

魏晓琼,贾文飞,张秋莹,等.  $GA_3$  处理对蓝莓叶片衰老过程中生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(3):137–141.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.03.022

# $GA_3$ 处理对蓝莓叶片衰老过程中生理特性的影响

魏晓琼<sup>1</sup>, 贾文飞<sup>1</sup>, 张秋莹<sup>1</sup>, 聂小兰<sup>1,2</sup>, 王 颖<sup>1,2</sup>, 李金英<sup>1,2</sup>, 吴 林<sup>1,2</sup>

(1. 吉林农业大学园艺学院, 吉林长春 130118; 2. 吉林省蓝莓研究中心, 吉林长春 130021)

**摘要:** 喷施赤霉素( $GA_3$ )能够不同程度地影响植株的生长发育,延缓植株叶片衰老进程,但在蓝莓上的研究鲜见报道。以 2019 年定植的半高丛蓝莓北陆和北高丛蓝莓 PL13 为试验材料,分别喷施 0(CK)、100(A1)、300(A2)、500(A3)、700(A4) mg/L 的  $GA_3$ ,测定叶片中的叶绿素含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性,研究不同浓度的  $GA_3$  对蓝莓植株叶片衰老的影响。结果表明,喷施 300 mg/L 的  $GA_3$  均能提高北陆和 PL13 蓝莓叶片中的叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白含量以及 SOD 酶活性,还能降低叶片中的 MDA 含量,影响植株叶片的衰老生理特性。喷施  $GA_3$  可以延缓蓝莓叶片衰老进程,其中 300 mg/L 的喷施浓度综合效果最好。

**关键词:** 蓝莓;  $GA_3$ ; 叶片衰老; 生理特性; 延缓衰老

**中图分类号:** S663.901 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)03-0137-04

蓝莓是杜鹃花科越橘属植物,是一种新型的世界性小浆果,除具有较高的经济价值<sup>[1]</sup>,还是一种保健食品,具有明目、抗衰老、抗癌、延缓记忆力衰退等功效,被联合国粮食及农业组织确认为人类五大健康食品之一,还被公认为 21 世纪最具发展潜力的果树树种<sup>[2]</sup>。目前,我国种植蓝莓的省市已有 27 个,不仅在北方的山东省、辽宁省、吉林省等地实现了蓝莓的产业化种植,还在贵州省、浙江省、湖北省、云南省等地进行了引种栽培<sup>[3]</sup>。随着蓝莓产业化的不断发展,人们对蓝莓果实品质的要求也越来越高,所以延长鲜果供应期,提高果实品质已然成为未来蓝莓的发展趋势,这就要求人们要通过各种手段调控其生长发育进程和果实品质等。目前已经有许多研究表明,赤霉素( $GA_3$ )在果树的生长发育过程中有重要的调节作用,外施  $GA_3$  不仅能显著

促进植物茎、叶生长,影响花芽分化,还可以促进果实发育,延缓植株衰老<sup>[4]</sup>。有研究表明,外施  $GA_3$  可以延缓红地球葡萄叶片叶绿素和蛋白质的降解,降低丙二醛(MDA)含量,延缓膜脂过氧化程度,从而使其植株的衰老进程减缓<sup>[5]</sup>。安迪研究发现,夏季喷施  $GA_3$  可以延缓兔眼蓝莓对其体内碳水化合物积累和利用,延缓整个植株的生长发育进程,延缓衰老<sup>[6]</sup>。植物生长调节剂可以调控植物的生长发育进程,延缓植株衰老,但植物生长调节剂在蓝莓上的应用现有研究较少。本研究通过研究不同浓度  $GA_3$  对蓝莓叶绿素含量、可溶性蛋白含量等的影响,筛选最佳  $GA_3$  喷施浓度,并应用到蓝莓生产上,以期促进蓝莓生长发育,以此来延缓蓝莓植株衰老,延长供果期,为高品质的蓝莓栽培提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于吉林省白山市靖宇县花园北口镇白山湖景区入口处(42°47′24″N,127°8′41″E)进行,海拔为 447 m,年平均降水量为 776.4 mm,年平均温度为 3.7℃,无霜期约为 130 d。

### 1.2 材料及处理

以 2019 年定植的长势正常、无病虫害的半高丛蓝莓北陆和北高丛蓝莓 PL13 为试验材料,分别用 0(CK)、100(A1)、300(A2)、500(A3)、700(A4) mg/L

收稿日期:2021-05-16

基金项目:吉林省科技发展规划(编号:20200402083NC、20200402113NC);吉林农业大学综合示范基地项目(编号:0214-202023181);吉林省靖宇县科技发展规划(编号:XBJ202016);吉林省重点领域省级标准化试点示范项目;吉林省“三区”人才支持计划科技人员专项(编号:202022309)。

作者简介:魏晓琼(1995—),女,山西武乡人,硕士研究生,从事果树生理生态及栽培技术研究。E-mail:1326595371@qq.com。

通信作者:吴 林,硕士,教授,从事蓝莓等小浆果品种选育、栽培生理和产业经济等全产业链技术研究。E-mail:310710966@qq.com。

GA<sub>3</sub> 于第 1 次采果后(7 月 20 日)进行喷施,喷施全树,至植株完全湿润且液体滴落时停止。每隔 7 d 喷施 1 次,共喷施 3 次。每个浓度处理 5 棵树,每个处理重复 3 次。叶片于 3 次全部喷施完的 30 d 后采取中长结果枝上的功能叶片并测量相关指标。

1.3 叶片生理指标测定方法

叶绿素测定方法:结合高俊凤的丙酮比色法<sup>[7]</sup>和高晓宇等的方法<sup>[8]</sup>,加以改良。将叶片去除叶柄和叶脉并剪碎,称取 0.2 g 置于试管中,加入无水乙醇与丙酮的体积比为 1∶1 的混合液 10 mL,进行黑暗处理。浸提至叶片变白,即可通过比色得出结果。

用蒽酮比色法<sup>[9]</sup>测定叶片可溶性糖含量;用考马斯亮蓝 G-250 染色法<sup>[9]</sup>测定叶片可溶性蛋白含量;用硫代巴比妥酸法<sup>[10]</sup>测定叶片丙二醛(MDA)含量;用氮蓝四唑(NBT)光氧化还原法<sup>[9]</sup>测定叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 制作图表,并用 SPSS 21.0 对试验数据进行方差分析以及差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 GA<sub>3</sub> 处理对北陆、PL13 叶片叶绿素含量的影响

叶片衰老的主要特征之一就是叶绿素降解,由表 1 可知,GA<sub>3</sub> 处理后,北陆总叶绿素的含量与叶绿素 a 的含量变化趋势一样,呈先上升后下降的趋势,当 GA<sub>3</sub> 浓度达到 500 mg/L 时,总叶绿素含量与对照相比无显著差异,而 GA<sub>3</sub> 浓度为 300 mg/L 时,总叶绿素含量显著升高,比对照高出 16.34%。PL13 喷施 GA<sub>3</sub> 后,虽然叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的

含量也呈先上升后下降的趋势,但是不同浓度的 GA<sub>3</sub> 均能显著提高叶绿素 a 和总叶绿素的含量,当 GA<sub>3</sub> 浓度为 300 mg/L 时,叶绿素 a 的含量显著高于对照,比对照高出 47.52%。说明外施植物生长调节剂 GA<sub>3</sub> 均能不同程度地延缓北陆和 PL13 蓝莓植株衰老,而且与对照相比,喷施浓度为 300 mg/L 时,延缓北陆和 PL13 叶片叶绿素降解的效果均最显著。而与对照相比,当外施 GA<sub>3</sub> 的浓度为 500、700 mg/L 时,对北陆叶片总叶绿素含量无显著影响,但不同浓度的 GA<sub>3</sub> 均能显著延缓 PL13 叶片的衰老。

2.2 GA<sub>3</sub> 处理对北陆、PL13 叶片可溶性糖含量的影响

由图 1 可知,喷施植物生长调节剂 GA<sub>3</sub> 后,可以提高北陆叶片中的可溶性糖含量,与对照相比,喷施浓度为 100、300、500 mg/L 时,叶片的可溶性糖含量均显著提高,其中处理浓度为 100 mg/L 时,效果最为显著,较对照高出 26.77%,GA<sub>3</sub> 浓度为 700 mg/L 时,可溶性糖的含量与对照相比无显著差异。当 GA<sub>3</sub> 处理 PL13 时,其叶片的可溶性糖含量呈先上升后下降的趋势,而且当喷施浓度为 100、300 mg/L 时,可溶性糖的含量分别比对照高 28.82%、15.42%,差异显著,而喷施浓度达到 500 mg/L 时,与对照差异不显著。结果表明,不同浓度的 GA<sub>3</sub> 均能不同程度地影响北陆和 PL13 叶片的可溶性糖含量,其中浓度为 100、300 mg/L 时,可溶性糖含量较高。

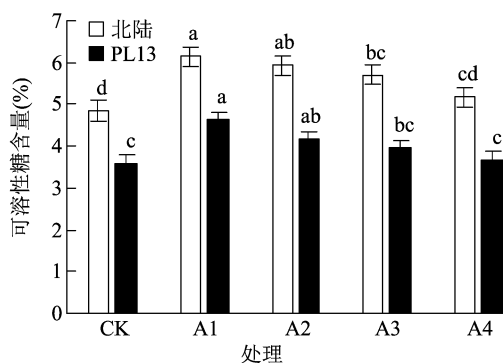
2.3 GA<sub>3</sub> 处理对北陆、PL13 叶片可溶性蛋白含量的影响

可溶性蛋白含量的下降是植物叶片衰老的重

表 1 GA<sub>3</sub> 处理后北陆、PL13 叶片的叶绿素含量

品种	处理	叶绿素 a (mg/g)	叶绿素 b (mg/g)	总叶绿素含量 (mg/g)
北陆	CK	0.707 ± 0.025c	0.149 ± 0.068b	0.857 ± 0.085b
	A1	0.762 ± 0.022b	0.152 ± 0.014b	0.914 ± 0.033b
	A2	0.823 ± 0.018a	0.177 ± 0.008a	0.997 ± 0.011a
	A3	0.675 ± 0.085cd	0.150 ± 0.033b	0.825 ± 0.057b
	A4	0.659 ± 0.058d	0.154 ± 0.017b	0.813 ± 0.075b
PL13	CK	0.644 ± 0.029d	0.086 ± 0.038c	0.730 ± 0.035e
	A1	0.734 ± 0.021bc	0.091 ± 0.022bc	0.826 ± 0.042c
	A2	0.950 ± 0.038a	0.108 ± 0.010a	1.058 ± 0.029a
	A3	0.869 ± 0.005b	0.112 ± 0.009ab	0.981 ± 0.012b
	A4	0.718 ± 0.034c	0.080 ± 0.007c	0.798 ± 0.021cd

注:同列数据后不同小写字母表示同一品种不同处理在 0.05 水平上差异显著。



柱上不同小写字母表示同一品种不同处理差异显著 ( $P < 0.05$ )。下图同

图1  $GA_3$  处理后北陆、PL13 叶片可溶性糖含量

要指标之一,用不同浓度的  $GA_3$  处理北陆和 PL13,对其叶片中可溶性蛋白含量的影响不尽相同。由图 2 可知,北陆叶片的可溶性蛋白含量先升高后下降,当喷施  $GA_3$  的浓度为 300、500 mg/L 时,北陆蓝莓叶片中的可溶性蛋白含量均显著高于对照,分别高出 11.24%、10.27%。PL13 叶片可溶性蛋白的含量总体呈上升趋势,只有喷施  $GA_3$  浓度为 100 mg/L 的处理与对照相比无显著差异,当喷施  $GA_3$  浓度为 500 mg/L 时,较 100 mg/L 处理叶片中的蛋白质含量无明显差异,但显著高于对照。说明用  $GA_3$  处理北陆和 PL13 均能提高其叶片中可溶性蛋白的含量,而叶片中可溶性蛋白主要是 1,5 - 二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶 (RuBisCO),被用于固定二氧化碳,为光合作用作贡献。因此喷施 300、500 mg/L 的  $GA_3$  能有效延缓北陆和 PL13 蓝莓叶片的衰老进程。

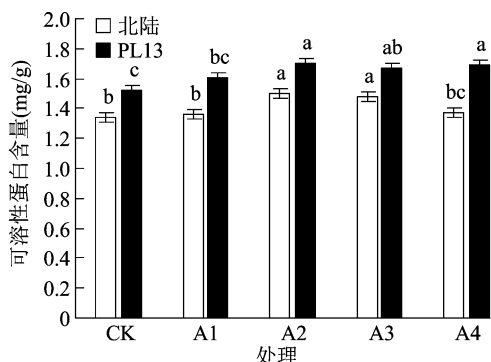


图2  $GA_3$  处理后北陆、PL13 叶片可溶性蛋白含量

#### 2.4 $GA_3$ 处理对北陆、PL13 叶片 MDA 含量的影响

植物衰老过程中会产生 MDA,MDA 是膜脂过氧化作用的产物之一,MDA 含量能反映植物膜脂过氧化程度,累积过多,膜脂过氧化严重,加速植物衰老。由图 3 可知,用浓度为 300、500 mg/L 的  $GA_3$  处理时,会显著降低北陆叶片中的 MDA 含量,与对照相比分别降低了 11.95%、16.24%。300、500、

700 mg/L  $GA_3$  均能显著降低 PL13 叶片中的 MDA 含量,其中浓度为 300、700 mg/L 时,降低效果最为显著,分别降低 22.80%、24.06%。结果表明,外施  $GA_3$  浓度为 300、500 mg/L 时,均能显著降低这 2 种蓝莓叶片中的 MDA 含量,缓解其膜脂过氧化程度,延缓叶片衰老。

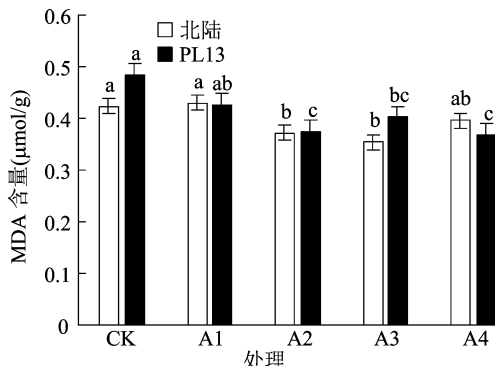


图3  $GA_3$  处理后北陆、PL13 叶片 MDA 含量

#### 2.5 $GA_3$ 处理对北陆、PL13 叶片 SOD 活性的影响

超氧化物歧化酶是一种清除超氧阴离子自由基 ( $O_2^- \cdot$ ) 的酶,能减缓活性氧对机体的毒害,增强抗逆性,延缓衰老。由图 4 可知,不同浓度的  $GA_3$  均能不同程度地影响北陆叶片中 SOD 的活性,当喷施浓度为 100 mg/L, SOD 的活性达到最高。不同浓度的  $GA_3$  处理 PL13,其叶片中 SOD 的活性随  $GA_3$  浓度的升高呈先升高后下降的趋势,而且与对照相比,当喷施浓度达到 300 mg/L 时, SOD 的活性最高, 500、700 mg/L 的喷施浓度与之相比, SOD 的活性显著降低,但较对照相比, SOD 的活性仍显著提高。结果表明,喷施  $GA_3$  浓度为 300 mg/L 时,均能较为有效地提高 2 种蓝莓叶片中的 SOD 活性,加速清除活性氧,延缓 2 种蓝莓植株的衰老。

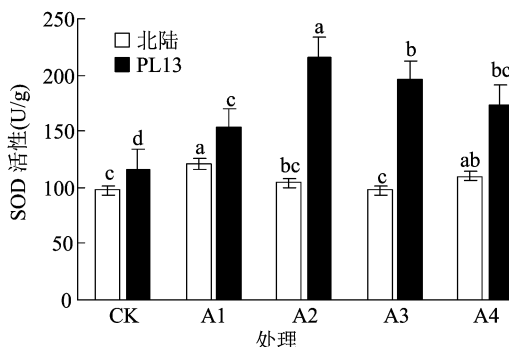


图4  $GA_3$  处理后北陆、PL13 叶片 SOD 活性

### 3 讨论与结论

本研究表明外施不同浓度的  $GA_3$  可以不同程

度地提高蓝莓叶片中的叶绿素含量,缓解叶片衰老进程。这与单守明等的研究结果<sup>[11]</sup>一致,即喷施一定浓度的 GA<sub>3</sub> 可以在一定程度上提高草莓和瑞卡蓝莓叶片中的叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量,提高光合速率。此外,还有研究表明,施用 GA<sub>3</sub> 可以延缓叶片中的叶绿素降解,提高可溶性糖和可溶性蛋白等的含量,延缓植株叶片衰老<sup>[12-13]</sup>。叶片中的可溶性糖和可溶性蛋白在植株的新陈代谢过程中起重要作用,可溶性糖为植株的生长发育提供碳素营养,可溶性蛋白多数是具有催化作用的酶,主要影响植株叶片的光合作用,也是反映植株衰老的重要特征之一<sup>[14]</sup>。已有研究发现用植物生长调节剂 GA<sub>3</sub> 处理可以延缓叶片中蛋白质的降解,提高可溶性糖的含量,延缓植株衰老<sup>[15]</sup>。本试验结果也表明,喷施一定浓度的 GA<sub>3</sub> 可以提高可溶性糖和可溶性蛋白的含量,其中浓度为 300、500 mg/L 时效果较好,可以延缓不同品种的蓝莓叶片衰老,证明较高浓度的 GA<sub>3</sub> 能够更有效地缓解植株叶片衰老,这与 Li 等的研究结果<sup>[16]</sup>类似。

植物衰老过程中,除了叶绿素和蛋白质等降解外,还会出现膜脂过氧化作用,产生大量的 MDA。过量的 MDA 积累,会增加细胞膜的相对透性,导致植物体内的营养物质流失,加速细胞和植物组织的衰老<sup>[17]</sup>。本试验结果表明,施用 GA<sub>3</sub> 之后可以降低 2 种蓝莓叶片中的 MDA 含量,这与王帅等在葡萄、厚皮甜瓜上的研究结果<sup>[18-19]</sup>一致。除此之外,GA<sub>3</sub> 可以提高超氧化物歧化酶活性,SOD 活性的提高可以通过加速清除蓝莓叶片中的活性氧,减缓膜脂过氧化作用,从而延缓蓝莓叶片衰老。曲亚英等的研究也证明,施用 GA<sub>3</sub> 可以延缓甜椒植株 SOD 酶活性的下降,减缓后期植株衰老<sup>[20]</sup>。植物衰老时,植株叶片叶绿素降解,可溶性糖和可溶性蛋白含量下降,细胞膜结构被破坏,会加速其叶片中活性氧和丙二醛的产生,从而导致膜脂过氧化作用加剧<sup>[21-22]</sup>。而叶片中活性氧产生的同时,也会导致细胞内抗氧化酶活性提高,清除部分活性氧,但这些酶的活性会随着细胞的衰老而下降<sup>[23]</sup>。本研究表明外施 GA<sub>3</sub> 可以提高可溶性蛋白的含量,降低 MDA 的产生,提高 SOD 活性。可能是由于赤霉素具有促进 mRNA 转录和翻译的作用,从而促进蛋白质合成,提高酶活性,加速活性氧清除,使细胞膜结构稳定,从而减少 MDA 的积累,延缓膜脂过氧化作用,减缓叶绿素降解,从而实现延缓植株衰老进程的

目的<sup>[24]</sup>。

第 1 次采果后(7 月 20 日)对半高丛蓝莓北陆和北高丛蓝莓 PL13 进行 GA<sub>3</sub> 喷施处理,可使北陆和 PL13 叶片中的叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白含量及 SOD 活性均有不同程度的提高,还降低了 2 种蓝莓叶片中的 MDA 含量。综合来看,在此时期喷施 300 mg/L GA<sub>3</sub> 效果较好。本试验只研究了一个时期的喷施影响,也并没有进行内源激素的测量,所以花期喷施试验,以及具体的激素含量变化趋势和影响还需要进一步研究分析。

#### 参考文献:

- [1] 李亚东,张志东,吴林. 蓝莓果实的成分及保健机能[J]. 中国食物与营养,2002,8(1):27-28.
- [2] 李丽敏. 中国蓝莓产业发展研究[D]. 长春:吉林农业大学,2011.
- [3] 李亚东,裴嘉博,陈丽,等. 2020 中国蓝莓产业年度报告[J]. 吉林农业大学学报,2021,43(1):1-8.
- [4] 张国华,张艳洁,丛日晨,等. 赤霉素作用机制研究进展[J]. 西北植物学报,2009,29(2):412-419.
- [5] 谭瑶,王文举,张亚红. 设施葡萄延后栽培中赤霉素处理对叶片衰老的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2007(4):18-20,23.
- [6] 安迪. 赤霉素对兔眼蓝莓生长发育的影响研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2018.
- [7] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 北京:世界图书出版公司,2000.
- [8] 高晓宇,邓浪,付开强,等. ‘巍山红雪梨’和‘美人酥’叶绿素、花色苷和类黄酮的动态变化分析[J]. 果树学报,2016,33(增刊1):83-89.
- [9] 张治安,陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 长春:吉林大学出版社,2008:101-181.
- [10] 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,2000:184-263.
- [11] 单守明,刘国杰,李绍华,等. 秋季叶面喷施 IAA、6-BA 或 GA<sub>3</sub> 对草莓植株的影响[J]. 果树学报,2007,24(4):545-548.
- [12] Rosenvasser S, Mayak S, Friedman H. Increase in reactive oxygen species (ROS) and in senescence-associated gene transcript (SAG) levels during dark-induced senescence of *Pelargonium* cuttings, and the effect of gibberellic acid[J]. Plant Science, 2006, 170(4):873-879.
- [13] 李金航,郭丽丽,孔祥生,等. 6-BA 和 GA<sub>3</sub> 对牡丹叶片衰老过程中生理特性的影响[J]. 植物生理学报,2014,50(8):1243-1247.
- [14] Nam H G. The molecular genetic analysis of leaf senescence[J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, 8(2):200-207.
- [15] 朱广慧,唐蓉,邓波,等. 赤霉素对东方百合延缓衰老及采后生理的影响[J]. 江苏农业科学,2011,39(5):385-386.
- [16] Li J R, Yu K, Wei J R, et al. Gibberellin retards chlorophyll degradation during senescence of *Paris polyphylla* [J]. Biologia Plantarum, 2010, 54(2):395-399.

王 涛, 黄语燕, 陈永快, 等. 不同复配基质对南方设施金线莲生长及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(3): 141–148.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.03.023

# 不同复配基质对南方设施金线莲生长及品质的影响

王 涛<sup>1</sup>, 黄语燕<sup>1</sup>, 陈永快<sup>1</sup>, 兰 婕<sup>1</sup>, 张剑亮<sup>2</sup>, 康育鑫<sup>1</sup>

(福建省农业科学院数字农业研究所, 福建福州 350003; 2. 龙岩草韵堂农业科技发展有限公司, 福建龙岩 364214)

**摘要:**探索南方温室大棚室内金线莲无土栽培最优基质配方, 为福建设施金线莲规模化无土栽培提供理论依据。以“红霞”金线莲为供试材料, 以常规栽培基质草炭、珍珠岩、蛭石作为材料, 通过不同混配方式, 研究金线莲栽培前后不同配方的理化性质、金线莲生长及养分的差异, 明确不同配方对金线莲生长、生理及有效成分的影响。经过 7 个多月的栽培, 基质的理化性质总体呈现容重及通气孔隙度下降的趋势, 总孔隙度、持水孔隙度及 EC 值呈上升趋势, 但 pH 值变化无规律性。配方 T<sub>6</sub> (草炭: 蛭石 = 3 : 1) 在株高、根数、节间距、地上部鲜质量、地上部干质量、地下部干质量方面表现优于 CK, 其中株高较 CK 显著增加 18.44%, 根数和节间距分别较 CK 增加 6.26%、12.10%, 地上部鲜质量、地上部干质量和地下部干质量分别较 CK 提高 34.94%、41.06%、12.70%; 单位面积产量最高, 较 CK 增加了 23.54%, 同时可节省成本约 2 025 元/667 m<sup>2</sup>。配方 T<sub>2</sub> 在根长、节间数、最大叶面积和地下部鲜质量方面优于 CK, 较 CK 分别提高 14.65%、12.51%、31.00%、12.14%, 单位面积产量次于配方 T<sub>6</sub>, 较 CK 增加了 16.23%, 可节省成本约 3 240 元/667 m<sup>2</sup>。草炭: 蛭石 = 3 : 1 (体积比) 为设施内金线莲栽培最优配方, 合理的配方能够为金线莲提供良好的根际环境, 提高其生物量的积累。

**关键词:**金线莲; 基质; 生长; 生理; 品质; 无土栽培

**中图分类号:**S682.310.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2022)03-0141-08

金线莲 [*Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl.] 为兰科开唇兰属的一种多年生草本植物, 主要分布在我国福建、浙江、江西以及台湾等地区<sup>[1]</sup>。作为一种名贵药用植物, 可以全草入药, 富含多糖、

黄酮类、氨基酸、生物碱等成分, 具有抗衰老、增强人体免疫力等作用, 还被用于预防和治疗糖尿病、高脂血症、肝炎、肿瘤等疾病<sup>[2-4]</sup>, 其中特有的金线莲苷成分具有修复受损胰岛细胞并恢复正常胰岛素分泌的作用<sup>[5]</sup>。金线莲喜阴凉及潮湿的环境, 其生长最适温度为 20~28℃, 低于 10℃ 时生长速度缓慢, 高于 30℃ 时会产生高温胁迫, 影响其生长<sup>[6]</sup>。目前, 金线莲人工栽培主要有林下栽培和大棚设施栽培 2 种模式, 其中大棚设施金线莲栽培上鲜有针对无土基质配方的报道, 不同配方基质理化性质对金线莲生长及营养成分的影响需要进一步

收稿日期: 2021-06-02

基金项目: 南方丘陵农情监测科技创新团队 (编号: CXTD2021012-3); 福建省农业科学院一般项目 (编号: Sfjd1941)。

作者简介: 王 涛 (1992—), 男, 福建福州人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为设施农业。E-mail: 793831167@qq.com。

通信作者: 陈永快, 硕士, 副研究员, 主要从事设施农业、数字农业研究。E-mail: stonecyk@126.com。

[17] Hameed A, Goher M, Iqbal N. Drought induced programmed cell death and associated changes in antioxidants, proteases, and lipid peroxidation in wheat leaves[J]. *Biologia Plantarum*, 2013, 57(2): 370–374.

[18] 王 帅. 设施葡萄延迟栽培叶片衰老生理及抗衰老技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.

[19] 李 田. 外源赤霉素和抗坏血酸对厚皮甜瓜坐果节位叶片早衰的调控机理研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.

[20] 曲亚英, 常 涛, 陶兴林, 等. 外源激素处理对甜椒生长发育及后期植株衰老的影响[J]. *北方园艺*, 2008(7): 4–7.

[21] Tewari R K, Singh P K, Watanabe M. The spatial patterns of oxidative stress indicators co-locate with early signs of natural

senescence in maize leaves[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35(3): 949–957.

[22] Bieker S, Riester L, Stahl M, et al. Senescence-specific alteration of hydrogen peroxide levels in *Arabidopsis thaliana* and oilseed rape spring variety *Brassica napus* L. cv. Mozart[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2012, 54(8): 540–554.

[23] Dai H P, Zhang P P, Lu C, et al. Leaf senescence and reactive oxygen species metabolism of broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) under drought condition[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(12): 1655–1660.

[24] 徐 践, 程玉琴. 园艺植物生物学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.