

水地小麦高产施肥模型及其应用研究

徐兆飞* 张定一

(山西省农业科学院小麦研究所, 临汾 041000)

摘 要

采用三因素二次回归旋转组合设计方法, 对影响小麦产量的氮肥、磷肥、有机肥的用量进行了定量研究, 建立了中等以上肥力的水地小麦产量形成的施肥函数模型及最佳施肥组合方案, 并确定水地小麦施肥模型主因素作用效应顺序: 磷肥>氮肥>有机肥。还研究了各项施肥措施间的交互作用效应。

关键词 冬小麦 函数模型 优选方案

在调查分析晋南水地冬小麦施肥技术的基础上, 采用三元二次回归旋转组合设计并借助电子计算机模拟, 研究了氮肥、磷肥、有机肥对小麦产量形成影响的函数模型, 确定了小麦生产的最优施肥组合方案以及在优化施肥组合方案下产量形成的各种目标函数指标值, 旨在为小麦大面积高产、稳产、高效栽培提供科学施肥依据。

试验设计

试验于1988~1990年在临汾市洪堡, 泊庄乡和永济县虞乡农场进行, 以洪堡村为主点试验, 其它为副点。播前土壤有机质含量为1.03~1.23%, 全氮0.051~0.064%, 速效氮 61.3~68.4ppm, 全磷0.075~0.095%, 速效磷18.5~24.6ppm。试验地前茬为夏玉米。种植的小麦品种为晋麦30号, 播期10月1日, 每亩基本苗17万株。

表1 试验因素水平编码 (公斤/亩)

变 量	代号	零水平	变化间距	变 量 设 计 水 平 ($r=1.682$)				
				-1.682	-1	0	1	1.682
氮 肥	x_1	10	5.95	0	4.06	10	15.95	20
磷 肥	x_2	10	5.95	0	4.06	10	15.95	20
有机肥	x_3	2500	1485	0	1014	2500	3986	5000

注: 氮肥80%底施, 20%拔节期追施, 磷肥与有机肥于播前一次底施。氮素来自尿素, 含氮量以46.6%计算, 磷素来自过磷酸钙, 含 P_2O_5 以14.0%计算。

1990—10—31收稿。 *执笔人。

参加本试验的还有永济县虞乡农场解鹏同志, 临汾市泊庄乡李福平同志。

试验采用三元二次正交回归旋转组合设计,按编码值制定试验方案(表1)。共设置23个小区,小区面积0.04亩。研究氮肥用量(x_1)、磷肥用量(x_2)、有机肥用量(x_3)对小麦籽粒产量的影响,同时调查小麦的群体变化,产量构成要素(表2)。

表2 目标函数

项目	籽粒产量	冬前总茎数	春季最高茎数	亩穗数	穗粒数	千粒重
代号	y_a	y_b	y_c	y_d	y_e	y_f

结果与分析

一、产量数学模型的建立

1988~1990年3个点6组试验资料分析结果趋势基本一致,现以1990年主点资料进行结果分析。将试验小区产量折合成亩产量(表3),把数据输入PC-1500A微机进行运算与统计分析。

表3 试验的结构矩阵与目标函数结果

处理号	x_1	x_2	x_3	y_a	y_b	y_c	y_d	y_e	y_f
1	1	1	1	472.5	65.3	80.3	45.3	28.3	36.9
2	1	1	-1	467.3	62.4	78.0	44.7	28.4	36.8
3	1	-1	1	404.0	58.5	73.5	38.5	34.5	30.4
4	1	-1	-1	414.0	59.1	74.0	39.6	32.4	32.3
5	-1	1	1	451.5	62.9	77.9	43.2	28.8	36.3
6	-1	1	-1	460.0	63.9	79.0	44.0	29.8	35.1
7	-1	-1	1	394.8	58.7	73.9	38.5	32.3	31.7
8	-1	-1	-1	403.2	58.4	73.0	38.4	35.2	29.8
9	1.682	0	0	416.2	59.6	75.1	39.6	32.2	32.6
10	-1.682	0	0	414.0	59.7	74.8	39.4	33.4	31.5
11	0	1.682	0	451.0	62.9	78.0	43.2	29.9	34.9
12	0	-1.682	0	399.0	59.0	74.0	38.0	34.0	30.9
13	0	0	1.682	450.0	62.9	80.1	43.0	29.1	36.0
14	0	0	-1.682	430.6	62.1	77.6	41.1	31.7	33.1
15	0	0	0	477.0	65.7	81.2	45.7	27.4	38.1
16	0	0	0	451.0	63.4	78.9	43.1	29.1	36.0
17	0	0	0	504.0	67.8	83.0	47.9	32.0	32.9
18	0	0	0	472.0	65.5	81.0	45.2	29.3	35.6
19	0	0	0	456.7	63.7	79.8	43.7	31.1	33.6
20	0	0	0	488.3	66.9	82.0	46.9	28.0	37.2
21	0	0	0	436.0	61.6	77.0	41.6	31.4	33.4
22	0	0	0	451.0	63.4	78.5	43.1	29.8	35.1
23	0	0	0	472.0	65.4	80.4	45.2	29.7	35.2

获得如下三元二次回归方程即产量回归模型:

$$\begin{aligned} \hat{y}_a = & 467.3110 + 3.7826x_1 + 23.6319x_2 + 0.8003x_3 + 1.0375x_1x_2 + 1.5125x_1x_3 \\ & + 1.8875x_2x_3 - 16.6908x_1^2 - 13.1307x_2^2 - 7.6837x_3^2 \end{aligned} \quad (1)$$

模型(1)中,常数项反映各肥料施用量均处在零水平时产量,即平均效应;回归系数 b_1, b_2, b_3 反映氮肥、磷肥、有机肥各自的线数增产效应; b_{12}, b_{13}, b_{23} 反映各肥料之间的交互效应; b_{11}, b_{22}, b_{33} 反映增施肥料的报酬递减效应。

对回归模型进行方差分析(表4)可知,失拟均方 $F_{失} = 0.54 < F_{0.05} = 3.69$,回归均方 $F_{回} = 4.86 > F_{0.01} = 4.19$,复相关系数 $R = 0.8780^{**}$ 。说明未控因素对试验数据的影响不显著,误差是随机的,试验所建立的二次方程与实测值拟合程度较好,三个因素与产量之间的密切程度达到极显著水平。试验随机误差估计值 $s = 19.1231$,查 t 分布表,当 $df = 13$, $t_{0.05} = 2.160$, $t_{0.01} = 3.012$ 时,回归方程置信概率为95%和99%的置信域分别为:

$$\hat{y}_a - 41.31 \leq \hat{y}_a \leq 41.31 + \hat{y}_a$$

$$\hat{y} - 57.60 \leq \hat{y}_a \leq 57.60 + \hat{y}_a$$

表4 回归方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
总变量	20744.17	22				
回 归	15990.15	9	1776.68	4.86**	2.72	4.19
剩 余	4754.02	13	365.69			
失 拟	1205.02	5	241.00	0.54	3.69	6.63
误 差	3549.00	8	443.63			

二、模型的解析与寻优

(一) 最佳产量模拟寻优

目标函数“ \hat{y}_a ”的最大值就是模型的最优解。利用微机求得 $-1.682 \leq x \leq 1.682$ 区域内, $\hat{y}_{amax} = 477.81$ 公斤/亩,其最高产量施肥组合方案为: $x_1 = 0, x_2 = 1, x_3 = 0$ 。

对于大面积生产实践来说, \hat{y}_{amax} 并不一定代表生产意义上的最优,只有采用产量频率分析法作进一步分析,求得的有关解,才符合生产情况。在 $-1.682 \leq x_1 \leq 1.682$ 区间内,经上机运算得到 $5^3 = 125$ 套全部组合方案,其中小麦籽粒产量 ≥ 425 公斤的组合方案48套(表5)。从表5可知,亩产425公斤以上小麦,自变量 x_i 编码值取值区间分别为: $x_1 = -0.052 \sim 0.416$, $x_2 = 0.757 \sim 1.031$, $x_3 = -0.081 \sim 0.305$ 。即在本试验条件下,最佳产量各 x_i 的取值范围是:氮肥(纯N)用量9.69~12.48公斤/亩,磷肥(P_2O_5)用量14.50~16.13公斤/亩,有机肥用量2379.63~2947.74公斤/亩。亩产小麦 $\hat{y}_a = 478.46 \pm 41.31$ 。

表5 小麦亩产量≥425公斤的施肥措施方案 x_i 取值频率分布 (%)

变 量		x_1 (N)		x_2 (P_2O_5)		x_3 (有机肥)	
		次数	频率	次数	频率	次数	频率
自变量编码水平	-1.682	0	0	0	0	7	14.6
	-1	13	27.1	1	2.1	9	18.8
	0	16	33.3	14	29.2	12	25.0
	1	15	31.3	17	35.4	11	22.9
	1.682	4	8.3	16	33.3	9	18.8
合 计		48	100	48	100	48	100
编码加权平均		0.182		0.894		0.112	
标 准 误		0.116		0.068		0.094	
95%置信区间		-0.052~0.416		0.757~1.031		-0.081~0.395	
组 合 措 措		9.69~12.48		14.50~16.13		2379.63~2947.74	
		公斤/亩		公斤/亩		公斤/亩	

(二) 单因素效应分析

数学模型(1)中,各正交回归数值经过无量纲线性编码代换后已经标准化。直接比较其绝对值的大小可知:一次项 $b_2 > b_1 > b_3$,即磷肥>氮肥>有机肥;二次项 $b_{11} > b_{22} > b_{33}$,即氮肥>磷肥>有机肥。说明氮肥、磷肥是影响小麦产量的主要因素,有机肥对产量影响程度不如氮磷明显,但对稳产有一定作用。

采用“降维法”,在模型(1)中分别将两个变量固定在零水平,可得到以下3个一元降维偏子回归模型:

$$\begin{aligned} \widehat{y_{a1}} &= 467.3110 + 3.7826x_1 - 16.6908x_1^2 \\ \widehat{y_{a2}} &= 467.3110 + 23.6319x_2 - 13.1307x_2^2 \\ \widehat{y_{a3}} &= 467.3110 + 0.8003x_3 - 7.6837x_3^2 \end{aligned}$$

(2)

将各正交编码值代入(2)数学模型,求解得表6。

表6 各试验因素不同水平下的产量 (公斤%)

变 量 因 素	试 验 水 平					变异系数 (C.V.)
	-1.682	-1	0	1	1.682	
x_1 氮肥	413.73	446.84	467.31	454.40	426.45	4.93
x_2 磷肥	390.41	430.55	467.31	477.81	469.91	8.19
x_3 有机肥	444.23	458.83	467.31	446.37	446.92	2.39

表6 变异系数表明,磷肥对小麦产量影响最大,氮肥次之,有机肥最小。说明当地土壤缺磷少氮是限制小麦产量的主导因素。

对模型(2)分别求导,可得其边际产量模型(3)。

$$\left. \begin{aligned} \widehat{dy}_{a1}/dx_1 &= 3.7826 - 33.3816x_1 \\ \widehat{dy}_{a2}/dx_2 &= 23.6319 - 26.2614x_2 \\ \widehat{dy}_{a3}/dx_3 &= 0.8003 - 15.3674x_3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

令 $\widehat{dy}_i/dx_i = 0$ ($i = 1, 2, 3$), 可求出 \widehat{y}_a 极大值时各项施肥的最佳值, $x_1 = 0.11$, $x_2 = 0.90$, $x_3 = 0.05$ 。上述各单项因素的极点值与模型 (1) 的极点值有差异。说明各项施肥互作效应对产量有影响。

利用模型 (2) 和 (3) 绘出氮磷和有机肥的产量反应曲线和边际产量图 (图 1)。

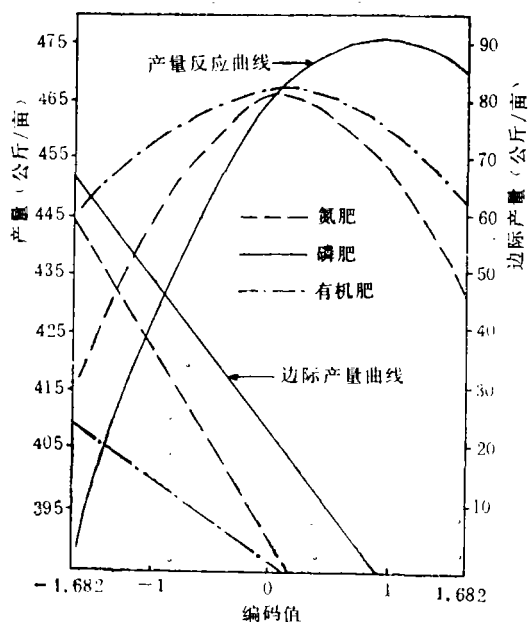


图1 氮、磷、有机肥的产量反应和边际产量曲线

(三) 三因素的互作效应

在模型 (1) 中, 将任何一个因素固定在“0”水平, 分析另两个因素的交互作用。

1. 氮、磷互作 令 $x_3 = 0$, 由模型 (1) 可得以下回归模式:

$$\begin{aligned} \widehat{y}_{a1,2} &= 467.3110 + 3.7826x_1 + 23.6319x_2 + 1.0375x_1x_2 - 16.6908x_1^2 \\ &\quad - 13.1307x_2^2 \end{aligned} \quad (4)$$

由模式 (4) 可算出氮、磷互作效应 (表 7)。从表 7 看出, 在施氮 $-1.682 \sim 0$ 水平, 施磷 $-1.682 \sim 1$ 水平时, 交互作用对产量的影响表现增产。当不施磷时, 轻施氮较不施氮增产, 但超过一定量出现减产趋势。当施氮量取零水平, 而施磷取 1 水平时, 产量达到最大值。以上分析说明, 水地冬小麦施肥必须进行氮、磷肥配合, 适当加大磷肥用量, 增产显

从图 1 的产量反应曲线看出, 增产效应: 磷肥 > 氮肥 > 有机肥。从边际产量曲线可知: 在 -1.682 水平时, 氮、磷的边际产量很大, 产量迅速上升。当至零水平时, 氮肥的边际产量趋近于零, 产量达到最大。过此之后, 边际产量变为负值, 产量开始下降。这说明在本试验条件下氮肥用量在 $0 \sim 9.69$ 公斤/亩区间, 随着用量增加, 产量迅速增加, 在 9.69 公斤/亩左右时产量最高, 超过此用量, 产量逐渐下降, 甚至减产。而当至 1 水平时, 磷肥的边际产量趋近于零, 产量达到最大值, 过此之后, 边际产量变为负值, 产量开始下降, 出现了施磷过量而减产的现象。说明磷肥用量在 $0 \sim 14.50$ 公斤/亩范围内, 产量随着磷肥用量的增加而迅速增加, 超过此用量, 造成减产。

有机肥的产量反应曲线变化趋势与氮相似, 但变化比较平缓。

著。

表7 氮肥与磷肥的互作效应

		x_1 编 码 值				
		-1.682	-1	0	1	1.682
x_2 编码值	-1.682	352.49	379.25	390.41	368.20	333.90
	-1	391.44	418.68	430.55	409.04	375.22
	0	426.15	454.40	467.31	446.84	413.73
	1	435.21	463.87	477.81	458.38	425.97
	1.682	426.21	455.76	469.91	451.18	431.99

2. 氮、有机肥互作 令 $x_2 = 0$ ，由模型 (1) 可得以下的回归模式：

$$\begin{aligned} \hat{y}_{01..3} = & 467.3110 + 3.7826x_1 + 0.8003x_3 + 1.5125x_1x_3 \\ & - 16.6908x_1^2 - 7.6837x_3^2 \end{aligned} \quad (5)$$

由模式 (5) 算出氮、有机肥互作效应 (表 8)。

表8 氮肥与有机肥的互作效应

		x_1 编 码 值				
		-1.682	-1	0	1	1.682
x_3 编码值	-1.682	394.92	426.30	444.23	428.77	399.10
	-1	407.79	439.87	458.83	444.41	415.42
	0	405.66	446.84	467.31	454.40	426.45
	1	404.20	438.44	460.43	449.03	422.12
	1.682	390.06	423.90	445.56	436.56	410.34

从表 8 可知，当不施氮时，无论少施还是多施有机肥，均无增产效果，当氮、有机肥取零水平时，产量达到最大值。以上分析说明，水地高产麦田，不施氮肥仅施有机肥是无法满足小麦高产需要的，必须结合施用氮肥，才能高产稳产。

3. 磷、有机肥互作 令 $x_1 = 0$ ，由模型 (1) 可得以下模式：

$$\begin{aligned} \hat{y}_{02..3} = & 467.3110 + 23.6319x_2 + 0.8003x_3 + 1.8875x_2x_3 \\ & - 13.1307x_2^2 - 7.6837x_3^2 \end{aligned} \quad (6)$$

由模式 (6) 可算出磷肥、有机肥的交互效应 (表 9)。从表 9 可以看出，当施磷量取 -1.682~1 水平，有机肥取 -1.682~0 时，交互效应对产量影响表现为增产。当施磷量取 1 水平，有机肥取零水平时，产量最高，而且施磷肥的增产幅度 (每增施 5.95 公斤 P_2O_5 ，亩增产小麦 37.97、33.59、7.33 公斤) 较施有机肥的增产幅度大 (每增施 1486 公斤有机肥，亩增产小麦 12.44、5.3 公斤)。说明高产麦田，有机肥增产效果虽不如磷肥明显，但对提高磷肥的利用率有一定作用。所以，在增施磷肥用量的条件下，不可忽视施用有机肥。

表9 磷肥与有机肥的互作效应

		x_2 编 码 值				
		-1.682	-1	0	1	1.682
x_3 编码值	-1.682	372.67	410.64	444.23	451.56	441.50
	-1	385.11	423.96	458.83	467.44	458.26
	0	390.41	430.55	467.31	477.81	469.91
	1	380.36	421.73	460.43	472.82	466.21
	1.682	364.63	406.93	446.92	460.60	454.87

三、最佳经济效益组合方案

在生产中往往最高产量组合方案不一定是最佳经济效益组合方案。为获取最大经济效益,实现低投高产,将各因素的费用成本,按每公斤小麦0.5元,氮素0.9元,磷素1.2元,有机肥0.01元计算。根据肥效增产曲线的分析原理,由模型(3)得:

$$\left. \begin{aligned} 3.7826 - 33.3816x_1 &= 0.9/0.5 \\ 23.6319 - 26.2614x_2 &= 1.2/0.5 \\ 0.8003 - 15.3674x_3 &= 0.01/0.5 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由模型(7)解得最佳经济效益方案为:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0.059 \text{ (折纯N10.35公斤/亩)} \\ x_2 &= 0.808 \text{ (折P}_2\text{O}_5\text{14.81公斤/亩)} \\ x_3 &= 0.051 \text{ (折有机肥2575.45公斤/亩)} \end{aligned}$$

最佳经济施肥方案与达到最高产量的施肥方案十分接近,而且也在频数法分析的各项施肥组合方案的范围之内。说明采用最佳施肥组合方案不仅可以获得高产,而且也可获得最佳经济效益。

四、最佳产量组合方案的各项函数指标

根据试验所得的产量参数可以建立产量模型,模型求解后得到最佳产量的施肥组合方案。同样,根据试验测定的目标函数的参数值,建立各种目标函数模型,组成一个目标函数模型群。然后根据产量模型求得最佳解,代入模型群,便可得到最佳产量施肥组合方案的各种目标函数指标(表10)。

表10 水地小麦最佳施肥组合方案的目标函数指标值

目标函数	代号	单 位	\hat{y} 值
籽粒产量	\hat{y}_a	公斤/亩	478.46 \pm 41.31
冬前总茎数	\hat{y}_b	万/亩	66.57 \pm 1.70
春季最高茎数	\hat{y}_c	万/亩	81.02 \pm 1.65
亩穗数	\hat{y}_d	万/亩	45.78 \pm 1.82
穗粒数	\hat{y}_e	个	29.44 \pm 1.45
千粒重	\hat{y}_f	克	37.44 \pm 1.62

df=13

 $t_{0.05}=2.160$

表10所示的一组多指标模型群是最佳施肥组合方案的解,反映小麦在最佳施肥组合方案下的群体动态和产量结构状况。

结 论

1. 通过试验建立了水地小麦施肥函数模型,比较综合反映了施氮肥、磷肥、有机肥量与小麦群体、产量及产量构成要素的关系,为小麦施肥的定量化提供了理论依据。

2. 运用回归设计理论和分析方法进行水地小麦施肥规范化栽培模型研究,试验规模小,信息量大,在二年的期间内基本摸清氮肥、磷肥、有机肥对小麦产量影响的大小和互作效应的大小和方向,对挖掘水地小麦增产潜力有一定参考意义。

3. 二年试验结果获得的最佳施肥组合方案为:氮肥(纯N) 9.69~12.48公斤/亩,磷肥(P_2O_5) 14.50~16.13公斤/亩,有机肥2379.63~2947.74公斤/亩。运用此方案可获得470公斤以上的小麦产量。

4. 在单项施肥条件下,增产幅度为:磷>氮>有机肥。这说明,水地麦田继续提高小麦产量应首先注重磷肥的施用,其次是氮肥,有机肥对稳产有一定作用。

5. 其他副点分析结果,总的趋势一致,都是稳氮增磷,只是因地力基础不同产量水平有所差别。

农作物的丰产,受多方面因素的制约,利用数学模型提供的丰产组合方案的信息,必须再回到实践进行反馈,不断充实、提高、完善,才能成为一个好的高产模式。

参 考 文 献

- [1] 茆诗松等:《回归分析与试验设计》,华东师范大学出版社,1981:191-219
- [2] 清华大学:《最优化设计基础》,北京,清华大学出版社,1982
- [3] 赵长清:汕优63高产模式栽培的研究及应用,《湖北农业科学》,1987(7),1-5
- [4] 范志杰:地膜棉花优质高产综合农艺措施的产量函数模型及其应用的研究,《中国农业科学》,23(2) 1990:57-66
- [5] 刘俊明:高产玉米合理施肥及其数学模型,《辽宁农业科学》,1939(2):14-18
- [6] 李英等:黄土旱塬小麦丰产模式的研究,《中国科学院西北水土保持研究所集刊》,1938(8):41-48
- [7] 宋殿珍等:旱地小麦高产栽培综合农艺措施数学模型及优化方案,《山西农业科学》,1990(8): 4-8

A Study on Fertilizer Application Model and Its Use for Higher Wheat

Xu Zhaofei Zhang Dingyi

(Wheat Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Linfen)

Abstract

In 1988—1990 field experiments of winter wheat with 3 factors 5 levels of orthogonal rotation design was carried out. The doses of N, P and organic fertilizer, which can all affect the yield of wheat, were studied quantitatively. Based on experimental results in two years and many test sites, the simulation model of wheat yield to doses of N, P, organic fertilizer was established, and the optimal combination of fertilizing amount was obtained. By reducing the dimension and resolving the model, the responses of wheat yield to each single fertilizer element and the interaction effects between N, P, and organic fertilizer were investigated.

Key words: Winter wheat; Simulation model; Optimum plans