

林下小麦栽种模型的研究[※]

景元书

吴运英

(南京气象学院应用气象学系, 南京 210044) (中国林业科学研究院, 北京 100091)

摘 要 运用二次回归旋转设计, 由田间试验实测参数建立了小麦 3 项栽培措施与林下产量群体发展动态指标值的数学模型群, 并解析了栽培因素的单独产量反应及其交互作用, 优选出林下小麦最佳栽培措施组合方案, 对规范化种植及高产预测预控提供信息。

关键词 复合林业, 旋转设计, 栽种模型, 群体动态

分类号 S165

小麦是华北平原区最主要的夏季农作物, 近几年以它为下层间作物的复合林业在全区发展很快。复合林业提高了耕地利用率, 较充分地利用光照、水分、养分等资源, 明显地提高了土地产出量, 成为林茂粮丰的综合种植体系。目前以粮为主的复合林业最为普遍, 由按一定规格营造的林带组成, 其研究重点集中在体系综合效益^[1, 2]和造林合理模式两方面, 对复合林下小麦栽种模式关注较少, 群众自发形成的栽培措施不配套, 直接影响小麦生产丰收。为此我们根据现代回归设计理论^[3], 克服传统试验小区数多、规模庞大之局限, 选择影响小麦产量较大的 3 个可控栽种因子, 进行田间精确试验。将试验所得有关参数建立林下小麦产量与群体发展动态指标数学模型, 选出丰产小麦规范化栽培措施, 旨在科学经营复合林业提高经济效益。

1 试验概况

试验于 1993 年 10 月 ~ 1994 年 6 月在山东省成武县东部 (115. 2 E, 35. 0 N) 泡桐林基地进行, 地势平坦, 潮土土壤, 年均温 13. 9℃, 年均降水量 661. 3 mm, 泡桐林带南北向, 吸收根密集在 40 ~ 100 cm, 耕作层中很少分布, 树冠郁闭度为 13%, 光照能满足林下小麦正常需要, 林龄 11 年, 相邻行距 32 m, 平均冠幅 8. 5 m, 亩施厩肥 135. 0 kg, 碳铵 15. 6 kg, 3 月中旬灌溉小麦返青水一次, 4 月上旬每亩喷久效磷 0. 5 kg 治虫, 按生育期重点调查各处理群体苗数 y_b (株 · m⁻²)、总茎蘖数 y_c (株 · m⁻²)、有效分蘖数 y_d (株 · m⁻²)、 $LAI(y_e)$, 成熟时各小区精收单打, 称粒重与地上部总重, 求得经济系数 y_f (%) 及最终产量 y_a (kg · ha⁻¹)。

2 试验设计

以“荷泽 363”小麦为试材, 采用二次旋转组合设计。此设计是随农业生产水平逐步提高的现代试验设计方法, 不设重复就可获得较丰富的信息, 其中二水平全因子试验点个数 $m_c = 8$,

※ 中国林业科学研究院农用林项目资助课题
收稿日期: 1995- 09- 08; 改回日期: 1996- 01- 19

变量为零水平的重复试验次数 $m_0=6$, 与因子个数有关的参数 $m_r=6$, 共有 20 个小区。每小区面积 20 m^2 , 东西向随机排列, 试验因素为小麦播种期、播种量及离树行距离。按设计要求, 各因素水平的无量纲线性编码值见表 1(表中变化间距: 播种期为 6d; 播种量为 $37.5\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; 离树行距离为 8 m)。

表 1 试验因素水平编码表($r=1.682$ 为设计水平)

Table 1 Element level coding for experiment

因素	$-r$	-1	0	1	r
播种期 x_1 (日/月)	28/9	2/10	8/10	14/10	18/10
播种量 $x_2/\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$	65	90	127.5	165	190
离树行距离 x_3/m	2	8	16	24	30

3 结果分析

3.1 模型建立

试验处理与各考察目标结果整理见表 2。

表 2 结构矩阵与考察目标值

Table 2 Structure matrix and target

区号	x_1	x_2	x_3	y_a	y_b	y_c	y_d	y_e	y_f	$\hat{y}_a$
1	1	1	1	5 227	238	497	170	4.6	29.2	5 134
2	1	1	-1	5 212	193	480	110	4.4	31.9	5 140
3	1	-1	1	3 886	171	552	155	6.2	29.8	4 092
4	1	-1	-1	4 307	270	458	179	5.4	23.2	4 517
5	-1	1	1	5 356	424	450	217	6.1	32.3	5 295
6	-1	1	-1	4 926	215	494	184	5.0	34.3	4 868
7	-1	-1	1	4 979	172	477	181	3.5	43.7	5 200
8	-1	-1	-1	4 951	180	477	198	5.2	36.2	5 193
9	r	0	0	4 973	140	378	110	4.1	28.1	4 819
10	$-r$	0	0	5 574	210	415	168	3.7	41.8	5 517
11	0	r	0	4 621	190	422	212	5.8	28.8	4 858
12	0	$-r$	0	4 709	203	557	247	7.6	31.0	4 254
13	0	0	r	5 218	201	380	152	4.5	35.2	5 123
14	0	0	$-r$	5 243	170	367	138	4.1	31.1	5 121
15	0	0	0	5 205	161	342	106	4.2	28.5	5 242
16	0	0	0	5 106	153	327	92	2.7	35.6	5 242
17	0	0	0	5 390	183	284	68	2.4	30.1	5 242
18	0	0	0	5 141	199	353	114	2.9	31.0	5 242
19	0	0	0	5 231	170	322	78	2.1	32.9	5 242
20	0	0	0	5 582	179	310	53	2.1	35.8	5 242

说明: $r=1.180$

根据回归设计原理, 试验所建数学模型为

$$\hat{y} = f(x_j) = b_0 + \sum_{j=1}^3 b_j x_j + \sum_{j=1}^3 b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^3 b_{jj} x_j^2$$

(1)

回归系数由下列各式求得

$$b_0 = K \sum_{\alpha} y_{\alpha} + E \sum_{j=1}^3 (\sum_{\alpha} x_{\alpha j}^2 y_{\alpha})$$

$$b_j = e^{-1} \sum_{\alpha} x_{\alpha j} y_{\alpha}$$

$$b_{ij} = m_e^{-1} \sum_{\alpha} x_{\alpha i} x_{\alpha j} y_{\alpha}$$

$$b_{jj} = (F - G) \sum_{\alpha} x_{\alpha j}^2 y_{\alpha} + G \sum_{j=1}^p \sum_{\alpha} x_{\alpha j}^2 y_{\alpha} + E \sum_{\alpha} y_{\alpha}$$

式中, K 、 E 、 F 、 G 、 e 为随设计性质和试验变量数而改变的参数^[6], $x_{\alpha j}$ 与 y_{α} 分别为各因子编码值与考察目标值, 对表 2 实测值进行运算, 得各回归系数列于表 3。经检验, 小麦产量及群体发展动态目标函数的回归方程无失拟因素存在, 并达到很显著水准($\alpha < 0.05$)。即所建立各方程反映了变量与目标函数之间的关系。用作预报有较高的可靠性, 产量预测见表 2 中 $\hat{y}_a$ 。

3.2 产量模型解析

(1) 主因子效应分析 各因子在不同水平下的产量效应可分为高中低 3 种。回归模型中各偏回归系数已经无量纲线性代换, 可直接从一次项回归系数绝对值大小判断各因子对产量的主要影响, 从表 3 知 $b_1 > b_2 > b_3$, 即播种期是小麦产量的主要限制因子, 其次要合理安排播种量。

表 3 模型回归系数及效果检验

Table 3 Model regression coefficient and verification							
	回归系数	$\hat{y}_a$	$\hat{y}_b$	$\hat{y}_c$	$\hat{y}_d$	$\hat{y}_e$	$\hat{y}_f$
常数项	b_0	5 241. 91	172. 4	333. 4	85. 0	2. 73	32. 29
一次项	b_1	- 209. 49	- 17. 3	2. 0	- 19. 4	0. 11	- 4. 06
	b_2	179. 36	18. 7	- 37. 3	- 6. 7	- 0. 24	- 0. 65
	b_3	0. 59	14. 6	1. 8	5. 5	0. 08	1. 19
交互项	b_{12}	236. 73	- 37. 1	- 2. 9	- 9. 5	- 0. 65	2. 68
	b_{13}	- 107. 93	- 31. 9	19. 4	2. 5	0. 20	- 0. 20
	b_{23}	104. 80	45. 1	- 15. 1	16. 8	0. 28	- 2. 35
平方项	b_{11}	- 27. 33	10. 2	37. 2	18. 7	0. 42	0. 91
	b_{22}	- 242. 52	17. 8	62. 6	50. 6	1. 40	- 0. 87
	b_{33}	- 42. 52	13. 9	22. 4	20. 8	0. 54	0. 28
$S_{回}$		$2. 24 \times 10^6$	$5. 4 \times 10^4$	$9. 5 \times 10^4$	$5. 2 \times 10^4$	37. 64	363. 26
$S_{剩}$	$S_{失拟}$	$7. 07 \times 10^5$	$1. 3 \times 10^4$	$2. 6 \times 10^4$	$4. 8 \times 10^2$	0. 79	6. 40
	$S_{误}$	$7. 19 \times 10^4$	$1. 4 \times 10^3$	$5. 2 \times 10^3$	$2. 7 \times 10^3$	3. 09	55. 34
$S_{总}$		$3. 02 \times 10^6$	$6. 9 \times 10^4$	$1. 3 \times 10^5$	$5. 5 \times 10^4$	41. 52	425. 00
显著性		0. 05	0. 05	0. 05	0. 01	0. 01	0. 01

(2) 单因子效应分析 对产量模型采用“降维法”将其他两个变量固定在零水平, 可得到在特定条件下任一因子为决策变量的子回归模型。

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= 5\,241.91 - 209.49 x_1 - 27.33 x_1^2 \\ y_2 &= 5\,241.91 + 179.36 x_2 - 242.52 x_2^2 \\ y_3 &= 5\,241.91 + 0.59 x_3 - 42.52 x_3^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对(2)中各式求导, 可得 x_1, x_2, x_3 每增加一单位变动因素所增加的产量, 即边际产量模式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_1}{dx_1} &= -209.49 - 54.66 x_1 \\ \frac{dy_2}{dx_2} &= 179.36 - 485.04 x_2 \\ \frac{dy_3}{dx_3} &= 0.59 - 85.04 x_3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

令 $\frac{dy_i}{dx_i} = 0$ ($-1.682 \leq x_i \leq 1.682$), 可求出 y_i 极大值时各单独要素的最佳值: x_1 为 -1.682 (播种期 28/9); x_2 为 0.370 (播种量 $141.4\text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$); x_3 为 0.007 (离树行距离 16.0 m), 利用(2)、(3)式可分别绘出 3 要素的产量反应及边际产量曲线(见图 1)。

从 3 要素的产量反应曲线可见:
(1) 播种期产量反应曲线单调下降, 取 $r = -1.682$ 水平时得产量极大值 $5\,517.0\text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; (2) 播种量 x_2 编码值在 $[-r, 0.37]$ 内, 小麦群体产量随 x_2 增大而上升, 边际产量为正, x_2 取 0.37 水平时产量最大值 $5\,242.0\text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。播种量再增加时, 边际产量为负值, 产量开始下降, 出现了过度密植引起的减产现象; (3) 林下小麦播种离树距离 x_3 产量反应与此类似, 但变化缓慢。距离与产量呈抛物线关系, 即两林带间有一个高产区两个低产胁区。当林带行距较大时, 其改善农田小气候之优势得到充分发挥, 故总体产量高于对照, 另外小麦应尽早播种, 使麦苗适应新小气候环境, 尽量错开小麦生长与泡桐枝叶茂盛期, 才能争取高产。

(3) 两因素交互效应 小麦产量模型中, 存在一个显著交互项 $x_1 x_2$ ($t > t_{0.05}$, 说明产量提高不仅是 3 因子单独增产效应的线性累加, 还具有配合效应, 将模型降至二维, 得播期与播种量子模型

$$y_{12} = 5\,241.91 - 209.44 x_1 + 179.36 x_2 +$$

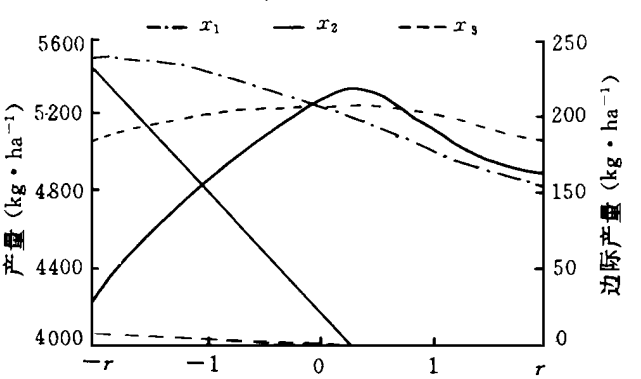


图 1 单因子效应分析图
曲线为 x_1, x_2, x_3 产量反应; 直线为 x_2 边际效应产量
Fig. 1 Diagram of effect of a single factor
(Yield related to x_1, x_2 and x_3 is denoted by the curve and the marginal effect of x_2 by the straight line)

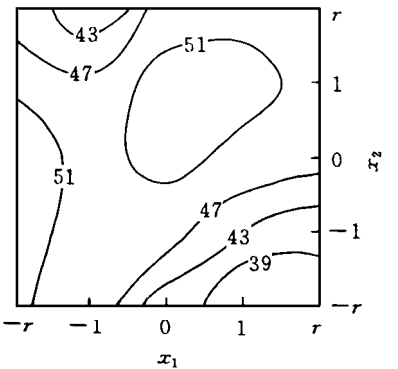


图 2 $x_1 x_2$ 对产量 ($\times 10^2\text{ kg}$) 交互效应
Fig. 2 Combined effect of x_1 and x_2 on yield ($\times 10^2\text{ kg}$)

$$236.73x_1x_2 - 27.33x_1^2 - 242.52x_2^2$$

自变量取不同水平时,交互效应如图 2。在播种量 x_2 低水平时,小麦产量随播期 x_1 推迟逐渐降低, (x_1, x_2) 在 $(r, -r)$ 附近表现最低 3 427 kg · ha⁻¹播种量水平较高时, 播种期稍后推迟有利小麦增产, (x_1, x_2) 在 $(-r, 0)$ 附近取得高产 5 517 kg · ha⁻¹, 两者交互作用最强。

3.3 产量模型寻优

单因子双因素效应分析可找到特定条件下优化方案, 这在生产上有一定意义, 现要对全部因素的配合问题进行讨论。产量模型(1) 式为非线性函数, 由数学分析原理得 x_0 处展开的梯度矩阵⁶⁾

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial \alpha_1^2} & \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} & \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_3} \\ \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial \alpha_2 \partial \alpha_1} & \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial \alpha_2^2} & \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial \alpha_2 \partial \alpha_3} \\ \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial \alpha_3 \partial \alpha_1} & \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial \alpha_3 \partial \alpha_2} & \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial \alpha_3^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -54.7 & 236.7 & -107.9 \\ 236.7 & -485.0 & 104.8 \\ -107.9 & 104.8 & -85.0 \end{pmatrix}$$

因矩阵 A 为不定型, 故原二次方程代表多维鞍形曲面, 无极值。另一方面, 单纯数学解最优值只能表示试验条件下的产量潜力, 在大面积生产中因有自然生态条件的不可控性和干扰很难实现, 可用频数分析法求得具有生产意义上可行的最优栽培措施组合, 将各控制因素给出一定范围, 且均能达到高产目的。在自变量设计范围 $-1.682 \leq x_i \leq 1.682$ 内, 将目标函数理论值大于某一高产值的方案筛选出来进行优化分析, 结果见表 4。当地高产 5 100 kg · ha⁻¹以上的高产栽培措施集中区域为: 播期 10 月 2 ~ 11 日, 播种量 115.3 ~ 138.2 kg · ha⁻¹, 离树行距离为 13.6 ~ 19.9 m, 此措施与单独产量反应极值点有差异, 说明栽培因素交互作用也对产量产生影响。

表 4 高产优化频率分析
Table 4 Frequency of optimized schemes for high-yield

自变量水平	x_1 (播期)		x_2 (播种量)		x_3 (距离)	
	次数	频率	次数	频率	次数	频率
- 1.682	14	0.378	3	0.081	6	0.162
- 1	10	0.270	9	0.243	8	0.217
0	9	0.243	13	0.351	6	0.162
1	3	0.081	10	0.270	10	0.270
1.682	1	0.028	2	0.055	7	0.189
合计	37	1.0	37	1.0	37	1.0
$\bar{x}_i^*$	- 0.777 7		- 0.016 7		0.099 5	
S_x	0.157 2		0.157 7		0.201 0	
区间估计**	- 1.085 8 ~ 0.469 6		- 0.325 8 ~ 0.284 0		- 0.294 4 ~ 0.493 0	
栽培措施	10 月 2 ~ 11 日		115.3 ~ 138.2 kg · ha ⁻¹		13.6 ~ 19.9 m	

说明: * 权重值; ** $\alpha=95\%$

把小麦产量模型求得的最佳解, 代入群体发展动态目标函数模型群(见表 3), 可得到最佳栽培措施组合方案下的函数指标值: 出苗株数(y_b) 206 ± 75 株 · m⁻², 总茎蘖数(y_e) 353 ± 108 株 · m⁻², 有效分蘖数(y_d) 115 ± 35 株 · m⁻², $LAI(y_e)$ 3.0 ± 1.2, 经济系数(y_f) 36.5 ± 4.8%,

这群多指标值能检测高产小麦生育过程中的群体生长性状,使群体和个体协调发展。小麦农田生产建立在一定群体基础上, LAI 过大或过小均不利于光能利用和产量形成,在生产水平较低时,播种量大可形成较多的群体苗数,有效分蘖数,从而增加了光合面积和亩穗数,为小麦高产打下基础。但当 y_b 、 y_d 大到一定程度时,就会使群体内光温气条件不利个体发育,导致减产。这时就需要由播种量合理设计种植密度,均衡发展群体和穗粒重,争取林下小麦高产。

4 结论与讨论

(1) 用现代回归设计理论,利用较小试验规模建立了小麦三项栽培措施与产量,群体发展动态指标模型群,可作为进一步挖掘林下小麦生产潜力的依据。

(2) 各栽培因子单独考虑时,小麦产量影响幅度为播种期 $x_1 >$ 播种量 $x_2 >$ 离树行距离 x_3 小麦播种期与播种量对小麦产量的交互作用影响很显著。

(3) 由运筹分析得本试验条件下小麦产量高于 $5\ 100\ kg \cdot ha^{-1}$ 的栽培方案为: 播种期 10 月 2 ~ 11 日, 播种量 $115.3 \sim 138.2\ kg \cdot ha^{-1}$, 离树行距 $13.6 \sim 19.9\ m$, 此优化方案下小麦群体发展动态指标值对大田栽培管理有参考意义。

(4) 小麦栽培函数模式及栽培方案,是在特定土壤、气候、大田管理技术及其他生产条件下获得,适应于条件类似地方,随意套用模式是不会成功的。为此须开展多年多点联网试验,有条件可进一步增设因子数诸如小麦品种、施肥水平、灌溉等来探讨对林下小麦产量的影响,在大田生产中去检验,不断完善以利用好当地自然资源。

参 考 文 献

1 陆新育,竺肇华,张振修. 农桐间作效益的研究. 农业气象, 1981, (1): 82 ~ 89
2 景元书. 农桐间作田中太阳辐射分布探讨. 南京气象学院学报, 1995, 18(2): 207 ~ 212
3 张 航,徐福利,赵明智. 渭北旱原春玉米高产农艺措施最佳组合方案的研究. 干旱区农业研究, 1994, 12(4): 45 ~ 49
4 茆诗松,丁 元,周纪芹等. 回归分析及其试验设计. 第二版,上海: 华东师范大学出版社, 1981. 211 ~ 215
5 栾汝书. 线性代数. 北京: 高等教育出版社, 1983. 269 ~ 272

STUDY ON MODELS OF WHEAT GROWTH
BETWEEN FOREST BELTS

Jing Yuanshu

(*Department of Applied Meteorology, NIM, Nanjing 210044*)

Wu Yunying

(*Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091*)

Abstract In the context of experimental observations and the quadratic regression revolution design, a group of models are established for three controllable cultivation factors and dynamic indices of wheat mass development between forest belts, with the yield effect related to one and all of the factors investigated, thereby sorting out an optimal scheme to provide assistance for normalized cultivation and prediction and control in advance of the crop for purposes of high yield.

Keywords compound forestry, revolution design, cultural model, mass development