

施肥对菠菜产量和硝酸盐含量的影响

盛锦寿

(福建省泉州市农业局土肥站, 福建鲤城 362000)

Effects of Fertilization on Yield and Nitrate Content in Spinach

SHENG Jin-shou

(Soil and Fertilizer station, Agricultural Bureau of Quanzhou City, Fujian province, licheng, Fujian 362000, China)

摘 要: 应用二次通用回归旋转组合设计, 以 N、P、K、有机肥料为试验因素, 建立菠菜产量和 NO₃⁻-N 含量的回归方程。N 肥和有机肥对菠菜产量和 NO₃⁻-N 含量均有极显著影响, 所有互作效应都不显著。为了兼顾菠菜高产和较低 NO₃⁻-N 含量的生产目的, 施肥量为: 纯 N 60 ~ 90 kg/hm², P₂O₅ 15 ~ 30 kg/hm², K₂O 45 ~ 67.5 kg/hm², 有机肥 1125 ~ 2250 kg/hm², 预计产量和 NO₃⁻-N 量分别为: 29104.9 kg/hm² ≤ Y ≤ 33607.9 kg/hm², 2523 mg/kg ≤ Y_{NO₃⁻} ≤ 3461 mg/kg。

关键词: 菠菜; 产量; NO₃⁻-N; 回归方程

中图分类号: S63; S147.2

菠菜是泉州市普遍栽种的绿叶蔬菜品种之一。菠菜是一种易于富集 NO₃⁻-N 的喜硝叶类蔬菜, 蔬菜体内 NO₃⁻-N 的过量累积, 对人体健康存在潜在威胁^[1-4]。造成蔬菜 NO₃⁻-N 累积的因素很多, 而平衡养分供应是控制蔬菜体内 NO₃⁻-N 含量的关键^[5-6]。随着菠菜生产不断发展, 需要相应的科学施肥技术来提高蔬菜产量和品质。本试验主要探讨 N、P、K 肥和有机肥料配施对菠菜产量和 NO₃⁻-N 含量的影响, 寻求合理的施肥技术, 为菠菜的高产、优质和安全生长提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2005 年 11 月至 2006 年 1 月在鲤城区浮桥镇延陵村蔬菜基地上进行。试验点土壤为灰沙土, 土壤基础养分状况见表 1。供试品种: 抗热大叶虎耳菠菜。

试验肥料: 尿素 (含 N 460 g/kg)、过磷酸钙 (含 P₂O₅ 120 g/kg)、氯化钾 (含 K₂O 600 g/kg)、商品有机肥料 (含有机质 320 g/kg)。

1.2 试验设计

试验采用 N (X₁)、P₂O₅ (X₂)、K₂O (X₃)、有机肥料 (X₄) 4 因素二次通用旋转组合设计。试验因素的编码值及肥料的施用量如表 2 所示。按设计要求, 设置 31 个小区, 随机排列, 小区面积 24 m²。试验 2005 年 11 月 18 日播种, 用种子直播, 播种量 62.5 kg/hm², 2006 年 1 月 3 日采收并测产。过磷酸钙和有机肥料全部作基肥; 尿素分别于 12 月 5、12、20、27 日, 并占总肥量的 1/5、1/5、2/5、1/5 作 4 次追肥施用; 氯化钾分别于 12 月 12、20、27 日, 占总肥量的 1/4、1/2、1/4 作 3 次追肥施用。试验过程中的其他管理措施均在相同条件下进行。

1.3 测试项目与方法

土壤基本理化性状采用常规分析方法测定^[7]。有机质, 用重铬酸钾容量法测定; 全 N, 用半微量凯氏法测定; 碱解 N, 用碱解扩散硼酸吸收法测定; 有效 P, 用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提、钼锑抗比色法测定; 速效 K, 用醋酸铵浸提、火焰光度法测定; pH 值, 用酸度计法测定。蔬菜 NO₃⁻-N 用紫外分光光度法测定^[8]。

表 1 试验地土壤基本性状

层次 (cm)	有机质 (g/kg)	全 N (g/kg)	碱解 N (mg/kg)	有效 P (mg/kg)	速效 K (mg/kg)	pH
0 ~ 20	22.9	0.78	102	203.0	196	6.26

作者简介: 盛锦寿 (1964—), 男, 福建惠安人, 高级农艺师, 主要从事土壤肥料技术推广和检测工作。E-mail: shengjs301@163.com

表 2 试验因子的水平编码及施用量

试验因子	变化间距 (kg/hm ²)	因子设计水平				
		-2	-1	0	1	2
N (X ₁)	30	0	30	60	90	120
P ₂ O ₅ (X ₂)	15	0	15	30	45	60
K ₂ O (X ₃)	22.5	0	22.5	45	67.5	90
有机肥料 (X ₄)	1125	0	1125	2250	3375	4500

2 试验结果与分析

2.1 施肥对菠菜产量的影响

2.1.1 菠菜产量的肥料效应方程

应用计算机 DPS 数据处理系统进行数据统计分析^[9],
建立菠菜产量 (y) 为因变量, 与 N (X₁)、P₂O₅ (X₂)、
由表 3 试验数据, K₂O (X₃)、有机肥料 (X₄) 施用量 4 因子的

表 3 试验处理结构矩阵与试验结果

处理区号	试验设计矩阵				产量 (kg/hm ²)	NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)
	N (X ₁)	P ₂ O ₅ (X ₂)	K ₂ O (X ₃)	有机肥料 (X ₄)		
1	1	1	1	1	33043.5	2779
2	1	1	1	-1	31626.0	3133
3	1	1	-1	1	32793.0	3375
4	1	1	-1	-1	30193.5	2974
5	1	-1	1	1	32793.0	3491
6	1	-1	1	-1	32439.0	3324
7	1	-1	-1	1	34459.5	3603
8	1	-1	-1	-1	30564.0	2552
9	-1	1	1	1	28021.5	3319
10	-1	1	1	-1	25813.5	1918
11	-1	1	-1	1	31189.5	3093
12	-1	1	-1	-1	24480.0	1248
13	-1	-1	1	1	27564.0	2867
14	-1	-1	1	-1	24321.0	1678
15	-1	-1	-1	1	29314.5	3035
16	-1	-1	-1	-1	25164.0	2487
17	-2	0	0	0	22939.5	2234
18	2	0	0	0	30751.5	2929
19	0	-2	0	0	29959.5	2218
20	0	2	0	0	28834.5	2935
21	0	0	-2	0	32127.0	3210
22	0	0	2	0	30814.5	2975
23	0	0	0	-2	24334.5	1103
24	0	0	0	2	26689.5	3627
25	0	0	0	0	32856.0	3325
26	0	0	0	0	30480.0	3400
27	0	0	0	0	30939.0	3404
28	0	0	0	0	34626.0	3927
29	0	0	0	0	29251.5	2967
30	0	0	0	0	31480.5	2843
31	0	0	0	0	34522.5	3882

编码为自变量之间试验产量回归方程：

$$Y=32022.21+2402.81X_1-71.19X_2-215.06X_3+1220.31X_4-1076.69X_1^2-438.82X_2^2+79.62X_3^2-1410.07X_4^2-358.78X_1X_2+394.97X_1X_3-502.78X_1X_4+139.59X_2X_3+80.72X_2X_4-633.28X_3X_4 \quad (1)$$

对回归方程 (1) 进行显著性 F 检验：失拟 $F_1 = 0.464$ 、 $P = 0.88958$ ，失拟因素不显著，说明本试验未控制的因素所引起的误差对试验结果无显著影响，可以忽略。 $F_2 = 7.072$ 、 $P = 0.00033$ ，达到极显著水平，

表明回归方程与试验实际情况相吻合，可以分析各因子的作用，故方程具有实际应用价值。对方程的各回归系数进行显著性检验，结果见表 4。表 4 表明，除了 X_1 、 X_4 、 X_1^2 、 X_4^2 项极显著外，其他都未达到显著水平，可见施 N 肥和有机肥料的施用对菠菜产量有很明显的影响。由一次项系数绝对值大小可判断 4 个因素对菠菜产量的影响顺序^[10]为 $X_1 > X_4 > X_3 > X_2$ ，P 肥影响最小，其次为 K 肥，这可能与试验土壤 P、K 素含量水平较高有关。

表 4 回归系数显著性检验结果

回归系数	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₁₁	b ₂₂	b ₃₃	b ₄₄	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₂₃	b ₂₄	b ₃₄
T	7.25	0.21	0.65	3.68	3.55	1.45	0.26	4.65	0.88	0.97	1.24	0.34	0.20	1.56
P	0.000	0.832	0.525	0.002	0.002	0.166	0.796	0.000	0.389	0.344	0.232	0.735	0.844	0.137

2.1.2 单因素对产量的效应 采用降维法，将上述回归模型 (1) 中 4 个因素中的任意 3 个因素固定在 0 水平，就得到只含有某一因素的一元二次偏回归子方程：

N: $Y=32022.21+2402.81X_1-1076.69X_1^2$
P₂O₅: $Y=32022.21-71.19X_2-438.82X_2^2$
K₂O: $Y=32022.21-215.06X_3+79.62X_3^2$
有机肥料: $Y=32022.21+1220.31X_4-1410.07X_4^2$
上述子方程各因素与产量间均呈二次曲线关系。其中 N (X_1)、P₂O₅ (X_2)、有机肥料 (X_4) 效应曲线均是一条开口向下的抛物线，表明菠菜产量随 N、

P₂O₅、有机肥料单施用量的增加而明显提高，当 N、P₂O₅、有机肥料单施用量分别为 1.116、-0.081、0.433 水平时产量最高，而后产量随施用量增加而逐渐下降，呈报酬递减规律。因此，N、P₂O₅、有机肥料单施用量应取适量值为佳，过高或过低都会影响产量。K₂O (X_3) 呈开口向上抛物线，菠菜产量呈现高-低-高的变化趋势，以 K₂O 施用量为 1.351 水平时产量为最低，因此，菠菜施 K₂O 量应合理比例以提高产量。

2.1.3 两因素交互效应对产量的影响 由表 4 可见，变量间有 6 个交互项系数均未达到 $P < 0.05$ 的显著水平。从表 5 中可以看出，N-P 交互作用为负，在

表 5 两因素交互作用对菠菜产量的影响

交互因子	水平编码	-2	-1	0	1	2
X ₁ (列) X ₂ (行)	2	32343.29	32870.99	32521.06	31293.49	29188.29
	1	32452.99	33339.48	33348.33	32479.54	30733.12
	0	30409.31	31654.58	32022.21	31512.21	30124.56
	-1	26212.24	27816.29	28542.71	28391.48	27362.62
	-2	19861.79	21824.62	22909.81	23117.37	22447.29
X ₁ (列) X ₃ (行)	2	31689.79	32025.81	32521.06	33175.56	33989.29
	1	33306.99	33248.04	33348.33	33607.86	34026.62
	0	32770.81	32316.90	32022.21	31886.77	31910.56
	-1	30081.24	29232.36	28542.71	28012.29	27641.12
	-2	25238.29	23994.43	22909.81	21984.43	21218.29
X ₁ (列) X ₄ (行)	2	26451.29	30896.24	32521.06	31325.74	27310.29
	1	26272.99	31220.73	33348.33	32655.79	29143.12
	0	23941.31	29391.83	32022.21	31832.46	28822.56
	-1	19456.24	25409.54	28542.71	28855.73	26348.62
	-2	12817.79	19273.87	22909.81	23725.62	21721.29

续表 5

X ₂ (列)	2	30314.79	30140.06	30124.56	30268.31	30571.29
X ₃ (行)	1	31981.62	31667.29	31512.21	31516.36	31679.74
	0	32770.81	32316.90	32022.21	31886.77	31910.56
	-1	32682.37	32088.86	31654.58	31379.54	31263.74
	-2	31716.29	30983.18	30409.31	29994.68	29739.29
X ₂ (列)	2	21720.79	27332.74	30124.56	30096.24	27247.79
X ₄ (行)	1	23269.87	28801.11	31512.21	31403.17	28473.99
	0	23941.31	29391.83	32022.21	31832.46	28822.56
	-1	23735.12	29104.92	31654.58	31384.11	28293.49
	-2	22651.29	27940.37	30409.31	30058.12	26886.79
X ₃ (列)	2	26362.79	30546.74	31910.56	30454.24	26177.79
X ₄ (行)	1	25072.43	29889.67	31886.77	31063.73	27420.56
	0	23941.31	29391.83	32022.21	31832.46	28822.56
	-1	22969.43	29053.23	32316.90	32760.42	30383.81
	-2	22156.79	28873.87	32770.81	33847.62	32104.29

同一 N 施用量下, 菠菜产量随着 P₂O₅ 的用量表现为低-高-低的趋势, 在 P₂O₅ 施用相同下, 菠菜产量也随着 N 的用量表现为低-高-低的趋势。N-K 为正交互作用, 表现较复杂, 在高 N 施用量下, 菠菜产量随着 K₂O 用量的增加不断提高, 以 N=1.467、K₂O=2 水平时产量为最高; 而 N 施用量在 0 ~ -2 水平下, 菠菜产量随着 K₂O 用量的增加表现为下降趋势。P-K 正交互作用, P₂O₅ 施用量在 0 ~ 2 水平下, 菠菜产量随着 K₂O 用量的增加表现为高-低-高; 而 P₂O₅ 施用量在 0 水平以下时, 菠菜产量随着 K₂O 用量的增加反而减产。N-有机肥料、K-有机肥料均为负交互作用, P-有机肥料为正交互作用, N、P、K 肥的增产效果随着有机肥料用量的增加而增加, 而在有机肥料用量高于一定水平后产量就不继续增加。说明各因素均存在一个合理数值范围, 超过此范围, 不利于提高菠菜产量。

2.2 施肥对菠菜 NO₃⁻-N 含量的影响

2.2.1 菠菜 NO₃⁻-N 含量的肥料效应方程 NO₃⁻-N 含量的高低是衡量蔬菜安全品质的重要指标之一。以 N、P₂O₅、K₂O、有机肥料用量编码为自变量, 以菠菜 NO₃⁻-N 含量为因变量, 得出菠菜 NO₃⁻-N 含量与肥料之间的回归方程:

$$Y=3392.6+290.7X_1+9.8X_2-13.7X_3+470.7X_4-177.6X_1^2-178.9X_2^2-49.9X_3^2-231.7X_4^2-13.8X_1X_2+19.0X_1X_3-232.4X_1X_4+48.5X_2X_3+21.1X_2X_4-90.1X_3X_4 \quad (2)$$

对上述方程 (2) 进行 F 检验, 失拟 F₁ = 1.376、P = 0.27471, 失拟因素不显著; F₂ = 3.830、P = 0.00772, 达到极显著水平, 表明回归方程与试验实际情况相吻合, 故此回归方程能反映施肥对菠菜 NO₃⁻-N 累积的影

响。对回归系数进行 T 检验, 除了 T (X₁) = 3.21**、P (X₁) = 0.005, T (X₄) = 5.21**、P (X₄) = 0.000, T (X₁²) = 2.14**、P (X₁²) = 0.047, T (X₂²) = 2.16**、P (X₂²) = 0.045, T (X₄²) = 2.80**、P (X₄²) = 0.012, 差异达到极显著水平, 单施 K₂O 和因子交互作用未达到 P<0.05 显著水平, 可见 N、P₂O₅、有机肥料的投入对菠菜 NO₃⁻-N 累积有极显著影响。

2.2.2 单因素效应及交互效应对菠菜 NO₃⁻-N 含量的影响 将上述回归方程 (2), 令 X₁、X₂、X₃、X₄ 中任意 3 个因素为 0 水平, 就可分别得到 N、P₂O₅、K₂O、有机肥料的单因素效应函数:

$$N: Y = 3392.6 + 290.7X_1 - 177.6X_1^2$$

$$P_2O_5: Y = 3392.6 + 9.8X_2 - 178.9X_2^2$$

$$K_2O: Y = 3392.6 - 13.7X_3 - 49.9X_3^2$$

$$有机肥料: Y = 3392.6 + 470.7X_4 - 231.7X_4^2$$

从上述方程可以看出, 一次项系数绝对值大小用来判断 4 个可控因子对菠菜 NO₃⁻-N 含量的影响大小为: X₄>X₁>X₃>X₂。在试验范围内, 4 个因子对菠菜 NO₃⁻-N 含量的效应均呈开口向下的抛物线, 表明不合理施用任一肥料因子均会提高菠菜 NO₃⁻-N 含量。

方程 (2) 的交互效应很小, 均未达到 P<0.05 的显著水平。交互项系数有正负数, 说明各因素均存在一个合理施用范围, 比例过大易引起菠菜 NO₃⁻-N 累积。4 种肥料两两互作对菠菜 NO₃⁻-N 累积影响大小为: X₁X₄>X₃X₄>X₂X₃>X₂X₄>X₁X₃>X₁X₂, 但 N 和有机肥料间的交互效应是其他因子两两交互效应的 2.6 ~ 16.8 倍, 有机肥和 N 肥的投入是影响蔬菜 NO₃⁻-N 累积的主要因子^[1], 应引起重视。

2.3 菠菜高产、低 NO_3^- -N 含量施肥方案的选择

国标 GB18406.1-2001^[12]中规定,无公害蔬菜的硝酸盐含量,叶菜类 $\leq 3000 \text{ mg/kg}$ 。在本试验条件下,大部分试验小区收获期菠菜硝酸盐含量未能达标,这可能是由于施肥与收获间隔时期短(7天)、后期气温高($20 \sim 25^\circ\text{C}$),而明显提高 NO_3^- -N 含量有关^[13-14],有待进一步试验研究,但各因子对菠菜 NO_3^- -N 累积均有一定程度的影响。从两个方程反映出,4种肥料对菠菜产量和 NO_3^- -N 累积作用的效果不同,最高产量要求的优化施肥方案与低积累 NO_3^- -N 要求的施肥方案有区别。经计算机模拟选优,为达到菠菜产量 30000 kg/hm^2 以上,有 190 个方案,在 95% 置信概率条件下, N: $0.841 \sim 1.086$, P_2O_5 : $-0.347 \sim 0.021$, K_2O : $-0.266 \sim 0.150$, 有机肥: $0.174 \sim 0.426$ 水平。而 NO_3^- -N $\geq 2294 \text{ mg/kg}$, 有 341 个方案,在 95% 置信概率条件下, N: $0.171 \sim 0.439$, P_2O_5 : $-0.090 \sim 0.178$, K_2O : $-0.202 \sim 0.090$, 有机肥: $0.536 \sim 0.766$ 水平。在大田种植中,兼顾菠菜高产和较低 NO_3^- -N 含量,进行综合分析,建议施肥组合区为 N 取 $0 \sim 1$ 水平, P_2O_5 取 $-1 \sim 0$ 水平, K_2O 取 $0 \sim 1$ 水平,有机肥取 $-1 \sim 0$ 水平,预控产量和 NO_3^- -N 量分别为: $29104.9 \text{ kg/hm}^2 \leq Y \leq 33607.9 \text{ kg/hm}^2$, $2523 \text{ mg/kg} \leq Y_{\text{NO}_3^-} \leq 3461 \text{ mg/kg}$ 。相当于施肥量为:纯 N $60 \sim 90 \text{ kg/hm}^2$, P_2O_5 $15 \sim 30 \text{ kg/hm}^2$, K_2O $45 \sim 67.5 \text{ kg/hm}^2$, 有机肥 $1125 \sim 2250 \text{ kg/hm}^2$ 。

3 小结

(1) 建立的四元二次肥料效应回归模型达到了极显著水平,可以表达 N 肥、P 肥、K 肥、有机肥料与菠菜产量及 NO_3^- -N 含量间的关系。

(2) N 肥和有机肥对菠菜产量有极显著影响, N 肥、P 肥、有机肥对菠菜 NO_3^- -N 累积的影响达极显著,所有互作效应都不显著。N 肥和有机肥料是影响菠菜产量和 NO_3^- -N 含量的主因子。

(3) 在本试验条件下,按菠菜产量 $> 30000 \text{ kg/hm}^2$,施肥方案为:纯 N $0.841 \sim 1.086$ 水平, P_2O_5 $-0.347 \sim 0.021$ 水平, K_2O $-0.266 \sim 0.150$ 水平,有机肥 $0.174 \sim 0.426$ 水平。为了兼顾菠菜高产和较低 NO_3^- -N 含量的生产目的,施肥方案为:纯 N $60 \sim 90 \text{ kg/hm}^2$, P_2O_5 $15 \sim 30 \text{ kg/hm}^2$, K_2O $45 \sim 67.5 \text{ kg/hm}^2$,

有机肥 $1125 \sim 2250 \text{ kg/hm}^2$, 预计产量和 NO_3^- -N 量分别为: $29104.9 \text{ kg/hm}^2 \leq Y \leq 33607.9 \text{ kg/hm}^2$, $2523 \text{ mg/kg} \leq Y_{\text{NO}_3^-} \leq 3461 \text{ mg/kg}$ 。

参考文献:

- [1] 王西娜, 王朝辉, 陈宝明, 李生秀. 硝态氮累积与菠菜有机 N 形成及 P、K 吸收的关系. 农业环境学报, 2005, 24 (3): 421-425
- [2] 熊国华, 林咸永, 章永松, 郑绍建, 王峰. 钾、尿素与有机物料或双氰胺配施对菠菜体内硝酸盐、亚硝酸盐含量影响的研究. 土壤通报, 2005, 36 (1): 62-67
- [3] 张英鹏, 徐旭军, 林咸永, 章永松, 张丽苏, 陈甜甜. 供氮水平对菠菜产量、硝酸盐和草酸累积的影响. 植物营养与肥料学报, 2004, 10 (5): 494-498
- [4] 盛锦寿. 泉州蔬菜硝酸盐污染的调查及探讨. 土壤肥料, 2002 (4): 23-25
- [5] 李群, 潘大丰, 陕方, 周向阳, 张兵, 金肇熙, 王多加, 钟娇娥. 抑制小白菜、菜心硝酸盐积累的栽培技术研究. 土壤通报, 2005, 36 (3): 387-390
- [6] 柳勇, 何江华, 杜应琼, 夏运生, 魏秀国, 朱立安. 施氮、钾和钼对菠菜不同生长阶段硝态氮累积影响研究初报. 植物营养与肥料学报, 2005, 11 (3): 363-368
- [7] 农业部全国土壤肥料总站. 土壤分析技术规范. 北京: 中国农业出版社, 1993
- [8] 蔡顺香. 紫外分光光度法快速测定蔬菜中的硝酸盐含量. 福建农业报, 2005, 20(2): 125-127
- [9] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京: 科学出版社, 2002
- [10] 汪建飞, 邢素芝, 于群英, 李孝良. 结球甘蓝 NKMg 肥配施数学模型的研究. 土壤, 2004, 36(4): 412-415
- [11] 金雪霞, 范晓晖, 蔡贵信. 菜地土氮素的主要转化过程及其损失. 土壤, 2005, 37(5): 492-499
- [12] 中华人民共和国国家标准. 农产品安全质量无公害蔬菜安全要求 (GB18406.1-2001). 北京: 中国标准出版社, 2001
- [13] 刘杏认, 任建强, 甄兰. 蔬菜硝酸盐累积及其影响因素的研究. 土壤通报, 2003, 34 (4): 356-361
- [14] 熊国华, 林咸永, 章永松, 郑绍建, 周根娣. 环境因素对蔬菜累积硝酸盐影响的研究进展. 土壤通报, 2004, 35 (3): 362-365