

## 生菜与樱桃萝卜间作气雾培栽培管理模式优化研究

张蕾<sup>1,2</sup> 李发秦尉<sup>1,2</sup> 姚利军<sup>1,2</sup> 肖飞<sup>1,2</sup> 于海业<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

**摘要:** 以降低气雾培生菜叶片硝酸盐含量并提高产量为目标, 针对生菜与樱桃萝卜间作气雾培, 采用三因素三水平正交试验对间作气雾栽培管理模式进行优化。选取间作比、营养液浓度分阶段管理、采收前补光处理时间作为试验因素, 由前期单因素试验结果, 设计三水平正交试验。结果表明, 最优栽培管理模式的因素水平组合为: 生菜与樱桃萝卜间作比为2(植株数量比), 采用前期供应0.5倍标准浓度的营养液、中期供应标准浓度营养液、后期供应0.5倍标准浓度营养液, 采收前补光处理48 h。验证试验表明, 该组合栽培管理模式生菜栽培效果优异, 具有高产、优质、可显著降低生菜叶片硝酸盐含量等优点, 为低硝酸盐优质叶菜无土栽培研究提供了理论基础和方法。

**关键词:** 生菜; 气雾培; 间作; 管理模式

中图分类号: S636.2; S317 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0337-07

OSID: 

## Optimization of Management Modes for Intercropping Aeroponics of Lettuce and Cherry Radish

ZHANG Lei<sup>1,2</sup> LI Faqinwei<sup>1,2</sup> YAO Lijun<sup>1,2</sup> XIAO Fei<sup>1,2</sup> YU Haiye<sup>1,2</sup>

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** High yield and quality of lettuce were objects under the intercropping aeroponics system with cherry radishes. The orthogonal test of three factors and three levels were enforced to reduce nitrate content in edible parts of lettuce under the intercropping aeroponics system. According to a large number of single factor experiments in previous researches, the orthogonal test was utilized to study the influence of intercropping ratio, phased management of nutrient solution concentration and the time of pre-harvest light supplementation on target plants. The results showed that the optimal combination of factors in the cultivation management mode was as follows: the intercropping ratio of lettuce and cherry radish was 2; the nutrient solution was supplied by 0.5 standard concentration in the early stage and in the week before harvest in stages, and standard concentration in the middle stage; and the time of pre-harvest light supplementation was 48 h. High yield, high quality and low nitrate content in the edible parts were found for lettuce in optimal cultivation management mode, which meant that the optimization was obvious. That's to say, the cultivation management mode provided theoretical basis and reference for the study of soilless cultivation of high quality leafy vegetables with low nitrate.

**Key words:** lettuce; aeroponics; intercropping; management mode

## 0 引言

气雾培(Aeroponics)作为一种新兴的无基质无土栽培方式,具有节水、增产增效等优势,是未来设

施农业的发展趋势<sup>[1]</sup>。生菜作为主要的温室蔬菜之一,是气雾栽培中叶菜类的典型代表,其生长周期短、抗病虫害能力强。硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ )是植物生长以及发育的重要氮源之一,对植物生长代谢有较大影

收稿日期: 2019-08-07 修回日期: 2019-09-29

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20170204020NY)

作者简介: 张蕾(1979—),女,副教授,主要从事设施农业资源可持续研究,E-mail: z\_lei@jlu.edu.cn

通信作者: 于海业(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业设施环境调控与节能技术研究,E-mail: haiye@jlu.edu.cn

响<sup>[2]</sup>。以气雾培和水培方式种植的生菜,其硝酸盐含量往往较高<sup>[3]</sup>。虽然  $\text{NO}_3^-$  本身对人体无害,但其在体内的反应和代谢产物(如亚硝胺)对人体健康的不良影响已经引起人们的警惕<sup>[4]</sup>。

间作(Intercropping)是一种极具潜力的生态集约化种植模式。王晓丽等<sup>[5]</sup>研究表明,间作可以显著降低蔬菜体内  $\text{NO}_3^-$  含量;文献<sup>[6-8]</sup>研究表明,适宜的间作栽培模式和间作比例可显著提高气雾培生菜的产量和品质;课题组前期对生菜与不同叶菜类蔬菜的间作进行了研究,表明间作具有明显降低  $\text{NO}_3^-$  含量的作用,且与樱桃萝卜的间作效果优异<sup>[9-11]</sup>。

营养液是气雾培中植物赖以生存的关键<sup>[12]</sup>。在气雾培研究中,营养液一直是研究的重要内容之一。目前相关研究主要针对营养液配方的改良,对于营养液管理方式的研究并不多见<sup>[13]</sup>,文献<sup>[14-15]</sup>研究表明,营养液浓度直接影响植物产量和品质,且蔬菜在不同生长时期对养分的需求也不同。可见,不同浓度营养液分阶段供应的管理模式十分必要。

近几年,针对降低蔬菜硝酸盐含量的问题,多数研究对蔬菜采收前进行短期处理,采收前的短期调控具有时间短、成本低、效果好等优点,而采收前连续补光处理是短期调控中最为有效的调控措施<sup>[16-18]</sup>。但将采收前连续补光处理与气雾培间作及营养液管理模式相结合的研究尚未见报道。

为优化生菜气雾栽培管理模式,本文以“意大利”全年耐抽薹生菜(*Lactuca sativa L. var. ramosa Hort.*)为研究对象,在课题组前期研究基础上,选择生菜与“红丁”樱桃萝卜(*Raphanus sativus*)构建间作栽培系统,以间作比、营养液浓度分阶段管理和采收前连续补光时间为处理因素,采用三因素三水平正交试验设计对3种措施进行优化<sup>[19]</sup>,利用综合评价法<sup>[20]</sup>作为多指标正交试验响应值的分析方法,并结合验证试验,确定最优栽培管理模式。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验条件

本研究分别于2018年3月31日—6月4日(春季)及2018年8月20日—10月25日(秋季)开展优化试验,于2018年10月30日—2019年1月5日(冬季)进行验证试验。试验在吉林大学南岭校区玻璃温室(43°51'5"N、125°19'51"E)内进行(图1)。温室内春季白天和夜晚温度分别为(25±5)℃和(15±5)℃,为防止光照过强,在11:00—14:00开启温室遮阳控制系统,白天光照强度范围为175~

225  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。秋季白天和夜晚温度分别为(20±4)℃和(16±4)℃,秋季光照强度范围为155~180  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。冬季白天和夜晚温度分别为(18±4)℃和(12±4)℃,冬季光照强度范围为150~180  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。



图1 栽培试验

Fig. 1 Experiments in cultivation

### 1.2 栽培管理

营养液大量元素采用日本园试配方,微量元素采用霍格兰德通用配方。所有试验单元每天傍晚测试并调节pH值一次,保持pH值在5.8~6.2;不同试验单元按照各自营养液浓度要求,每天傍晚测试并调节电导率(Electrical conductivity, EC)一次,控制各处理的初始浓度在±100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的范围内。移栽后,栽培周期30 d,划分为3个生长阶段:定植第1~10天为前期,第11天至采收前一周为中期,采收前一周至第30天为后期。试验气雾栽培箱尺寸为53 cm×37 cm×23 cm,每箱可种植12株植株,株距为12 cm。设置循环喷雾定时器,白天每间隔15 min喷施15 min,夜间每间隔45 min喷施5 min。

### 1.3 试验方案

3个试验因素分别选择生菜与樱桃萝卜间作比A(植株数量比);营养液浓度分阶段管理模式B,每个试验单元总营养液均为20 L,试验组按照3个生长阶段逐次添加6、8、6 L的营养液,对照组从试验开始,一次性加入20 L营养液;采收前补光处理时间C,补光的光照强度控制在175~185  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。不同因素各设定3个水平如表1所示。每轮试验采用三因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交表<sup>[20]</sup>,设置如表2所示的10个处理,每个处理重复3次,共30个试验单元。其中,处理10为生菜单作,营养液为传统供液方式,采收前不补光处理作为对照组。

表1 试验因素水平

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	生菜与樱桃萝卜间作比A	营养液浓度分阶段管理模式B	采收前补光处理时间C/h
1	1	1s: 1s: 1s	0
2	2	0.5s: 1s: 0.5s	24
3	3	0.25s: 1s: 0.25s	48

注:s代表营养液,s前的数字代表营养液浓度倍数,“:”分隔的3个部分代表3个生长阶段,下同。

表2 正交试验方案

Tab.2 Scheme of orthogonal test

试验号	生菜与樱桃萝卜 间作比 A	营养液浓度分阶 段管理模式 B	采收前补光 处理时间 C/h
1	1	1s:1s:1s	0
2	1	0.5s:1s:0.5s	24
3	1	0.25s:1s:0.25s	48
4	2	1s:1s:1s	24
5	2	0.5s:1s:0.5s	48
6	2	0.25s:1s:0.25s	0
7	3	1s:1s:1s	48
8	3	0.5s:1s:0.5s	24
9	3	0.25s:1s:0.25s	0
10	生菜单作	1s	0

### 1.4 测量指标及方法

为减少人为干扰对栽培系统蔬菜生长发育的影响,30 d栽培周期结束后,统一采收并测量相关指标,各指标为每个试验单元随机选取3株生菜测量的平均值。

(1)鲜质量:称量法。

(2)干质量:先将生菜叶片(地上部分)放入85℃真空干燥箱(DZF-6050型,上海)干燥至恒质量,再采用电子天平(ME104E型,瑞士)进行称量。

(3)最大叶面积:利用叶面积仪(Yaxin-1242型,北京)测量每株植株最大的3片叶片的单叶面积,然后求和取其平均值,用其平均值表示生菜每株最大叶面积。

(4)NO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量:利用NO<sub>3</sub><sup>-</sup>与水杨酸<sup>[21]</sup>反应后进行比色测定,选取生菜植株整株叶片洗净,用滤纸吸干水分后将叶片剪碎混匀,称取2~3g作为一个样本,每株植株重复3个样本。

(5)可溶性糖含量:利用蒽酮与糖<sup>[22]</sup>反应后进行比色测定,选取生菜植株整株叶片洗净,用滤纸吸干水分后将叶片剪碎混匀,称取0.5g作为一个样本,每株植株重复3个样本。

(6)可溶性蛋白含量:利用考马斯亮蓝G-250与蛋白质结合后<sup>[21]</sup>进行比色测定,选取生菜植株整株叶片洗净,用滤纸吸干水分后将叶片剪碎混匀,称取0.1~0.3g作为一个样本,每株植株重复3个样本。

### 1.5 数据分析与计算

采用SPSS Statistics 22.0、Minitab 19、Origin 2019进行数据分析与作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同组合处理对生菜生长的影响

如表3所示,与处理10相比,不同组合处理下生菜鲜质量和叶面积均高于处理10,其中,鲜质量最高增加了34.54g/株,最大叶面积最高增加了76.9cm<sup>2</sup>/株;除处理9的生菜干质量略低于对照组外,其他试验组均高于对照组。可见,间作比例过大,营养液前、后期氮钾浓度过低对生菜干物质的积累产生影响,这与张小明等<sup>[7]</sup>和王军君等<sup>[23]</sup>的研究结果相符。

表3 不同组合处理生菜生长指标试验结果

Tab.3 Results of test on growth index of lettuce

试验号	春季			秋季		
	鲜质量/(g·株 <sup>-1</sup> )	干质量/(g·株 <sup>-1</sup> )	最大叶面积/ (cm <sup>2</sup> ·株 <sup>-1</sup> )	鲜质量/(g·株 <sup>-1</sup> )	干质量/(g·株 <sup>-1</sup> )	最大叶面积/ (cm <sup>2</sup> ·株 <sup>-1</sup> )
1	64.56 <sup>bc</sup>	3.25 <sup>a</sup>	153.9 <sup>bcd</sup>	19.43 <sup>cd</sup>	0.70 <sup>d</sup>	84.4 <sup>b</sup>
2	73.05 <sup>ab</sup>	3.46 <sup>a</sup>	170.4 <sup>abc</sup>	21.88 <sup>bc</sup>	0.97 <sup>cd</sup>	85.4 <sup>b</sup>
3	48.35 <sup>d</sup>	2.64 <sup>b</sup>	143.3 <sup>cde</sup>	15.73 <sup>de</sup>	0.82 <sup>cd</sup>	65.1 <sup>e</sup>
4	69.04 <sup>abc</sup>	3.42 <sup>a</sup>	151.8 <sup>cd</sup>	25.99 <sup>ab</sup>	1.10 <sup>bc</sup>	71.3 <sup>d</sup>
5	76.48 <sup>a</sup>	3.54 <sup>a</sup>	195.1 <sup>a</sup>	29.04 <sup>a</sup>	1.46 <sup>ab</sup>	96.5 <sup>a</sup>
6	46.09 <sup>d</sup>	2.46 <sup>b</sup>	124.7 <sup>de</sup>	19.27 <sup>cde</sup>	0.79 <sup>cd</sup>	68.9 <sup>de</sup>
7	49.90 <sup>d</sup>	2.60 <sup>b</sup>	150.7 <sup>cd</sup>	26.64 <sup>a</sup>	1.51 <sup>a</sup>	94.7 <sup>a</sup>
8	62.74 <sup>c</sup>	3.53 <sup>a</sup>	183.8 <sup>ab</sup>	21.41 <sup>c</sup>	0.93 <sup>cd</sup>	76.6 <sup>c</sup>
9	43.89 <sup>d</sup>	2.43 <sup>b</sup>	132.6 <sup>de</sup>	19.66 <sup>cd</sup>	0.87 <sup>cd</sup>	66.1 <sup>e</sup>
10	41.94 <sup>d</sup>	2.44 <sup>b</sup>	118.2 <sup>e</sup>	15.06 <sup>e</sup>	0.64 <sup>d</sup>	66.9 <sup>de</sup>

注:不同小写字母表示在P<0.05水平差异显著,下同。

生菜鲜质量、干质量及叶面积均属于正向指标<sup>[24]</sup>,利用宋明顺等<sup>[25]</sup>所述的均值化法计算生菜生长指标各因素响应值的均值与极差,结果如表4所示。因素A、B的优水平均为A<sub>2</sub>、B<sub>2</sub>,因素C的优水平因季节的变化存在差异,在春、秋季节其优水平

分别为C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>。对各因素响应值进一步进行方差分析,得出试验因素B对生菜生长指标影响最显著,其P值均小于0.001;因素A为显著因素,其P值均小于0.05;而因素C在春季不显著,其P值大于0.05,而在秋季显著,其P值小于0.01。因此,对于

表4 生菜生长指标正交试验均值响应

Tab.4 Average response of orthogonal test on growth index of lettuce

水平	因素(春季)			因素(秋季)		
	A	B	C	A	B	C
1	3.07	3.02	2.98	2.73	3.30	2.73
2	3.12	3.52	3.04	3.29	3.36	2.99
3	2.82	2.46	2.99	3.18	2.54	3.48
极差	0.30	1.06	0.06	0.56	0.82	0.75
主次因素排序	2	1	3	3	1	2

表5 不同组合处理生菜品质指标试验结果

Tab.5 Intuitive analysis on quality index of lettuce

试验号	春季			秋季		
	硝酸盐含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	可溶性糖含量/ %	可溶性蛋白含量/ (mg·g <sup>-1</sup> )	硝酸盐含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	可溶性糖含量/ %	可溶性蛋白含量/ (mg·g <sup>-1</sup> )
1	2 777.37 <sup>b</sup>	1.32 <sup>bc</sup>	4.67 <sup>cd</sup>	2 729.84 <sup>b</sup>	1.35 <sup>de</sup>	4.75 <sup>e</sup>
2	2 435.25 <sup>cd</sup>	1.78 <sup>a</sup>	5.10 <sup>bc</sup>	2 502.52 <sup>bc</sup>	1.57 <sup>cd</sup>	5.13 <sup>d</sup>
3	1 953.41 <sup>e</sup>	1.19 <sup>cd</sup>	5.53 <sup>ab</sup>	1 889.45 <sup>de</sup>	1.86 <sup>ab</sup>	5.59 <sup>e</sup>
4	2 059.03 <sup>e</sup>	1.38 <sup>bc</sup>	4.93 <sup>e</sup>	1 993.26 <sup>de</sup>	1.68 <sup>bc</sup>	6.14 <sup>b</sup>
5	2 015.39 <sup>e</sup>	1.68 <sup>ab</sup>	5.77 <sup>a</sup>	1 695.69 <sup>e</sup>	2.08 <sup>a</sup>	6.77 <sup>a</sup>
6	2 653.01 <sup>bc</sup>	1.23 <sup>cd</sup>	4.77 <sup>cd</sup>	2 526.41 <sup>bc</sup>	1.10 <sup>ef</sup>	4.63 <sup>e</sup>
7	2 561.37 <sup>bed</sup>	1.41 <sup>abc</sup>	4.59 <sup>cd</sup>	1 991.69 <sup>de</sup>	1.85 <sup>ab</sup>	6.02 <sup>b</sup>
8	2 257.44 <sup>de</sup>	1.24 <sup>cd</sup>	4.67 <sup>cd</sup>	2 216.30 <sup>cd</sup>	1.42 <sup>d</sup>	4.72 <sup>e</sup>
9	2 012.99 <sup>e</sup>	0.93 <sup>de</sup>	4.83 <sup>e</sup>	1 865.07 <sup>de</sup>	1.08 <sup>f</sup>	5.54 <sup>e</sup>
10	3 252.85 <sup>a</sup>	0.76 <sup>e</sup>	4.24 <sup>d</sup>	3 224.23 <sup>a</sup>	0.81 <sup>g</sup>	4.64 <sup>e</sup>

可见,不同间作气雾培处理对提高生菜品质具有促进作用,这与贺志文等<sup>[26]</sup>和BIAN等<sup>[27]</sup>的研究结果相符。

生菜叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量属于正向指标,生菜叶片硝酸盐含量属于逆向指标,对逆向指标正向化后<sup>[24]</sup>,利用宋明顺等<sup>[25]</sup>所述的均值化法计算生菜品质指标各因素响应值的均值与极差,结果如表6所示。生菜的品质指标极差均为因素C最大,因素A、B极差相差不大,因素A、B、C的优水平为A<sub>2</sub>、B<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>;对各因素响应值进一步进行方差分析,得出试验因素C均对生菜品质指标影响最显著,其P值均小于0.001,因素A、B皆为显著因素,其P值范围为0.001~0.05。因此,对于生菜品质指标而言,最主要因素为因素C,其最优的气雾培栽培管理模式为处理5,即组合A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>。

### 3 验证试验

为验证正交试验优化结果,对最优栽培组合模式处理5(T),并以生菜单作作为对照试验(CK)进行栽培试验。每处理重复3箱,30d栽培周期结束后,统一采收并测量相关指标,试验结果如图2所示。可以看出,最优栽培组合模式下生菜生长指标和品质指标均有明显的优势,其生菜生长指标(鲜

生长指标而言,最主要因素为因素B,其最优的气雾培栽培管理模式为处理5,即组合A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>。

### 2.2 不同组合处理对生菜品质的影响

如表5所示,与处理10相比,不同组合处理下生菜叶片硝酸盐含量均有所下降,可溶性糖含量、可溶性蛋白含量则均有所增加。春、秋季生菜叶片硝酸盐含量最高分别降低了1 299.44、1 528.54 mg/kg,可溶性糖含量最高分别增加了1.02、1.27个百分点,可溶性蛋白含量最高分别增加了1.53、2.13 mg/g。

表6 生菜品质指标正交试验均值响应

Tab.6 Average response of orthogonal test on quality index of lettuce

水平	因素(春季)			因素(秋季)		
	A	B	C	A	B	C
1	1.04	0.89	0.77	0.85	1.03	0.52
2	1.12	1.23	1.06	1.14	1.10	0.96
3	0.84	0.88	1.17	0.98	0.85	1.49
极差	0.28	0.35	0.41	0.29	0.25	0.97
主次因素排序	3	2	1	2	3	1

质量、干质量、最大叶面积)分别平均提高了36.82%、42.34%、31.69%,品质指标中可溶性糖含量和可溶性蛋白含量分别平均提高了49.48%、24.84%,硝酸盐含量平均降低了41.97%。因此,验证试验结果显示,优化效果明显,该组合栽培管理模式下栽培的生菜具有高产优质,且可显著降低生菜叶片硝酸盐含量等优点。

### 4 讨论

从研究结果可以看出,间作比例A、营养液浓度分阶段管理模式B、采收前补光处理时间C均可调节生菜生长代谢,受自然界物种间化感作用启发<sup>[28]</sup>,将间作引入无土栽培,达到了提高作物产量

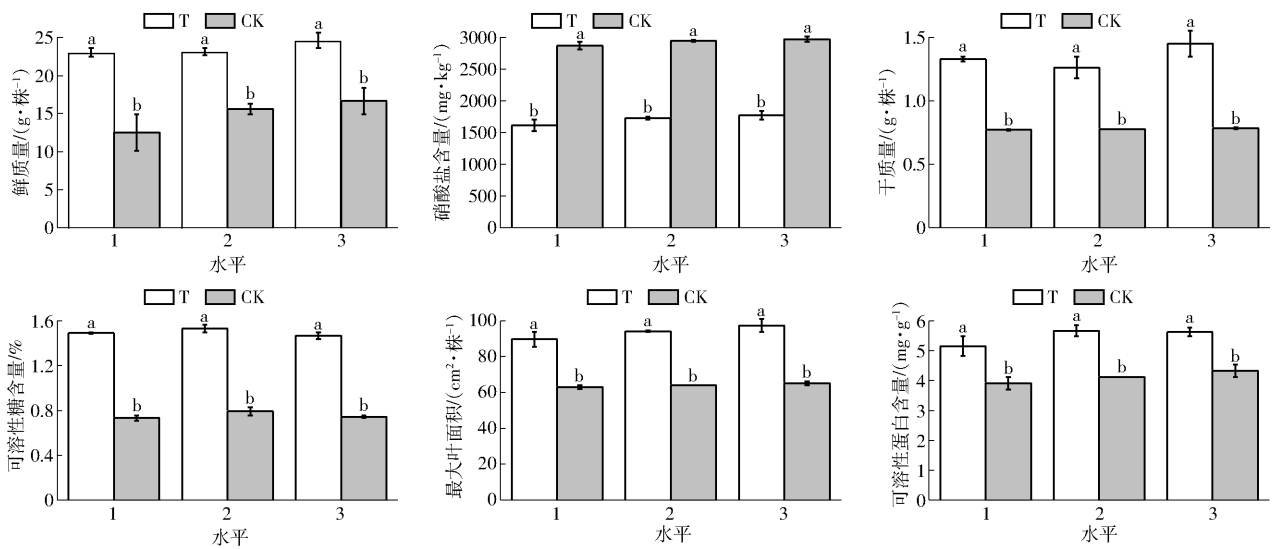


图2 验证试验结果

Fig. 2 Results of verification test

和品质的效果,与已有间作研究结果一致<sup>[29]</sup>。在生菜栽培体系中增加樱桃萝卜后,生菜对硝态氮的吸收受到限制,使生菜叶片 $\text{NO}_3^-$ 含量得到一定程度的控制;随间作比的变化,其 $\text{NO}_3^-$ 含量的差异性被放大。已有研究报道,采收前补光条件下植物体内糖和淀粉的积累量显著增加<sup>[30]</sup>,通过促进植物体内氮素代谢关键酶的合成,从而影响植物体内 $\text{NO}_3^-$ 含量的积累<sup>[27]</sup>,有利于提高生菜的产量和品质,这与本研究的结果一致。同时,植物在生长过程中对养分需求不同<sup>[31]</sup>,因此不同浓度营养液的分阶段供应不仅更加有利于植物生长,并且节约水源与肥料。避免了传统供液方式易导致随气雾培时间的增加使营养液中养分元素比例严重失调<sup>[10]</sup>,从而影响植物生长以及营养物质的运输和代谢等。

生长指标中,生菜叶片所有指标均存在显著性差异,说明此种优化模式对生菜生长有显著的影响。本研究在东北地区日光温室中进行,其环境因素因季节的变化差异显著,尤其是光照和温度,导致本研究中春季、秋季和冬季生菜生长指标表现出明显的差别,这与方舒玲等<sup>[32]</sup>和LEE等<sup>[33]</sup>的研究结果相符。本试验中春季和秋季优化的栽培模式结果几乎一致,因素A、B差异显著且优水平为 $A_2$ 、 $B_2$ ,因素C在春季差异不显著而秋季差异显著,但春季和秋季因素C均不是正交优化中的最主要因素。这可能与东北地区日光温室内春季和秋季光照不同有关,东北地区日光温室秋冬季受弱光胁迫,对蔬菜光合、产量等产生影响,而弱光下补光措施对植物更加敏感,这与王双喜等<sup>[34]</sup>的研究相符。品质指标中,生

菜叶片对采收前补光处理时间C这一因素表现出极显著差异,其优水平为采收前补光48h,即 $C_3$ 。说明采收前补光这一措施对生菜品质的影响更大,这与BIAN等<sup>[27]</sup>的研究一致,并且间作比A和营养液浓度分阶段管理模式B这两因素皆为生菜生长和品质的显著因素,且优水平均为 $A_2$ 和 $B_2$ 。因此,本研究的优化组合为 $A_2B_2C_3$ 。

## 5 结论

(1)间作比、营养液分阶段供应以及采收前补光时间是影响生菜生长及品质指标的可控因素,选择合理的栽培管理模式不仅可以提高生菜的产量及品质,并且可以有效降低气雾培生菜的 $\text{NO}_3^-$ 含量。

(2)春秋两季分别开展正交试验,通过将结果转换为综合评价分数,从而建立基于多指标正交试验的综合评价模型,并确定了试验最优方案为 $A_2B_2C_3$ 因素水平组合,即生菜与樱桃萝卜间作比为2,前期供应0.5倍标准浓度营养液、中期供应标准浓度营养液、后期供应0.5倍标准浓度营养液,采收前连续补光48h,此组合处理下的栽培管理模式效果显著。

(3)最优栽培管理模式下,生菜生长指标(鲜质量、干质量、叶面积)分别平均提高了36.82%、42.34%、31.69%,表明此模式栽培的生菜产量增加显著;可溶性糖含量和可溶性蛋白含量分别平均提高了49.48%、24.84%, $\text{NO}_3^-$ 含量平均降低了41.97%,表明此模式栽培的生菜品质较好。

## 参 考 文 献

- through nutrient feeding approach under aeroponic and hydroponic system [J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 133(7): 160–167.
- [2] LEI Bo, BIAN Zhonghua, YANG Qichang, et al. The positive function of selenium supplementation on reducing nitrate accumulation in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(4): 837–846.
- [3] KONSTANTOPOULOU E, KAPOTIS G, SALACHAS G, et al. Effect of nitrogen application on growth parameters, yield and leaf nitrate content of greenhouse lettuce cultivated during three seasons [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2012, 35(8): 1246–1254.
- [4] PINTO E, FIDALGO F, TEIXEIRA J, et al. Influence of the temporal and spatial variation of nitrate reductase, glutamine synthetase and soil composition in the N species content in lettuce [J]. *Plant Science*, 2014, 219(2): 35–41.
- [5] 王晓丽, 李隆, 江荣凤, 等. 玉米/空心菜间作降低土壤及蔬菜中硝酸盐含量的研究 [J]. *环境科学学报*, 2003, 23(4): 463–467.  
WANG Xiaoli, LI Long, JIANG Rongfeng, et al. Effects of maize/swamp cabbage intercropping on reduction of the nitrate content in soil profile and vegetables [J]. *Journal of Environmental Science*, 2003, 23(4): 463–467. (in Chinese)
- [6] 涂晓杰, 芦悦, 宋书宏. 不同间作比例对鲜食毛豆与玉米群体光合生理效应及产量的影响 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2014, 45(3): 331–334.  
TU Xiaojie, LU Yue, SONG Shuhong. The response of yield and physiological effects to different proportions intercropping groups with fresh peas and corn [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2014, 45(3): 331–334. (in Chinese)
- [7] 张小明, 来兴发, 杨宪龙, 等. 施氮和燕麦/箭筈豌豆间作比例对系统干物质质量和氮素利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 489–498.  
ZHANG Xiaoming, LAI Xingfa, YANG Xianlong, et al. Effects of nitrogen application and intercropping ratio on dry matter production and nitrogen use efficiency of the oat and common vetch intercropping system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(2): 489–498. (in Chinese)
- [8] 唐艺玲, 杜清, 赖建宁, 等. 广东省甜玉米-大豆不同比例间作模式的系统产量分析 [J]. *广东农业科学*, 2013, 40(21): 19–23.  
TANG Yiling, DU Qing, LAI Jianning, et al. Analysis on yield and economic efficiency in different patterns of sweet corn- soybean intercropping systems in Guangdong Province [J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2013, 40(21): 19–23. (in Chinese)
- [9] 王琳琳, 于海业, 张蕾, 等. 基于生态位适宜度模型和 TOPSIS 模型的间作模式评价 [J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 291–297.  
WANG Linlin, YU Haiye, ZHANG Lei, et al. Evaluation of intercropping pattern based on niche-fitness model and TOPSIS model [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 291–297. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170438&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170438&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.038. (in Chinese)
- [10] 于海业, 王琳琳, 张蕾, 等. 间作对气雾培生菜生长和硝酸盐积累的影响 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 228–234.  
YU Haiye, WANG Linlin, ZHANG Lei, et al. Effects of intercropping on growth and nitrate accumulation of lettuce in aeroponics [J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(24): 228–234. (in Chinese)
- [11] 王琳琳. 控制生菜硝酸盐的间作气雾培模式与机理研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.  
WANG Linlin. Research on the intercropping modes and mechanisms of controlling nitrate content in aerosol lettuce [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [12] 王瑞. 不同浓度营养液对水培莴苣的影响 [J]. *黑龙江农业科学*, 2012, 35(5): 83–85.  
WANG Rui. Effect on different concentrations of nutrient solution on hydroponic lettuce [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2012, 35(5): 83–85. (in Chinese)
- [13] 季延海, 武占会, 于平彬, 等. 不同营养液浓度对水培韭菜生长适应性的影响 [J]. *中国蔬菜*, 2017(11): 53–56.  
JI Yanhai, WU Zhanhui, YU Pingbin, et al. Effect of nutrient solution with different concentration on growing adaptability of Chinese Chive under water culture condition [J]. *China Vegetables*, 2017(11): 53–56. (in Chinese)
- [14] ZHANG Yiting, YOSHIKAZU K, AKIRA N. Influence of nutrient concentration and composition on the growth, uptake patterns of nutrient elements and fruit coloring disorder for tomatoes grown in extremely low-volume substrate [J]. *Horticulture Journal*, 2015, 84(1): 37–45.
- [15] 丁文雅, 林若筠, 周伟伟, 等. 不同供氮水平下雾培与水培生菜生长和营养品质差异的比较 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2016, 42(6): 703–712.  
DING Wenya, LIN Ruojun, ZHOU Weiwei, et al. Comparison of growth and nutritional quality of lettuce grown in mist culture and water culture under different nitrogen supply levels [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2016, 42(6): 703–712. (in Chinese)
- [16] ZHOU Wanlai, LIU Wenke, YANG Qichang. Reducing nitrate content in lettuce by pre-harvest continuous light delivered by red and blue light-emitting diodes [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2013, 36(3): 481–490.
- [17] ZHOU Wanlai, LIU Wenke, YANG Qichang. Quality changes in hydroponic lettuce grown under pre-harvest short-duration continuous light of different intensities [J]. *Journal of Horticulture Science and Biotechnology*, 2012, 87(5): 429–434.
- [18] 陈晓丽, 杨其长, 马太光, 等. 不同频率 LED 红蓝光交替照射对生菜生长与品质的影响 [J/OL]. *农业机械学报*,

- 2017, 48(6): 257 - 262.
- CHEN Xiaoli, YANG Qichang, MA Taiguang, et al. Effects of red and blue led irradiation in different alternating frequencies on growth and quality of lettuce [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 257 - 262. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170633&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170633&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.033. (in Chinese)
- [19] 马义东, 徐灿, 崔永杰, 等. 水培生菜整株低损收获装置设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 162 - 169. MA Yidong, XU Can, CUI Yongjie, et al. Design and test of harvester for whole hydroponic lettuce with low damage [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 162 - 169. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190117&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190117&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.017. (in Chinese)
- [20] 任露泉. 实验设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [21] 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, 2000.
- [22] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [23] 王军君, 鄢小撑, 丁文雅, 等. 雾培营养液氮钾水平对不同番茄品种果实产量和营养品质的影响 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, 39(5): 489 - 496. WANG Junjun, WU Xiaocheng, DING Wenya, et al. Effects of nitrogen and potassium supply on fruit yield and nutritional quality of aeroponically grown tomato cultivars [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2013, 39(5): 489 - 496. (in Chinese)
- [24] 叶宗裕. 关于多指标综合评价中指标正向化和无量纲化方法的选择 [J]. 浙江统计, 2003, 22(4): 25 - 26. YE Zongyu. The selection of index positivity and dimensionless method in multi-index comprehensive evaluation [J]. Zhejiang Statistics, 2003, 22(4): 25 - 26. (in Chinese)
- [25] 宋明顺, 黄佳, 张士朋, 等. 多指标正交试验设计去量纲准则及方法研究 [J]. 工业工程与管理, 2014, 19(1): 41 - 46. SONG Mingshun, HUANG Jia, ZHANG Shipeng, et al. The research on the dimensionless criterion and methods about the design of multi-index orthogonal experiment [J]. Industrial Engineering and Management, 2014, 19(1): 41 - 46. (in Chinese)
- [26] 贺志文, 王利春, 郭文忠, 等. 水培生菜适宜营养液氮素供应浓度优化 [J]. 农业工程, 2018, 8(4): 116 - 122. HE Zhiwen, WANG Lichun, GUO Wenzhong, et al. Optimization of nitrogen supply concentration in nutrient solution for hydroponics lettuce [J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(4): 116 - 122. (in Chinese)
- [27] BIAN Zhonghua, CHENG Ruifeng, YANG Qichang. Continuous light from red, blue, and green light-emitting diodes reduces nitrate content and enhances phytochemical concentrations and antioxidant capacity in lettuce [J]. Journal of the American Society for Horticulture Science, 2016, 141(2): 186 - 195.
- [28] HUANG Chengdong, LIU Quanqing, GOU Fang, et al. Plant growth patterns in a tripartite strip relay intercrop are shaped by asymmetric aboveground competition [J]. Field Crops Research, 2017, 201(2): 41 - 51.
- [29] GUSTAVE N M, JEAN F L, XAVIER D. Shoot and root competition in potato/maize intercropping: effects on growth and yield [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, 64(2): 180 - 188.
- [30] ROLF I P, SISSEL T, HANS R G. Effects of intracanopy lighting on photosynthetic characteristics in cucumber [J]. Scientia Horticulturae, 2010, 125(2): 77 - 81.
- [31] 孙美, 李栋梅, 董业雯, 等. 养分供应量对玫瑰香葡萄矿质元素和水分吸收的影响 [J]. 西北植物学报, 2017, 37(3): 526 - 533. SUN Mei, LI Dongmei, DONG Yewen, et al. Absorption of mineral elements and water in muscat hamburg grape with different nutrient supply [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(3): 526 - 533. (in Chinese)
- [32] 方舒玲, 胡笑涛, 王文娥, 等. 光照强度和营养液浓度对水培生菜产量和品质的影响 [J]. 北方园艺, 2017, 41(13): 97 - 102. FANG Shuling, HU Xiaotao, WANG Wen'e, et al. Effects of light intensity and nutrient solution concentration on yield and quality of hydroponic lettuce [J]. Northern Horticulture, 2017, 41(13): 97 - 102. (in Chinese)
- [33] LEE A C, LIAO F S, LO H F. Temperature, daylength, and cultivar interact to affect the growth and yield of lettuce grown in high tunnels in subtropical regions [J]. Hortscience, 2015, 50(10): 1412 - 1418.
- [34] 王双喜, 王旭, 张静. 北方塑料连栋温室蔬菜生产环境仿真研究 [J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2008, 26(5): 424 - 427. WANG Shuangxi, WANG Xu, ZHANG Jing. Emulation on environment of vegetables production for plastic covered multi-span greenhouse [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science), 2008, 26(5): 424 - 427. (in Chinese)