

闻 婧, 李倩中, 李淑顺, 等. 不同 LED 光源对铁皮石斛生长和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 江苏农业学报, 2016, 32(4): 910-916.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.04.031

不同 LED 光源对铁皮石斛生长和叶绿素荧光参数的影响

闻 婧, 李倩中, 李淑顺, 荣立苹, 唐 玲, 黎 瑞

(江苏省农业科学院园艺研究所/江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室, 江苏 南京 210014)

摘要: 利用 LED 光源, 设红光、蓝光、黄光、红蓝组合光和红蓝黄组合光 5 个处理, 以荧光灯为对照, 测定铁皮石斛干质量、鲜质量、株高、茎粗、多糖、叶绿素和叶绿素荧光参数, 研究不同光质处理对铁皮石斛生长及叶绿素荧光参数的影响。结果表明: 在鲜质量等量增加的情况下, 红蓝组合光利于植株干物质的积累, 红蓝黄组合光有利于植株干质量和鲜质量的提高; 红蓝组合光和红蓝黄组合光 2 个处理的叶片 PS II 反应中心从光能的吸收、转化、传递、分配和耗散整个过程都优于其他处理; 单色红光在处理 20 d 时, 其叶绿素 a 含量达到最大, 且 φ_{P_0} 、 φ_{E_0} 、 Ψ_0 、 PI_{ABS} 和 PI_{total} 值均与 2 个组合光无显著差异。单色红光在短期 (20 d 左右) 内可以有效促进多糖累积, 红蓝黄组合光则更有利于铁皮石斛盆栽苗的生长、干物质积累和多糖的积累。

关键词: LED 光源; 光质; 铁皮石斛; 叶绿素荧光参数

中图分类号: S567.23⁺

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2016)04-0910-07

Growth and chlorophyll fluorescence parameters of *Dendrobium officinale* exposed to different LED light qualities

WEN Jing, LI Qian-zhong, LI Shu-shun, RONG Li-ping, TANG Ling, LI Rui

(Institute of Horticulture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu Key Laboratory for Horticultural Crop Genetic Improvement, Nanjing 210014, China)

Abstract: Taking *Dendrobium officinale* as material, red light, blue light, yellow light, red-blue light, red-blue-yellow light by light emitting diode (LED) was applied to study the effects of LED light qualities on growth and chlorophyll characteristics by measuring the dry weight, fresh weight, plant height, stem diameter, polysaccharide content, chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters. Fluorescent lamp was set as control. The red-blue light was beneficial for the accumulation of dry matter, and red-blue-yellow light was favorable for the increase of fresh weight and dry weight. Under red-blue light and red-blue-yellow light, the ability of energy absorption, energy transformation, energy transmission, energy distribution and energy dissipation in PS II reaction center increased significantly. In the red light treatment for 20 d, the content of chlorophyll attained the maximum, and φ_{P_0} , φ_{E_0} , Ψ_0 , PI_{ABS} values showed no difference with those in red-blue light and red-blue-yellow light treatments. The short-term (around 20 d) red light illumination could promote the accumulation of polysaccharide. Red-blue-yellow light was conducive to the growth, accumulation of dry matter and polysaccharide content in *D. officinale*.

Key words: LED; light quality; *D. officinale*; chlorophyll fluorescence parameter

不同光质对植物的生长发育、形态建成、光合作

用、物质代谢以及基因表达均具有调控作用^[1-2], 通过光质的调节和控制, 可以充分发挥植物的生长潜能, 增加经济价值^[3-4]。铁皮石斛作为名贵的中药材, 其人工栽培产业也迅速发展, 通过光质调控来提高铁皮石斛品质, 对铁皮石斛产业化发展具有重要意义^[5-6]。已有研究结果证明, 红光有助于植物干物质的积累, 促进茎的伸长生长, 提高光合速率和总

收稿日期: 2015-11-18

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(13)5067]

作者简介: 闻 婧 (1983-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 硕士, 助理研究员, 从事园艺栽培研究工作。(Tel) 025-84392681; (E-mail) wenjing123006@sina.com

通讯作者: 李倩中, (Tel) 025-84392651

糖含量;蓝色具有抑制茎伸长,促进分化,增加叶面积,提前花期,抑制黄化现象等作用^[7-10]。利用 LED 光源已经成功培育多种植物,如莴苣^[11-12]、小麦^[13]、菠菜^[14]、生菜^[15]、马铃薯组培苗^[16]、香蕉组培苗^[17]、番茄^[18]、黄瓜^[19]、韭菜^[20]、虎头兰^[21]、白鹤芋^[22]等。对铁皮石斛组培苗的研究发现,红蓝光强比值为 1~2 较为适宜铁皮石斛组培苗的生长,比值大于 4,对铁皮石斛组培苗的生长发育和扩繁形成抑制^[23]。但对铁皮石斛盆栽苗的光质调控还鲜有报道。本研究在不同光质对其他植物以及铁皮石斛组培苗研究基础上,对 1 年生铁皮石斛盆栽苗进行研究,希望能发现光质调控对铁皮石斛盆栽苗生长发育以及叶绿素荧光参数的影响。

1 材料与方法

1.1 试验时间和地点

试验于 2014 年 8 月至 2014 年 10 月在江苏省农业科学院紫金生态园植物生长室进行。室内温度白天为 25 ℃,夜间为 18 ℃;光照时间为每天 10 h (8:00-18:00)。

1.2 试验材料

供试材料为铁皮石斛(*Dendrobium officinale*)组培驯化苗,选择长势基本一致的 1 年生植株,每个植株鲜质量约 0.8 g,株高约 4 cm,茎粗 0.4 cm。用树皮、泥炭土和奥绿颗粒肥混合作为栽培基质,其中树皮:泥炭土:奥绿颗粒肥为 200:50:3(质量比)。每 7 d 浇 1 次水,每天喷水 1 次,每盆栽种 5 株,每个处理 5 盆。

1.3 LED 光质处理

试验光源为深圳市四海新宇照明科技有限公司生产的 LED 光源,其中红光(R)波峰为 636 nm,蓝光(B)波峰为 458 nm,黄光(Y)波峰为 592 nm。试验共设 5 个 LED 光源处理,分别是红光(R)、蓝光(B)、黄光(Y)、红蓝组合光(RB)(光照度比例为 R:B=8:1)和红蓝黄组合光(RBY)(光照度比例为 R:B:Y=8:1:1)。将植物置于灯架下,通过调节高度,使各处理总光照度控制在 85~90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。光照波峰和光照度比例使用 AvaSpec 光纤光谱仪测定,光照度使用 Li-250A 光照计测定。以普通荧光灯为对照(CK)。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 生理指标的测定 盆栽苗在不同 LED 光源下处理 40 d 后,在每个光照处理中随机选取 3 盆,每盆

中随机取 2 株,进行干鲜质量、株高、茎粗和多糖的测定。其中,鲜质量直接用天平称量,干质量在 80 ℃烘 48 h 后称量^[24];株高使用直尺测量;茎粗使用游标卡尺测量;采用苯酚-硫酸法测量多糖^[25];每隔 10 d,选取从顶端向下 2~4 节的成熟叶片,每个处理随机取 3 片,采用比色法测量叶片叶绿素含量^[26]。

1.4.2 叶绿素荧光参数测定 使用英国汉莎科学仪器公司生产的 Handy PEA 植物效率分析仪,每间隔 10 d 在 9:00-11:00 测量 1 次叶片叶绿素荧光动力学参数,测量叶片选取从顶端向下 2~4 节的成熟叶片,环境温度 25 ℃,各荧光参数的意义及计算公式^[27-28]见表 1。

表 1 叶绿素荧光诱导动力学曲线(OJIP)分析中的荧光参数

Table 1 Parameters in the analysis of chlorophyll fluorescence transient (OJIP)

荧光参数	描述
F_0 、 F_m	最小荧光、最大荧光
$F_{300\mu\text{m}}$ 、 $F_J = F_{2\text{ms}}$ 、 $F_I = F_{30\text{ms}}$	300 μm 、2 ms、30 ms 时瞬时荧光值
$W_k = (F_{300\mu\text{m}} - F_0) / (F_J - F_0)$	K 点的相对可变荧光 F_k 占 $F_J - F_0$ 振幅的比例,
$V_J = (F_J - F_0) / (F_m - F_0)$ 、 $V_I = (F_I - F_0) / (F_m - F_0)$	J 和 I 相对可变荧光
$M_0 = 4(F_{300\mu\text{m}} - F_0) / (F_m - F_0)$	相对荧光的初始斜率
$\varphi_{P_0} = F_v / F_m = 1 - F_0 / F_m$	最大光化学效率
$\Psi_0 = ET_0 / TR_0 = 1 - V_J$	捕获的光能用于 QA-下游电子传递的量子产额
$\varphi_{E_0} = ET_0 / ABS = (F_v / F_m) / (1 - V_J)$	吸收的能量用于电子传递的量子产额
$\varphi_{D_0} = F_0 / F_m = 1 - \varphi_{P_0}$	用于耗散的量子产额
PI_{ABS} 、 PI_{total}	以吸收光能为基础的性能参数、综合性能参数

1.5 数据统计分析

本试验各处理均随机挑选 3 盆测量,6 次重复,数据取平均值。利用 DPS 进行显著性分析,用 Excel2010 进行数据处理与作图。

2 结果与分析

2.1 不同光质对铁皮石斛干鲜质量、株高、茎粗和多糖含量的影响

由表 2 可知,RBY 处理下的铁皮石斛干鲜质量最大,显著大于其他各处理;RB 处理下,植株鲜质

量显著低于 CK,而干质量显著高于 CK;R 和 B 2 个处理间干鲜质量无显著差异;Y 处理的干鲜质量最小,显著小于其他处理。

不同处理中,B 处理的株高最小,显著低于其他处理,RB 和 RBY 2 个处理株高与 CK 无显著差异,R 和 Y 2 个处理株高显著高于 CK。不同处理中,植株茎粗变化较小,只有 Y 处理显著小于其他处理,其他各处理间无显著差异。

多糖是铁皮石斛的主要药用功能成分,其含量

表 2 不同光质处理下铁皮石斛的干鲜质量、株高、茎粗和多糖

Table 2 Dry weight, fresh weight, plant height, stem diameter and polysaccharide content of *Dendrobium officinale* exposed to different light qualities

处理	鲜质量(g)	干质量(g)	株高(cm)	茎粗(cm)	多糖含量(mg/g,FW)		
					茎	叶	总量
R	1.2 ± 0.08d	0.15 ± 0.03d	6.3 ± 0.5a	0.55 ± 0.07a	25.6 ± 3.8a	14.7 ± 2.3a	40.3 ± 4.1a
B	1.2 ± 0.09d	0.13 ± 0.01de	4.6 ± 0.3c	0.51 ± 0.09a	18.7 ± 3.1b	11.9 ± 2.1b	30.6 ± 5.2b
Y	1.0 ± 0.10e	0.10 ± 0.02e	6.7 ± 0.7a	0.45 ± 0.05b	15.4 ± 3.5b	13.7 ± 1.8ab	29.1 ± 5.3b
RB	1.5 ± 0.09c	0.39 ± 0.03b	6.0 ± 0.5ab	0.57 ± 0.07a	15.0 ± 2.6b	12.3 ± 2.0b	27.3 ± 4.6b
RBY	2.6 ± 0.11a	0.59 ± 0.02a	5.5 ± 0.8b	0.53 ± 0.03a	26.0 ± 3.7a	15.1 ± 1.4a	41.1 ± 5.1a
CK	2.1 ± 0.04b	0.20 ± 0.03c	5.6 ± 0.4b	0.52 ± 0.05a	10.8 ± 2.2c	8.6 ± 1.5c	19.4 ± 3.7c

R、B、Y、RB、RBY、CK 分别表示红光、蓝光、黄光、红蓝组合光、红蓝黄组合光、荧光灯对照。

2.2 不同光质对铁皮石斛叶绿素含量的影响

由图 1 可知,在不同处理中,对于从顶端向下 2~4 节的成熟叶片,RBY 处理、RB 处理和 R 处理在 0~20 d,叶绿素 a 含量逐渐升高,在处理 20 d 时达到最大值,其中 RBY 处理>RB 处理>R 处理,分别升高了 50%、40%和 30%。随后 RBY 处理和 RB 处理小幅降低,处理 40 d 时,降幅分别为 13%和 12%,R 处理则降幅较大,处理 40 d 时,降低 27%;B 处理和 Y 处理在处理 20 d 之前变化较小,与 CK 相似,无显著差异,20 d 后均显著降低,显著低于其他处理。在整个处理过程中,叶绿素 b 无显著变化,说明不同处理对植株叶绿素 b 无显著影响。叶绿素 a+b 和 a/b 的变化情况与叶绿素 a 的变化情况相似,且不同处理间存在显著差异。

2.3 不同光质对铁皮石斛叶绿素荧光参数的影响

2.3.1 不同光质对基本参数 F_0 、 W_k 、 V_j 、 V_i 、 M_0 的影响 W_k 为 K 点的相对可变荧光 F_k 占 F_j-F_0 振幅的比例, W_k 的升高可作为 PS II 反应中心供体侧(放氧复合体 OEC)发生伤害的标志^[29]。如图 2A 所示,随着处理时间的延长,B 处理、Y 处理和 R 处理的 W_k 均有显著升高。处理 20 d 时,R 处理 W_k 升高了

的高低,直接影响铁皮石斛的品质优劣。不同光质处理下,R 和 RBY 2 个处理间多糖总含量无显著差异,均显著高于其他处理,CK 多糖总含量最低,并显著小于其他处理。另外,铁皮石斛茎和叶两部分多糖含量的变化相似。R 和 RBY 2 个处理的多糖有 63.5%和 63.2%储存在茎中,B、Y、RB 和 CK 4 个处理分别有 61.1%、52.9%、55.0%和 55.7%的多糖储存在茎中。说明单色红光和红蓝黄组合光更有利于铁皮石斛多糖的积累,并主要储存在植株的茎中。

16%,之后随着处理时间的延长无显著升高。B 处理和 Y 处理在处理 20 d 时,分别升高了 24%和 16%,40 d 时分别升高 44%和 30%。说明蓝、黄、红 3 种单色光处理在不同程度上对 OEC 造成了伤害。 W_k 在 RB 处理、RBY 处理和 CK 中无显著变化。

V_j 和 V_i 反映了照光 2 ms 和 30 ms 时有活性的反应中心的关闭程度^[28]。如图 2B 和 2C 所示,随着处理时间的延长,B 处理和 Y 处理的 V_j 有显著升高;而 R 处理、RB 处理和 RBY 处理的 V_j 呈波动性变化,总体上没有显著差异;CK 在处理过程中,先显著降低,后随着处理时间的延长有所升高。各处理的 V_i 值在整个过程中呈波动性的变化,但是总体上没有显著差异。说明,不同处理在照光 2 ms 之前对活性反应中心的关闭程度有影响,照光 30 ms 后对活性反应中心的关闭程度没有影响。

M_0 反应了 Q_A 被还原的最大速率,即 0~J 过程中 Q_A 被还原的速率,代表着 PS II 反应中心的关闭状态^[27,30]。如图 2D 所示, M_0 的变化趋势与 V_i 相似,说明各处理在照光 2 ms 之前,有活性的反应中心关闭程度高,是由于反应中心 Q_A 被还原的速率快, Q_A 积累造成的。

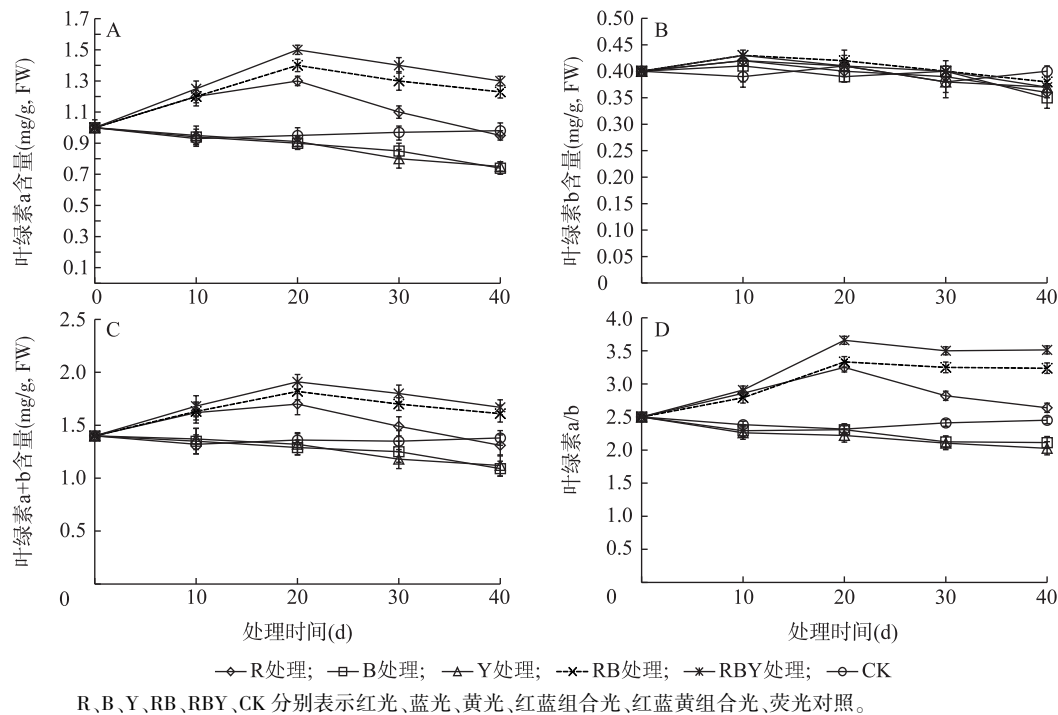


图1 不同光质对铁皮石斛叶绿素含量的影响
Fig.1 Effects of different light qualities on chlorophyll contents of *D. officinale*

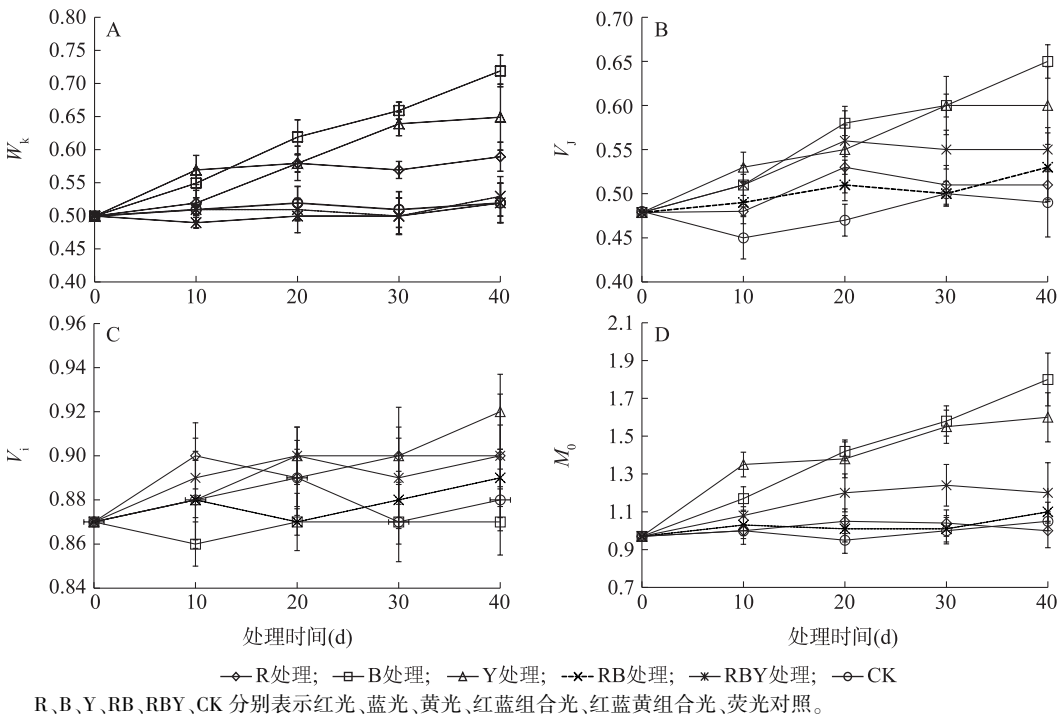
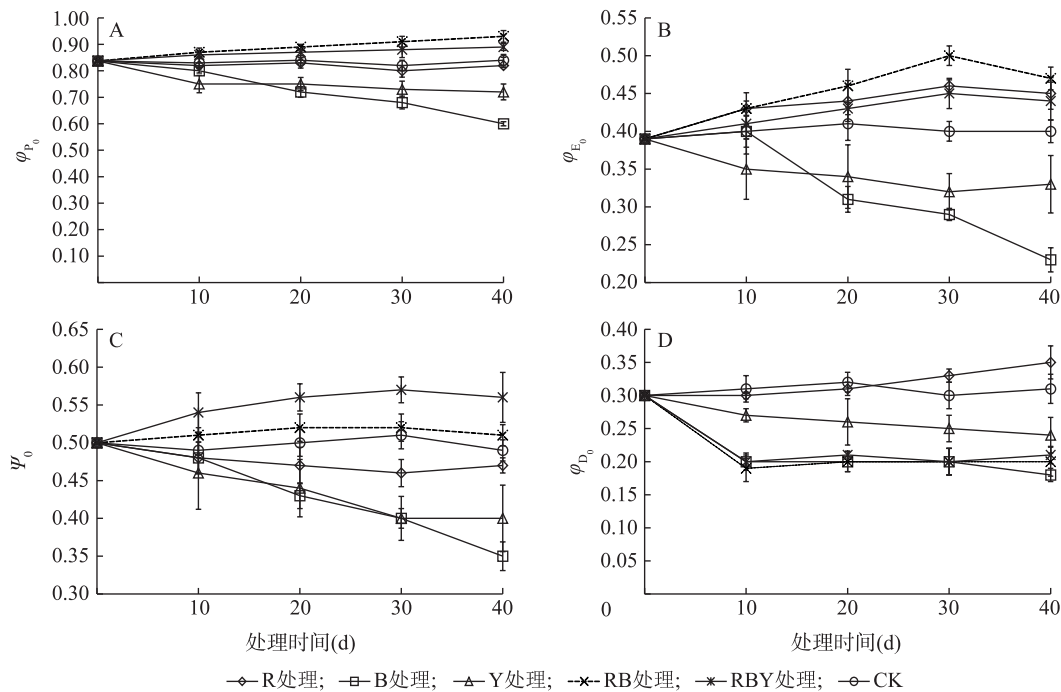


图2 不同光质对铁皮石斛叶绿素荧光参数 W_k , V_j , V_i 和 M_0 的影响
Fig.2 Effects of different light qualities on chlorophyll fluorescence parameters W_k , V_j , V_i and M_0 of *D. officinale*

2.3.2 不同光质对 φ_{P_0} 、 φ_{E_0} 、 Ψ_0 、 φ_{D_0} 的影响 φ_{P_0} 反映 PS II 反应中心光能的转换效率,在发生光抑制时

降低。如图 3A 所示,随着处理时间的延长,B 处理的 φ_{P_0} 不断下降,在处理 20 d 时,下降 14%,处理 40 d 时



R、B、Y、RB、RBY、CK 分别表示红光、蓝光、黄光、红蓝组合光、红蓝黄组合光、荧光对照组。

图 3 不同光质对铁皮石斛叶绿素荧光参数 φ_{P_0} 、 φ_{E_0} 、 Ψ_0 、 φ_{D_0} 的影响

Fig.3 Effects of different light qualities on chlorophyll fluorescence parameters φ_{P_0} , φ_{E_0} , Ψ_0 and φ_{D_0} of *D. officinale*

下降 20%;Y 处理在处理 10 d 时, φ_{P_0} 下降 11%, 之后随着时间的延长, 没有显著变化;RB 处理和 RBY 处理的 φ_{P_0} 逐步升高, 并显著高于其他处理;在整个处理过程中, R 处理和 CK 的 φ_{P_0} 没有显著变化。

φ_{E_0} 反映了天线吸收的能量用于电子传递的产额。在处理 10 d 时, 只有 Y 处理 φ_{E_0} 显著降低, 其他处理间无显著差异。随着处理时间的延长, Y 处理没有大幅度降低;B 处理的 φ_{E_0} 在处理 20 d 时大幅度降低, 达 20%, 40 d 时降低 40%;RB 处理、RBY 处理和 R 处理的 φ_{E_0} 有不同程度升高, 其中 RB 处理显著高于 RBY 处理和 R 处理, 并均显著高于 CK。

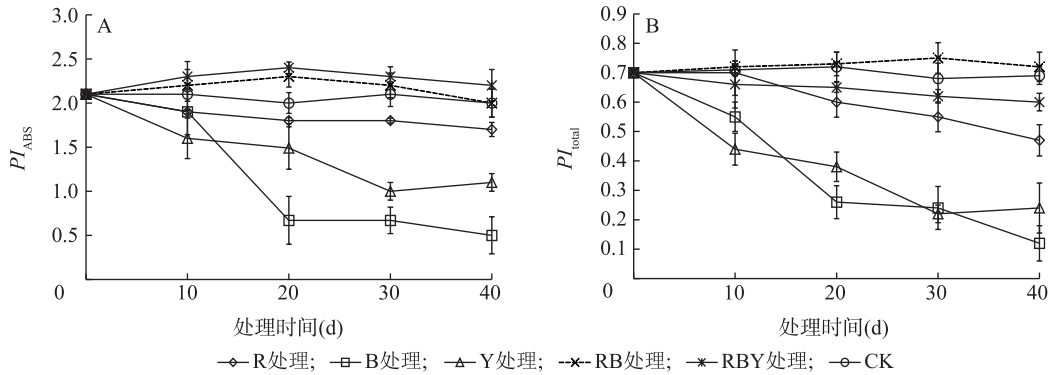
Ψ_0 反映了反应中心捕获的光能用来推动电子向 Q_A 下游电子传递的量子产额。RBY 处理的 Ψ_0 在整个处理过程中呈上升趋势, 并显著高于其他处理;RB 处理和 CK 的 Ψ_0 在整个过程中变化不显著, 且处理间无显著差异;R 处理的 Ψ_0 在整个过程中呈下降趋势, 且显著低于 CK;B 处理和 Y 处理的 Ψ_0 随着处理时间的延长不断下降, 且显著低于其他处理。

φ_{D_0} 为用于耗散的量子产额, 处理 20 d 前, R 处理的 φ_{D_0} 无显著变化, 与 CK 无显著差异, 随后 φ_{D_0} 逐渐升高, 在处理 40 d 时升高 17%。整个处理过程中 Y 处理的 φ_{D_0} 变化平缓, 在 40 d 时, 下降 20%。B 处理、RB 处理和 RBY 处理间 φ_{D_0} 变化无显著差异, 均在处理 10 d 时显著降低, 随后降低幅度不随处理时间的延长而显著变化。说明红光处理 20 d 后, 石斛叶片用于耗散的量子产额在不断增加。

2.3.3 不同光质对 PI_{ABS} 、 PI_{total} 的影响 PI_{ABS} 和 PI_{total} 分别代表以吸收光能为基础的性能参数以及包括 PS I 和 PS II 在内的综合性能参数。图 4A 显示, RBY 处理在整个过程中 PI_{ABS} 略有上升, 并显著高于 CK;RB 处理在处理 20 d 后有所上升并与 RBY 处理无显著差异, 而在处理 20~40 d 呈下降趋势, 显著低于 RBY 处理, 与 CK 无显著差异;R 处理的 PI_{ABS} 随着处理时间的延长有所降低, 并显著低于 CK;Y 处理在处理 20 d 后, PI_{ABS} 开始显著下降, 降幅 35%;B 处理的 PI_{ABS} 在处理 10 d 后开始显著下降, 降幅达 80%。图 4B 显示, RB 处理的 PI_{total} 和 CK 无显著差异;RBY 处理在处理 30 d 后, PI_{total} 与 CK 无

显著差异,处理后 40 d 时显著低于对照;R 处理的 PI_{total} 在处理 10 d 后不断下降,而 B 处理和 Y 处理的

PI_{total} 则在整个处理过程中急剧下降,降幅分别达到 82% 和 66%,显著低于其他处理。



R、B、Y、RB、RBY、CK 分别表示红光、蓝光、黄光、红蓝组合光、红蓝黄组合光、荧光对照组。

图 4 不同光质对铁皮石斛叶绿素荧光参数 PI_{ABS} 、 PI_{total} 的影响

Fig.4 Effects of different light qualities on chlorophyll fluorescence parameters PI_{ABS} and PI_{total} of *D. officinale*

3 讨论

光质对铁皮石斛的生长发育和多糖含量具有重要影响。试验中,红蓝两色组合光处理的植株鲜质量显著低于荧光灯对照,但植株干质量却显著高于荧光灯对照,说明在鲜质量增加相同的情况下,红蓝组合光处理比荧光灯对照更有利于铁皮石斛植株干物质的积累;红蓝黄三色组合光处理的植株鲜质量和干质量均显著大于红蓝两色组合光。这与前人对铁皮石斛和莼苣的研究结果^[5,10,23]均表明红蓝组合光有利于植株干物质的积累的结论有相似之处,也有不同之处。根据叶绿素含量和叶绿素荧光参数分析结果认为,2 个组合光处理,对光能转化有重要作用的叶绿素 a 含量在处理过程中显著高于其他单色光 and 对照,叶片 PS II 反应中心从光能的吸收、转化、传递、分配和耗散整个过程都显著优于其他处理。因此认为组合光是通过增强对光能的利用来促进植株干物质的积累。此外,在处理 20~30 d 2 个组合光间的差异表现最大,其中红蓝黄三色组合光的叶绿素 a 含量、 φ_{E_0} 和 Ψ_0 值显著高于红蓝两色光处理,说明红蓝黄组合光在植株光能转化、电子传递以及 Q_A 下游电子传递等方面具有优势,而电子传递量越大越有利于植株干物质的积累。

光质对铁皮石斛株高的影响与其他研究结果相似,蓝光处理显著抑制了植株的伸长生长。但不同光质对植株茎粗的影响较小,认为铁皮石斛本身增粗生长缓慢,还需延长处理时间来观察。

红蓝黄三色组合光和单色红光两个处理的多糖含量高,并且显著高于红蓝两色组合光以及单色蓝光和黄光处理。这与王红星等^[31]发现的黄光有利于芦荟多糖积累的结果不同。试验中,红光处理的多糖含量显著高于其他处理,与高亭亭等^[6]对铁皮石斛组培苗的研究结果有相似之处,她认为单色红光比单色蓝光、黄光和绿光更有利于提高铁皮石斛组培苗的多糖含量。因此,不同植物多糖的积累会受不同光质的影响,对于铁皮石斛盆栽苗,本试验认为红蓝黄组合光和单色红光有利于多糖的积累。其中红光处理在处理 20 d 时,植株叶绿素含量、 φ_{P_0} 、 φ_{E_0} 、 Ψ_0 、 PI_{ABS} 和 PI_{total} 值均与 2 个组合光处理无显著差异,说明植株生长状态是良好的,认为铁皮石斛在短期(20 d 左右)红光照射下,可以显著提高其多糖含量,但随着处理时间的延长,上述各项指标会明显下降,从而影响植株干物质的积累和正常生长。

叶绿素作为高等植物的光合色素,对植物光合作用具有重要作用。试验中,光质主要影响铁皮石斛叶绿素 a 的含量,红光处理的铁皮石斛叶绿素 a 含量显著高于蓝光和黄光处理,这与对草莓^[32]和番茄^[9]的研究结果相符,也与叶绿素 a 的光吸收波峰在 660 nm 的情况符合,红色光的波长更接近 660 nm。从整体看,叶绿素 a 含量与叶绿素荧光参数的变化具有一定的相关性,其中 F_0 、 W_k 、 V_J 、 M_0 和 φ_{D_0} 几个参数的值越低,而 φ_{P_0} 、 φ_{E_0} 、 Ψ_0 、 PI_{ABS} 、 PI_{total} 几个参数的值越高,叶绿素 a 含量越大。此外,从蓝光到红

光,随着处理光源波长的增长,铁皮石斛叶片的各项叶绿素荧光参数有逐步变好的趋势,认为长波长的光比短波长的光更适合铁皮石斛植株的生长。

综上所述,不同光质处理是通过调节植物对光能的吸收、转化与利用的众多环节来影响铁皮石斛生长的,其中单色红光在短期(20 d左右)可以有效促进多糖累积,红蓝黄组合光则更有利于铁皮石斛盆栽苗的生长、干物质积累和多糖的积累。

参考文献:

- [1] 王兴翠,曹逼力. 光质对生姜试管苗生长及微型姜诱导的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(7): 142-146.
- [2] 李军营,徐超华,崔明昆,等. 不同光质对烟草叶片生长及叶绿素荧光参数的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(11): 140-145.
- [3] ENRIQUE L J, PAUL F D. Light and the control of plant growth[J]. Plant Cell Monogr,2008,10:224-264.
- [4] 廖祥儒,张蕾,徐景. 光在植物生长发育中的作用[J]. 河北大学学报:自然科学版,2001,21(3):341-346.
- [5] 尚文倩,王政,侯甲男,等. 不同红蓝光质比LED光源对铁皮石斛试管苗生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(5):155-160.
- [6] 高亭亭,斯金平,朱玉球,等. 光质与种质对铁皮石斛种苗生长和有效成分的影响[J]. 中国中药杂志,2012,37(2):198-202.
- [7] TENNESSEN D J, SINGSAAS E L, SHARKEY T D. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research[J]. Photosynthesis Research,1994,39:85-92.
- [8] 魏胜林,王家保,李春保. 蓝光和红光对菊花生长和开花的影响[J]. 园艺学报,1998,25(2):203-204.
- [9] 蒲高斌,刘世琦,刘磊,等. 不同光质对番茄幼苗生长和生理特性的影响[J]. 园艺学报,2005,32(3):420-425.
- [10] 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,2011,38(4):761-769.
- [11] OKAMOTO K, YANAGI T, KONDO S. Growth and morphogenesis of lettuce seedlings raised under different combinations of red and blue light[J]. Acta Horticulturae,1997,435:149-157.
- [12] BULA R J, MORROW R C, TIBBITS T W, et al. Light-emitting diodes as a radiation source for plants[J]. Hortscience,1991,26(2):203-205.
- [13] TRIPATHY B C, BROWN C S. Root-shoot interaction in the greening of wheat seedlings grown under red light[J]. Plant Physiology,1995,107(2):407-411.
- [14] YANAGI T, OKAMOTO K. Utilization of super-bright light emitting diodes as an artificial light source for plant growth[J]. Acta Horticulturae,1997,418:223-228.
- [15] HUNTER D C, BURRITT D J. Light quality influences adventitious shoot production from cotyledon explants of lettuce[J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant,2004,40(2):215-220.
- [16] 杨雅婷,程瑞峰,杨其长,等. LED光源不同R/B处理对甘薯组培苗品质及节能效果的影响[J]. 中国农业气象,2010,31(4):546-550.
- [17] NHUT D T, TAKAMURA T, WATANABE H, et al. Efficiency of a novel culture system by using light-emitting diode (LED) on in vitro and subsequent growth of micropropagated banana plantlets[J]. Acta Horticulture,2003,6:121-127.
- [18] 刘晓英,徐志刚,常涛涛,等. 不同光质LED弱光对樱桃番茄植株形态和光合性能的影响[J]. 西北植物学报,2010,30(4):725-732.
- [19] 王虹,姜玉萍,师恺,等. 光质对黄瓜叶片衰老与抗氧化酶系统的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(3):529-534.
- [20] 陈娟,刘世琦,孟凡鲁,等. 不同光质对韭菜营养品质的影响[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2012,43(3):361-366.
- [21] TANAKA M, TAKAMURA T, WATANABE H, et al. In vitro growth of Cymbidium plantlets cultured under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs)[J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology,1998,73(1):39-44.
- [22] NHUT D T, TAKAMURA T, WATANABE H. Artificial lighting source using light-emitting-diodes (LEDs) in the efficient micro-propagation of Spathiphyllum plantlets[J]. Acta Horticulture,2005,692:137-142.
- [23] 鲍顺淑. 密闭式植物工厂中药用铁皮石斛组培生产的适宜光照环境[D]. 北京:中国农业大学,2007.
- [24] 杨德志,阳德华,陈超,等. 植物激素对紫花苜蓿生长速度和干鲜比的影响[J]. 山地农业生物学报,2012,31(4):329-332.
- [25] 栾洁,辛甜,储智勇,等. 不同来源铁皮石斛多糖,微量元素及氨基酸含量分析[J]. 时珍国医国药,2014,25(7):1728-1729.
- [26] 李合生,孙群,赵世杰,等. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [27] 杨鑫,张启超,孙淑云,等. 水深对苦草生长及叶片PS II光化学特性的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(6):1623-1631.
- [28] 李鹏民,高辉远,RETO J S. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J]. 植物生理与分子生物学报,2005,31(6):559-566.
- [29] 张子山,张立涛,高辉远,等. 不同光强与低温交叉胁迫下黄瓜PSI与PSII的光抑制研究[J]. 中国农业科学,2009,42(12):4288-4293.
- [30] 张丽颖,冯新新,高晶晶,等. 根际浇灌ALA溶液对苹果叶片生理特性与果实品质的影响[J]. 江苏农业学报,2015,31(1):158-165.
- [31] 王红星,王进,李景元. 光质对库拉索芦荟生物活性物质的影响[J]. 北方园艺,2009(12):56-58.
- [32] 刘庆,连海峰,刘世琦,等. 不同光质LED光源对草莓光合特性及产量与品质的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(6):1-10.

(责任编辑:陈海霞)