

不同红蓝配比的LED光调控黄瓜幼苗的生长

徐文栋, 刘晓英, 焦学磊, 徐志刚*

南京农业大学农学院, 南京210095

摘要: 红光和蓝光是植物吸收的最主要光谱, 不同作物对红光和蓝光光谱的需求有差异。本研究采用LED调制红蓝光的不同配比, 研究了不同红蓝配比的LED光对黄瓜幼苗生长的影响, 以期为设施黄瓜育苗光调控提供理论依据和数据支撑。结果显示: 除红光比例为25%的R25处理外, 其他处理的株高随着红光比例的减小而增大; 在红光比例为75%的R75处理中, 植株茎粗最大、叶绿素含量最高; 100%蓝光处理的叶面积最大; 随着红光比例的下降, 植株干鲜重呈现先增后减的趋势, 红光比例为75%的R75处理的植株鲜重和干重最大且壮苗指数显著大于其他处理; 可溶性糖含量随蓝光比例的上升而下降。结果表明: 不同红蓝比的LED光对黄瓜幼苗的生长调控是红光和蓝光相抑或互扬的叠加作用效果。R75处理的植株生长健壮, 生物量积累较多, 红蓝比为3:1的LED复合光可以作为设施培育黄瓜幼苗的适宜光谱。

关键词: 红蓝光配比; 黄瓜幼苗; 生长; 光合速率; 可溶性蛋白

Different Ratio of Red and Blue LED Regulation Growth and Development of Cucumber Seedlings

XU Wen-Dong, LIU Xiao-Ying, JIAO Xue-Lei, XU Zhi-Gang*

Agriculture College of Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: Red and blue light are the most important spectrum absorbed by plants. The demands quantitative of different crops for red or blue light are different. In this study, we adopted red and blue LED, the effects of different ratio of red and blue LED on growth of cucumber seedling were investigated to provide a theoretical basis and data support for cucumber seedlings to light regulation. The results showed that the ratio of red and blue LED regulated growth and development of cucumber seedlings. Except the treatment of 25% red light of R25, with decreasing of red light, the plant height increased. Stem diameter of 75% red light of R75 treatment was the thickest and chlorophyll content was the most. Leaf area of 100% blue light of R0 treatment was the largest. With the decrease of red light, fresh and dry weight of plant first increased then decreased, plant fresh weight, dry weight and healthy index of R75 treatment were significantly greater than those of other treatments. With blue light increased, soluble sugar content decreased. The results suggested that red and blue composited LED light regulation cucumber seedlings growth was promoted and prohibited effects of red and blue light. Under 75% red light of R75, cucumber seedlings is healthier and stronger, and accumulated more biomass. The ratio 3:1 of red and blue composited light can be used reference standard of spectrum modulation for culturing cucumber seedlings in facilities.

Key words: ratio of red and blue light; cucumber seedlings; growth; photosynthetic rate; soluble protein

光是植物生长发育的重要环境因子之一, 通过调节光谱来控制植株形态建成和生长发育是设施栽培的一项重要技术(崔瑾等2009)。设施补光或全部人工光照可以显著地促进光合作用、优化生长、增加植株的生物量并能提高果实产量和品质(车生泉等1997)。LED光源因其具有诸多优点而被认为具有广泛应用的潜力(崔慧茹2009)。光源的光谱分布对植物的生长发育、光合作用、光形态建成及产量品质都有显著的影响(Olle和Viršilė

2013)。尤其是波长为640~660 nm的红光和430~450 nm的蓝光, 被认为是植物叶片吸收光谱的最强两个区域, 是植物进行光合作用和光形态建成的主要光谱(Gioile等2008)。单色红光或蓝光对植物生长发育的影响已有诸多报道。研究发现红光

收稿 2015-04-23 修定 2015-06-17

资助 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2013AA103003)和农业部公益行业(农业)科研专项(201303108)。

* 通讯作者(E-mail: xuzhigang@njau.edu.cn; Tel: 13951879589)。

影响植物的叶片扩展、干物质累积和茎的伸长,有利于番茄和黄瓜幼苗的干物质积累,提高叶片的生长速率(蒲高斌等2005a, b; 倪纪恒等2009); 明显增加香椿苗、辣椒、萝卜芽苗菜和葡萄新梢的干物质积累(Brown等1995; 孔云等2006; 张欢等2009; 张立伟等2010); 同时也增大烟草、草莓和生菜的叶片面积(柯学等2011; 徐凯等2006; Li和Kubota 2009)。蓝光有利于菊花单株总叶面积和总茎长的增加(史宏志等1999), 但是抑制了‘一品红’和‘三叶草’的叶柄伸长和叶片扩展(魏胜林等1998; Gautier等1997)。蓝光有利于万寿菊和不结球白菜茎的伸长(江明艳和潘远智2006; 王婷等2011), 但是显著抑制了水稻幼苗的株高(Heo等2002)。蒲高斌等(2005b)发现蓝光促进了番茄幼苗的生长, 有利于培育壮苗。

单色红光或蓝光的生物效应不及红蓝复合光, 红蓝复合光显著地促进植物的生长。补充红蓝复合光使得黄瓜、辣椒和番茄幼苗的鲜重和干重均高于不补光的处理(崔瑾等2009)。红蓝复合光促进了辣椒、水稻五叶期幼苗和生菜植株生物量的积累(倪纪恒等2009)。但研究发现, 作物不同, 对红光和蓝光需求量有差异, 只有适宜的红蓝光比例, 才能充分发挥植物的生长潜力(崔瑾等2009; 闻婧等2011)。

黄瓜是葫芦科重要的蔬菜之一, 也是我国温室栽培的主要蔬菜, 因其果实营养价值丰富和预防保健功能, 深受广大消费者的青睐(高文瑞等2011)。由于连续阴雨或雾霾等天气, 直接影响黄瓜苗期的光照条件。王玲平等(2013)用蓝光和红蓝配比光及白光3种不同光质照射黄瓜幼苗, 研究对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响, 发现在苗期照射红蓝复合光可有效促进黄瓜幼苗的生长, 有利于培育壮苗。闻婧等(2013)也发现不同配比的红蓝复合光处理对黄瓜幼苗的生长发育有调节作用。

不同品种或不同光量条件下, 植物对光谱响应有差异(王玲平等2013; 闻婧等2013)。黄瓜喜光, 需要较高的光密度, 本试验将光密度设为 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 采用红蓝LED光调制红蓝光的光密度比例, 通过测定生长指标及光合参数, 研究不同配比的红蓝光对黄瓜幼苗生长的影响, 以期对设施黄瓜育苗光调控提供理论依据和数据支撑。

材料与方 法

1 试验设计

试验在南京农业大学LED植物光源研究中心开展, 以黄瓜(*Cucumis sativus* L.)品种‘露丰’为试验材料。种子催芽5 d后, 于2014年3月5日播于直径为15 cm的营养钵, 采用蔬菜栽培专用基质育苗。待长至二叶一心时, 以荧光灯(CK)为对照, 分别置于光密度为 $(300\pm 5) \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的5种不同配比的红蓝组合光下。LED光源处理分别为: 100%红光(R100)、75%红光+25%蓝光(R75)、50%红光+50%蓝光(R50)、25%红光+75%蓝光(R25)、100%蓝光(R0)。红光的主峰波长为660 nm, 半波宽为20 nm, 蓝光主峰波长为445 nm, 半波宽为20 nm。日温为 $(28\pm 1) ^\circ\text{C}$, 夜温为 $(18\pm 1) ^\circ\text{C}$, 光照时间 $12 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$, 相对湿度为60%~80%。生长过程中精细化管理。每处理栽植15株, 3次重复。

2 测定指标与方法

植株培养30 d后取样, 各处理随机取样3株, 用游标卡尺测量株高、茎粗、第一节间长; 叶面积采用肖强等(2005)的测定方法。用电子天平称量鲜重; 将植株于烘箱中 $105 ^\circ\text{C}$ 杀青15 min后, $85 ^\circ\text{C}$ 烘干至恒重后, 称量植株干重。壮苗指数计算公式: 全株干质量 \times 茎粗/株高(李合生2000); 叶绿素用80%丙酮提取后采用分光光度计测定; 用TTC法(李合生2000)测定根系活力; 参照李合生(2000)的方法测定可溶性糖含量; 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法(李合生2000)测定; 光合参数测定采用光合仪(LI-6400, 美国)进行测定。各指标均以植株倒三叶进行测定, 3次重复。

3 数据整理与分析

采用Microsoft Excel 2003和SPSS 16.0系统进行数据整理分析, 采用Duncan法进行方差分析($P < 0.05$)。

实验结果

1 不同红蓝比的LED光对黄瓜幼苗植株生长的影响

不同红蓝光比例影响黄瓜幼苗的生长。除R25处理外, 随着红光比例的减小, 株高增大, R100处理的株高最小, R0处理的株高最大, 且显著大于R100、R75和R25处理, R25处理的株高大于R100

处理, 但差异不显著(图1-A)。在100%和25%红光的处理中, 植株茎粗最小, 在红光比例为75%、50%及0的处理中, 茎粗无显著差异(图1-B)。除R25处理之外, 随着红光比例的下降, 叶面积呈增大的趋势, 且R0处理叶面积显著大于其他处理, R25处理叶面积显著小于R75和R50处理, 但显著大于R100处理(图1-C)。R0处理的第一节间距显著长于其他处理, 其次为R75处理, R100、R50和

R25处理第一节间距无显著差异(图1-D)。随着红光比例的下降, 植株干鲜重出现先增后减的趋势, 植株鲜重和干重在75%红光比例下最大, 且R75、R50及R25处理的鲜重无显著差异, R75处理的干重和R25处理无显著差异, 但显著大于其他处理(图1-E、F)。R75处理的壮苗指数显著大于其他处理, R0处理的壮苗指数最小, 其他处理间无显著差异(图1-G)。

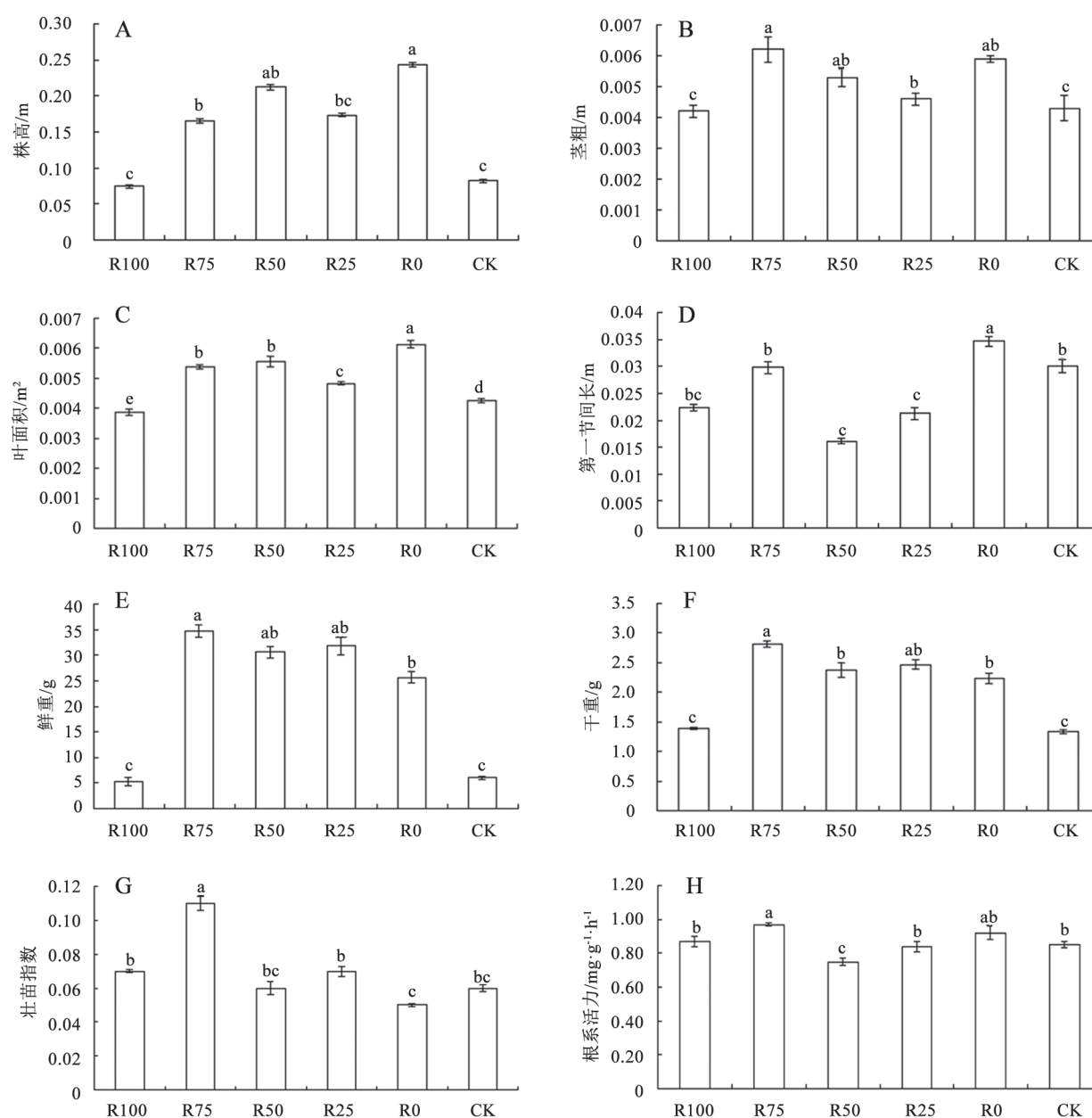


图1 不同红蓝配比的LED光对黄瓜幼苗的生长的影响

Fig.1 Effect of different ratio of red and blue LEDs on growth of cucumber seedlings

R100: 100%红光; R75: 75%红光+25%蓝光; R50: 50%红光+50%蓝光; R25: 25%红光+75%蓝光; R0: 100%蓝光; 下图表同。各柱形图上不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$); 下图同。

2 不同红蓝比的LED光对黄瓜幼苗根系活力的影响

植物根系活力影响植物的光合作用和蒸腾作用。如图1-H所示, 随红光和蓝光比例的变化, 根系活力的变化无显著规律可循, R75处理根系活力最大, 但与R0处理无显著差异, 显著大于其他处理, R50的根系活力显著低于其他处理, 其他处理间根系活力无显著差异。

3 不同红蓝比的LED光对黄瓜幼苗叶片色素含量的影响

如表1所示, 黄瓜叶片光合色素含量受红蓝光配比的影响。R75处理的叶绿素a含量最高, 与R50处理无显著差异, 但显著大于其他处理; CK处理的叶绿素a含量最少; 最大叶绿素b含量出现在R75处理中, 最小叶绿素b含量出现在R0处理中, R75、R25处理的叶绿素b含量与CK无显著差异。R75处理下叶绿素(a+b)含量显著高于除R50外的其他处理, R50、R0处理类胡萝卜素含量显著高于其他处理, R25处理的类胡萝卜素含量最低。R0处理的叶绿素a/b显著高于其他处理, 具有阳生植物的特点, 其他处理间无显著差别。

4 不同红蓝比的LED光对黄瓜幼苗可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

如图2-A所示, 所有LED处理的可溶性糖含量都大于CK处理, 高比例红光的R100和R75处理的可溶性糖含量显著高于CK。随着红光比例的降低, 植株叶片的可溶性糖含量呈下降趋势, 但在所有LED处理间, 可溶性糖含量无显著差异。

如图2-B所示, 除R25处理外, 可溶性蛋白含量随着蓝光的比例增大而增加, 至蓝光比例为100%的R0处理中达到最大值, R100、R25和CK处理可溶性蛋白含量最小, 相互间无显著差异。

5 不同红蓝比的LED光对黄瓜幼苗光合特性的影响

如图3-A~C所示, 随着红蓝比的变化, 净光合速率、气孔导度及蒸腾速率变化趋势相同, 都是随着红光比例的减少, 呈现先增后减再增的趋势, 在蓝光比例为100%时达到最大, 且显著大于其他处理。R100、R25及CK处理的净光合速率、气孔导度及蒸腾速率较小, 这3个处理间无显著差异。随红蓝比的变化胞间CO₂浓度变化不大, 除R100处理的胞间CO₂浓度显著大于其他处理外, 其他处理间无显著差异(图3-D)。

表1 不同红蓝配比的LED光对黄瓜幼苗色素含量的影响

Table 1 Effect of different ratio of red and blue LEDs on pigment content of cucumber seedlings

光处理	色素含量/mg·g ⁻¹				
	叶绿素	叶绿素b	叶绿素(a+b)	叶绿素a/b	类胡萝卜素
R100	1.23±0.03 ^{bcd}	0.61±0.03 ^b	1.84±0.06 ^c	2.03±0.07 ^b	0.97±0.01 ^b
R75	1.51±0.03 ^a	1.01±0.15 ^a	2.53±0.18 ^a	1.55±0.21 ^b	0.96±0.01 ^{bc}
R50	1.47±0.15 ^{ab}	0.73±0.04 ^b	2.21±0.16 ^{ab}	2.01±0.23 ^b	1.24±0.04 ^a
R25	1.20±0.06 ^{cd}	0.80±0.13 ^{ab}	2.01±0.07 ^{bc}	1.63±0.35 ^b	0.70±0.02 ^d
R0	1.44±0.08 ^b	0.39±0.03 ^c	1.82±0.05 ^c	4.13±0.08 ^a	1.22±0.01 ^a
CK	1.16±0.03 ^d	0.78±0.04 ^{ab}	1.96±0.04 ^{bc}	1.49±0.10 ^b	0.83±0.01 ^c

同列不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

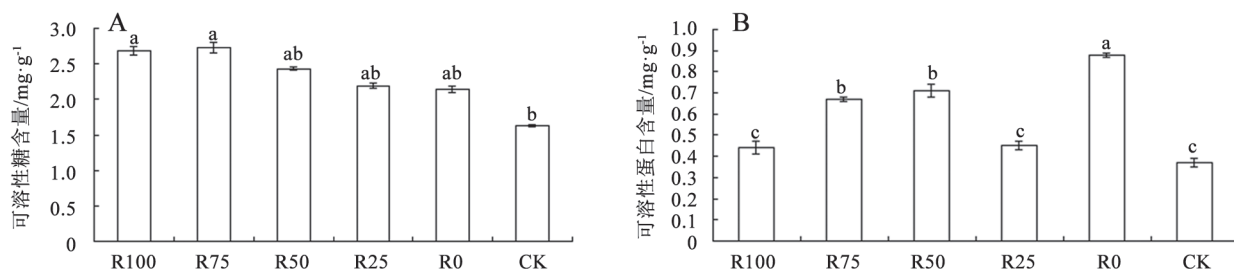


图2 不同红蓝配比的LED光对黄瓜幼苗可溶性糖和蛋白的影响

Fig.2 Effect of different ratio of red and blue LEDs on soluble sugar and soluble protein of cucumber seedling

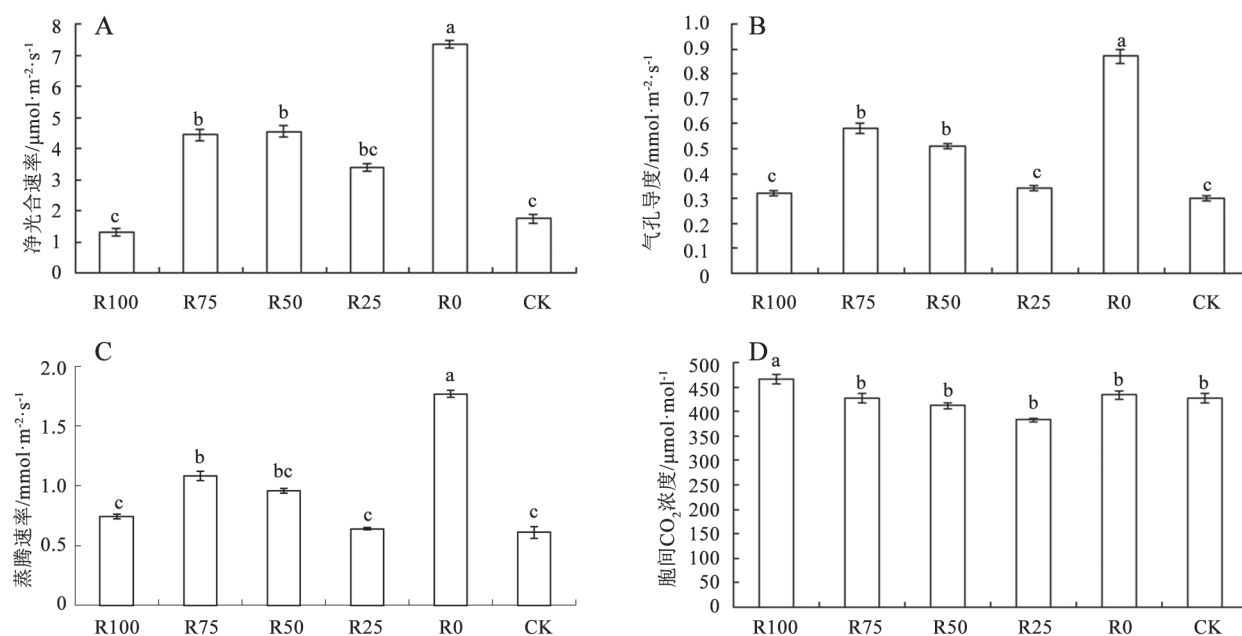


图3 不同红蓝配比的LED光对黄瓜幼苗光合特性的影响

Fig.3 Effect of different ratio of red and blue LEDs on photosynthetic characteristics of cucumber seedling

讨 论

植物的生长依赖于光合作用,而光合色素是植物进行光合作用的基础。蓝光及红蓝组合光均对黄瓜幼苗(曹刚等2013)、葡萄(Poudel等2008)和菊花(邸秀茹等2008)叶片叶绿素的合成有促进作用,红光降低了草莓叶片的叶绿素含量(Nhut等2003)。本研究结果与上述结论相似,红蓝复合光下光合色素含量较高,而在100%蓝光或100%红光下光合色素较低。叶绿素是植物生长发育的重要生化指标之一(李彩虹等2014),植株叶片的叶绿素含量在100%蓝光处理和100%红光处理间无显著差异(表1),但100%蓝光处理植株的净光合速率显著高于100%红光处理(图3-A)。我们推测,由于在100%蓝光的照射下,植物色素(隐花色素、向光素等)的活性增强(Sander等2010),导致植株接受光能的能力增加,叶片的光合速率得以显著增高;此外,由于100%蓝光处理叶片的气孔导度显著高于100%红光处理(图3-B),促进了气体和水分的交换,导致蓝光照射下叶片的净光合速率显著增高。我们观测到100%蓝光处理的叶片具有最高的光合速率,但也同时发现100%蓝光处理植株的生物量积累却不是最高的(图1-E、F),Kowallik (1982)报道

蓝光可显著促进线粒体的暗呼吸,消耗光合产物,据此,我们推测,100%蓝光照射在引起高光合速率的同时,也引起很高呼吸速率,导致生物量的累积减缓。

光合产物及中间产物反馈作用于光合作用,调节光合,影响植物的生长。可溶性糖不仅是光合产物,而且还是渗透调节的物质,同时还在信号转导中起着重要的作用,能够以类似植物激素的方式作为一种信号分子存在,在植物的生长、发育、成熟和衰老等许多过程中发挥调控作用(Koch等2000)。糖信号还可调控叶片的衰老,表现为叶绿素含量降低、光合作用降低。红光下高的可溶性糖含量,负反馈调节了叶绿素的含量,表现为光合作用下降,限制植株的生长。R75处理可溶性糖含量也很高,但其叶绿素含量却显著大于单色红光,这很可能是蓝光的一种反馈促进作用。光合碳代谢为氮代谢提供能量和碳架(Huppe和Turpin 1994),植物体内氮素水平与碳氮代谢等过程有密切关系。光合碳氮代谢过程调节是对立统一的过程:一方面,CO₂的同化和NO₃⁻的还原由于对光反应产物的竞争而相互抑制;另一方面,CO₂同化的加速又可产生较多的碳架,有利于氨基酸

的合成。前人报道蓝光可显著促进线粒体的暗呼吸,呼吸过程中的有机酸为有机含氮化合物的合成提供了碳架,促进了蛋白质的合成(Kowallik 1982)。Evans (1983)发现小麦叶片内CO₂同化速率与叶片氮水平呈正相关,本研究结果也发现不同红蓝比光处理下的净光合速率的变化也与可溶性蛋白含量也呈正相关(图2、3),这也是蓝光下获得最高的光合速率的一个重要原因。

不同红蓝比的LED光对黄瓜幼苗的生长具有调控作用。闻婧等(2013)研究发现不同红蓝比值的光源对黄瓜幼苗的干鲜重、叶面积、根系活力、叶绿素含量、光合速率、蒸腾速率以及气孔导度的调节变化趋势是随着红蓝比值的增加呈现先增加后降低的趋势;Nhut等(2003)发现红光的增加有利于茎的伸长;Sander等(2010)研究表明,在100%红光处理下黄瓜叶片的光合作用机能失调,而在100%的蓝光处理下植物叶片光合作用却正常。本研究结果与闻婧等(2013)不同,红蓝光比值与黄瓜幼苗生长参数的变化没有明显一致的规律可循,植株生长参数表现出与红蓝光比值变化的随机性,找不到一个良好生长明显的阈值范围,但我们发现,茎粗、干重、根系活力及壮苗指数在红光比例为75%的R75处理下最大,植株表型健壮。

不同红蓝比的LED光对黄瓜幼苗的生长调控作用是一个复杂的过程,其生长与红蓝比的变化没有严格的正相关或负相关,是红光和蓝光相抑或互扬的叠加作用效果,也是生理代谢和光合作用相互作用的调节过程。红光比例为75%的R75处理生长健壮,生物量积累较多,与其根系活力大、叶片捕光面积较大、光合色素积累较多、气孔有利于气体和水分的流通、促进植物光合有关。从生长和干物质积累角度考虑,红蓝比为3:1的LED复合光可以作为设施培育黄瓜幼苗光源的光谱调制的参考标准。

参考文献

- 曹刚,张国斌,郁继华,马彦霞(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
- 车生泉,盛月英,秦文英(1997). 光质对小苍兰茎尖试管培养的影响. 园艺学报, 24 (3): 269~273
- 崔慧茹(2009). 光质对彩色甜椒生理特性及品质的影响[硕士论文]. 山东泰安: 山东农业大学, 12~14
- 崔瑾,马志虎,徐志刚,张欢,常涛涛,刘海俊(2009). 不同光质补光对黄瓜、辣椒和番茄幼苗生长及生理特性的影响. 园艺学报, 36 (5): 663~670
- 邸秀茹,焦学磊,崔瑾,刘晓英,孔燕,徐志刚(2008). 新型光源LED辐射的不同光质配比光对菊花组培苗生长的影响. 植物生理学通讯, 44 (4): 661~664
- 高文瑞,徐刚,孙艳军,李德翠(2011). 设施黄瓜果实发育过程中品质及形态变化规律的研究. 金陵科技学院学报, 17 (1): 22~25
- 江明艳,潘远智(2006). 不同光质对盆栽一品红光合特性及生长的影响. 园艺学报, 33 (2): 338~343
- 柯学,李军营,李向阳,郭春芳,徐超华,晋艳,龚明(2011). 不同光质对烟草叶片生长及光合作用的影响. 植物生理学报, 47 (5): 512~520
- 孔云,王绍辉,沈红香,马承伟,姚允聪(2006). 不同光质补光对温室葡萄新梢生长的影响. 北京农学院学报, 10: 23~25
- 李彩虹,冯美臣,王超,尹超(2014). 不同播期冬小麦叶绿素含量的冠层光谱响应研究. 核农学报, 28 (2): 309~316
- 李合生(2000). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 195~197
- 倪纪恒,陈学好,陈春宏,徐强(2009). 补充不同光质对温室黄瓜生长发育、光合和前期产量的影响. 中国农业科学, 42 (7): 2615~2623
- 蒲高斌,刘世琦,刘磊,任丽华(2005a). 不同光质对番茄幼苗生长和生理特性的影响. 园艺学报, 32 (3): 420~425
- 蒲高斌,刘世琦,张珍,任丽华(2005b). 光质对番茄幼苗生长及抗氧化酶活性的影响. 中国蔬菜, (9): 21~23
- 史宏志,韩锦峰,管春云,远彤(1999). 红光和蓝光对烟叶生长碳氮代谢和品质的影响. 作物学报, 25 (2): 215~220
- 王玲平,周胜军,朱育强,戴丹丽,张鹏(2013). 不同光质对水果黄瓜育苗的影响. 浙江农业科学, (8): 976~978
- 王婷,李雯琳,巩芳娥,郁继华(2011). LED光源不同光质对不结球白菜生长及生理特性的影响. 甘肃农业大学学报, 46 (4): 69~73
- 魏胜林,王家保,李春保(1998). 蓝光和红光对菊花生长和开花的影响. 园艺学报, 25 (2): 203~204
- 闻婧,杨其长,魏灵玲,程瑞锋,刘文科,鲍顺淑,周晚来(2011). 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. 园艺学报, 38 (4): 761~769
- 闻婧,杨其长,魏灵玲,刘文科,孟力力,程瑞锋,韦金河,张俊(2013). 不同波峰的LED红蓝光质组合对黄瓜苗生长和光合特性的影响. 江苏农业学报, 29 (3): 619~625
- 肖强,叶文景,朱珠,陈瑶,郑海雷(2005). 利用数码相机和Photoshop软件非破坏性测定叶面积的简便方法. 生态学杂志, 24 (6): 711~714
- 徐凯,郭延平,张上隆,戴文圣,符庆功(2006). 不同光质对丰香草莓生长发育的影响. 果树学报, 23 (6): 818~824
- 张欢,徐志刚,崔瑾,郭银生,谷艾素(2009). 不同光质对萝卜芽苗菜生长和营养品质的影响. 中国蔬菜, (10): 28~32
- 张立伟,刘世琦,张自坤,杨茹,杨晓建(2010). 不同光质下香椿苗的生长动态. 西北农业学报, 19 (6): 115~119
- Brown CS, Schuerger AC, Sager JC (1995). Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. J Amer Soc of Hort Sci, 120 (5): 808~813

- Evans JR (1983). Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiol*, 72: 297~302
- Gautier H, Varlet GC, Baudry N (1997). Effects of blue lights on the vertical colonization of space by white clover and their consequences for dry matter distribution. *Ann Bot*, 80: 665~671
- Gioia DM, Kim HH, Wheeler RM, Mitchell CA (2008). Plant Productivity in response to LED lighting. *Hortic Sci*, 43: 1951~1956
- Heo J, Lee C, Chakrabarty D, Paek KY (2002). Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a Light-Emitting Diode (LED). *Plant Growth Regul*, 38: 225~230
- Huppe HC, Turpin DH (1994). Intergration of carbon and nitrogen metabolism in plant and algal cells. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 45: 577~607
- Koch KE, Ying Z, Wu Y, Avigne WT (2000). Multiple paths of sugar-sensing and a sugar/oxygen overlap for genes of sucrose and ethanol metabolism. *J Exp Bot*, 51: 417~427
- Kowallik W (1982). Blue light effects on respiration. *Annu Rev Plant Physiol*, 33: 51~72
- Li Q, Kubota C (2009). Effect of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environ Exp Bot*, 67: 59~64
- Nhut DT, Takamura T, Watanabe H, Okamoto K, Tanaka M (2003). Responses of strawberry plantlets cultured *in vitro* under super-bright red and blue light-emitting diodes (LEDs). *Plant Cell Tissue Organ Cult*, 73: 43~52
- Olle M, Viršilè A (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agric Food Sci*, 22: 223~234
- Poudel PR, Kataoka I, Mochioka R (2008). Effect of red- and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes. *Plant Cell Tissue Organ Cult*, 92: 147~153
- Sander WH, Govert T, Hans M, Poorter H, Ieperen WV, Harbinson J (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