

熊伟任,雷雨田,杨永森,等.不同波长蓝光对紫叶生菜品质形成的影响[J].江苏农业科学,2023,51(1):143-148.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.01.021

不同波长蓝光对紫叶生菜品质形成的影响

熊伟任,雷雨田,杨永森,胡永波,林碧英,申宝营

(福建农林大学园艺学院,福建福州 350002)

摘要:为探究不同波长蓝光对紫叶生菜生长品质和花青素含量的影响,以红皱品种紫叶生菜为研究对象,以白光(CK)为对照,设置蓝光峰值波长为 410 nm(BO)、450 nm(BF)、480 nm(BE)的 3 种红蓝光组合处理,各处理光照强度均为 $240 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,不同波峰蓝光处理下红(660 nm)蓝光比均为 1:2,研究 4 种光照条件对紫叶生菜生长、花青素合成及营养品质的影响。结果表明,紫叶生菜的鲜质量随着蓝光峰值波长增加,呈现先降低后上升的趋势。在不同波长蓝光处理下,峰值为 410 nm 照射下的紫叶生菜生物量最大。相对于对照组的处理,在不同波长蓝光处理下叶片表面颜色表现有所不同。其中,在蓝光波长为 450 nm 处理下的紫叶生菜叶片颜色用色差仪测出的 a 值最大,相较于波长为 410、480 nm 蓝光处理分别提高了 222.00 倍和 2.84 倍。此外,不同波长蓝光照射可促进全生长期可溶性蛋白、花青素、类黄酮和总酚的积累。其中,450 nm 蓝光处理下其含量最高,在处理 16 d,相较于 CK 花青素含量提高了 128%,可溶性蛋白含量提高了 41%,类黄酮含量提高了 71%,总酚含量提高了 13%。不同波长蓝光也刺激了苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性,相较于白光处理,分别提高了 8%、33%、20%。综上所述,不同波长蓝光处理均促进了次生代谢物的堆集,但在波长为 450 nm 的蓝光处理下紫叶生菜的次生代谢产物含量最高。因此,在植物工厂中采用红光和不同波长蓝光,可以有目的地调整生菜的生长和品质。

关键词:紫叶生菜;波长;蓝光;品质;花青素

中图分类号:S636.204 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)01-0143-05

生菜(*Lactuca sativa*)是世界比较受欢迎的蔬菜,近年来已成为我国设施及植物工厂中的主要蔬菜栽培类型,其多种营养价值使得在市场上的需求量持续走高。近年来,富含花青素的紫叶生菜也逐渐进入大众视野,花青素具有较强的抗氧化性,可消除体内自由基,减缓衰老的功效^[1]。

“万物生长靠太阳”揭示了光对于植物生长的重要性,光是植物生长发育过程中不可或缺的环境因子之一^[2]。利用 LED 光源对植物生长发育进行研究的相关试验已经进行了多年,并取得了可喜的成效。前人研究认为,LED 光源产生的红、蓝光能明显影响植物的生长^[3],并且改善植物的品质与产量^[4-5]。李聪聪等在红蓝光配比的研究中发现,紫

叶生菜中花青素含量随蓝光比例增加而提高^[6];余意等发现,红蓝光质配比可有效提升红色、紫色与绿色 3 种叶色生菜生长与品质^[7]。然而,目前研究多以探寻提升紫叶生菜品质与产量的最优红蓝光质配比为目的,对最优 LED 光源峰值的选择却鲜有研究。本试验通过测定不同峰值 LED 光源下,紫叶生菜生物量指标和相应品质指标的变化,选择最优峰值 LED 光源,旨在为紫叶生菜工厂化栽培的 LED 光源精细调控提供一些理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本次试验采用的生菜品种红皱是由北京绿东方农业技术研究所培育提供。肥料用普乐收 A、B 肥。

1.2 试验方法

试验于 2021 年 4—9 月进行。将紫叶生菜种子置于培养皿中,放置在催芽箱,箱内温度保持在 30 ℃ 催芽至种子露白。再将露白的种子播种至 60 孔穴盘中,在人工气候室内育苗。待幼苗生长 15 d 左右达到两叶一心,将生长一致的幼苗转移至水槽中。为研究不同波长 LED 蓝光对紫叶生菜生长

收稿日期:2022-02-19

基金项目:福建省教育厅中青年教师教育科研项目(编号:JAT210076);福建农林大学乡村振兴服务团队项目(编号:11899170126);福建农林大学科技创新专项基金(编号: CXZX2020141C、CXZX2016123)。

作者简介:熊伟任(1994—),河南信阳人,硕士研究生,研究方向为蔬菜栽培与设施环境调控。E-mail:1030572273@qq.com。

通信作者:申宝营,主要从事设施园艺研究。E-mail:shenby889@fafu.edu.cn。

及品质的影响,设置 LED 红蓝光总光照度 240 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光处理具有相同的光周期(12 h/12 h)、相同的昼夜温差(25/18 $^{\circ}\text{C}$)和室内湿度(60%),红蓝光光质比为 1:2,其中红光波长为 660 nm,蓝光波长分别为 410、450、480 nm,分别记为 BO、BF、BE。以 240 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的白光为对照(CK)组,光谱能量分布曲线如图 1 所示。营养液采取的是蔬菜类 A、B 肥,将 10.35 g 的 A、B 肥溶于 9 L 的水中。在定植 4、8、12、16 d 后,从每个处理中取 3 株苗,从心向外数第 3 张叶片进行指标测定,试验重复 3 次。

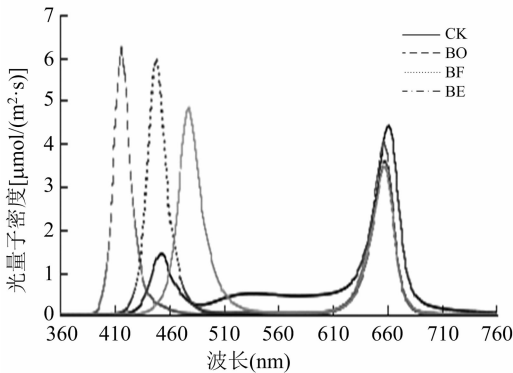


图1 光源光谱能量分布曲线

1.3 测定指标及方法

用电子游标卡尺测量株高(cm)和冠幅(cm),用精度为 0.000 1 的电子天平测地上部位鲜质量(g),用根系扫描仪测量叶面积(cm^2),用分光测色仪(3nh, YS3060)测定紫叶生菜叶片色度值,采用

FMS-2 便携式荧光仪测定叶片叶绿素荧光,蒽酮比色法测量可溶性糖含量^[8],用考马斯亮蓝染色法测量可溶性蛋白含量^[9],比色法测量抗坏血酸含量,用 Folin-酚法测量总酚含量,花色苷、类黄酮、苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性用试剂盒进行测定,试剂盒来自苏州科铭生物公司。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2010 和 DPS 整理数据和作图,并对不同处理得到的数据平均值进行多重比较。用最小显著差数法(LSD)进行差异显著性($P<0.05$)分析。

2 结果与分析

2.1 不同波长蓝光对紫叶生菜形态的影响

由表 1 和图 2 可知,在不同波长蓝光处理下各生长指标总体差异显著。随着蓝光波长的增加,各处理间株高、鲜质量、冠幅、叶面积整体呈先下降后上升趋势,且均以 BF 与 CK 间差异最大,分别比 CK 降低 41%、46%、40%、50%;BO 各项指标显著低于 CK,说明复合光处理下紫叶生菜地上部形态较不同峰值蓝光处理显著提高,其中 BF 处理明显低于其他处理。在不同波长的蓝光处理下,测量的色度 L 值与 b 值排序均为 CK>BO>BE>BF, a 值排序为 BF>BE>BO>CK, BF 处理 a 值较 BO、BE 分别提高了 222.00 倍、2.84 倍,表明在 BF 处理下的紫叶生菜花青素含量最高。

表 1 不同波长蓝光对紫叶生菜地上部的影响

光处理	株高 (mm)	鲜质量 (g)	冠幅 (mm)	叶面积 (cm^2)	色度值		
					L	a	b
CK	115.2±3.48a	30.2±0.96a	222.5±2.12a	1 873.2±161.1a	41.9±1.16a	-8.61±0.78c	28.1±1.9a
BO	87.0±3.23b	20.1±0.56b	159.0±0.96b	1 259.9±23.4b	38.6±1.96a	0.03±1.23b	23.5±1.4b
BF	67.8±1.04d	16.3±0.23d	133.6±1.76d	927.3±46.6c	19.7±1.99c	6.69±0.45a	7.6±1.2d
BE	77.1±5.13c	18.5±0.34c	148.3±6.18c	1 088.9±25.6bc	28.8±2.49b	1.74±0.27b	13.4±1.3c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.5$)。

2.2 不同波长蓝光对紫叶生菜可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

如图 3 所示,在试验处理 4~16 d,可溶性糖含量差异性显著,都低于处理 0 d,在处理 4 d,可溶性糖含量表现为 BF>BO>BE>CK。可溶性蛋白的含量的整体趋势表现为为先上升后下降。BO、BF、BE 处理均提高了可溶性蛋白含量,其中在 BF 处理下可溶性蛋白含量显著高于其他处理,在处理 16 d 表现为 BF>BE>BO>CK, BF 处理分别比 CK、BO、

BE 提高了 41%、31%、16%。

2.3 不同波长蓝光对紫叶生菜类黄酮和花青素含量的影响

如图 4 所示,紫叶生菜中类黄酮和花青素的含量受不同波长蓝光的影响,总体差异显著。紫叶生菜中类黄酮含量随处理时间呈先上升后下降的趋势,总体表现为 BF>BE>BO>CK, BF 条件下生长的紫叶生菜叶片中类黄酮含量最高,在处理 16 d 比 CK 高 71%。在不同波峰蓝光处理下,花青素含



图2 不同波长蓝光对紫叶生菜生长形态的影响

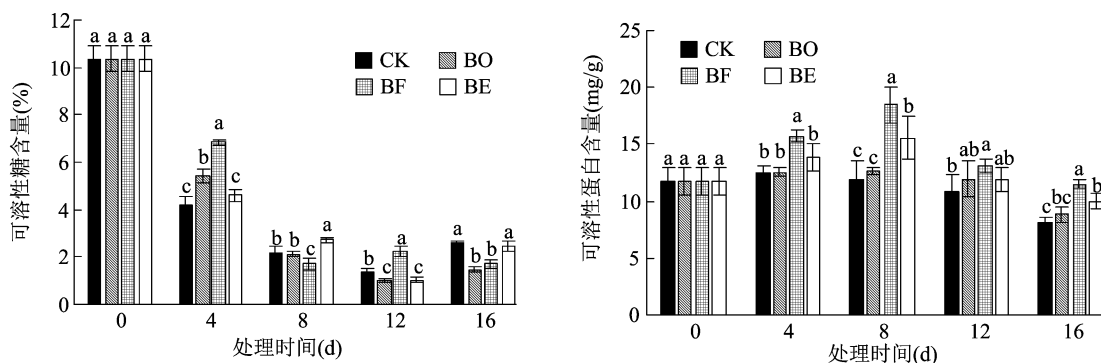
柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

图3 不同波长蓝光对紫叶生菜可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

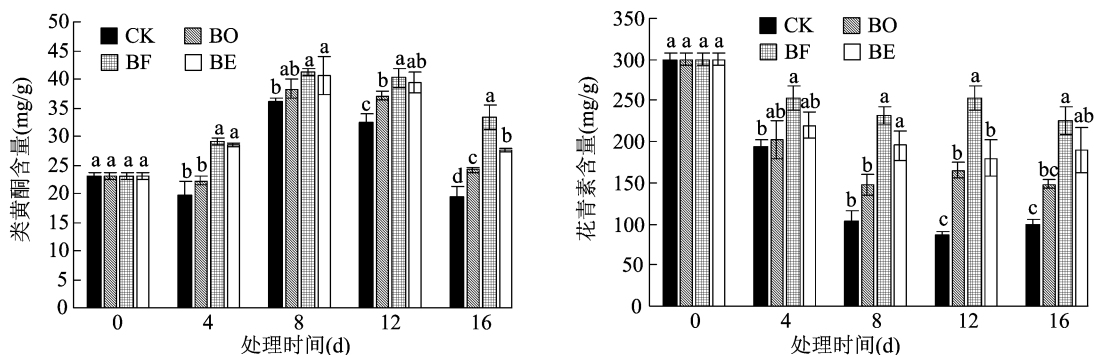


图4 不同波长蓝光对类黄酮和花青素含量的影响

量依次表为 BF > BE > BO > CK, 其中 BF 的叶片花青素含量最高, 处理 16 d, 在波长为 450 nm 的蓝光处理下比 CK 高 128%。

2.4 不同波长蓝光对总酚含量和 PAL 活性的影响

由图 5 可知, 在不同波长蓝光处理下, 总酚含量和 PAL 活性显著高于对照处理。叶片内总酚含量和 PAL 活性在 BF 与 BE 处理下无显著性差异, 但显著高于 CK 处理。在处理 16 d, BF 处理下叶片总酚含量比 CK 处理下高 13%。PAL 活性整体表现为 BF > BE > BO > CK, BF 与 BE 无显著性差异, 在处理 16 d, 与 CK 相比, BO、BF、BE 处理下叶片中 PAL 活性分别提高了 8%、33%。

2.5 不同波长蓝光对紫叶生菜抗坏血酸含量的影响

如图 6 所示, 在处理 4、8 d, BO、BF、BE 处理下的抗坏血酸含量无显著性差异, 在处理 12 d, 各处理间差异最明显。不同波长蓝光处理均能促进叶片中抗坏血酸的含量, BF 处理下抗坏血酸均高于其他光照处理, 表现为 BF > BE > BO > CK。在处理 12 d 的样品中, BF 处理的抗坏血酸含量相比其他处理分别提高了 10%、5%、3%。

3 讨论与结论

前人研究主要在不同红蓝光配比对紫叶生菜品

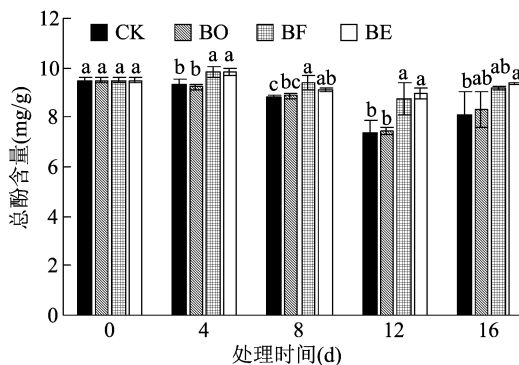


图5 不同波长蓝光对总酚含量和 PAL 活性的影响

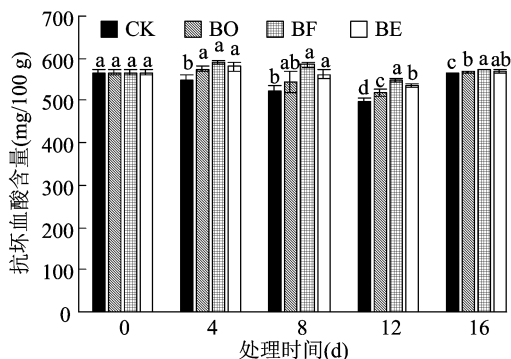
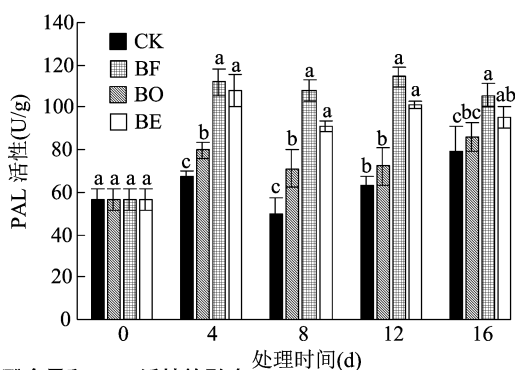


图6 不同波长蓝光对紫叶生菜抗坏血酸含量的影响

质的影响^[10]。到目前为止,关于不同波长蓝光对紫叶生菜品质的影响研究还很少。由于 LED 的广泛应用,光谱和强度的任意可控性,现在我们完全可以在可控的环境中将植物暴露在精确的光质下,提高作物产量和营养品质。在本研究中,不同波长蓝光照显著刺激紫叶生菜次级代谢物的积累,但抑制生菜的生物量产生。因此通过调控不同波长蓝光有助于提高紫叶生菜的品质,为水培紫叶生菜提供一种合理的照明模式。

3.1 不同波长蓝光对紫叶生菜形态的影响

光照对植物的生长发育不可或缺,植物通过一套光受体系统来接收不同波长的光子,影响着植物的生命周期。蓝光是作物生长过程中不可缺少的的光质,对作物的生长有重大的影响^[11]。本研究表明,不同波长蓝光照对紫叶生菜生长有显著的影响,株高、鲜质量、冠幅、叶面积显著低于白光处理,且随着蓝光波长的增加,呈先下降后上升的趋势,与高波等的研究结果^[12-13]相同,虽然试验中添加了红光,但并未表现出对植物生长促进的作用,可能是因为高比例蓝光的照射对植物的生长产生了抑制作用。光照是导致植物叶片颜色变化的主要原因之一,它从光强、光质和照射时间的长短来影响植物花青素的合成从而改变植物叶片的颜

色^[14]。王璐等对紫叶生菜花青素含量与色差指标进行回归分析,表明 L 、 a 、 b 均能反应紫叶生菜花青素含量^[15]。色差指标 L 代表明亮度的变化, L 值在 0~100 之间, $L=0$ 代表黑色, $L=100$ 代表白色; a 值代表红/绿之间的变化,当 a 值为正数时,色彩表现为偏红色,当 a 值为负数时,色彩表现为偏绿色; b 值代表黄/蓝之间的变化, b 为正值时,表现为黄色, b 值为负值时,颜色表现为蓝色^[16]。其中 L 、 b 值与花青素含量呈明显负相关, a 值与花青素含量呈明显正相关。本研究结果表明,在不同波长蓝光的处理下紫叶生菜的叶片颜色较深,可能是花青素含量较高的原因所导致的。

3.2 不同波长蓝光对紫叶生菜品质的影响

可溶性蛋白含量是评价蔬菜营养价值的主要指标之一。光质对植物的碳氮代谢有极大的影响,蓝光对植物生物量的积累有促进作用^[17]。本研究表明,与对照组的生菜相比,不同波长蓝光处理都显著提高了可溶性蛋白的含量。这与邵明杰对紫叶生菜^[18]和张立伟等对豌豆苗^[19]的研究结果相同,这可能是因为蓝光促进了 NR、NIR、GOGAT 等初级氮代谢相关酶活性^[20],从而有助于可溶性蛋白的合成。可溶性糖是植物储存能量的一种物质,也是果蔬甜度的主要来源,高含量的可溶性糖会让蔬菜的口感更好^[21]。高比例红光有助于提高可溶性糖的含量^[22]。卢贝通过不同光质对草莓品质影响的研究发现,在高比例红光的照射下草莓的可溶性糖含量较高^[23]。在处理 0 d,紫叶生菜可溶性糖含量均高于其他时间的处理,可能是因为幼苗期可溶性糖是主要生长物质;在处理 16 d,对照组处理的紫叶生菜可溶性糖的含量显著高于不同波长蓝光处理,这可能是因为蓝光抑制了蔗糖代谢相关酶活性的原因,从而导致了不同波长蓝光处理可溶性糖含量低于对照组。抗坏血酸普遍存在于新鲜的水

果蔬菜中,能够增强植物的抗逆性,Moradi 等在研究蓝光对藏红花光合性能和生物量的影响时发现,蓝光能提高藏红花抗坏血酸的含量^[24],本研究的结果与之相同。

3.3 不同波长蓝光促进紫叶生菜的次生代谢产物的产生

研究表明,植物中的抗氧化剂是抵御各种压力的复杂防御机制的一部分。植物组织中花青素的积累是植物遭受胁迫的一个标志,花青素这类类黄酮物质一方面作为抗氧化物质对植物起到保护的作用,另一方面可以在植物中起到结合植物毒素以及控制生长素运输来帮助调节应激反应的作用^[24]。蓝光被认为是一种能诱导酚类化合物积累和增强抗氧化能力的应激源^[25]。总酚类包括类黄酮和花青素,是一种有效的抗氧化剂,具有抗氧化 DNA 损伤和预防人类慢性疾病的能力,类黄酮结构中羟基的数量和定位对化合物的抗氧化和细胞保护潜力似乎很重要^[26]。花青素属于类黄酮的一种,花色苷合成生物途径也是类黄酮的合成途径的一个分支^[27]。PAL 是合成酚类化合物的关键酶,由光诱导^[28]。在本研究中,总酚含量和 PAL 活性随着蓝光的波长增加表现出先增加后降低的趋势,都高于对照组,这证实了蓝光在刺激酚类合成方面仍然有效。处理 4~16 d 时,不同波长蓝光处理紫叶生菜中黄酮含量明显高于对照组,且存在显著差异,表明蓝光有刺激黄酮类化合物的合成作用。在处理 16 d 时,各处理紫叶生菜中黄酮含量明显下降,且在蓝光波长为 450 nm 处理的紫叶生菜中黄酮含量最高,这可能是因为不同波长蓝光对植物后期生长阶段黄酮合成的影响不如前期。花青素含量的变化趋势与类黄酮不同在于,在处理 4~16 d 中,蓝光波长为 450 nm 处理的紫叶生菜花青素含量始终最大,且显著高于蓝光 410 nm 和蓝光 480 nm 处理下的花青素含量。据报道,蓝光诱导花青素合成也受叶片发育阶段的影响。二氢黄酮醇 4-还原酶(DFR)和花青素合成酶(LDOX/ANS)基因在幼叶中的表达水平较高,且随着叶片的发育而逐渐降低,在成熟叶中最低^[29]。这可能解释了紫叶生菜后期花青素含量活性下降的原因。

本研究利用蓝色发光二极管研究了不同波长蓝光照射对紫叶生菜生产和次生代谢产物积累的影响。不同波峰蓝光照射诱导了较高的次生代谢产物,也增加了紫叶生菜的营养品质,但对植物造

成了胁迫,表现为抗坏血酸含量较高、花青素含量较高、生物量产量显著降低。结果表明,采用红光加不同波长蓝光是有目的地调整生菜生长和质量的一种潜在方法。然而,需要进行更多的试验来确定最佳的红蓝光配比,以获得产量和营养品质更好的生菜。

参考文献:

- [1]王楠,徐小辉.紫叶生菜高品质栽培技术[J].上海农业科技,2020(1):76-77.
- [2]龚建华,文斌,李青峰,等.CO₂颗粒气肥对黄瓜、茄子生长发育及产量的影响[J].长江蔬菜,2000(12):39-40.
- [3]郑冬梅,李彩霞,林碧英,等.不同LED光质对紫甘蓝幼苗生长的影响[J].热带作物学报,2017,38(6):1058-1063.
- [4]高勇,李清明,刘彬彬,等.不同光质对比对紫叶生菜光合特性和品质的影响[J].应用生态学报,2018,29(11):3649-3657.
- [5]余意,杨其长,刘文科.LED红蓝光质对两种叶色生菜产量和光合色素含量的影响[J].农业工程,2014,4(S1):1-3.
- [6]李聪聪,吉家曾,陈增举,等.红蓝光质对比对两种叶色生菜生长及品质的影响[J].浙江农业科学,2019,60(12):2238-2241.
- [7]余意,杨其长,赵姣姣,等.LED光质对三种叶色生菜光谱吸收特性、生长及品质的影响[J].照明工程学报,2013,24(增刊1):139-145.
- [8]谢冰,饶在生,向金友,等.萘酚比色法测定烟叶中可溶性糖的不确定度评定[J].中国测试,2015,41(增刊1):10-13.
- [9]陈晓梅,刘雅文,程熠,等.考马斯亮蓝法蛋白定量标准曲线稳定性观察[J].中国公共卫生,2006,22(3):380-381.
- [10]邵明杰.LED红蓝光供光模式对紫叶生菜生长和品质的影响[D].北京:中国农业科学院,2021.
- [11]刘玉兵,王军伟,李洁,等.LED光质对蔬菜生长及品质影响研究进展[J].湖南农业科学,2020(12):105-108.
- [12]高波,杨振超,李万青,等.3种不同LED光质对比对芹菜生长和品质的影响[J].西北农业学报,2015,24(12):125-132.
- [13]陈文昊,徐志刚,刘晓英,等.LED光源对不同品种生菜生长和品质的影响[J].西北植物学报,2011,31(7):1434-1440.
- [14]郁敏,张亚辉.槭树叶色机理研究进展[J].世界林业研究,2016,29(3):30-34.
- [15]王璐,刘超杰,齐正阳,等.紫色叶用莴苣中花青素含量与色差指标的相关性[J].北京农学院学报,2018,33(3):44-48.
- [16]张圆圆,齐冬梅,刘辉,等.观赏向日葵的花色多样性及其与花青苷的关系[J].园艺学报,2008,35(6):863-868.
- [17]周成波.光质对小白菜生长及生理特性的影响[D].泰安:山东农业大学,2017.
- [18]邵明杰.LED红蓝光供光模式对紫叶生菜生长和品质的影响[D].北京:中国农业科学院,2021.
- [19]张立伟,刘世琦,张自坤,等.不同光质对豌豆苗品质的动态影响[J].北方园艺,2010(8):4-7.
- [20]高勇.光质对紫叶生菜生理特性及品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2019.
- [21]高莉平.萝卜营养品质和农艺性状的相关分析[D].杭州:浙江农林大学,2015.

王正林,孟令松,李校忠,等. 铁肥及其复配剂对紫金黄脆(金陵黄脆)桃树叶片黄化的防治效果[J]. 江苏农业科学,2023,51(1):148-154.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.01.022

铁肥及其复配剂对紫金黄脆(金陵黄脆)桃树叶片黄化的防治效果

王正林¹, 孟令松², 李校忠³, 穆家壮¹, 刘广勤⁴, 渠慎春¹, 余心怡¹, 陈卫平¹

(1. 南京农业大学,江苏南京 210095; 2. 徐州市果树研究所,江苏丰县 221700;

3. 徐州子午河生态农业开发有限公司,江苏丰县 221700; 4. 江苏省农业科学院,江苏南京 210014)

摘要:为探究不同种类铁肥及其复配剂对桃树叶片缺铁性黄化病的防治效果,以紫金黄脆(金陵黄脆)为试验材料,分别于2020年秋季、2021年春季开展试验。整树叶面喷施铁肥及其复配剂(第1次喷施结束2周后喷施第2次),随后检测在第1次喷施处理21 d后桃树叶片的SPAD值和活性铁含量。结果表明,无论在春季还是秋季,叶面施用铁肥及其复配剂均可以显著提高桃树叶片的SPAD值和活性铁含量。在2020年秋季,0.5% FeSO₄、0.3% 乙二胺四乙酸铁钠(EDTA-FeNa)、0.2%和0.3%螯合氨基酸亚铁、0.5%黄腐酸铁(FA)和0.5%柠檬酸铁分别为该类型铁肥的最适溶液类型及浓度,0.3% FeSO₄+0.2% K₂SO₄+0.3% H₃BO₃为防治效果最佳的铁肥复配剂。在2021年春季,0.3% FeSO₄、0.3%和0.5% EDTA-FeNa、0.3%螯合氨基酸亚铁、0.4%和0.5%的黄腐酸铁(FA)、0.5%柠檬酸铁分别为该类型铁肥的最适溶液类型及浓度,0.3% FeSO₄+0.2% K₂SO₄+0.3%赖氨酸为防治效果最佳的铁肥复配剂。综合2年铁肥及其复配剂处理的试验数据,0.3% FeSO₄+0.2% K₂SO₄+0.3%赖氨酸处理的桃树叶片的SPAD值和活性铁含量增幅最高,防治效果最佳。

关键词:桃;缺铁性黄化病;铁肥;叶绿素;活性铁

中图分类号:S662.106 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)01-0148-07

江苏省徐州市丰县位于黄河故道地区,属黄泛

冲积平原,设施桃树面积达2 000 hm²以上^[1]。紫金黄脆(金陵黄脆)是由江苏省农业科学院育成的离核、硬质的黄肉脆桃,其果形圆整、果面光洁、短毛,相比其姐妹系金陵黄露,紫金黄脆(金陵黄脆)的含糖量更高。设施促成栽培是丰县桃栽培的一大特色,引进紫金黄脆(金陵黄脆)新品种,不仅可为丰县桃产业的发展提供品种支持,还可为建立适宜丰县乃至江苏省的紫金黄脆(金陵黄脆)新品种高效栽培技术体系提供理论依据。然而,因丰县地区土壤为沙壤土质,容易出现因缺铁导致的桃树叶

收稿日期:2022-02-20

基金项目:国家重点研发计划(编号:2019YFD1000100);江苏省科学技术厅现代农业-苏北科技专项(编号:XZ-SZ202002);江苏省“一带一路”创新合作项目(编号:BZ2019012);江苏高校优势学科建设工程;江苏桃产业技术体系-丰县推广示范基地项目(编号:JATS[2021]065)。

作者简介:王正林(1997—),男,山东淄博人,硕士研究生,从事果树栽培生理研究。E-mail:1520341233@qq.com。

通信作者:陈卫平,硕士,高级实验师,从事果树栽培生理研究。E-mail:wpchen@njau.edu.cn。

[22]梁 玮,郝文琴,石 玉,等. 不同光质下外源锌对水培生菜生长和品质的影响[J]. 北方园艺,2021(18):7-13.

[23]缪依琳. 紫茎油菜花青素的积累特性及其抗旱能力初探[D]. 杭州:浙江大学,2021.

[24]Moradi S, Kafi M, Aliniaieifard S, et al. Blue light improves photosynthetic performance and biomass partitioning toward harvestable organs in saffron (*Crocus sativus* L.)[J]. Cells,2021,10(8):1994.

[25]Park Y G, Jeong B R. How supplementary or night-interrupting low-intensity blue light affects the flower induction in *Chrysanthemum*, a qualitative short-day plant[J]. Plants (Basel,

Switzerland),2020,9(12):1694.

[26]Pandey M M, Khatoon S, Rastogi S, et al. Determination of flavonoids, polyphenols and antioxidant activity of *Tephrosia purpurea*: a seasonal study[J]. Journal of Integrative Medicine, 2016,14(6):447-455.

[27]姜 立. 橙花龙胆 DHK 底物特异性 DFR 变体基因烟草的获得[D]. 长春:长春师范大学,2021.

[28]李卫星,杨舜博,何智冲,等. 植物叶色变化机制研究进展[J]. 园艺学报,2017,44(9):1811-1824.

[29]李 涛,李运丽,李志强,等. 叶片发育影响紫罗勒花青素的强光诱导和激发能分配[J]. 植物生理学报,2014,50(5):675-682.