

水培生菜氮磷钾产量模型的构建与分析

张 栋^{1,2}, 胡笑涛¹, 王文娥¹, 苏苑君¹, 乔 源¹, 王 瑞¹

(1. 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;

2. 中国电力建设集团 贵阳勘测设计院有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘 要:为定量揭示水培生菜产量对营养液主要营养元素氮磷钾浓度的关系,以香港“玻璃脆”散叶生菜为试材,设置不同氮磷钾营养液配方,采用三因素(N、P、K)五水平二次通用旋转组合设计试验,分析了水培生菜在前、后期氮磷钾对产量的影响,建立了生菜产量对三因素的回归数学模型。结果表明:前期三因素对产量的影响顺序是 $N > K > P$,后期为 $N > P > K$;各因素间存在着交互作用,营养液中氮离子浓度和钾离子浓度均呈正相关,磷离子与钾离子浓度均呈负相关;在生长前期,当氮磷钾浓度分别为 $8.46, 0.62, 2.57 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,产量最高为 $12.26 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$;在生长后期,当氮磷钾浓度分别为 $4.65, 0.69, 2.43 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,产量最大为 $88.27 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。

关键词:水培生菜;氮磷钾;产量;数学模型

中图分类号:S 636.206⁺.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)14-0011-06

氮磷钾是对植物生长发育影响最大的3种元素^[1],研究植物工厂营养液氮磷钾的合理配施是构建高产高效模型的关键。前人研究表明,产量的形成受各营养因子综合作用的影响^[2]。杨振超等^[3]研究结果表明,对生菜产量的影响顺序为 $N > P > K$,且氮磷钾对产量的影响均呈开口向下的抛物线。COOKE等^[4]研究NK交互作用发现,增施氮肥时,增加氮供应能够提高K肥的增产效果。董燕等^[5]研究表明,增施磷肥能明显提高产量。这些研究都是着眼于整个生育期,但是作物在不同生育期的需肥规律是不一致的^[6],目前对作物在不同的生长阶段需求量是否变化以及对产量的影响还缺乏研究。近年来,国内对氮磷钾的合理配施的研究主要集中在果蔬类,如番茄、黄瓜^[7]等,对叶菜类,如生菜等的研究主要集中在单因素或二因素交互以及水肥耦合^[8-12]等方面,对氮磷钾三因素配施研究较少且不深入。

该试验运用回归设计建立了氮磷钾与产量形成的关系方程,以期水培生菜高效生产提供理论依据。在日本山崎配方^[13]的基础上,通过设计不同的氮磷钾处理,探讨氮磷钾配施(交互作用)对生菜生长、品质及养分含量的影响,研究各营养因子在生菜生长发育中的重

要程度,建立生菜高产、高效、优质模式及回归模型,以期实现蔬菜生长发育过程中营养液的智能化控制,为水培生菜的工厂化生产进行探索。

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。采用育苗移栽的方式,在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室人工光植物工厂中进行,期间设置光照强度为 2500 lx ,光照时间为 $12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$,植物工厂内昼夜温为 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}/18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。生菜长到六叶一心时,清水洗净根部后用海绵包裹定植于水培箱上,水培箱规格为 $28 \text{ cm} \times 37 \text{ cm} \times 17.2 \text{ cm}$,营养液为 10 L ,对应水深为 9.7 cm ,为深液流栽培方式。每箱种植4棵,生长中后期利用充气泵供氧。试验于2014年11月20日开始,至2014年12月20日结束,培养期40 d。

1.2 试验方法

试验采用三因素二次回归通用旋转组合设计^[14](表1),共20个处理,3次重复。除氮磷钾外其它元素浓度在山崎配方基础上设置。微量元素采用通用配方^[13],EDTA-NaFe含量为 $56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表2)。

表 1 试验因子及水平编码值

Table 1 The experimental factor and level code value

因子	上限	下限	零水平	无量纲编码数量	Dimensionless quality			
Factor	Upper limit	Lower limit	Zero level	Δ_i	+r	1	0	-1
N	9	3	6	1.78	9	4.22	6	7.78
P	1	0.2	0.6	0.24	1	0.36	0.6	0.84
K	6	2	4	1.19	6	2.81	4	5.19

第一作者简介:张栋(1987-),男,硕士研究生,现主要从事农业工程理论与技术等研究工作。E-mail:759439326@qq.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”计划课题资助项目(2013AA103004)。

收稿日期:2016-03-22

表 2 营养液中微量元素用量

Table 2 The dosage of trace element in nutrient solution $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

化合物 Compound	$\text{Na}_2\text{Fe-EDTA}$	H_3BO_3	$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
含量 Content	30.00	3.00	2.13	0.22	0.08

1.3 项目测定

自定植后开始,分别在第 10 天和第 40 天采用百分之一天平称量 1 次生菜鲜样质量。

1.4 数据分析

应用 DPS 7.05 和 SPSS 软件进行统计分析,建立生菜产量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 产量目标函数数学模型的建立与检验

表 3 为不同处理的阶段和最终产量测定结果。以产量(y)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,得到生菜产量在不同阶段对三因素的回归模型。

生长前期影响生菜产量的回归模型为 $Y=9.948+1.560X_1-0.150X_2-1.239X_3-1.159X_1^2-1.516X_2^2-1.197X_3^2+0.278X_1X_2-1.186X_1X_3-0.072X_2X_3$ (1); 生长后期影响生菜产量的回归模型为: $Y=82.749-4.5201X_1+1.680X_2+0.873X_3-5.597X_1^2-4.87X_2^2-0.783X_3^2+0.625X_1X_2+3.125X_1X_3-1.625X_2X_3$ (2); 式中: X_1 、 X_2 、 X_3 分别为氮磷钾用量的编码值(下同)。

对式(1)、(2)进行显著性检验,模型(1) $F_{\text{失拟}}=0.723 < F_{0.05}=5.05$,失拟不显著。 $F_{\text{拟合}}=25.6931 > F_{0.05}=2.91$, $R^2=0.96$,回归关系达到显著水平。

模型(2) $F_{\text{失拟}}=2.5199 < F_{0.05}=5.05$,失拟不显著。 $F_{\text{拟合}}=5.0223 > F_{0.05}=3.02$, $R^2=0.91$,表明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产量之间的关系,方程失拟不显

表 3 试验方案及各因子编码值

Table 3 The text plan and code value of each factor

处理 Treatment	X_1	X_2	X_3	产量 Yield/(g·株 ⁻¹)	
				前期 Early stage	后期 Later stage
1	1	1	1	4.83	68.91
2	1	1	-1	9.01	65.82
3	1	-1	1	3.11	66.94
4	1	-1	-1	7.40	61.01
5	-1	1	1	4.13	71.09
6	-1	1	-1	4.15	84.12
7	-1	-1	1	4.74	75.03
8	-1	-1	-1	2.42	78.50
9	+r	0	0	4.45	65.06
10	-r	0	0	4.31	71.31
11	0	+r	0	6.78	74.25
12	0	-r	0	4.11	64.98
13	0	0	+r	2.53	85.69
14	0	0	-r	9.56	75.00
15	0	0	0	9.95	83.31
16	0	0	0	10.01	82.22
17	0	0	0	10.06	82.01
18	0	0	0	10.16	81.79
19	0	0	0	9.87	82.03
20	0	0	0	10.69	84.85

著,可以进行进一步的分析与预测^[15]。

2.2 氮磷钾施用量与产量的效应分析

2.2.1 主效应分析 由于回归模型本身已经过无量纲编码处理,其各项偏回归系数已经标准化^[16],因此,可以用一次项系数绝对值的大小进行主效应分析^[17]。对模型(1)中各项系数进行 t 检验可知,氮钾的一次效应和二次效应均达极显著水平,磷的二次效应也达到极显著水平;氮磷和氮钾的互作效应达到显著水平。三因素对产量的影响程度的大小为 $N > K > P$ 。对模型(2)中各项系数进行 t 检验可知,氮的一次效应和二次效应及磷的二次效应达到极显著水平,氮钾交互作用达到显著水平,磷钾互作效应达到 0.25 显著水平,表明施氮量与施钾量、施磷量与施钾量之间存在显著的耦合作用。三因素对产量的影响程度的大小为 $N > P > K$ 。

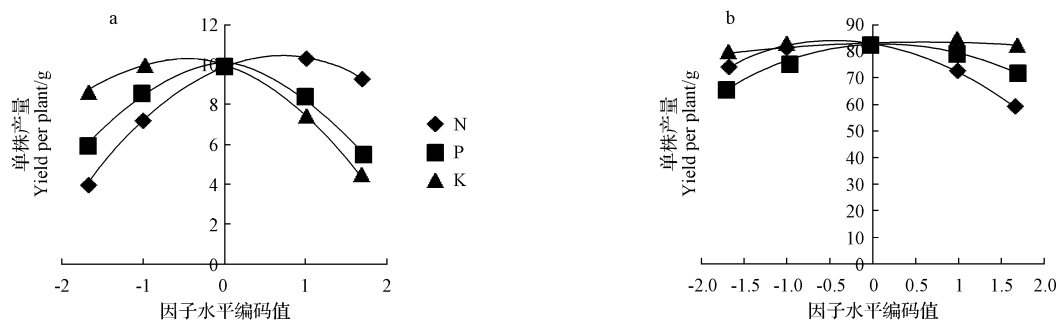
表 4 模型方差分析及检验

Table 4 The analysis and inspection of the model

方差来源 Source	10 d			40 d		
	偏相关 Patial Correlation	t 值 t -value	P 值 P -value	偏相关 Patial Correlation	t 值 t -value	P 值 P -value
X_1	0.967 4	7.970 8	0.000 0	-0.920 3	5.480 7	0.000 4
X_2	-0.232 3	0.781 7	0.485 7	0.550 9	2.070 2	0.084 8
X_3	-0.970 3	6.449 0	0.000 1	0.334 2	1.089 6	0.364 1
X_1^2	-0.962 5	6.275 5	0.000 1	-0.949 1	6.819 2	0.000 1
X_2^2	-1.002 0	7.888 9	0.000 0	-0.950 1	6.074 8	0.000 2
X_3^2	-0.942 6	6.622 7	0.000 1	-0.315 5	1.005 1	0.378 3
X_1X_2	0.337 1	1.114 2	0.313 7	0.182 1	0.596 3	0.635 0
X_1X_3	-0.847 0	4.812 5	0.001 0	0.666 9	2.964 8	0.021 8
X_2X_3	-0.089 3	0.307 3	0.784 6	-0.443 8	1.456 9	0.183 3

2.2.2 单因素对产量的效应分析 试验设计是正交实验,各偏回归系数彼此独立^[18],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产量的偏回归方程。对模型(1)进行降维处理得到: $Y_1 = 9.948 + 1.560X_1 - 1.159X_1^2$; $Y_2 = 9.948 - 0.150X_2 - 1.516X_2^2$; $Y_3 = 9.948 - 1.239X_3 - 1.197X_3^2$;由该3个方程可以绘制单因素与生菜产量的关系曲线。由图1a可见,氮磷钾三者对产量有明显的正交互作用。在生长前期,氮磷钾浓度对生菜产量的关系均为开口向下的抛物线。单施氮肥时,产量随氮浓度的升高呈现先增后降的趋势,在氮浓度编码值0.673处,产量达到最大值 $10.47 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$,随后产量开始下降。单施磷肥时,产量在编码值范围 $-1.682 \sim -0.050$ 都呈上升趋势,在接近零水平时达到最高,为 $9.95 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。单施钾肥时,产量只在 $-1.682 \sim -0.517$ 阶段内有一个短暂的上升期,在编码值 -0.517 处达到最高,为 $10.27 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。说明

在生菜生长前期,钾的浓度不宜太高,应保持在较低水平,磷的浓度应保持在中间水平,可以适当提高氮的浓度,将氮的浓度保持在高水平,以更好的促进生菜生长。对模型(2)进行降维处理得到 $Y_1 = 82.749 - 4.520X_1 - 5.597X_1^2$; $Y_2 = 82.749 + 1.680X_2 - 4.875X_2^2$; $Y_3 = 82.749 + 0.873X_3 - 0.783X_3^2$;生长后期单因素对产量的影响曲线如图1b所示。在整个生育期,氮磷钾施用量对生菜产量的关系均为开口向下的抛物线。说明氮磷钾的增产作用都有一定限度。当磷钾处于中间水平时,产量随施氮量的增大而不断提高,但当施氮量达到一定水平时,产量开始下降,在施氮量编码值为 -0.404 时,生菜产量达到最大。磷的变化与氮大体一致,在 0.172 时达到产量的最大值。钾在整个阶段的增产作用不明显。因此,在生长后期,将氮磷钾浓度保持在中间水平是很好的增产策略。



注:a. 前期各因子对生菜产量的影响;b. 后期各因子对生菜产量的影响。

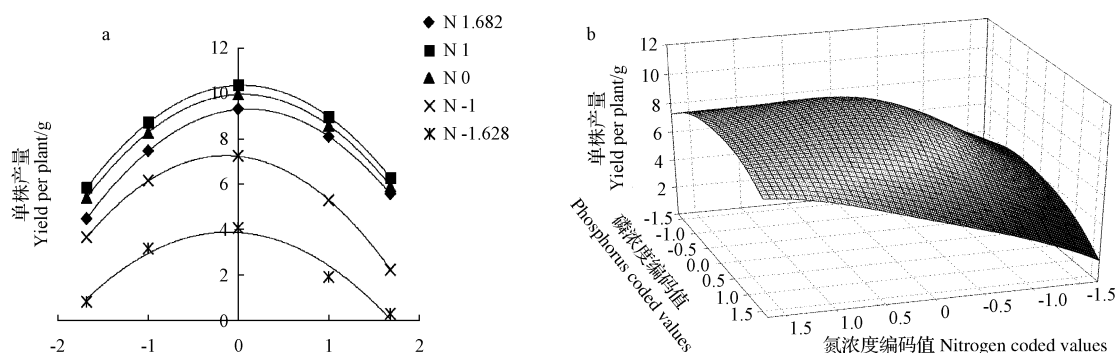
Note: a. The influence of experimental factors on yield in the early stage of the growth; b. The influence of experimental factors on yield in the early stage of the growth.

图1 不同生育阶段各试验因子对产量的影响曲线

Fig. 1 Curves of the influence of experimental factors on yield during different stage of growth

2.2.3 二因素对产量的耦合效应分析 生菜产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。模型(1)中存在3个显著的交互项,对模型进行降维处理,得到氮磷钾互作的效应模型为 $Y_{12} = 9.948 + 1.560X_1 - 0.150X_2 - 1.159X_1^2 - 1.516X_2^2 + 0.278X_1X_2$; $Y_{13} = 9.948 + 1.560X_1 - 1.239X_3 - 1.159X_1^2 - 1.197X_3^2 - 1.186X_1X_3$; $Y_{23} = 9.948 - 0.150X_2 - 1.239X_3 - 1.516X_2^2 - 1.197X_3^2 - 0.0723X_2X_3$;氮磷对产量的耦合效应为正效应,如表4所示。氮磷互作效应见图2a、b。由图2a可知,产量受到氮磷的交互作用影响。当磷素一定时,产量随氮浓度的增大而先上升后下降,在氮浓度编码值中间水平(0~1)时达到最大。当氮浓度一定时,产量随磷浓度的增大也呈现先上升后下降的趋势。由图2b可知,氮磷对产量的耦合效应呈开口向下的凸面形状,氮磷浓度过高或者过低都会引起产量的下降。当氮磷浓度均处于最低

水平时,产量最低。氮磷任一元素处于较高水平时,产量均很低。只有当二者都处于中间水平时,产量才达到最大值。说明生菜在生长前期,氮磷配施能够提高产量,但浓度不宜过高。氮钾对产量的耦合效应为负效应。氮钾互作效应见图3a、b。由图3a可知,当钾浓度一定时,产量随氮浓度的提高先上升后下降,在氮浓度编码值中间水平(0~1)时达到最大。当氮浓度处于最高水平时,产量随钾浓度的增大呈下降的趋势。由图3b可知,氮钾浓度过高或过低,产量都很低。氮浓度处于中间水平,钾浓度处于较低水平时,产量最高。磷钾对产量的耦合效应为负效应,见图4a、b。由图4a可以看出,产量受到磷钾的交互作用影响。当磷素一定时,产量随钾浓度的增大而先上升后下降,在钾浓度编码值中间水平(-1~0)时达到最大。当钾浓度一定时,产量随磷浓度的增大也呈现先上升后下降的趋势。由图4b可知,磷钾对产量的耦合效应呈开口向下的凸面形状,磷

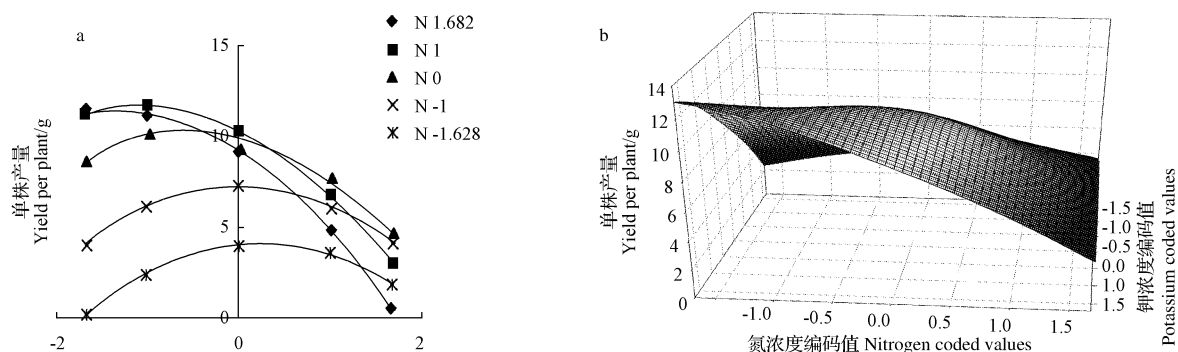


注:a. 氮磷耦合对产量的影响曲线;b. 氮磷耦合对产量的影响曲面。

Note:a. Curves of the nitrogen and phosphorus coupling effect on yield; b. Surface of the nitrogen and phosphorus coupling effect on yield.

图 2 生长前期氮磷耦合对产量的影响

Fig. 2 The nitrogen and phosphorus coupling effect on yield in the early stage of growth

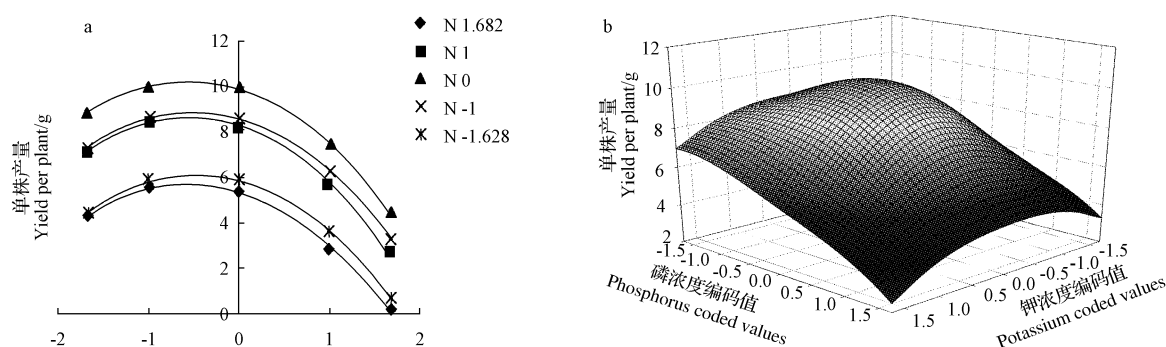


注:a. 氮钾耦合对产量的影响曲线;b. 氮钾耦合对产量的影响曲面。

Note:a. Curves of the nitrogen and potassium coupling effect on yield; b. Surface of the nitrogen and potassium coupling effect on yield.

图 3 生长前期氮钾耦合对产量的影响

Fig. 3 The nitrogen and potassium coupling effect on yield in the early stage of growth



注:a. 磷钾耦合对产量的影响曲线;b. 磷钾耦合对产量的影响曲面。

Note:a. Curves of the phosphorus and potassium coupling effect on yield; b. Surface of the phosphorus and potassium coupling effect on yield.

图 4 生长前期磷钾耦合对产量的影响

Fig. 4 The phosphorus and potassium coupling effect on yield in the early stage of growth

钾浓度过高或者过低都会引起产量的下降。当磷钾浓度均处于最高水平时,产量最低。当二者都处于中间水平时,产量达到最大值,为 $9.98 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。综上,在生菜生长前期,氮磷的浓度宜保持在中间水平,钾的浓度宜

保持在较低水平($-1.682 \sim -1$)范围内,在这种搭配条件下产量最高,效果最显著。对模型(2)进行降维处理,得到氮磷钾互作模型为 $Y_{12} = 82.749 - 4.520X_1 + 1.680X_2 - 5.597X_1^2 - 4.875X_2^2 + 0.625X_1X_2$; $Y_{13} = 82.749 -$

$4.520X_1 + 0.873X_3 - 5.597X_1^2 - 0.783X_3^2 + 3.125X_1X_3; Y_{23} = 82.749 + 1.678X_2 + 0.873X_3 - 4.875X_2^2 - 0.783X_3^2 - 1.625X_2X_3$; 生长后期氮磷对产量的耦合效应为正效应, 由表 5 可知, 产量随氮浓度和磷浓度的增加均呈先增加后降低的趋势。当氮磷处于中间水平时, 产量最大, 为 $82.75 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。当氮浓度处于最低水平, 而磷浓度处于最高水平时, 产量最低, 为 $40.93 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。当氮浓度处于较高水平 ($-1.682 \sim 0$) 时, 不管磷浓度处于何种水平, 产量都较其它水平高。说明较高的氮水平 ($-1.682 \sim 0$) 有助于产量的提高。同时磷的浓度也不宜过高。氮钾对产量的耦合效应为正效应, 由表 6 可知, 当氮浓度处于较高水平 ($1 \sim 1.682$) 时, 产量随钾浓度的升高呈持续上升趋势; 当氮浓度处于最低水平时, 产量随钾浓度的增大呈持续下降趋势; 当氮浓度处于中间水平 ($-1 \sim 0$) 时, 产量随钾浓度的变化呈先增大后下降的趋势。当氮处于中间水平, 而钾处于较低水平 ($-1.682 \sim -1$) 时, 产量最大, 为 $83.67 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$; 当氮浓度处于最高水平, 而钾浓度处于最低水平时, 产量最低, 为 $46.79 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。磷钾对产量的耦合效应为负效应, 由表 7 可知, 当磷浓度处于较高水平 ($1 \sim 1.682$) 时, 产量随钾浓度的增大呈持续下降趋势; 当磷浓度处于较低水平 ($-1.682 \sim -1$) 时, 产量随钾浓度的升高呈持续上升趋势; 当磷处于中间水平, 钾处于较高水平 ($1 \sim 1.682$) 时, 产量最大, 为 $82.84 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$; 当磷钾都处于最低水平时, 产量最小, 为 $57.84 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。这说明, 磷浓度保持在较低水平有利于产量的提高, 同时钾浓度也应保持在较高水平。

表 5 氮磷对生菜产量的耦合效应

Table 5 The nitrogen and phosphorus coupling effect on lettuce yield $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$

氮浓度编码值 Nitrogen coded values	磷浓度编码值 Phosphorus coded values				
	-1.682	-1	0	1	1.682
-1.682	59.67	66.10	66.13	54.96	40.93
-1	69.01	75.74	76.19	65.45	51.71
0	74.52	81.67	82.75	72.63	59.31
1	70.27	77.85	79.55	70.06	57.17
1.682	61.78	69.65	71.78	62.72	50.12

表 6 氮钾对生菜产量的耦合效应

Table 6 The nitrogen and potassium coupling effect on lettuce yield $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$

氮浓度编码值 Nitrogen coded values	钾浓度编码值 Potassium coded values				
	-1.682	-1	0	1	1.682
-1.682	79.67	81.24	77.06	63.69	46.79
-1	78.11	83.14	81.09	67.85	52.40
0	74.52	83.67	82.75	72.63	59.31
1	69.35	78.64	82.84	75.85	64.66
1.682	64.93	75.67	82.00	77.14	67.41

表 7 磷钾对生菜产量的耦合效应

Table 7 The phosphorus and potassium coupling effect on lettuce yield $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$

钾浓度编码值 Potassium coded values	磷浓度编码值 Phosphorus coded values				
	-1.682	-1	0	1	1.682
-1.682	57.84	69.77	77.06	78.60	72.69
-1	61.74	72.91	81.09	79.52	72.86
0	66.13	76.19	82.75	79.55	71.78
1	68.96	77.91	82.84	78.02	69.14
1.682	69.99	78.18	82.00	76.08	66.44

3 讨论与结论

已有研究表明, 氮磷钾配施能够显著提高生菜产量。该试验结果指出, 产量随氮磷钾浓度的增加均呈开口向下的抛物线, 这可能是因为过高或过低的营养液浓度不利于作物对水分的吸收, 从而影响产量的提高^[19]。

该试验分阶段建立了氮磷钾三因素对产量的影响模型, 模型经检验达到显著水平, 可以进行产量的分析与预测, 并得出了最优组合设计。在生长后期, 当氮磷钾浓度分别为 $4.65, 0.69, 2.43 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 产量最大为 $88.27 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 三因素对产量的影响顺序是 $N > P > K$ 。杨小锋等^[20]研究结果表明, 全生育期氮磷钾三者对产量影响的大小顺序为 $N > P > K$, 当氮磷钾的浓度分别为 $3.070, 0.582, 2.666 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 产量可以达到优质高产的目标。该试验结果与杨小锋等结论接近, 说明在节水节肥的同时, 收到了较好的经济效益。但是, 由于试验环境及处理方法的不同, 该试验氮磷钾互作效应对产量的影响顺序为 $NK > NP > PK$ 。对于氮磷钾互作机理还有待进一步研究。

前人已分阶段的对油菜氮磷钾需肥规律进行了研究^[21-23], 把油菜的生育阶段分成了 3 个时期, 苗期至现蕾期, 蕾苔期和成熟期。研究结果表明, 在苗期至现蕾期这一阶段, 积累的干物质占全年的 10% 左右, 三因素对油菜的积累量的影响顺序为 $N > K > P$, 这与该试验的研究结论是一致的。该研究结果表明, 在生菜的生育前期, 三因素对生菜产量的影响顺序为 $N > K > P$, 当氮磷钾浓度分别为 $8.46, 0.62, 2.57 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 产量最高为 $12.26 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$, 约占全生育期产量的 8%。

普遍认为, 氮磷是影响产量的主要因子, 而对钾的增产作用存在争议。田昌等^[24]认为, 钾肥对油菜籽粒产量影响不明显; 而李建等^[25]研究指出, 高钾处理、中钾处理、低钾处理产量极显著高于不施钾处理, 钾肥的增产作用显著。该试验条件下, 氮磷对产量的影响为正效应, 钾对产量的影响呈现先增大后减小的趋势, 前期氮钾对产量的耦合效应为负效应, 磷钾对产量的耦合效应为负效应。后期氮钾对产量的耦合效应为正效应, 当氮浓度处于较高水平 ($1 \sim 1.682$) 时, 产量随钾浓度的升高

呈持续上升趋势,当氮浓度处于最低水平时,产量随钾浓度的增大呈持续下降趋势;磷钾对产量的耦合效应为负效应,钾浓度保持在较低水平有利于增产。

参考文献

- [1] 马宗琪,衣宁,杨发斌,等. 植物中氮磷钾含量的快速测定方法[J]. 现代农业科技,2014(1):140-142.
- [2] 张振贤,程智慧. 高级蔬菜生理学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2008.
- [3] 杨振超. 生菜水培营养液配方模型构建及专家系统的建立[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2002.
- [4] COOKE G W,GETHING P A. Changing concepts on the use of potash [C]. Proc 11 Congress Int Potash Inst,1978:28-35.
- [5] 董燕,王正银,丁华平,等. 平衡施肥对生菜产量和品质的影响[J]. 西南农业大学学报,2004,26(6):741-743.
- [6] 杨其长. 植物工厂系统与实践[M]. 北京:化学工业出版社,2012:65-66.
- [7] 伍德林,毛罕平,李萍萍. 我国设施园艺相关生理研究进展[J]. 长江蔬菜,2007(2):36-39.
- [8] 王丽霞,罗庆熙. 控水条件下钾钙配施对生菜生长和品质的影响[D]. 重庆:西南大学,2006.
- [9] 朗文陪,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.
- [10] 张建华,卜玉山. 氮钾钙配施对生菜生长和品质的影响[J]. 山西农业大学学报,2007,27(5):19-21.
- [11] 杨小燕,卜玉山. 生菜施用氮钾钙的研究[D]. 晋中:山西农业大学,2005.
- [12] 徐岩,于海业. 水肥耦合对日光温室生菜生育及土壤环境的影响研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [13] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京:中国农业出版社,2011.
- [14] 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.
- [15] 谢小玉,邹志荣,江雪飞. 影响无土栽培黄瓜叶片中镁含量的因素研究[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(6):86-88.
- [16] 陈修斌,邹志荣,熊汉琴. 温室茄子水肥耦合数学模型及其优化方案研究[J]. 水土保持研究,2004,11(3):202-203.
- [17] 李建明,潘铜华,王玲慧,等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(10):83-87.
- [18] 牛晓丽,胡田田,周振江,等. 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.
- [19] 赵志华,李建明,张大龙,等. 水钾耦合对大棚厚皮甜瓜产量和可溶性固形物含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(8):161-167.
- [20] 杨小峰,别之龙. 氮磷钾施用量对水培生菜生长和品质的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(增刊2):265-269.
- [21] 鲁剑巍,陈防,张竹青,等. 磷钾肥配合施用对油菜产量及养分积累的影响[J]. 中国油料作物学报,2003,25(2):52-55.
- [22] 杨斌,肖华贵,李超. 油菜需肥特性及施肥方法探讨[J]. 现代农业科技,2008(15):187-188.
- [23] 孙家刚. 氮钾肥用量对油菜各器官钾素积累的影响[D]. 扬州:扬州大学,2007:33-35.
- [24] 田昌,彭建伟,宋海星,等. 氮磷钾配比对湘杂油菜 763 产量和养分吸收的影响[J]. 湖南农业大学学报,2010,36(3):263-266.
- [25] 李建,朱青,陈正刚,等. 不同钾肥用量对油研 599 油菜产量及养分吸收的影响[J]. 土壤肥料,2002(2):35-37.

Construction and Analysis of Hydroponic Lettuce Production Model Basing on NPK Concentration

ZHANG Dong^{1,2}, HU Xiaotao¹, WANG Wen'e¹, SU Yuanjun¹, QIAO Yuan¹, WANG Rui¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. China Electric Power Construction Guiyang Survey and Design Research Institute Co. Ltd., Guiyang, Guizhou 550000)

Abstract: For quantitative reveal the relationship between hydroponic lettuce yield and major nutrient elements(N,P,K) in nutrient solution, leaf lettuce of Hong Kong 'Bolicui' was used as test materials, hydroponic formula of different N,P,K were set, the three factors (N,P,K) five levels quadratic general rotary unitized experiment was adopted to analysis the affect to hydroponic lettuce yield. Lettuce yield regression mathematical model of three factors was established. The results showed that under the test conditions, in the early, the sequence of three factors on the yield was $N > K > P$; in the late, the sequence of three factors on the yield was $N > P > K$. The interaction between various factors, there was a positive correlation between the nitrogen ion concentration and potassium ion concentration, there was a negative correlation between the phosphorus ion concentration and potassium ion concentration. At the early stage of the growth, when the concentration of NPK for $8.46 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.62 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $2.57 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively, the highest yield per plant was 12.26 g. At the late stage of the growth, when the concentration of N,P,K for $4.65 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.69 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $2.43 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively, the highest yield per plant was 88.27 g.

Keywords: hydroponic lettuce; N,P,K; yield; mathematical model