

基于氮磷钾浓度的水培生菜硝酸盐含量模型研究

张 栋, 胡笑涛, 王文娥, 苏苑君, 乔 源, 王 瑞

(西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:以生菜为研究对象, 设计了 3 因素(N、P、K)5 水平二次回归通用旋转组合试验, 建立了硝酸盐品质指标对 3 个因素的回归数学模型, 分析了氮、磷、钾浓度对生菜硝酸盐含量的影响, 以定量揭示水培生菜硝酸盐含量对营养液主要营养元素氮磷钾浓度的关系。结果表明: 对硝酸盐的影响顺序是 $N > P > K$; 氮磷钾对硝酸盐含量具有一定的负效应。其中氮对硝酸盐含量的影响较大, 适当提高磷钾浓度有利于抑制硝酸盐含量的积累。

关键词:生菜; 硝酸盐; 氮; 磷; 钾; 回归模型

中图分类号:S 636.206⁺.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)06-0006-04

植物工厂是一种通过设施内高精度环境控制, 实现作物周年连续生产的高效农业系统, 是由计算机对作物生育过程的温度、湿度、光照、CO₂ 浓度以及营养液等环境要素进行自动控制, 不受或者很少受自然条件制约的省力型生产方式^[1]。蔬菜品质不仅关系到植物工厂的生产经济效益, 也关系消费者的身心健康, 因而越来越受到重视。水培叶菜类蔬菜品质普遍存在硝酸盐含量过高的问题, 因此研究该品质指标对主要营养元素浓度的响应过程对于改善品质, 实现营养液精准动态调控具有重要意义。

前人在这方面已有相关研究。周根娣等^[2]研究表明, 在氮肥一定的情况下, 增施磷肥有利于抑制硝酸盐的积累; PFLUGER 等^[3]研究表明, 氮钾平衡可以控制菠菜体内的硝酸盐积累。王文军等^[4]研究结果表明, 氮钾肥配施可以提高花菜维生素 C 含量, 且钾肥的作用比氮肥更为明显; 然而目前关于蔬菜品质的研究, 多集中在水肥单因子和不同肥料配比的研究及水肥耦合等对品质的影响上, 对于主要营养液因子氮磷钾多因子及其耦合对品质的影响研究较少。现以生菜为研究对象, 采用 3 因素二次回归通用旋转组合设计, 通过回归分析定量研究了氮、磷、钾 3 个因子及其交互对生菜硝酸盐含量的影响, 以期为实现生菜优质高产提供理论指导。

第一作者简介:张栋(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为农业工程理论与技术。E-mail: mzsqsy1990@163.com.

责任作者:胡笑涛(1972-), 男, 博士, 教授, 现主要从事节水灌溉理论与技术等研究工作。E-mail: huxiaotao11@nwsuaf.edu.cn.

基金项目:国家“863”计划资助项目(2013AA103004)。

收稿日期:2015-12-14

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为香港“玻璃脆”散叶生菜。

1.2 试验方法

试验在西北农林科技大学旱区农业研究院植物工厂进行。其中光照强度为 2 500 lx, 光照时间为 12 h/d, 植物工厂内昼夜温为 25℃/18℃。供试生菜定植于 42 cm×27 cm 的泡沫培养箱中, 每箱定植 4 株, 培养期 40 d。每隔 2 d 调节 pH 至 5.5~6.0。生长过程中利用充气泵充气。除磷素外其它元素浓度在山崎配方基础上设置。除母液外, 试验所用水均来自当地自来水, 钙镁离子含量较高, 为 52.24 mg/L。微量元素采用通用配方^[3,5], EDTA-NaFe 含量为 56 mg/L。试验开始时每个水培箱中营养液为 10 L, 对应水深为 9.7 cm。试验于 2014 年 11 月 20 日开始, 至 2014 年 12 月 20 日结束。试验采用 3 因素二次回归通用旋转组合设计(表 1)^[6]。共 20 个处理(表 2), 3 次重复。随机区组排列。

表 1 试验因子及水平编码值

Table 1 Experimental factor and level code value

因子	上限	下限	零水平	Δ_i	无量纲编码数 Dimensionless coding				
Factor	Upper limit	Low limit	Zero level		+r	1	0	-1	-r
N	9	3.0	6.0	1.78	9	4.22	6.0	7.78	3.0
P	1	0.2	0.6	0.24	1	0.36	0.6	0.84	0.2
K	6	2.0	4.0	1.19	6	2.81	4.0	5.19	2.0

1.3 项目测定

采用育苗移栽的方式, 生菜长到 6 叶 1 心时, 清水洗净根部后用海绵包裹定植于水培箱上, 每箱种植 4 棵, 每隔 2 d 用 1 mmol/L 的 H₂SO₄ 或者 1 mmol/L 的 NaOH 调节营养液的 pH。自定植后开始, 定植后第 40 天取长势相近的 3 株生菜, 用于测定生菜品质。硝酸盐

含量采用比色法测定^[7]。维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定^[7]。

1.4 数据分析

试验数据用 Excel 完成。应用 DPS 7.05 和 SPSS 软件进行统计分析,建立生菜品质指标与各试验因子之间的数学模型;应用 Sigmaplot 软件进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 目标函数数学模型的建立与检验

表 2 为品质测定结果,以硝酸盐为目标函数,以施氮量、施磷量、施钾量为决策变量,对数据进行计算机处理,得到生菜品质对 3 个因素的回归模型。

表 2 试验方案及各因子编码值

Table 2 Trial protocol and each factor code value

处理	X_1 (N)	X_2 (P)	X_3 (K)	硝酸盐含量
Treatment	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	Nitrate content/ $(\mu g \cdot g^{-1})$
1	1	1	1	2 671
2	1	1	-1	2 916
3	1	-1	1	3 065
4	1	-1	-1	3 445
5	-1	1	1	1 898
6	-1	1	-1	2 013
7	-1	-1	1	2 112
8	-1	-1	-1	1 752
9	+r	0	0	3 405
10	-r	0	0	1 224
11	0	+r	0	2 735
12	0	-r	0	3 014
13	0	0	+r	1 794
14	0	0	-r	2 345
15	0	0	0	2 234
16	0	0	0	2 252
17	0	0	0	2 284
18	0	0	0	2 202
19	0	0	0	2 195
20	0	0	0	2 212

结合不同营养液浓度条件下生菜中硝酸盐的含量的结果,获得生菜硝酸盐含量的回归方程为: $Y=2\ 228.127+585.026X_1-98.496X_2-95.677X_3+41.116X_1^2+239.057X_2^2-45.483X_3^2-121.250X_1X_2-108.750X_1X_3+25.236X_2X_3$ 。式中, X_1 、 X_2 分别为氮磷钾用量的编码值(下同)。对模型进行显著性检验,模型 $F_{失拟}=2.136 < F_{0.05}=5.05$,失拟不显著。 $F_{拟合}=45.770\ 6 > F_{0.05}=2.91$,回归关系达到显著水平。

F 检验结果表明,产量与各因素拟合很好,能够正确反应氮磷钾施用量与硝酸盐含量之间的关系,方程失拟不显著。显著性效果及互作效果如表 3 所示。

2.2 氮磷钾对生菜硝酸盐含量的影响

2.2.1 单一因素对硝酸盐含量的影响 该试验设计是正交实验,各偏回归系数彼此独立,因此可以将其它因素固定在零水平,对回归方程进行降维处理,分别得到各因素对生菜硝酸盐含量的偏回归方程: $Y_1=2\ 228.127+585.026X_1+41.116X_1^2$; $Y_2=2\ 228.127-98.496X_2+$

$239.057X_2^2$; $Y_3=2\ 228.127-95.677X_3-45.483X_3^2$; 由图 1 可知,硝酸盐含量随 P 浓度的升高呈先下降后上升的趋势,在 P 肥浓度编码值为 -0.21(0.55 mg/L)时,硝酸盐含量最低。随着 K 浓度的升高,硝酸盐含量先小幅度升高然后下降,当 K 浓度编码值为 0.04(4.05 mg/L)时,硝酸盐含量达到最大值。当磷钾固定在零水平时,硝酸盐含量随 N 浓度的升高呈上升趋势。试验表明,氮、磷、钾对硝酸盐含量具有一定的负效应。氮对硝酸盐含量的影响较大。

表 3 模型方差分析及检验

Table 3 Model analysis of variance and inspection

方差来源	硝酸盐含量 Nitrate content/ $(\mu g \cdot g^{-1})$	t 值	P 值
Source	Partial correlation	t value	P value
X_1	1.022 0	19.357 8	0.000 0
X_2	-0.754 5	3.169 1	0.013 8
X_3	-0.719 1	3.145 4	0.016 3
X_1^2	0.400 0	1.334 7	0.235 7
X_2^2	0.972 7	8.201 6	0.000 0
X_3^2	-0.420 4	1.457 9	0.191 8
X_1X_2	-0.730 5	2.985 7	0.018 9
X_1X_3	-0.660 6	2.690 6	0.030 3
X_2X_3	-0.306 2	1.028 7	0.364 4

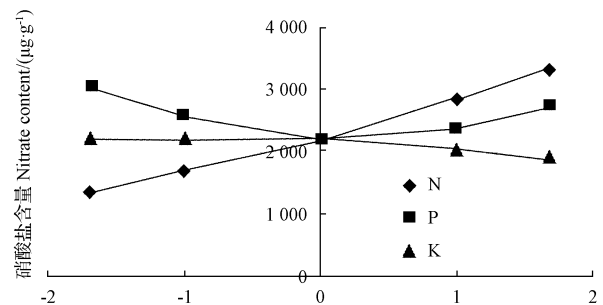


图 1 氮磷钾单因子对硝酸盐含量的影响

Fig. 1 The influence of NPK on the nitrate content

2.2.2 两因素对生菜硝酸盐含量的耦合效应 生菜硝酸盐含量受到氮、磷、钾多种营养因子的影响,因子之间存在相互抑制或促进的作用,因而需要对其进行耦合效应分析。试验中共有 3 个交互项,其中 X_1X_2 、 X_2X_3 达到显著水平。降维法处理后,得到如下子模型: $Y_{NP}=2\ 228.127+585.026X_1-98.496X_2+41.116X_1^2+239.057X_2^2-121.250X_1X_2$; $Y_{NK}=2\ 228.127+585.026X_1-95.677X_3+41.116X_1^2-45.483X_3^2-108.750X_1X_3$; $Y_{PK}=2\ 228.127-98.496X_2-95.677X_3+239.057X_2^2-45.483X_3^2-42.500X_2X_3$ 。氮磷对硝酸盐含量的耦合效应表明,氮磷对硝酸盐含量为负交互作用,由图 2a 可知,二次曲面为开口向上的凹面型,交互作用显著。由表 4 可以看出,当磷素一定时,硝酸盐含量随氮素浓度的降低而降低。当氮素一定时,硝酸盐含量随磷素浓度的升高呈先下降后上升的趋势,但上升幅度不明显。同时可

以看出,当氮磷比较大时,硝酸盐含量较高。但当磷浓度处于高水平时,硝酸盐含量显著降低。当氮浓度处于零水平,而磷浓度处于最高水平时,硝酸盐含量最低,为 1 360 $\mu\text{g/g}$ 。可见,提高磷浓度有利于抑制硝酸盐含量的积累。氮钾对硝酸盐含量的耦合效应表明,氮钾对硝酸盐含量为负交互作用,由图 2b 可知,二次曲面为开口向上的凹面型,交互作用显著。由表 5 可以看出,当

氮素一定时,硝酸盐含量随钾浓度的升高而降低。当钾浓度处于中间水平以下时,硝酸盐含量随氮浓度的提高而呈下降趋势;当钾浓度处于中间水平以上时,硝酸盐含量随氮浓度的提高呈现先增加后降低的趋势。当氮处于最低水平,钾处于最高水平时,硝酸盐含量最低,为 1 085.02 $\mu\text{g/g}$ 。可见较高的钾浓度有利于抑制硝酸盐的积累,合理施用钾素是抑制硝酸盐积累的重要措施。

表 4 氮磷对硝酸盐含量的耦合效应

Table 4 The coupling effect of nitrogen and phosphorus on nitrate content

氮浓度编码值 Nitrogen coded values	磷浓度编码值 Phosphorus concentrations of coded values					统计参数 Statistical parameter		
	-1.682	-1	0	1	1.682	X	S	CV
-1.682	4 513.49	3 900.20	3 070.12	2 322.267	1 859.40	2 322.27	1 092.89	3.48
-1	3 869.96	3 313.07	2 565.68	1 900.52	1 494.05	1 900.52	978.61	3.72
0	3 328.46	2 854.27	2 228.13	1 684.217	1 360.44	1 684.22	811.12	3.54
1	3 265.08	2 873.58	2 368.69	1 946.028	1 704.94	1 946.03	643.78	2.65
1.682	3 496.08	3 160.98	2 738.78	2 398.811	2 214.12	2 398.81	529.80	0.19
统计参数 Statistical parameter	X	1 726.59	2 050.37	2 594.28	3 220.42	3 694.62		
	S	333.14	301.14	329.04	426.79	514.60		
	CV	0.19	0.15	0.13	0.13	0.14		

表 5 氮钾对硝酸盐含量的耦合效应

Table 5 The coupling effect of nitrogen and potassium on nitrate content

氮浓度编码值 Nitrogen coded values	钾浓度编码值 Potassium concentration coded values					统计参数 Statistical parameter		
	-1.682	-1	0	1	1.682	X	S	CV
-1.682	3 668.38	3 069.44	2 260.38	1 533.55	1 085.02	2 323.35	1 063.83	4.58
-1	3 561.58	3 013.21	2 278.32	1 625.66	1 227.71	2 341.30	961.34	4.11
0	3 328.46	2 854.27	2 228.13	1 684.22	1 360.44	2 291.10	811.12	3.54
1	3 004.39	2 604.36	2 086.97	1 651.81	1 402.19	2 149.94	661.02	3.07
1.682	2 731.19	2 381.75	1 938.52	1 577.53	1 378.50	2 001.50	558.77	2.79
统计参数 Statistical parameter	X	1 290.77	1 614.55	2 158.46	2 784.61	3 258.80		
	S	133.48	59.78	144.13	288.54	389.67		
	CV	0.19	0.15	0.13	0.13	0.14		

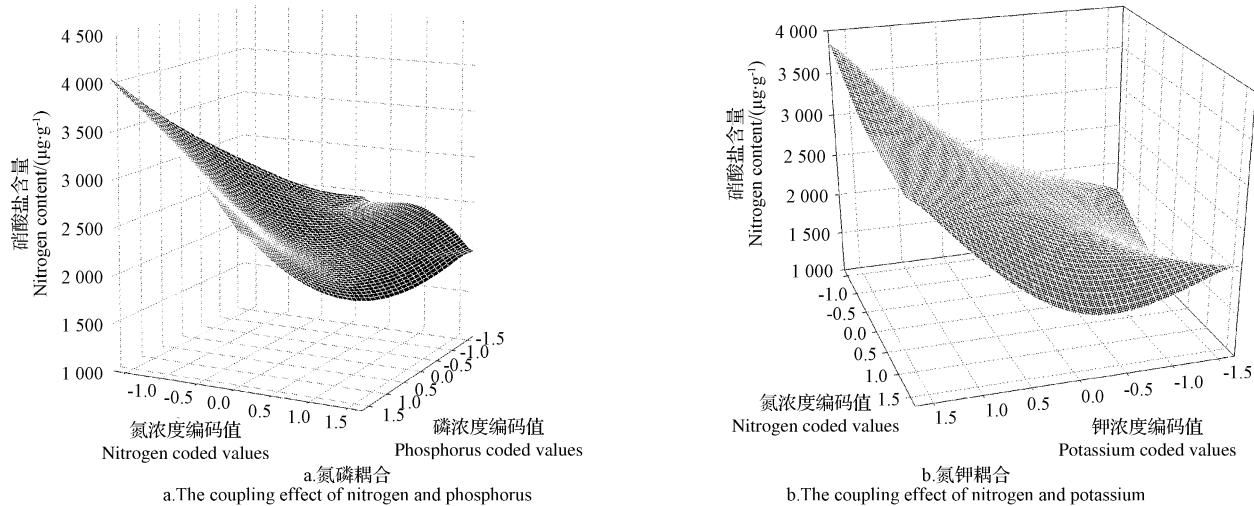


图 2 氮磷钾耦合对硝酸盐含量的影响

Fig. 2 N、P、K coupling effects on nitrate content

3 讨论

营养液中氮磷钾养分的平衡以及相互作用对蔬菜品质形成具有显著影响。已有研究表明^[8-10],氮是造成

硝酸盐积累的主要因子,硝酸盐含量会随着施氮量的增加而上升。这与该试验的研究结论一致。这主要是由于在水培条件下氮肥会很快水解硝化成硝态氮,供氮水

平较高,导致叶菜吸收的硝态氮增加。虽然同时硝酸还原酶的活性也随之提高,会促进硝态氮的还原,但是吸收量大于还原量仍然导致了硝态氮的积累^[11]。

磷以多种形式参与植物的新陈代谢。缺磷会提高硝酸还原酶和过氧化物酶活性,同时游离氨和水溶性氨基酸的积累也多^[12]。目前关于磷肥对硝酸盐积累的影响已有不少研究。高祖明等^[12]研究结果表明,氮磷比过大是造成硝酸盐积累的根本原因;王朝辉等^[11]指出,当磷不足时,增加磷肥的施用可以降低硝酸盐的积累,但当磷肥过多时,增施磷肥一方面能促进作物对硝态氮的吸收,另一方面也会增强硝酸盐的还原作用。该试验研究结果表明,提高磷浓度有利于抑制硝酸盐的积累,这与周根娣等^[2]研究的结论是一致的。

钾参与作物对硝态氮的吸收、还原以及代谢的全过程^[13]。前人对钾素对硝酸盐含量影响的研究看法不一。朗文培等^[14]指出,施用钾肥会提高生菜体内硝酸盐含量;牛晓丽等^[15]研究表明,增施钾肥可以降低番茄果实中硝酸盐含量。在该试验条件下,研究结果表明,较高的钾浓度有利于抑制生菜体内硝酸盐的积累,这主要是钾素会提高作物体内硝酸还原酶的活性,促进蛋白质的合成,降低硝酸盐在作物体内的积累^[16]。

4 结论

试验建立了氮、磷、钾 3 个因素对硝酸盐含量的影响模型,模型经检验达到显著水平,可以进行分析与预测。说明氮磷钾合理配施能够有效改善作物品质,当磷素一定时,硝酸盐含量随氮素浓度的降低而降低。当氮素一定时,硝酸盐含量随磷素浓度的升高呈先下降后上升的趋势,但上升幅度不明显。当氮素一定时,硝酸盐含量随钾浓度的升高而降低。当钾浓度处于中间水平

以下时,硝酸盐含量随氮浓度的提高而呈下降趋势;当钾浓度处于中间水平以上时,硝酸盐含量随氮浓度的提高呈现先增加后降低的趋势。

参考文献

- [1] 杨其长,魏灵玲,刘文科,等. 植物工厂系统与实践[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- [2] 周根娣,卢善玲. 磷钾肥、光照、贮藏加工对蔬菜硝酸盐含量的影响[J]. 上海农业学报,1991,7(2):53-56.
- [3] PFLUGER R, MENGEL K. The photochemical activity of chloroplasts from various plants with different potassium nutrition[J]. Plant and Soil, 1972,36:417-425.
- [4] 王文军,朱宏斌,武际,等. 氮磷钾配施对花菜产量、品质和养分吸收的影响[J]. 安徽农业科学,2002,30(5):676-677.
- [5] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京:中国农业出版社,2011.
- [6] 袁志发,周静芋. 试验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2000:366-385.
- [7] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,1999.
- [8] 傅志坚,罗安程. 设施栽培蔬菜硝酸盐积累问题[J]. 浙江农业科学,2004(2):80-82.
- [9] 王庆,王丽,赫崇岩,等. 过量氮肥对不同蔬菜中硝酸盐积累的影响及调控措施研究[J]. 农业环境保护,2000,19(1):46-49.
- [10] 郭熙盛,吴礼树. 施用氮钾肥料对蔬菜品质的研究进展[J]. 华中农业大学学报,2002,21(6):593-598.
- [11] 王朝辉,李生秀,田霄鸿. 不同氮肥用量对蔬菜硝态氮累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(1):22-28.
- [12] 高祖明,张耀栋,张道勇,等. 氮磷钾对叶菜硝酸盐积累和硝酸还原酶、过氧化物酶活性的影响[J]. 园艺学报,1989,16(4):294-297.
- [13] 唐静. 苣荬菜和大白菜钾肥效应研究[D]. 重庆:西南大学,2013.
- [14] 朗文培,艾绍英,王朝辉,等. 钾肥种类及用量对生菜生长和品质效应的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2008,27(5):1946-1950.
- [15] 牛晓丽,胡田田. 水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报,2013,11(2):1-6.
- [16] 祖艳群,林克惠. 氮钾营养的交互作用及其对作物产量和品质的影响[J]. 土壤肥料,2000(2):3-7.

Main Quality Index Model of Nitrate Content in Hydroponic Lettuce Basing on NPK Concentration

ZHANG Dong, HU Xiaotao, WANG Wen'e, SU Yuanjun, QIAO Yuan, WANG Rui

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Lettuce was used as test material, two indexes regression mathematical model on nitrates as established using a pot experiment with three factors in five levels, in order to reveal the relationship between nitrates and main nutrient elements (N, P, K) in hydroponics. The results showed that under the condition of this experiment, the influence of three factors on nitrate was $N > P > K$; N, P, K had negative effects on the nitrate content. N had a bigger effect on the concentration of nitrate; improving the concentration of NK appropriately was conducive to suppress the accumulation of nitrate content.

Keywords: lettuce; nitrate; N; P; K; regression model