doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.04.032

非连续光对无土栽培番茄苗期无机元素吸收的影响

陈晓丽[1]　刘艺涵[1,2]　徐　凡[1]　魏晓明[1]　郑文刚[1]

(1.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097;2.天津农学院园艺园林学院,天津 300384)

摘要:本研究在人工光型植物工厂中采用岩棉种植番茄植株,分析了在总光量一致的基础上红光背景下蓝光补充介入和蓝光取代介入两种非连续供光模式对番茄植株营养液无机元素吸收及叶片色素光谱参量的影响。结果表明,与连续红光相比,蓝光以不同方式介入均降低了番茄叶片中 K 元素含量而提高了茎中 K 元素含量,蓝光介入一定程度上抑制了番茄 K 元素由茎向叶片的运输;蓝光以不同方式介入均提高了番茄地上部中 Mg 含量(增幅 8.93% ~13.63%),而降低了地上部 Fe 含量(降幅 28% ~48%)及 Mn 含量(降幅 3.93% ~21.24%)。其中蓝光补充介入模式下番茄叶片中 Mg 元素含量随着蓝光补充强度的升高而增加,叶片 Mg 含量在蓝光取代介入模式下高于蓝光补充介入模式而地上部 Fe 含量趋势则相反,蓝光取代介入的非连续光模式较蓝光补充介入模式而言更有利于刺激叶片中 Mg 的积累而抑制地上部 Fe 的积累。与连续红光相比,蓝光以不同方式介入后番茄叶片色素光谱参量 Hue 值(色相角)和 MCARI 值(修正叶绿素吸收比指数)均有所提高,相反,Red/Green 值(红绿区域光谱反射比)均有所降低,蓝光补充介入模式下叶片 Hue 值和 MCARI 值随蓝光补充强度的升高而增大,R/RB_{80}处理下 Hue、MCARI 值最高,较对照分别提高 4%、124%;蓝光取代模式下 Hue 值和 MCARI 值随蓝光间歇时间的延长先增大后减小,$R/RB_{(1h)}$处理下 Hue、MCARI 值最高,较对照分别提高 6%、215%。番茄叶片在绿光波段的反射率与各处理下 Hue、MCARI 值变化趋势接近,而番茄叶片中 Mg 元素含量与叶绿素光谱参量呈正相关性。蓝光取代介入的非连续光模式较蓝光补充介入模式而言更有利于刺激叶片类胡萝卜素分解和叶绿素积累,非连续供光模式通过调控番茄植株无机元素的吸收进而作用于叶片色素的形成。本研究为无土栽培番茄光环境调控提供了理论依据。

关键词:植物工厂;LED 供光模式;番茄苗期;非连续光;无机元素

中图分类号:S626.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)04-0327-10　　**OSID**:

Effect of Discontinuous Light on Absorption of Inorganic Elements in Soilless Tomato Seedlings

CHEN Xiaoli[1]　LIU Yihan[1,2]　XU Fan[1]　WEI Xiaoming[1]　ZHENG Wen'gang[1]

(1. *Intelligent Equipment Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*
2. *Horticultural and Landscape Architecture College*, *Tianjin Agricultural University*, *Tianjin* 300384)

Abstract: Tomato plants were planted in rock wool in an artificial light plant factory and exposed to red background light with supplementary or substituted blue light. The nutrient element absorption by tomato plants and the spectral parameters of tomato leaves were analyzed. The results showed that compared with constant pure red light, both supplementary and substituted blue light decreased the content of K in tomato leaves but increased that in tomato stems, interventional blue light might inhibit the transport of K from stems to leaves; both supplementary and substituted blue light increased the content of Mg in the whole tomato plant by 8.93% ~13.63% while decreased that of Fe by 28% ~48% and Mn by 3.93% ~21.24%. Among which, Mg content in tomato leaves was increased with the increase of supplemental blue light intensity. The content of Mg was higher in tomato plants treated with substituted blue light than that treated with supplementary blue light, while Fe content showed opposite trend. Substituted blue light seemed more conducive to the accumulation of Mg in tomato leaves as well as the inhibition of Fe in the whole plant. Compared with pure red light, the Hue and MCARI value of tomato leaves treated with

收稿日期:2023-09-12　修回日期:2023-10-23

基金项目:北京市智能温室蔬菜创新团队项目(BAIC12-2024)和北京市农林科学院青年科研基金项目(QNJJ202119、QNJJ202307)

作者简介:陈晓丽(1987—),女,副研究员,博士,主要从事植物光配方及设施光环境调控研究,E-mail:chenxl@nercita.org.cn

通信作者:郑文刚(1975—),男,研究员,博士,主要从事环境智能感知控制及水肥智慧灌溉技术研究,E-mail:zhengwg@nercita.org.cn

interventional blue light was increased, while the Red/Green value was decreased; Hue and MCARI value was increased with the increase of supplemental blue light intensity. Hue and MCARI value were the highest under R/RB_{80} treatment, which were respectively 4% and 124% higher than the control. In substituted blue light mode, Hue and MCARI value first increased and then decreased with the prolongation of blue light intermittent time, reaching the highest values under $R/RB_{(1h)}$ treatment, which were 6% and 215% higher than the control respectively. The reflectance of tomato leaves in the green light area was close to the change trend of Hue and MCARI value among treatments, while Mg content in tomato leaves showed a certain positive correlation with chlorophyll spectral parameters. Comparing with the spectral parameters of tomato leaves under the two modes of interventional blue light, it can be seen that substituted blue light was more conducive for the decomposition of carotenoid and the accumulation of chlorophyll in leaves than supplemental blue light on the basis of equal total light amount. The discontinuous light supply mode might regulate the absorption of inorganic elements in tomato plants, thereby affecting the formation of leaf pigments. The research result can provide some theoretical basis for the regulation of light environment in soilless tomato cultivation.

Key words: plant factory; LED light supply mode; tomato seedlings; discontinuous light; inorganic elements

0 引言

光和无机营养分别是植物生长发育的能量及物质来源,番茄植株对光能的利用、光信号的响应以及对营养液养分的吸收是决定无土栽培番茄果实产量及品质的重要因素。植物叶片的呈色由叶片对不同波段可见光的反射决定,而不同波段的反射强度取决于叶片中叶绿素、叶黄素及类胡萝卜素等色素含量。这些色素合成与植物所吸收的无机营养元素密切相关,如大量元素 Mg 是构成叶绿素的组分,缺 Mg 会导致叶绿素无法合成;微量元素 Fe、Cu 与叶绿素形成有关,具有提高叶绿素稳定性的功能,避免叶绿素过早遭受破坏[1-2]。因此,叶片呈色和反射光谱特征是光作用于植株无机元素吸收的一个重要表型,将植株地下部分离子吸收运输活动与地上部分叶片呈色联系起来。

光环境控制是密闭式设施生产中提高植物生长和品质的有效手段之一,红光和蓝光是影响植物生理代谢活动的主要光谱区段,因此也成为目前设施人工光源中的主流光质[3-5]。研究表明,不同比例红蓝组合光对生菜体内矿质元素的种类和含量具有诱导调节作用,例如生菜在红蓝比例 1∶2.75 的处理下对 K、P、Ca、Mg 元素的吸收量较大,而纯红光显著促进了生菜对 Fe 和 Cu 元素的吸收[2]。光环境要素包括光质、光量子通量密度、光周期和光分布。连续供光是指在一个光周期内的任意时刻,所有的光环境要素均保持一致(即恒定光强、恒定光质),也称为静态光照射。非连续供光是指在一个光周期内,光环境要素中的一项或多项发生改变(一般为规律性变化),如光强递变、光质交替、明暗交替等,也称动态光照射。研究表明,红、蓝光在植物某些生理活动中的作用可能相反,也可能一致,而动态光环境由于光信号传导方式的改变会在植物中引发一些诸如生物量提高、次生代谢物积累量增多、植株电能利用率提高等积极的结果[6-8]。对于非连续光环境下植株无机元素吸收的研究表明,与连续光照射相比,不同频率的交替红蓝光照射下叶用莴苣体内 Mg、Fe、Zn 元素的累积量均得到显著提高,植株中 Ca 元素含量显著降低,而高频次的红蓝光交替照射能够显著刺激植株对 Fe 元素的吸收[9]。随着 LED 及光配方系统调控硬件的深度开发,植物光配方不再局限于对光质、光强度以及光期的调节,而是拓展到供光模式的调节,优化的红蓝光供光模式可能避免红、蓝光在植物某些生理活动中的相反作用,最大化地提高两种光质的协同作用。目前,尚未见非连续供光模式下番茄植株对营养元素吸收利用的相关研究报道。

综上,人工光源光质、供光模式等对植物无机养分的吸收具有明显的影响,而目前光环境要素对番茄植株的作用研究主要围绕植株生物量、叶片光合、幼苗活性等方面,而对无土栽培番茄植株无机元素吸收方面的影响研究鲜见报道。为了探究不同的红蓝光环境对番茄植株无机元素吸收的影响,本研究以连续红蓝光照射为对照,比较蓝光介入和蓝光取代两种非连续光模式下番茄植株对 K、P、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 等无机元素的吸收以及叶片光谱参量和反射光谱特征的影响,以期为番茄无土栽培设施中光环境的调控提供理论依据。

1 材料与方法

试验在北京市农林科学院全人工光型植物工厂

中进行，试验光源采用可以设置任意光配方及供光模式的 LED 植物光配方系统。以番茄品种“丰收 74－560RZ F1”为试验材料，采用荷兰进口 Groden 农用岩棉进行种植。植物工厂内温度为（24 ± 1）℃/（13 ± 1）℃（光期/暗期），空气相对湿度（65 ± 1）%，CO_2浓度为（450 ± 2）μmol/mol；营养液采用日本山崎配方，灌溉频率为 1 次/d。在整个试验周期内（40 d），营养液电导率范围为 1.2 ~ 1.8 mS/cm，单株营养液灌溉总量为 720 mL/株；光源为 LED 红蓝光，栽培面距离光源高度为 60 cm。播种后即将岩棉块置于不同的红、蓝供光模式下进行培养，光期/暗期均为 16 h/8 h，红、蓝光峰值波长分别为 660 nm 和 450 nm，光合有效辐射的测量采用光量子仪（model－1400，LI － COR，美国）；光谱测试采用 USB650 型光谱仪（OceanOptics，model－SD650，美国），波长范围为 350 ~ 1 000 nm。从播种日起第 40 天进行取样和指标测定。

根据叶菜和果菜光配方相关研究[3-6]，苗期的光期和光强度设置范围一般为 10 ~ 16 h 和 100 ~ 300 μmol/（m^2·s）。本试验中非连续光处理根据蓝光的介入方式分为两类，一类为在红光 R 背景光的基础上（光强度 200 μmol/（m^2·s），光期 16 h）间歇补充相同总光量（1.152 μmol/（m^2·s））、不同光强度及光期的蓝光 B（光强度分别为 20、32、40、64、80 μmol/（m^2·s），对应补光周期分别为 16、10、8、5、4 h），对应试验处理分别记作 RB_{20}、R/RB_{32}、R/RB_{40}、R/RB_{64}、R/RB_{80}，以没有蓝光介入的连续纯红光 R 为对照，见表 1。另一类为在背景光红光的基础上以等光强度的蓝光（20 μmol/（m^2·s））间歇取代红光（间歇间隔分别为 0、1 min、1 h、4 h）[8-10]，以没有蓝光介入的连续光（纯红光 R）为对照，试验处理分别记作 RB、$R/RB_{(1\ min)}$、$R/RB_{(1\ h)}$、$R/RB_{(4\ h)}$，见表 1。由于 RB_{20}或 RB 处理中，蓝光与红光光期完全同步，因此为连续光模式。

表 1　LED 不同供光模式处理

Tab. 1　Different lighting modes

试验处理		供光模式		日累积光量子数/（mol·m^{-2}）			瞬时光强度/（μmol·m^{-2}·s^{-1}）		
		光期	暗期	红光	蓝光	总光量	红光	蓝光	总光强
蓝光补充介入模式	R	R 16h	8h	12.672	0	12.672	220	0	220
	RB_{20}	RB 16h	8h	11.52	1.152	12.672	200	20	220
	R/RB_{32}	（R 0.6h—RB 1h）… ×10 = 16h	8h	11.52	1.152	12.672	200	32	232
	R/RB_{40}	（R 1h—RB 1h）… ×8 = 16h	8h	11.52	1.152	12.672	200	40	240
	R/RB_{64}	（R 2.2h—RB 1h）… ×5 = 16h	8h	11.52	1.152	12.672	200	64	264
	R/RB_{80}	（R 3h—RB 1h）… ×4 = 16h	8h	11.52	1.152	12.672	200	80	280
蓝光取代介入模式	R	R 16h	8h	12.672	0	12.672	220	0	220
	RB	RB 16h	8h	11.52	1.152	12.672	200	20	220
	$R/RB_{(1min)}$	（R 1min—RB 1min）… ×480 = 16h	8h	12.096	0.576	12.672	200/220	20/0	220
	$R/RB_{(1h)}$	（R 1h—RB 1h）… ×8 = 16h	8h	12.096	0.576	12.672	200/220	20/0	220
	$R/RB_{(4h)}$	（R 4h—RB 4h）… ×2 = 16h	8h	12.096	0.576	12.672	200/220	20/0	220

注：表中“—”表示不同光质的切换。如“R 0.6h—RB 1h”指红光照射 0.6 h 后转为红蓝混合光照射 1 h。

2　测定与分析

2.1　叶片光谱参量

番茄植株叶片在 400 ~ 700 nm 光谱范围的反射率用分光测色仪（YS3010 型）进行测定，对 L^*、a^*、b^*空间和数据进行处理以获得色调。色相角（Hue）反映番茄植株叶片着色，数值越大，叶片越绿。光化学反射指数（PRI）反映类胡萝卜素与叶绿素的比率；光谱中红色和绿色区域的反射比（Red/Green）反映花青素与叶绿素的比率；修正叶绿素吸收比指数（MCARI）反映叶绿素的变动。

2.2　无机元素测定

无机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，美国），光谱仪条件：样品提升量 1.0 mL/min，载气 0.8 L/min，辅助气 0.5 L/min，冷却气 15.0 L/min，高频发生器功率 1 300 W。称取 0.50 g 番茄植株样品于消煮管中，加入浓硝酸和高氯酸的混合酸 15 mL（体积比为 4∶1）于 180℃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，购自北京市化工厂，元素标准液源自国家标准物质中心。配制不同质量浓度的 K、P、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 元素标准溶液，各元素分析谱线波长见表 2。表 2 显示，标准液质量浓度与吸光度呈较好的线性关系，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%。

表 2 各元素分析谱线波长、标准液质量浓度、相关系数和相对标准偏差

Tab. 2 Wavelength, standard series solution, correlation coefficients and relative standard deviation

元素	光谱波长/nm	标准液质量浓度/(mg·L^{-1})	相关系数 r	相对标准偏差/%
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

2.3 数据处理

数据采用 Excel、DPS9.05 软件进行统计分析，采用 Hiplot 绘制聚类分析热图、OriginPro 软件进行相关性分析。

3 结果分析

3.1 非连续光模式(蓝光补充)下番茄植株各部位无机元素含量

由表 3、4 可见，番茄植株中 P、Ca、Fe、Mn、Cu 元素含量表现为叶片大于茎，K 元素含量表现为叶片小于茎，Mg、Zn 元素含量差异在叶片和茎中不明显。与纯红光 R 相比，两种蓝光介入的非连续供光模式均降低了番茄叶片中 K 元素含量，但提高了茎中 K 元素含量，蓝光介入一定程度上抑制了番茄 K 元素由茎向叶片的运输。与 R 相比，蓝光补充介入模式均提高了番茄叶片或茎中 Mg 元素含量，叶片

表 3 蓝光补充介入模式下番茄植株大量元素含量(平均值±标准差)

Tab. 3 Content of macroelements in tomato plants exposed to supplementary blue light treatments (mean ± SD)

mg/g

部位	元素	R	RB_{20}	R/RB_{32}	R/RB_{40}	R/RB_{64}	R/RB_{80}
叶片	K	(65.58±1.59)^{a}	(54.09±1.37)^{b}	(55.87±1.50)^{b}	(61.43±1.73)^{a}	(62.12±2.03)^{ab}	(60.75±2.11)^{ab}
	P	(5.60±0.22)^{b}	(6.58±0.13)^{a}	(4.94±0.17)^{c}	(5.46±0.09)^{b}	(5.05±0.11)^{c}	(6.10±0.28)^{ab}
	Ca	(18.45±0.66)^{b}	(24.23±1.02)^{a}	(23.31±0.78)^{a}	(24.35±1.21)^{a}	(20.31±0.32)^{a}	(20.38±0.65)^{a}
	Mg	(9.63±0.46)^{c}	(10.12±0.54)^{b}	(10.39±0.63)^{ab}	(10.62±0.32)^{a}	(10.74±0.23)^{a}	(10.83±0.61)^{a}
茎	K	(86.78±3.22)^{c}	(87.17±2.05)^{c}	(93.69±1.33)^{b}	(86.90±5.62)^{c}	(89.49±3.07)^{c}	(100.19±5.13)^{a}
	P	(2.06±0.11)^{b}	(2.16±0.05)^{ab}	(2.15±0.09)^{ab}	(1.96±0.03)^{b}	(2.22±0.13)^{ab}	(2.41±0.08)^{a}
	Ca	(17.68±0.46)^{b}	(19.65±0.78)^{ab}	(16.14±0.32)^{bc}	(20.72±0.71)^{a}	(14.98±0.33)^{c}	(15.88±0.56)^{c}
	Mg	(9.37±0.42)^{b}	(10.71±0.52)^{a}	(10.77±0.61)^{a}	(10.50±0.13)^{a}	(10.29±0.33)^{a}	(9.87±0.56)^{b}
地上部	K	(152.36±5.13)^{b}	(141.26±2.21)^{c}	(149.56±1.32)^{b}	(148.33±3.29)^{b}	(151.61±3.81)^{b}	(160.94±4.98)^{a}
	P	(7.66±0.19)^{b}	(8.74±0.22)^{a}	(7.09±0.16)^{b}	(7.42±0.13)^{b}	(7.27±0.28)^{b}	(8.51±0.37)^{a}
	Ca	(36.13±1.53)^{b}	(43.88±1.62)^{a}	(39.45±1.09)^{b}	(45.07±1.76)^{a}	(35.29±1.22)^{b}	(36.26±1.87)^{b}
	Mg	(19.00±0.71)^{b}	(20.83±1.33)^{ab}	(21.16±1.09)^{a}	(21.12±0.87)^{a}	(21.03±1.03)^{a}	(20.70±0.98)^{ab}

注：同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

表 4 蓝光补充介入模式下番茄植株微量元素含量(平均值±标准差)

Tab. 4 Content of microelements in tomato plants exposed to supplementary blue light treatments (mean ± SD)

μg/g

部位	元素	R	RB_{20}	R/RB_{32}	R/RB_{40}	R/RB_{64}	R/RB_{80}
叶片	Fe	(579.33±22.11)^{a}	(294.21±6.71)^{d}	(310.25±5.32)^{cd}	(392.96±10.21)^{c}	(439.46±12.41)^{b}	(390.20±9.98)^{c}
	Mn	(92.35±3.77)^{a}	(68.71±1.22)^{c}	(77.92±3.21)^{b}	(77.93±2.99)^{b}	(80.00±3.68)^{b}	(92.83±4.65)^{a}
	Zn	(33.09±2.12)^{a}	(27.28±1.23)^{c}	(34.28±1.78)^{a}	(30.85±1.09)^{ab}	(34.92±1.77)^{a}	(32.88±2.03)^{ab}
	Cu	(8.75±0.49)^{b}	(6.36±0.58)^{d}	(7.22±0.75)^{c}	(7.53±0.44)^{c}	(8.68±0.38)^{b}	(10.70±0.72)^{a}
茎	Fe	(325.31±20.82)^{a}	(176.06±13.12)^{d}	(275.02±8.32)^{b}	(237.83±5.67)^{b}	(210.68±7.24)^{c}	(247.89±6.11)^{b}
	Mn	(58.23±1.36)^{a}	(49.89±1.01)^{bc}	(47.94±1.23)^{c}	(52.77±2.21)^{b}	(51.97±1.06)^{b}	(51.83±0.99)^{b}
	Zn	(38.52±1.22)^{a}	(23.73±1.31)^{b}	(26.71±1.35)^{b}	(25.39±0.85)^{b}	(41.76±1.98)^{a}	(31.39±0.78)^{ab}
	Cu	(4.85±0.21)^{b}	(3.80±0.19)^{c}	(4.48±0.29)^{b}	(4.39±0.36)^{b}	(5.64±0.22)^{ab}	(6.00±0.41)^{a}
地上部	Fe	(904.64±26.12)^{a}	(470.27±12.13)^{d}	(585.27±16.22)^{c}	(630.79±17.09)^{b}	(650.14±17.47)^{b}	(638.09±16.01)^{b}
	Mn	(150.58±5.32)^{a}	(118.60±1.27)^{c}	(125.86±4.33)^{bc}	(130.70±3.38)^{b}	(131.97±4.28)^{b}	(144.66±5.17)^{a}
	Zn	(71.61±2.31)^{a}	(51.01±3.05)^{c}	(60.99±2.01)^{bc}	(56.24±1.02)^{c}	(76.68±3.02)^{a}	(64.27±1.36)^{b}
	Cu	(13.60±0.31)^{b}	(10.16±0.24)^{d}	(11.70±0.61)^{c}	(11.92±0.42)^{c}	(14.32±0.21)^{b}	(16.70±0.19)^{a}

中 Mg 元素含量随着蓝光补充强度的增加而升高，茎中 Mg 元素含量随着蓝光补充强度的增加而降低，可见蓝光强度的增加促进了番茄植株 Mg 元素由茎向叶片的运输，在光量一定的基础上，蓝光强度越高（光期越短）越有利于叶片中 Mg 元素的积累。

与纯红光相比，除 R/RB_{80}之外蓝光补光介入模式均显著降低了番茄叶片及茎中 Mn 元素含量（$P<0.05$），且在总光量一致的前提下，蓝光强度越低（光期越长）越不利于 Mn 在番茄植株中的吸收，地上部 Mn 元素含量在 RB_{20}处理下最低。与纯红光相比，蓝光补充介入处理均降低了番茄叶片和茎中 Fe 元素含量，RB_{20}处理下番茄植株中 Fe 元素含量最低，可能是因为该处理下蓝光与红光同步供光，蓝光持续光期最长。与纯红光相比，低光强蓝光补充介入降低了叶片以及茎中 Cu 元素含量，但是随着蓝光强度继续增加，Cu 元素含量逐渐升高且高于对照，R/RB_{80}处理下叶片以及茎中 Cu 元素含量均最高，可见高强度短光期的蓝光介入有利于番茄植株中微量元素 Cu 的吸收和积累。

3.2　非连续光模式（蓝光补充）下番茄植株无机元素吸收聚类和相关性分析

聚类分析热图反映不同供光处理对所有无机元素的总体调控效应。由图 1 可见，低强度长光期蓝光介入模式 RB_{20}、R/RB_{32}、R/RB_{40}处理组成一个聚类亚群，短光期蓝光处理 R、R/RB_{64}、R/RB_{80}组成一个聚类亚群，除 Ca、Mg 元素外，后一个聚类亚群处理下番茄植株各部位无机元素含量整体均高于前一个聚类亚群，说明长光期蓝光不利于大部分无机元素的吸收。聚类分析热图直观呈现了纯红光下植株低 Mg 含量以及蓝光介入后 Mg 含量的提升，充分说明蓝光对 Mg 元素吸收的正向调控作用。此外，如图 1 所示，高强度蓝光处理 R/RB_{80}对植株 Cu 元素存在明显的正向调控作用，图中全株仅指植株地上部分，不包含地下部分。

对大量元素在植株不同部位的相关性分析（图 2）可见，番茄植株各部位的 K 元素含量均与相应部位 Ca、Mg 元素含量呈负相关，可能是因为 K^+对膜通道的抢夺能力强于 Mg^{2+}和 Ca^{2+}，K^+对 Mg^{2+}和 Ca^{2+}的吸收呈现拮抗作用。与连续红光相比，非连续光蓝光补充介入模式下叶片中 K 元素含量降低而 Mg、Ca 元素含量升高，可能是离子间拮抗作用的表现。相反，通过对微量元素在植株不同部位的相关性分析发现，Fe、Mn、Zn、Cu 等 4 种微量元素之间均呈现正相关。此外，大量元素和微量元素之间也存在显著的相关关系：叶片 Ca 和 Fe、Mn 均显著负相关（$P<0.05$），地上部 Mg 与 Fe、Ca 与 Zn 均显著负相关（$P<0.05$），而地上部 K 与 Cu、叶片 K 与 Fe 均显著正相关（$P<0.01$）。图 2 中，* 表示 $P\leqslant 0.05$，** 表示 $P\leqslant 0.01$。

3.3　非连续光模式（蓝光取代）下番茄植株各部位无机元素含量

由表 5 可见，与纯红光相比，蓝光取代介入模式均显著降低了番茄叶片中 K 元素含量，但不同程度地提高了茎中 K 元素含量（$P<0.05$），与蓝光补充介入模式效应相同，可见红光背景下蓝光以不同方式介入均会抑制番茄植株中 K 元素由茎向叶片的

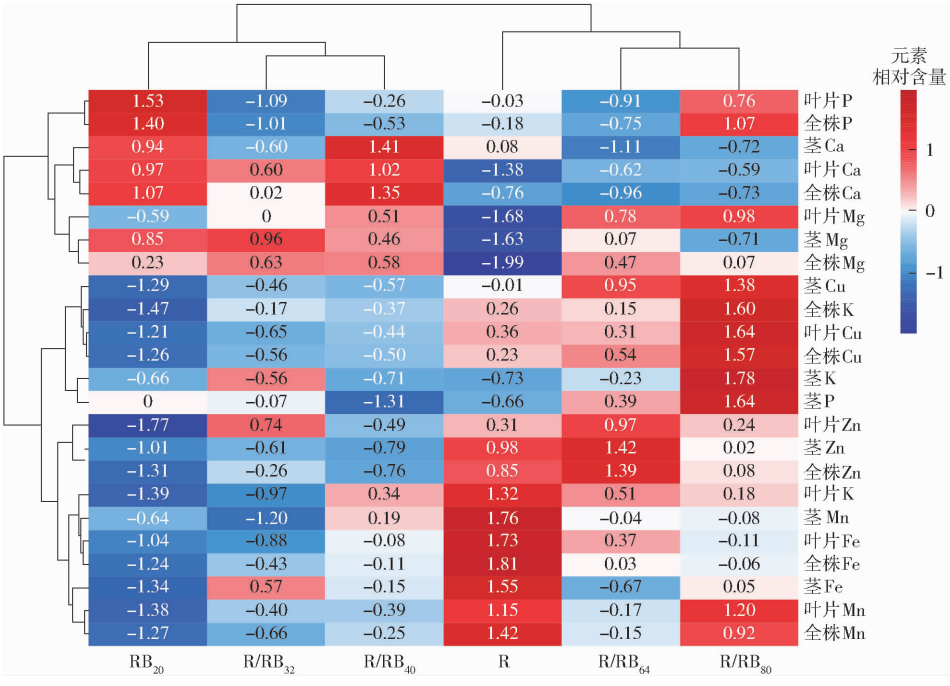


图 1　蓝光补充供光模式下番茄植株无机元素吸收聚类分析

Fig. 1　Cluster analysis of inorganic element absorption in tomato plants under supplemental blue light

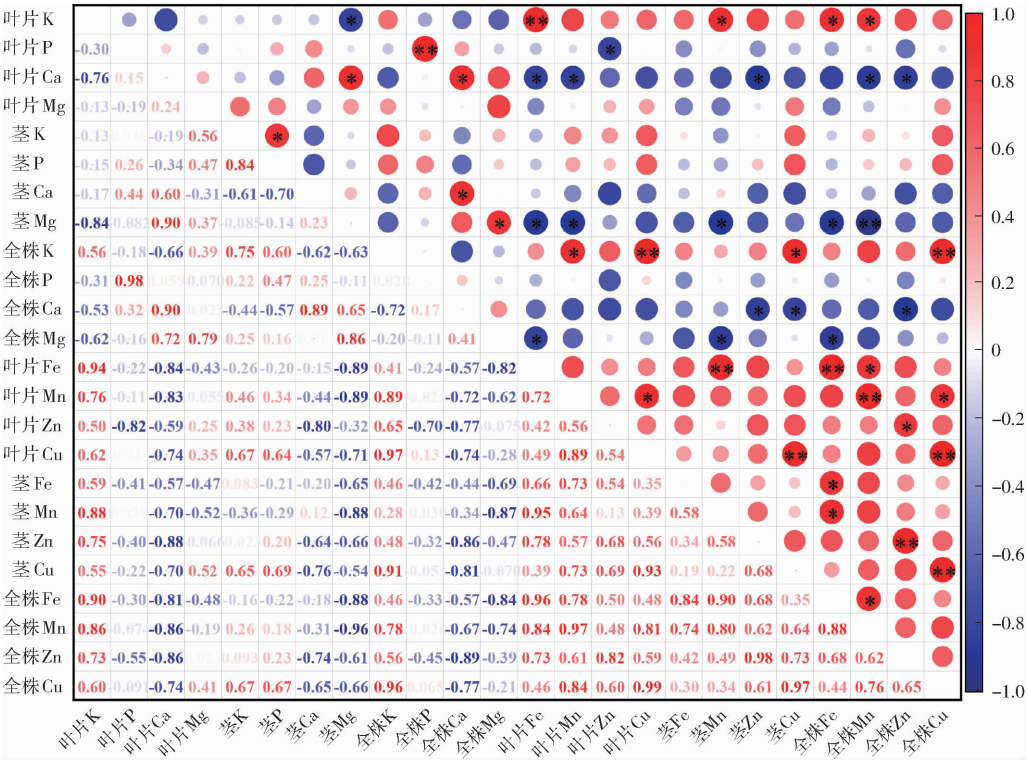


图 2 蓝光补充供光模式下番茄植株无机元素吸收相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of inorganic element absorption in tomato plants under supplemental blue light

表 5 蓝光取代介入模式下番茄植株大量元素含量（平均值 ± 标准差）

Tab. 5 Content of macroelements in tomato plants exposed to substituted blue light treatments(mean ± SD)

mg/g

部位	元素	R	RB	$R/RB_{(1min)}$	$R/RB_{(1h)}$	$R/RB_{(4h)}$
叶片	K	(65.58 ± 1.59)^{a}	(54.09 ± 1.37)^{c}	(60.62 ± 2.15)^{b}	(64.33 ± 2.01)^{ab}	(61.46 ± 1.33)^{b}
	P	(5.60 ± 0.22)^{b}	(6.58 ± 0.13)^{a}	(5.26 ± 0.22)^{b}	(5.27 ± 0.35)^{b}	(5.30 ± 0.29)^{b}
	Ca	(18.45 ± 0.66)^{b}	(24.23 ± 1.02)^{ab}	(22.72 ± 0.61)^{ab}	(28.67 ± 0.71)^{a}	(22.76 ± 0.31)^{ab}
	Mg	(9.63 ± 0.46)^{b}	(10.12 ± 0.54)^{b}	(11.18 ± 0.32)^{a}	(11.43 ± 0.61)^{a}	(11.29 ± 0.59)^{a}
茎	K	(86.78 ± 3.22)^{b}	(87.17 ± 2.05)^{b}	(91.21 ± 2.11)^{a}	(87.20 ± 0.32)^{b}	(89.36 ± 1.06)^{ab}
	P	(2.06 ± 0.11)^{a}	(2.16 ± 0.05)^{a}	(1.88 ± 0.03)^{b}	(1.90 ± 0.05)^{ab}	(1.96 ± 0.12)^{ab}
	Ca	(17.68 ± 0.46)^{b}	(19.65 ± 0.78)^{a}	(16.46 ± 0.33)^{b}	(16.82 ± 0.42)^{b}	(16.56 ± 1.06)^{b}
	Mg	(9.37 ± 0.42)^{b}	(10.71 ± 0.52)^{a}	(9.60 ± 0.35)^{b}	(10.16 ± 0.44)^{a}	(10.18 ± 0.17)^{a}
地上部	K	(152.36 ± 5.13)^{a}	(141.26 ± 2.21)^{b}	(151.83 ± 3.33)^{a}	(151.53 ± 2.01)^{a}	(150.82 ± 4.01)^{a}
	P	(7.66 ± 0.19)^{b}	(8.74 ± 0.22)^{a}	(7.14 ± 0.31)^{b}	(7.17 ± 0.13)^{b}	(7.26 ± 0.65)^{b}
	Ca	(36.13 ± 1.53)^{b}	(43.88 ± 1.62)^{a}	(39.18 ± 0.93)^{b}	(45.49 ± 2.33)^{a}	(39.32 ± 1.76)^{b}
	Mg	(19.00 ± 0.71)^{b}	(20.83 ± 1.33)^{ab}	(20.78 ± 2.04)^{ab}	(21.59 ± 1.07)^{a}	(21.47 ± 1.28)^{a}

运输。与纯红光相比，蓝光取代介入模式均提高了番茄叶片或茎中 Mg 元素含量，其中叶片中 Mg 元素含量在 $R/RB_{(1min)}$、$R/RB_{(1h)}$ 和 $R/RB_{(4h)}$ 等蓝光取代介入非连续光模式下提高幅度（16.10% ~ 18.69%）大于表 3 中蓝光补充介入非连续光模式（9.32% ~ 12.46%），同时前者处理中蓝光光量仅为后者处理的一半（表 1），可见蓝光以取代方式介入背景红光更有利于刺激叶片中 Mg 元素的积累。由表 6 可见，与纯红光相比，蓝光取代介入模式均显著降低了番茄叶片及茎中 Fe 元素含量（$P < 0.05$），与蓝光补充介入模式效应相同，可见红光背景下蓝光以不同方式介入均抑制了番茄植株中 Fe 元素的吸收。此外，与纯红光相比，蓝光取代介入模式亦显著降低了番茄叶片和茎中 Zn、Cu 元素含量（$P < 0.05$），其中番茄植株中 Cu 元素含量随着蓝光取代介入间歇时长的增加而降低，植株 Cu 元素含量在 $R/RB_{(4h)}$ 处理下最低。

3.4 非连续光模式（蓝光取代）下番茄植株无机元素吸收聚类和相关性分析

由图 3 可见，P、Ca、Mg 元素构成一个聚类亚群，与纯红光相比，该亚群元素含量在蓝光介入后均得到不同程度的提升，其中 P、Ca 含量在连续光 RB

表 6　蓝光取代介入模式下番茄植株微量元素含量（平均值 ± 标准差）

Tab. 6　Content of microelements in tomato plants exposed to substituted blue light treatments (mean ± SD)

μg/g

部位	元素	R	RB	$R/RB_{(1min)}$	$R/RB_{(1h)}$	$R/RB_{(4h)}$
叶片	Fe	(579.33 ± 22.11)^{a}	(294.21 ± 6.71)^{b}	(325.40 ± 19.71)^{b}	(312.69 ± 10.08)^{b}	(323.42 ± 11.33)^{b}
	Mn	(92.35 ± 3.77)^{a}	(68.71 ± 1.22)^{c}	(72.64 ± 2.45)^{c}	(85.53 ± 3.01)^{b}	(81.56 ± 2.79)^{b}
	Zn	(33.09 ± 2.12)^{a}	(27.28 ± 1.23)^{b}	(27.83 ± 3.10)^{b}	(23.96 ± 2.67)^{b}	(28.13 ± 2.09)^{b}
	Cu	(8.75 ± 0.49)^{a}	(6.36 ± 0.58)^{b}	(5.71 ± 1.24)^{bc}	(5.76 ± 0.73)^{bc}	(5.21 ± 0.79)^{c}
茎	Fe	(325.31 ± 20.82)^{a}	(176.06 ± 13.12)^{c}	(145.55 ± 9.23)^{d}	(247.64 ± 10.39)^{b}	(187.03 ± 16.21)^{c}
	Mn	(58.23 ± 1.36)^{a}	(49.89 ± 1.01)^{b}	(46.43 ± 2.13)^{b}	(50.43 ± 1.89)^{b}	(47.95 ± 2.01)^{b}
	Zn	(38.52 ± 1.22)^{a}	(23.73 ± 1.31)^{b}	(22.48 ± 0.92)^{b}	(17.64 ± 1.02)^{c}	(26.50 ± 1.04)^{b}
	Cu	(4.85 ± 0.21)^{a}	(3.80 ± 0.19)^{b}	(3.37 ± 0.12)^{b}	(3.13 ± 0.13)^{b}	(2.75 ± 0.06)^{c}
地上部	Fe	(904.64 ± 26.12)^{a}	(470.27 ± 12.13)^{c}	(470.95 ± 9.23)^{c}	(560.33 ± 21.53)^{b}	(510.45 ± 27.22)^{bc}
	Mn	(150.58 ± 5.32)^{a}	(118.6 ± 1.27)^{c}	(119.07 ± 2.33)^{c}	(135.96 ± 6.71)^{b}	(129.51 ± 4.05)^{b}
	Zn	(71.61 ± 2.31)^{a}	(51.01 ± 3.05)^{b}	(50.31 ± 2.36)^{b}	(41.60 ± 3.01)^{c}	(54.63 ± 4.21)^{b}
	Cu	(13.60 ± 0.31)^{a}	(10.16 ± 0.24)^{ab}	(9.08 ± 0.91)^{b}	(8.89 ± 0.81)^{b}	(7.96 ± 0.02)^{c}

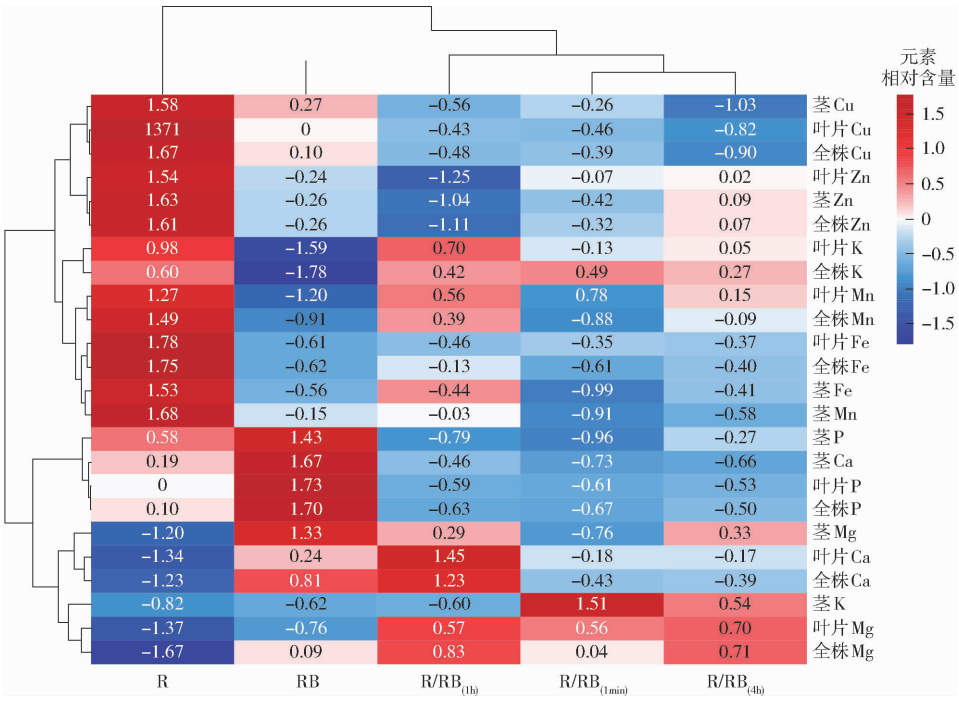


图 3　蓝光取代供光模式下番茄植株无机元素吸收聚类分析

Fig. 3　Cluster analysis of inorganic element absorption in tomato plants under substituted blue light

处理下增幅最大，而叶片 Mg 含量则在 $R/RB_{(1min)}$、$R/RB_{(1h)}$、$R/RB_{(4h)}$ 非连续光模式下提升幅度最大，图 3 进一步说明蓝光介入对 Mg 元素吸收的正向调控作用。此外，由 P、Ca、Mg 以外的其他元素聚类而成一个亚群，与纯红光相比，该亚群元素含量在蓝光介入后均得到不同程度的下调，其中 K、Zn、Cu 含量分别在 RB、$R/RB_{(1h)}$、$R/RB_{(4h)}$ 处理下降幅最大。

通过对大量元素在植株不同部位的相关性分析（图 4）发现，植株各部位的 K 元素与 P、Ca、Mg 元素均呈负相关，相反，植株各部位的 Fe、Mn、Zn、Cu 等微量元素之间均呈正相关。可见，蓝光取代介入模式处理也表现出植株 K 可能对 Mg 和 Ca 存在拮抗作用。此外，蓝光取代介入供光模式下植株大量元素和微量元素之间的相关关系与蓝光补充介入模式下有所不同，表现为：地上部 Mg 与 Zn、Cu 分别在 0.05 和 0.01 水平显著负相关，叶片 Ca 与 Zn、Mg 与 Cu 分别在 0.01 和 0.05 水平显著负相关，而叶片 K 与 Mn 显著正相关（$P < 0.05$）。可见，元素之间的相关性与供光模式有关，不同供光模式可能通过调控和协调元素吸收之间的关系进而影响植物相关生理活动。图 4 中，* 表示 $P \leqslant 0.05$，** 表示 $P \leqslant 0.01$。

3.5　非连续光模式下番茄叶片色素光谱参量

表 7 显示了不同处理下番茄植株叶片的光谱参

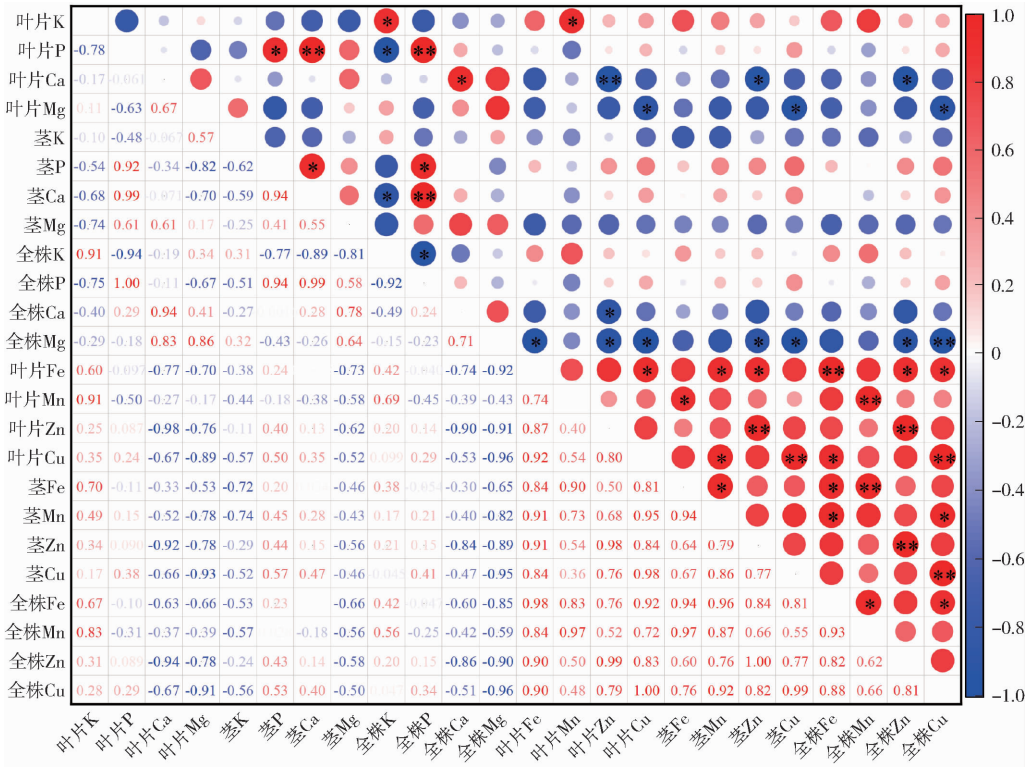


图 4 蓝光取代供光模式下番茄植株无机元素吸收相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of inorganic element absorption in tomato plants under substituted blue light

表 7 不同供光模式下番茄植株叶片光谱参量(平均值 ± 标准差)

Tab. 7 Spectral parameter of tomato plants under different lighting treatments(mean ± SD)

处理		Hue	MCARI	Red/Green	PRI
蓝光补充介入模式	R	(233.92 ± 3.21)^{b}	(15.31 ± 1.65)^{c}	(0.78 ± 0.02)^{a}	(0.02 ± 0.00)^{b}
	RB_{20}	(236.33 ± 2.38)^{ab}	(18.02 ± 1.38)^{bc}	(0.77 ± 0.03)^{a}	(0.02 ± 0.00)^{b}
	R/RB_{32}	(235.75 ± 5.55)^{ab}	(21.05 ± 0.61)^{b}	(0.77 ± 0.03)^{a}	(0.03 ± 0.00)^{a}
	R/RB_{40}	(237.63 ± 4.10)^{ab}	(24.27 ± 1.44)^{b}	(0.70 ± 0.01)^{b}	(0.03 ± 0.00)^{a}
	R/RB_{64}	(239.01 ± 4.16)^{ab}	(20.88 ± 0.71)^{b}	(0.71 ± 0.01)^{b}	(0.02 ± 0.00)^{b}
	R/RB_{80}	(243.09 ± 2.17)^{a}	(34.26 ± 1.03)^{a}	(0.70 ± 0.01)^{b}	(0.01 ± 0.00)^{c}
蓝光取代介入模式	R	(233.92 ± 3.21)^{b}	(15.31 ± 1.65)^{d}	(0.78 ± 0.02)^{a}	(0.02 ± 0.00)^{a}
	RB	(236.33 ± 2.38)^{b}	(18.02 ± 1.38)^{cd}	(0.77 ± 0.03)^{a}	(0.02 ± 0.00)^{a}
	$R/RB_{(1min)}$	(242.44 ± 3.13)^{a}	(36.55 ± 1.02)^{b}	(0.67 ± 0.04)^{b}	(0.02 ± 0.00)^{a}
	$R/RB_{(1h)}$	(247.12 ± 4.35)^{a}	(48.16 ± 1.88)^{a}	(0.69 ± 0.01)^{b}	(0.00 ± 0.00)^{b}
	$R/RB_{(4h)}$	(240.36 ± 1.14)^{ab}	(24.03 ± 0.89)^{c}	(0.71 ± 0.02)^{b}	(0.02 ± 0.00)^{a}

量值。结果显示,与纯红光相比,蓝光补充介入和蓝光取代介入的非连续供光模式下番茄叶片 Hue 值和 MCARI 值均有所提高,而番茄叶片 Red/Green 值均有所降低。蓝光补光介入模式中 Hue 值和 MCARI 值随介入蓝光强度的增加而增大,R/RB_{80}处理下 Hue、MCARI 值最高,较对照分别提高 4%、124%;蓝光取代模式中,Hue 值和 MCARI 值随蓝光间歇时间的延长先增大后减小,$R/RB_{(1h)}$处理下 Hue、MCARI 值最高,较对照分别提高 6%、215%。比较蓝光介入和蓝光取代两种非连续供光模式下番茄叶片色素光谱参量可见,在总光量相等的前提下,蓝光取代介入模式比蓝光补充介入模式更有利于刺激叶片类胡萝卜素的分解和叶绿素积累。

与纯红光相比,蓝光介入处理均提高了番茄叶片和茎中 Mg 元素含量,且蓝光补光介入模式下番茄叶片 Mg 元素含量随着蓝光补充强度的增加而升高,这与表 7 显示的番茄叶片 Hue 值和 MCARI 值在不同光处理间的变化趋势一致。Hue 值反映番茄植株叶片着色,数值越大、叶片越绿,修正叶绿素吸收比指数 MCARI 反映叶绿素的变动。可见,番茄植株尤其叶片中 Mg 元素含量的增加与叶绿素增加呈现一定的正相关性,这可能是由于叶绿素为镁卟啉化合物,而 Mg 元素是构成叶绿素分子的重要组成部分,Mg 元素的积累有利于促进叶绿素的形成。由于

类胡萝卜素中不含 Mg 元素，叶绿素含量指征光谱参量 Hue 和 MCARI 最高的 $R/RB_{(1h)}$ 处理中番茄叶片 PRI(反映类胡萝卜/叶绿素比值)值最低，几乎为零。

3.6　非连续光模式下番茄叶片反射光谱

图 5 和图 6 为不同处理下番茄叶片的反射光谱曲线。番茄叶片绿光光谱区域(500 ~ 599 nm)反射率在蓝光补充介入处理下随着蓝光强度的增加而升高，R/RB_{40}、R/RB_{64} 和 R/RB_{80} 处理下番茄叶片平均反射率分别为 9.16%、10.42% 和 10.65%，较纯红光对照分别提高 2% ~ 17%；与纯红光 R 相比，$R/RB_{(1min)}$、$R/RB_{(1h)}$、$R/RB_{(4h)}$ 等蓝光取代介入处理均提高了番茄叶片绿光区域反射率，提高幅度为 15% ~ 78%。植物叶片呈色与叶片中色素如叶绿素、叶黄素、花青素等含量密切相关，叶片呈现绿色与叶绿素吸收大部分红光和紫光但反射绿光直接相关，结果可见番茄叶片在绿光区域的反射率与其各处理下叶绿素光谱参量变化趋势接近，不同模式的光照射可能通过调控番茄植株对色素代谢相关的无机元素吸收来影响叶片着色。

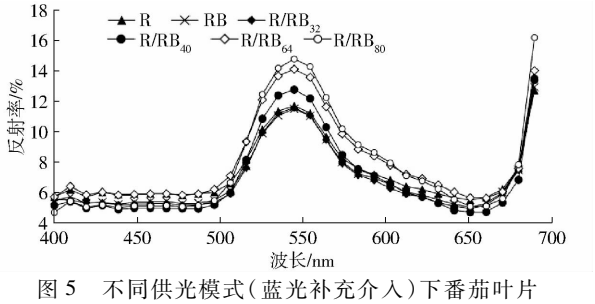


图 5　不同供光模式(蓝光补充介入)下番茄叶片反射光谱曲线

Fig. 5　Reflection spectra of tomato leaves exposed to different lighting treatments (blue light supplementary intervention)

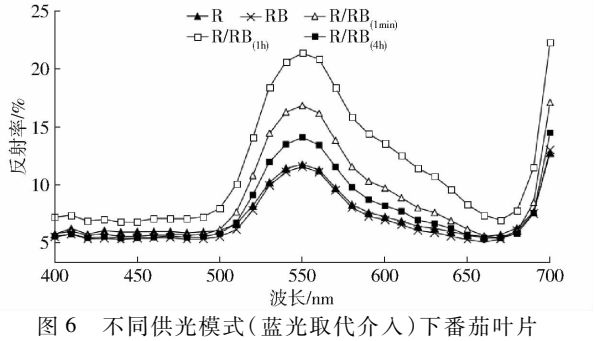


图 6　不同供光模式(蓝光取代介入)下番茄叶片反射光谱曲线

Fig. 6　Reflection spectra of tomato leaves exposed to different lighting treatments (blue light substitution intervention)

4　讨论

光环境影响植物的养分吸收，而植物体内营养元素通过作用于光合色素的合成反过来作用于植物的光能传导和光合作用。本研究表明，红光背景下介入相同光量的蓝光培育番茄植株，植株营养元素吸收、茎叶间运转以及叶片叶绿素光谱参量的变化均与蓝光的介入方式有关。总体来看，蓝光介入后番茄植株体内大量元素 Ca、Mg 含量较纯红光下均有所增加，其中 Mg 元素在蓝光取代介入模式下增加幅度大于蓝光补充介入模式。相反，蓝光介入后番茄植株体内微量元素 Fe、Mn、Zn、Cu 含量较纯红光下均有所降低。同时，蓝光介入后番茄叶片叶绿素光谱参量 Hue、MCARI 以及叶片在绿光波段区域的平均反射率均有所升高。以往研究表明，纯红光显著促进了生菜对 Fe 和 Cu 元素的吸收[11]，这与本研究结果基本一致，即蓝光的介入不利于番茄植株对 Fe 和 Cu 元素的吸收。此外，研究表明蓝光促进了植物叶片中叶绿素的生物合成，并在植物叶片中叶绿素的生成和移动中发挥了主要作用，缺乏蓝光对许多植物如黄瓜、菠菜和小麦等的叶绿素生物合成有不利影响[12-13]。大量元素 Mg 是构成叶绿素的组分，缺 Mg 会导致叶绿素无法合成，尽管微量元素 Fe、Cu 也与叶绿素合成有关，具有提高叶绿素稳定性的功能，而从本研究结果来看，蓝光可能主要通过增加 Mg 这种叶绿素结构性元素的吸收量来促进叶绿素的合成，且蓝光取代介入模式下的促进作用大于蓝光补充模式。有研究者认为蓝光对植物叶绿素生物合成的影响是定性而非定量的效应，即叶绿素含量不随蓝光比例的升高而增加[14]；也有相反研究结果表明，叶片叶绿素含量随着蓝光比例的增加而逐渐增加[15]。本研究结果显示，与纯红光相比，在蓝光补光介入模式下番茄叶片叶绿素光谱参量随着蓝光补充强度的增加而升高，这可能表明不同品种的叶绿素对光质的反应不同；本研究结果还表明在蓝光取代红光的介入模式下番茄叶片叶绿素随着蓝光介入时间间隔的延长先升高后降低，在总光量相等的基础上，蓝光取代介入模式比蓝光补充介入模式更有利于刺激番茄叶片叶绿素合成。

本研究结果还显示，红光背景下蓝光以连续或者非连续的供光方式介入对番茄植株无机营养元素吸收及运转产生的差异结果，这表明红、蓝光在调节番茄植株营养元素吸收转运的生理过程中是相互影响的，而不是独立作用的。然而，就某一种元素而言，未观察到番茄地上部元素含量与蓝光光强度或蓝光介入间隔时间的明显正/负相关关系，红、蓝光之间复杂的互作机制可能与红、蓝光受体的信号传导有关。红光和蓝光通过光感受器蛋白影响植物的光响应，这些蛋白质包括作为红光受体的光敏色素(phyA，phyB，phyC，phyD，phyE)、作为蓝色紫外线受体的隐花色素(cry1，cry2，cry3)和向光素(phot1，

phot2)[16-17]。红光和蓝光通过这些光感受器完成植物的信号传导,这些光感受器在不同的生理活动或不同的环境状态中表现出协同或拮抗关系。例如,cry2 和 phyB 在诱导开花方面是拮抗的,但在调节向光性方面是协同的;cry1 在拟南芥中表现出对 phyB 的功能依赖性,当植物暴露于连续光照时,cry1 和 phyB 功能变得独立[18-20]。因此,红光和蓝光的信号传导通路中可能存在信号串扰或放大,适当的蓝光介入照射可能通过消除红、蓝光信号传导通路之间的信号串扰或拮抗,从而充分发挥红、蓝光的生理功能,这可能是相同总光量不同蓝光介入模式下目标物质(如本研究中的无机元素)增效或减效的原因之一。

在总光量一致的前提下,本研究中非连续蓝光取代介入模式 $R/RB_{(1min)}$、$R/RB_{(1h)}$、$R/RB_{(4h)}$ 较连续红光或连续红蓝光而言,番茄叶片 Mg 含量得到大幅提升,对 Mg 元素的刺激增益效果显著。发光二极管(LED)作为光谱可调的植物生长光源,在园艺生产系统中受到广泛关注,由于 LED 的高度可控性,目前人工光型栽培设施中的照射方式已不必局限于传统模式,本文认为能够增效的非连续供光模式均值得探索。

5 结论

(1)与连续红光相比,蓝光以不同方式介入均降低了番茄叶片中 K 元素含量而提高了茎中 K 元素含量,蓝光介入一定程度上抑制了 K 由茎向叶片的运输;蓝光以不同方式介入均促进了番茄地上部 Mg 的吸收同时抑制了 Fe 和 Mn 的吸收,其中蓝光补充介入模式下番茄叶片中 Mg 含量随着蓝光补充强度的升高而增加,蓝光强度增加一定程度上促进了 Mg 由茎向叶片的运输;蓝光取代介入的非连续光模式较蓝光补充介入模式而言更有利于刺激叶片 Mg 的积累以及抑制地上部 Fe 的积累。

(2)与连续红光相比,蓝光以不同方式介入后番茄叶片叶绿素光谱参量均有所提高,蓝光补充介入模式下叶绿素光谱参量随蓝光补充强度的升高而增大。番茄叶片叶绿素光谱参量与叶片中 Mg 含量正相关且与各处理间绿光波段反射率变化趋势相近,蓝光取代介入的非连续光模式较蓝光补充介入模式而言更有利于刺激类胡萝卜素分解和叶绿素积累。非连续供光模式可能通过调控番茄植株无机元素的吸收进而作用于叶片色素代谢等相关的植物生理活动。

参 考 文 献

[1] AMOOZGAR A, MOHAMMADI A, SABZALIAN M R. Impact of light-emitting diode irradiation on photosynthesis, phytochemical composition and mineral element content of lettuce cv. Grizzly[J]. Photosynthetica, 2017, 55: 85-95.

[2] KALAJI H M, BABA W, GEDIGA K, et al. Chlorophyll fluorescence as a tool for nutrient status identification in rapeseed plants[J]. Photosynthesis Research, 2018, 136: 329-343.

[3] CHEN Xiaoli, YANG Qichang. Effects of intermittent light exposure with red and blue light emitting diodes on growth and carbohydrate accumulation of lettuce[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 234: 220-226.

[4] CHOI H G, MOON B Y, KANG N J. Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 189: 22-31.

[5] PANJAI L, NOGA G, HUNSCHE M, et al. Optimal red light irradiation time to increase health-promoting compounds in tomato fruit postharvest[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 251:189-196.

[6] HOFFMANN A M, NOGA G, HUNSCHE M. Alternating high and low intensity of blue light affects PSII photochemistry and raises the contents of carotenoids and anthocyanins in pepper leaves[J]. Plant Growth Regulation, 2016, 79: 275-285.

[7] YAMADA C, OHYAMA K, KOZAI T. Photosynthetic photon flux control for reducing electric energy consumption in a closed-type transplant production system[J]. Environment Control in Biology, 2000, 38: 255-261.

[8] CHEN Xiaoli, YANG Qichang, SONG Wenpin. Growth and nutritional properties of lettuce affected by different alternating intervals of red and blue led irradiation[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 223 (15): 44-52.

[9] SHIMOKAWA A, TONOOKA Y, MATSUMOTO M, et al. Effect of alternating red and blue light irradiation generated by light emitting diodes on the growth of leaf lettuce[J]. BioRxiv, 2014: 003103.

[10] CHEN Xiaoli, WANG Lichun, LI Youli, et al. Alternating red and blue irradiation affects carbohydrate accumulation and sucrose metabolism in butterhead lettuce[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 302(3): 111177.

[11] CHEN Xiaoli, WANG Lichun, LI Youli, et al. Effects of alternating light spectrum on the mineral element level of lettuce[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022,42(9): 2813-2817.

[12] KEIKO O K, RYO M, EIJI G, et al. Growth of rice plants under red light with or without supplemental blue light[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2006, 52: 444-452.

[13] HOGEWONING S W, GOVERT T, HANS M. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of cucumis sativus grown under diferent combinations of red and blue light[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(11): 3107-3117.

(下转第 345 页)

and model fusion[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 243 – 250. (in Chinese)

[25] 肖白, 赵晓宁, 姜卓, 等. 利用模糊信息粒化与支持向量机的空间负荷预测方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1):251 – 258.
XIAO Bai, ZHAO Xiaoning, JIANG Zhuo, et al. A spatial load forecasting method using fuzzy information granulation and support vector machines[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 251 – 258. (in Chinese)

[26] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈纬楠, 等. 二次模态分解组合 DBiLSTM – MLR 的综合能源系统负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13):85 – 94.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Weinan, et al. Comprehensive energy system load forecasting using second-order modal decomposition combined with DBiLSTM – MLR[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 85 – 94. (in Chinese)

[27] WANG W, ZHANG M, LIU C, et al. Real-time monitoring of environmental information and modeling of the photosynthetic rate of tomato plants under greenhouse conditions[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 29(5):783 – 792.

[28] SHU S, TANG Y, YUAN Y, et al. The role of 24-epibrassi-nolide in the regulation of photosynthetic characteristics and nitrogen metabolism of tomato seedlings under a combined low temperature and weak light stress[J]. Plant Physiol. and Biochem., 2016, 107:344 – 353.

[29] 张继波, 陈辰, 李楠, 等. 极端寡照天气对设施番茄光合特性及抗氧化酶活性的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(3):64 – 68.
ZHANG Jibo, CHEN Chen, LI Nan, et al. The impact of extreme low-light weather on the photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activity of cultivated tomatoes[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(3): 64 – 68. (in Chinese)

[30] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995:1942 – 1948.

[31] HUANG G, ZHOU H, DING X, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification[J]. IEEE Transactions on Systems, 2011, 42(2):513 – 529.

[32] 张晓凤, 王秀英. 布谷鸟搜索算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(18):8 – 16.
ZHANG Xiaofeng, WANG Xiuying. Cuckoo search algorithm review[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(18): 8 – 16. (in Chinese)

[33] LU H, CHEN J, LIAO W. Nonparametric regression via variance-adjusted gradient boosting Gaussian process regression[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2021, 33(6):2669 – 2679.

[34] DEHGHANI M, HUBALOVSKY S, TROJOVSKY P. Northern goshawk optimization: a new swarm-based algorithm for solving optimization problems[J]. IEEE Access, 2021, 9:162059 – 162080.

[35] EL-DABAH M A, EL-SEHIEMY R A, HASANIEN H M, et al. Photovoltaic model parameters identification using Northern Goshawk Optimization algorithm[J]. Energy, 2023, 262:125522.

[36] ZHAN Y, ZHANG H, LI J, et al. Prediction method for ocean wave height based on stacking ensemble learning model[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(8):1150.

[37] ALMADANI M, KHEIMI M. Stacking artificial intelligence models for predicting water quality parameters in rivers[J]. Journal of Ecological Engineering, 2023, 24(2):152 – 164.

(上接第 336 页)

[14] DOUGHER T A, BUGBEE B. Diferences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation[J]. Photochem Photobiol, 2001, 73(2): 199 – 207.

[15] WANG Jun, LU Wei, TONG Yuxin, et al. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fuorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to diferent ratios of red light to blue light[J]. Front. Plant Science, 2016, 7: 250.

[16] LISCUM E. Blue light-induced intracellular movement of phototropins: functional relevance or red herring? [J]. Front. Plant Science, 2016, 7:205000.

[17] MAXIMILIANO S L, CHRISTIAN D L, PABLO D C. Bottom-up assembly of the phytochrome network[J]. PLoS Genetics, 2016, 12 (11): 1006413.

[18] 陈晓丽, 杨其长, 王利春, 等. 红蓝光交替照射下生菜能量利用与光合性能分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6):344 – 350.
CHEN Xiaoli, YANG Qichang, WANG Lichun, et al. Analysis of energy use efficiency and photosynthesis of lettuce under alternating red and blue irradiation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6):344 – 350. (in Chinese)

[19] CHENG M C, KATHARE P K, PAIK I, et al. Phytochrome signaling networks[J]. Annu. Rev. Plant Biol., 2021, 72: 217 – 244.

[20] 王美娇, 彭晶, 齐立娟, 等. 光信号调控植物响应非生物胁迫的研究进展[J]. 植物生理学报, 2023, 59(4):682 – 704.
WANG Meijiao, PENG Jing, QI Lijuan, et al. Research advances on light control of plant responses to abiotic stresses[J]. Plant Physiology Journal, 2023, 59(4): 682 – 704. (in Chinese)