

# 结球甘蓝 NKMg 肥配施数学模型的研究

汪建飞 邢素芝 于群英 李孝良

(安徽技术师范学院 安徽凤阳 233100)

**摘要** 采用正交回归试验设计,研究了 N、K、Mg 肥用量和对比对甘蓝产量的影响,获得了相应的函数模型;通过微机对数学模型的优化和解析,得出甘蓝获得最高产量 ( $111.89 \text{ t/hm}^2$ ) 时,尿素、硫酸钾、硫酸镁用量分别为  $465.19$ 、 $97.38$ 、 $28.48 \text{ kg/hm}^2$ ; 3 种肥料的最佳施用量分别为  $460.37$ 、 $96.14$ 、 $28.36 \text{ kg/hm}^2$ , 此时,肥料成本投入为  $818.98 \text{ 元/hm}^2$ , 施肥利润为  $42895.59 \text{ 元/hm}^2$ , 产投比可达  $52.4:1$ 。

**关键词** 结球甘蓝; 平衡施肥; 数学模型

中图分类号 S147.2

结球甘蓝是世界范围内广泛种植的重要叶菜之一<sup>[1]</sup>。生产中,常常因肥料用量和配比不当,对其提高产量和增进品质均产生不利影响,肥料用量不足导致植株营养生长不良,产量下降;过量施用将引起肥料的有效成分在土壤中残留,造成资源浪费,同时影响蔬菜品质,且有害物质增加,经济效益下降<sup>[2~5]</sup>。为此,我们针对甘蓝的矿质营养特性,采用正交回归设计方案,布置了 N、K、Mg 的 3 肥料 5 水平试验<sup>[6~8]</sup>。根据试验小区的产量数据,建立了甘蓝的施肥数学模型,分析了 3 种肥料的产量效应和

2 种肥料之间的交互效应;并根据边际利润的理论,计算出试验地区甘蓝生产的最佳施肥量和施肥利润。试验结果及甘蓝施肥数学模型对其他地区的甘蓝生产亦有重要的参考价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

试验安排在安徽技术师范学院种植科技园,土壤为下蜀黄土发育而成的黄褐土,肥力中等(表 1)。

表 1 供试土壤的基本性状

Table 1 Basic properties of tested soil

采样深度 (cm)	有机质 (g/kg)	全 N (g/kg)	碱解 N ( $\hat{g}/g$ )	有效 P ( $\hat{g}/g$ )	速效 K ( $\hat{g}/g$ )	速效 Mg ( $\hat{g}/g$ )	pH
0~20	16.95	1.03	120	37	190	20	7.5

## 1.2 试验设计

表 2 试验因子及水平设计

Table 2 Factors and level designed for the experiment

试验因子	变化间距 ( $\text{kg/hm}^2$ )	因子设计水平				
		-1.215	-1	0	1	1.215
$X_1$ (尿素)	270.27	0	58.11	328.38	598.65	656.76
$X_2$ ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ )	54.18	0	11.65	65.82	120.00	131.65
$X_3$ ( $\text{MgSO}_4$ )	15.43	0	3.32	18.75	34.18	37.50

试验采用 3 因素 5 水平回归正交设计<sup>[9]</sup>。选取 N 肥量 (尿素,  $X_1$ )、K 肥量 ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $X_2$ )、Mg 肥量 ( $\text{MgSO}_4$ ,  $X_3$ ) 为自变量,以甘蓝产量 ( $y$ ) 为目标函数,共有 15 个处理(表 2)。

### 1.3 试验安排

供试品种为春丰甘蓝(江苏明天种业科技有限公司生产)。2002 年 10 月 25 日播种,2003 年 4 月 5 日移栽,小区面积为  $3.2 \text{ m}^2$  ( $1.6 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ), 每小

区定植甘蓝 24 (4×6) 棵。根据试验设计的肥料用量(表 2) 5 月 3 日给各试验小区施肥 尿素与 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 采取沟施；MgSO<sub>4</sub> 采用喷施。实际操作时，根据其用量配制成相应浓度的 200ml 溶液，不施 MgSO<sub>4</sub> 的小区则喷施 200ml 蒸馏水。各小区的田间水分管理及病虫害的防治均保持一致。6 月 19 日采收，测定各小区产量(表 3)。

表 3 试验处理与产量  
Table 3 Treatments and yield

试验 区号	施肥量水平编码			小区产量 (kg)	折算产量 (t/hm <sup>2</sup> )
	尿素	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>		
1	-1	-1	-1	7.05	22.02
2	-1	-1	1	11.47	35.84
3	-1	1	-1	10.22	31.93
4	-1	1	1	12.39	38.70
5	1	-1	-1	16.08	50.24
6	1	-1	1	23.32	72.86
7	1	1	-1	21.70	67.82
8	1	1	1	26.69	83.40
9	-1.215	0	0	9.14	28.57
10	1.215	0	0	23.32	72.87
11	0	-1.215	0	21.92	68.50
12	0	1.215	0	25.90	80.92
13	0	0	-1.215	20.27	63.34
14	0	0	1.215	25.98	81.20
15	0	0	0	25.91	80.97

## 2 结果与分析

### 2.1 甘蓝产量的函数模型

根据 3 因素 5 水平回归正交设计原理，编制程序，经计算机运算，求得 N 肥量( X<sub>1</sub> ) K 肥量( X<sub>2</sub> ) Mg 肥量( X<sub>3</sub> ) 与甘蓝产量的函数模型为：

$$Y=80.9692+18.2304X_1+5.1111X_2+7.3488X_3+1.9175X_1X_2+2.2000X_1X_3-1.7600X_2X_3-20.4888X_1^2-4.2386X_2^2-5.8903X_3^2$$

回归式显著性测定结果表明，复相关系数 R=0.9369，回归关系达极显著水平，模型与小区试验结果拟合较好，可作有关分析。

### 2.2 单因素效应分析

将上述回归模型中任两个因素固定在 0 水平，就得到只含有其余某一因素的一元偏回归子模型(表 4)。由各回归系数可判断 3 个处理因素对甘蓝产量的影响顺序为 X<sub>1</sub>> X<sub>3</sub>> X<sub>2</sub>。

表 4 各试验因子与甘蓝产量的偏回归子模型

Table 4 Partial regression sub-models of tested factors and cabbage yields

试验因子	回归模型
尿素 ( X <sub>1</sub> )	Y <sub>1</sub> = 80.9692+18.2304X <sub>1</sub> -20.4888X <sub>1</sub> <sup>2</sup>
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ( X <sub>2</sub> )	Y <sub>2</sub> = 80.9692+5.1111X <sub>2</sub> -4.2386X <sub>2</sub> <sup>2</sup>
MgSO <sub>4</sub> ( X <sub>3</sub> )	Y <sub>3</sub> = 80.9692+7.3488X <sub>3</sub> -5.8903X <sub>3</sub> <sup>2</sup>

将各因子水平值分别代入以上子模型，得因子对产量的效应，绘成图 1。

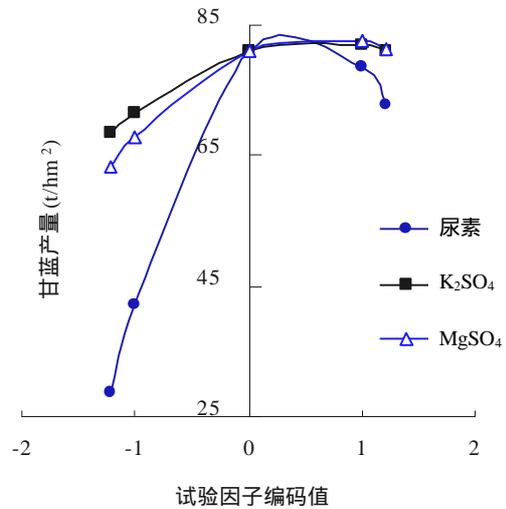


图 1 N、K、Mg 肥与甘蓝产量的效应曲线

Fig. 1 Yield response curves to N, K and Mg application rate

由图 1 可以看出，在设计范围内，随着 N、K、Mg 肥用量的增加，甘蓝产量均呈现出低 - 高 - 低的变化趋势，其中 N 肥所产生的影响最为显著，Mg 肥次之，K 肥的影响最小，这可能与试验土壤 K 素含量水平较高有关。单因素肥料作用时，甘蓝出现最高产量的 N、K、Mg 肥设计水平理论值分别为 0.445、0.603、0.624，相当于每公顷施用尿素 448.65 Kg，K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 98.49 Kg，MgSO<sub>4</sub> 28.38 Kg。超过上述肥料用量，均会导致甘蓝的产量下降。

### 2.3 两因素交互效应分析

分别将甘蓝产量回归模型中的一个因子固定在 0 水平，可以获得一组两因素互作对甘蓝产量影响的效应方程。

$$Y_{1,2}= 80.9692 + 18.2304X_1 + 5.1111X_2 + 1.9175X_1X_2 - 20.4888X_1^2 - 4.2386X_2^2$$

$$Y_{1,3}= 80.9692 + 18.2304X_1 + 7.3488X_3 + 2.2000X_1X_3 - 20.4888X_1^2 - 5.8903X_3^2$$

$$Y_{2,3} = 80.9692 + 5.1111X_2 + 7.3488X_3 - 1.7600X_2X_3 - 4.2386X_2^2 - 5.8903X_3^2$$

从方程的交互系数大小可以判断, 尿素与  $MgSO_4$  的交互作用( $X_1X_2$ )最为显著, 尿素与  $K_2SO_4$  的交互作用( $X_1X_3$ )次之,  $K_2SO_4$  与  $MgSO_4$  的交互效应( $X_2X_3$ )最小。

根据上述 3 式可以计算出两因素下不同水平搭配时的甘蓝产量(表 5)。从表 5 中不难看出, 尿素与  $K_2SO_4$  之间是正交互作用, 在同一  $K_2SO_4$  施用量下, 甘蓝的产量随着尿素用量的增加不断提高, 在

尿素施用量相同时, 甘蓝产量随着  $K_2SO_4$  的用量表现为低-高-低的趋势; 尿素与  $MgSO_4$  之间亦表现为正交互作用, 在同一  $MgSO_4$  施用量下, 甘蓝产量随着尿素用量的增加表现为低-高-低的趋势, 在尿素施用量相同时, 甘蓝产量随着  $K_2SO_4$  的用量表现为低-高-低的趋势, 而且在尿素施用量较高时, 甘蓝产量出现最大值的  $MgSO_4$  用量水平也较高;  $K_2SO_4$  与  $MgSO_4$  之间则表现为负交互作用, 这可能与 K、Mg 均为阳离子态养分有关。

表 5 两因素交互作用对甘蓝产量的影响 ( $t/hm^2$ )

Table 5 Interactive effects of two factors on yield

交互因子项目	因子水平编码	-1.215	-1	0	1	1.215
$X_1$ (列)	-1.215	49.18	51.80	58.82	57.36	55.94
$X_2$ (行)	-1	52.60	55.31	62.74	61.69	60.36
	0	68.50	71.62	80.97	81.84	80.92
	1	84.40	87.93	99.20	101.99	101.48
	1.215	87.82	91.44	103.12	106.32	105.90
$X_1$ (列)	-1.215	14.20	18.01	28.57	27.36	25.56
$X_3$ (行)	-1	27.30	31.21	42.25	41.51	39.81
	0	63.34	67.73	80.97	82.43	81.20
	1	58.41	63.27	78.71	82.37	81.62
	1.215	52.00	56.96	72.87	77.00	76.35
$X_2$ (列)	-1.215	48.28	53.12	68.50	72.10	71.33
$X_3$ (行)	-1	51.86	56.62	71.62	74.84	73.99
	0	63.34	67.73	80.97	82.43	81.20
	1	66.36	70.36	81.84	81.54	79.94
	1.215	65.90	69.82	80.92	80.24	78.56

## 2.4 边际效应分析

边际产量是指增施单位量肥料作物所增加的总产量。当肥料效应递增时, 即边际产量随施肥量的增加而增加, 总产量曲线的斜率递增。当肥料效应递减时, 边际产量随施肥量的增加而递减, 总产量按一定的递减率递增。当边际产量递减为零时, 总产量达到最高点。为了分析各因素的边际效应, 对各试验因子与甘蓝产量的偏回归子模型求一阶导数, 获以下代数式:

$$\frac{dy}{dx_1} = 18.2304 - 40.9776X_1$$

$$\frac{dy}{dx_2} = 5.1111 - 8.4772X_2$$

$$\frac{dy}{dx_3} = 7.3488 - 11.7806X_3$$

将各因素的不同编码值代入上式, 得边际效应值(表 6)。由表 6 可知, 在 (-1.215, 0) 区间, N、K、Mg 肥的边际产量均为正值。当边际产量为 0 时,

表 6 各因素的产量边际效应

Table 6 Marginal effects of tested factors on cabbage yield

试验因子	因子设计水平				
	-1.215	-1	0	1	1.215
$X_1$ (尿 素)	68.02	59.21	18.23	-22.75	-31.56
$X_2$ ( $K_2SO_4$ )	15.41	13.59	5.11	-3.37	-5.19
$X_3$ ( $MgSO_4$ )	21.66	19.13	7.35	-4.43	-6.96

尿素水平为 0.445(即施尿素 448.65 kg/hm<sup>2</sup>), K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水平为 0.603 (即施 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 98.49 kg/hm<sup>2</sup>), MgSO<sub>4</sub> 水平为 0.624 (即施 MgSO<sub>4</sub> 28.38 kg/hm<sup>2</sup>)。超过上述施肥量, 边际产量就呈现负值。

### 2.5 施肥量的确定与经济效益分析

根据试验因子与肥料用量之间的函数关系, 将甘蓝产量的函数模型中肥料用量水平的代码值转换为肥料的实际用量, 换算后的函数表达式如下:

$$Y = 24.4493 + 0.2332X_N - 2.8049 \times 10^{-4}X_N^2 + 0.2816X_K - 1.4507 \times 10^{-3}X_K^2 + 1.3691X_{Mg} - 2.4734 \times 10^{-2}X_{Mg}^2 + 1.3125 \times 10^{-4}X_NX_K + 5.2747 \times 10^{-4}X_NX_{Mg} - 2.1099 \times 10^{-3}X_KX_{Mg}$$

式中: Y 表示甘蓝的产量, 单位是 t/hm<sup>2</sup>, X<sub>N</sub>、X<sub>K</sub>、X<sub>Mg</sub> 分别为尿素、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、MgSO<sub>4</sub> 的用量, 单位均为 kg/hm<sup>2</sup>。

根据三元二次多项式的极值原理, 求出 Y 达到极大值时, X<sub>N</sub>=465.19 kg/hm<sup>2</sup>, X<sub>K</sub>=97.38 kg/hm<sup>2</sup>, X<sub>Mg</sub>=28.48 kg/hm<sup>2</sup>; 此时甘蓝产量 Y=111.89 t/hm<sup>2</sup>。

最高施肥量是获得最高产量的施肥量, 这是计量施肥中的极限值, 超过此量施用就会导致减产并浪费肥料。在农业生产中, 还要综合考虑肥料和农产品的价格因子。当边际产量等于肥价与农产品价格之比时, 边际利润率 (R) 等于零, 单位面积的施肥利润额最大, 此时的施肥量为最佳施肥量。

当前本地市场上尿素、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、MgSO<sub>4</sub> 的价格分别为 1.26、1.60、3.00 元/Kg, 甘蓝的价格为 500 元/t。据此可以计算出不同边际利润率 (R) 时的施肥量和施肥利润 (表 7)。

表 7 甘蓝 NKMg 肥效应不同 R 值的施肥量和施肥利润

Table 7 Rates and profits of fertilization on different R values

R	施肥量 (kg/hm <sup>2</sup> )			施肥增产量 (t/hm <sup>2</sup> )	肥料成本 (元/hm <sup>2</sup> )	施肥利润 (元/hm <sup>2</sup> )	产投比
	尿素	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>				
2	450.58	93.67	28.12	87.36	801.97	42878.78	53.5 : 1
1	455.47	94.91	28.24	87.40	810.48	42891.44	52.9 : 1
0.5	457.92	95.52	28.30	87.42	814.73	42894.58	52.6 : 1
0.4	458.41	95.65	28.31	87.42	815.58	42894.95	52.6 : 1
0.3	458.90	95.77	28.33	87.42	816.43	42895.23	52.5 : 1
0.2	459.39	95.90	28.34	87.43	817.28	42895.44	52.5 : 1
0.1	459.88	96.02	28.35	87.43	818.13	42895.55	52.4 : 1
0	460.37	96.14	28.36	87.43	818.98	42895.59	52.4 : 1
-1	465.26	97.38	28.48	87.44	827.49	42891.23	51.8 : 1

注: 计算施肥利润和产投比时均未包括施肥固定成本。

由表 7 可以看出, 当边际利润率 R=0 时, 尿素、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、MgSO<sub>4</sub> 的最佳施用量分别为 460.37、96.14、28.36 kg/hm<sup>2</sup>, 此时, 肥料成本投入为 818.98 元/hm<sup>2</sup>, 施肥利润为 42895.59 元/hm<sup>2</sup>, 产投比可达 52.4:1。

### 3 小结

(1) 在本试验条件下, 获得了甘蓝产量与 NPMg 肥料用量的函数模型, 其表达式为:

$$Y = 80.9692 + 18.2304X_1 + 5.1111X_2 + 7.3488X_3 + 1.9175X_1X_2 + 2.2000X_1X_3 - 1.7600X_2X_3 - 20.4888X_1^2 - 4.2386X_2^2 - 5.8903X_3^2$$

(2) 在一定的用量范围内, 施用 NPK 肥料均能提高甘蓝的产量, 但过量施用, 均会造成甘蓝减产。NPMg 3 种肥料对甘蓝产量的影响顺序为尿素 >

MgSO<sub>4</sub> > K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。

(3) NPMg 3 种肥料之间均存在着显著的交互作用。从各交互的偏回归系数看, 尿素与 MgSO<sub>4</sub> 之间呈正交互作用, 交互效应最为显著; 尿素与 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 也是正交互作用, 交互效应次之; K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 与 MgSO<sub>4</sub> 之间呈负交互作用, 交互效应最小。

(4) 通过微机对数学模型的优化和解析, 得出甘蓝获得最高产量 (111.89 t/hm<sup>2</sup>) 时, 尿素、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、MgSO<sub>4</sub> 用量分别为 465.19、97.38、28.48 Kg/hm<sup>2</sup>; 当边际利润率 R=0 时, 尿素、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、MgSO<sub>4</sub> 的最佳施用量分别为 460.37、96.14、28.36 Kg/hm<sup>2</sup>, 此时, 肥料成本投入为 818.98 元/hm<sup>2</sup>, 施肥利润为 42895.59 元/hm<sup>2</sup>, 产投比可达 52.4:1。

(下转第 429 页)

## SOIL QUALITY EVALUATION OF SOME TYPICAL NEWLY-ESTABLISHED GREEN BELTS IN SHANGHAI

XIANG Jian-guang<sup>1</sup> FANG Hai-lan<sup>2</sup> YANG Yi<sup>3</sup> HUANG Yi-zhen<sup>2</sup> ZHANG Qi<sup>2</sup> ZHAO Xiao-yi<sup>2</sup> XI You-wei<sup>2</sup>

(1 Shanghai Management Station of Green Project, Shanghai 200023; 2 Shanghai Institute of Landscape Gardening, Shanghai 200232;

3 Bureau of Road Management of Shanghai, Pudong New Area, Shanghai 201200)

**Abstract** Soil qualities of some typical newly-established green belts in Shanghai, such as Yanzhong, Kaiqiao, Huashang, Huangxing, and those alongside the Longdong and Yuandong Roads were investigated. The results show that the soils are high in pH value and alkaline or high alkaline in reaction and basically up to the standard for EC. More than 60% of the soils meet the standard for organic matters. The soils tend to be low in organic matter contents, high in bulk density, poor in aeration and generally low in CEC. Some green belts use mountain soil and peat. The mixture is good in quality and meets the requirements for greening of the city. It is, therefore, recommended that the gardening plants be grown in light of the local soil and urban wastes high in organic matter, such as domestic garbage and sewage sludge, etc. be used to ameliorate the soil and the index system for soil quality evaluation be further improved and include CEC, soil drainage, etc..

**Key words** Greening land, Soil, Soil quality, Evaluation index

\*\*\*\*\*

(上接第415页)

### 参考文献

- 1 于广建, 张百俊. 蔬菜栽培技术. 北京: 中国农业科技出版社, 1998, 77 ~ 82
- 2 黄得明, 白纲义, 樊淑文. 蔬菜配方施肥. 北京: 中国农业出版社, 2001. 115 ~ 116
- 3 何天秀, 何成辉, Michel Marchand, 何涪剑. N、K、Mg 营养平衡与甘蓝高产优质的关系. 西南农业学报, 1999, 12 (3): 50 ~ 56
- 4 邢素芝, 汪建飞, 姚春芬. 辣椒 NPK 肥施肥措施数学模型的研究. 土壤通报, 2003, 34 (3): 238 ~ 240
- 5 Li Wenqing, Zhang Min, S. Van Der Zee. Salt contents in soils under plastic greenhouse gardening in China. Pedosphere, 2001, 11 (4): 359 ~ 367
- 6 黄晓澜, 允青, 刘英, 况晶. 肥料中氮源类型对结球甘蓝产量及生物学产量的效应. 安徽农业科学, 1998, 6 (2): 156 ~ 157
- 7 宋国菡, 杨力, 刘光栋, 泉维洁, 卢桂菊. 营养液镁浓度对结球甘蓝生长发育及镁吸收影响的研究. 山东农业科学, 1998, (1): 12 ~ 16
- 8 Ni Wuzhong, Liang Jianshe, Hardter R. Yield and quality responses of selected solanaceous vegetable crops to potassium fertilization. Pedosphere, 2001, 11 (3): 251 ~ 255
- 9 金耀青, 张中原. 配方施肥方法及其应用. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993, 128 ~ 135

## MATHEMATICS MODEL FOR N : K : Mg RATIO IN FERTILIZING BALL CABBAGE

WANG Jian-fei XIN Su-zhi YU Qun-ying LI Xiao-liang

(Anhui Technical Teachers college, Fengyang, Anhui 233100)

**Abstract** Effects of application rate and N:K:Mg ratio of the fertilizer on yield of ball cabbage were studied through experiment of quadratic orthogonal regression design. A relative function model was thus obtained. With the aid of computer, the model was optimized and parsed, showing that when the application rate of urea, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and MgSO<sub>4</sub> was 465.19, 97.38 and 28.48kg/hm<sup>2</sup>, respectively, the yield of ball cabbage was the highest (111.89 t/hm<sup>2</sup>), but the optimum application rate of urea, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and MgSO<sub>4</sub> was 460.37, 96.14 and 28.36kg/hm<sup>2</sup>, respectively, when the cost of fertilization would be 818.98 yuan/hm<sup>2</sup>, the profit 42,895.59 yuan/hm<sup>2</sup> and the O/I 52.4:1.

**Key words** Ball Cabbage, Balanced fertilization, Mathematics model