM}) \quad (8)$$

式(6)~(8)中,  $\text{RD}$  为暗呼吸消耗量,  $\text{RM}$  为维持呼吸消耗量,  $\text{RG}$  为生长呼吸消耗量;  $R_g$  为生长呼吸系数(取 0.28)<sup>[10]</sup>,  $R_m$  为维持呼吸系数;  $\text{PCG}$  为当天的群体光合作用日总量;  $W(t)$  为出苗后第  $t$  天的群体干物质。

由于维持呼吸受昼夜温度的影响,故需对维持呼吸系数进行温度订正<sup>[8]</sup>:

$$R_m(T) = R_{m0} \cdot Q_{10}^{\frac{T-T_0}{10}} \quad (9)$$

式(9)中,  $R_m(T)$  是气温为  $T(^{\circ}\text{C})$  时的维持呼吸系数;  $T_0$  为玉米呼吸的最适温度( $30^{\circ}\text{C}$ );  $Q_{10}$  为呼吸作用温度系数(取 2.0)<sup>[2]</sup>;  $T$  为日平均气温;  $R_{m0}$  为适宜温度  $T_0$  时的维持呼吸系数(取 0.032)。将式(9)代入式(7)得维持呼吸消耗量计算模型:

$$RM = R_{m0} \cdot Q_{10}^{\frac{T-T_0}{10}} \cdot W(t) \quad (10)$$

### 3.2 群体净光合日总量

如果玉米呼吸作用模型不考虑光呼吸项(即  $R = RD$ ),冠层日净光合产量为:

$$PN = PCG - RD \quad (11)$$

PCG 为冠层日光合总量, RD 表示呼吸总量。经环境因子订正后的冠层日净光合产量 PND 为:

$$PND = CF \cdot TF \cdot WF \cdot PCG - (RG + RM) \quad (12)$$

式(12)中, CF 表示  $CO_2$  浓度效应因子, TF 表示温度效应因子, WF 表示土壤水分效应因子<sup>[11]</sup>。

### 3.3 群体干物质积累模型

由式(12)计算出的结果是玉米冠层日  $CO_2$  净同化量, 将其转换为干物质应乘以由  $CO_2$  到葡萄糖的转换系数和由初级光合产物转化为结构物质的效率, 即有:

$$\Delta W(t) = \frac{\lambda \cdot \beta \cdot PND}{1 - \epsilon} \quad (13)$$

$$W(t) = W(t-1) + \Delta W(t) \quad (14)$$

式(13)~(14)中  $\Delta W(t)$  为玉米冠层干物质的日增量,  $W(t-1)$ ,  $W(t)$  分别为第  $(t-1)$ ,  $t$  天群体干物重;  $\lambda$  为由  $CO_2$  到葡萄糖的转换系数, 用  $CH_2O$  与  $CO_2$  的分子量之比表示;  $\beta$  为由葡萄糖到碳水化合物转换系数(取 0.72);  $\epsilon$  为玉米干物质中的矿物质含量, 一般只占 5% 左右, 故取  $\epsilon = 0.05$ 。

### 3.4 同化物的分配

为反映玉米同化物在植株各器官间的分配, 用植株各器官的增重与全株增重的比率来表示, 这一比率称作器官的增长分配系数。表达为:

$$CP_i(t) = \frac{W_i(t+1) - W_i(t)}{\Delta W(t)} \quad (15)$$

式(15)中,  $CP_i(t)$  为器官  $i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ; 依次表示茎秆、叶片、果穗和苞叶)的分配系数;  $W_i(t+1)$ ,  $W_i(t)$  分别表示第  $(t+1)$ ,  $t$  天器官  $i$  的干重;  $\Delta W(t)$  意义同前。

有关玉米同化物分配的内部机制机理的数学模型研究鲜有报道。李赋镐等<sup>[12]</sup>曾利用系统动力学建立了一个以化学反应(包括光合、呼吸和合成反应)为中心来解释生长、运输和分配的机理性模型, 但由于该模型包含众多方程和参数, 难以实际应用。本研究仍采用各生育阶段固定系数的方法对玉米同化物在各器官间进行分配。表 1 给出了玉米同化物在不同器官和不同时段分配系数。

表 1 玉米不同发育期同化物分配系数

生育期	苗期	穗期	花期	粒期
茎秆	0.09	0.36	0.20	0.02
叶片	0.91	0.42	0.20	-0.12
果穗	0	0	0.40	1.15
苞叶	0	0.22	0.20	-0.05

注: 表中数据引自文献[13], 并结合试验资料进行了调整

在实际应用时,  $CP_i(t)$  的逐日值可由表 1 中的数值通过线性内插求得。因此, 玉米同化物在各器官中的逐日分配模型为:

$$\Delta W_i(t) = \Delta W(t) \cdot CP_i(t) \quad (16)$$

其中  $\Delta W_i(t)$  为器官  $i$  第  $t$  天的同化物分配量;  $\Delta W(t)$  意义同前。

## 4 玉米产量形成模型

据研究<sup>[14]</sup>, 玉米子粒的干物质约有 1/3 来自于吐丝前茎、鞘、叶等器官中的贮藏物质, 其余来自吐丝后光合产物的积累。因此, 玉米的产量形成模型可表示如下<sup>[15]</sup>:

$$YD = (YBS \cdot K_{BS} + YAS \cdot K_{AS}) \times (1 + \delta) \times \eta \quad (17)$$

$$K_{BS} = \frac{1}{3} HI \cdot (1 + \alpha) \quad (18)$$

$$K_{AS} = \frac{2}{3} HI \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{YAS}{YBS} \quad (20)$$

式(17)~(20)中, YD 为经济产量 ( $kg/hm^2$ ); YBS 和 YAS 分别为吐丝前和吐丝后群体光合生产的净干物重 ( $g/m^2$ );  $K_{BS}$  为吐丝前茎鞘贮存物质向子粒的转移率,  $K_{AS}$  为吐丝后光合产物向子粒的转移率; HI 为收获指数(取 0.47);  $\alpha$  为吐丝后与吐丝前群体净干重的比值;  $\delta$  表示玉米子粒含水百分率(取 13%);  $\eta$  为由  $g/m^2$  转换为  $kg/hm^2$  的单位换算系数 ( $\eta = 10$ )。

## 5 结果与讨论

根据作者在南京春夏两季的田间试验数据及同期天气气候资料, 利用上述产量形成模型, 对 2 个供试品种掖单 13 和苏玉 9 号的产量进行模拟, 将模拟产量与试验实测产量<sup>[11]</sup>进行比较(表 2), 结果表明: 模拟值与实测值比较接近, 相对误差在 -4.0% ~ 11.1% 之间, 相关系数为 0.8。取置信度  $\alpha = 0.05$ , 经计算得置信带<sup>[11]</sup>为  $Y = X - 966.15$  和  $Y = X + 966.15$ , 模型置信水平达 95%。说明模型的模拟精度较高, 可以用于预测玉米产量。

表2 产量模拟值与实测值的比较

项 目	掖单 13		苏玉 9 号	
播期(月-日)	04-20	06-10	04-20	06-10
实测产量(kg/hm <sup>2</sup> )	9 532.5	8 287.5	9 283.5	7 462.5
模拟产量(kg/hm <sup>2</sup> )	10 018.5	9 210.0	8 916.0	8 139.0
相对误差(%)	5.1	11.1	-4.0	9.1

表2显示夏播(06-10播种)2个品种的模拟误差均较大,其原因是当玉米进入子粒灌浆时,正值南京酷暑高温干旱的“秋老虎”,叶片早枯早死,灌浆不足,导致产量降低。

与前人研究工作相比,本研究根据玉米子粒干物质的“来源”,建立玉米产量形成模拟模型,既有助于理解玉米产量形成的内在机理,进而又可模拟出收获前一定时段内的逐日产量,这为发展“精准农业”确定“精准收获”日期提供了决策依据。

当然,本研究亦有不足之处,一是我们仅在作物模拟的“第二层次水平”开展研究,即研究过程假设“肥力条件得到充分满足”,这与生产实际还存在一定的距离;二是本研究中确定或引用的模型参数,不一定适用于其他地区、其他品种。这两点均有待于进一步验证和完善。

#### 参考文献:

- [1] 赵明,郑丕尧.夏玉米个体生长发育中叶片光合速率的动态特征[J].作物学报,1992,18(5):337-343.
- [2] 佟屏亚,程延年.夏播玉米产量形成动态模式的研究[J].玉米科学,1992,(创刊号):23-26,35.
- [3] 胡昌浩,董树亨.高产夏玉米群体光合速率与产量关系的研究[J].作物学报,1993,19(1):63-69.

- [4] 孙睿,洪佳华,曹永华.夏玉米光合生产模拟模型初探[J].中国农业气象,1997,18(20):20-23.
- [5] 于强,王天铎,刘建栋,等.玉米株型与光合作用的数学模拟研究: I. 模型与验证[J].作物学报,1998,24(1):7-15.
- [6] 杨京平,陈杰.计算机模拟渍水时期及持续时间对春玉米生长及产量的影响[J].生物数学学报,2001,16(3):353-361.
- [7] 刘建栋,周秀骥,于强.温度对夏玉米光合生产力影响的数值模拟研究[J].应用气象学报,2002,13(4):398-405.
- [8] Penning de Vries F W T, Jansen D M, Ten Berge H F M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops[M]. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1989. 111-155.
- [9] 王馥棠.农业产量气象模拟与模型引论[M].北京:科学出版社,1990.88-96.
- [10] Grant R F. Simulation of maize phenology[J]. Agron J, 1989,81:451-457.
- [11] 郑国清.玉米生长发育模拟模型的研究[D].南京:南京农业大学,1999.13-68.
- [12] 李赋镛,马立望.关于玉米生长、糖分运输和干物质分配的数学模型[J].北京农业大学学报,1985,11(2):125-134.
- [13] 佟屏亚,程延年.玉米生育和产量模型[M].北京:中国农业科技出版社,1997.1-290.
- [14] 山东农业科学院.中国玉米栽培学[M].上海:上海科学技术出版社,1986.1-154.
- [15] 李秉柏.作物的光合生产及实际产量模拟模型的初步分析[J].农业气象,1986,(2):1-8.

## 欢迎订阅 2005 年《湖南农业科学》

《湖南农业科学》是由湖南省农科院、湖南省科技厅星火计划办和湖南农业大学主办的农业科学技术类期刊。主要刊登宏观农业与区域经济、作物遗传与品种选育、作物栽培与土壤肥料、植物保护与农药研制、科技管理与星火计划、产业开发与信息技术、畜牧水产与加工贮藏。本刊深受省内外农业科技人员、农村基层干部和农技推广员和广大农民朋友的喜爱,曾多次受到有关部门的奖励。

《湖南农业科学》国内外公开发行,国内标准刊号:CN43-1099/S,国际标准刊号:ISSN1006-060X,国内邮发代号为42-20。双月刊,国际标准16开,64页,彩色封页。每期定价5.00,全年30.00,全国各地邮局均可订阅。漏订者可与本编辑部联系。

地 址:长沙市芙蓉区马坡岭湖南省农科院 邮编:410125

联系电话:(0731)4691322

E-mail:hnnk@chinajournal.net.cn