

植物工厂水培生菜技术研究进展

滕 星¹, 高星爱¹, 姚丽影¹, 温嘉伟¹, 李忠和¹, 张宝军^{2*}, 金荣德^{1*}

(1. 吉林省农业科学院, 长春 130033; 2. 吉林省梨树县小宽镇农业技术推广站, 吉林 梨树 136500)

摘 要: 水培蔬菜研究开展了数十年时间, 技术几乎是伴随着设备更新而逐渐发展。本文系统地对当前国内外植物工厂水培生菜的技术研究归纳, 并从中选择最主要的影响因子进行详细论述, 对其中存在的分歧也开展讨论和分析。

关键词: 生菜; 植物工厂; 水培

中图分类号: S636.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-8701(2017)01-0040-06

Review on Studies of Hydroponic Lettuce Production Technology in Plant Growing Factory

TENG Xing¹, GAO Xing'ai¹, YAO Liying¹, WEN Jiawei¹, LI Zhonghe¹, ZHANG Baojun^{2*}, JIN Rongde^{1*}

(1. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033; 2. Agricultural Technology Extension Station of Xiaokuan Town, Lishu County, Jilin Province, Lishu 136500, China)

Abstract: Research on the hydroponic vegetables were conducted for decades, and technology gradually developed almost with equipment update. Researches on hydroponic lettuce growing technology at home and abroad at present were summarized in the paper. Main influence factors were selected and discussed in detail. Technical differences existed were also discussed and analyzed.

Key words: Lettuce; Plant growing factory; Hydroponic

生菜(*Lactuca sativa*)属菊科莴苣属莴苣种, 学名叶用莴苣。具有生长期短(40~60 d)、易于管理、产量高等特征, 营养价值高, 还有降血压、镇痛、安神、防贫血、抗衰老和防止心律紊乱等作用^[1], 生菜生食消费特点, 以及对洁净品质的高要求, 决定了生菜是植物工厂最广泛栽培的蔬菜。植物工厂是通过程序控制作物连续生产的系统。植物工厂在荷兰、日本以及美国等设施农业发达的国家发展水平较高, 在我国整体技术水平尚未完善, 存在调控能力差、管理不科学, 技术针对性和适应性不强等问题, 是我国农产品质量不佳、产量不高、运营成本较高的原因。当前国内关于植物工厂培植生菜的技术研究设计较多, 但是各种研究成果

存在较大差异, 也缺乏系统的归纳和总结。

1 水培技术

生菜栽培适合采用无土栽培。由于克服了土地的各种限制, 扩展了农业生产空间, 也避免了有土栽培极易携带的各种病源物。通过工厂化栽培生菜, 实现了自动化和标准化, 确保了品质和健康。当前生菜栽培主流栽培技术如下。

营养液膜技术(Nutrient Film Technique, NFT): 植物直接放在种植槽槽底, 根系在槽底生长, 根系仅仅接触1~2 cm的浅层流动营养液, 大部分根系裸露在潮湿的空气中^[2]。这种技术最早始于20世纪70年代的英国, 80年代引入我国, 具有投资小, 易于管理等特点。这种设施的不足在于耐用性不够^[3-4]。

深液流水培技术(Deep Flow Technique, DFT): 液层深度为6~8 cm, 植物由定植板或定植网框悬挂在营养液液面上方, 而根系从定植板或定植网框伸入到营养液中生长。深液流技术是高效、设施稳定耐用、管理简单的栽培方式, 最早成功应用于商业化植物生产的无土栽培技术。首先在美国和日本等国得到广泛推广和应用, 深液流

收稿日期: 2016-11-14

基金项目: 吉林省科技厅国际合作项目(20140414001GH); 吉林省农业科技创新工程项目(c62150209)

作者简介: 滕 星(1977-), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向: 种废弃物利用和转化处理。

通讯作者: 张宝军, 男, 副研究员, E-mail: liquan6112@sina.com

金荣德, 男, 博士, 副研究员, E-mail: 18744330503@163.com

技术逐渐在我国许多省市及高校得到推广,并进行了相关大量实验研究^[5-7]。

雾培技术(Spray Culture):是新近建立的无土栽培型模式,它利用喷雾装置将营养液雾化,可间歇性地喷射到植物根系,为作物生长提供水分和养分,是一种新颖的同步供应水、肥、气的作物种植方式^[8]。

2 营养液对生菜生长的影响

2.1 浓度的影响

营养液浓度过低会导致植株养分亏缺,浓度过高会引起植株根系周围渗透压过大、离子毒害以及养分吸收不均衡等问题。梁勇等使用山崎配方 Hymec 膜栽培生菜,研究显示营养液浓度升高到 6S 时生菜的生长才受到一定程度的抑制^[9]。而别之龙等用不同浓度的山崎生菜标准营养液配方进行生菜试验表明,浓度处理会影响生菜的营养生长,高浓度处理下导致细胞膜的正常功能受损,造成硝酸离子和 MDA 含量提高,2 个单位的营养液浓度处理显著抑制了水培生菜的生长。1/2 浓度处理下生菜的产量最高^[10]。二者结论存在差异,二者试验设计区别在于应用的水培技术不同,前者使用的是 Hymec 膜栽培技术,而后者使用的是深液流技术(DFT),可见应用不同技术,对水培植物生产影响程度更大,这是由于植物根对营养成分吸收方式以及氧气利用程度有关。陈淑芳等研究珍珠岩栽培黄瓜浇灌不同浓度营养液发现,低浓度处理减慢植物生长发育进程,高浓度处理促进植物生长旺盛,影响生殖生长^[11]。营养液浓度影响植物根的电解质交换作用以及呼吸作用,进而间接地影响蔬菜产量以及其他生理特性。大量研究表明,合理的营养液浓度有助于提高蔬菜光合作用能力和叶绿素含量。

还有研究表明,植物不同生长阶段应用不同营养液浓度配方,有利于植物生长^[12-13]。樊怀福等水培植物实验发现,在生产中采用营养液量化分段管理更能促进植物的生长和品质的形成,定植初期至缓苗前采用 EC 值为 0.5 ms/cm 的营养液,缓苗后至开花前采用 EC 值为 2 ms/cm 的营养液,开花期至坐果期采用 E 值为 3 ms/cm 的营养液。生菜、菠菜和水芹等叶菜类商品生产时只需要营养生长,生长过程中营养液组成相对固定,只是浓度随着植株的生长相应的提高,可以提高产量^[14]。徐加林发现,在生菜的不同生长发育时期,生长前期低营养液浓度管理可促进植株的生

长,生长中期和后期较高浓度会显著提高生菜的产量;但生长前期采用适中的营养液浓度,生长中期用高浓度营养液,后期供应低浓度营养液显著提高了可溶性蛋白、可溶性糖和维生素 C 含量,同时采收时的硝酸盐含量较低^[15]。

根据作物不同生长发育时期选择适宜的营养液浓度,是按需给肥、降低生产成本、提高作物产量和品质,增加经济效益的重要举措。但在叶菜类的生产过程中,也经常采用通过加大营养液浓度的方式来抑制植物生长。比如在夏季高温期,通过提高营养液浓度比遮光降温更能有效抑制植株生长发育,这是为了获得更好的产品品质,且可以降低能源消耗。

营养液浓度大还存在废液对环境的富养化问题。浓度越大的营养废液,其中含有的营养成分就越高,当前农业设施的废液往往采取直排的方式,造成城市水系富养化增加、水质改变、土壤盐渍化等次生污染。因此,如何提高低浓度营养液的利用效率,减少废液对环境的压力,将成为水培工厂需要着手解决的问题^[16]。

2.2 营养液配方的影响

不同营养液配方适用不同的蔬菜品种,对于同样的蔬菜品种,不同的营养液配方则产生不同的影响效果,大量研究都开展了调整营养液配方的工作^[17-21]。

丁文雅等采用雾培方法,对市面上几种营养液配方对生菜的影响进行了对比。研究发现,华南农大叶菜 B 的营养液 pH 升幅最小,英国 Hewitt 最大;华南农大叶菜 B 处理的生菜地上鲜重、干重最高,英国 Hewitt 以及 Hoagland 处理最低;华南农大叶菜 B 处理的生菜叶片还原型抗坏血酸含量、FRAP 抗氧化活性和 DPPY 自由基清除率最高,日本园试次之,日本山崎最低;华南农大的叶菜 B 处理生菜的可溶性糖含量最高,可溶性蛋白质含量与日本园试相当,显著高于其他配方,而硝酸盐含量稍低于日本园试和日本山崎配方^[22]。该研究表明,不同的营养液配方对生菜影响显著,特别是对生菜的品质影响程度更大。该研究也发现,水培技术方法和营养液配方也存在匹配的关系,日本山崎和英国 Hewitt 的营养液配方明显不适合用于雾培。

曲明山等对山崎生菜营养液配方进行了调整,结果表明:在保持 1 个单位标准浓度营养液配方中其他元素含量不变的基础上,施用硝酸钙 0.50 ~ 0.75 mmol/L 和硝酸铵 0.46 mmol/L,可以较

大幅度地提高生菜产量及其Vc含量,减少硝酸盐的积累,是水培生菜比较适宜的营养液施用方案^[23]。

近年来,受到生物质综合开发的影响,正在兴起沼液开发营养液的研究,杨丹等发现,沼液营养液有助于提高生菜种子萌发,采用10%浓度的沼液配方进行无土栽培处理,与常用营养液处理无差别,表明沼液开发无土栽培营养液是可行的^[24]。

3 光照

光照是植物生长发育的重要环境因子之一。光照条件的好坏影响植物的生理活动,进而影响植物的生长发育,最终影响植物产量和品质。植物生长发育主要受到光照的强度和光质影响。

3.1 光照强度

光照强度是指单位面积上所接受可见光的能量,反映了光照的强弱。按照植物对光的需求程度,分成光补偿点和光饱和点。植物在光补偿点以下,无净光合产物的积累。在饱和点以上,并不会增加产物积累,反而可能导致生理活动受到抑制^[25]。生菜的光补偿点为 $38.38\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、光饱和点 $851.1\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[26]。

太阳光中只有部分光能辐射可被植物吸收利用,称为生理辐射,包括直接参与光合作用的400~760 nm的可见光,影响植物化学成分和造型的290~400 nm的紫外线,以及被植物吸收转化为热能的红外线(大于1 050 nm)。在可见光谱中,植物吸收的红、橙光辐射(610~720 nm)约占生理辐射的55%,吸收的蓝、紫光辐射(400~510 nm)约占生理辐射的8%,因此光补偿设施要契合植物的生理辐射范围^[25]。

我国早期的设施农业发展中最突出的一个问题就是光照不足。我国设施农业的生产主要用于反季节栽培,生产季节都是光强较弱时期,再加上设施材料透光性问题,导致设施内光照强度严重不足。设施农业发展水平很大程度上是伴随人工辅助光设备的水平发展的。早期有白炽灯、荧光灯、金属卤化物灯、高压钠灯和日光色温灯等,现在逐步发展成LED光源^[27]。这是由于旧有设备往往都是高能耗产品,从节能角度以及光辐射效率对比,都不如LED光源,LED光能利用效率达80%~90%^[28]。LED光源还具有安全、环保、单色光、低发热、寿命长、稳定、体积小等诸多优点^[29-31]。

LED光源的特点,决定了它是植物工厂所需人工光源的首选。国际上最早提出应用LED对植物进行补光照明的Bula等应用红色LED和蓝色LED相结合,与荧光灯+白炽灯照明相比,发现生菜生长特性相近,而LED处理对鲜重和干重略有增加^[32]。杨其长、刘水丽等开发出国内第一批用于植物工厂育苗红蓝LED光环境调控装置。他们进行了人工光源和自然光环境下的生菜栽培试验。结果表明,人工光源下生菜光合速率显著高于自然光处理,散叶生菜光合速率为对照的1.8倍,奶油生菜为对照的1.3倍,散叶生菜和奶油生菜地上部鲜重最大值132.7 g和143.9 g,为对照的1.4倍和1.2倍,叶片数为对照的1.3倍和1.4倍^[33]。完全利用人工光的植物工厂,称为闭锁式植物工厂,被认为是植物工厂化发展的方向。但是,该研究也发现,人工环境生产的生菜维生素C含量、总糖含量、干物质率等指标要低于温室对照。这表明,人工环境并不能完全取代自然环境,对植物生长条件的研究和模拟任重道远。其他研究也表明,生菜中糖分和维生素的含量会随着光强增强而提高。王志敏等应用光照强度为 $100\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (RB100)、 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (RB200)和 $300\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (RB300)的红蓝LED光源,研究对生菜生长与品质的影响,发现低光强处理下生菜的株高、叶面积、根长、比叶面积、叶绿素含量和可溶性蛋白含量增加;RB300处理下生菜中有较高的可溶性糖,Vc含量最高,硝酸盐最低^[34]。证明低光强下,植物引发伸长生长,高光强下植物则提高产品品质。不过,关于光强和叶绿素的关系,不同研究也有不同的结论。周秋月等通过5个梯度的光强处理研究生菜的生长变化,发现硝酸盐的积累随着光强增加而减少,但是叶绿素含量却是随着光强增加而增加,并得出 $450\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 对生产和品质最有利的结论。王君等发现不同光强对生菜电能和光能利用效率及品质的影响存在差异,中等强度的 $300\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 处理地上生物量积累以及可溶性糖含量最高,硝酸盐含量较低,推荐该强度作为LED光源下生菜生长较优的光照强度^[35]。国际上也普遍认为红蓝光结合优于单独的红色LED照明,有利于生菜等植物提高产量^[36]。但是王君等在实验中应用的红蓝光配比设定为1:1,这与国际上大多数研究红蓝光配比关系不一致,Yorio研究发现红色LED+10%蓝光LED处理下的干重要高于其他处理,研究认为适量补充蓝光可极大促进生菜等植物生长^[37]。

LED光源不仅对植物工厂水培的生菜生长起作用,对土培生菜也有显著作用。刘文科等发现LED光源对土培生菜采收前进行连续照射6天,可以提高生菜营养品质。各种光质都不能显著增加叶绿素和胡萝卜素含量,但是单独的红光、蓝光和红蓝光处理都能够显著降低生菜硝酸盐含量,并提高花青素含量^[38]。

3.2 光质的作用

不同光质对生菜生长的影响存在差异,徐莉等以不同颜色荧光灯(白光、红光、蓝光、黄光)为光源,在人工控制的条件下对生菜照光25天后进行生长和品质指标的测定。结果表明:黄光对生菜的生长效果好,其次是白光,红光和蓝光对生菜生长不利;可溶性糖含量以黄光处理最高,之后依次是红光、蓝光;可溶性蛋白、Vc、干物质含量以黄光最高,其次是蓝光;硝酸盐含量以黄光处理的最低,而蓝光、红光处理,其含量与对照相比有显著的提高;蓝光处理下植株的Mg、Zn、Cu、Mn含量显著高于白光。结论认为黄光对提高生菜的食用品质效果最好,但蓝光更有利于显著提高生菜矿质元素的含量^[39]。该研究证明黄光对植物生长也起到重要作用。许多学者将黄光波段(580~600 nm)归到绿光波段。Kim等研究红光+蓝光LED(ppf为 $136\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),再添加5%($6\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)绿光照明对生菜生长的影响,发现增加绿光可以改善生菜在红蓝光照下呈现的紫灰色^[40]。加大绿光含量到24%,发现此处理下,生菜具有更大的鲜重和干重,以及更大的叶片面积。而更高比例的绿色荧光(86%绿光)处理下,生菜生物量最小,表明适量绿光才能促进植物生长^[41]。国内张明毅等获得类似结论,他们发现在红蓝光整体以及蓝光光亮不变的前提下,加入25%绿光提高了生菜的产量,但当绿光比例大约50%以上时,生菜生长趋缓。该研究还发现,红蓝光光质配比为85:15时有助于生菜生长^[42]。2005年,Tamulaitis等发现远红外光在白天照明和夜间照明以及不同照明周期对生菜光合特性影响存在显著差异,表明远红外光对植物生长具有重要意义^[43]。2011年,闻婧等研究了不同红蓝LED光对比对生菜生长的影响。发现660 nm红光和450 nm蓝光组合照明可以有效提高生菜的光能利用率,促进光合作用。R/B比例为8能有效提高维生素C含量,降低硝酸盐含量,提高生菜品质。又发现660 nm红光+450 nm蓝光的和630 nm红光+460 nm蓝光组合照明,对生菜光合速率、蒸腾速

率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、维生素C、总糖和硝酸盐含量均无显著差异,但后者单株耗电量比前者节省53.3%^[44]。这对实际生产有重大指导意义。

可见,不同光质的确影响生菜的生长,且不同光质组合还影响电能的消耗水平,不恰当的光质管理会导致生菜生产减产,还会增加实际运营管理的成本费用。成熟的植物工厂应该根据不同光谱组合性质,来对生菜营养成分和口味进行调整,种出比普通温室或者大田出产的品质更佳的产品。

4 其他影响因素

刘磊等研究发现通气处理可显著降低生菜叶片的硝酸盐、纤维素含量,提高维生素C、可溶性糖和可溶性蛋白质的含量,特别是其中以7:00~19:00每隔4小时通气2小时的处理对提高生菜平均单株质量和品质效果最好^[45]。水培作物根部呼吸所需的氧气一部分来自于营养液中根系直接吸收的溶解氧,另一部分是位于液面之上的根系吸收的空气中的氧气^[46]。有研究指出,营养液中的溶解氧含量越高,裸露于空气的根系所占的比例越大,作物根系的生长就越好^[47]。付立波等开展生菜悬根长度对产量和质量实验,探究生菜在静液水培条件下,裸露在液面上多大比例根系,更有利于水培生菜生长。研究通过对营养液中溶解氧含量的检测发现,在一定范围内,悬根长度与水中溶解氧含量呈正相关趋势。结论是采用2 cm悬根处理,可以提高生菜的生理指标和品质^[48]。

严妍等研究不同昼夜温度对生菜生长和品质的影响,发现随着昼温的升高,生菜的叶片数、地上部干鲜质量、根干鲜质量、叶面积等均显著增加。30℃条件下,茎长/茎粗的值显著增大,但并未造成抽薹现象,不影响生菜的商品性。夜温对生菜生长影响较小,较低的夜温有助于抑制抽薹的发生,有利于提高生菜品质^[49]。该研究表明,水培生菜应控制昼温在25~30℃较为适宜。夜温控制在15~25℃之间即可,有利于节省能源运行成本。李润儒等研究了5个根区温度对水培生菜的生长影响,发现根区温度提高,有利于提高单株生菜产量,在25℃达到最大,且干物质最高;达到35℃处理时,植物生长受到严重阻碍^[50]。

综上所述,植物工厂培植生菜技术,随着日新月异的设备更迭,涌现出大量新技术,也给研究者提供了大量新课题。如何减少生产上的投入,

增加经营性收入,是广大理论工作者在制定实验目标时候亟需考虑的问题。

参考文献:

- [1] 倪水员.生菜营养价值及栽培技术[J].吉林蔬菜,2011(5):23.
- [2] 王化.中国蔬菜无土栽培发展历史的初步探讨[J].上海蔬菜,1997(1):11-12.
- [3] 王星海,李迁.营养液膜(NFT)生菜栽培技术[J].西北园艺,1999(5):24-25.
- [4] 齐敬伟.人工光源条件下营养液条件对水培生菜生长的影响[D].保定:河北农业大学,2015.
- [5] 陈胜文,谢伟平,肖英银,等.红叶生菜深液流水培技术[J].长江蔬菜,2008(15):30-31.
- [6] 张东旭,张洁,张晓文,等.深液流技术(DFT)生菜栽培条件探索[J].农业工程技术(温室园艺),2012(5):54-56.
- [7] 袁桂英.水培蔬菜简易栽培技术的研究[D].南京:南京农业大学,2009.
- [8] Hayden A. Aeroponic and hydroponic systems for medicinal herb, rhizome, Aeroponic and hydroponic systems for medicinal herb, rhizome, and root crops[J]. HortScience, 2006, 43(3): 536-538.
- [9] 梁勇,卜崇兴,郭世荣,等.不同营养液浓度处理下 Hymec 膜栽培生菜的试验研究[J].上海农业学报,2007(2):50-52.
- [10] 别之龙,徐加林,杨小峰.营养液浓度对水培生菜生长和硝酸盐积累的影响[J].农业工程学报,2005(S2):109-112.
- [11] 陈淑芳,窦锐贤.不同营养液浓度对黄瓜幼苗生长的影响[J].安徽农业科学,2007(34):11056-11057.
- [12] 林多,黄丹枫,杨延杰,等.营养液浓度对基质栽培网纹甜瓜生长和品质的影响[J].华北农学报,2007(2):184-186.
- [13] 杨晓峰,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.
- [14] 樊怀福,杜长霞,朱祝军.调节营养液电导率对卡罗番茄果实品质和产量的影响[J].西北农业学报,2011(4):102-105.
- [15] 徐加林.营养液调控对生菜生长和硝酸盐积累的影响[D].武汉:华中农业大学,2005.
- [16] 范洁群,吴淑杭,褚长彬,等.无土栽培营养液废液循环利用研究进展[J].农学学报,2014(7):51-53.
- [17] 尚庆茂,高丽红,李式军.硒素营养对水培生菜品质的影响[J].中国农业大学学报,1998(3):67-71.
- [18] 苏苑君,胡笑涛,王瑞,等.不同氮磷钾水平对水培生菜产量和品质的影响[J].仲恺农业工程学院学报,2014(4):15-19.
- [19] 苏苑君,胡笑涛,王文娥,等.磷对水培生菜生长及矿质元素动态吸收的影响[J].中国生态农业学报,2015(10):1244-1252.
- [20] 苏苑君,胡笑涛,王文娥,等.钾浓度对水培生菜生长及矿质元素动态吸收的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016(8):191-196.
- [21] 苏苑君,王文娥,胡笑涛,等.氮对水培生菜营养液元素动态变化及产量与品质的影响[J].华北农学报,2016(3):198-204.
- [22] 丁文雅,邹小撑,刘敏娜,等.不同营养液配方对雾培生菜生物量和营养品质的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2012,38(2):175-184.
- [23] 曲明山,董海泉,邢文鑫,等.调整山崎生菜营养液配方对生菜产量及品质的影响[J].河北农业科学,2012,16(8):31-35.
- [24] 杨丹,刘静,刘程,等.浓缩沼液在无土栽培生菜上应用研究[J].中国沼气,2016(5):87-90.
- [25] 张欢.光环境调控对植物生长发育的影响[D].南京:南京农业大学,2010.
- [26] 徐坤,康立美,赵红军,等.结球莴苣光合特性研究[J].园艺学报,1995(4):363-366.
- [27] 刘再亮,马承伟,杨其长.设施环境中红光与远红光比值调控的研究进展[J].农业工程学报,2004(1):270-273.
- [28] 魏灵玲,杨其长,刘水丽.LED在植物工厂中的研究现状与应用前景[J].中国农学通报,2007(11):408-411.
- [29] 陈洪国.LED在植物工厂中的应用[J].液晶与显示,1996(4):311-312.
- [30] 于海业,王永志,张蕾.LED在设施农业中的应用[J].农机化研究,2009(5):190-192.
- [31] 周国泉,徐一清,付顺华,等.温室植物生产用人工光源研究进展[J].浙江林学院学报,2008(6):798-802.
- [32] Bula R J, Morrow R C, Tibbitts T W, et al. Light emitting diodes as a radiation source for plants[J]. HortScience, 1991,26(2):203-205.
- [33] 刘水丽.人工光源在闭锁式植物工厂中的应用研究[D].北京:中国农业科学院,2007.
- [34] 王志敏,宋非非,徐志刚,等.不同红蓝LED光照强度对叶用莴苣生长和品质的影响[J].中国蔬菜,2011(16):44-49.
- [35] 王君,杨其长,全宇欣.红蓝光下光强对生菜电能、光能利用效率及品质的影响[J].中国农业大学学报,2016(8):59-66.
- [36] Yorio N C, Wheeler R M, Goins G D, et al. Bule light requirements for crop plants used in bioregenerative life support systems [J]. Life support & biosphere science: international journal of earth space, 1998, 5(2): 119-128.
- [37] Yorio N, Goins G, Kagie H, et al. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation[J]. HortScience, 2001, 36(2): 380-383.
- [38] 刘文科,杨其长,邱志平,等.不同LED光质对生菜生长和营养品质的影响[J].蔬菜,2012(11):63-65.
- [39] 许莉,尉辉,齐连东,等.不同光质对叶用莴苣生长和品质的影响[J].中国果菜,2010(4):19-22.
- [40] Kim H, Wheeler R, Sager J, et al. A comparison of growth and photosynthetic characteristics of lettuce grown under red and blue light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental green LEDs [J]. Acta horticulturae, 2004, 659: 467-475.
- [41] Kim H, Goins G, Wheeler R, et al. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes[J]. HortScience, 2004, 39(7):1617-1622.
- [42] 张明毅,方炜,邹家琪.植物照明中绿光比例对不同莴苣生长之影响[A].2011第二届中国·寿光国际设施园艺高层学术论坛[C].中国山东寿光,2011:385-393.

- [43] Tamulaitis G, Duchovskis P, Bliznikas Z, et al. High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2005, 38(17):3182-3187.
- [44] 闻 婧,杨其长,魏灵玲,等.不同红蓝LED组合光源对叶用莴苣光合特性和品质的影响及节能评价[J].园艺学报, 2011(4):761-769.
- [45] 刘 磊,曾 迪,谢玉萍,等.水培生菜高产品种筛选及不同通气处理对生菜平均单株质量和品质的影响[J].热带作物学报,2012(4):613-616.
- [46] 宋卫堂,张树阁,黄之栋.营养液动态液位法的原理及其增氧效果[J].农业工程学报,2003(2):194-198.
- [47] 徐志豪,张德威.改善水培作物根际氧气供给的原理和实践[J].浙江农业学报,1994(1):45-49.
- [48] 付利波,贾 菲,杨志新,等.悬根长度对水培生菜产量质量和水溶氧的影响[J].西南农业学报,2015(4):1775-1779.
- [49] 严 妍,雷 波,汪力威,等.不同昼夜温度对水培生菜生长和品质的影响[J].长江蔬菜,2010(24):39-42.
- [50] 李润儒,朱月林,高垣美智子,等.根区温度对水培生菜生长和矿质元素含量的影响[J].上海农业学报,2015(3):48-52.
- (责任编辑:王 昱)