

# 旱地谷子高产栽培措施模型研究

姚克明 张喜文 宋殿珍 刘源湘

(山西省农业科学院谷子研究所, 长治 046011)

**摘 要** 1987~1988年在山西省屯留试点进行试验, 采用二次回归正交旋转组合设计, 对影响谷子产量形成的密度、播期、氮、磷和农家肥五项关键农艺措施进行了量化的综合研究, 初步确定了最佳农艺措施组合方案, 并利用产量反应模型研究了各项措施对产量形成的单独反应以及各项农艺措施间的互作效应。优化方案经1988和1989年的示范对比和小面积推广, 证明是切实可行的。

**关键词** 旱地 谷子 栽培措施 数学模型 产量

谷子是一种抗旱、耐瘠、丰产的粮草兼用作物, 在旱地粮食生产中占有重要地位。认真研究旱地谷子的丰产栽培技术体系, 使其具有科学性、定量性、规范性、预控性, 对于充分发挥谷子的优势, 改善生态环境, 增加粮食总产量, 改善膳食营养结构, 具有重要意义。

## 1 试验设计及实施

试验分高、中、低三种不同地力条件, 设在屯留县莲村基点。主要以氮肥 ( $x_1$ )、磷肥 ( $x_2$ )、密度 ( $x_3$ )、播期 ( $x_4$ )、农家肥 ( $x_5$ ) 为试验因子, 采用正交旋转组合设计方法, 于1987~1988年按同一设计方案, 共设置了8个试验 (其中有两个因提苗不佳, 虫害较重, 影响了密度, 故未作小区计产收获)。每个试验为36个小区, 按正交区组排列, 小区面积27m<sup>2</sup>。各因子和设计水平如表1。试验点1987年年降水量533.5mm, 1988年为560.4mm, 均接近历年平均值(546.3mm), 对谷子生育较为有利。1987年受早霜(9月25日)为害, 产量稍受影响。

表1 因素水平编码

因 素	零水平	间 距	设计水平及编码值				
			-2	-1	0	1	2
$x_1$ 氮肥 (纯N kg/亩)	7.5	3.75	0	3.75	7.5	11.25	15
$x_2$ 磷肥 ( $P_2O_5$ kg/亩)	5	2.5	0	2.5	5	7.5	10
$x_3$ 密度 (万株/亩)	3	1	1	2	3	4	5
$x_4$ 播期 (月-日)	05-09	12	04-15	04-27	05-09	05-21	06-02
$x_5$ 农家肥 (kg/亩)	6000	3000	0	3000	6000	9000	12000

供试品种晋谷14号,氮肥用尿素(美国产品),磷肥用过磷酸钙(太原磷肥厂产品),农家肥为当地土杂肥,均按设计要求于播前作底肥一次施入。播期和密度按设计要求进行。生育期间注意防治病虫害,及时间苗,定苗,中耕除草二次,培土一次,并按试验要求分别从各处理区定期定点取样,进行群体和个体调查,成熟及时收获,分区计产。

## 2 试验结果和产量模型的建立

各试验处理的子粒产量连同结构矩阵一并列于表2。将各试验处理的因子取值和子粒产量输入计算机,用回归正交旋转设计分析程序进行统计运算,获得不同地力条件下各产量模

表2 试验结构矩阵及产量结果

(单位: kg/亩)

试验号	因子 编 码 值					产 量 (1937)			产 量 (1983)		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	Y <sub>I</sub>	Y <sub>II</sub>	Y <sub>III</sub>	Y <sub>IV</sub>	Y <sub>V</sub>	Y <sub>VI</sub>
1	1	1	1	1	1	260.2	352.1	341.0	291.7	383.7	454.8
2	1	1	1	-1	-1	223.3	329.7	344.2	225.2	348.8	413.3
3	1	1	-1	1	-1	229.2	314.2	296.9	241.4	332.7	406.2
4	1	1	-1	-1	1	213.5	296.7	230.0	239.8	321.3	396.8
5	1	-1	1	1	-1	201.9	310.9	282.0	214.9	322.3	383.2
6	1	-1	1	-1	1	200.5	315.4	300.4	223.9	333.8	392.1
7	1	-1	-1	1	1	203.9	301.9	279.9	232.8	321.5	393.9
8	1	-1	-1	-1	-1	190.0	292.6	268.2	225.3	314.2	372.9
9	-1	1	1	1	-1	174.0	293.5	237.5	192.1	309.8	385.5
10	-1	1	1	-1	1	182.6	299.2	279.0	202.0	322.0	391.8
11	-1	1	-1	1	1	200.2	289.8	260.1	221.5	313.5	400.0
12	-1	1	-1	-1	-1	195.4	232.7	263.7	214.7	301.2	373.1
13	-1	-1	1	1	1	180.3	301.8	296.9	199.2	325.4	392.4
14	-1	-1	1	-1	-1	154.6	273.6	248.8	195.6	289.5	345.8
15	-1	-1	-1	1	-1	198.0	271.2	270.5	216.6	283.9	372.7
16	-1	-1	-1	-1	1	190.4	296.4	270.6	213.5	323.6	398.9
17	2	0	0	0	0	215.1	312.0	290.2	236.4	334.0	397.6
18	-2	0	0	0	0	152.1	260.7	236.5	182.5	286.6	359.3
19	0	2	0	0	0	251.2	347.4	333.6	257.4	357.9	423.0
20	0	-2	0	0	0	220.8	323.9	303.6	251.7	342.3	381.1
21	0	0	2	0	0	171.9	300.2	282.9	202.9	321.9	385.8
22	0	0	-2	0	0	184.9	267.5	253.1	225.2	296.0	370.2
23	0	0	0	2	0	217.7	315.1	293.8	215.5	341.8	408.1
24	0	0	0	-2	0	202.2	302.8	283.6	239.9	327.3	395.1
25	0	0	0	0	2	247.9	349.2	335.6	269.4	369.0	439.3
26	0	0	0	0	-2	225.9	328.0	302.4	253.2	368.4	403.3
27	0	0	0	0	0	244.3	348.1	331.5	266.4	373.6	423.7
28	0	0	0	0	0	236.9	335.2	321.6	273.5	360.7	437.2
29	0	0	0	0	0	249.0	350.2	337.5	261.7	367.3	426.8
30	0	0	0	0	0	256.6	331.8	342.4	280.3	381.2	429.5
31	0	0	0	0	0	239.8	329.2	327.2	274.6	370.5	435.3
32	0	0	0	0	0	232.8	341.7	318.9	269.2	390.1	425.5
33	0	0	0	0	0	242.2	358.9	328.7	290.8	369.2	440.2
34	0	0	0	0	0	255.0	350.6	340.8	271.7	375.4	438.9
35	0	0	0	0	0	240.6	354.8	332.7	277.9	385.3	410.4
36	0	0	0	0	0	247.3	349.5	320.3	282.3	368.8	439.1

型的回归系数矩阵(表3),由表3则可建立各试验号的产量模型(略)。对各回归模型进行失拟性检验,无失拟因素干扰,进行显著性测定均达 $F_{0.01}$ 的显著标准。

表3 产量模型的回归系数矩阵及检验结果

项 目		1987年			1988年		
		Y <sub>I</sub>	Y <sub>II</sub>	Y <sub>III</sub>	Y <sub>IV</sub>	Y <sub>V</sub>	Y <sub>VI</sub>
线性项	t <sub>0</sub>	244.478	343.1494	329.8162	269.9219	368.9824	425.9782
	t <sub>1</sub>	15.550	12.8292	13.4542	14.4833	12.6750	9.5667
	t <sub>2</sub>	9.1417	5.8791	8.1292	4.9167	6.2500	10.5583
	t <sub>3</sub>	-2.875	8.1708	10.3958	-4.4000	7.3000	3.1500
	t <sub>4</sub>	5.3417	3.0708	3.7625	3.8917	2.8083	5.4167
	t <sub>5</sub>	4.5417	5.3042	4.6875	5.4583	5.9833	10.0000
交互项	t <sub>12</sub>	6.3250	3.1062	8.0062	5.9875	4.4125	5.5250
	t <sub>13</sub>	8.8500	4.6688	5.9563	5.8625	4.6500	6.4250
	t <sub>14</sub>	2.4125	2.5187	-2.8688	3.9375	2.8625	1.3750
	t <sub>15</sub>	0.1500	-2.9687	-1.6313	4.0125	-3.6125	-2.7500
	t <sub>23</sub>	2.9375	3.2188	7.0063	3.0125	4.2375	5.8875
	t <sub>24</sub>	-0.0001	2.0937	-1.4187	3.7375	3.4000	2.4375
	t <sub>25</sub>	0.2375	-3.0937	-6.9026	4.0375	-2.9000	-2.3375
	t <sub>34</sub>	0.850	1.9812	0.6313	2.0125	3.4875	2.6125
	t <sub>35</sub>	4.6625	2.2938	3.9687	4.9625	2.9125	2.4125
	t <sub>45</sub>	1.100	1.6688	2.2438	3.8625	3.0250	1.1875
二次项	b <sub>11</sub>	-15.2521	-14.3719	-16.1844	-17.2917	-16.4604	-12.3188
	b <sub>22</sub>	-2.1520	-2.0469	-2.3719	-6.0166	-6.5104	-6.4188
	b <sub>33</sub>	-16.5521	-14.9969	-15.0219	-16.1417	-16.7979	-12.4313
	b <sub>44</sub>	-8.6646	-8.7218	-9.2219	-8.2292	-10.5979	-6.5313
	b <sub>55</sub>	1.9271	-1.3094	-2.2719	-4.5292	-1.1007	-1.0063
SS总		31161.88	26087.50	32689.25	32935.13	33090.0	24001.00
SS回		30572.19	25039.61	31747.87	31944.94	31828.16	23043.67
SS离回	SS失拟	57.68	6.32	308.05	353.22	537.31	161.11
	SS误	552.01	1041.569	633.32	636.96	724.53	796.22
复相关系数		0.9952	0.9893	0.9927	0.9924	0.9903	0.98980

### 3 产量模型分析

#### 3.1 各因素与产量的简单效应

3.1.1 氮肥的产量效应 用降维法将其中4个因子固定在零水平时,氮肥的效应方程见表4。由表4可见,氮肥的产量效应均为二次抛物线型,且最高最佳用量有随地力水平的提高而逐渐降低的趋势,但差异不大,均以亩施氮9 kg左右时产量达到峰点值。同时看出,在地力基础较低时施氮效应较好,低产田平均以单位氮素增产谷子12.2 kg,中高产田平均增产

表4 氮肥与产量的效应方程

年份	地力	回 归 方 程	最高 用量	最高 产量	最佳 用量	最佳 产量	单位氮 素增产
1987	低	$\hat{Y} \text{ I} = 244.478 + 15.55X_1 - 15.2521 X_1^2$	9.41	248.44	8.06	246.45	11.67
	中	$\hat{Y} \text{ II} = 343.1914 + 12.8292X_1 - 14.3719 X_1^2$	9.17	346.01	7.74	343.90	10.64
	中	$\hat{Y} \text{ III} = 329.8162 + 13.4542X_1 - 16.1844 X_1^2$	9.06	332.61	7.78	330.73	11.90
1988	低	$\hat{Y} \text{ VI} = 269.9219 + 14.4833X_1 - 17.2917X_1^2$	9.07	272.95	7.37	271.20	12.63
	中	$\hat{Y} \text{ V} = 368.9824 + 12.675X_1 - 16.4604X_1^2$	8.94	371.42	7.69	369.60	11.94
	高	$\hat{Y} \text{ IV} = 425.9782 + 9.5667X_1 - 12.388X_1^2$	8.96	427.84	7.28	425.37	9.31

10.9kg较为经济合理。

3.1.2 磷肥的增产效应 磷肥的一元生产函数列于表5。

表5 磷肥与产量的效应关系

(单位: kg/亩)

年份	地力	回 归 方 程	最高 用量	最高 产量	最佳 用量	最佳 产量	单位P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 增产
1987	低	$\hat{Y} \text{ I} = 244.478 + 9.1417X_2 - 2.1512 X_2^2$	10.31	254.2	5.13	244.9	5.33
	中	$\hat{Y} \text{ II} = 343.1494 + 5.8791X_2 - 2.0469X_2^2$	8.59	347.3	3.14	337.6	4.60
	中	$\hat{Y} \text{ III} = 329.8162 - 8.1292X_2 - 2.3719X_2^2$	9.28	336.8	4.58	328.4	5.31
1988	低	$\hat{Y} \text{ IV} = 269.9219 + 4.9167X_2 - 6.0167X_2^2$	6.02	270.9	4.17	267.6	7.58
	中	$\hat{Y} \text{ V} = 368.9824 + 6.25X_2 - 6.5104 X_2^2$	6.20	370.5	4.49	367.4	8.24
	高	$\hat{Y} \text{ VI} = 425.9782 + 10.5583X_2 - 6.4188X_2^2$	7.06	430.3	5.32	427.2	9.03

从表5看出,磷肥与产量呈二次曲线关系,其二次项值较小,表明磷肥即使过量施用,产量也不会出现较大的负效应。最高最佳用量在不同年份、地力条件下反应不一,1987年用量较大,且有随地力水平的提高用量逐渐降低的趋势,而1988年则相反。因此,尚不能说明磷肥在何种地力上施用效果最好。究其原因主要与农肥中的速效磷含量有关。总的看,磷肥的较佳用量平均以亩施P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 4.5kg,单位P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>平均增产谷子6.7kg为适宜。

3.1.3 密度的产量效应 由密度的一元回归关系式(略)分析表明,随地力水平的提高密度指标呈马鞍形趋势,低产田以2.8~2.9万株/亩,中产田3.0~3.3万株/亩、高产田3.1万株/亩较为适宜,从设计下限密度到最适密度水平,增加单位万亩增产谷子26.4~40.3kg。

3.1.4 播期的产量效应 播期与产量呈二次曲线关系,最适播期中低产田以5月10~12日,高产田则以5月14日左右为宜。从设计下限播期水平到最适播期水平,每推迟一日播种平均增产谷子1.7kg。

3.1.5 农家肥的增产效应 经计算,低产田达到产量峰点值的农肥用量平均为4357kg,中高产田为5916kg/亩。但由于农肥质量不高,故增产效果较差,亩最高增产谷子19.5~42.0kg。

### 3.2 各因子增产效应比较

在试验设计范围内,各因子的增产作用大小可依其在不同的取值水平上所引起的产量极

差和变异程度来衡量。经分析比较看出,不同年份、各类地块都以氮肥和密度增产作用最大,其中高产田的主次顺序为 $x_1 > x_3 > x_2 > x_5 > x_4$ ,中、低产田为 $x_1 > x_3 > x_4 > x_2 > x_5$ 。

### 3.3 不同因素间的交互效应

3.3.1 氮肥与磷肥 由氮磷二因子与产量效应的二元回归方程(略)可知,氮磷间在一定范围水平的配比下存在相互促进的正互作效应。通过偏导函数置零法,可得出两因子在峰点产量时的最高水平取值。经计算,低产田以亩施氮素9.5kg、 $P_2O_5$ 6.7kg时,产量最高(275.5kg),经济最佳用量以亩施氮素7.7kg、 $P_2O_5$ 4.2kg较为合理。中产田以亩施氮9.3kg、 $P_2O_5$ 6.6kg时产量最高(374.0kg),经济较佳用量为氮7.6kg、 $P_2O_5$ 4.5kg,高产田以氮9.9kg、 $P_2O_5$ 7.7kg时产量最高(434.8kg),经济最佳用量为氮7.4kg、 $P_2O_5$ 5.3kg,氮磷比为1:0.5~0.72。在最佳用量时,单位养分增产谷子7.5~10.0kg。

3.3.2 氮肥、磷肥与密度 依据氮与密度的二元生产函数则可推出不同肥力田块氮肥与密度的优良组合。经计算,低产田以亩施氮7.8kg,亩留苗2.88万株时产量最高(271.2kg)。不施氮肥时,以亩留苗2.5万株较为适宜。在此基础上,每增施氮素1kg,亩留苗应相应增加0.067万株,这样才能达到最佳增产效果。而中、高产田氮与苗的优良组合为亩施氮7.4~7.8kg,亩留苗3.1~3.2万株,不施氮时以亩留苗2.6~2.9万株为宜。若每增施1kg氮素,亩留苗则应相应增加0.01~0.05万株,直至达到最高产量。

磷肥与密度的互作关系与氮肥相似,故不另作分析。总之,在增密的同时应相应增加氮磷的投入量,充分发挥其间的正连应效果。

### 3.4 优良组合方案的选择

根据不同肥力地块建立的生产函数模型,采用频次分析的方法进行农艺措施的优化筛选和产量预测。经计算机模拟、筛选,结果列于表6。

表6 不同肥力田块高产农艺措施方案筛选结果

试验 年份	代表 地块	模拟 产量 (kg/亩)	农艺 组合数 (套)	纯氮 (kg/亩) $X_1$	$P_2O_5$ (kg/亩) $X_2$	密度 (万株/亩) $X_3$	播期 (月-日) $X_4$	农家肥 (kg/亩) $X_5$
1987	低	>200	697	9.8~10.3	6.5~7.0	3.1~3.3	05-12~05-14	3300~3600
	中	>300	746	9.4~10.5	6.1~6.5	3.3~3.5	05-12~05-14	3200~3500
	中	>300	504	9.9~10.5	6.8~7.4	2.9~3.1	05-9~05-12	3100~3500
1988	低	>200	933	9.0~9.4	5.2~5.6	3.0~3.1	05-10~05-13	3300~3500
	中	>300	945	9.1~9.6	5.8~6.2	3.3~3.4	05-11~05-13	3200~3500
	高	>400	472	9.8~10.4	7.0~7.5	3.5~3.7	05-14~05-16	3700~4000

由表6可以看出,在高肥力田块中,单产要达到400kg以上的水平,其栽培措施组合是亩施纯氮9.8~10.4kg,  $P_2O_5$ 7.0~7.5kg,亩留苗3.5~3.7万株,播期5月14~16日,农家肥3700~4000kg。中低产田的措施取值水平则趋于一致,其综合农艺措施组合为亩施纯氮9.4~9.9kg,  $P_2O_5$ 6.1~6.5kg,亩留苗3.1~3.3万株,播期5月10~13日,农家肥3200~3500kg。

以上是从各生产函数模型中推导,筛选出在高产水平时的综合农艺措施方案。考虑到当

前实验区的实际情况,特别是农肥的施用量一般为2000kg左右,很难达到方案的要求,为能较好地适应当地生产条件,使方案指标定的较为经济合理、切实可行,我们拟定农肥用量为当前水平(2000kg/亩),播期和密度以方案水平为准,在此约束条件下则可推算出各方案的氮磷经济最佳用量。经计算得出,中低产田高产高效的相应综合栽培技术方案为:纯氮7.3~8.5kg/亩,  $P_2O_5$  4.6~6.0kg/亩,密度3.1~3.3万株/亩,播期5月10~13日,农家肥2000kg/亩;高产田的相应综合栽培措施方案为,纯氮8.6~9.1kg/亩,  $P_2O_5$  6.6~7.2kg/亩,密度3.5~3.7万株/亩,播期5月14~16日,农家肥2000kg/亩。

#### 4 小结

通过对各因子的增产效应比较,得出影响当地谷子产量的主要栽培因子是氮肥和密度,其中高产田对产量影响的主次顺序为:氮肥>密度>磷肥>农家肥>播期;中低产田为氮肥>密度>播期>磷肥>农家肥。

双因素分析表明,密度和氮、磷肥的交互作用十分显著,在一定取值水平范围内存在相互促进的效应。生产上在增密的同时,应注意相应增加氮磷的投入量,充分发挥其连应效果。其次是氮、磷之间也存在一定的交互效应。

在地力水平较低条件下,采用亩施纯氮7.3~8.5kg,  $P_2O_5$  4.6~6.0kg,亩留苗3.1~3.3万株,播期5月10~13日,农家肥2000kg的综合优化方案则可获得300kg以上的产量水平。在高地力水平时,获取亩产400kg以上的综合优化方案是,亩施纯氮8.6~9.1kg,  $P_2O_5$  6.6~7.2kg,亩留苗3.5~3.7万株,播期5月14~16日,农家肥2000kg。

试验提出的优化栽培方案1989年在屯留示范5万亩,设示范对比田10块,平均单产为268.9kg,比对照增产30.7%,显著地提高了试验区的谷子产量,具有明显的经济效益和生态效益。

## A Study on Mathematic Models of High-yielding Practices of Spring Millet in Arid Land

Yao Keming    Zhang Xiwen    Song Dianshen    Liu Yuanxiang

(Millet Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Changzhi 046011)

**Abstract** The experiment was carried out on the experimental farm in Tunliu of Shanxi province during 1987 — 1988. Through quadratic regression orthogonal rotational combinatorial design the quantitative comprehensive study was made about the key agronomic measures of sowing density, sowing time, N, P and manure fertilizer application amount, and the optimum synthetic design of agronomic measures was preliminarily determined. Both single reactions on the millet yield and interactions of all agronomic measures were also studied using yield reaction model. After application on a small scale and comparison, the optimization plant was proved to be feasible and profitable.

**Key words:** Millet, Arid land, Cultural measures, Mathematical models, Yield