

## LED红蓝光强对水培生菜生长以及有机碳和自毒物质分泌的影响

周成波, 刘文科\*, 查凌雁, 李宗耕, 张玉彬, 邵明杰, 李宝石

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业农村部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京100081

**摘要:** 为了探明发光二极管(LED)红(R)蓝(B)光强对生菜(*Lactuca sativa*)生长的调控机理, 在密闭植物工厂内, 以红蓝LED (红光:蓝光=4:1, 4R:1B)为光源, 研究了100  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (RBL1)、200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (RBL2)和300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (RBL3)光强对水培生菜生长和根系分泌物的影响。结果表明: RBL1处理下生菜生物量较低, RBL2和RBL3地上部生物量均较高, 地下部生物量以RBL3最高; 三个处理下生菜叶片净光合速率随处理光强增加而逐渐升高; 在根系的生长发育和形态结构方面以RBL3处理最佳, RBL1最低; RBL3处理下营养液中总有机碳(TOC)浓度较高, 而积累单位生物量(地上部和地下部)释放的有机碳量和单位根系表面积释放的有机碳量各处理之间无显著差异; 此外, 5种自毒物质分泌量在RBL1和RBL2处理下较低, 与这两个处理相比, RBL3下5种自毒物质均显著提高超过150%, 且生菜根系自毒物质分泌量依次为水杨酸>阿魏酸>苯甲酸>单宁酸>没食子酸。总之, 各处理水培生菜通过根系释放的有机碳量差异不大, 自毒物质以水杨酸含量最高。LED红蓝光强为200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时能够降低环境中自毒物质的含量, 同时促进生菜的生长, 降低光合产物在地下部的分配比例, 以保证生菜产量。因此, 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光强更适于植物工厂水培生菜的生长。

**关键词:** 生菜; 水培; 光强; TOC; 自毒物质

光是植物进行光合作用的基本能源, 也是植物生长发育的重要调节因子。植物的生长发育不仅受光强制约, 而且受光质及其组成比例的影响(许大全等2015)。光环境对植物生长发育的调节过程包括种子萌发、茎的生长、叶和根的发育、成花诱导、叶绿素合成以及次生代谢等。随着设施农业的快速发展, 利用发光二极管(light-emitting diode, LED)光源光质纯度高、光强可调、耗能少、波长固定与低发热的优点, 研究光质光强对园艺作物生长发育、物质代谢和形态建成的影响已成为热点, 植物工厂生产和温室补光已成为设施园艺生产的一项关键技术(刘文科等2012; 曹刚等2013)。

植物工厂规模化生产逐渐成为一种趋势。植物工厂作为周年连续生产的高效农业系统, 多采用营养液自动循环系统, 虽然能够有效提高营养液中的溶解氧和养分利用效率, 但营养液中植物分泌的自毒物质会逐渐积累, 并抑制植物的生长, 这也是限制植物工厂生产的一个重要因素(Yu等2003; Yu和Matsui 1994)。为解决这一问题, 邱志平等(2013)发现采用纳米 $\text{TiO}_2$ 光催化的方法能有效去除营养液中自毒物质, 但同时也降低了有效态Fe、Mn、Zn元素的含量。而且, Talukder等(2019)采用电降解的方法可显著降低营养液中苯甲酸浓

度并增加草莓(*Fragaria* × *ananassa*)产量, 但是存在操作复杂、投入较高的问题。此外, 还可通过加温、活性炭吸附等方法去除营养液中自毒物质, 但都存在一定的弊端。光环境对植物根系的生长发育产生重要影响, 不仅能够调控根系形态建成, 还能够影响根系活力, 进而影响根系的次生代谢(杨俊伟等2018; 闫晓花等2016)。因此, 为更好地解决植物工厂营养液自毒物质的问题, 本团队计划从光环境调控的角度出发, 在提高产量的同时从源头上减少营养液中根系分泌物的含量。

生菜(*Lactuca sativa*)是一种全球性蔬菜, 富含蛋白质、维生素和纤维等营养物质, 在设施园艺中栽培广泛。生菜株型低矮, 品种多样, 生长速度快, 尤其适合在人工光植物工厂中规模化生产, 其栽培效率是露地生产的几十倍。光环境调控在人工光植物工厂水培生菜优质高产方面具有不可或缺的应用价值(查凌雁和刘文科2017)。关于光环境对生菜地上部生长的调控、温度和营养等其他条件对植物化感作用影响的研究已经很多, 但关

收稿 2019-02-18 修定 2019-03-22

资助 国家自然科学基金面上项目(31672202)和中央级科研院所基本科研业务费专项(BSRF201702和BSRF201711)。

\* 通讯作者(liuwenke@caas.cn)。

于光照环境对水培生菜根系分泌物自毒作用的调控的研究鲜有报道。本试验利用LED光源,研究了红蓝光下不同光强对小白菜生长及自毒物质分泌的影响,旨在探明植物工厂营养液循环系统中自毒物质对生产的限制作用,为设施生菜等叶菜的优质、高产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验于2018年11~12月在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所植物工厂内进行。试验以‘特波斯’生菜(*Lactuca sativa* L.)作为试验对象,2018年11月将种子点播于湿润海绵块(2.4 cm×2.4 cm)中,在200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强的白色LED灯下育苗至二叶一心时,将幼苗根系用去离子水冲洗3次后,移栽于栽培盆中(直径19 cm,高17 cm),每盆4株,每个处理4盆,每盆装4 L营养液,营养液采用Hoagland营养液配方。植物工厂环境温度为(25±1)°C昼/(22±1)°C夜,相对湿度为(65±5)%,CO<sub>2</sub>浓度为大气CO<sub>2</sub>浓度。

### 1.2 试验设计

选用LED红蓝组合灯板进行光照处理,灯板尺寸为50 cm×50 cm,红灯LED芯片主波长655 nm,蓝光芯片主波长437 nm(图1)。试验共设3个光照处理,分别为RBL1、RBL2和RBL3(表1)。采用LI 1500辐射照度测量仪(美国LI-COR公司)测量栽培盆上方5 cm处光强。

### 1.3 测定方法

移栽15 d后每个处理随机选择长势具有代表性的4株生菜测量叶面积、叶片数、地上部鲜重、地下部鲜重,于80°C下烘干测定地上部和地下部干重。净光合速率采用Li-6400光合仪(LI-COR,美国)选取顶端完全展开的第2~3片功能叶进

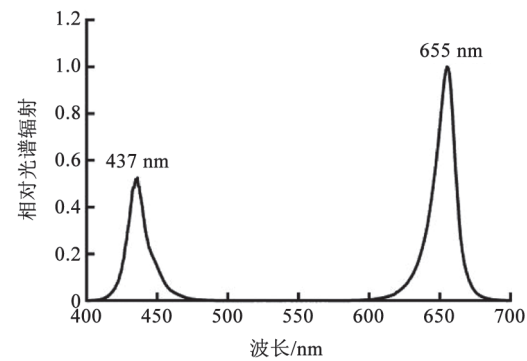


图1 LED红蓝组合灯相对光谱辐射

Fig.1 Relative spectral distributions of red and blue LED lights

行测定,测定时光合仪光质参数设定为红光/蓝光光强比4:1(4R:1B),CO<sub>2</sub>浓度400  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,温度(22±1)°C。根系形态指标的测定采用STD-4800扫描仪(Regent Instruments,加拿大)扫描后经Win-RHIZO根系分析系统进行分析,计算根长、根系表面积和根系体积。总有机碳(total organic carbon, TOC)浓度采用MultiN/C2100分析仪(Aanalytik Jena AG,德国)测定。

移栽15 d后每个处理随机选择长势具有代表性的4株生菜,用去离子水清洗根系3次,滤纸吸干根部,将植株放入盛有120 mL去离子水的100 mL三角瓶中,用铝箔纸包裹三角瓶遮光,分别在原光照条件下培养3 d后取出植株收集溶液,将收集到的溶液经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜抽滤后,保存在-80°C冰箱待测。苯甲酸、水杨酸含量采用紫外分光光度法测定(段科欣2009)。配制0、4、8、12、16  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的苯甲酸溶液各50 mL,227 nm波长处测定吸光度,绘制标准曲线,根据标准曲线计算吸光度;水杨酸样品浓度测定与苯甲酸类似,只是吸光度测定波长为297 nm。阿魏酸、没食子酸、单宁酸浓度采

表1 试验光照处理方案

Table 1 The details of light treatments

处理	光强/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	光质比例(红光光强:蓝光光强)	光周期(昼/夜)
RBL1	100	4:1	12 h/12 h
RBL2	200	4:1	12 h/12 h
RBL3	300	4:1	12 h/12 h

用 $\text{FeCl}_3\text{-K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 显色比色法进行测定(蒋乃翔等2010; 付煜荣等2006), 具体操作步骤: 分别吸取 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的阿魏酸标准液0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mL放入对应的试管中, 各试管用蒸馏水定容至2.5 mL, 然后用无水乙醇定容至5 mL, 接着各试管加入 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的十二烷基硫酸钠水溶液2 mL, 再加入将 $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 三氯化铁水溶液和 $9\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铁氰化钾水溶液按体积比10:9混和配制的溶液(现用现配) 1 mL, 暗处放置5 min后, 用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸定容至25 mL, 混匀, 显色20 min后, 720 nm波长处测定吸光度, 绘制标准曲线, 采用与标准曲线相同的操作步骤, 对阿魏酸样品进行比色, 然后根据标准曲线计算阿魏酸样品对应的浓度值, 实际样品的浓度值为标准曲线计算出的浓度值乘以10; 没食子酸、单宁酸样品浓度测定与阿魏酸相同。

#### 1.4 数据处理

分别用Microsoft Excel 2010和SigmaPlot 10.0软件处理数据和作图, 用方差分析软件对数据进行单因素方差分析, 并运用Duncan检验法对显著性差异( $P<0.05$ )进行多重比较。

## 2 实验结果

### 2.1 LED红蓝光强对生菜生长的影响

如表2所示, RBL3处理下叶片数最多, 显著多于RBL1, 但与RBL2差异不显著。RBL2和RBL3处理下地上部鲜重、地上部干重和叶面积均较高, 显著高于RBL1, 但是两个处理之间无显著差异。地下部鲜重、地下部干重和根冠比的趋势均为RBL3>RBL2>RBL1, 且各处理之间差异显著。结果说明在200和 $300\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下生菜地上部生长没有显著差异, 但显著高于 $100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强; 而

$300\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强对生菜地下部生长促进效果更显著。

### 2.2 LED红蓝光强对生菜气体交换参数的影响

图2-A为RBL1、RBL2和RBL3处理生菜分别于生长光强下测定的净光合速率(即RBL1于 $100\text{ }\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、RBL2于 $200\text{ }\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、RBL3于 $300\text{ }\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下测定净光合速率), RBL3处理下生菜叶片净光合速率最高, 分别比RBL1和RBL2处理高189%和31.2%。图2-B为RBL1、RBL2和RBL3处理生菜在 $1500\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 饱和光强下测定的净光合速率, RBL2和RBL3处理无显著差异, 但均显著高于RBL1。光合量子效率为净光合速率与测定时光强的比值(例如, RBL1处理的光合量子效率为 $4.3/100$ , 4.3为RBL1处理生菜叶片于 $100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下测定的净光合速率, 100为RBL1处理下生菜的生长光强; 同理, RBL2的光合量子效率为 $9.4/200$ , RBL3的光合量子效率为 $12.3/300$ ), 以RBL2处理最高, 与RBL1差异不显著, 但显著高于RBL3处理(图2-C)。结果说明虽然RBL3处理生菜叶片在生长光强下有最高的净光合速率, 但光合量子效率最低, 而RBL2处理在生长光强下净光合速率较RBL3低, 但有较高的光合量子效率; 同时RBL2和RBL3在 $1500\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下净光合速率均较高, 表明这两个处理在饱和光强下都有较大的光合潜能。

### 2.3 LED红蓝光强对生菜根系形态特征和有机碳分泌的影响

由表3可知, RBL3处理下生菜根系总根长显著高于其他处理, 分别比RBL1和RBL2处理提高213.7%和68.3%; 生菜根系表面积和根系体积趋势与总根长一致, 均为RBL3>RBL2>RBL1, 且各处理之间差异显著。TOC浓度在RBL3处理下显著高于

表2 LED红蓝光强对生菜生长的影响

Table 2 Effects of red and blue LED light intensities on the growth of lettuce

处理	叶片数	叶面积/cm <sup>2</sup>	鲜重/g		干重/g		根冠比
			地上部	地下部	地上部	地下部	
RBL1	13.0±0.82 <sup>b</sup>	371.5±31.8 <sup>b</sup>	13.3±1.59 <sup>b</sup>	1.44±0.14 <sup>c</sup>	0.601±0.05 <sup>b</sup>	0.06±0.01 <sup>c</sup>	0.107±0.005 <sup>c</sup>
RBL2	14.3±0.96 <sup>ab</sup>	571.5±53.7 <sup>a</sup>	26.0±2.48 <sup>a</sup>	3.56±0.33 <sup>b</sup>	1.010±0.07 <sup>a</sup>	0.14±0.02 <sup>b</sup>	0.141±0.018 <sup>b</sup>
RBL3	15.3±1.26 <sup>a</sup>	551.4±74.4 <sup>a</sup>	27.5±3.98 <sup>a</sup>	5.46±0.57 <sup>a</sup>	1.255±0.23 <sup>a</sup>	0.23±0.02 <sup>a</sup>	0.183±0.027 <sup>a</sup>

同列数据用不同小写字母标识表示差异显著( $P<0.05$ ), 表3同此。

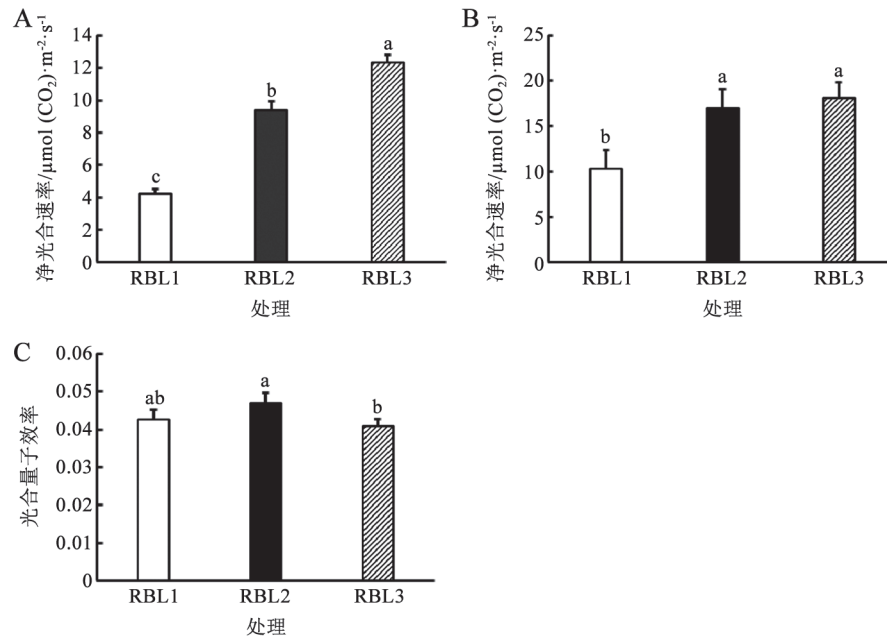


图2 LED红蓝光强对生菜叶片光合气体交换参数的影响

Fig.2 Effects of red and blue LED light intensities on photosynthetic gas exchange parameters of lettuce leaves

各柱形上用不同小写字母标识表示数据间差异显著( $P < 0.05$ ), 图3和4同此。

表3 LED红蓝光强对生菜根系形态特征和有机碳分泌的影响

Table 3 Effects of red and blue LED light intensities on the root characteristics and organic carbon accumulation of lettuce

处理	总根长/cm	根系表面积/ $\text{cm}^2$	根系体积/ $\text{cm}^3$	TOC浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TOC分泌量/mg
RBL1	2 312.4±199.7 <sup>c</sup>	143.0±11.8 <sup>c</sup>	0.704±0.06 <sup>c</sup>	3.95±2.53 <sup>b</sup>	3.19±2.10 <sup>a</sup>
RBL2	4 310.7±414.4 <sup>b</sup>	306.4±33.3 <sup>b</sup>	1.734±0.22 <sup>b</sup>	5.24±1.93 <sup>b</sup>	3.55±1.24 <sup>a</sup>
RBL3	7 253.4±909.3 <sup>a</sup>	536.3±62.5 <sup>a</sup>	3.170±0.39 <sup>a</sup>	8.53±2.70 <sup>a</sup>	5.37±1.56 <sup>a</sup>

其他两个处理, RBL2处理较RBL1高, 但两者无显著差异; 营养液中TOC分泌量以RBL3较高, 但各处理之间差异不显著。以上结果说明, 随着光强的增加, 有利于水培生菜根系生长和形态结构建成, 同时营养液中TOC浓度也逐渐增加, 其中以RBL3处理最高, 但是各处理下有机碳的总分泌量无显著差异。

#### 2.4 LED红蓝光强下生菜根系有机碳分泌特征的分析

如图3所示, TOC含量/地上部鲜重与TOC含量/地上部干重均在RBL1处理下较高, 但各处理之间无显著差异。同样, TOC含量/地下部鲜重与TOC含量/地下部干重在RBL1处理下较高, 但各处理之间无显著差异。TOC含量/根系表面积在RBL1处理较高, 其次是RBL2, 但各处理之间无显著差异。

结果说明各LED红蓝光强处理下每生产单位质量的地上部、地下部的鲜重和干重而分泌的总的有机碳的量之间无显著差异, 同样, 单位根系表面积分泌的有机碳的量各处理之间也无显著差异。

#### 2.5 LED红蓝光强对生菜根系自毒物质分泌量的影响

由图4可知, 不同根系自毒物质在各红蓝光强处理下趋势表现一致, 均在RBL3处理下浓度较高, 远远高于其他两个处理, 而RBL1和RBL2两个处理之间无显著差异。RBL3处理下生菜根系自毒物质分泌量依次为水杨酸>阿魏酸>苯甲酸>单宁酸>没食子酸, 说明水杨酸是5种自毒物质中生菜根系分泌最多的, 当光强不超过 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 生菜根系分泌的自毒物质含量较少, 而当光强超过200

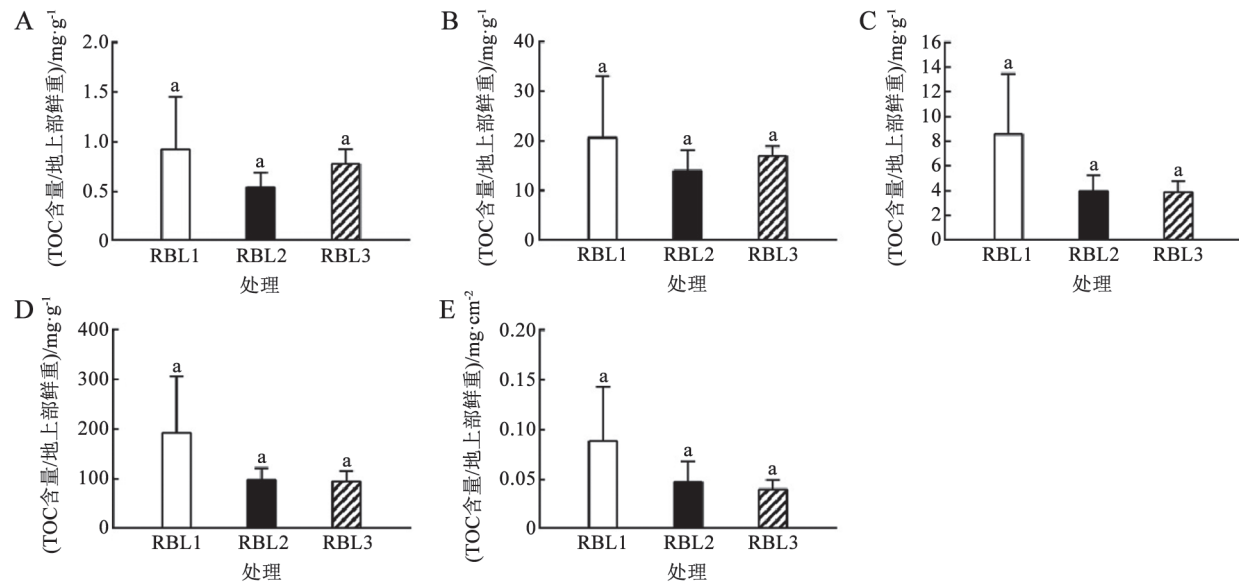


图3 LED红蓝光强下生菜有机碳分泌特征的分析

Fig.3 Analysis of the characteristics of organic carbon secretion in lettuce under red and blue LED light intensities

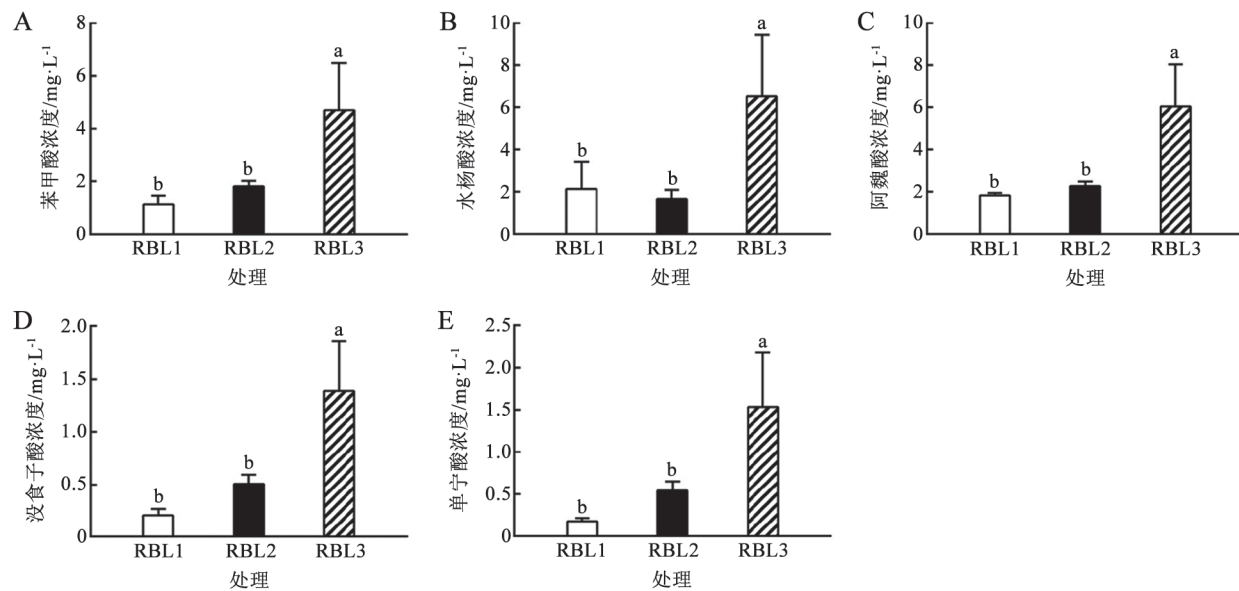


图4 LED红蓝光强对生菜根系自毒物质分泌量的影响

Fig.4 Effects of red and blue LED light intensities on the secretion of autotoxic substances in lettuce root

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,生菜根系分泌的自毒物质含量大大提高。

### 3 讨论

光是植物生长发育的基本环境因素,它不仅

是光合作用的基本能源,而且是植物生长发育的重要调节因子(许大全等2015)。植株生长状况的改变是植物响应环境改变的最直接表现,体现出植物对环境的适应性(马光恕等2002)。前人研究表明,红光可通过抑制光合产物从叶片中的输出,

使植株体内淀粉和可溶性糖含量明显增加(郭银生等2011; Sæbø等1995), 蓝光能够调控叶绿素形成, 促进叶绿体发育与气孔开启等生理过程(周成波等2017; 李韶山和潘瑞焱1994), 而红蓝组合光照射能提高植物叶片光合速率、促进碳水化合物的积累, 并提高品质(Savvides等2012; Hogewoning等2010)。种培芳和陈年来(2008)发现随着光照强度不断增加, 生菜地上部分的积累量逐渐增加, 但当达到一定强度时则开始下降。本研究中, RBL2处理与RBL1相比, 地上部和地下部的鲜重、干重以及叶面积都显著提高; RBL3与RBL2相比, 地下部鲜重和干重均显著提高, 说明在 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强内增加光照强度能够促进生菜的生长。然而相较于对地下部的显著促进效果, RBL3对地上部的促进效果并没有显著高于RBL2处理, 表明较高的光强更多地促进了生菜地下部的生长发育而不是地上部。RBL2相比于RBL1处理光强增加了 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 净光合速率提高了120.2%, 而RBL3相比于RBL2在增加光强程度一样的情况下净光合速率只提高了31.2%。因此, RBL2处理下光合量子效率最高, RBL3处理下生菜叶片虽然净光合速率较高但光合量子效率却较低, 且在 $1\ 500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 饱和光强下, 只有RBL1净光合速率较低, RBL2和RBL3处理下生菜均有较高的光合潜能, 这也解释了RBL3下生菜有较高的生长量, 但只是略高于RBL2处理, 而RBL1下生长量最低。同时随着光强的提高, 根冠比逐渐增加, 说明根系生长与地上部植株光合作用产物的供应密切相关, 高光强有利于增加光合作用产物在地下部的分配比例, 这与高佳等(2017)在玉米上的研究结果一致。

光作为重要的环境因子, 既能通过改变植株内源激素的水平来调控侧根的发生、根系细胞的分化以及细胞壁的重塑, 也能通过调控光合产物的合成以及向地下部根系的运输和分配影响根系形态建成(于晓波等2015; Molas等2006; Cluis等2004)。徐经年等(2015)在烟苗(*Nicotiana tabacum*)的研究中发现红蓝组合光源能够有效提高植株根系活力和根系表面积。在本研究中, RBL3处理下根系总根长、表面积和体积均显著高于其他处理, 说明此处理最利于生菜根系的发育, 因此RBL3处

理下生菜株型更加健壮紧凑。同时, 此处理下营养液中的有机碳浓度也较高, 虽然有机碳总分泌量稍高, 但与其他处理差异不显著。而RBL2处理在保持较大的根系形态有利于根系对水分和养分吸收的同时, 营养液中的TOC浓度和有机碳的分泌量并没有较大提高, 说明 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强在促进根系生长的同时, 并不会将过多的碳水化合物通过根系释放到营养液中, 这也解释了RBL2在光合作用稍低的情况下还能够保持与RBL3处理相当的地上部生物量的原因。

在植物生长过程中, 根系不仅从环境中摄取养分和水分, 同时也会向生长介质中分泌质子, 释放无机离子, 分泌大量的有机物, 即根系分泌物。而这些物质向环境的释放和分泌会引起化感作用, 影响其他有机体的生长和发育, 当受体和供体同属于一种植物时产生的抑制作用, 称为植物的自毒作用(Hierro和Callaway 2003)。自毒物质的存在, 是导致连作障碍的一个重要因素(吴凤芝和王伟1999)。连作障碍是生产实践中普遍存在的问题, 它不仅存在于土壤栽培中, 设施园艺水培栽培中也同样存在。Lee等(2006)在水培生菜的研究中在营养液中鉴定到了有机酸的存在, 并发现随着营养液使用次数的增加, 营养液中苯甲酸等酚酸类根系分泌物含量也增加, 导致生菜地上部和地下部的生长都受到抑制。前人研究表明, 生菜根系分泌物中酚酸类物质主要有苯甲酸、水杨酸、阿魏酸、没食子酸、单宁酸等(Neumann等2014; Lee等2006)。本研究中, 检测的五种自毒物质在 $100$ 和 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下浓度较低, 而当光强达到 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 五种自毒物质浓度均显著提高, 且提高幅度均在150%以上。有研究表明, 化感物质会使植株体内产生活性氧, 从而激活根系的抗氧化机制, 而过多的化感物质会导致根细胞膜质过氧化, 细胞膜损伤, 丙二醛含量增加, 进而破坏线粒体和细胞核等细胞器, 最终使叶绿体膜、质膜降解, 此外, 还能够干扰光系统I到光系统II的电子传递功能, 对植物造成不可逆的损伤(Ullah等2015; Qian等2009; Weir等2004)。因此, 推测本研究中水培生菜在 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下光合量子效率降低与营养液中自毒物质的积累有关,

是导致此处理下地上部生物量没有显著高于200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强处理的重要原因。

综上所述, 太低的光强( $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )不利于生菜的生长, 随着红蓝光强的提高, 能够显著提高植物的光合作用, 促进生菜的生长发育, 增加产量, 当光强达到 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 虽然能够提高植物的光合作用, 增加地下部的生物量, 但是光合效率显著降低, 同时增加了生菜根系有机碳的释放和自毒物质的分泌, 并未有效提高生菜产量, 造成光合产物在一定程度上的浪费。因此, 在红/蓝光质比4:1条件下,  $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强不仅能够获得较大的产量, 还能有效的降低能耗和资源浪费, 所以更适合植物工厂水培生菜的生产。

### 参考文献(References)

- Cao G, Zhang GB, Yu JH, et al (2013). Effects of different LED light qualities on cucumber seedling growth and chlorophyll fluorescence parameters. *Sci Agr Sin*, 46 (6): 1297–1304 (in Chinese with English abstract) [曹刚, 张国斌, 郁继华等(2013). 不同光质LED光源对黄瓜苗期生长及叶绿素荧光参数的影响. *中国农业科学*, 46 (6): 1297–1304]
- Cluis CP, Mouchel CF, Hardtke CS (2004). The *Arabidopsis* transcription factor HY5 integrates light and hormone signaling pathways. *Plant J*, 38 (2): 332–347
- Duan K (2009). *Experiments of Instrument Analysis*. Beijing: Chemical Industry Press (in Chinese) [段科欣(2009). 仪器分析实验. 北京: 化学工业出版社]
- Fu YR, Zhang WM, Chen GM, et al (2006). Determination of gallic acid and total phenolic acid in *Sedum aizoon* L. *Chin Tradit Pat Med*, 28 (7): 1016–1018 (in Chinese with English abstract) [付煜荣, 张万明, 陈桂敏等(2006). 景天三七中没食子酸和总酚酸含量测定. *中成药*, 28 (7): 1016–1018]
- Gao J, Shi JG, Dong ST, et al (2017). Effect of different light intensities on root characteristics and grain yield of summer maize (*Zea mays* L.). *Sci Agr Sin*, 50 (11): 2104–2113 (in Chinese with English abstract) [高佳, 史建国, 董树亭等(2017). 花粒期光照强度对夏玉米根系生长和产量的影响. *中国农业科学*, 50 (11): 2104–2113]
- Guo YS, Gu AS, Cui J (2011). Effects of light quality on rice seedlings growth and physiological characteristics. *Chin J Appl Ecol*, 22 (6): 1485–1492 (in Chinese with English abstract) [郭银生, 谷艾素, 崔瑾(2011). 光质对水稻幼苗生长及生理特性的影响. *应用生态学报*, 22 (6): 1485–1492]
- Hierro JL, Callaway RW (2003). Allelopathy and exotic plant invasion. *Plant Soil*, 256: 29–39
- Hogewoning SW, Trouwborst G, Maljaars H, et al (2010). Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *J Exp Bot*, 61 (11): 3107–3117
- Jiang N, Liu Z, Ren H, et al (2010). Changes of phenolic acids and total phenolic acids contents in cell walls of Moso bamboos at different ages. *J Bamboo Res*, 29 (1): 24–28 (in Chinese with English abstract) [蒋乃翔, 刘志明, 任海青等(2010). 不同竹龄毛竹细胞壁总酚酸和酚酸类物质的含量变化. *竹子研究汇刊*, 29 (1): 24–28]
- Lee JG, Lee BY, Lee, HJ (2006). Accumulation of phytotoxic organic acids in reused nutrient solution during hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Sci Hortic*, 110 (2): 119–128
- Li S, Pan R (1994). Effects of blue light on the growth of rice seedlings. *Chin J Rice Sci*, 8 (2): 115–118 (in Chinese with English abstract) [李韶山, 潘瑞焱(1994). 蓝光对水稻幼苗生长效应的研究. *中国水稻科学*, 8 (2): 115–118]
- Liu W, Yang Q, Wei L (2012). *Light-Emitting Diodes (LEDs) and Their Applications in Protected Horticulture as Light Sources*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press (in Chinese) [刘文科, 杨其长, 魏灵玲(2012). LED光源及其设施园艺应用. 北京: 中国农业科学技术出版社]
- Ma G, Lian H, Yan M (2002). Effects of different mulching materials on the growth and development of tomato in greenhouse. *J Jilin Agr Sci*, 27 (4): 41–43 (in Chinese) [马光恕, 廉华, 闫明伟(2002). 不同覆盖材料对大棚内番茄生长发育的影响. *吉林农业科学*, 27 (4): 41–43]
- Molas ML, Kiss JZ, Correll MJ (2006). Gene profiling of the red light signalling pathways in roots. *J Exp Bot*, 57 (12): 3217–3229
- Neumann G, Bott S, Ohler MA, et al (2014). Root exudation and root development of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Tizian) as affected by different soils. *Front Microbiol*, 5: 2
- Qian H, Xu X, Chen W, et al (2009). Allelochemical stress causes oxidative damage and inhibition of photosynthesis in *Chlorella vulgaris*. *Chemosphere*, 75 (3): 368–375
- Qiu ZP, Yang QC, Liu WK (2013). Effect of nano-TiO<sub>2</sub> photocatalysis on yield and quality of hydroponic lettuce. *Acta Agr Boreali Sin*, 28 (2): 103–107 (in Chinese with English abstract) [邱志平, 杨其长, 刘文科(2013). 纳米TiO<sub>2</sub>光催化处理对水培生菜产量及品质的影响. *华北农学报*, 28 (2): 103–107]
- Sæbø A, Krekling T, Appelgren M (1995). Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets *in vitro*. *Plant Cell Tissue Organ Cult*, 41 (2): 177–185
- Savvides A, Fanourakis D, van Ieperen W (2012). Co-ordina-

- tion of hydraulic and stomatal conductances across light qualities in cucumber leaves. *J Exp Bot*, 63 (3): 1135–1143
- Talukder MR, Asaduzzaman M, Tanaka H, et al (2019). Electro-degradation of culture solution improves growth, yield and quality of strawberry plants grown in closed hydroponics. *Sci Hortic*, 243: 243–251
- Ullah N, Haq IU, Safdar N, et al (2015). Physiological and biochemical mechanisms of allelopathy mediated by the allelochemical extracts of *Phytolacca latbenia* (Moq.) H. Walter. *Toxicol Ind Health*, 31 (10): 931–937
- Weir TL, Park SW, Vivanco JM (2004). Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals. *Curr Opin Plant Biol*, 7: 472–479
- Wu FZ, Wang W (1999). Research on soil microflora of greenhouse tomato. *North Hortic*, (3): 1–2 (in Chinese) [吴凤芝, 王伟(1999). 大棚番茄土壤微生物区系研究. *北方园艺*, (3): 1–2]
- Xu DQ, Gao W, Ruan J (2015). Effects of light quality on plant growth and development. *Plant Physiol J*, 51 (8): 1217–1234 (in Chinese with English abstract) [许大全, 高伟, 阮军(2015). 光质对植物生长发育的影响. *植物生理学报*, 51 (8): 1217–1234]
- Xu J, Ren S, Zhang L, et al (2015). Effects of additional light irradiation on growth of tobacco seedling root system in a multilayer seedling culturing system. *Tob Sci Tech*, 48 (5): 9–13 (in Chinese with English abstract) [徐经年, 任四海, 张林等(2015). 立体育苗模式下补光光源对烟苗根系生长的影响. *烟草科技*, 48 (5): 9–13]
- Yan X, Yu J, Xie J (2016). Effects of supplemental light quality and durations of illumination on growth and root activity of cucumber seedling. *J Nucl Agr Sci*, 30 (6): 1211–1217 (in Chinese with English abstract) [闫晓花, 郁继华, 颜建明(2016). 补光时间及光质对黄瓜幼苗生长及根系活力的影响. *核农学报*, 30 (6): 1211–1217]
- Yang J, Pan T, Wang J, et al (2018). Effects of different light quality on tomato seedlings growth and roots. *North Hortic*, (12): 77–82 (in Chinese with English abstract) [杨俊伟, 潘铜华, 王嘉维等(2018). 不同光质对番茄幼苗生长和根系的影响. *北方园艺*, (12): 77–82]
- Yu JQ, Matsui Y (1994). Phytotoxic substances in root exudates of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *J Chem Ecol*, 20 (1): 21–31
- Yu JQ, Ye SF, Zhang MF, et al (2003). Effects of root exudates and aqueous root extracts of cucumber (*Cucumis sativus*) and allelochemicals, on photosynthesis and antioxidant enzymes in cucumber. *Biochem Syst Ecol*, 31 (2): 129–139
- Yu XB, Luo L, Zeng XT, et al (2015). Response of roots morphology and physiology to shading in maize–soybean relay strip intercropping system. *Chin J Oil Crop Sci*, 37 (2): 185–193 (in Chinese with English abstract) [于晓波, 罗玲, 曾宪堂等(2015). 套作弱光胁迫对大豆苗期根系形态和生理活性的影响. *中国油料作物学报*, 37 (2): 185–193]
- Zha LY, Liu WK (2017). Effect of continuous light with red and blue LED lamps on growth and characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of five lettuce cultivars. *Plant Physiol J*, 53 (9): 1735–1741 (in Chinese with English abstract) [查凌雁, 刘文科(2017). LED红蓝光连续光照对五种生菜生长、光合和叶绿素荧光特性的影响. *植物生理学报*, 53 (9): 1735–1741]
- Zhong PF, Chen NL (2008). Research progress of the influence of light intensity on photosynthesis of horticultural plants. *J Gansu Agr Univ*, 43 (5): 104–109 (in Chinese with English abstract) [种培芳, 陈年来(2008). 光照强度对园艺植物光合作用影响的研究进展. *甘肃农业大学学报*, 43 (5): 104–109]
- Zhou CB, Zhang X, Cui QQ, et al (2017). Effects of supplementary light quality on growth and photosynthesis of pakchoi (*Brassica campestris*). *Plant Physiol J*, 53 (6): 1030–1038 (in Chinese with English abstract) [周成波, 张旭, 崔青青等(2017). LED补光光质对小白菜生长及光合作用的影响. *植物生理学报*, 53 (6): 1030–1038]



## Effects of red and blue LED light intensities on the growth of hydroponic lettuce and secretions of organic carbon and autotoxins

ZHOU Cheng-Bo, LIU Wen-Ke\*, ZHA Ling-Yan, LI Zong-Geng, ZHANG Yu-Bin, SHAO Ming-Jie, LI Bao-Shi

*Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*

**Abstract:** In order to investigate the regulation mechanism of red and blue LED light intensities on growth and root exudates of hydroponic lettuce (*Lactuca sativa*), a study was conducted with three different light intensities [ $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (RBL1),  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (RBL2), and  $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (RBL3)] delivered by red and blue LED light (4:1) in a closed plant factory. The results show that the aboveground biomass of lettuce under RBL1 treatment was lower than those under RBL2 and RBL3 treatments, and the underground biomass was the highest under RBL3 treatment. The net photosynthetic rates of lettuce leaves improved with the increases of light intensities under the three treatments, as well as the root growth and morphological development. The total organic carbon (TOC) concentration in the nutrient solution was higher under RBL3 treatment, but the amount of organic carbon released by unit biomass (aboveground and underground) and the amount of organic carbon released by unit root surface area showed no significant difference in all treatments. In addition, the secretions of five autotoxins were lower under the RBL1 and RBL2 treatments. Compared to these two treatments, the secretions of five autotoxins were significantly increased by over 150% under RBL3 treatment. The amounts of autotoxins secreted by lettuce roots were salicylic acid, ferulic acid, benzoic acid, tannic acid, and gallic acid in descending order. In summary, the amount of organic carbon released from the root was not much different under all treatments, and the salicylic acid content was highest in all autotoxins.  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  red and blue LED light could reduce the contents of autotoxins, improve the growth of lettuce, and reduce the distribution ratios of photosynthetic products in the underground to ensure the yield of lettuce. Therefore,  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  red and blue LED light is more suitable for the growth of hydroponic lettuce in plant factory.

**Key words:** lettuce; hydroponics; light intensity; TOC; autotoxin

Received 2019-02-18 Accepted 2019-03-22

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31672202), and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (BSRF201702 and BSRF201711).

\*Corresponding author (liuwenke@caas.cn).