

许建民,仇学文,解振强,等. 不同光质及其组合对山黧豆苗菜生长及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(4):134-138.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.04.023

# 不同光质及其组合对山黧豆苗菜生长及品质的影响

许建民<sup>1,2</sup>, 仇学文<sup>1</sup>, 解振强<sup>1,2</sup>, 戴林秀<sup>1</sup>

(1. 江苏农林职业技术学院,江苏句容 212400; 2. 江苏现代园艺工程技术中心,江苏句容 212400)

**摘要:**以松柳种子为试验材料,采用发光二极管(light emitting diode,LED)作为光源,设置红、绿、蓝 3 种不同单色光质、复合光组合以及白光共 9 种不同的光质处理,研究不同光质对松柳芽苗菜生长和营养品质的影响。结果表明,纯红光处理的松柳芽苗菜可食用部分鲜质量、株高、可溶性蛋白含量最高,但其可食用部分干鲜比最低,含水量最多;红蓝绿 3 色混合光处理的松柳芽苗菜体内叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量最高;红蓝 1:1 混合光处理的松柳芽苗菜维生素 C 含量最高;白光处理的松柳芽苗菜游离氨基酸含量最高;不同光质对松柳芽苗菜的确态氮含量无明显影响;白光和蓝光可以促进松柳芽苗菜总黄酮的合成。与蓝绿光组合相比,红蓝光组合更有利于松柳芽苗菜生长和品质的增加。在实际生产中可根据所需品质要求选择合适的光质组合。

**关键词:**松柳芽苗菜;光质;生长;营养品质

**中图分类号:**S643.904 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)04-0134-05

光质对于植物的营养生长和生殖生长具有重要影响。发光二极管(light emitting diode,LED)作为新型光源,光电转化效率高、发热量低且光谱能量调制便捷,极大地提高了空间利用率。近年来,随着食品安全问题日益被关注,居民对美好生活的追求日益强烈,在芽苗菜生产过程中通过应用 LED 控制光环境来提高芽苗菜产量及品质的方式已引起人们的重视,并成为设施栽培领域新的研究热点<sup>[1]</sup>。目前,已有许多关于不同光质对园艺作物生长影响的研究证实了光质对植物的生长发育具有显著的影响<sup>[2-6]</sup>。

松柳学名山黧豆(*Lathyrus sativus* L.),松柳菜是山黧豆的芽苗,别称相思菜、松柳苗,外表呈龙须状,叶子细长,质地脆嫩,清香可口,营养价值丰富,越来越受到人们的追捧。本试验旨在探明不同光质对松柳芽苗菜生长和营养品质的影响,以期找出最适合松柳芽苗菜生长的光质组合,为松柳芽苗菜工厂化生产提供科学有效的依据。

## 1 材料与方法

收稿日期:2018-11-28

基金项目:江苏农林职业技术学院院级课题(编号:2016kj002);江苏省大学生创新创业训练计划(编号:201813103013Y);江苏高校品牌专业建设工程资助项目(编号:PPZY2015B173)。

作者简介:许建民(1981—),男,甘肃张掖人,硕士,副教授,主要从事设施园艺光环境控制研究。E-mail:jsnlxjm@vip.163.com。

### 1.1 试验材料

松柳芽苗菜种子,购自北京市农林科学院。

### 1.2 试验方法

1.2.1 培养条件 选取色泽鲜亮、大小均匀、成熟度好的种子,清洗干净后,浸种 24 h,中途换水 1 次。浸种完成后,将种子均匀播撒在底部铺有纱布的育苗盘内,27℃黑暗条件下催芽 2 d,随即转入人工气候室,放置在不同光质下培养。培养条件为相对湿度 75%~80%,温度(25±2)℃,光—暗周期 12 h—12 h。培养 8 d 后,随机取样测定各项指标。

1.2.2 光质处理 本试验使用的光源为自制可控 LED 植物生长灯,设红、绿、蓝及其光质组合、白光等 9 种光质处理,光谱能量分布的主要技术参数见表 1。

### 1.3 测定方法

可食用部分长度用直尺直接测定;茎粗采用游标卡尺测量;干、鲜质量测定采用称质量法。

可食用部分干鲜比 = 可食用部分干质量/可食用部分鲜质量。

采用丙酮比色法测定叶绿素含量,蒽酮比色法测定可溶性糖含量,考马斯亮蓝 G-250 比色法测定可溶性蛋白含量,钼蓝比色法测定维生素 C 含量,水合茚三酮比色法测定游离氨基酸含量<sup>[7]</sup>;总黄酮含量测定采用 Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>-NaNO<sub>3</sub> 比色法<sup>[8]</sup>,硝态氮含量测定采用磺基水杨酸法<sup>[9]</sup>。

随机取样,每个生长指标重复测定 10 次,生理

表 1 不同光质处理的技术参数

光处理	峰值波长 (nm)	波长半宽 (nm)	光量子通量密度 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
R	655	12	50
G	530	16	50
B	460	11	50
R : G = 1 : 1	655;530	$\pm 12 ; \pm 16$	50
R : B = 1 : 1	655;460	$\pm 12 ; \pm 11$	50
G : B = 1 : 1	530;460	$\pm 16 ; \pm 11$	50
R : B = 3 : 1	655;460	$\pm 12 ; \pm 11$	50
R : G : B = 1 : 1 : 1	655;530;460	$\pm 12 ; \pm 16 ; \pm 11$	50
W	400 ~ 760		50

注:R 表示红光,G 表示绿光,B 表示蓝光,W 表示白光。下同。

生化指标重复测定 3 次。采用 Excel 2016 整理数据,SPSS 22.0 进行方差分析,显著性由 Duncan’s 新复极差法检验( $\alpha=0.05$ )。

2 结果与分析

2.1 不同光质对松柳芽苗菜生长指标的影响

由表 2 可知,与白光处理相比,其他光质处理下松柳芽苗菜可食用部分干、鲜质量和株高均显著增加;红光处理下的松柳芽苗菜可食用部分干鲜比最

低,株高最高,鲜质量最大;松柳芽苗菜茎粗在蓝绿光 1 : 1 处理下最大,红蓝光 1 : 1 处理下最小。在单色光处理的情况下,纯红光处理下的可食用部分鲜质量最高,可食用部分干鲜比最低;在多种光混合处理中,红蓝绿光 1 : 1 : 1 处理下的松柳芽苗菜株高最高,红蓝光 3 : 1 处理下的松柳芽苗菜最高,红绿光 1 : 1 和蓝绿光 1 : 1 处理下的松柳芽苗菜可食用部分鲜质量最低,且与红蓝光 1 : 1 处理之间无显著性差异。

表 2 不同光质对松柳芽苗菜生长指标的影响

处理	可食用部分鲜质量 (g)	可食用部分干质量 (g)	茎粗 (mm)	株高 (cm)	可食用部分干鲜比
R	0.38 $\pm$ 0.02a	0.03 $\pm$ 0.00ab	2.29 $\pm$ 0.09abc	21.12 $\pm$ 0.59a	0.08 $\pm$ 0.00b
G	0.31 $\pm$ 0.02b	0.03 $\pm$ 0.00ab	2.15 $\pm$ 0.13bc	20.68 $\pm$ 0.44a	0.10 $\pm$ 0.00ab
B	0.32 $\pm$ 0.02b	0.04 $\pm$ 0.00a	2.42 $\pm$ 0.12ab	14.34 $\pm$ 0.44d	0.11 $\pm$ 0.01a
R : G = 1 : 1	0.24 $\pm$ 0.01c	0.02 $\pm$ 0.00b	2.28 $\pm$ 0.09abc	16.64 $\pm$ 0.48bc	0.10 $\pm$ 0.00ab
R : B = 1 : 1	0.25 $\pm$ 0.01c	0.03 $\pm$ 0.00ab	2.05 $\pm$ 0.17c	12.30 $\pm$ 0.36e	0.11 $\pm$ 0.01a
B : G = 1 : 1	0.24 $\pm$ 0.01c	0.02 $\pm$ 0.00b	2.59 $\pm$ 0.13a	12.26 $\pm$ 0.34e	0.10 $\pm$ 0.00ab
R : B = 3 : 1	0.31 $\pm$ 0.02b	0.03 $\pm$ 0.00ab	2.54 $\pm$ 0.05a	16.13 $\pm$ 0.50c	0.10 $\pm$ 0.00ab
R : G : B = 1 : 1 : 1	0.30 $\pm$ 0.02b	0.03 $\pm$ 0.00ab	2.40 $\pm$ 0.08ab	17.73 $\pm$ 0.26b	0.11 $\pm$ 0.01a
W	0.18 $\pm$ 0.01d	0.02 $\pm$ 0.00b	2.44 $\pm$ 0.00ab	9.52 $\pm$ 0.23f	0.10 $\pm$ 0.01ab

注:表中数据为平均值  $\pm$  标准差,同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下表同。

2.2 不同光质对松柳芽苗菜叶绿素、类胡萝卜素含量的影响

由表 3 可知,红蓝绿光 1 : 1 : 1 3 色混合处理下的松柳芽苗菜叶绿素 a、叶绿素 b 含量均显著高于其他处理;红绿光 1 : 1 处理下松柳芽苗菜的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均为最低。在红、绿、蓝 3 种单色光处理中,以蓝光处理的松柳芽苗菜叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量最高;红绿光 1 : 1 复合光处理下松柳芽苗菜叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量均低于单色红光或绿光处理;在 2 种不同光质的组合处理中,以蓝绿光 1 : 1 处理下的松柳芽苗菜叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量最

高。红绿蓝光 1 : 1 : 1 复合光处理的松柳芽苗菜叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量高于 2 种不同单色光之间的组合。

2.3 不同光质对松柳芽苗菜营养品质的影响

由表 4 可知,红蓝光 1 : 1 混合光处理下的松柳芽苗菜维生素 C 含量最高,纯红光处理下的松柳芽苗菜维生素 C 含量最低;红绿光 1 : 1 混合光处理下松柳芽苗菜可溶性糖含量最高,纯蓝光处理下的松柳芽苗菜可溶性糖含量最低;单色光中,纯红光处理下的松柳芽苗菜可溶性蛋白含量最高,白光处理下的松柳芽苗菜可溶性蛋白含量最低;游离氨基酸的含量在白光处理下最高,蓝绿光 1 : 1 混合光处

理下最低;各种光质处理下的松柳芽苗菜硝态氮含量无显著性差异。在单色光处理中,纯蓝光处理下的松柳芽苗菜维生素 C、游离氨基酸含量最高,纯红光处理下的可溶性糖和可溶性蛋白含量相对较高;在双色复合光处理中,红蓝光 1 : 1 处理的松柳芽苗

菜维生素 C 含量最高,红绿光 1 : 1 处理下的可溶性糖含量和游离氨基酸含量较高。总体来看,红蓝光 3 : 1 处理下的维生素 C 含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和游离氨基酸含量等高于其他 8 种处理。

表 3 不同光质对松柳芽苗菜叶绿素含量的影响

处理	叶绿素 a 含量 (mg/g)	叶绿素 b 含量 (mg/g)	类胡萝卜素含量 (mg/g)	叶绿素 a + 叶绿素 b 含量 (mg/g)	叶绿素 a 含量/ 叶绿素 b 含量
R	52.78 ± 1.67c	33.15 ± 1.97cd	8.13 ± 1.27cd	85.93 ± 3.60de	1.60 ± 0.05d
G	55.60 ± 0.18c	33.87 ± 0.43cd	10.14 ± 0.83cd	89.47 ± 0.25de	1.64 ± 0.03d
B	89.41 ± 5.91b	44.99 ± 4.55b	16.65 ± 1.70ab	134.39 ± 10.46b	2.00 ± 0.07abc
R : G = 1 : 1	25.55 ± 2.48d	15.50 ± 1.36e	2.41 ± 0.34e	41.05 ± 3.84f	1.65 ± 0.02d
R : B = 1 : 1	52.10 ± 1.96c	27.87 ± 0.48d	8.28 ± 0.40cd	79.96 ± 1.48e	1.87 ± 0.10c
B : G = 1 : 1	78.46 ± 8.18b	38.11 ± 2.79bc	15.85 ± 2.05ab	116.57 ± 10.97bc	2.05 ± 0.07ab
R : B = 3 : 1	61.62 ± 9.69c	36.68 ± 2.72c	12.30 ± 1.12bc	106.53 ± 7.82cd	1.90 ± 0.00bc
R : B : G = 1 : 1 : 1	114.87 ± 5.59a	53.49 ± 2.58a	18.25 ± 2.73a	168.36 ± 8.16a	2.15 ± 0.01a
W	52.84 ± 1.96c	27.04 ± 1.41d	7.40 ± 0.16d	79.88 ± 3.37e	1.96 ± 0.03bc

表 4 不同光质对松柳芽苗菜营养品质的影响

处理	维生素 C 含量 (mg/g)	可溶性糖含量 (mg/g)	可溶性蛋白含量 (mg/g)	游离氨基酸含量 (μg/g)	硝态氮含量 (μg/g)
R	7.42 ± 0.29c	0.24 ± 0.01ab	0.34 ± 0.06a	1.92 ± 0.15c	0.02 ± 0.00a
G	7.89 ± 0.36bc	0.26 ± 0.01ab	0.22 ± 0.01bc	2.79 ± 0.17abc	0.02 ± 0.00a
B	8.38 ± 0.22ab	0.22 ± 0.00b	0.25 ± 0.03ab	3.44 ± 0.23ab	0.02 ± 0.00a
R : G = 1 : 1	7.93 ± 0.07bc	0.27 ± 0.00a	0.15 ± 0.00c	3.33 ± 0.25ab	0.02 ± 0.00a
R : B = 1 : 1	8.77 ± 0.20a	0.23 ± 0.01b	0.15 ± 0.00c	2.00 ± 0.23c	0.02 ± 0.00a
B : G = 1 : 1	8.42 ± 0.21ab	0.24 ± 0.00ab	0.28 ± 0.02ab	1.80 ± 0.14c	0.02 ± 0.00a
R : B = 3 : 1	8.32 ± 0.12ab	0.25 ± 0.01ab	0.30 ± 0.04ab	3.44 ± 0.11ab	0.02 ± 0.00a
R : B : G = 1 : 1 : 1	7.87 ± 0.23bc	0.24 ± 0.01ab	0.34 ± 0.04a	2.27 ± 0.33bc	0.02 ± 0.00a
W	8.65 ± 0.11a	0.24 ± 0.02ab	0.13 ± 0.00c	3.89 ± 0.94a	0.02 ± 0.00a

2.4 不同光质对松柳芽苗菜总黄酮含量的影响

由图 1 可知,白光处理下的松柳芽苗菜总黄酮含量最高,红蓝绿光 1 : 1 : 1 处理下的松柳芽苗菜总黄酮含量最低;在单色光处理下,纯蓝光和纯绿光处理下的松柳芽苗菜总黄酮含量都高于纯红光

处理;在 2 种复合光处理中,蓝绿光 1 : 1 处理下的松柳芽苗菜总黄酮含量高于红绿光 1 : 1、红蓝光 1 : 1 和红蓝光 3 : 1 处理,但蓝绿光 1 : 1、红蓝光 1 : 1 和红绿光 1 : 1 之间差异较小。

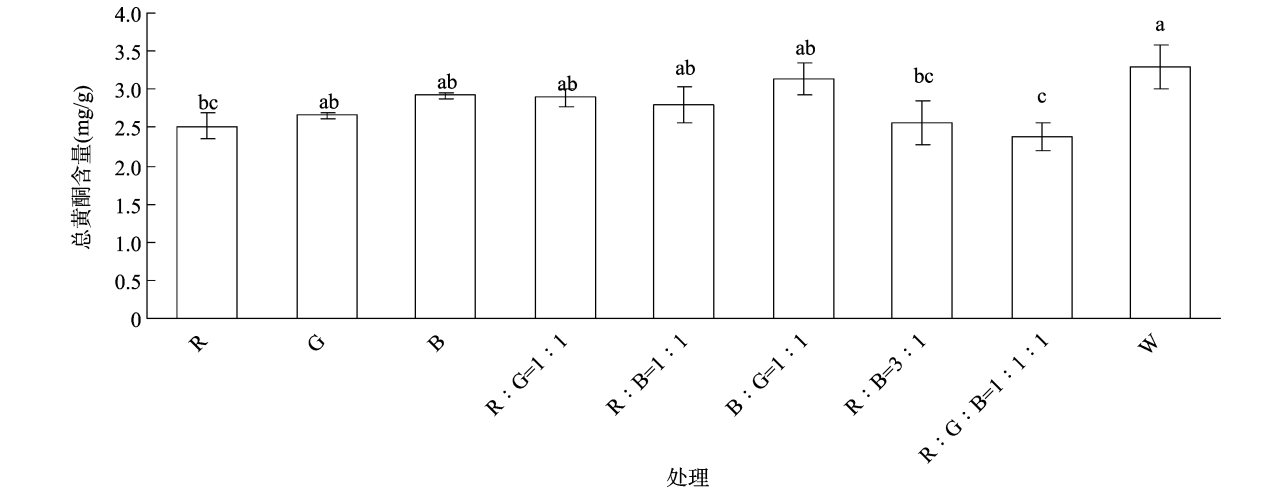


图1 不同光质对松柳芽苗菜总黄酮含量的影响

### 3 讨论

芽苗菜的鲜质量可直接反映出其产量的高低。本试验发现,纯红光处理下的松柳芽苗菜可食用部分鲜质量最高,因此对应产量也是最高的,但从干鲜比的数据可以看出,红光处理下的松柳芽苗菜可食用部分干鲜比最低,这表明在其鲜质量中,水分占了很大的比例。蓝光处理下的松柳芽苗菜可食用部分干质量最大,纯蓝光、红蓝光 1:1 和红蓝绿 1:1:1 处理下的松柳芽苗菜可食用部分干鲜比最大。Lin 等发现,红蓝组合光能促进石斛原球茎干物质的积累<sup>[10]</sup>,与本试验研究结果一致。

株高和茎粗可以粗略地反映芽苗菜在市场交易中的受欢迎程度,消费者更喜欢茎粗、体长、卖相较好的芽苗菜。从试验结果可以看出,虽然不同光质处理下的松柳芽苗菜茎粗有显著性差异,但其差异的最大值不超过 0.6 mm,肉眼难以直接区分。因此,在市场交易中,株高更高的松柳芽苗菜可能更受欢迎。从试验数据来看,红光处理下的松柳芽苗菜株高在 9 种处理中最高。因此,红光处理下的芽苗菜在市场会更受欢迎。

叶绿素中的叶绿素 a 和叶绿素 b 是植物光合作用过程中的主要色素,对光能的吸收利用起着极其重要的作用。不同光质处理对叶片中叶绿素含量的影响不同。蓝光 LED 处理可以显著提高豌豆苗的叶绿素含量和鲜质量<sup>[13]</sup>,且可以增加生菜中花青素和类胡萝卜素的含量<sup>[11]</sup>。本试验中,不同光质处理下的松柳芽苗菜叶绿素含量不尽相同,其中以红蓝绿光 1:1:1 处理下的叶绿素总量最高,红绿光 1:1 处理下的叶绿素总量最低;在单色光处理条件下,纯蓝光处理下的松柳芽苗菜叶绿素含量最高;在混合光处理条件下,红绿光 1:1 处理下的松柳芽苗菜叶绿素含量最低,这表明蓝光能明显促进松柳芽苗菜叶绿素的合成。这与前人的研究结果也基本一致。

松柳芽苗菜作为食品,其营养品质是一个极其重要的指标。维生素 C 又名抗坏血酸,可以有效地防治坏血病,是人体重要的抗氧化剂之一。从试验数据可以看出,红蓝光 1:1 处理下的松柳芽苗菜维生素 C 含量最高,其次是白光处理,然后是蓝绿光 1:1 处理,纯红光处理下的松柳芽苗菜的维生素 C 含量最低。徐茂军等研究发现,蓝光可提高发芽大豆中维生素 C 的含量,并提高半乳糖酸内酯脱氢酶

(GLDH) 的活性<sup>[12]</sup>。在黄瓜、豌豆、大蒜愈伤组织和叶用莴苣上的研究表明,红光可促进维生素 C 的合成和累积<sup>[13-16]</sup>,而在本试验中,红光处理下的松柳芽苗菜维生素 C 含量最低,这可能与松柳芽苗菜体内维生素 C 合成的关键酶的表达和活性有关,具体的机制还有待进一步研究探讨。

可溶性糖是重要的能量物质,也是衡量松柳芽苗菜营养品质的一个重要指标。本研究结果表明,部分条件处理下的松柳芽苗菜可溶性糖含量之间存在显著性差异。红绿光 1:1 处理下的松柳芽苗菜可溶性糖含量最高,纯蓝光处理下的松柳芽苗菜可溶性糖含量最低。张立伟等的试验结果表明,红光能提高香椿苗的可溶性糖含量,蓝光则降低香椿苗的可溶性糖含量<sup>[17]</sup>。本试验中,纯蓝光处理下的松柳芽苗菜可溶性糖含量最低,纯红光处理下的松柳芽苗菜可溶性糖含量高于纯蓝光处理,这与前人的试验结果基本吻合。从试验数据可以看出,在多种光混合处理中,红绿 1:1 处理下的松柳芽苗菜可溶性糖含量明显高于带有蓝光的混合光处理,原因可能是松柳芽苗菜在蓝光处理下呼吸作用会增强,导致光合产物消耗增加<sup>[18]</sup>。

有研究表明,蓝光能诱导抗氧化酶基因的表达及活性的上升,缓解植物体内可溶性蛋白的降解,从而提高其含量<sup>[19]</sup>。本试验中,纯红光处理下的松柳芽苗菜可溶性蛋白含量较高,白光处理下的松柳芽苗菜的可溶性蛋白质含量最低,与前人的研究结果不一致。可能是由于在松柳芽苗菜内,蓝光对抗氧化物酶基因的表达和活性的上升诱导作用较低,有关机制还需要进一步验证。Kowalik 研究表明,蓝光可显著促进线粒体的暗呼吸作用,为氨基酸合成提供碳架,从而提高氨基酸的含量<sup>[20]</sup>。在本试验数据中,红光处理下的松柳芽苗菜游离氨基酸含量较低,白光处理条件下的松柳芽苗菜的游离氨基酸的含量最高,这与前人的研究结果不一致,可能是因为植物种类的不同导致光质的作用不同。

硝态氮主要是指硝酸盐中氮的含量。硝酸盐在一定条件下可以发生化学反应,形成亚硝酸盐,对人体健康产生潜在的影响。唐丽等研究发现,蓝光显著降低了苜蓿芽苗菜硝酸盐的含量<sup>[21]</sup>。闻婧等研究表明,在 R/B 为 8 的红蓝 LED 混合光下生长的生菜硝酸盐含量最低<sup>[22]</sup>。本试验中,在 9 种不同光质处理下的松柳芽苗菜硝态氮含量没有明显差异,大多稳定在 0.02  $\mu\text{g/g}$ ,可能是因为光质对植物

硝酸盐含量的影响因植物的不同而异。

黄酮是一种强有效的抗氧化性物质,在人体内可以起到抗衰老、阻止细胞退化、降低胆固醇含量等效用。本试验中,白光处理下的松柳芽苗菜总黄酮含量最高,而红绿蓝光 1:1:1 处理下的松柳芽苗菜总黄酮含量最低,这与鲁燕舞等研究发现的白光有利于香椿芽苗菜总黄酮含量的积累<sup>[23]</sup>一致。Guo 等的研究结果显示,蓝光有利于雪莲愈伤组织总黄酮含量的积累<sup>[24]</sup>。谢宝东等认为,长波段(如红光)的光抑制黄酮类物质的积累,短波段(如蓝光)的光利于黄酮类物质的积累<sup>[25]</sup>。在 3 种单色光处理条件下的松柳芽苗菜总黄酮含量由高到低分别是蓝光处理、绿光处理和红光处理。而在 2 种光混合处理下,以蓝绿光 1:1 混合处理的总黄酮含量最高,之后依次是红绿光 1:1、红蓝光 1:1 和红蓝光 3:1,这表明相对于蓝光和绿光而言,红光对松柳芽苗菜的总黄酮合成起抑制作用,这与前人的研究结果相一致,且当红光与其他光组合时,抑制作用占主导,尤其是与蓝光混合时,抑制作用更强,这表明松柳芽苗菜在合成黄酮时,可能对红色更加敏感。红蓝绿光 1:1:1 处理下的松柳芽苗菜总黄酮含量最低的结果也间接地验证这一推断。

综上所述,不同的光质处理对松柳芽苗菜的生长和营养品质可以产生显著的影响,表明利用光控技术控制芽苗菜的生长和营养品质的提高具有可行性。

#### 参考文献:

- [1] Morrow R C. LED lighting in horticulture[J]. Hort Science, 2008, 43(7):1947-1950.
- [2] 张立伟,刘世琦,张自坤,等. 光质对萝卜芽苗菜营养品质的影响[J]. 营养学报, 2010, 32(4):390-392, 396.
- [3] Wu M C, Hou C Y, Jiang C M, et al. A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings[J]. Food Chemistry, 2007, 101(4):1753-1758.
- [4] Suchi S, Varsha G, Baishnab C T, et al. Photoregulation of the greening process of wheat seedlings grown in red light[J]. Plant Molecular Biology, 2005, 59(2):269-287.
- [5] Heo J, Lee C, Chakrabarty D, et al. Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a light-emitting diode (LED)[J]. Plant Growth Regulation, 2002, 38(3):225-230.
- [6] Lee N Y, Lee M, Kim Y, et al. Effect of light emitting diode radiation on antioxidant activity of barley leaf[J]. J Korean Soc Appl Biol Chem, 53(6):685-690.
- [7] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
- [8] 张京芳, 王冬梅, 张强. 香椿叶抗脂质过氧化物的分离及抗氧化特性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1):285-290.
- [9] Lichtenthaler H K. Chlorophyll II and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes[J]. Method Enzymol, 1987, 48:350-382.
- [10] Lin Y, Li J, Li B, et al. Effects of light quality on growth and development of protocorm-like bodies of *Dendrobium officinale* in vitro[J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 2011, 105(3):329-335.
- [11] Li Q, Kubota C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1):59-64.
- [12] 徐茂军, 朱睦元, 顾青. 光诱导对发芽大豆中半乳糖胺内酯脱氢酶活性和维生素 C 合成的影响[J]. 营养学报, 2002, 24(2):212-214.
- [13] 徐师华, 王修兰, 吴毅明. 不同光质(光谱)对作物生长发育的影响[J]. 生态农业研究, 2000, 8(1):18-20.
- [14] 刘文科, 杨其长, 邱志平, 等. LED 光质对豌豆苗生长、光合色素和营养品质的影响[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4):500-504.
- [15] 马琳. 激素与光质对大蒜组织培养的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2011.
- [16] 许莉. 光质对叶用莴苣生理特性及品质的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2007.
- [17] 张立伟, 刘世琦, 张自坤, 等. 不同光质下香椿苗的生长动态[J]. 西北农业学报, 2010, 19(6):115-119.
- [18] 史宏志, 韩锦峰, 张国显, 等. 单色蓝光和红光对烟苗叶片生长和碳氮代谢的影响[J]. 河南农业大学学报, 1998(3):57-61.
- [19] Kong S S, Hosakatte N M, Jeong W H, et al. The effect of light quality on the growth and development of *in vitro* cultured *Doritaenopsis* plants[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2008, 30:339-343.
- [20] Kowallik W. Blue light effects on respiration[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1982, 33:51-72.
- [21] 唐丽, 鲁燕舞, 崔瑾. 光质对苜蓿芽苗菜营养品质和抗氧化特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(13):32-36.
- [22] 闻婧, 鲍顺淑, 杨其长, 等. LED 光源 R/B 对叶用莴苣生理性状及品质的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(3):413-416.
- [23] 鲁燕舞, 唐丽, 张晓燕, 等. 光质对香椿芽苗菜生长和营养品质的影响[J]. 营养学报, 2014, 36(2):188-192.
- [24] Guo B, Liu Y G, Yan Q, et al. Spectral composition of irradiation regulate's the cell growth and flavonoids biosynthesis in callus cultures of *Saussurea medusa* Maxim[J]. Plant Growth Regulation, 2007, 52(3):259-263.
- [25] 谢宝东, 王华田. 光质和光照时间对银杏叶片黄酮、内酯含量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, 30(2):51-54.