

交替光谱辐照对叶用莴苣营养元素水平的影响

陈晓丽¹, 王利春¹, 李友丽¹, 郭文忠^{1, 2*}

1. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097

2. 农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京 100097

摘要 在人工光型植物工厂中采用深液流水培法栽培叶用莴苣, 依托光谱时空分布可精准调控的智能LED光源系统, 应用电感耦合等离子体原子发射光谱技术(ICP-AES), 研究了5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 60 min, 2 h, 4 h和8 h等不同间隔的红、蓝光交替照射对叶用莴苣中K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn和Cu等8种营养元素吸收和累积的影响。结果表明:(1)与同时照射模式相比,所有的交替光谱处理均显著提高了叶用莴苣地上部生物量,其中鲜重提高幅度约为18.6%~67.4%,干重提高幅度约为5.1%~88.0%;所有的交替红蓝光照射下叶用莴苣体内Mg, Fe和Zn元素的植株累积量均得到显著($p < 0.05$)地提高;所有的红蓝交替光谱辐射处理均不同程度地降低了叶用莴苣植株中Ca元素含量。(2)间隔为5 min的红蓝交替光谱辐射下莴苣植株Fe元素含量显著高于其他任意处理,较其他处理增加了38.87%~85.37%,高频次的红蓝光切换照射刺激了叶用莴苣植株对Fe元素的吸收。(3)红蓝交替光谱辐射有利于提高叶用莴苣的能量利用效率,与红蓝同时供光的RB处理相比,所有交替处理均显著提高了叶用莴苣的光、电能利用率,提高幅度分别约为34.3%~87.5%和34.6%~87.9%;其中,间隔为4 h的红蓝交替光谱辐射下叶用莴苣植株的光、电能利用率均最大,分别为6.13%和2.01%,除间隔为5和10 min的红蓝交替光谱辐射处理外的其他交替光谱处理下的植株光、电能利用率均与处理间最大值无显著性差异。(4)叶用莴苣对K和Mg两种元素的吸收在红蓝光交替间隔为10 min, 15 min, 60 min及4 h等多个处理下呈现拮抗现象。(5)R/B(30 m)处理下叶用莴苣中P, Ca, Fe和Mn等四种元素的含量水平均呈现处理间最低水平,其中P和Ca元素含量水平显著低于对照。

关键词 交替光谱; 非连续光谱; ICP-AES技术; 叶用莴苣; 营养元素

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)09-2813-05

引言

光是植物光合作用的唯一能量来源也是调节植物生长发育的环境信号,光环境要素包括单一光谱的时空分布以及单一光谱强度,光环境由若干单一光谱耦合而成,是影响植物生长发育和栽培效益的关键环境方面。发光二极管(LED)因具有光谱可调、光量可控、产热少等优势,被越来越多地应用于园艺作物生产和研究中,伴随LED光谱调控系统的开发,光环境调控不再局限于对光质、光强度以及光期的调节,而是延伸到对光谱时空分布即供光模式的调节,不同频率的单一光谱交替供光模式是一种被证明有提高植物能量利用效率作用的供光方式^[1]。近年来,红、蓝光谱因对应于植

物光合色素吸收光谱的峰值波段而成为植物栽培领域光谱研究的主要物质^[2]。研究表明,在累计光积分和能量消耗相等的前提下,与传统的同时供光相比,红、蓝光谱以一定的时间间隔交替照射生菜植株,能够促进生菜植物的生长及其生物量的积累^[3],这意味着红、蓝光谱交替有潜力提高植物产出效益和栽培系统电能利用效率,因此研究相同能耗条件下交替供光策略的潜在优势具有重要的实际意义。K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn和Cu等矿质元素不仅是叶用莴苣重要的食用品质指标,也是反映叶用莴苣对营养元素吸收水平的重要依据。研究表明,植物对矿质元素的吸收及利用受到光环境的影响。有报道指出,红、蓝组合光谱在不同的光谱光量比例下对基质栽培生菜体内矿质元素的种类和含量具有诱导调节作用^[4],然而红、蓝交替光谱对叶用莴苣根系矿质

收稿日期: 2021-08-23, 修订日期: 2021-12-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1000300), 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2019BBF02010)资助

作者简介: 陈晓丽, 女, 1987年生, 北京市农林科学院智能装备技术研究中心助理研究员 e-mail: chenxl@nercita.org.cn

* 通讯作者 e-mail: guowz@nercita.org.cn

元素吸收的调控尚未报道。因此,本研究在封闭式植物工厂中采用 LED 红、蓝交替光谱及深液流水培模式培育叶用莴苣,设置了不同交替间隔时长的红蓝交替光处理,并以红蓝光同时供光为对照,运用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)^[5],探究了红、蓝交替光谱对叶用莴苣矿质元素吸收和积累的影响,研究结果为植物工厂功能性蔬菜的生产及不同光环境下的营养液调节提供理论依据,也为更好的揭示红、蓝光在作用于植物生长发育过程中的相互关系及高能量利用率的供光方式提供思路。

1 实验部分

1.1 材料与处理

本试验在北京市农林科学院智能装备技术研究中心的全人工光型植物工厂中进行,试验材料为奶油叶用莴苣(*Lactuca sativa* L. 'Flandria'; Rijk Zwaan Co., Netherlands)。将叶用莴苣种子播种至海绵块中进行育苗,14 d 后定植到不同光环境的水培种植箱中。植物工厂内昼/夜温度设置为 24/20 °C,空气湿度 65%,CO₂ 浓度 700 μmol·mol⁻¹,霍格兰营养液^[6]pH 和 EC 分别保持在 6.5 和 1.45 mS·cm⁻¹左右,营养液每周更换一次。从播种日起第 54 天(即定植后 40 d)进行收获并测定收获指标。

本试验共 8 个处理,试验光源采用北京市农林科学院智能装备技术研究中心研制的 LED 植物光配方调控系统,光源垂直悬挂于植物顶部。该系统可以设置不同光质、光量配比以及供光模式和照射频率。定植当天即开始不同的光处理照射。光处理如表 1 所示,共设 8 个红蓝交替光处理、1 个红蓝光同时供光处理。纯红光(R)与纯蓝光(B)的处理中,红光和蓝光的光强度均为 200 μmol·m⁻²·s⁻¹;其他处理中红、蓝光的光强分别设定为 180 和 20 μmol·m⁻²·s⁻¹,即整个生育期内红光与蓝光的光量子数比值为 9:1,红蓝光峰值波长分别为 660 和 450 nm。

表 1 红蓝交替光试验处理

处理	红蓝光交替间隔		
R/B(5 m)	(R 5 m-B 5 m)···×96=16 h	暗期 8 h	
R/B(10 m)	(R 10 m-B 10 m)···×48=16 h	暗期 8 h	
R/B(15 m)	(R 15 m-B 15 m)···×32=16 h	暗期 8 h	
R/B(30 m)	(R 30 m-B 30 m)···×16=16 h	暗期 8 h	
R/B(60 m)	(R 60 m-B 60 m)···×8=16 h	暗期 8 h	
R/B(2 h)	(R 2 h-B 2 h)···×4=16 h	暗期 8 h	
R/B(4 h)	(R 4 h-B 4h)···×2=16 h	暗期 8 h	
R/B(8 h)	(R 8 h-B 8 h)···×1=16 h	暗期 8 h	
RB	RB 8 h	暗期 8 h	RB 8 h

关于红蓝光交替处理模式的设置和命名见表 1。在每天 16 h 的光期里,红、蓝光每 5 min 切换 1 次,交替频率为 96 次·d⁻¹,处理记作 R/B(5 m),同理红、蓝光交替间隔时间为 10 min, 15 min, 30 min, 60 min, 2 h, 4 h 和 8 h 分别记作 R/B(10 m), R/B(15 m), R/B(30 m), R/B(60 m), R/B(2

h), R/B(4 h)和 R/B(8 h)光期里对应的红蓝光交替频率则分别为 48 次、32 次、16 次、8 次、4 次、2 次、1 次,红蓝光同时供光的处理为对照计为 RB。关于处理间的光量子数和耗电量见表 2。试验中红蓝光同时供光的处理 RB 每天的光期为 8 h,这是为了该处理作为对照与其他交替红蓝光处理具有相等的总光量和总耗电量。

表 2 日累计光积分和耗电量

Table 2 Daily integral photons and electric consumption in treatments

处理	日累积光量子数/(mol·m ⁻²)			日累积耗电量/MJ
	红光	蓝光	总光量子数	
R/B(5 m)	5.18	0.576	5.76	3.30
R/B(10 m)	5.18	0.576	5.76	3.30
R/B(15 m)	5.18	0.576	5.76	3.30
R/B(30 m)	5.18	0.576	5.76	3.30
R/B(60 m)	5.18	0.576	5.76	3.30
R/B(2 h)	5.18	0.576	5.76	3.30
R/B(4 h)	5.18	0.576	5.76	3.30
R/B(8 h)	5.18	0.576	5.76	3.30
RB	5.18	0.576	5.76	3.30

1.2 仪器与测试

光合有效辐射的测量采用光量子仪(model-1400, LICOR, USA);光谱测试采用 USB650 型光谱仪(Ocean Optics, model-SD650, USA),波长范围为 350~1 000 nm,LED 红光峰值波长为 660 nm,蓝光峰值波长为 450 nm;矿质元素测试采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICAP 6300 ICP-OES Spectrometer, Thermo Fisher, USA),光谱仪条件为:样品提升量 1.0 mL·min⁻¹;载气 0.8 L·min⁻¹;辅助气 0.5 L·min⁻¹;冷却气 15.0 L·min⁻¹;高频发生器功率 1 300 W。

1.3 元素浸提及标准曲线

称取 0.50 g 莴苣样品于消煮管中,加入浓硝酸和高氯酸的混合酸 15 mL(体积比为 4:1)于 180 °C 消煮 6~8 h 至溶液接近无色时冷却,过滤后滤液用去离子水定容至 50 mL,以同样的方法制备空白对照。浓硝酸和高氯酸均为优级纯购自北京化工厂,元素标准液源自国家标准物质中心。

配制不同浓度的 K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn 和 Cu 元素标准溶液,各元素分析谱线波长见表 3。表 3 显示,标准液浓度与吸光度成较好的线性关系,相关系数 r 在 0.998 3~0.999 8 之间,相对标准偏差 RSD 为 0.23%~0.74%。

1.4 数据处理

能量利用率计算参照文献[7],数据采用 Excel、DPS 9.05 软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 交替光谱对叶用莴苣中营养元素吸收量的影响

由表 4 和表 5 可见,交替红蓝光光谱照射对叶用莴苣体内常量及微量元素含量水平有较明显的影响。R/B(5 m)下 Fe

表3 各元素分析谱线波长、标准液浓度、相关系数和相对标准偏差

Table 3 Wavelength, standard series solution, correlation coefficients and relative standard deviation

元素	光谱波长/nm	标准液浓度/(mg·L ⁻¹)	相关系数 r	RSD /%
K	766.490	0, 0.1, 1, 10, 100	0.998 9	0.41
P	213.617	0, 0.1, 1, 10, 100	0.998 6	0.39
Ca	317.933	0, 0.1, 1, 10, 100	0.999 8	0.23
Mg	279.077	0, 0.1, 1, 10, 100	0.998 3	0.63
Fe	238.204	0, 0.1, 0.4, 1, 4	0.999 2	0.38
Mn	257.610	0, 0.1, 0.4, 1, 4	0.998 9	0.74
Zn	213.857	0, 0.1, 0.4, 1, 4	0.998 8	0.55
Cu	324.752	0, 0.1, 0.4, 1, 4	0.999 1	0.53

元素含量显著高于其他任意处理, 植株 Fe 元素含量较其他处理增加了 38.87%~85.37%, 高频次的红、蓝光切换照射刺激了叶用莴苣植株对 Fe 元素的吸收。与红蓝光同时供光相比, 所有的红、蓝交替光谱辐射处理均不同程度地降低了

叶用莴苣植株中 Ca 元素含量。R/B(10 m)处理下叶用莴苣中 K 元素含量水平在处理间呈最低值为 55.08 mg·g⁻¹、Mg 元素含量在处理间呈最高值为 4.79 mg·g⁻¹; 相反, R/B(15 m)处理下, K 元素含量水平在处理间最高, 而 Mg 元素含量表现为处理间最低。此外, 处理间次低水平的 K 元素含量出现在 R/B(4 h)和 R/B(60 m)处理下, 分别为 55.52 和 56.97 mg·g⁻¹, 与 R/B(10 m)处理下 K 元素含量水平无显著性差异, 同时这两个处理下的 Mg 元素含量水平仅次于 R/B(10 m)下的最高值, 且与之无显著性差异。这可能是由于 K 离子对 Mg 离子拮抗强烈导致的, K 对离子通道的抢夺能力强于 Mg, K 吸收的降低导致 Mg 吸收的增加。类似地, R/B(4 h)处理下叶用莴苣中 Mn 元素含量水平在处理间最高, 而 Zn 元素含量为处理间的最低, 可能存在离子吸收过程中的拮抗效应。此外, R/B(8 h)处理下植株体内 Zn 和 Cu 元素含量水平显著高于其他任意处理, 较对照分别增加了 54.0% 和 103.6%。R/B(30 m)处理下叶用莴苣中 P, Ca, Fe 和 Mn 等四种元素的含量水平均呈现处理间最低水平, 其中 P 和 Ca 元素含量水平显著低于对照。

表4 不同交替光谱处理下叶用莴苣中大量元素含量(mg·g⁻¹, n=3)

Table 4 The content of macroelements in *Lactuca sativa* exposed to different alternating spectrum

处理	R/B(5 m)	R/B(10 m)	R/B(15 m)	R/B(30 m)	R/B(60 m)	R/B(2 h)	R/B(4 h)	R/B(8 h)	RB
K	70.74a	55.08c	71.28a	64.89b	56.97c	65.68b	55.52c	70.34a	65.47b
P	7.67ab	7.52ab	7.02ab	6.51b	8.39a	7.95ab	7.79ab	7.51ab	8.10a
Ca	12.57a	11.75ab	10.99b	10.96b	12.80a	12.20a	12.21a	11.83ab	12.89a
Mg	4.04b	4.79a	3.15c	3.60c	4.65a	3.76c	4.38ab	3.48c	4.12b

注: 同列不同小写字母表示 0.05 水平差异显著, 下同

Note: Values within a row followed by different letters significantly differ (by Tukey's test, $p=0.05$), the same below

表5 不同交替光谱处理下叶用莴苣中微量元素含量(μg·g⁻¹, n=3)

Table 5 The content of microelements in *Lactuca sativa* exposed to different alternating spectrum

处理	R/B(5 m)	R/B(10 m)	R/B(15 m)	R/B(30 m)	R/B(60 m)	R/B(2 h)	R/B(4 h)	R/B(8 h)	RB
Fe	219.28a	136.15bc	161.40b	118.29c	126.49c	157.67b	157.90b	145.83bc	142.89bc
Mn	171.78a	108.27d	124.06c	108.62d	146.70b	123.79c	175.26a	126.22c	121.68c
Zn	22.24b	19.79bc	21.54b	19.18bc	20.68b	22.81b	18.60c	33.24a	21.59b
Cu	2.64bc	3.05b	1.63c	2.63bc	3.05b	1.93c	2.60bc	5.15a	2.53bc

2.2 交替光谱对叶用莴苣生物量的影响

由表6可见, 与红蓝同时供光的 RB 处理相比, 所有的交替光谱均显著提高了叶用莴苣地上部生物量, 其中鲜重提高幅度约为 18.6%~67.4%, 干重提高幅度约为 5.1%~88.0%。R/B(4 h)处理下植株地上部分生物量最高, 干重和鲜重分别达到 125.82 和 5.32 g。R/B(4 h)处理下生产单位干物质叶用莴苣所需的光子数处理间最低为 1.73 mol·g⁻¹, 较对照 RB 降低了 46.8%; 所消耗的电能同样是处理间最低为 0.99 MJ·g⁻¹, 较对照 RB 降低了 87.9%。因此, 与红蓝光同时供光相比, 红蓝交替光谱辐射有利于提高叶用莴苣的光子利用效率和电能利用效率, 提高幅度与红蓝交替光谱的交替间隔时间有关, 其中间隔为 4 h 的红蓝交替光谱辐射下光子和电能利用效率最高。

2.3 交替光谱对叶用莴苣能量利用率的影响

由表7可见, 交替光谱对叶用莴苣光能利用率和电能利用率有一定的影响, 与红蓝同时供光的 RB 处理相比, 所有交替处理均显著提高了叶用莴苣的光、电能利用率, 提高幅度分别约为 34.3%~87.5% 和 34.6%~87.9%。在交替光谱处理之间, R/B(4 h)处理下的叶用莴苣光、电能利用率均达到最大值, 分别为 6.13% 和 2.01%, R/B(5 m)和 R/B(10 m)处理下叶用莴苣光、电能利用率显著低于该最大值, 而其他交替光谱处理下的叶用莴苣光、电能利用率与该最大值无显著性差异。

2.4 交替光谱对叶用莴苣营养元素累积量的影响

由表8和表9可见, 大量元素中, 植株单株累积量的高低顺序为 K>Ca>P>Mg, 微量元素中单株累积量的高低顺

表 6 不同交替光谱处理下叶用莴苣地上部分生物量及单位干物质所需的光子和电量

Table 6 The shoot biomass of *Lactuca sativa* and the consumption of photon and electricity in different alternating spectrum treatments

处理	单株地上部鲜重/g	单株地上部干重/g	单位干物质所需的光子数/(mol·g ⁻¹)	单位干物质所消耗的电能/(MJ·g ⁻¹)
R/B(5 m)	89.19bc	3.97b	2.32b	1.33b
R/B(10 m)	98.43b	3.81b	2.42b	1.39b
R/B(15 m)	103.74b	4.80ab	1.92bc	1.10c
R/B(30 m)	115.50ab	5.06a	1.82c	1.04c
R/B(60 m)	109.54b	4.48ab	2.06b	1.18bc
R/B(2 h)	115.46ab	4.79ab	1.92bc	1.10c
R/B(4 h)	125.82a	5.32a	1.73c	0.99c
R/B(8 h)	112.34ab	4.41ab	2.09b	1.20bc
RB	75.18c	2.83c	3.25a	1.86a

序为 Fe>Mn>Zn>Cu。与同时照射模式相比,交替红蓝光照射下叶用莴苣体内所有元素的单株累积量均有所提高,其中 Mg, Fe 和 Zn 元素植株累积量的提高达到显著水平($p < 0.05$)。K 和 Fe 元素的植株累积量分别在 R/B(15 m)和 R/B(5 m)处理下最高,显著高于对照,分别较对照提高了 84.7%和 115.3%; Zn 和 Cu 元素的植株累积量在 R/B(8 h)处理下最高,显著高于对照,分别较对照提高了 140.0%和 217.3%; P, Ca, Mg 和 Mn 元素的植株累积量在 R/B(4 h)处理下最高,显著高于对照,分别较对照提高了 70.0%, 67.4%, 88.0%和 154.5%。

表 7 不同交替光谱处理下叶用莴苣能量利用率

Table 7 The energy use efficiency of *Lactuca sativa* in different alternating spectrum treatments

处理	光能利用率/%	电能利用率/%
R/B(5 m)	4.58b	1.50b
R/B(10 m)	4.39b	1.44b
R/B(15 m)	5.54ab	1.82ab
R/B(30 m)	5.84a	1.92a
R/B(60 m)	5.17ab	1.70ab
R/B(2 h)	5.52ab	1.81ab
R/B(4 h)	6.13a	2.01a
R/B(8 h)	5.09ab	1.67ab
RB	3.27c	1.07c

表 8 不同交替光谱处理下叶用莴苣中大量元素单株累积量(mg·plant⁻¹, n=3)

Table 8 The accumulation of macroelements in *Lactuca sativa* exposed to different alternating spectrum

处理	R/B(5 m)	R/B(10 m)	R/B(15 m)	R/B(30 m)	R/B(60 m)	R/B(2 h)	R/B(4 h)	R/B(8 h)	RB
K	280.84b	209.85c	342.15a	328.36a	255.23b	314.59ab	277.60b	310.21ab	185.29c
P	30.43bc	28.66c	33.69b	32.94b	37.59a	38.06a	38.93a	33.13b	22.91c
Ca	49.89bc	44.74bc	52.73b	55.46ab	57.33ab	58.42ab	61.05a	52.16 b	36.48c
Mg	16.06bc	18.26b	15.10c	18.21b	20.85a	18.00b	21.92a	15.35c	11.66d

表 9 不同交替光谱处理下叶用莴苣中微量元素单株累积量(μg·plant⁻¹, n=3)

Table 9 The accumulation of microelements in *Lactuca sativa* exposed to different alternating spectrum

处理	R/B(5 m)	R/B(10 m)	R/B(15 m)	R/B(30 m)	R/C(60 m)	R/B(2 h)	R/B(4 h)	R/B(8 h)	RB
Fe	870.55a	518.73c	774.71ab	598.53bc	566.67bc	755.23ab	789.50ab	643.11b	404.38d
Mn	681.95b	412.50cd	595.49bc	549.64c	657.23b	592.95bc	876.28a	556.63c	344.34d
Zn	88.28bc	75.40c	103.39b	97.03b	92.66b	109.25b	93.00b	146.58a	61.09d
Cu	10.50b	11.61b	7.84c	13.28b	13.67b	9.26bc	13.01b	22.72a	7.16c

3 结 论

植物的养分吸收到光环境的影响,反过来植物叶片对光能的传导和利用也受到体内营养元素种类及水平的影响,例如 Fe 是光合电子传递链中细胞色素、铁氧还蛋白以及 Fe-S 蛋白的组成成分, Cu 是光合电子传递链中质体蓝素的组成成分, Mg 是光合色素叶绿素的重要成分, Mn 在光合作用光反应水的光解中有不可替代的作用, P 作用于 ATP 的生成等。

本研究表明,红蓝光交替光谱对叶用莴苣的营养元素吸收和积累与红蓝光谱的交替间隔以及营养元素种类有关。与同时照射模式相比,所有的交替光谱均显著增加了叶用莴苣

地上部生物量、提高了光子和电能利用效率及 Mg, Fe 和 Zn 元素的植株累积量,同时不同程度地降低了植株中 Ca 元素含量。5 min 间隔的红、蓝光交替照射下,植株 Fe 元素吸收得到促进,而 30 min 间隔的红、蓝光交替照射下植株 P, Ca, Fe 和 Mn 等元素的吸收受到抑制,说明红、蓝光在作用于叶用莴苣元素吸收的过程中是相互影响的。然而,就某一种元素而言,未观察到元素含量或积累量与红、蓝交替光谱间隔时间的明显正/负相关关系,红、蓝光谱的相互作用机制较为复杂,可能与红、蓝光的光受体及信号传导有关。红光和蓝光通过光受体蛋白影响植物的光响应,光受体蛋白包括作为红光受体的光敏色素(phyA—phyE),作为蓝紫外光受体的隐花色素(cry1—cry3)和光敏素(phot1, phot2)^[8-10],红、蓝光通过这些光受体完成在植物中的信号转导,这些光受体

在不同生理活动或不同环境状态下表现出协同或拮抗关系，交替红、蓝光照射下光受体的激活途径可能不同于同步红蓝光下的激活途径，也就是说红、蓝光的信号转导途径可能存在信号串扰或放大。适当间隔的红、蓝交替照射可以消除红、蓝光信号转导通路之间的信号串扰或拮抗作用，也可能

抵消正向的信号放大，因此造成植株体内不同种类元素的吸收利用在各异的红、蓝光交替间隔下表现不同。总体而言，在光子量和电量消耗一致的前提下，红、蓝光交替光谱对叶用莴苣体内矿质元素吸收和积累有明显的调控作用，这对功能性蔬菜的生产具有一定的指导意义。

References

- [1] Chen X L, Yang Q C. *Sci. Hort.*, 2018, 234: 220.
- [2] Choi H G, Moon B Y, Kang N J. *Sci. Hort.*, 2015, 189: 22.
- [3] Chen X L, Yang Q C, Song W P. *Sci. Hort.*, 2017, 223: 44.
- [4] Amoozgar A, Mohammadi A, Sabzalain M R. *Photosynthetica*, 2017, 55(1): 85.
- [5] LIU Wen-ke, ZHANG Yu-bin, ZHA Ling-yan(刘文科, 张玉彬, 查凌雁). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2020, 40(7): 2215.
- [6] Chen X L, Wang L C, Li T. *Sci. Rep.*, 2019, 9: 6926.
- [7] CHEN Xiao-li, YANG Qi-chang, WANG Li-chun, et al(陈晓丽, 杨其长, 王利春, 等). *T. Chin. Soc. Agric. Mach.(农业机械学报)*, 2021, 52(6): 344.
- [8] Liscum E. *Front. Plant Sci.*, 2016, 7: 827.
- [9] Gärtner W. *Photochem. Photobiol.*, 2017, 93(1): 382.
- [10] Sánchez-Lamas M, Lorenzo C D, Cerdán P D. *PLOS Genetics*, 2016, 12(11): e1006413.

Effects of Alternating Light Spectrum on the Mineral Element Level of Lettuce

CHEN Xiao-li¹, WANG Li-chun¹, LI You-li¹, GUO Wen-zhong^{1, 2*}

1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China
2. Key Laboratory of Urban Agriculture (North China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100097, China

Abstract Lettuce (*Lactuca sativa*) was cultured in a completely enclosed plant factory and irradiated with an intelligent LED light system with accurate regulation of spectral space-time distribution. Absorption and content of eight mineral elements such as K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn and Cu in *Lactuca sativa* exposed to alternating red and blue light spectrum with different alternating intervals were studied by ICP-AES technology. The results showed that: (1) Compared with concurrent red and blue light spectrum, all the alternating spectrum treatments increased shoot biomass of lettuce, the increasing range of fresh weight and dry weight was respectively 18.6% ~ 67.4% and 5.1% ~ 88.0%. All the alternating spectrum treatments significantly increased the accumulation of Mg, Fe and Zn in the lettuce plant ($p < 0.05$); all the alternating spectrum treatments decreased the content of Ca in lettuce to different extents. (2) Fe content in lettuce subjected to R/B(5 m) was significantly higher than any other treatment, increasing by 38.87% ~ 85.37% compared with the other treatments. Alternating red and blue light spectrum with high alternating frequency seemed to stimulate Fe uptake by lettuce plants. (3) Alternating red and blue light spectrum enhanced the use efficiency of light photons and electricity by lettuce. Compared with RB, all alternating treatments significantly improved the light and electric use efficiency of leaf lettuce by about 34.3% ~ 87.5% and 34.6% ~ 87.9%; Among them, the light and electric use efficiency of leaf lettuce were both the largest under the alternating treatment with an interval of 4 h, which were 6.13% and 2.01% respectively. Except for the alternating treatments with the intervals of 5 m and 10 m, no significant difference existed in the light and electric use efficiency of plants among the alternating spectrum treatments. (4) The absorption of K and Mg by lettuce showed antagonism under the alternating intervals of 10m, 15 m, 60 m and 4 h. (5) The contents of P, Ca, Fe and Mn in lettuce treated with R/B(30 m) showed the lowest level among treatments, and the contents of P and Ca were significantly lower than the control.

Keywords Alternating light spectrum; Discontinuous spectrum; ICP-AES technology; *Lactuca sativa*; Mineral element

* Corresponding author

(Received Aug. 23, 2021; accepted Dec. 23, 2021)