

玉米栽培因子与叶面积指数模型研究初探

白 莎¹,池宝亮²,黄学芳²,樊文华¹,樊修武³

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801; 2.山西省农业科学院旱地农业研究中心,山西 太原 030031;
3.山西省农业科学院作物遗传研究所,山西 太原 030031)

摘 要:采用均匀试验设计和逐步回归分析方法,以先玉 335 为试验材料,研究了水肥等栽培因子对玉米叶片完全展开时叶面积指数的影响。多因素分析表明,其影响顺序为:底氮>追氮>底磷>密度>补水>追肥/补水生长期>底钾>播期。在数学模型中,各栽培因子间耦合效应对玉米叶面积指数影响都达到了显著水平。在本试验研究范围内,当播期在 5 月 11 日,密度为 80 999.8 株/hm²,底施氮量为 48.2 kg/hm²,底施磷量为 293.6 kg/hm²,底施钾量为 152.0 kg/hm²,追施氮量为 62.8 kg/hm²,补灌量为 1 199.4 m³/hm²,追肥/补水生长期在玉米 18 展叶时,叶面积指数理论最高值 6.64。

关键词:玉米叶面积指数;栽培因子;均匀设计;数学模型
中图分类号: S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)02-0075-05

玉米不仅我国是主要的粮食作物,而且是重要的饲料原料,所以,我们应不断地提高玉米产量以满足各方面的需求。在玉米生长过程中,叶片起着非常重要的作用,尤其是对籽粒产量的积累,在一定范围内,玉米籽粒产量随着叶面积指数的增长而增加^[1]。为此,本研究拟从玉米生长发育的角度探讨水肥等栽培因子对叶面积指数的影响,以期对玉米高产栽培提供可借鉴的技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验地设在山西省榆次市张庆乡西长寿村,试验地土壤类型为潮土,其基本理化性状见表 1、2。试验所用的玉米品种为先玉 335。供试肥料:氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 量 12%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 量 60%)。

1.2 试验方案

在本试验中,播种至拔节:试验因素为播期、密度、播前补水、底氮、底磷、底钾;拔节至成熟:依据群体从小到大动态调整排序,对应各试验小区编码实施追氮、补水和确定追肥/补水生长期,每个控制因素都设 5 水平。由于所涉及的因素数和水平数较多,本试验采用均匀设计方法进行设计^[2]。试验设 25 个处理,各处理因素的水平组合选用均匀设计表 U₂₅(25⁹)排列,具体处理采用均匀设计软件协助完成。

表 1 供试土壤基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of tested soil

土壤层次 Soil layer (cm)	容重 Bulk density (g/cm ³)	田间持水量 Field capacity (%)	凋萎系数 Wilting coefficient (%)	有效储水量 Effective water storage (mm)
0~20	1.22	31.0	11.6	38.8
20~40	1.46	31.4	14.0	34.8
40~60	1.40	33.0	11.9	42.2
60~80	1.37	32.9	7.9	53.9
80~100	1.38	35.9	7.9	53.4
100~120	1.36	33.4	11.9	43.0
120~140	1.36	33.3	13.3	40.0
140~160	1.36	33.3	13.3	40.0
160~180	1.36	33.3	13.3	40.0
180~200	1.36	33.3	13.3	40.0
0~200	—	33.1	11.8	426.1(总和)

表 2 供试土壤肥力状况

Table 2 Fertility status of tested soil

有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Available N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
17.4	1.953	119.5	11.60	241.9

试验小区规格 6 m×7 m,种植行距为 50 cm,小区间由保护行隔开。划好小区后,播前按处理浇水、施入底肥。灌溉、施肥、播种、补水和追氮的实施见表 3。玉米生长期间按常规田间方法管理。

收稿日期:2009-10-09
基金项目:国家 863 计划(2006AA100220);山西省“十一五”科技攻关课题(2007031002-7)
作者简介:白 莎(1983—),女,山西省平遥县人,硕士研究生,研究方向为土壤生态。
通讯作者:池宝亮(1956—),男,山西省定襄县人,研究员。E-mail: baoliangchi@hotmail.com。

表 3 试验设计方案
Table 3 Experiment design scheme

处理 编号 No.	播期(月/日) Sowing date (M/d)	密度 Density (株/hm ²)	播前补水 Supplementary water before sowing (m ³ /hm ²)	底氮 Base N (kg/hm ²)	底磷 Base P (kg/hm ²)	底钾 Base K (kg/hm ²)	追氮 Top N (kg/hm ²)	补水 Supplementary water (m ³ /hm ²)	追肥/补水 生育期(展叶) Topdressing/ supplementary water (leaf spreading)
1	04-16	45000	150	150	225	300	180	0	18 叶
2	04-16	54000	300	0	75	300	0	1200	12 叶
3	04-16	72000	600	75	150	300	180	1200	9 叶
4	04-16	63000	450	225	300	300	60	1200	6 叶
5	04-16	72000	0	225	0	225	120	600	12 叶
6	04-23	81000	300	75	300	225	180	600	6 叶
7	04-23	45000	450	300	150	225	120	1200	15 叶
8	04-23	54000	600	150	0	225	240	900	9 叶
9	04-23	63000	0	0	225	225	180	900	15 叶
10	04-23	63000	150	150	75	150	240	0	12 叶
11	04-29	72000	450	0	0	150	0	600	9 叶
12	04-29	81000	600	225	225	150	240	1200	18 叶
13	04-29	45000	0	75	75	150	0	0	6 叶
14	04-29	54000	150	300	300	150	240	600	15 叶
15	04-29	54000	300	75	150	75	60	300	9 叶
16	05-06	63000	600	300	75	75	0	900	18 叶
17	05-06	72000	0	150	300	75	60	0	15 叶
18	05-06	81000	150	0	150	75	240	300	6 叶
19	05-06	45000	300	225	0	75	60	600	18 叶
20	05-06	45000	450	0	225	0	180	300	12 叶
21	05-13	54000	0	225	150	0	120	900	6 叶
22	05-13	63000	150	75	0	0	0	300	15 叶
23	05-13	72000	300	300	225	0	120	300	18 叶
24	05-13	81000	450	150	75	0	120	0	9 叶
25	05-13	81000	600	300	300	300	60	900	12 叶

2 结果与分析

2.1 玉米主要生育期叶面积指数与产量间的关系

根据实收测产时测定的玉米籽粒的水分百分含量,将玉米产量换算成国家标准形式即籽粒的水分百分含量为 14% 时玉米的实际产量。再将换算后的产量折算成每公顷的产量(kg/hm²)。各处理玉米主要生育期叶面积指数与实际产量见表 4。

采用 DPS 对玉米主要生育期叶面积指数和产量进行相关分析,得到它们间的相关关系见表 5。

由表 5 可得,玉米主要生育期叶面积指数与产量间都达到了极显著水平,

说明它们之间的关系极其密切,有很大的相关性,所以说从玉米生长发育的角度探讨水肥等栽培因子对叶面积指数的影响,可以为玉米高产栽培提

供一定的技术指导。通过比较表 5 中相关系数的大小可得到,当所有叶片完全展开时,叶面积指数与产量间相关性最大,所以对这一时期叶面积指数进行建模研究。

为便于建模,将原始数据中的播期换算成播种时间距第一个播期的天数。由于供试地底墒良好,播前补水对产量的影响几乎为零,所以建模前剔除了播前补水这个因子。

2.2 水肥等栽培因子对叶面积指数影响的数学模型的建立

采用 DPS 软件,对播期、密度、底氮、底磷、底钾、追氮、补水和追肥/补水生育期与叶面积指数进行二次多项式逐步回归,同时进行优化处理,剔除一部分不显著项,最后得到数学模型,即回归方程:

表 4 各试验处理玉米主要生育时期叶面积指数与产量

Table 4 Leaf area index of the main growing period of maize and yield of every experiment treatment

处理编号 No.	叶面积指数 Leaf area index					产量 Yield (kg/hm ²)
	6 展叶 6 leaves spreading	9 展叶 9 leaves spreading	12 展叶 12 leaves spreading	15 展叶 15 leaves spreading	完全展开 All leaves spreading	
1	0.16	0.57	1.35	2.22	3.11	11035.5
2	0.16	0.61	1.53	2.55	3.53	13792.5
3	0.19	0.78	1.94	3.23	4.40	14704.5
4	0.17	0.73	1.87	3.18	4.48	13309.5
5	0.20	0.79	1.97	3.28	4.54	12624.0
6	0.23	0.98	2.47	4.12	5.56	13948.5
7	0.12	0.51	1.31	2.27	3.20	13012.5
8	0.13	0.55	1.44	2.53	3.54	12040.5
9	0.22	0.84	1.96	3.17	4.31	14263.5
10	0.19	0.80	1.93	3.15	4.36	12804.0
11	0.21	0.93	2.18	3.52	4.57	12247.5
12	0.25	1.06	2.59	4.32	5.92	13752.0
13	0.14	0.58	1.36	2.25	3.08	11164.5
14	0.16	0.73	1.74	2.88	4.03	12564.0
15	0.18	0.77	1.79	2.92	4.03	12910.5
16	0.22	0.91	2.25	3.63	4.80	13264.5
17	0.24	0.97	2.42	3.97	5.32	13399.5
18	0.24	1.00	2.62	4.35	5.79	12709.5
19	0.14	0.60	1.52	2.52	3.44	11791.5
20	0.14	0.59	1.48	2.47	3.40	11131.5
21	0.17	0.73	1.85	3.03	4.08	12585.0
22	0.21	0.87	2.10	3.36	4.29	12811.5
23	0.21	0.90	2.27	3.71	4.86	12894.0
24	0.23	1.02	2.49	3.98	5.11	13441.5
25	0.23	1.02	2.58	4.21	5.41	13173.0

表 5 玉米主要生育时期叶面积指数与产量间的相关关系

Table 5 Correlations between leaf area index in the main growing period of maize and yield

相关系数 Correlation coefficient		产量 Yield
叶面积 指数 Leaf area index	6 展叶 6 leaves spreading	0.56**
	9 展叶 9 leaves spreading	0.53**
	12 展叶 12 leaves spreading	0.54**
	15 展叶 15 leaves spreading	0.55**
	完全展开 All leaves spreading	0.57**

注: * 表示 $P < 0.05$, 达到显著水平, ** 表示 $P < 0.01$, 达到极显著水平。

Note: * means correlation is significant at 0.05 level; ** means correlation is significant at 0.01 level.

$$y = -0.4864 + 0.00008965x_2 + 0.005094x_3 - 0.001110x_4 - 0.000000003486x_2^2 - 0.00001334x_3^2 - 0.000002545x_4^2 - 0.00001071x_5^2 + 0.000008487x_6^2 - 0.0000002240x_7^2 +$$

$$0.0007780x_8^2 - 0.00007896x_1x_3 + 0.0001146x_1x_6 + 0.00000005300x_2x_4 + 0.0000001064x_2x_7 - 0.00000004378x_2x_8 + 0.000004359x_3x_4 - 0.000005540x_3x_6 - 0.0000008878x_4x_6 - 0.0000003409x_5x_7 + 0.00014824x_5x_8 - 0.000001844x_6x_7 - 0.0001986x_6x_8 + 0.00001234x_7x_8$$

方程中: x_1 为播期(d); x_2 为密度(株/hm²); x_3 为底氮(kg/hm²); x_4 为底磷(kg/hm²); x_5 为底钾(kg/hm²); x_6 为追氮(kg/hm²); x_7 为补水(m³/hm²); x_8 为追肥/补水生育期(展叶); y 为叶面积指数。

公式显著性检验结果列于表 6, 检验结果显示模型达到了极显著水平, 说明模型是有效的, 能反映各栽培因子与叶面积指数之间的相关关系; 而且 Durbin-Watson 统计量(实测值和公式计算值之间的误差统计量)在 2 左右, 说明方程具有一定的实际意义。

表 6 回归方程显著性检验结果

Table 6 Significance test result of regression equation

相关系数 R Correlation coefficient	方差 F Variance	p 值 p value	Durbin - Watson 统计量 Durbin - Watson statistics
0.9999	21739.0978	0.0054	1.7112

2.3 水肥等栽培因子对叶面积指数影响的数学模型的解析

通过二次多项式逐步回归,可得到玉米叶面积指数与各栽培因子的数学模型参数(见表 7)。

表 7 方程各变量回归系数检验结果

Table 7 Test results of regression coefficients of every variable in equation

变量 Variable	t 检验值 t test value	p 值 p value	变量 Variable	t 检验值 t test value	p 值 p value
x_2	168.2020	0.0001	x_3x_4	118.1866	0.0001
x_3	243.1473	0.0001	x_3x_7	156.1106	0.0001
x_4	25.7815	0.0015	x_3x_8	5.5255	0.0312
x_2^2	86.0052	0.0001	x_3x_8	92.6624	0.0001
x_3^2	204.1297	0.0001	x_3x_6	71.1955	0.0002
x_4^2	55.7600	0.0003	x_4x_6	9.3420	0.0113
x_5^2	139.8081	0.0001	x_3x_7	18.7259	0.0028
x_6^2	176.0502	0.0001	x_3x_8	137.6058	0.0001
x_7^2	66.7162	0.0002	x_6x_7	189.4516	0.0001
x_8^2	44.3063	0.0005	x_6x_8	156.3655	0.0001
x_1x_3	225.5940	0.0001	x_7x_8	24.3662	0.0017
x_1x_6	174.6116	0.0001			

由表 7 可得,方程中各单因子对叶面积指数都达到了极显著水平,各栽培因子间耦合效应都达到了显著水平。

在多因素数学模型的分析中,由于各因子的变异度(标准差)不同,数学模型中不同因子的系数大小不能反映各因子对因变量的影响程度。因此,在这里引用贡献法来评价各栽培因子对叶面积指数的相对重要性。首先根据回归方程的各回归系数的 t 值求出某一栽培因子的贡献(δ),然后将其代入公式中计算出该因子的综合贡献值(Δ_j),计算公式如下:

$$\delta = \begin{cases} 0 & (t \leq 1) \\ 1 - \frac{1}{t^2} & (t > 1) \end{cases} \quad (F = t^2)$$

$$\Delta_j = \delta_j + \delta_{jj} + 1/2 \sum \delta_{ij}$$

式中, j, jj 分别代表第 j 个因子的一次项和二次项的贡献值, δ_{ij} 代表所有与 j 交互的交互项的贡献值^[3]。

将表 7 中的回归系数的 t 检验值代入上式,可得

到各因子的贡献值,分别为: $\Delta_{\text{播期}} = 1.0000$, $\Delta_{\text{密度}} = 3.4834$, $\Delta_{\text{底氮}} = 3.500$, $\Delta_{\text{底磷}} = 3.4924$, $\Delta_{\text{底钾}} = 1.9985$, $\Delta_{\text{追氮}} = 3.4941$, $\Delta_{\text{补水}} = 2.9975$, $\Delta_{\text{追肥/补水生育期}} = 2.9822$ 。比较贡献值的大小,可得到各栽培因子对玉米叶面积指数的影响顺序:底氮(x_3) > 追氮(x_6) > 底磷(x_4) > 密度(x_2) > 补水(x_7) > 追肥/补水生育期(x_8) > 底钾(x_5) > 播期(x_1)。从中可以看出,氮肥对叶面指数影响最大,这说明氮肥对于叶片的生长非常重要,因为氮肥能促进叶绿素的形成,使叶色深绿,叶面积增大。

方程中密度、底氮、底磷、底钾、补水的二次项都为负,这说明其与叶面积指数间都存在一拐点,在拐点前表现为正效应,而在拐点后,则相反,这可能是由于密度过大会影响叶片的光合作用,而底肥、补水过多也不利于叶片的正常生长,这与人们多年来的研究相符合。

2.4 水肥等栽培因子对叶面积指数影响的数学模型的优化

采用 DPS 软件,对播期、密度、底氮、底磷、底钾、追氮、补水、追肥/补水生育期与玉米叶面积指数进行二次多项式逐步回归,寻求此非线性规划的最优解,最终求得叶面积指数理论最高值为 6.64,此时各栽培因子的组合为:播期在 5 月 11 日,密度为 80999.8 株/hm²,底施氮量为 48.2 kg/hm²,底施磷量为 293.6 kg/hm²,底施钾量为 152.0 kg/hm²,追施氮量为 62.8 kg/hm²,补灌量为 1199.4 m³/hm²,追肥/补水生育期在玉米 18 展叶。

3 小结与讨论

以往由于试验设计的不同及试验条件的限制,人们只进行单因素或是双因素的试验,这样就不能在一个试验中同时体现出多个主要影响因素。而本试验采用均匀设计法和动态调整的设计思想,将对玉米叶面积指数影响的主要因素都体现了出来。将试验所得数据经过处理、回归分析后,可建立起水肥等栽培因子对玉米叶面积指数的调控模型,该试验研究成果不仅为玉米高产提供可靠的理论依据,同时也为建立不同栽培因子的联合调控智能化决策支持系统提供数据支撑。

从多因素分析表明不同栽培因子对玉米叶片完全展开时叶面积指数影响顺序为:底氮(x_3) > 追氮(x_6) > 底磷(x_4) > 密度(x_2) > 补水(x_7) > 追肥/补水生育期(x_8) > 底钾(x_5) > 播期(x_1)。在数学模型中,各栽培因子间耦合效应对玉米产量影响都

达到了显著水平,也是不可忽略的影响因素。在本试验研究范围内,当播期在5月11日,密度为80999.8株/hm²,底施氮量为48.2 kg/hm²,底施磷量为293.6 kg/hm²,底施钾量为152.0 kg/hm²,追施氮量为62.8 kg/hm²,补灌量为1199.4 m³/hm²,追肥/补水生育期在玉米18展叶时,叶面积指数达到理论最高值6.64。

本试验研究也存在一定的局限性。玉米叶片的生长除受人工调控措施的影响外,还要受到自然条件的影响,由于试验条件的限制,本试验研究所建立的调控决策模型还缺少一些环境因子,如气候条件

等。在今后的试验研究中,通过建立定点气象监测系统,收集完整的气象资料,将会使试验更加完善,试验结果更加有说服力。

参考文献:

- [1] 郭庆法. 中国玉米栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986: 171—376.
- [2] 方开泰. 均匀设计——数论方法在试验设计中的应用[J]. 应用数学学报, 1980, 9(4): 363—378.
- [3] 吴建, 庄郁华. 农作物栽培技术系统优化设计[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1988: 1—96.

Preliminary study on model of cultural factors and leaf area index of maize

BAI Sha¹, CHI Bao-liang², HUANG Xue-fang², FAN Wen-hua¹, FAN Xiu-wu³

(1. Resources and Environment College, Shanxi Agriculture University, Taigu, Shanxi 030801, China;

2. Dryland Agriculture Research Center, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan, Shanxi 030031, China;

3. Institute of Crops Genetics, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: An experiment was conducted to study the effect of water, fertilizer and other cultivating factors on leaf area index of maize when the leaves spread by uniform experiment design and stepwise regression method using Xianyu335 as the experimental material. By Multiple Factors Analysis, the influence order is: base nitrogen > nitrogen topdressing > base phosphorus > planting density > supplementary irrigation > growth stages of supplementary fertilizer and irrigation > base potassium > sowing date. In the mathematical model, the coupling effect between cultivating factors on leaf area index of maize reaches the significant level. In the research bound of this experiment, the result is that the leaf area index of maize achieves the highest theoretical value 6.64 when the sowing date is May 11, the planting density is 80 999.8 strain/hm², the base nitrogen is 48.2 kg/hm², the base phosphorus is 293.6 kg/hm², the base potassium is 152.0 kg/hm², the nitrogen topdressing is 62.8 kg/hm², the supplementary irrigation is 1199.4 m³/hm², and the supplementary fertilization and irrigation is made in the growth stage when the eighteenth leaf of maize spreads completely.

Keywords: leaf area index of maize; cultivating factors; uniform design; mathematical model