

宁南干旱山区春小麦氮、磷施肥模式研究

党增春 李鼎新 刘耀宏 马国忠

中国科学院水利部西北水土保持所·陕西杨陵·712100)(宁夏回族自治区固原基地办·固原县·756000)

提 要

该文应用二次饱和D最优设计,研究了试区3种不同立地农田生态系统春小麦N、P施肥效应方程,建立起不同适宜性的施肥数学模型,分析研究了N、P肥的主效应和交互效应,计算出不同农田的最佳施肥量。以低位梯田为例,计算出不同产量下N、P肥的用量及最适配比。

关键词: 农田生态系统 施肥模型 最佳用量

Study on Fertilizer Model of Nitrogen and Phosphorous for Spring Wheat in Arid Hilly Area of South NingXia

Dang Zengchun Li Dingxin Liu Yaohong

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100)

Ma Gouzhang

(office of Guyuan agriculture modernization of Ningxia, Guyuan, 756000)

Abstract

Based on the field test of saturated D—optimal designs with a Square, This paper deals with the response equation of N and P fertilizer, on Spring Whest in three different yild ecosystem in Shanghuang experimental station. The mathmatic model of fertilization with different adaptability has been established, The main effect and mutual effects of N and P fertilizer have been analized and the optimum of fertilizer required has been caculated according to the model. fertilizer amount applied and the optimum ratio of N and P of crops grown in low terrace have been caculated as an example.

Key Wrods field ecosystem fertilization model optimum amount of fertilization

春小麦是宁南山区夏粮主要作物之一。产量的高低制约着全年粮食的总产水平。因此,春小麦的潜势开发在农业中占有显著的地位。

宁南山区有山、川和塬地各种农田生态系统。各系统的结构和功能各异,对肥料的效应不同。试区建点后,虽然搞了一些肥料和施肥技术方面的试验。但把试区联结起来作为一个生态系统较全面的研究,建立高产模式报道的甚少。为此,从1991至1994年在固原上黄试区N、P肥调研的基础上,采用二次饱和D最优设计,对不同农田N、P肥的最佳用量和配比进行了研究。以便从宏

观上调控系统内的 N、P 肥的流向,合理搭配,为合理施肥提供依据。现将 4 年来的试验结果总结如下。

一、设计方案和方法

上黄试区位于黄土高原西部丘陵区。年平均气温 6.7℃,≥10℃的积温 2 573℃,全年降水量为 478.2mm,无霜期 152 天。气候属温凉半干旱易旱地区,早春气温低、多旱。

试验分别布设在梯田、塬地和川台地农田上,土壤为黑垆土和绵黄土。土壤性质见表 1。供试作物为春小麦,品种为陇春 10 号,小区面积 0.037 亩,重复 3 次,随机排列。

表 1 土壤基本性质

土壤	土地类型	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	有效钾 (mg/kg)
黑垆土	川台地	11.4	0.787	1.57	67.5	7.1	312.0
黑垆土	塬地	11.2	0.735	1.35	59.4	6.4	168.3
绵黄土	低位梯田	7.1	0.484	1.31	37.4	5.7	110.3

试验方案如下:

1. 氮、磷肥肥效试验按常规设计。氮肥试验设在川台地农田上。处理设不施(ck)、施 N34.5kg/hm²、N69.0kg/hm²、N138.0kg/hm²、N172.5kg/hm²,5 个处理。

磷肥试验设在塬地上。处理设不施(ck)、P18kg/hm²、P36.0kg/hm²、P54.0kg/hm²、P72.0kg/hm²、P90.0kg/hm²,6 个处理。

2. 氮、磷用量及配比试验系采用二次饱和 D 最优设计方案。分别按不同的立地条件设置。

试验因子、零水平、变化区间和编码水平及肥料用量见表 2、表 3、表 4。

表 2 氮、磷肥上下限水平表

因素	川地农田用量(kg/hm ²)		级差	塬地及低位梯田农田用量(kg/hm ²)		级差
	上限	下限		上限	下限	
N(x ₁)	187.5	0	93.75	10.0	0	75.0
P ₂ O ₅ (x ₂)	105.0	0	52.50	75.0	0	37.5

表 3 编码水平对应的 N、P 肥用量

编码值	川地肥料用量(kg/hm ²)		塬地及低位梯田农田肥料用量(kg/hm ²)	
	N(x ₁)	P ₂ O ₅ (x ₂)	N(x ₁)	P ₂ O ₅ (x ₂)
1	187.5	105.0	150.0	75.0
0.3944	130.6	73.2	104.6	52.4
-0.1315	81.5	45.6	65.1	32.6
-1	0	0	0	0

表 4 试验施肥方案

处理号	编码值		川地肥料用量(kg/hm ²)		塬地和低位梯田农田肥料用量(kg/hm ²)	
			N(x ₁)	P ₂ O ₅ (x ₂)	N(x ₁)	P ₂ O ₅ (x ₂)
1	-1	-1	0	0	0	0
2	1	-1	187.5	0	150.0	0
3	-1	1	0	105.0	0	75.0
4	-0.1315	-0.1315	81.5	45.6	65.1	32.6
5	1	0.3944	187.5	73.2	150.0	52.4
6	0.3944	1	130.6	105.0	104.6	75.0

氮肥为尿素(含 N46%),磷肥为普钙(含 P₂O₅11.73%),肥料作基肥秋季一次深施。翌年 3 月 10 日播种,7 月 10 日收获。

二、结果与分析

(一) 氮肥效应

在本试验中,氮肥在川台地对春小麦有显著的增产效应。在 34.5~69kg/hm² 用量范围内,春小麦的产量效应随氮肥增加呈上升的趋势,超过 69kg/hm² 的 N,则产量呈缓慢的下降。施 N 较对照分别增产 28.57%~94.00%。

根据效应产量建立的一元二次方程式 $\hat{Y} = 1175.25 + 20.1180x - 0.2749x^2$,经 F 值检验 $F_{0.05} = 9.55 < 29.90$,达显著水平。

从方程中求 x 的偏导数,川台地春小麦的最高产量的施 N 量为 117.0kg/hm²。

最佳施肥量是边际产量等于边际成本时的施肥量,受边际产量、肥料和产品价格的制约。因此,有 $\frac{d\hat{y}}{dx_1} = \frac{Cx_1}{py} \cdot \frac{d\hat{y}}{dx_2} = \frac{cx_2}{py}$ 方程, $\frac{d\hat{y}}{dx_1} \cdot \frac{d\hat{y}}{dx_2}$ 是 N、P 肥的边际产量。Cx₁,Cx₂ 是肥料的价格,Py 是产品的价格(小麦价格 0.67 元/kg,N 肥的价格 1.63 元/kg。)代入方程求得春小麦最佳施肥量为 102kg/hm²。

(二) 磷肥效应

在本试验中,1991 年春旱,春小麦返青拔节期对磷的生物效应不明显。直到 5 月 24 日下了一次透雨(40.9mm),磷肥效应逐渐显著,显示磷肥的抗旱作用。生物学记载显示,无论是株高、小穗数、穗粒数、千粒重,或是叶面积皆有随磷肥的增加而相应的增高、增重。尤其是粒重和产量。在 18~72kg/hm² 范围内,磷肥增产效应明显,分别增产 32.25%~80.64%,高于 72kg/hm² 时,则效应下降。

磷肥试验建立的一元二次方程式为 $\hat{Y} = 941.79 + 15.8631x - 0.0810x^2$,经 F 值检验, $F_{0.01}^{0.05} \frac{9.55}{30.82} < 178.21$ 。达极显著水平。

对上面方程求偏导数,求得塬台地春小麦最高产量的施磷量为 102.45kg/hm²。

从方程求最佳产量(春小麦价格 0.67 元/kg,磷肥 P₂O₅ 为 2.83 元/kg)时的施磷量为 73.65kg/hm²。

(三) 不同立地农田生态系统 N、P 二次饱和 D 最优设计试验

结果见表 5、表 6。

表 5 不同立地农田系统春小麦的产量情况

处理号	试验水平编码		产 量 (kg/hm ²)		
	N(x ₁)	P ₂ O ₅ (x ₂)	低位梯田	塬地	川台地
1	-1	-1	1095.15	1261.5	2139.0
2	1	-1	1515.15	1728.0	2430.15
3	-1	1	1440.30	1620.0	2289.0
4	-0.1315	-0.1315	1741.50	1926.0	3058.5
5	1	0.3944	1878.0	2266.5	3180.0
6	0.3944	1	1864.65	2317.5	2949.0

二次回归饱和 D 最优设计的数学模型为

$$Y = B_0 + \sum_{j=1}^p B_j x_j + \sum_{i < j} B_{ij} x_i x_j$$

表 6 低位梯田春小麦生物经济性状资料

处理	株高 (cm)	叶面积 (cm)	秆重 (g/株)	穗重 (g/株)	穗长 (cm)	小穗数 (个)	穗粒重 (g/株)	产量 (kg/hm ²)
1	75.65	157.34x2	0.68	0.83	5.85	8.6	0.53	1095.15
2	77.35	248.33x2	0.63	1.13	6.42	9.75	0.76	1515.15
3	76.32	172.6x2	0.70	1.00	6.05	7.26	0.78	1440.30
4	78.33	219.9x2	0.74	1.10	6.47	10.1	0.75	1741.5
5	87.2	288.5x2	0.78	1.18	6.72	10.57	0.84	1878.0
6	86.2	281.24x2	0.76	1.16	6.53	10.40	0.82	1864.65

用 PC·1500 计算机,把试验结果输入二次饱和 D 最优设计的结构矩阵中进行运算。分别建立不同立地农田生态系统春小麦高产施肥模式如下。

(1)低位梯田春小麦高产施肥回归方程为:

$$\hat{Y} = 1792.97 + 224.1479x_1 + 163.0829x_2 - 174.3175x_1^2 - 151.6375x_2^2 - 1.3350x_1x_2 \quad (\text{模型}_1)$$

(2)塬地春小麦高产施肥回归方程为:

$$\hat{Y} = 1992.17 + 307.0008x_1 + 254.4488x_2 - 168.5080x_1^2 - 77.5730x_2^2 + 80.4750x_1x_2 \quad (\text{模型}_2)$$

(3)川台地春小麦高产施肥回归方程为:

$$\hat{Y} = 3124.55 + 234.1815x_1 + 160.3365x_2 - 229.7775x_1^2 - 450.4575x_2^2 + 95.0450x_1x_2 \quad (\text{模型}_3)$$

模型 1、2、3 计算的理论值 \hat{Y} 与实测值之间进行拟合效果作相关值检验,分别为 $r = +0.9832$, $r = +0.9569$, $r = +0.9482$, 达极显著水平,说明曲线拟合较好,建立的模型可以用来预测。春小麦的产量又与其农艺生物经济性状有着密切的关系。现对其中的低位梯田春小麦主要的农艺生物经济性状进行运算,建立的另一组模型如下:

(1)株高:
$$\hat{Y} = 79.13 + 3.9014x_1 + 3.4304x_2 + 0.2842x_1^2 + 0.5306x_2^2 + 3.1608x_1x_2 \quad (\text{模型 } a)$$

(2)小穗数:
$$\hat{Y} = 10.27 + 1.0671x_1 + 0.1828x_2 - 1.1083x_1^2 - 0.0625x_2^2 + 2.5842x_1x_2 \quad (\text{模型 } b)$$

(3)穗粒重:
$$\hat{Y} = 0.82 + 0.0596x_1 + 0.0617x_2 - 0.0553x_1^2 - 0.0487x_2^2 - 0.0554x_1x_2 \quad (\text{模型 } c)$$

(四)模型的应用

1. 主因子效应。对建立的模型 1、2、3 中主因子效应采用“降维法”进行分析。将两维因子中某一因子取值,其它因子取零水平,使之变成单维因子,以便分析取值因子的作用。

从模型 1、2、3 中 N、P 二因素对产量效应的主方程中可以导出三组偏回归子模式方程:

(1)低位梯田:氮(N)肥(x_1),磷(P_2O_5)肥(x_2),

$$\hat{Y}_1(x_1) = 1792.97 + 224.1479x_1$$

$$\hat{Y}_1(x_2) = 1792.97 + 163.0829x_2$$

(2)塬地:氮肥(x_1),磷肥(x_2),

$$\hat{Y}_2(x_2) = 1992.17 + 307.0008x_1$$

$$\hat{Y}_2(x_2) = 1992.17 + 254.448x_2$$

(3) 川台地: 氮肥(x_1), 磷肥(x_2),

$$\hat{Y}_3(x_1) = 3124.55 + 234.1815x_1$$

$$\hat{Y}_3(x_2) = 3124.55 + 160.3365x_2$$

从上面三种农田生态系统建立的春小麦丰产施肥模型对主因子效应进行降维处理, 通过偏回归系数绝对值的比较可看出, 在 $-1.682 \leq x_1 \leq 1.682$ 范围内, 氮肥、磷肥对产量影响的排序为氮肥 > 磷肥。排序结果与土壤养分的分析结果一致。

2. 氮磷肥的交互增产效应。通过试验结果, 建立的模型 1、2、3 的 N、P 效应方程是两种肥料对产量的效应方程。因此, 它的效应是一个立体效应曲面。为了直观起见, 把 N、P 肥的不同用量转变为相应的水平编码值, 并使其中的一个因子保持一定水平, 代入模型中, 求出另一因子不同水平编码的理论产量。这样就使二元二次方程式变成为一元二次方程。其公式为 $\hat{Y} = c + mx + bx^2$ 。所计算的理论产量值, 可以分别绘出两种肥料的投产线图。现以模型 1 为例, 计算结果见表 7。

表 7 低位梯田方程的 \hat{Y} 的理论估算值 (kg/hm^2)

x_2	P_2O_5 (kg/hm^2)	x_1					
		-0.4	0.2	0.8	1.4	2.0	2.4
		N (kg/hm^2)					
		45	90	135	180	225	255
-0.2	30	1635	1785	1815	1725	1515	1305
0.6	60	1680	1875	1905	1815	1605	1345
1.4	90	1605	1770	1800	1710	1500	1290
2.2	120	1335	1485	1515	1440	1230	1020

根据表 7 资料, 绘制的投产曲线如图 1(a)、图 1(b)。

从图 1(a)、图 1(b) 看出, N 与 P 对春小麦的交互作用。在不同氮肥水平下, 不同施磷量表现在低 N 水平呈增加, 随施 N 的增加则 P 逐渐下降。在不同的磷肥基础上, N 肥效果以 $60\text{kg}/\text{hm}^2$, P 增产作用最大;

在不同的 N 肥基础上, 磷肥效果以 $90 \sim 135\text{kg}/\text{hm}^2$, N 增产作用最高。从图 1(a) 中还看出, 当 N 用量超过 $135\text{kg}/\text{hm}^2$ 或 P_2O_5 超过 $60\text{kg}/\text{hm}^2$ 时, 则产量效应呈现明显下滑, 显然是与 1991 年的早春干旱有关。所以说, 在早春干旱期, 施 N 或 P 肥要严格控制, 否则, 会导致减产。

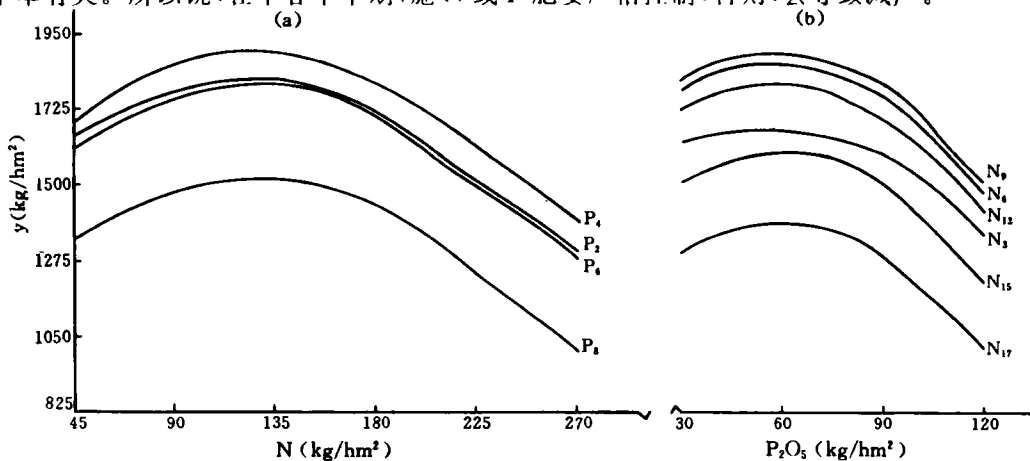


图 1 (1) 投入—产出曲线

图 1-(2) 投入—产出曲线

3. 氮、磷肥对春小麦生物经济性状的影响。两种肥料的不同用量影响到产量的高低, 而产量又是通过叶面积、小穗数、穗长、穗粒重影响到产量的。以低位梯田春小麦的田间调查资料为例,

建立的二元回归模型 a、b、c,用直观图解研究 N、P 与其各生物经济性状间的关系(图 2- (1)、图 2- (2)、图 3- (1)、图 3- (2))。

小穗数与 N、P 肥的关系十分密切。从模型看,主因子效应子模式 $b_{(1)}$ 、 $b_{(2)}$ 偏回归系数的绝对值是氮肥 > 磷肥。从 N 和 P 的交互作用看,在低氮条件,随磷肥用量的增加而减少,但是随着 N 肥的增加小穗数急剧增加,见图 2₍₁₎。在不同磷肥用量的条件下,N 肥的效果以 120kg/hm²,P 的增产作用最大;在不同 N 肥水平下,在低 N 条件下,磷肥的效果以 90kg/hm²,N 肥增加最多,随着 N 肥的增加,磷肥的效果以 225kg/hm²,N 肥增产最高图 2- (1)。

穗粒重直接影响到产量的高低。穗粒重在低 N 条件下,随 P 肥用量的增加而增加,交互作用显著,随 N、P 肥的增加,穗粒重呈下降趋势。在低磷水平下,P 肥的效果以每 1hm²90kg,N 肥增产最高。尔后,再增加 N 肥,则随着 P 肥的增加穗粒重呈下降趋势图 3- (1)、图 3- (2)。说明在干旱情况下,土壤水分供应不足时,提高 N 或 P 肥的用量不仅不会增加穗粒重,反而会导致穗粒重减轻,影响到春小麦的产量。

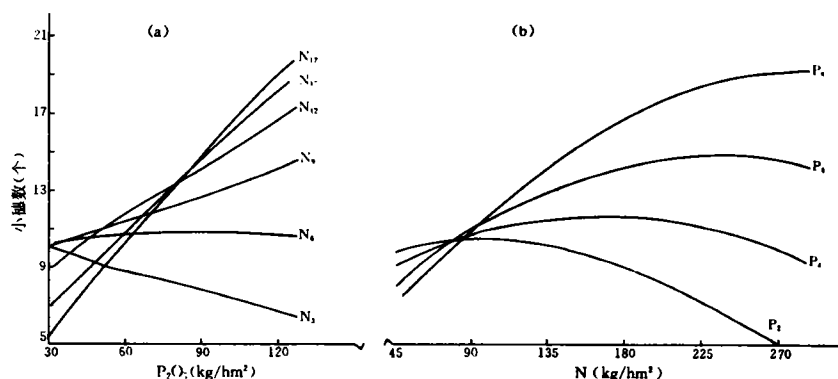


图 2- (1)小穗数与施肥量的关系

图 2- (2)小穗数与施肥量的关系

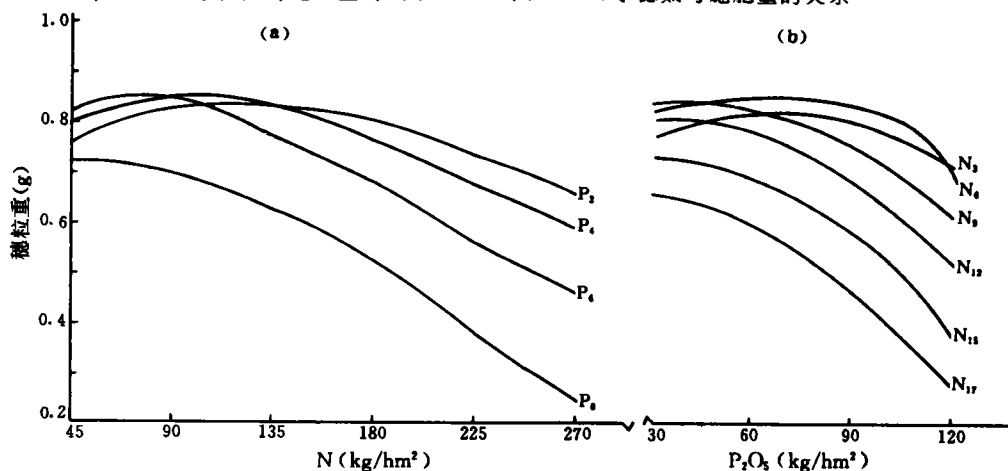


图 3- (1)穗粒重与施肥量的关系

图 3- (2)穗粒重与施肥量的关系

产量是各个因素对肥料的综合反映,一般说,当施肥水平不高时,各因素和产量效应随施用量的增加上升的较快。如果达到最高产量点前,施肥量继续增加,则各要素有增有减,导致产量增加缓慢,若继续提高施肥量,各因素增加的量难以弥补减少的量时,则产量下降,效益低。1992~1994 年的试验结果符合这一规律。这里不再赘叙。

4. 施肥量的确定。

低位梯田生态系统: 水土流失型, 土壤有效贮水 300 多 mm, 土壤 N、P 亏缺, 农业生产水平低。

①最高产量的施肥方案。根据模式 1, 求 x_1, x_2 的偏导数, 令其等于零, 解联立方程。最高产量为 1905.45kg/hm², 施肥方案, N 为 124.2kg/hm², P₂O₅ 为 58.95kg/hm²。

②最佳产量的施肥方案。农业生产不仅是为了生产更多的粮食, 而且要获得最大的经济效益。根据模式, (小麦价格 0.67 元/kg, 纯 N 为 1.74 元/kg, 纯磷为 2.83 元/kg, 代入,) 解联立方程。最佳产量为 1895.55kg/hm³, 施肥方案, N 为 115.6kg/hm³, P₂O₅ 为 50.7kg/hm²。

塬地生态系统: 保水保土型, 地形平坦, 农田生态环境较好, 土壤有效水 350~400mm, 土壤 N、P 养分亏缺, 农业生产不稳定。

①最高产量为 2 185.5kg/hm², 施肥方案, N 为 112.8kg/hm², P₂O₅ 为 66.75kg/hm²;

②最佳产量为 2 174kg/hm³, 施肥方案, N 为 112.65kg/hm³, P₂O₅ 为 56.25kg/hm³。

川台地农田生态系统: 集约经营型, 地形平坦, 生态环境较优, 农业生产水平较高。

①最高产量为 3 202.5kg/hm², N 为 147.9kg/hm², P₂O₅ 为 65.4kg/hm²;

②最佳产量为 3 198.45kg/hm², N 为 138.45kg/hm², P₂O₅ 为 61.05kg/hm²。

5. NP 肥合理配比。对方程求 x_1, x_2 的偏导数, 并令其等于零, 求联介, 得两条直线, 把这两种对应值在等产线图上标点, 并分别与最高产量点相连, 延长与等产线相交, 即得两条脊线。这两条脊线与横轴及纵轴相连形成的区就是合理施肥区(图 4)。

在合理施肥区, N、P 肥的不同配比, 均可以得到相同的产量。根据经济原则, 成本最低时的 N、P 肥用量即合理配比。应满足如下的条件:

$$\frac{d\hat{y}}{dx_1} \cdot CN = \frac{d\hat{y}}{dx_2} \cdot CP \quad \text{即: } \frac{dx_1}{dx_2} = \frac{CP}{CN}$$

$\frac{d\hat{y}}{dx_1}, \frac{d\hat{y}}{dx_2}$ 是 N、P 肥的边际产量, CN、CP 是 N、P 肥的价格。

当等产线上某点的边际代替率等于两种肥料价格比的倒数时, 此点即为一定产量水平下的最适施肥点和最适配比点。连结此点即得最适施肥量和最适配比线。

表 8 NP 肥最适配比

产量 (kg/hm ²)	N 最适用量 (kg/hm ²)	P ₂ O ₅ 最适用量 (kg/hm ²)	N/P
1575.0	82.5	6.0	1 : 0.07
1725.0	94.5	21.0	1 : 0.23
1875.0	111.0	45.5	1 : 0.41

不同产量时的最适施肥方案。结果见表 8。

从表 8 资料看出, 随着产量的增加, N、P 肥也随之增加该农田的地力水平为 1 095kg/hm², 要获得不同产量时 N 和 P 肥的最适用量和配比。塬台地和川台地亦可以根据模型 2、模型 3 计算

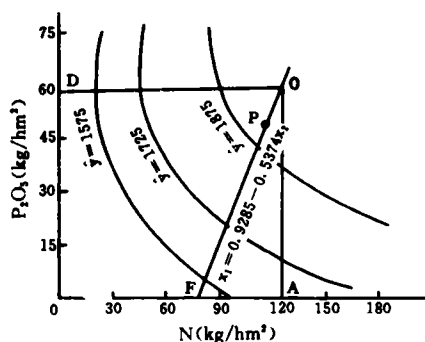


图 4 低位梯田春小麦 N、P 肥等产线及配比线

以模型 1 为例, 求出 N、P 肥的最适配比线为 $x_1 = 0.9283 - 0.5374x_2$ 。在此线上, 随施肥量的增加, 产量也随之增加, 经济收益也相应变化, 达到最高点时的施肥方案, 就是最适施肥量(图 4)。

从图 4 就可以找到低位梯田春小麦

出 N、P 肥的用量和最适配比施肥方案。

6. 不同立地农田生态系统最佳施肥的经济效益。统计结果见表 9。

表 9 不同立地农田最佳施肥的经济效益

农田类型	对照区产量 (kg/hm ²)	最佳产量 (kg/hm ²)	最适施肥量		化肥投资 (元/hm ²)	增 产		纯利投资	
			(N)	(P ₂ O ₅)		(kg/hm ²)	(元/hm ²)	(元/hm ²)	效益元/元)
低位梯田	1095.15	1895.5	115.6	50.7	331.9	800.4	536.3	204.40	0.62
塬地农田	1261.5	2174.8	112.6	56.3	342.8	913.3	611.9	269.10	0.79
川台地农田	2139.0	3198.5	138.5	61.0	398.4	1059.5	709.9	311.50	0.78

注: N1.63 元/kg, P₂O₅2.83 元/kg, 春小麦 0.67 元/kg。

从表 9 看出, 在低位梯田和塬地农田生态系统中, 依照模型 1、模型 2 计算的最佳理论产量与对照比较分别增产 73.08%、72.4%。粮食增加了, 但由于化肥价格上涨过猛, 农产品价格低, 投资效益低。川台地农田最佳产量为 3198.5kg, 较对照增产 49.5%, 但化肥投资增加, 投资效益不高。由此可知, 要加快农业的发展, 尽快的对农业生产资料和产品价格进行宏观调控。否则, 会影响农民的生产积极性。

三、结 语

三种农田生态系统的土壤属缺氮缺磷型。从试验结果看氮、磷肥单施和配合施用都可以提高春小麦的产量。从模型 1、2、3 子模式主效应因子看 N>P 建立的模型用数学语言表叙了这一特征。模型 1、2、3 分别适用于梯田、塬地和川台地三种农田。

根据不同立地农田建立的春小麦高产施肥模型。在拟定产量时, 可以计算出最适施肥量和最适配比, 作到计划用肥。如模型 1, 要达到 1875kg/hm² 产量水平, 需 N110.0kg/hm², P₂O₅45.15kg/hm², N:P=1:0.41。计算的 N、P 肥用量要依据气候, 土壤墒情进行调节。或分期施用。

参 考 文 献

- [1] 固原县综合考察队.《黄土高原典型地区宁夏固原县综合农业区划与应用》.银川:宁夏人民出版社.1983 年
- [2] 山仑等.宁南山区主要粮食作物生产力和水分利用的研究.《中国农业科学》,1988 年
- [3] 辛业全等.水土流失区合理深施肥料的增产效益.《水土保持通报》,1986 年,第 1 期
- [4] 李鼎新等.黄土高原区土壤中磷的状态和磷肥投放方案的刍议.《水土保持学报》,1992 年,第 4 期
- [5] 陈伦寿,李仁岗主编.《农田施肥原理与实践》.北京:农业出版社.1984 年