

刘涛,程培蕾,赵坤坤,等. 蓝光处理对夏菊优香组培苗生长发育的影响及其分子机制[J]. 江苏农业科学,2022,50(12):150-156.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.12.024

蓝光处理对夏菊优香组培苗生长发育的影响及其分子机制

刘涛¹,程培蕾²,赵坤坤³,王丽君²,蒋甲福²

(1. 青岛西海岸农高科技服务有限公司,山东青岛 266400; 2. 南京农业大学,江苏南京 210000;

3. 浙江省农业科学院园艺研究所,浙江杭州 310021)

摘要:为研究蓝光对夏菊生长发育的影响,并探究光质影响菊花生长发育的分子机制,选用菊花优香 [*Chrysanthemum morflorum* (Ramat.) Kitam. 'Yuuka'] 为试验材料,应用植物组织培养技术,经蓝光照射组培苗后,对组培苗进行表型观察、叶绿素含量测定、石蜡切片制作及相关基因表达量分析,进而从表观、细胞、分子3个层面来观察蓝光照射对菊花的影响。结果表明,在组培苗生长前期,蓝光处理会抑制菊花根的发育,而在后期该抑制作用减弱;同时蓝光照射会使植株发生矮化,且叶片明显变小,但植株总叶片数并未改变。基于石蜡切片的结果显示,蓝光处理60 d后,植株较白光对照组,茎明显变细,根变粗,叶片中栅栏细胞明显变大;同时,在叶绿素含量方面,蓝光照射对叶绿素含量的影响并不明显;而在基因表达水平上,蓝光处理会使光敏色素基因 *CmPHYA*、*CmPHYB*、*CmPHYC* 和隐花色素基因 *CmCRY1*、*CmCRY2* 的表达量升高,使 *CmCRY1.2* 的表达量下降。另外,蓝光处理对开花调控基因 *CmCO* 的表达没有明显影响,但能诱导开花素基因 *CmFT1*、*CmFT2*、*CmFT3* 的表达。

关键词:菊花;蓝光;石蜡切片;开花基因

中图分类号:S682.1⁺10.4⁺3

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2022)12-0150-06

菊花(*Chrysanthemum morflorum*)原产于我国,多为短日照植物,秋季开花,因其观赏价值极高,深受人们的喜爱。作为世界四大切花之一,菊花的栽培生产遍布世界各地,且对其生长发育的研究也得到了人们的普遍重视。优香作为菊花品种之一,表现为光周期不敏感,因此夏季即可开花^[1],其较为独特的开花机制一直是人们研究的热点。已有研究表明,不同光质对植物生长发育所产生的影响是不同的,如红光相对于蓝光对葡萄的形态建成所起的作用更大^[2];而在蝴蝶兰组培苗方面的研究表明,不同光质对植物组培苗的生长发育也会产生不同的影响^[3]。当然,在光质影响菊花生长发育方面也有类似报道,如在菊花神马中的研究表明,白光和红光对菊花神马的生长更加有利^[4];Kim等研究表明,不同光质对菊花组培苗的光合速率及气孔数目有不同的影响^[5];Jeong等研究表明,补加蓝光对

菊花的净光合率及开花时间会产生影响^[6]。然而在以上报道中,虽涉及蓝光处理,但此类报道多集中在表型观察方面,并未深入研究,且试验普遍选用秋菊,对于光周期不敏感的夏菊,并不能完全参考。另外,为进一步探究光质影响植物生长发育的分子机制,研究者发现了光敏色素、隐花色素以及向光素的存在,而光敏色素、隐花色素已有研究证实,其参与了植物的开花调控路径^[7-8],且隐花色素作为一种蓝光受体,在光信号感知及信号传导过程中也起着重要作用^[9]。

本试验以夏菊优香为材料,为避免大田栽培过程中存在的环境差异,选用组培苗进行光照处理。通过表型观察、数据分析、石蜡切片制作及实时荧光定量PCR等技术手段,对蓝、白光处理后的差异进行比较分析,旨在探究蓝光处理对夏菊的影响机制,并希望借此对菊花的组培、栽培提供一定的帮助。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于2017年在南京农业大学菊花遗传育种实验室进行,材料夏菊[*C. morflorum* (Ramat.)

收稿日期:2021-07-28

基金项目:国家自然科学基金(编号:31872146)。

作者简介:刘涛(1993—),男,山东青岛人,硕士,农艺师,主要从事园艺作物组培、栽培、育种研究。E-mail:773018081@qq.com。

通信作者:蒋甲福,博士,教授,博士生导师,主要从事菊花遗传育种与分子生物学研究。E-mail:jiangjiafu@njau.edu.cn。

Kitam.]品种优香(Yuuka)取自南京农业大学菊花遗传及分子育种实验室,取材后经外植体消毒、植物组织培养等操作于组培瓶中培养,待组培苗长大后,取组培苗相同位点节间,转置新组培瓶中,每瓶放3株,置于组培室中进行光照处理。处理在LED(全白、全蓝)灯光下进行,处理时间维持2个月。处理过程中,组培室温度恒定为25℃,白光、蓝光光周期均为16 h/8 h,光强度均为 $38 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。处理结束后进行如下取样:叶绿素含量直接称取新鲜叶片0.2 g进行测定;石蜡切片制作取样根、茎、叶置于酒精醋酸福尔马林混合(FAA)固定液中固定,4℃冰箱保存;相关基因表达量测定取样根、茎、叶、生长点,并置于液氮中进行速冻,-80℃冰箱保存。

1.2 表型观察

光照处理过程中观察记录组培苗生根数、生根长度、植株高度并拍照;光照处理60 d取组培苗统计单株叶片数,随机选取组培苗5株,取每株最大叶片3张,进行测量计算并拍照。

1.3 石蜡切片制作

将FAA固定液中固定的根、茎、叶取出,经脱水、透明、渗蜡、包埋、切片等操作进行石蜡切片制作^[10],并使用番红固绿双重染色法和固绿快速染色法对切片进行染色,封片后,显微镜下观察各组织器官形态、大小。

1.4 叶绿素含量测定

取新鲜叶片0.2 g,加石英砂、碳酸钙进行研磨,

随后使用95%乙醇进行萃取,并用分光光度计测量665、649、490 nm 3个波长下的吸光度,通过计算,求得叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量。

1.5 荧光实时定量PCR

使用Trizol试剂盒(TaKaRa)进行总RNA的提取。取0.2 g左右根、茎、叶、生长点样品在液氮中研磨,加入2 mL Trizol后按说明书步骤操作。其中在第1次三氯甲烷抽提后使用DNase I消化基因组DNA。提取的RNA溶于20 μL 无酶无菌水中。使用两步法反转录试剂盒进行反转录得到cDNA。根据孙静克隆得到的*CmFT1*(GenBank: AB545936. 2)、*CmFT2*(GenBank: AB677317. 1)、*CmFT3*(GenBank: AB679272)^[11]设计定量引物(表1),根据夏菊优香转录组库序列分析(SRP029991),设计*CmPHYA*(AB733629)、*CmPHYB*(AB733630)、*CmPHYC*、*CmCRY1. 2*(KC202424)、*CmCRY1*、*CmCRY2*(KJ463737)、*CmCO*(JQ693394)的定量引物(表1)。使用菊花Elongation Factor 1 α (*CmEF1 α* , KF305681)进行cDNA第1链检测并作为内参对照,对比其他基因表达量的差异,内参引物为*CmEF1 α* -F和*CmEF1 α* -R。定量PCR仪使用Mastercycler ep realplex 2S(Eppendorf),程序为:95℃ 2 min;95℃ 15 s,55℃ 15 s,72℃ 20 s,40个循环。程序结束后得到每个样品的 C_T 值,假定扩增效率为100%,并假定标准曲线及每次扩增之间的效率保持一致,采用 $2^{-\Delta\Delta C_T}$ 法进行相对定量分析^[12]。

表1 菊花各基因荧光实时定量PCR引物

引物	序列(5'→3')
<i>CmPHYA</i>	F: GAACTGAACTGGGAGATGAGCA; R: CCAAATACCCGTCTACGATGC
<i>CmPHYB</i>	F: GTTCGGCATTCACCCTCG; R: CATGCTTAGTCTAAACCTTCCTC
<i>CmPHYC</i>	F: ATCTTCAGTTTCTTTCCGTGCCA; R: TCAGCGGTCAACGGGAGC
<i>CmCRY1</i>	F: AAGGCATCCGCAATCTCAC; R: ATATGGCATAGCAAACAACACTACAAG
<i>CmCRY1. 2</i>	F: TAGTTATTCAGAGCGTTTGTAGG; R: TCTTTCCAGTTACAAATCTGACCTA
<i>CmCRY2</i>	F: ATTGTGGTCTGAAGACTTACCTATAC; R: ACACAACTCATCATCTGTTTCCGTA
<i>CmCO</i>	F: TAGACCCGCAAAAAGGGACAA; R: CGAAACGACCTTTGATCCTTG
<i>CmFT1</i>	F: AATCGTGTGCTATGAGAGCC; R: GCTTGTAAAGTCTCTTCATGC
<i>CmFT2</i>	F: ATGTGTTATTCGGCAATTGGGTCG; R: AAATATGCATTTGTAACGTCATGTG
<i>CmFT3</i>	F: CTATGAGAGCCCAAGGCCATCAATG; R: TGATGTTCTGCTTTCAATATGTAT
<i>CmEF1α</i>	F: TTTTGGTATCTGGTCTCGAG; R: CCATTCAAGCGACAGACTCA

2 结果与分析

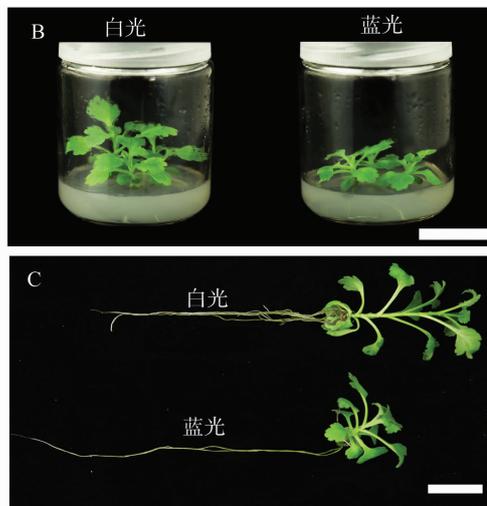
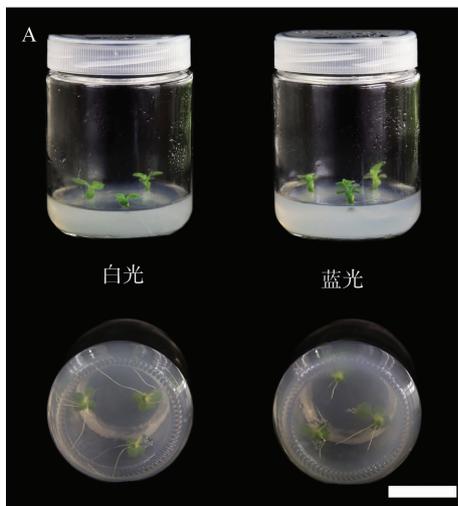
2.1 表型观察

2.1.1 蓝、白光处理不同阶段根的生长情况 分别统计光照处理8、10、15 d蓝、白光下组培苗生根

数,并对光照处理10、60 d的根长度进行测量,计算平均值(表2)。根据统计结果,相对于白光,蓝光处理下的组培苗在生长前期,其生根速度及根长度较对照明显受到抑制,而在生长后期,该抑制逐渐消失,前期的抑制效果被逐渐弥补(图1)。

表 2 蓝、白光处理后生根数和根长度

光照时间 (d)	生根数(条)		根长度(cm)	
	白光	蓝光	白光	蓝光
8	1.13 ± 0.35	0.17 ± 0.38		
10	2.37 ± 0.49	2.33 ± 0.55	2.73 ± 0.54	1.79 ± 0.34
15	2.43 ± 0.50	2.57 ± 0.77		
60			16.30 ± 2.72	19.59 ± 2.24



A—蓝、白光处理 11 d; B—蓝、白光处理 30 d; C—蓝、白光处理 60 d。标尺: 3 cm

图1 蓝、白光处理不同时间植株生长情况对比

表 3 蓝、白光处理后地上部分长度

光照时间 (d)	地上部分平均长度(cm)	
	白光	蓝光
10	0.81 ± 0.09	0.68 ± 0.14
30	1.85 ± 0.21	1.50 ± 0.24
60	4.10 ± 0.66	2.04 ± 0.40

并拍照记录(图 2)。经比较发现,夏菊优香组培苗



白光

蓝光

标尺: 2 cm

图2 蓝、白光处理 60 d 植株叶片大小比较

2.2 石蜡切片结果

光照处理 60 d 后,随机选取蓝、白光下各 3 株组培苗的成熟区根段、茎中段及叶面积最大的 3 张叶片,经渗蜡、切片、番红固绿双重染色(叶片选用固绿快速染色法染色)后,置于显微镜下观察根的最大直径(图 3),茎的最大直径(图 4),叶片的叶厚度及栅栏细胞厚度(图 5),进行测量统计,随后计算

2.1.2 蓝、白光处理不同阶段地上部分的生长情况

分别测量统计 10、30、60 d 优香组培苗地上部分长度,并计算平均值(表 3)。结果发现,在蓝光照射下的组培苗较白光均明显变矮,光照 60 d 蓝光下植株仅为对照组高度的 1/2(图 1)。

2.1.3 蓝、白光处理后植株叶片生长情况

光照处理 60 d 后,统计组培苗的叶片数和叶面积(表 4),

经蓝光处理 60 d 后,单株叶片总数保持不变,但叶面积较白光对照组明显变小。

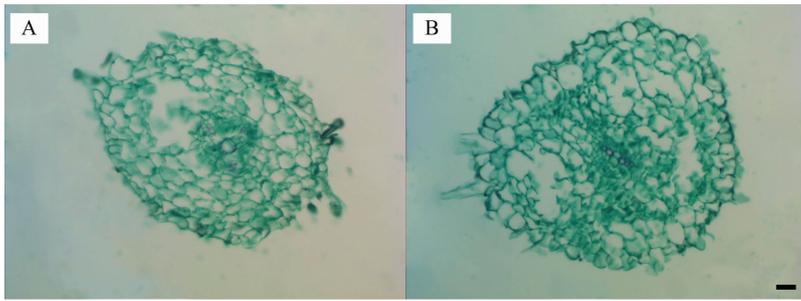
表 4 蓝、白光下处理 60 d 叶片数和叶面积

指标	单株平均叶片数(张)	叶片平均叶面积(cm^2)
白光	15.00 ± 1.07	2.91 ± 0.30
蓝光	15.00 ± 1.03	1.69 ± 0.20

各部位平均值,结果见表 5。比较发现,夏菊优香组培苗经蓝光处理 60 d 后,根变粗,茎显著变细,叶厚度变厚而栅栏细胞长度显著变长,栅栏组织厚度占叶片总厚度的比值明显变大。

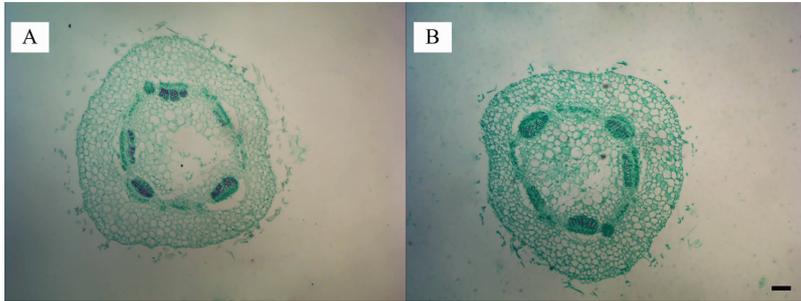
2.3 叶绿素含量测定

取蓝、白光处理 60 d 组培苗叶片,使用分光光度法进行叶绿素含量的测定。由表 6 可知,蓝光处



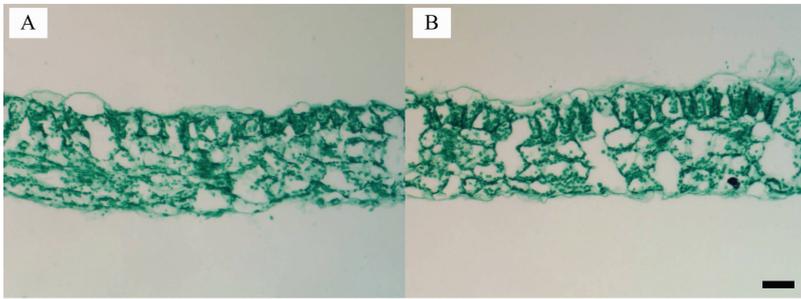
A—白光; B—蓝光; 放大倍数: 20×; 标尺: 25 μm

图3 蓝、白光处理 60 d 植株根石蜡切片



A—白光; B—蓝光; 放大倍数: 4×; 标尺: 100 μm

图4 蓝、白光处理 60 d 植株茎石蜡切片



A—白光; B—蓝光; 放大倍数: 20×; 标尺: 25 μm

图5 蓝、白光处理 60 d 植株叶片石蜡切片

表5 蓝、白光下处理 60 d 组织器官差异比较

光照类型	根直径(μm)	茎直径(μm)	叶厚度(μm)	栅栏细胞长度(μm)	栅栏细胞长度/叶厚度
白光	341.00 ± 5.58a	2 088.00 ± 14.71a	198.00 ± 5.38a	53.00 ± 2.62a	0.26 ± 0.01a
蓝光	364.00 ± 2.45b	1 906.00 ± 7.29b	205.00 ± 3.20b	69.00 ± 2.17b	0.33 ± 0.01b

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理对同一组织器官的发育存在显著差异($P < 0.05$)。

表6 蓝、白光处理 60 d 叶片叶绿素含量

光照类型	叶绿素 a + b 含量(mg/L)	叶绿素 a 含量(mg/L)	叶绿素 b 含量(mg/L)	类胡萝卜素含量(mg/L)
白光	1.31 ± 0.021a	0.97 ± 0.010a	0.34 ± 0.014a	0.19 ± 0.006a
蓝光	1.33 ± 0.006a	1.00 ± 0.006a	0.33 ± 0.010a	0.19 ± 0.006a

理后,叶绿素 b、类胡萝卜素含量基本保持不变,仅叶绿素 a 含量略微升高。

2.4 色素基因组织相对表达量分析

取白光处理 60 d 组培苗根、茎、叶、生长点反转录后的 cDNA,利用实时荧光定量对光敏色素基因

CmPHYA、*CmPHYB*、*CmPHYC*, 隐花色素基因 *CmCRY1.2*、*CmCRY1*、*CmCRY2* 的相对表达量进行分析。由图 6 可知,在菊花组培苗中各色素基因在不同部位的表达量是不同的,*CmPHYA* 表达量最高的部位是茎和生长点,在根中表达量最低;*CmPHYB* 表达量最高的部位是叶,最低部位是根;*CmPHYC* 表达量最高的部位是茎,最低部位是根;*CmCRY1.2* 表达量最高的部位是叶,最低部位是根;*CmCRY1* 表达量最高的部位是叶,最低部位是根;*CmCRY2* 表达量最高的部位是茎,最低部位是根。

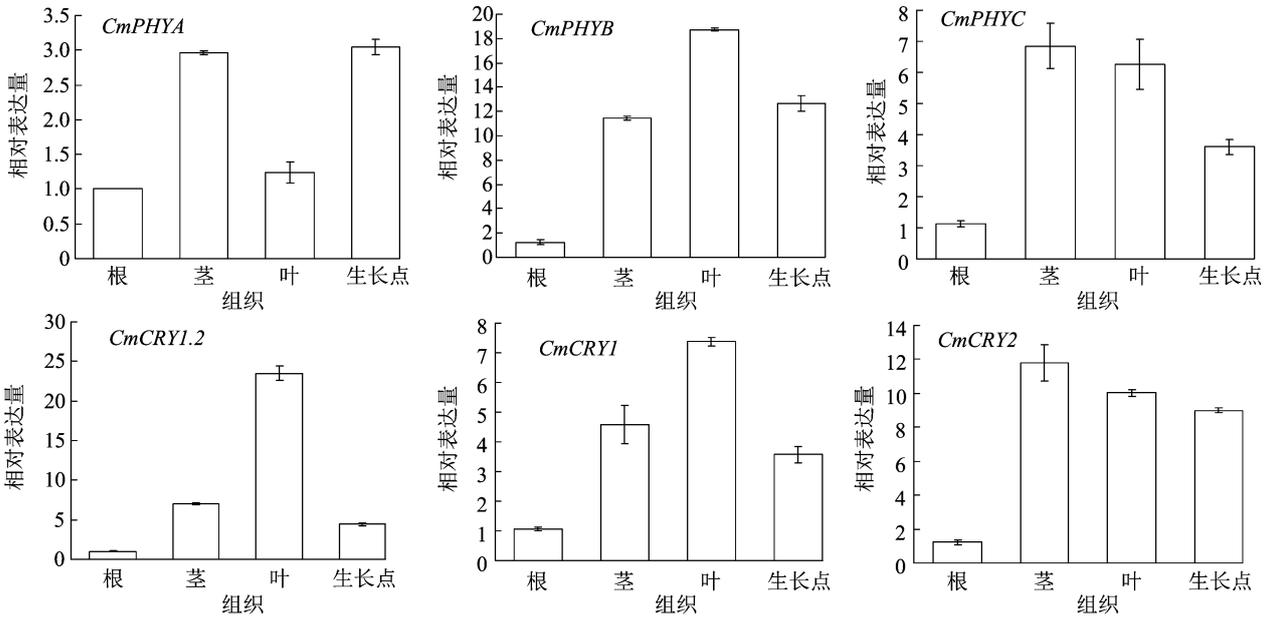


图6 色素基因组织相对表达量分析

2.5 叶片中色素基因相对表达量及蓝光处理后表达量变化

取蓝、白光处理 60 d 的组培苗叶片反转录后的 cDNA, 利用实时荧光定量 PCR 对光敏色素基因 *CmPHYA*、*CmPHYB*、*CmPHYC*, 隐花色素基因 *CmCRY1.2*、*CmCRY1*、*CmCRY2* 的相对表达量进行分析。由图 7 可知, 在叶片中 *CmCRY1.2* 的相对表达量最高, *CmPHYA* 的相对表达量最低。经蓝光处理后, 除 *CmCRY1.2* 的相对表达量降低外, 其他基因的相对表达量都有所增加。

2.6 蓝、白光处理后开花调节基因相对表达量变化

取蓝、白光处理 60 d 的组培苗叶片反转录后的 cDNA, 利用实时荧光定量 PCR 对开花调节基因 *CmFT1*、*CmFT2*、*CmFT3*、*CmCO* 的相对表达量进行分析。经蓝光处理后, *CmFT1*、*CmFT3* 的相对表达量都明显升高, 为白光对照组的 4 倍左右; *CmFT2* 相对表达量也有所升高, 但仅为白光对照组的 2 倍

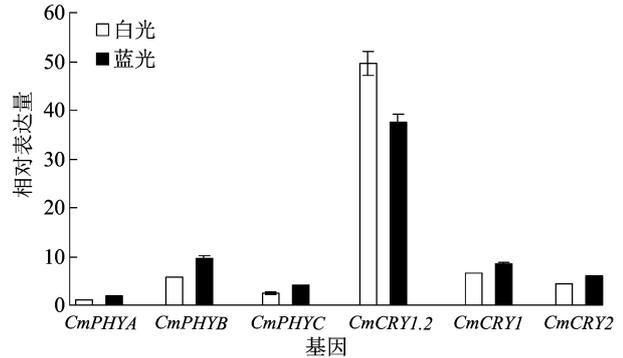


图7 蓝、白光处理 60 d 叶片中各基因相对表达量

左右; 而 *CmCO* 的相对表达量并没有因蓝光处理产生变化(图 8)。

3 讨论与结论

不同光质对植物的生长发育会产生不同的影响, 众所周知, 对于绿色植物, 绿色光照最不利于植物的生长, 而红光、红蓝光等对大多数植物的生长

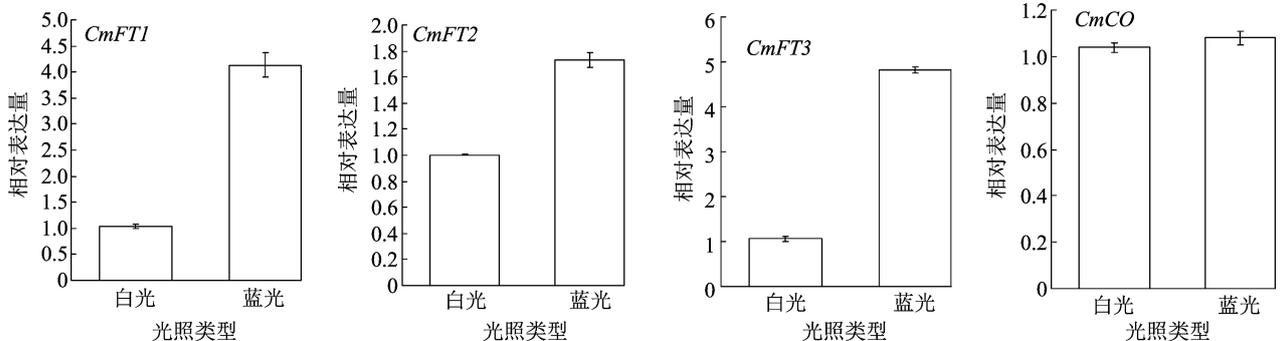


图8 蓝、白光处理 60 d 后开花调节基因相对表达量变化

有促进作用。相对于夏菊,不同光质对秋菊的影响已基本清晰。然而夏菊作为一种对光周期不敏感的特殊品种,其受光质的影响与秋菊是否一致还有待证实。秋菊的报道中显示,蓝光处理后秋菊31-12组培苗表现为植株变高,茎变粗,叶面积变大,生根数变多,根长度变长,叶绿素a、b、a+b含量均升高^[13]。本试验选用夏菊优香作为供试材料,蓝光处理后,夏菊优香表现为植株矮化,茎粗变细,叶片数不变,叶面积变小,生根总数基本不变,根长度变长,叶绿素a含量略微升高。由此可见,对光周期不敏感的夏菊,其在表型上对不同光质的响应与秋菊是不同的。因此在选择夏菊组培及栽培的光质时,应与秋菊进行区分。另外,有研究表明,叶片中栅栏组织的光合效率较海绵组织更高^[14]。本试验在进行石蜡切片制作时发现,蓝光处理后,夏菊叶面积明显变小,但叶平均厚度略微增加且叶片中栅栏组织厚度所占比重显著增加,以上结果可从侧面说明,植物为适应环境变化造成的伤害(叶面积变小),可能通过提高栅栏组织厚度来保证光合效率和保证生命代谢的有序进行。

有试验表明,光敏色素及隐花色素在植物的光信号接受及传递过程中扮演着重要的角色,广泛参与植物各种生长、代谢路径^[15-16]。本试验为探究光质对夏菊生长发育的影响,对夏菊优香中光敏色素及隐花色素相关基因的表达量进行分析,除隐花色素 *CmCRY1.2* 的表达下降外,其他基因表达量均上升。这一结果显示,光质对植物的影响从光信号接收开始便已存在。

光敏色素基因及隐花色素基因表达量的变化,必然会影响其参与的信号调节路径,如开花路径^[17]。对开花调节基因 *CmCO* 及开花整合因子 *CmFT1*、*CmFT2*、*CmFT3* 进行实时荧光定量PCR,发现经蓝光处理后 *CmCO* 表达量无明显变化,而 *CmFT1*、*CmFT2*、*CmFT3* 的表达量均明显升高。这一结果可在分子层面上解释关于秋菊白莲经蓝光照射开花提前的现象^[18]。

有报道称,在拟南芥中 *PHYA* 能够诱导 *CO* 表达,进而通过上调 *FT* 促进开花;*PHYB* 通过抑制 *pFT* 表达和 *CO* 的表达延迟开花^[7,19];在小麦中的研究表明,*PHYC* 能够通过诱导 *PPD1* 上调 *FT* 促进开花^[20]。另外,在拟南芥中,隐花色素 *CRY1*、*CRY2* 作为蓝光受体^[9],在响应蓝光信号诱导 *CO* 表达的同时,也能主动结合 *CIB1*,上调 *FT*^[19];而隐花色素

CRY1.2 由于是近年来刚从菊花中克隆得到,对其研究尚在进行,所以该基因的功能尚不明确。本研究中,蓝光照射作为一种光信号,直接导致光敏色素 *PHYA*、*PHYB*、*PHYC* 及隐花色素 *CRY1*、*CRY2* 的表达上调,有可能导致向光素 *PHOT*、光敏色素 *PHYD*、*PHYE* 等其他感光基因表达量的变化,这些感光基因对 *CO* 的影响不同,有的促进,有的抑制,所以最终导致 *CO* 的表达量未发生变化的机制还不清楚;而对 *FT* 表达量的影响,虽然 *PHYB* 抑制 *FT* 的表达,但也存在 *CRY* 结合 *CIB1* 而上调 *FT* 的作用,且还有其他感光基因的调控,最终导致 *FT* 表达量升高的分子机制还有待进一步研究。

参考文献:

- [1]潘才博,张启翔. 日中性菊花及其分子育种前景[J]. 分子植物育种,2010,8(2):350-358.
- [2]Poudel P R, Kataoka I, Mochioka R. Effect of red - and blue - light - emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2008, 92(2): 147-153.
- [3]任桂萍,王小菁,朱根发. 不同光质的LED对蝴蝶兰组织培养增殖及生根的影响[J]. 植物学报,2016,51(1):81-88.
- [4]王春昕. 光对切花菊‘神马’生长和开花的影响[D]. 南京:南京农业大学,2012.
- [5]Kim S J, Hahn E J, Heo J W, et al. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets *in vitro* [J]. Scientia Horticulturae, 2004, 101(1/2): 143-151.
- [6]Jeong S W, Hogewoning S W, van Ieperen W. Responses of supplemental blue light on flowering and stem extension growth of cut chrysanthemum [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 165: 69-74.
- [7]Cerdán P D, Chory J. Regulation of flowering time by light quality [J]. Nature, 2003, 423(6942): 881-885.
- [8]Mockler T, Yang H Y, Yu X H, et al. Regulation of photoperiodic flowering by *Arabidopsis* photoreceptors [J]. PNAS, 2003, 100(4): 2140-2145.
- [9]Wang Q, Barshop W D, Bian M D, et al. The blue light - dependent phosphorylation of the CCE domain determines the photosensitivity of *Arabidopsis* CRY2 [J]. Molecular Plant, 2015, 8(4): 631-643.
- [10]Sun C Q, Chen F D, Teng N J, et al. Factors affecting seed set in the crosses between *Dendranthema grandiflorum* (Ramat.) Kitamura and its wild species [J]. Euphytica, 2010, 171(2): 181-192.
- [11]孙静. 菊花 *FT-like* 基因开花调控功能研究[D]. 南京:南京农业大学,2014.
- [12]Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real - time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta C_t}$ method [J]. Methods, 2001, 25(4): 402-408.
- [13]张欢,徐志刚,崔瑾,等. 不同光谱能量分布对菊花试管苗增殖及生根的影响[J]. 园艺学报,2010,37(10):1629-1636.
- [14]强胜. 植物学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:133-135.

覃勇荣,赵贞涛,刘旭辉,等. 重金属胁迫对不同种源任豆种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(12):156-162.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.12.025

重金属胁迫对不同种源任豆种子萌发及幼苗生长的影响

覃勇荣, 赵贞涛, 刘旭辉, 范金成, 廖康全

(河池学院化学与生物工程学院, 广西宜州 546300)

摘要:为了比较不同种源任豆种子萌发及其幼苗生长对重金属胁迫抗性的差异,选择广西宜州怀远(HY)、平果(PG)、云南昆明(YN)3个不同来源的任豆种子,研究不同浓度 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫对任豆种子的萌发特性及其幼苗生长的影响,测定了任豆种子的发芽势、发芽率、发芽指数、胚芽长度、胚根长度、株高,应用模糊数学的隶属函数法,对不同来源任豆种子萌发过程中的重金属耐性进行综合评价。结果表明:(1)任豆种子对不同重金属离子胁迫的耐性有明显差异,其大小排序为 $Zn^{2+} > Pb^{2+} > Cu^{2+} > Cd^{2+}$,任豆种子萌发过程中 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 的毒性明显大于 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} ; (2)不同重金属离子对任豆幼苗生长的抑制作用随其浓度的增大而明显增强,且重金属对任豆胚根生长的抑制作用更为明显,任豆幼苗对不同重金属的耐性强弱排序为 $Zn^{2+} > Pb^{2+} > Cu^{2+} > Cd^{2+}$; (3)不同种源任豆幼苗对铬、铜、铅、锌4种重金属耐性的强弱排序分别为 $PG > YN > HY$ 、 $YN > PG > HY$ 、 $PG > HY > YN$ 、 $HY > YN > PG$;综合考虑各种重金属的影响,不同种源任豆幼苗对重金属耐性强弱排序为 $PG > YN > HY$ 。尽管不同种源任豆种子的萌发及其幼苗对重金属的耐性有一定的差异,但均可以作为土壤重金属污染的修复材料使用。

关键词:不同种源;任豆种子;重金属胁迫;萌发特性;幼苗;重金属耐性

中图分类号: X173; Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)12-0156-07

任豆是中国特有的单种属植物,主要分布在我国南方的石灰岩地带,其根系发达,生长迅速,耐旱性强,生态经济效益较高^[1],因而被广泛应用于岩溶地区造林绿化和石漠化治理等环境修复工程之中。近年来,随着我国区域经济的快速发展,生态环境也受到一定程度的破坏,污染问题日渐突

出^[2],环境治理是亟需解决的问题。在土壤重金属污染治理的诸多方法中,植物修复是一种成本低廉且应用广泛的技术方法,而优良先锋物种的选用则是植物修复的重要基础^[3]。为了探讨利用任豆树种进行土壤重金属污染植物修复的可行性,笔者曾对重金属胁迫背景下任豆种子萌发及其幼苗抗氧化酶活性进行过一些试验^[4-6],发现任豆幼苗对不同重金属元素的耐性具有明显差异,其大小排序为 $Zn^{2+} > Pb^{2+} > Cu^{2+} > Cd^{2+}$ 。黄银珊也对任豆种子的萌发特性和储藏生理进行了研究,测定了任豆种子的发芽率、发芽势、发芽指数以及 POD、SOD、CAT 活性等生理生化指标^[7]。高菲菲研究了不同浓度 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 胁迫对沙打旺、紫花苜蓿、红三叶种子萌发、幼苗生长及重金属富集能力的影响

收稿日期:2021-08-12

基金项目:广西自然科学基金(编号:桂科自0832273);河池学院硕士专业学位建设基金(编号:2016HJA007);河池学院高层次人才科研启动费项目(编号:XJ2018GKQ016);河池学院重点实验室项目(编号:校政发[2016]91号);广西大学生创新创业计划(编号:201810605084)。

作者简介:覃勇荣(1963—),男,广西贵港人,硕士,教授,从事岩溶地区石漠化综合治理与生态恢复研究。E-mail:hexyqyr@126.com。

[15] Pedmale U V, Huang S S C, Zander M, et al. Cryptochromes interact directly with PIFs to control plant growth in limiting blue light[J]. Cell, 2016, 164(1/2): 233-245.

[16] Sullivan S, Hart J E, Rasch P, et al. Phytochrome a mediates blue-light enhancement of second-positive phototropism in *Arabidopsis* [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7(775): 290.

[17] Liu B B, Yang Z H, Gomez A, et al. Signaling mechanisms of plant cryptochromes in *Arabidopsis thaliana* [J]. Journal of Plant

Research, 2016, 129(2): 137-148.

[18] 魏胜利,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): 100-101.

[19] Fornara F, de Montaigu A, Coupland G. SnapShot: control of flowering in *Arabidopsis* [J]. Cell, 2010, 141(3): 550-550. e2.

[20] Chen A, Li C X, Hu W, et al. PHYTOCHROME C plays a major role in the acceleration of wheat flowering under long-day photoperiod [J]. PNAS, 2014, 111(28): 10037-10044.