

LED 补光组合对大棚越橘生长发育的影响

王佳淇, 何莹钰, 韦晓桐, 李永强, 杨 莉, 陈文荣, 廖芳蕾*, 郭卫东*

(浙江师范大学化学与生命科学学院, 浙江省特色经济植物生物技术研究重点实验室, 浙江金华 321000)

摘要: 以 2 年生南高丛越橘 ‘Emerald’ 为材料, 以大棚内自然光作为对照, 研究 LED 光源的红蓝光 (3:1 和 6:1)、紫外光 (UVA) 对植株长势、叶片光合作用、碳氮代谢、开花基因表达及开花率、果实品质的影响。结果表明: 红蓝光组合处理下 ‘Emerald’ 的植株营养生长较旺盛, 株高、1 年生枝条长度和粗度显著高于对照。此外, 红蓝光 (6:1) 处理下叶片的叶绿素相对含量、比叶重和净光合速率均显著提高。红蓝光组合也可诱导植株开花, 开花基因 *FT* 表达量和开花率明显高于对照。紫外光下叶片的氮含量、开花率及 *FT* 基因表达量显著高于对照。不同光质组合补光对 ‘Emerald’ 的果实品质有显著影响, 红蓝光 (3:1) 处理下果实的质量、横纵径、可溶性固形物、可溶性糖、花青素含量和糖酸比均高于对照。总之, 不同光质补光会促进越橘 ‘Emerald’ 的生长发育, 红蓝光 6:1 组合对促进营养生长作用相对较大, 红蓝光 3:1 组合对提高果实品质效果较好。紫外光虽能改变植株形态和促进开花, 但果实品质提高效果较红蓝光处理稍弱。

关键词: 越橘; LED 补光组合; 生长势; 光合作用; 开花率; 果实品质

中图分类号: S 663.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0513-353X (2020) 06-1183-11

Effects of LED Supplemental Light on the Growth and Development of Blueberry in Greenhouse

WANG Jiaqi, HE Yingyu, WEI Xiaotong, LI Yongqiang, YANG Li, CHEN Wenrong, LIAO Fanglei*, and GUO Weidong*

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Biotechnology on Specialty Economic Plants, College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321000, China)

Abstract: The two-year-old southern highbush blueberry cultivar ‘Emerald’ were used to study the effect of LED supplemental light in greenhouse. Selecting the natural light as the control, we evaluated the plant growth situation, photosynthesis, carbon and nitrogen metabolism, the expression of flowering control genes, flowering rate and fruit quality under LED supplemental light of the red/blue light (3:1 and 6:1), ultraviolet A (UVA). The results showed the red/blue light treatment was beneficial for the vigorous vegetative growth of ‘Emerald’, which could increase the plant height, the length and diameter of annual branches. Meanwhile, the leaf chlorophyll relative content, specific leaf weight and net photosynthetic rate were significantly improved by red/blue (6:1) treatment. In addition, the expression of flowering gene *FT* and flowering rate were remarkably higher than those of the control, indicating the red/blue light induced

收稿日期: 2019-12-11; **修回日期:** 2020-03-05

基金项目: 浙江省科技厅公益性项目 (2016C32010); 浙江省科技厅重点研发计划项目 (2018C2007); 金华市科技计划重点项目 (2016-2-002); 浙江省农业新品种选育重大科技专项 (2016C02052-9)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: fangleiliao@zjnu.cn, gwd@zjnu.cn)

flowering earlier. The nitrogen contents of leaves, the flowering rate and the expression of *FT* gene under UVA light were higher than those of the control. Moreover, the red/blue (3:1) treatment raised the fruit quality of 'Emerald', characterized by a heavier fruit weight, the increase in the transverse and longitudinal diameter, the content of soluble solids, soluble sugar, anthocyanin and the sugar acid ratio. In summary, the application of different LED supplemental light can promote the growth and development of the blueberry 'Emerald', because the red/blue(6:1) treatment works better on the vegetative growth while the red/blue (3:1) treatment improves because the fruit quality. Although the UVA treatment can change plant morphology and accelerate flowering, its effect on fruit quality was slightly weaker than that of the red/blue light treatment.

Keywords: *Vaccinium corymbosum*; LED complementary light combination; growth potential; photosynthesis; flowering rate; fruit quality

不同光质对植物的生长发育等有明显的调控作用 (Hernández & Kubota, 2015)。红光促进叶面积增大、植株增高和碳水化合物的积累 (Kasperbauer et al., 2010); 蓝光促进叶片伸展和侧枝形成, 抑制茎的伸长 (Lin, 2005; 郑洁 等, 2008)。紫外光诱导生物合成途径, 使次生代谢产物发生变化 (Hofmann et al., 2000)。温室葡萄补充红蓝光后茎粗显著增加, 而补充蓝紫外光后叶面积显著减小 (孔云 等, 2006)。花芽分化是植物生长发育的重要阶段, 叶片的碳氮含量在分化过程中发生显著变化 (周强 等, 2017)。光质主要是通过影响光合产物的积累来影响花芽分化, 并与光敏色素基因紧密关联 (田云和薛玉梅, 2008)。照射红蓝混合光能调节仙客来的花期, 增加花芽数量, 而单独照射红光或蓝光则会减弱成花反应 (Heo et al., 2003)。花芽分化和花期诱导受多种基因调控, 其中 *FT* (*Flowering locus T*) 在成花途径中起重要作用, *FT* 的转录产物由叶片运输到茎尖分生组织, 促进花芽形成, 从而提早花期 (Srikanth & Schmid, 2011)。

南高丛越橘 (*Vaccinium corymbosum*) 是喜光果树, 适宜栽植在阳光充足、无树荫遮盖的地方 (郑云, 2012)。南高丛越橘 'Emerald' 虽具有茎干粗壮, 花芽量多, 花期早, 果实品质好, 需冷量低, 抗病性强等优良性状 (Lyrene, 2008), 但在设施内光线弱和光谱差等情况下会导致植株生长不良或发育异常 (何俊涛, 2011; 董克锋 等, 2016)。发光二极管 (Light-emitting diode, LED) 作为一种新型光源, 能精确调控光谱能量分布 (Xu et al., 2017), 十分适合于设施栽培补光 (Trouwborst et al., 2010)。越橘的设施栽培以有色棚膜居多, LED 补光在设施越橘上的应用鲜有研究。本试验中通过研究 LED 补光对 'Emerald' 越橘的长势、叶片生理生化特性、开花过程和果实品质的影响, 以期越橘补光生产应用及高效栽培提供新思路。

1 材料与amp;方法

1.1 试材及处理

试验于 2018 年 5 月至 2019 年 7 月在浙江省金华市婺城区浙江师范大学的大棚内进行。大棚棚膜主要遮挡透射光谱中的紫外光 (280 ~ 400 nm; 图 1, A)。2018 年 9 月的晴天大棚内日均光强为 $220 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 光周期与大棚外同步, 大棚棚膜透光率为 83%。

试验材料为南高丛越橘 'Emerald'。统一以椰糠为栽培基质, 定植在控根容器中, 采用喷灌浇水, 定期施加有机肥和复合肥。共有 4 个处理: 2 种不同配比的红 (R) 蓝 (B) 光质 (3:1 和 6:1)、

紫外光 (UVA) 和对照 (大棚内自然光), 每个处理选取 12 株长势良好的越橘树, 分 3 个重复, 每个重复 4 株, 每株枝头顶端 20 cm 处安装 3 支 LED 灯管。

LED 灯源由浙江师范大学数理与信息工程学院设计制造, 功率为 25 W, 红蓝光质及紫外光相对光谱分布如图 (1) 所示。红蓝光和紫外光处理于 2018 年 5 月底开始, 每日 8: 30—11: 30 和 14: 00—17: 00 补光。每株越橘光源通过照度计测量调整, R : B = 3 : 1 的补光照度为 $3.4 \pm 0.2 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, R : B = 6 : 1 的补光照度为 $4.0 \pm 0.2 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 紫外光补光照度为 $1.2 \pm 0.2 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 灯管随植株生长状态而调整。

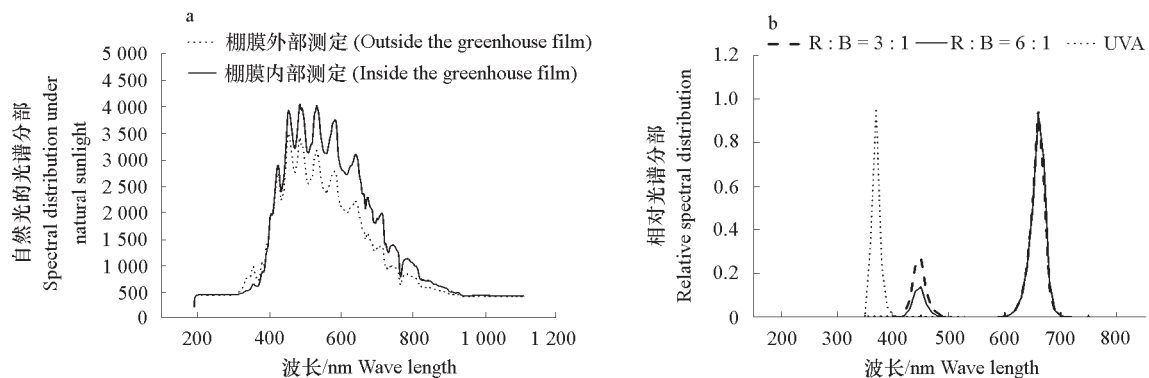


图 1 光环境与 LED 光源

a: 棚膜内、外光谱图; b: 不同补光组合的光谱图。R: 红光; B: 蓝光; UVA: 紫外光。

Fig. 1 Illumination environment and LED source

a: Spectrum inside and outside the greenhouse film; b: Spectrum of different supplemental light. R: Red light; B: Blue light; UVA: Ultraviolet A.

1.2 越橘植株生长、生理相关指标测定

2018 年 6 月初每处理标记 5 个长势均匀的未停长新梢 (1 年生枝条), 两个月后分别用直尺和游标卡尺测量新梢长度和基部粗度, 用卷尺测量每株越橘的株高、冠幅、新梢长度和节间长。在 2018 年 7 月的晴朗天气, 用 LI-6800 (LI-COR Inc. USA) 便携式光合仪测定各处理叶片的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i), 每个处理选 8 株, 每株重复测定 5 次。在 2018 年 7 月采集越橘叶片, 取每株从上往下数的第 4 片功能叶, 立即放入冰盒带回实验室。利用 CI-203 激光叶面积测定仪 (CID Inc. USA) 测量叶面积后, 放入 85°C 烘箱烘干, 称其干叶质量, 计算比叶重。将干叶放入研磨机中磨成粉末, 用蒽酮-硫酸比色法 (徐美蓉 等, 2017) 测定叶片中的可溶性糖和淀粉含量, 用纳什比色法 (李朝英 等, 2014) 测定叶片中总氮含量。碳氮比计算为可溶性糖与淀粉含量之和与氮含量的比值。选取 9 月份叶片, 用 SPAD-502Plus 型叶绿素仪测定 SPAD 值, 每片叶选取 3 个测量点, 记录平均值。

1.3 越橘开花基因的表达分析

在 2018 年 10 月采集越橘花芽, 每个处理中选取 12 枝生长状况具有代表性的新梢, 采集新梢枝条顶端 5 个花芽, 立即用液氮固定, 随后放入 -80°C 冰箱中保存。用 CTAB - KAc 法提取 RNA, 反转录成 cDNA 进行 qPCR。在 NCBI 中找到 *FT* 基因的序列, 在越橘基因库中 Blast 出相似度最高的基因序列, 采用 Primer 5.0 设计特异性引物序列 (序列号: CUFF.18244.1; 上游引物序列: GGACCTTCTACACTCTGGTTATG; 下游引物序列: TCCTGTGGTTGCTGGAATATC), 由上海擎科生物科技有限公司合成, 以 *GAPDH* 为内参基因。采用 $2^{-\Delta\Delta\text{CT}}$ 法 (Livak & Schmittgen, 2001) 进行数据的相对定量分析。

1.4 越橘开花数量的统计和果实品质的测定

2019年3月,在每个处理中取36个开花枝条标记,对开花数量进行统计。花瓣裂开露出柱头为花开放,开花率(%) = 开放花数量/花总数量×100。

2019年6月采摘成熟的越橘果实,每个处理取20个果实,用电子天平测定单果质量,用游标卡尺测定果实横、纵径,用手持式水果硬度计测定果实硬度,用阿贝折射仪测定可溶性固形物含量,用NaOH滴定法(陈屏昭等,2013)测定总酸含量,用蒽酮—硫酸比色法(徐美蓉等,2017)测定总糖含量,用pH试差法(陈安平等,2016)测定花青素含量。

2 结果与分析

2.1 不同补光组合对越橘植株形态的影响

如图2所示,‘Emerald’越橘在红蓝光下株高显著高于对照,其中,红蓝光6:1组合下生长最

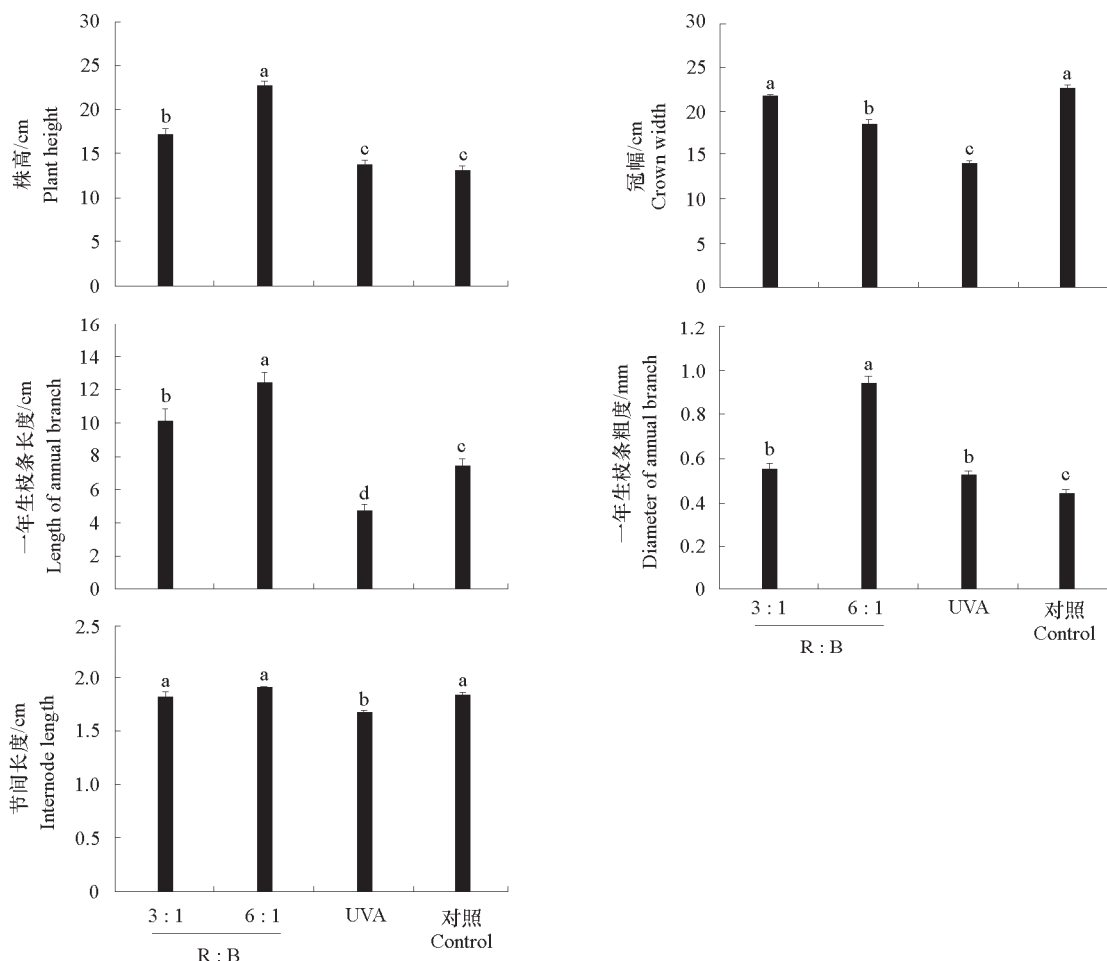


图2 不同光质补光组合下越橘‘Emerald’的植株形态指标

a, b, c 分别表示 0.05 水平下的差异显著。下同。

Fig. 2 Morphological indexes of the blueberry ‘Emerald’ under different supplemental light

a, b, c indicate significant difference under 0.05 level, The same below.

快, 红蓝光 3:1 组合次之; 冠幅在红蓝光 6:1 组合和紫外光下增长速度低于对照, 且紫外光下冠幅增长速度最慢; 红蓝光下可显著加快枝条伸长和变粗, 而紫外光下枝条伸长速度显著变慢; 在补光 3 个月后, 紫外光下节间长最短。由此说明, 红蓝光可显著促进植株增高和新梢生长 (长度增加、基部粗度增加), 而紫外光会抑制枝条生长, 减小冠幅, 缩短节间。

2.2 不同补光组合对越橘叶片比叶重和叶绿素的影响

比叶重 (Specific leaf weight, SLW) 一般作为衡量光合作用和叶片结构的生理指标。SPAD (Soil and plant analyzer development) 值代表叶片的叶绿素相对含量, 一般与叶绿素总含量呈显著相关, 叶绿素的高低可直接影响光物质的积累。由图 3 可得, ‘Emerald’ 越橘的比叶重在红蓝光 6:1 组合下明显高于对照。SPAD 值在 3 种补光处理下均高于对照, 红蓝光 6:1 组合下最高, 红蓝光 3:1 组合和 UVA 处理次之。

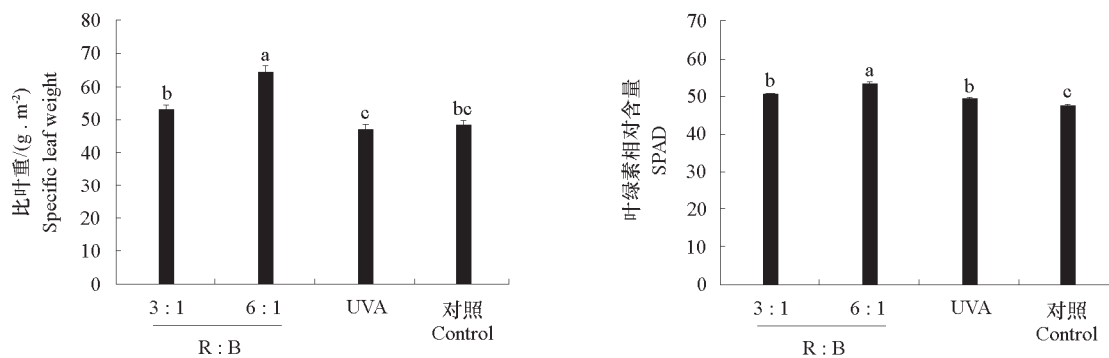


图 3 不同补光组合下 ‘Emerald’ 越橘叶片的比叶重和叶绿素含量
Fig. 3 Specific leaf weight and chlorophyll relative content of leaves of the blueberry ‘Emerald’ under different supplemental light

2.3 不同补光组合对越橘叶片光合作用的影响

光合作用是物质积累和能量转化的过程, 气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r) 会间接影响叶片的净光合速率 (P_n)。由图 4 可知, 红蓝光下叶片的净光合速率均显著高于对照, 此外, 红蓝光 3:1 组合下气孔导度也显著高于对照; 而紫外光下的气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率均显著低于对照。因此可得, 红蓝光处理能促进 ‘Emerald’ 越橘叶片的光合作用, 且红蓝光 6:1 组合下的处理效果更加明显。

2.4 不同补光组合对越橘叶片代谢的影响

碳氮比能反映植物叶片碳氮代谢的相对强弱, 对调节植物生长有重要作用。由图 5 可知, 红蓝光 3:1 组合和紫外光处理显著提高叶片的可溶性糖含量; 红蓝光 6:1 组合处理能明显提高淀粉含量; 紫外光处理则能提高氮含量; 红蓝光 3:1 组合处理下碳氮比达到最大值。可得出, 红蓝补光明显能提高 ‘Emerald’ 越橘叶片的碳水化合物积累, 而紫外补光可显著促进氮的积累。总之, 补光均能增强叶片碳氮代谢能力。

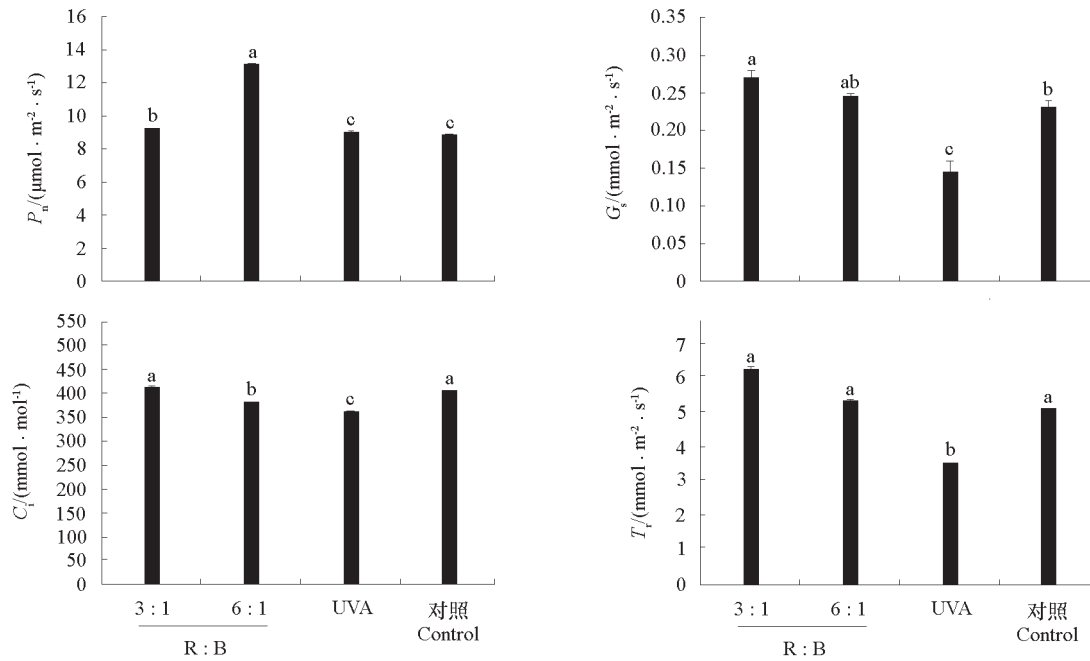


图4 不同补光组合下越橘‘Emerald’叶片的光合作用

Fig. 4 Photosynthesis of the leaves of the blueberry ‘Emerald’ under different supplemental light

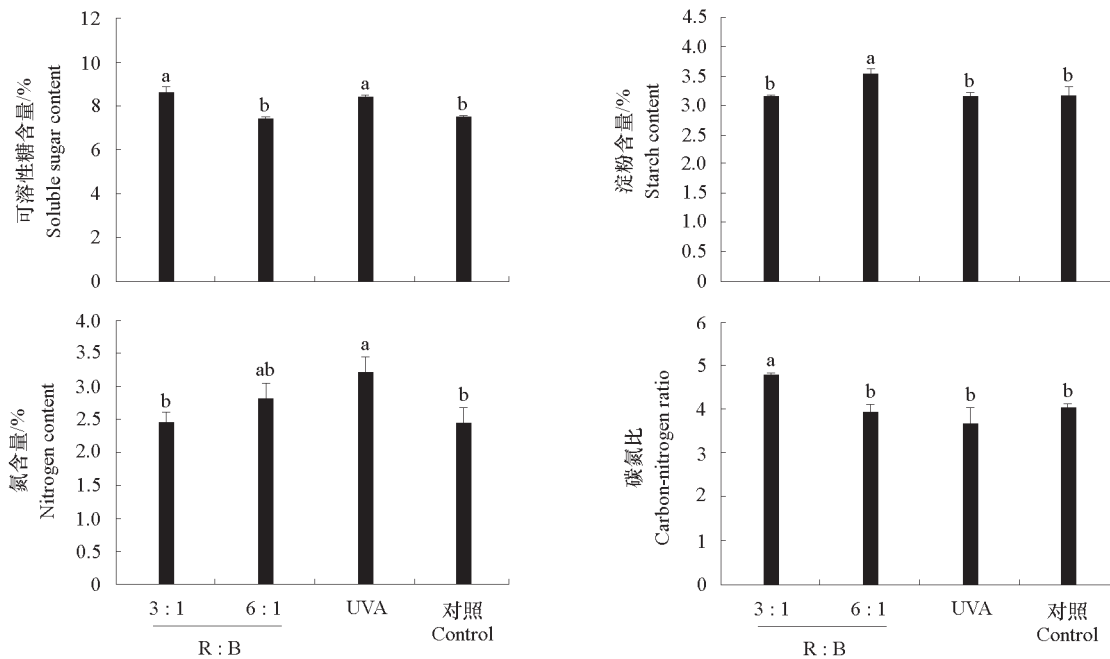


图5 不同补光组合下越橘‘Emerald’叶片的碳氮代谢情况

Fig. 5 Carbon and nitrogen metabolism of leaves of the blueberry ‘Emerald’ under different supplemental light

2.5 不同补光组合对开花基因表达量及开花率的影响

叶片感受光照的变化而激活 *FT* 基因，通过信号传递，使 *FT* 蛋白表达，从而促进植物开花。从

‘Emerald’ 越橘花芽的开花基因 *FT* 表达量 (图 6) 来看, *FT* 在补光条件下都显著上调, 在红蓝光组合处理下显著高于对照。统计 3 月的开花率, 红蓝光补光处理均显著高于对照 (图 6, 图 7)。红蓝光 3:1 和 6:1 组合处理间差异不显著, 紫外光处理在 3 月 20 日与对照差异不显著。

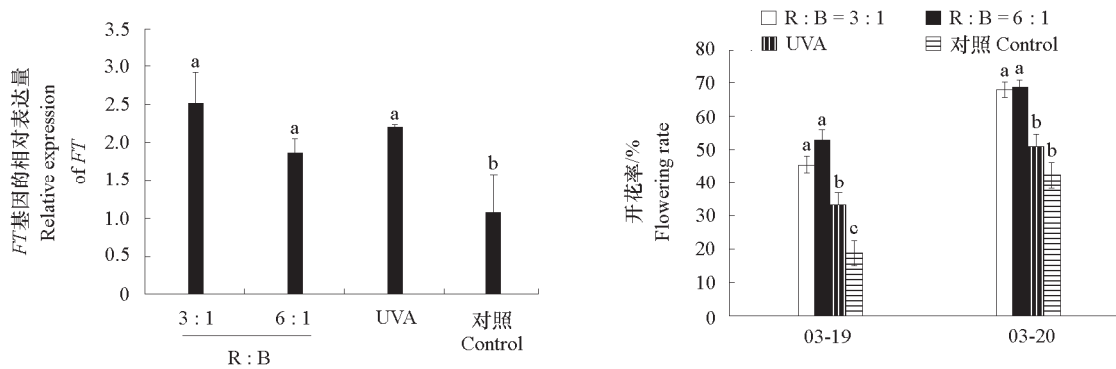


图 6 不同补光组合下越橘 ‘Emerald’ 开花基因相对表达量及开花率

Fig. 6 Relative expression of flowering gene and flowering rate of the blueberry ‘Emerald’ under different supplemental light

2.6 不同补光组合对越橘果实外在品质的影响

由表 1 可知, 与对照相比, 红蓝光 3:1 组合和紫外光下 ‘Emerald’ 越橘的单果质量和横、纵径显著增加, 而红蓝光 6:1 组合的果形指数显著降低, 果实硬度无显著性变化。由此可得, 不同光质组合补光会影响越橘果实大小和形状, 在红蓝光 6:1 组合处理下 ‘Emerald’ 的果实形状更趋向于扁圆形 (图 7)。

表 1 不同补光组合对越橘 ‘Emerald’ 果实外在品质的影响

Table 1 Effect of different supplemental light on fruit external quality of the blueberry ‘Emerald’

补光组合 Complementary light	单果质量/g Single fruit weight	横径/mm Transverse diameter	纵径/mm Longitudinal diameter	果形指数 Fruit shape index	硬度/(N·cm ⁻²) Fruit firmness
R : B = 3:1	2.64 ± 0.08 a	17.49 ± 0.38 a	13.33 ± 0.20 a	0.76 ± 0.02 ab	5.02 ± 0.28 a
R : B = 6:1	2.28 ± 0.07 b	17.01 ± 0.09 a	12.04 ± 0.30 b	0.71 ± 0.02 b	5.19 ± 0.25 a
UVA	2.64 ± 0.05 a	17.03 ± 0.01 a	13.52 ± 0.32 a	0.79 ± 0.02 a	4.78 ± 0.40 a
对照 Control	2.27 ± 0.05 b	15.39 ± 0.39 b	12.35 ± 0.33 b	0.80 ± 0.02 a	4.69 ± 0.10 a

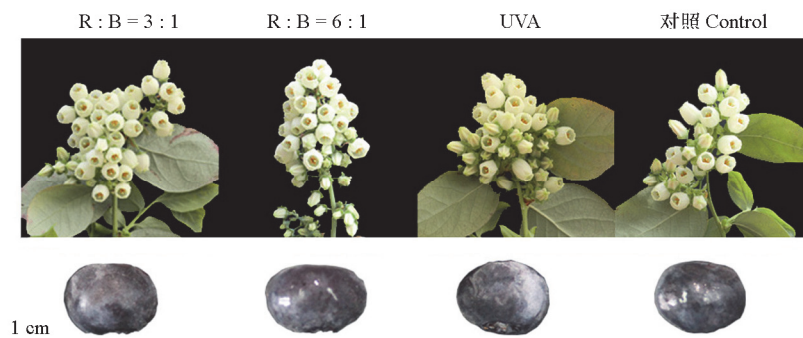


图 7 不同补光组合下越橘 ‘Emerald’ 的花和果实

Fig. 7 Flowers and fruits of the blueberry ‘Emerald’ under different supplemental light

2.7 不同补光组合对越橘果实内在品质的影响

可溶性糖、可滴定酸、花青素决定了越橘果实的风味口感和营养价值，由表 2 可知，补光对‘Emerald’果实糖酸比的提高有显著作用，此外，红蓝光 3:1 组合处理下的可溶性固形物、可溶性糖和花青素含量与对照相比明显增加、可滴定酸的含量明显降低。紫外光下仅可溶性固形物含量有所提高。因此，红蓝光 3:1 组合处理对提高果实内在品质作用最大。

表 2 不同补光组合对越橘‘Emerald’果实内在品质的影响
 Table 2 Effect of different supplemental light on fruit intrinsic quality of the blueberry ‘Emerald’

补光组合 Complementary light	可溶性固形物/% Soluble solids content	花青素/(mg·g ⁻¹) Anthocyanin	可溶性糖/(mg·g ⁻¹) Soluble sugar	可滴定酸/% Titratable acidity	糖酸比 Sugar acid ratio
R:B=3:1	10.57±0.27 a	0.60±0.04 a	78.62±0.31 a	0.67±0.02 b	11.75±0.3 b
R:B=6:1	9.47±0.20 bc	0.38±0.01 b	72.43±0.85 b	0.53±0.01 c	13.66±0.10 a
UVA	10.15±0.15 ab	0.46±0.03 b	70.48±0.60 b	0.76±0.03 a	9.51±0.23 c
对照 Control	8.87±0.03 c	0.37±0.01 b	71.33±0.79 b	0.82±0.02 a	8.72±0.07 d

3 讨论

不同光质处理能引起植物发生形态和生理变化，营养生长能直观反映植物生长 (Choi et al., 2009; 许大全 等, 2015)。在蓝莓补光研究中发现，红蓝光质对植株形态、开花特性以及果实品质等方面均有显著影响 (Cho et al., 2019)。而在葡萄中，蓝色和复合 LED 辐射能增加叶片的光合能力并改善了果实品质，而红色和复合 LED 辐射能增大果实质量 (Li et al., 2017)。本研究中，红蓝光 (6:1) 处理下‘Emerald’越橘的株高和枝条生长速度明显加快，冠幅增大速度变慢，植株呈直立的状态生长。紫外光下‘Emerald’越橘的枝条、节间及冠幅的生长均受到抑制，表明紫外光能使其株形更加紧凑，在一定程度上会达到矮化和防徒长效果。红蓝光 (3:1) 处理下‘Emerald’越橘的植株高大，枝条粗壮，且无矮化现象，植株长势最好。

氮是叶绿素的一种组成成分，在一定程度上光合作用强弱受叶绿素氮含量的影响 (崔菁菁 等, 2016)。红蓝光和紫外光对植物叶片的叶绿素合成、净光合速率、碳氮代谢及干物质积累均能产生较大影响 (Verdaguer et al., 2017; 唐道彬 等, 2017; Liu et al., 2018)。本研究中发现，补光处理能影响‘Emerald’越橘叶片的光合能力，其中红蓝光 (6:1) 处理下的 SPAD 值和比叶重最大，净光合速率最高，表明光合作用能力最强。红蓝光 (6:1) 处理下‘Emerald’越橘叶片可溶性糖和淀粉含量增加，且碳氮比最大，即碳氮代谢最活跃。一般情况下，叶片氮含量与光合速率存在显著正相关 (孙梅 等, 2017)。但是，本研究中紫外光下叶片的氮含量增加后光合速率并未增加，气孔导度反而显著降低。其原因可能是紫外光抑制了气孔张开，导致胞间 CO₂ 浓度降低，引起净光合速率下降，这也意味着叶片光合作用受气孔导度影响更大。因此大棚越橘补光栽培可采用红蓝光 (6:1) 来提高叶片的代谢能力，改善树体营养状况。

光环境影响花芽的形成 (Yanez et al., 2009)。蓝光比例增加后 FT 基因的表达水平明显上调，说明植物光受体在接受蓝光光质刺激后，通过信号传递，调控相关基因表达，从而影响植株的生长发育 (宋佳丽, 2016)。FT 蛋白也被证实作为开花素，促使花分生组织特异性基因的表达，而促进开花 (Lin et al., 2007)。本研究中发现，补光处理后 FT 基因的相对表达量远高于对照，尤以红蓝光 (3:1) 处理上调最为显著，且红蓝光处理下‘Emerald’越橘的开花数也有所增加，表明红蓝光

能调控开花基因的表达从而促进开花。不同光质可通过调控植株生长和物质代谢来改变果实品质 (Zoratti et al., 2014; 孙娜, 2015; 杨乐, 2015)。本研究中, 红蓝光 (3:1) 处理下 ‘Emerald’ 越橘的果实外在品质 (质量、横、纵径) 和内在品质 (可溶性固形物、可溶性糖、花青素含量和糖酸比) 均有明显提高, 因此可作为大棚优良栽培的最佳选择, 但此结果还需要延长处理时间及更多的重复来证实。此结果说明在大棚温室生长环境中, 补光装置的设计需要结合生产目的来进行。

综上所述, 不同光质组合补光使大棚越橘 ‘Emerald’ 的生长和发育有明显的变化, 红蓝光组合补光对植株生长影响范围较大, 包括植株长势、叶片光合、有机物积累和开花率。其中, 红蓝光 (3:1) 处理植株长势及叶片生理特性变化虽不及红蓝光 (6:1) 处理, 但在生殖生长阶段的开花状况和果实品质都有很大的提高。紫外光下能树体紧凑, 叶片活力提高, 开花基因上调表达。总之, 红蓝光 (3:1) 处理在 ‘Emerald’ 越橘的大棚生产应用中效果更佳, 可为后续补光试验提供理论基础。本研究虽筛选出影响 ‘Emerald’ 越橘生理和生殖的最佳补光光质, 但光质是如何通过调控植物体内物质合成和转运的机制尚待探索。

References

- Chen An-ping, Huang Yong-jun, Wang Sheng-feng. 2016. The determination of proanthocyanidins content in blueberry products on the market. *Food Research and Development*, (1): 170 - 173. (in Chinese)
- 陈安平, 黄勇军, 汪胜峰. 2016. 市售蓝莓类产品的原花青素含量测定. *食品研究与开发*, (1): 170 - 173.
- Chen Ping-zhao, Du Hong-bo, Qin Yan-fen, Yang Hong-gui, Li Cheng-shu, Mo Zheng-fen. 2013. Improvement and application of determination method for titratable acidity in fruit and vegetable production. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, (4): 451 - 453, 456. (in Chinese)
- 陈屏昭, 杜红波, 秦燕芬, 杨宏贵, 李成树, 莫正芬. 2013. 果蔬品含酸量测定方法的改进及其应用. *浙江农业科学*, (4): 451 - 453, 456.
- Cho H Y, Kadowaki M, Che J, Takahashi S, Horiuchi N, Ogiwara I. 2019. Influence of light quality on flowering characteristics, potential for year-round fruit production and fruit quality of blueberry in a plant factory. *Fruits*, 74 (1): 3 - 10.
- Choi I L, Won J H, Jung H J, Kang H M. 2009. Effect of red LED, blue LED and UVa light sources on coloration of paprika fruits. *Journal of Bio-Environment Control*, 18 (4): 431 - 435. (in Korean)
- Cui Jing-jing, Xu Ke-zhang, Wu Zhi-hai, Chen Zhan-yu, Zhang Zhi-an, Wu Chun-sheng. 2016. Changes of nitrogen content in leaf and its correlation with net photosynthetic rate of rice cultivars in different years. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 44 (7): 70 - 77. (in Chinese)
- 崔菁菁, 徐克章, 武志海, 陈展宇, 张治安, 吴春胜. 2016. 不同年代水稻品种叶片氮含量变化及其与净光合速率的关系. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 44 (7): 70 - 77.
- Dong Ke-feng, Yue Qing-hua, Gao Yong. 2016. Diagnostic technique for abnormal growth of blueberry in greenhouse. *Northern Horticulture*, (21): 209 - 210. (in Chinese)
- 董克锋, 岳清华, 高 勇. 2016. 设施栽培蓝莓生长异常诊断技术. *北方园艺*, (21): 209 - 210.
- He Jun-tao. 2011. Effects of loquat ‘Dawuxing’ growth, yield, quality and economic benefit in the plastic canopy cultivation [M. D. Dissertation]. Ya’an: Sichuan Agricultural University. (in Chinese)
- 何俊涛. 2011. 大棚栽培对 ‘大五星’ 枇杷生长发育、产量品质及经济效益的影响 [硕士论文]. 雅安: 四川农业大学.
- Heo J W, Lee C W, Murthy H N, Paek K Y. 2003. Influence of light quality and photoperiod on flowering of *Cyclamen persicum* Mill. cv. ‘Dixie White’. *Plant Growth Regulation*, 40 (1): 7 - 10.
- Hernández R, Kubota C. 2015. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environmental and Experimental Botany*, 29 (1): 66 - 74.
- Hofmann R W, Swinny E E, Bloor S J, Markham K R, Ryan K G, Campbell B D, Jordan B R, Fountain D W. 2000. Responses of nine *Trifolium repens* L. populations to ultraviolet-B radiation: differential flavonol glycoside accumulation and biomass production. *Annals of Botany (London)*, 86 (3): 527 - 537.

- Kasperbauer M J, Hunt P G, Sojka R E. 2010. Photosynthate partitioning and nodule formation in soybean plants that received red or far-red light at the end of the photosynthetic period. *Physiologia Plantarum*, 61 (4): 549 - 554.
- Kong Yun, Wang Shao-hui, Shen Hong-xiang, Ma Cheng-wei, Yao Yun-cong. 2006. Effects of supplemental lighting with different light quality on the shoot growth of grape growing in greenhouse. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 21 (3): 23 - 25. (in Chinese)
- 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*, 21 (3): 23 - 25.
- Li C X, Chang S X, Khalil-Ur-Rehman M, Xu Z G, Tao J M. 2017. Effect of irradiating the leaf abaxial surface with supplemental light-emitting diode lights on grape photosynthesis. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 23 (1): 58 - 65.
- Li Zhao-ying, Zheng Lu, Lu Li-hua, Li Li-li. 2014. Improvement in the H₂SO₄-H₂O₂ digestion method for determining plant total nitrogen. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 30 (6): 159 - 162. (in Chinese)
- 李朝英, 郑路, 卢立华, 李丽利. 2014. 测定植物全氮的 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法改进. *中国农学通报*, 30 (6): 159 - 162.
- Lin C. 2005. Plant blue-light receptors. *Planta*, 220 (3): 498 - 502.
- Lin M K, Belanger H, Lee Y J, Varkonyi-Gasic E, Taoka K I, Miura E, Xoconostle-Cázares B, Gendler K, Jorgensen R A, Phinney B, Lough T J, Lucas W J. 2007. FLOWERING LOCUS T protein may act as the long-distance florigenic signal in the cucurbits. *Plant Cell*, 19 (5): 1488 - 1506.
- Liu X Y, Jiao X L, Chang T T, Guo S R, Xu Z G. 2018. Photosynthesis and leaf development of cherry tomato seedlings under different LED-based blue and red photon flux ratios. *Photosynthetica*, 56 (4): 1212 - 1217.
- Livak K J, Schmittgen T D. 2001. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2^{-ΔΔCT} method. *Methods*, 25 (4): 402 - 408.
- Lyrene P M. 2008. 'Emerald' southern highbush blueberry. *Hortscience A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 43 (5): 1606 - 1607.
- Song Jia-li. 2016. RNA-Seq-transcriptome analysis of sex differentiation in cucumber seeding under different light quality[M. D. Dissertation]. Guangzhou: South China Agricultural University. (in Chinese)
- 宋佳丽. 2016. 光质调控黄瓜花性分化的转录组分析[硕士论文]. 广州: 华南农业大学.
- Srikanth A, Schmid M. 2011. Regulation of flowering time: all roads lead to Rome. *Cellular and Molecular Life Sciences (CMLS)*, 68 (12): 2013 - 2037.
- Sun Mei, Tian Kun, Zhang Yun, Wang Hang, Guan Dong-xu, Yue Hai-tao. 2017. Research on leaf functional traits and their environmental adaptation. *Plant Science Journal*, 35 (6): 940 - 949. (in Chinese)
- 孙梅, 田昆, 张贇, 王行, 管东旭, 岳海涛. 2017. 植物叶片功能性状及其环境适应研究. *植物科学学报*, 35 (6): 940 - 949.
- Sun Na. 2015. Effects of light quality on growth, physiological metabolism, fruit yield and quality of tomato[M. D. Dissertation]. Tai'an: Shandong Agricultural University. (in Chinese)
- 孙娜. 2015. 光质对番茄生长、生理代谢及果实产量品质的影响[硕士论文]. 泰安: 山东农业大学.
- Tang Dao-bin, Zhang Xiao-yong, Wang Ji-chun, Jiang Yu-chun, Jing Fu, Luo Yu-long, Bai Hui, Huang Ting-rong, Shu Jin-kang, Chen Yong-chun. 2017. Effect of different LED light qualities on the photosynthesis and tuberization of virus-free potato in hydroponic culture. *Acta Horticulturae Sinica*, 44 (4): 691 - 702. (in Chinese)
- 唐道彬, 张晓勇, 王季春, 蒋玉春, 敬夫, 罗玉龙, 白慧, 黄廷荣, 舒进康, 陈永春. 2017. 不同光质对水培脱毒马铃薯光合与结薯特性的影响. *园艺学报*, 44 (4): 691 - 702.
- Tian Yun, Xue Yu-mei. 2008. Analysis of influence factors and relations between buds differentiation and misshaped fruits of tomato. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 33 (3): 55 - 57. (in Chinese)
- 田云, 薛玉梅. 2008. 影响番茄花芽分化及产生畸形果的因素分析. *吉林农业科学*, 33 (3): 55 - 57.
- Trouwborst G, Oosterkamp J, Hogewoning S W, Harbinson J, Leperen W V. 2010. The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiologia Plantarum*, 38 (3): 289 - 300.
- Verdaguer D, Díaz-Guerra L, Font J, González J A, Llorens L. 2017. Contrasting seasonal morphological and physio-biochemical responses to UV radiation and reduced rainfall of two mature naturally growing Mediterranean shrubs in the context of climate change. *Environmental and*

- Experimental Botany, 147: 189 - 201.
- Xu Da-quan, Gao Wei, Ruan Jun. 2015. Effects of light quality on plant growth and development. *Plant Physiology Journal*, (8): 1217 - 1234. (in Chinese)
- 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*, (8): 1217 - 1234.
- Xu H, Fu Y N, Li T L, Wang R. 2017. Effects of different LED light wavelengths on the resistance of tomato against *Botrytis cinerea* and the corresponding physiological mechanisms. *Journal of Integrative Agriculture*, 16 (1): 106 - 114.
- Xu Mei-rong, Li Xiao-rong, Li Ting. 2017. Determination of soluble sugar from grape leaves by optimizing of anthrone-sulfuric acid method by response surface methodology. *Gansu Agricultural Science and Technology*, (11): 25 - 29. (in Chinese)
- 徐美蓉, 李晓蓉, 李 婷. 2017. 响应面分析优化蒽酮硫酸法测定葡萄叶片中可溶性糖的含量. *甘肃农业科技*, (11): 25 - 29.
- Yanez P, Retamales J B, Lobos G A, Pozo A D. 2009. Light environment within mature rabbiteye blueberry canopies influences flower bud formation. *Acta Horticulturae*, 810 (4): 471 - 473.
- Yang Le. 2015. The effect of ultraviolet irradiation treatment on the major quality of blueberry during different stages [M. D. Dissertation]. Beijing: Beijing Forestry University. (in Chinese)
- 杨 乐. 2015. 紫外辐照对不同发育时期蓝莓主要果实品质的影响 [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学.
- Zheng Jie, Hu Mei-jun, Guo Yan-ping. 2008. Regulation of photosynthesis by light quality and its mechanism in plants. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19 (7): 1619 - 1624. (in Chinese)
- 郑 洁, 胡美君, 郭延平. 2008. 光质对植物光合作用的调控及其机理. *应用生态学报*, 19 (7): 1619 - 1624.
- Zheng Yun. 2012. Characteristics and cultivation techniques of southern highbush blueberry. *Modern Agricultural Science and Technology*, (15): 74 - 75. (in Chinese)
- 郑 云. 2012. 南高丛蓝莓特征特性及栽培技术. *现代农业科技*, (15): 74 - 75.
- Zhou Qiang, Geng Jia-lin, Wang Yu-hang, Li Min, Wen Xin, Zhou Yan, Tang Xue-dong. 2017. Change of mineral nutrient content and C/N in blueberry leaves during flower-bud differentiation. *Journal of Northeast Agricultural University*, 48 (2): 37 - 45. (in Chinese)
- 周 强, 耿佳麒, 王宇航, 李 敏, 温 欣, 周 妍, 唐雪东. 2017. 越橘花芽分化期叶片矿质元素含量和 C/N 变化分析. *东北农业大学学报*, 48 (2): 37 - 45.
- Zoratti L, Sarala M, Carvalho E, Karppinen K, Martens S, Giongo L, Häggman H, Jaakola L. 2014. Monochromatic light increases anthocyanin content during fruit development in bilberry. *BMC Plant Biology*, 14 (1): 377.