

# 内蒙古河套灌区春小麦高产栽培优化 农艺措施及数学模型的研究

安玉麟 李彦 杜刚强 郑文哲

(内蒙古农业科学院, 呼和浩特 010030)

张玉贵 马忠林 周 鸿

(内蒙古巴彦淖尔盟农科所, 陕坝 015400)

**摘 要** 本文通过三因素二次通用旋转设计试验, 对内蒙古河套灌区春小麦高产栽培的主要农艺措施进行优化分析与数学模拟, 确定了春小麦高产栽培优化农艺措施为亩播量18~23kg, 施N 20~23kg, 施 $P_2O_5$  10~13kg。同时还明确了河套灌区春小麦高产栽培的亩产量与氮磷和播量之间的相关关系, 即随着目标产量的提高, 在增施氮肥和磷肥的基础上, 密度呈下降的趋势。

**关键词** 春小麦 高产栽培措施 数学模型

春小麦是内蒙古河套灌区的主要作物, 1990年播种面积达232.5万亩, 而且呈逐年扩大的趋势。目前河套灌区小麦栽培的主要技术措施是缩垄增行, 增加密度, 增施化肥。播量一般为每亩27.5kg, 甚至更多, 亩施磷酸二铵 15kg, 加 3 kg尿素作种肥施用, 亩施氮 15kg, 主要在浇头水时作追肥。我们通过多点调查, 发现在这种农艺措施指导下, 小麦亩产量一般为400kg或略超400kg, 要获取更高产量则较难。这就给我们提出了一个问题, 目前推行的小麦栽培农艺措施是不是最优的, 是否可适应于不同土壤肥力的麦田。针对这些问题, 我们开展了河套灌区春小麦高产栽培优化农艺措施及数学模型的研究。

## 材料和方法

试验于1990~1991年在巴彦淖尔盟临河县八一综合实验区进行, 试验地土壤农化性状见表1。

表1 试验地土壤农化性状

地 块	有机质 (%)	全 盐 (%)	全 氮 (%)	全 磷 (%)	全 钾 (%)	碱解氮 (ppm)	Olsen-P (ppm)	K <sub>2</sub> O (ppm)
1990年地块	1.32	0.081	0.036	0.066	2.00	57.20	8.60	185.00
1991年地块	1.32	0.013	0.085	0.053	1.30	70.00	17.30	170.00

供试小麦品种1990年为永良4号, 1991年为永良12号, 氮肥为尿素, 磷肥为三料磷和磷酸二铵, 磷酸二铵所含氮量计在施氮总量内。小区面积1990年 $24\text{m}^2$ , 1991年 $12.5\text{m}^2$ 。作畦, 畦间距 $0.25\text{m}$ , 以便管理和施肥。试验采用三因素二次通用旋转设计, 20个处理, 随机排列。两年试验均在3月20日播种, 行距 $13.3\text{cm}$ , 人工开沟播种。磷肥作种肥施用, 氮肥在小麦三叶期浇头水时一次施完, 其他管理措施与大田生产相同。小麦4月13日出苗, 出苗率95%以上。小麦生育期浇3次水, 生长发育正常。7月20日收获, 每小区收获面积 $7.75\text{m}^2$ , 并进行了考种。

## 试验设计和统计分析

本试验采用三因素二次通用旋转设计, 对内蒙古河套灌区春小麦高产栽培的主要农艺措施、播量(密度)、氮肥、磷肥进行优化数学模型的研究。三因素二次通用旋转设计水平编码见表2。

表2 三因素二次通用旋转设计水平编码

因 素	编 码				
	-1.682	-1	0	1	1.682
(播量) $X_1$ kg/亩	15	19.5	25.5	31.5	36.0
(N) $X_2$ kg/亩	0	5.8	13.8	21.8	27.6
( $P_2O_5$ ) $X_3$ kg/亩	0	2.9	6.9	10.9	13.8

表3 试验田产量结果

处理	$X_1$ (播量)	$X_2$ (N)	$X_3$ ( $P_2O_5$ )	$Y_1$ (1990年) (kg)	$Y_2$ (1991年) (kg)
1	1	1	1	466.67	481.75
2	1	1	-1	300.00	391.42
3	1	-1	1	373.34	417.23
4	1	-1	-1	333.34	408.63
5	-1	1	1	460.00	640.90
6	-1	1	-1	260.00	473.14
7	-1	-1	1	386.65	443.04
8	-1	-1	-1	293.34	438.73
9	1.682	0	0	373.34	466.69
10	-1.682	0	0	346.32	481.75
11	0	1.682	0	360.00	490.35
12	0	-1.682	0	266.67	318.30
13	0	0	1.682	453.34	560.46
14	0	0	-1.682	236.67	438.73
15	0	0	0	386.67	479.60
16	0	0	0	353.00	490.35
17	0	0	0	366.67	434.43
18	0	0	0	373.34	473.14
19	0	0	0	366.67	490.35
20	0	0	0	373.34	483.04

本次三因素二次通用旋转设计的结构矩阵及计算过程因国内多有报道[1], 本文在此从略。以播量、N、 $P_2O_5$ 为决策变量, 以小麦产量为目标函数, 求出回归方程的各项系数(见表4)。

表4 回归方程系数显著性检验

回 归 项	1990年系数	1991年系数
$B_0$	368.897	474.584
$B_1$	8.699	-23.583
$B_2$	18.819	41.664
$B_3$	63.299	34.838
$B_{12}$	2.498	-23.120
$B_{13}$	-10.831	-9.143
$B_{23}$	29.169	30.648
$B_{11}$	1.049	0.476
$B_{22}$	-15.386	-24.232
$B_{33}$	-4.192	9.446
$F_1$	$F_{0.05} < 6.4037 < F_{0.01}$	$3.6144 < F_{0.05}$
$F_2$	$64.0354 > F_{0.01}$	$17.1838 > F_{0.01}$

由此得出回归方程为:

$$\hat{y}_{90} = 368.897 + 8.699x_1 + 18.819x_2 + 63.299x_3 + 2.498x_1x_2 - 10.831x_1x_3 + 29.169x_2x_3 + 1.049x_1^2 - 15.386x_2^2 - 4.192x_3^2 \quad (1)$$

$$\hat{y}_{91} = 474.584 - 23.588x_1 + 41.664x_2 + 34.838x_3 - 23.12x_1x_2 - 9.143x_1x_3 + 30.648x_2x_3 + 0.476x_1^2 - 24.232x_2^2 + 9.446x_3^2 \quad (2)$$

对两个方程进行 $F_1$ 、失拟均方/误差均方、 $F_2$ 和回归均方/剩余均方的显著性检验, 两个方程的 $F_2$ 均达到了极显著水平, 这说明了回归方程 $\hat{y}$ 是准确可靠的。

## 分析与讨论

### 一、模型的优化和解析

从表1看出, 两年试验地的土壤肥力是不同的。1991年试验地的土壤肥力高于1990年, 主要表现在有效养分上。总的属于缺氮、少磷, 这 and 全国化肥网普查的结果是一致的。现以亩产 $\geq 475\text{kg}$ ,  $\geq 500\text{kg}$ ,  $\geq 600\text{kg}$ 为目标产量, 采用步长为0.4205对(1)式进行计算机寻优( $9^3 = 729$ ), 结果见表5、6、7。

由表5、6、7可知, 河套灌区春小麦高产栽培的优化农艺措施是, 目标产量475~500 kg时, 亩播量22~24 kg, 亩施氮18~20 kg, 亩施磷9~10 kg; 目标产量500~600 kg时, 亩播量21~23 kg, 亩施氮20~21 kg, 亩施磷10~11 kg; 目标产量大于600 kg时, 亩播量18~20 kg, 亩施氮21~24 kg, 亩施磷11~13 kg。

表5 每亩产量为475~500kg的农艺措施

编 码	$x_1$ (播量)		$x_2$ (N)		$x_3$ ( $P_2O_5$ )	
	次 数	频 率	次 数	频 率	次 数	频 率
-1.682	45	0.1875	0	0	0	0
-1.2615	39	0.1625	0	0	3	0.0125
-0.841	36	0.1500	4	0.0167	10	0.0417
-0.4205	31	0.1292	23	0.0958	18	0.0750
0	26	0.1083	38	0.1583	24	0.1000
0.4205	22	0.0917	45	0.1875	35	0.1458
0.841	18	0.0750	46	0.1917	43	0.1792
1.2615	14	0.0583	44	0.1833	51	0.2125
1.682	9	0.0375	40	0.1667	56	0.2333
	240	1	240	1	240	1
$\bar{x}$	-0.4626		0.6974		0.8059	
$S_{\bar{x}}$	0.0636		0.0445		0.0476	
95%的置信区间 农艺措施	-0.5873~-0.3379 22.0~23.5 (kg/亩)		0.6101~0.7846 18.7~20.1 (kg/亩)		0.7126~0.8992 9.8~10.5 (kg/亩)	

表6 每亩产量500~600kg时的农艺措施

编 码	$x_1$ (播量)		$x_2$ (N)		$x_3$ ( $P_2O_5$ )	
	次 数	频 率	次 数	频 率	次 数	频 率
-1.682	35	0.1944	0	0	0	0
-1.2615	32	0.1778	0	0	0	0
-0.841	27	0.1500	0	0	3	0.0167
-0.4205	26	0.1444	12	0.0667	9	0.0500
0	20	0.0833	26	0.1444	18	0.1000
0.4205	15	0.0667	34	0.1889	24	0.1333
0.841	12	0.0667	37	0.2056	33	0.1833
1.2615	9	0.0500	36	0.2000	43	0.2389
1.682	4	0.0222	35	0.1944	50	0.2778
	180	1	180	1	180	1
$\bar{x}$	-0.5466		0.8036		0.9487	
$S_{\bar{x}}$	0.0696		0.0479		0.0499	
95%的置信区间 农艺措施	-0.6830~-0.4102 21.4~23.0 (kg/亩)		0.7097~0.8975 20.18~20.98 (kg/亩)		0.8459~1.0415 10.3~11.1 (kg/亩)	

表7 每亩产量 $\geq 600$ kg时的农艺措施

编 码	$x_1$ (播量)		$x_2$ (N)		$x_3$ ( $P_2O_5$ )	
	次 数	频 率	次 数	频 率	次 数	频 率
-1.682	15	0.3125	0	0	0	0
-1.2615	12	0.2500	0	0	0	0
-0.841	9	0.1875	0	0	0	0
-0.4205	7	0.1458	0	0	0	0
0	3	0.0625	2	0.0417	0	0
0.4205	2	0.0417	7	0.1458	2	0.0417
0.841	0	0	11	0.2292	9	0.1875
1.2615	0	0	14	0.2917	14	0.2917
1.682	0	0	14	0.2917	23	0.4792
	48	1	48	1	48	1
$\bar{x}$	-1.042		1.1127		1.3492	
$S_{\bar{x}}$	0.0868		0.0706		0.0539	
95%的置信区间 农艺措施	-1.2165~-0.8676 18.2~20.3 (kg/亩)		0.9705~1.2546 21.6~23.8 (kg/亩)		1.2408~1.4575 11.9~12.7 (kg/亩)	

我们以表 5、6、7 中播量、氮和磷的下限指标来作图 (见图 1—a, b, c), 可以明显地看出, 随着目标产量的提高, 最优播量呈下降的趋势, 也就是说目标产量和密度之间为负相关关系, 在小麦的高产栽培中尤其如此。而氮和磷的施用恰恰相反, 随着目标产量的提高, 最优施氮和施磷量不断增加, 这反映了亩产量和施氮、施磷及密度之间的关系, 即在河套灌区的春小麦高产栽培中, 应采取增氮、增磷和适当减低密度, 以发挥小麦的个体增产潜力。这是夺取小麦高产稳产的新途径。

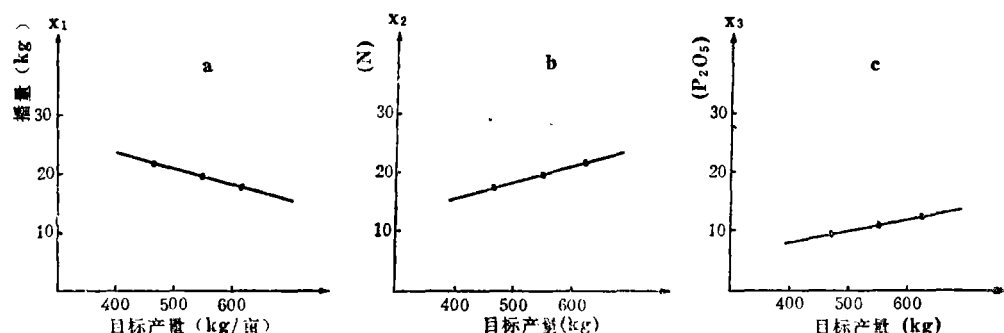


图1 目标产量与三因素的关系

## 二、主因素效应分析

对回归方程 (1) 和 (2) 的右端进行正交转换, 由计算机程序得出特征值如下:

	$\hat{y}$	正 交 变 换	特 征 值
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
方程 (1)	-0.5031	-25.9760	8.034
方程 (2)	-1.0070	-32.7840	19.481

各因素对小麦产量的影响, 分别是用特征值的绝对值的大小进行排列。由上可知, 两年试验的结果都表明了主因素的效应是  $x_2 > x_3 > x_1$ , 即氮 > 磷 > 播量。所以, 河套灌区春小麦高产栽培最主要的因素是氮和磷, 在增施氮肥和磷肥的前提下, 来调节密度。从我们的试验结果可知, 在土壤肥力较高的条件下, 高氮高磷施肥水平下获得高产的密度恰恰是低的。

## 三、单因素产量效应分析

由于试验是在正交旋转设计的基础上进行, 所以模型中各项效应不仅线性可知, 且各项偏回归系数彼此独立, 因而能用模型来分析因子的独立效应和交互效应。将小麦高产栽培模型 (1) 采用降维法分析, 固定两因子的取值水平, 便可求出另一自变量的偏回归子模型, 以考查另一个因子取不同水平值的变化规律, 这恰好相当于特定条件下的单因子试验。现分别将两因子固定在一1.682、0、1.682水平上采用降维法求出  $x$  的一元二次回归子模型:

① 令 $x_2 = x_3 = -1.682$	$\hat{y}_1 = 188.729 + 22.716x_1 + 1.049x_1^2$
$x_2 = x_3 = 0$	$\hat{y}_1 = 368.897 + 8.699x_1 + 1.049x_1^2$
$x_2 = x_3 = 1.682$	$\hat{y}_1 = 479.604 - 5.318x_1 + 1.049x_1^2$
② 令 $x_1 = x_3 = -1.682$	$\hat{y}_2 = 230.993 - 33.444x_2 - 15.386x_2^2$
$x_1 = x_3 = 0$	$\hat{y}_2 = 368.897 + 18.819x_2 - 15.386x_2^2$
$x_1 = x_3 = 1.682$	$\hat{y}_2 = 473.194 + 71.084x_2 - 15.386x_2^2$
③ 令 $x_2 = x_1 = -1.682$	$\hat{y}_3 = 289.116 + 23.455x_3 - 4.192x_3^2$
$x_2 = x_1 = 0$	$\hat{y}_3 = 368.897 + 63.299x_3 - 4.192x_3^2$
$x_2 = x_1 = 1.682$	$\hat{y}_3 = 381.689 + 94.144x_3 - 4.192x_3^2$

将各因素的不同水平值分别代入导出的一元二次回归子模型, 得出各因素在不同水平值的理论产量(如图2-a, b, c)。其中图2-a描述了产量与播量的关系, 在低氮低磷的水平下, 产量主要受播量的影响, 产量随播量的增加而增加, 氮、磷施用接近中高水平时, 仍保持这一趋势; 在高氮高磷情况下, 产量随着播量的增加而呈递减的趋势。图2-b描述了产量与施氮的关系, 在低播量低磷的水平下, 随着施氮量的增加, 产量锐减; 在高播量高磷水平下, 随着氮的增加, 产量呈增加趋势。图2-c描述了产量与施磷的关系, 不论在低播量低氮, 或高播量高氮的情况下, 产量随着磷的增加而呈上升趋势。

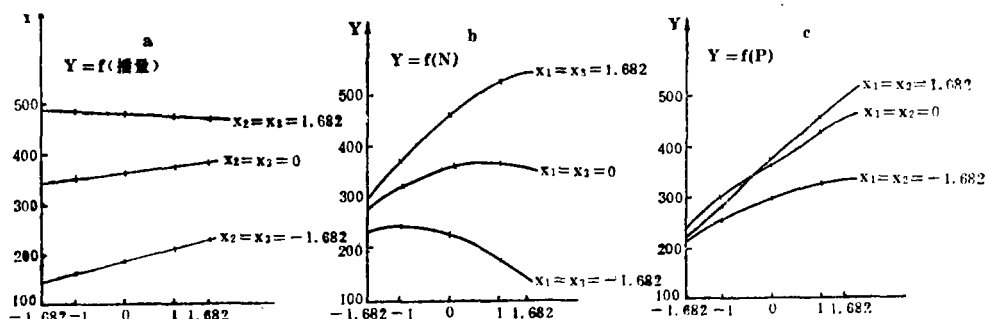


图2 三因素在不同水平值时的理论产量

经上分析可以看出, 类似试验地土壤肥力的麦田, 小麦高产栽培必须使氮磷的施用达一定的水平, 在这一水平之上再求氮磷的适宜配比。在高磷高氮的情况下, 采用精量播种、稀植, 增加分蘖是获得高产的一大趋势。

#### 四、边际产量及其效应分析

本试验在因素编码  $-1.682 < x_1, x_2, x_3 < 1.682$  的约束条件下, 对(1)式用计算机寻优, 找出小麦的最高产量为  $546.1\text{kg}/\text{亩}$ , 相应的编码水平值为  $x_1 = -1.682$ ,  $x_2 = 1.682$ ,  $x_3 = 1.682$ , 相应的农艺措施为  $x_1 = 15.0\text{kg}/\text{亩}$ ,  $x_2 = 27.6\text{kg}/\text{亩}$ ,  $x_3 = 13.8\text{kg}/\text{亩}$ 。以上仅是理论最优边际效应, 只能表明潜力, 但我们从中可以看出, 在播量、氮、磷三因素中, 出现最高

产量的组合是低播量、高氮、高磷，这与单因素分析的结果是一致的。

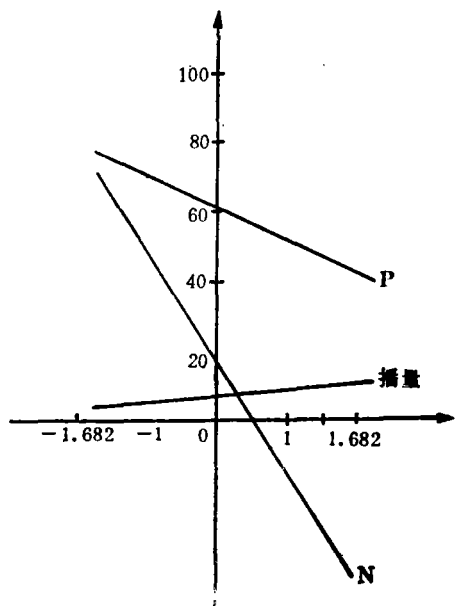


图3 边际产量及其效应

另外，对回归方程(1)在其他二因素为0水平时，对另一个因素分别求一阶偏导有：

$$y'_1 = 8.699 + 2.098x_1$$

$$y'_2 = 18.819 - 30.772x_2$$

$$y'_3 = 63.299 - 8.384x_3$$

然后把因素编码水平值代入以上3式作图，进一步分析边际效应。从图3可以看出，①氮的直线最陡，次之为磷，播量最差，这与因子主效应的分析是一致的。②在本试验土壤肥力条件下，播量的边际产量缓慢上升，但增产幅度不大。③氮磷的增产呈负效应，这是符合报酬递减规律的。

### 五、氮、磷的交互效应

从回归方程(1)知道施氮量与施磷量的交互效应最为明显，因而把 $x_1$ 固定在0水平上得回归子模型为

$$\hat{y} = 368.897 + 18.819x_2 + 63.299x_3 + 29.169x_2x_3 - 15.386x_2^2 - 4.192x_3^2$$

把各因素编码水平值代入上式，求得各水平值的产量并作交互作用分析(表8)。

从表8可以看出，氮磷交互作用最明显的高氮高磷区，其氮磷比为1:0.5~1:1，小麦亩产量大于400kg。从产量分析，它们交互效应的排列顺序是高氮高磷区>高氮中磷区>低氮高磷区>高氮低磷区>低氮低磷区。在不同的施氮水平上，增加磷的用量，小麦产量的变异系数小于在不同的施磷水平上，增加氮用量的小麦产量变异系数。这说明

以氮为主，增施磷肥，氮磷合理配合是内蒙古河套灌区小麦高产稳产的主要措施。

## 结 论

在本试验中，小麦高产栽培氮、磷和密度三主因素的效应依次是氮>磷>密度。小麦高产必须是在高氮、高磷的水平上才能获得，在这一基础上，氮磷配比为1:0.5~1:1。

小麦亩产大于500kg的优化农艺措施是：亩播量18~23kg，亩施氮20~23kg，亩施磷10

表8 氮、磷交互作用

		P 肥 用 量 ( $X_3$ )					CV(%)
		-1.682	-1	0	1	1.682	
N 肥 用 量 ( $X_2$ )	-1.682	低N低P区		低 N 高 P 区		9.72	
	-1			300kg ≤ Y < 400kg		14.47	
	0	Y < 300kg		中 P 区	高N高P区	20.24	
	1				Y > 400kg	30.83	
	1.682	高N低P区				53.37	
CV (%)		36.33	10.24	9.38	17.09	21.82	

Y = 亩产量

~13kg。春小麦稀植高产栽培可望成为内蒙古河套灌区小麦高产稳产的新途径。

### 参 考 文 献

- 1 陶勤南. 化肥的最小施肥量与最大经济效益. 见: 中国土壤学农业化学专业会议论文选集. 北京: 农业出版社, 1983
- 2 杨守春. 黄淮海平原小麦施肥模式及最佳氮磷施用量的研究. 见: 国际平衡施肥学术讨论会议文集. 北京: 农业出版社, 1989
- 3 金绍龄. 甘肃河西灌区春小麦的平衡施肥. 见: 国际平衡施肥学术讨论会文集. 北京: 农业出版社, 1989

## A Study on the Optimized Agronomical Practice and Mathematical Model for High-yielding Cultivation of Spring Wheat in Hetao Irrigated Area of Inner Mongolia

An Yulin      Li Yan      Du Gangqiang      Zheng Wenzhe

(Inner Mongolia Academy of Agricultural Science, Huhhot 010030)

Zhang Yugui      Ma Zhonglin      Zhou Hong

(Bameng Agricultural Science Institute, Shanba)

**Abstract** A 3-factor and 2-degree common rotary design was used to analyse and simulate the main agronomical practice for high-yielding wheat in Hetao irrigated area of Inner Mongolia, and it was determined that the optimal sowing amount of seeds was 18—23 kg/mu, while N and  $P_2O_5$  were applied at the rates of 20—23 kg and 10—13 kg/mu respectively. The correlation among yield, application of N and P and sowing amount was determined for high-yielding spring wheat cultivation. It was found that density tended to decrease with higher target yield while more N and P fertilizers should be applied.

**Key words:** Spring wheat; High-yielding cultivation practice; Mathematical model