

孙协平, 钟 美, 梁 东, 等. 硒元素调控富硒高褪黑素甜樱桃生产的探讨(综述)[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4): 146–152.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.04.022

硒元素调控富硒高褪黑素甜樱桃生产的探讨(综述)

孙协平¹, 钟 美¹, 梁 东², 夏 萍¹, 冉卫军¹, 杨 沙¹, 田 洁¹, 黄胡铃¹, 向宇慧¹, 寇琳羚³, 罗友进⁴

(1. 长江师范学院现代农业与生物工程学院, 重庆 408100; 2. 四川农业大学园艺学院, 四川成都 411130;

3. 重庆市农业技术推广总站, 重庆 401121; 4. 重庆市农业科学院, 重庆 401329)

摘要:甜樱桃味美、营养价值高并含有褪黑素。硒元素是人体必需元素,也是植物有益元素,在提高作物产量、品质、抗逆等方面有着重要作用。富硒高褪黑素甜樱桃将备受消费者的青睐,也是育种科学研究追求的目标之一。然而褪黑素在植物体内的合成代谢途径尚未全面清晰,硒在植物体内的吸收、转运和贮存也未完全明确。本文从甜樱桃的营养、观赏和应用方面明确了甜樱桃具有的价值;从富硒水果的价值、硒对甜樱桃品质及褪黑素的影响方面进行探讨,生产富硒甜樱桃较为容易,而要达到高褪黑素水平有一定的不确定性;从植物体内褪黑素合成途径、甜樱桃褪黑素合成途径、硒对甜樱桃褪黑素合成途径的影响等方面进行探索,明确植物体内褪黑素合成途径具有多样性,硒调控植物体内褪黑素含量具有复杂性,为硒调控甜樱桃褪黑素含量提供一定的理论方向。

关键词:富硒;高褪黑素;合成途径;甜樱桃

中图分类号:S662.501 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)04-0146-06

目前,世界上生产种植的樱桃主要有甜樱桃 [*Cerasus avium* (Linn.) Moench.]、中国樱桃 [*Cerasus pseudocerasus* (Lindl.) G. Don]、酸樱桃 (*Cerasus vulgaris* Mill.)、毛樱桃 [*Cerasus tomentosa* (Thunb.) Wall.] 等。我国市场上主要销售的樱桃果实是前 2 种^[1],其中甜樱桃又称欧洲甜樱桃、大樱桃、车厘子,是蔷薇目蔷薇科樱属植物,原产于欧洲东南、亚洲西部以及非洲西北部地区。我国现有樱桃栽培面积约 26.67 万 hm²,甜樱桃 23.33 万 hm²^[2],是世界甜樱桃主要生产国之一。随着产业的发展,富硒(Se)高褪黑素甜樱桃的生产也将成为研究热点之一。那么,硒能否提高甜樱桃褪黑素的合成?本综述将系统分析甜樱桃、硒和褪黑素三者之间的关系,研究能否通过调控硒的施用技术来提高褪黑素含量,为富硒高褪黑素甜樱桃的生产提供依据。

1 甜樱桃的主要价值

甜樱桃因其早熟性和优良品质而深受消费者喜爱,这主要与其色泽、甜度、酸度、硬度等品质有关^[3],其果实中的总抗氧化活性、总酚类化合物、花

青素和维生素 C 含量等品质也备受关注。甜樱桃果实总抗氧化能力为 1.02 mmol/100 g,高于苹果(0.29 mmol/100 g)、香蕉(0.2 mmol/100 g)、梨(0.18 mmol/100 g),略低于李子(1.06 mmol/100 g)、柑橘(1.14 mmol/100 g)等水果^[4]。甜樱桃总酚类含量为 44.3~87.9 mg 没食子酸/100 g^[5],维生素 C 含量为 3.15~19.52 mg/100 g^[6]。甜樱桃果质量一般为 5.0~15.0 g,比中国樱桃和欧洲酸樱桃大。可溶性固形物含量与中国樱桃不相上下,比欧洲酸樱桃高^[1,7-8]。某些品种甜樱桃的褪黑素含量高,对提升睡眠有极大的帮助^[6,9]。

国内外已有许多果树运用于园林绿化中。甜樱桃树为多年生落叶乔木,可单株种植、丛植、列植或成片种植,适合种植在山地、平原、城市道路、别墅、花园、公园等地^[10],也可以种植在庭院中,而经过矮化后的甜樱桃可作为楼房家庭的阳台观赏植物。可从树形、花果型、花果香、叶色等方面欣赏^[11]。单一品种花期虽在 10 d 左右,采用多品种交错种植可将花期延长 20 d 左右,达到美化乡村、促进观光旅游收入的效果。果的观赏价值主要体现在果色缤纷,从未成熟果的绿油油到成熟果的白、黄、橙、鲜红、紫、紫红、紫黑色以及 2 种颜色相间等,增加了视觉的美感。果实在形态上有心形、肾形、圆形、扁圆形、椭圆形、卵形等。甜樱桃种子清洗干净后,用塑料自封袋装好置于冰箱保鲜层,通

收稿日期:2022-03-14

基金项目:国家自然科学基金(编号:31901972)。

作者简介:孙协平(1983—),女,山东烟台人,博士,讲师,主要从事果树生理与生态方面的研究。E-mail:xieping444@163.com。

过 4~6 个月的低温处理(0~7℃),种子破壳萌发后进行盆栽播种,可观赏幼苗。

甜樱桃树的根、茎、叶、果实、核仁均可入药,随着甜樱桃种植面积的不断扩大,合理开发甜樱桃树资源,意义重大^[12]。此外,甜樱桃树的叶子还可分离出沉香醇,占树叶中挥发性油总量的 8.5% 左右^[13],而沉香醇是一种非环状单萜,具有清甜的花香味,具有抗炎、抗氧化、镇定、抗菌及止痉挛等作用^[14]。甜樱桃树心材为淡红色至棕色,纹理通直,可用作很好的表面加工材料^[15]。

2 硒在甜樱桃上的应用

2.1 富硒水果的价值

20 世纪 70 年代前,人们将硒定义为有毒害元素。随着人类认知水平的提高,世界卫生组织和国际营养组织把硒元素定义为人体和动物必需的微量元素。据中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 2017 年发布的最新《中国居民膳食营养素参考摄入量》指出,成人每天硒平均需要量为 50 μg,最高摄入量为 400 μg。我国 39%~61% 的人口硒摄入量低于 26~34 μg/d^[16],摄入量严重不足。进入 21 世纪 20 年代,人们需求已经从“物质文化的需要”转变为“美好生活的需要”,饮食供应中的营养性和安全性必然会成为民生焦点。2022 年我国已经步入老龄化社会,老龄化程度持续加深,预计 2050 年我国老年人口将增至总人口的 1/3^[17]。面临人体新陈代谢能力、机体各种功能逐渐减退等重要问题,人们可以通过食用既有营养又有保健功能的食品来实现“医食同源”,从而达到延年益寿、增强体质的目的。硒的营养价值和医疗保健价值也是研究热点之一。

食用富硒水果可作为一种重要手段,既能提高国民的硒摄入量,还能达到一定的保健作用。天然富硒农产品主要来自高硒地区,如湖北恩施、陕西紫阳等地。而我国是一个缺硒大国,在自然状态下水果的含硒量较低,鲜有达到富硒标准(10~50 μg/kg FW)^[16,18]。通过土壤施用硒肥或者叶面喷施硒肥是获得富硒水果的主要途径之一^[19]。富硒樱桃、苹果、梨、火龙果、葡萄、柑桔、荔枝、杨梅等应运而生。但富硒水果产品的市场价值尚未充分挖掘,仍然存在广阔的市场前景^[20]。

2.2 硒对甜樱桃品质的影响

叶面喷施 4 种浓度的硒肥能够提高果实中的超

氧化物歧化酶活性,降低丙二醛含量和脯氨酸的积累^[21]。落花后,喷洒 2 次亚硒酸钠,间隔 7 d 分别喷施浓度为 10、20、40 mg/L 亚硒酸钠的果实硒含量显著高于对照,并达到富硒食品标准^[22]。在品质方面,叶面施用硒增加了单果质量和硬度,降低了可滴定酸和可溶性固形物含量,但均未达到显著水平;同时提高了维生素 C 含量,10、20 mg/L 的硒浓度处理达到显著水平^[22]。硒对甜樱桃果实品质有一定的促进作用,这与硒在其他果树上施用的效果相似^[23-24]。叶面喷洒不同浓度硒后,甜樱桃果实中的平均果质量、果实硬度、维生素 C 含量提高,可滴定酸含量降低,果实中硒含量随着硒浓度的增加而增加,且降低了重金属含量^[21-22]。

与叶面喷施相比,根施硒肥能够显著提高硒的积累,并增加可食用部分的安全性^[19,25]。此外,根施硒肥在提高果实产量和品质的同时,还能促进果树的生长、提高抗氧化水平^[26-29]。目前,使用的硒肥形态主要包括硒酸盐、亚硒酸盐、硒粉、有机硒,其中硒酸盐对植物的损害度低于亚硒酸盐,并且植物对硒酸盐的富集转运能力高于亚硒酸盐^[30-31]。商品化的硒肥种类繁多,对于多年生的果树应注重其肥料的利用率以及施用时间^[26,32]。根施硒肥对甜樱桃品质的影响尚未见报道。早在 1986 年 Angradi 等研究表明,根系施用亚硒酸钠导致黑樱桃(*Prunus serotina* Ehrh.)的硒含量增加;当土壤硒含量在 10 mg/kg 时,降低了幼树直径;当叶片硒浓度为 10 mg/kg(干质量)时,致死率为 50%^[33]。有研究指出,根施 2 mg/L 的硒酸钠、亚硒酸钠处理二年生的甜樱桃(布鲁克斯、红蜜),甜樱桃叶片硒含量在硒酸钠处理下显著高于亚硒酸钠处理^[34]。近期,笔者所在课题组也做了一系列根施硒处理对甜樱桃生长、生理以及果实品质方面的影响研究。根据前期研究结果,在 2021 年以重庆市丰都县高山区 4 年生休眠期甜樱桃为试验材料,以硒酸钠(硒酸盐)为硒源,并与田间生产的杂草堆肥相结合,利用环保无纺布袋组装成袋装肥,每株施用 77 mg,分析两边(果树两侧)和一边(一侧)施用对萨米脱甜樱桃果实品质和硒含量的影响。2 种施肥方式对甜樱桃单果质量、果核质量、果实横纵经、可溶性固形物、总酚含量影响不显著,但均能提高果实硒含量和维生素 C 含量,这与戚霄晨等的研究结果^[22]相似,其中果实硒含量提高达到显著水平,而仅有一边施用维生素 C 含量与对照达到显著水平(表 1)。试验中

甜樱桃果实平均含水量为 87.85%,通过折算,果实
硒含量均大于 0.01 mg/kg(鲜质量),说明这 2 种施

硒肥方式均能够获得富硒甜樱桃果实。综合考虑,
采用一边施用方法较好,也较为省力。

表 1 不同施肥方式对甜樱桃果实品质的影响

施肥方式	单果质量 (含果柄,g)	果核质量 (g)	单果质量 (不含果柄,g)	横径 (mm)	纵径 (mm)	可溶性 固形物含量 (%)	总酚含量 (mg/g)	硒含量 (mg/kg DW)	维生素 C 含量 (mg/kg)
对照	8.00±0.838a	0.385 6±0.048a	7.89±0.850a	26.58±1.190a	22.27±1.540a	14.16±0.955a	229.1±81.25a	0.310±0.164b	85.30±67.31b
两边施用	8.07±0.784a	0.382 2±0.038a	7.93±0.689a	25.90±0.973a	23.88±0.863a	13.36±0.648a	166.4±79.39a	1.013±0.076a	131.12±51.29ab
一边施用	7.33±0.884a	0.371 2±0.034a	7.30±0.872a	24.99±0.997a	22.89±0.773a	14.79±1.167a	291.8±91.50a	1.152±0.289a	196.59±15.53a

注:同列数据后不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。下表同。

2.3 硒对甜樱桃褪黑素的影响

甜樱桃果实中含有褪黑素[*N*-乙酰基-5-甲
氧基色胺($C_{13}N_2H_{16}O_2$)],该物质具有较强的保健
功能,尤其在提高睡眠质量方面^[6],失眠患者口服
剂量 3 mg/d 也能达到明显的治疗效果^[35]。此外,
褪黑素在镇痛、调节昼夜节律和繁殖周期、治疗骨
质疏松和创伤性周围神经缺损、抑制癌细胞等方面
都起到明显的作用^[36-39]。李玲等对少硒地区甜樱
桃叶片硒和褪黑素的含量进行分析,发现硒与褪黑
素含量呈正相关,并初步筛选出硒和褪黑素含量相
对较高的俄罗斯 8 号、红蜜、萨米脱、短枝一号品种,
为发展富硒高褪黑素甜樱桃提供依据^[40]。笔者所
在课题组通过施用不同剂量的硒酸钠,发现低剂量

硒酸钠对甜樱桃叶片褪黑素的含量影响不显著,而
高剂量(96 mg/株)硒酸钠能促进褪黑素的积累^[41]。
硒对甜樱桃褪黑素的合成有一定的影响,并受硒的
价态、品种、剂量等因素的影响^[34,40-41]。在甜樱桃
中根施褪黑素也能增加甜樱桃叶片硒含量^[34]。

2.4 硒对甜樱桃生理的影响

不同形态硒对甜樱桃的生理特性也存在一定的
影响。叶面喷施适量的亚硒酸钠可显著提高美
早甜樱桃叶片中的超氧化物歧化酶活性,降低丙二
醛和脯氨酸的积累^[21]。同时,根施硒酸钠 2 种施硒
方式对叶片 N、K、Ca 以及 Fe 含量影响不显著。但
是两边施用处理下的叶片磷含量显著低于对照
(表 2)。

表 2 不同施肥方式对甜樱桃叶片质量影响

施肥方式	N 含量 (g/kg)	P 含量 (g/kg)	K 含量 (g/kg)	Ca 含量 (g/kg)	Fe 含量 (g/kg)
对照	15.38±1.56a	3.33±0.33a	24.63±3.69a	3.65±0.21a	0.126±0.017a
一边施用	15.53±0.02a	2.92±0.49ab	21.80±3.16a	3.53±0.15a	0.119±0.058a
两边施用	16.94±1.31a	2.76±0.59b	23.59±4.13a	2.79±0.92a	0.153±0.028a

3 硒对植物体褪黑素合成途径的影响

3.1 植物体内褪黑素合成途径

褪黑素广泛存在于植物体内,在促进植物光合
效率、提高果实品质、提高作物抗逆等方面起着重
要作用,也可用于食品的保鲜和植物的生根剂、生
长剂^[42-44]。植物褪黑素合成途径比较复杂,与 3-
吲哚乙酸合成共用底物色氨酸^[42,45-47](图 1)。植
物利用 CO₂ 通过莽草酸途径合成色氨酸,色氨酸在
色氨酸脱羧酶(TDC)、色胺-5-羟化酶(T5H)的
作用下分别生成色胺、5-羟色胺。色胺依次经过
5-羟色胺乙酰转移酶(SNAT)、色胺-5-羟化酶
(T5H)、咖啡酸-*O*-甲基转移酶(CAMT)作用,分

别生成 *N*-乙酰基色胺、*N*-乙酰 5-羟色胺、褪黑
素;色胺也可以生成 3-吲哚乙酸(尚未证实)来调
控植物的生长。色氨酸在色氨酸羟化酶(TPH)作
用下生成 5-羟-色氨酸,5-羟-色氨酸在 TDC 酶作
用下生成 5-羟色胺,这条途径主要在动物体内进
行。5-羟色胺再合成褪黑素有 2 种途径:一种是在
SNAT/芳香烷基胺-*N*-乙酰基转移酶(AANAT)/
CAMT、CAMT/*N*-乙酰 5-羟色胺-*O*-甲基转移
酶(ASMT)作用下产生 *N*-乙酰 5-羟色胺、褪黑
素;一种是在 CAMT/ASMT、SNAT 作用下产生 5-
甲氧酪胺/5-甲氧色胺、褪黑素。5-羟-色氨酸在
ASMT 作用下合成 5-甲氧基色氨酸。动物和植物
体内褪黑素合成途径有相似也有不同之处^[48]。

Zhao 等研究表明,TDC 是甜樱桃褪黑素合成限速酶,主要将色氨酸转化为色胺^[49]。笔者所在课题组研究表明,李子 5-羟色胺合成途径更像动物,即色氨酸→5-羟-色氨酸→5-羟色胺,TDC 酶主要将 5-羟-色氨酸脱羧为 5-羟色胺^[50]。由此推测,TDC 酶是一种相对专一的酶,主要起到脱羧作用。

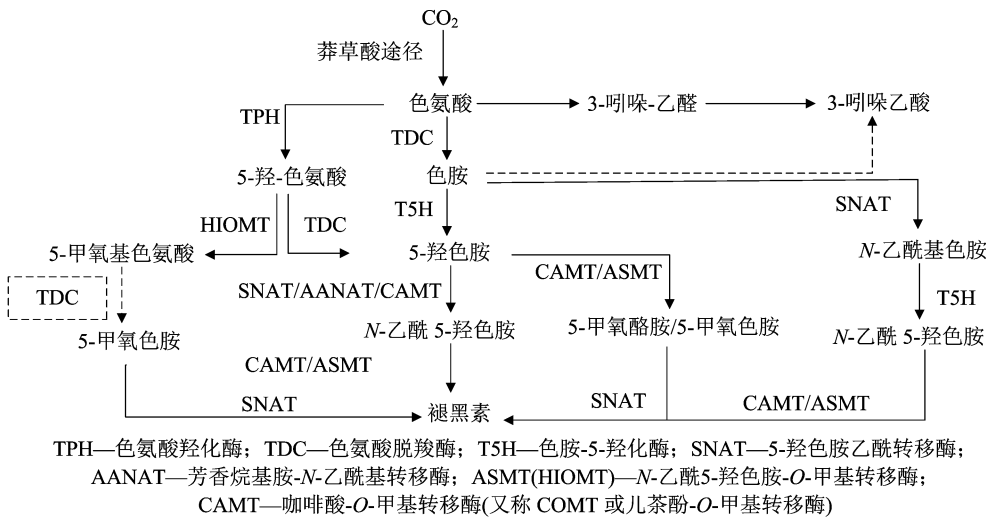


图1 植物褪黑素和 3-吲哚乙酸合成途径

3.2 甜樱桃褪黑素合成途径探索

褪黑素也普遍存在于水果中,甜樱桃中的褪黑素含量显著高于其他水果,并且高于哺乳动物中的褪黑素含量。研究发现不同地点、不同时间、不同采集方式下,不同甜樱桃品种中的褪黑素含量均有差异。褪黑素含量高的甜樱桃,其 5-羟色胺含量有高低,因此推断甜樱桃果实中褪黑素和 5-羟色胺的含量不存在相关性^[52]。也存在褪黑素含量高的同时 5-羟色胺含量也高的品种,例如 Pico Negro linon 品种^[53]。这可能是因为植物褪黑素的合成存在一条不通过 5-羟色胺的途径,也或许是因为植物可以像动物体内 5-羟-色氨酸在 HIOMT 作用下合成 5-甲氧色氨酸^[54],然后再在 TDC、SNAT 酶的作用下,生成褪黑素。而 5-甲氧色氨酸能否通过 TDC 酶合成 5-甲氧色胺,目前尚未见报道,需要进一步验证。甜樱桃不同器官褪黑素含量也存在一定的差异,其含量为幼果>成熟果实,幼叶>功能叶>老叶^[55],与葡萄中的含量规律相似^[56]。一般逆境胁迫能够促进褪黑素的合成,如干旱、盐胁迫、冷害等非生物胁迫^[56-57]。外源褪黑素处理方式中,甜樱桃果实在 0℃处理 45 d,发现外源褪黑素能够提高甜樱桃的褪黑素含量,并保持较好的营养物质含量,进一步研究表明,低温以及外源

在动物体内,羟基吲哚甲氧基转移酶(HIOMT)又名 ASMT,是合成褪黑素中最关键的酶^[51],也是一种相对专一的酶,参与 N-乙酰 5-羟色胺合成褪黑素,也参与 5-羟-色氨酸合成 5-甲氧色氨酸,以及 5-羟-色胺合成 5-羟基色胺;在植物体内也参与了褪黑素合成以及 5-甲氧色氨酸的合成(图 1)。

褪黑素处理均能促进果实 TDC、T5H、SNAT、ASMT 表达^[58]。笔者所在课题组通过根系施用不同浓度的硒肥(硒酸钠),发现不同剂量的硒也影响甜樱桃叶片 TDC、T5H、SNAT、ASMT 的表达(表 3)。

表 3 根施不同剂量的硒酸钠对 4 年生盆栽甜樱桃叶片 TDC、T5H、SNAT、ASMT 表达的影响

施硒量 (mg/株)	TDC	T5H	ASMT	SNAT
0	1.00 ± 0.090b	1.00 ± 0.077b	1.00 ± 0.234a	1.00 ± 0.809ab
32	1.04 ± 0.088b	1.05 ± 0.092b	0.78 ± 0.085a	0.88 ± 0.041bc
64	0.45 ± 0.050c	1.52 ± 0.154a	1.11 ± 0.093a	0.74 ± 0.847c
96	1.60 ± 0.255a	0.83 ± 0.736c	0.94 ± 0.198a	1.12 ± 0.115a

3.3 硒对甜樱桃褪黑素合成途径的影响

植物褪黑素是一个快速发展的研究领域,硒与褪黑素的关系依旧不够明确^[59]。Li 等研究指出不同形态硒处理番茄幼苗 3 d,能够显著增加褪黑素合成前体如色胺、5-羟-色胺、褪黑素含量以及相关酶 TDC、T5H、SNAT、ASMT 的活性^[60]。但 Lee 等研究指出,硒与褪黑素不存在相关性,褪黑素在水稻中的合成是不受硒诱导的^[61]。也有研究表明,用硒酸钠短时间处理离体甜樱桃叶片,随着硒浓度的上升,褪黑素含量也会上升;当硒浓度上升到一定值时,褪黑素含量会降到显著低于对照组^[34]。然而,

硒对植物存在双重作用:硒胁迫抑制植物生长和降低叶绿素含量时,褪黑素起到调节和保护的作用^[62];当硒促进植物生长时,褪黑素变化的差异取决于植物种类、硒的形态和浓度以及其他因素。这让硒与褪黑素关系的研究变得更加复杂。根施亚硒酸钠与褪黑素能够增加甜樱桃叶片的硒含量,而亚硒酸钠和硒酸钠单独处理降低了叶片褪黑素含量,2 种价态硒和褪黑素同时处理能够提高叶片褪黑素含量^[40]。植物在外界环境下难免受到各种逆境胁迫,硒处理可能提高了其抗逆性,同时降低了叶片褪黑素的含量。Lee 等研究指出,喷施外源褪黑素同样能够降低内源褪黑素的含量^[61]。Zhao 等研究也指出,甜樱桃褪黑素含量和丙二醛含量出现的峰值存在一定的重合,验证逆境胁迫可促进褪黑素合成^[49]。顺境可能对褪黑素的合成影响不大,如果硒的价态以及浓度未达到硒胁迫水平,则对褪黑素的合成起到抑制作用。

4 富硒高褪黑素甜樱桃发展展望

4.1 生态效益明显

甜樱桃树姿优美、花型优雅,具有一定的观赏价值,可以结合乡村发展,建设环境友好型家园,可以达到不降低原有森林覆盖率、涵养水源、净化空气、防治水土流失等功效,维持生态平衡。

4.2 品种优势

我国山东地区最先于 19 世纪 70 年代引种栽培甜樱桃,先后从美国、德国、日本、俄罗斯、加拿大、乌克兰等国家引入 50 余个品种,其中美早、俄罗斯 8 号、萨米脱、拉宾斯、艳阳等品种成为优势种植区的主栽品种。迄今,我国选育出甜樱桃品种 40 余个,储备优系 300 余个^[2]。国内品种红灯、蜜脆、福星、佳红、齐早等,主要种植在我国北方;南方甜樱桃的种植面积也逐年增加,并选育出需冷量低、适应南方气候的江南红等品种。繁多的品种和储备优系为选育褪黑素高的品种提供了材料基础。

4.3 经济社会效益显著

由于甜樱桃具备巨大的市场潜力和较高的种植效益,我国甜樱桃种植面积不断扩大,在南方云、贵、川等冷凉高地也得到了蓬勃发展。发展富硒高褪黑素甜樱桃产品,既能够改善人体硒摄入水平,又能够增加甜樱桃的附加值,为果农创收。

甜樱桃经济价值高,而硒是人体必需微量元素,生产富硒甜樱桃是提高甜樱桃经济效益的有效途径

之一,同时能够增加保健物质褪黑素的含量,实现一举两得的功效。然而,甜樱桃褪黑素合成途径尚有不明确之处,硒促进甜樱桃褪黑素合成的形态和剂量尚未见报道,富硒高褪黑素甜樱桃在生产上还处于空白阶段。甜樱桃对不同形态硒的吸收和转运能力存在差异,不同形态硒参与植物蛋白合成也存在差异。需要从硒形态、硒剂量、施用方法、施用时间等因素综合考虑,探索出硒剂量不超标、褪黑素含量高的技术。

参考文献:

- [1] 黄晓姣,王小蓉,陈 涛,等. 中国樱桃遗传资源多样性研究进展[J]. 果树学报,2013,30(3):470-479,508.
- [2] 段续伟,李 明,谭 钺,等. 新中国果树科学研究 70 年:樱桃[J]. 果树学报,2019,36(10):1339-1351.
- [3] Serrano M, Guillén F, Martínez - Romero D, et al. Chemical constituents and antioxidant activity of sweet cherry at different ripening stages[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005,53(7):2741-2745.
- [4] Halvorsen B L, Holte K, Myhrstad M C W, et al. A systematic screening of total antioxidants in dietary plants[J]. The Journal of Nutrition,2002,132(3):461-471.
- [5] Usenik V, Fabčič J, Štampar F. Sugars, organic acids, phenolic composition and antioxidant activity of sweet cherry (*Prunus avium* L.)[J]. Food Chemistry,2008,107(1):185-192.
- [6] 王 蒙,冯晓元,戴 莹,等. 樱桃果实褪黑素及其营养功能研究进展[J]. 食品科学,2014,35(19):307-311.
- [7] 张建瑛,殷东生,田新华,等. 东北地区 5 个毛樱桃品种果实特性及成分研究[J]. 江西农业学报,2019,31(3):57-60.
- [8] 贾朝爽,单长松,周 涛,等. 主要樱桃品种果实营养性状分析[J]. 食品科学,2019,40(4):244-250.
- [9] 高 佳,王宝刚,冯晓元,等. 甜樱桃和酸樱桃品种果实性状的综合评价[J]. 北方园艺,2011(17):17-21.
- [10] 胡 勇,吕秋香. 四川区域性果树的园林观赏性综合评价[J]. 中国南方果树,2016,45(4):140-143.
- [11] 唐 瓴,姜卫兵,魏家星,等. 观赏樱的资源多样性、价值多重性及综合开发应用[J]. 湖南农业科学,2016(5):73-77,81.
- [12] 任晓丹. 甜樱桃核化学成分及生物活性的研究[D]. 天津:天津科技大学,2015.
- [13] 孙艳丽,钱文涛,赵春生,等. 甜樱桃叶片中挥发油成分分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2002,30(4):76-78.
- [14] 高小燕,高丰展,王 鑫,等. 沉香醇及沉香醇合酶研究进展[EB/OL]. (2013-12-04)[2022-01-22]. <https://www.docin.com/p-766618625.html>.
- [15] 欧洲樱桃木、日本樱桃木和美国樱桃木[J]. 家具,2004,25(3):28.
- [16] Dinh Q T, Cui Z W, Huang J, et al. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: a review[J]. Environment International,2018,112:294-309.
- [17] 周兰妹. 我国老龄化背景下残疾态势分析及基于健康老龄化理

- 论的预防策略思考[J]. 解放军护理杂志,2022,39(1):1-3.
- [18] 谢 斌,吴文良,郭岩彬,等. 作物富硒研究进展[J]. 江苏农业科学,2014,42(1):15-18.
- [19] 冯 涛,周国华,卢立波. 施硒肥对梨树生理、光合作用和果实品质的影响[J]. 北方园艺,2020(11):37-41.
- [20] 中国富硒农业产业技术创新联盟. 中国富硒农业发展蓝皮书:2018[M]. 北京:中国农业大学出版社,2019.
- [21] 戚霄晨. 甜樱桃叶面施硒的效应及1-MCP对果实贮藏效果的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2016.
- [22] 戚霄晨,简在海,张 琦,等. 叶面喷施硒对甜樱桃硒和重金属含量及果实品质的影响[J]. 果树学报,2019,36(6):748-754.
- [23] 李文贵,吴茂力,陈 莉,等. 富硒李子生产技术研究[J]. 农学学报,2019,9(10):38-41.
- [24] 孙 岩,马海峰,崔 野,等. 硒肥对红提葡萄硒、可溶性固形物含量和贮藏效果的影响[J]. 北方果树,2020(4):19-20.
- [25] Yin H J, Zhao W Q, Li T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: role of straw nutrient resources [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2695-2702.
- [26] 刘 丽,王张民,牛慈琼,等. 土壤施富硒有机肥对嘎拉苹果果实硒含量和品质的影响[J]. 中国果树,2020(1):27-30,35.
- [27] Kaur S, Nayyar H. Selenium fertilization to salt-stressed mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) plants reduces sodium uptake, improves reproductive function, pod set and seed yield[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 197: 304-317.
- [28] Puccinelli M, Malorgio F, Terry L A, et al. Effect of selenium enrichment on metabolism of tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit during postharvest ripening[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(5): 2463-2472.
- [29] Zahedi S M, Abdelrahman M, Hosseini M S, et al. Alleviation of the effect of salinity on growth and yield of strawberry by foliar spray of selenium-nanoparticles[J]. Environmental Pollution, 2019, 253: 246-258.
- [30] Wang M K, Peng Q, Zhou F, et al. Uptake kinetics and interaction of selenium species in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(10): 9730-9738.
- [31] Sun X P, Wang Y S, Han G Q, et al. Effects of different selenium forms on selenium accumulation, plant growth, and physiological parameters of wild peach [J]. South African Journal of Botany, 2020, 131: 437-442.
- [32] Ebrahimi N, Hartikainen H, Hajiboland R, et al. Uptake and remobilization of selenium in *Brassica napus* L. plants supplied with selenate or selenium-enriched plant residues[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2019, 182(2): 196-202.
- [33] Angradi T R, Tzilkowski W M. Uptake and phytotoxicity of selenium in black cherry and white ash seedlings[J]. Forest Science, 1986, 32(3): 806-811.
- [34] 孙协平,罗友进,周广文. 硒对甜樱桃叶片褪黑素和谷胱甘肽氧化还原循环的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(22):4373-4381.
- [35] 赵 瑛,刘 颖,石勇铨,等. 褪黑素对中老年人失眠的疗效及安全性研究[J]. 解放军医学杂志,2003,28(3):234-235.
- [36] 王旭东,黄东生. 褪黑素防治骨质疏松症的研究现状[J]. 中国骨质疏松杂志,2020,26(5):741-745.
- [37] 康文利,魏亮亮,赵淑琴,等. 褪黑素受体基因 *MTR1* 在绵羊生殖轴系的表达定位[J]. 中国草食动物科学,2020,40(3):1-7.
- [38] 吕建伟,马剑雄,马信龙. 褪黑素通过激活典型 Wnt/ β -catenin 信号通路促进许旺细胞迁移[J]. 中国组织工程研究,2020,24(31):5030-5037.
- [39] 陈 欢,朱佳斌,赵晓瑾,等. 褪黑素增强紫杉醇对膀胱癌 T24 细胞增殖的抑制作用[J]. 天津医药,2020,48(5):353-357,465.
- [40] 李 玲,马宇珩,孙协平,等. 重庆地区甜樱桃品种筛选及其叶片硒和褪黑素含量关系分析[J]. 南方农业学报,2019,50(3):615-621.
- [41] Sun X P, Luo Y J, Han G Q, et al. Effects of low-dose selenium on melatonin synthesis in sweet cherry [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(4): 3309-3319.
- [42] 徐 芳,周海鹏,郭早霞,等. 植物褪黑素及其抗逆性研究[J]. 基因组学与应用生物学,2013,32(2):260-266.
- [43] 庄维兵,刘天宇,束小春,等. 褪黑素在植物生长发育过程中与植物激素的关系[J]. 安徽农业科学,2018,46(31):12-16.
- [44] Wang F, Zhang X P, Yang Q Z, et al. Exogenous melatonin delays postharvest fruit senescence and maintains the quality of sweet cherries[J]. Food Chemistry, 2019, 301: 125311.
- [45] 武兰兰,郑耀庭,李国元,等. 褪黑素调节植物非生物胁迫耐性的机理[J]. 植物生理学报,2018,54(11):1669-1677.
- [46] Tan D X, Manchester L C, Esteban-Zubero E, et al. Melatonin as a potent and inducible endogenous antioxidant: synthesis and metabolism[J]. Molecules, 2015, 20(10): 18886-18906.
- [47] Arnao M B, Hernández-Ruiz J. Melatonin: plant growth regulator and/or biostimulator during stress? [J]. Trends in Plant Science, 2014, 19(12): 789-797.
- [48] Park S, Lee K, Kim Y S, et al. Tryptamine 5-hydroxylase-deficient Sekiguchi rice induces synthesis of 5-hydroxytryptophan and *N*-acetyltryptamine but decreases melatonin biosynthesis during senescence process of detached leaves[J]. Journal of Pineal Research, 2012, 52(2): 211-216.
- [49] Zhao Y, Tan D X, Lei Q, et al. Melatonin and its potential biological functions in the fruits of sweet cherry [J]. Journal of Pineal Research, 2013, 55(1): 79-88.
- [50] Sun X P, Han G Q, Ye S, et al. Effects of selenium on serotonin synthesis and the glutathione redox cycle in plum leaves[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 20(4): 2212-2221.
- [51] 张 凯. 牦牛褪黑激素合成酶 *AA-NAT/HIOMT* 基因 cDNA 克隆及序列分析[D]. 雅安:四川农业大学,2007.
- [52] González-Gómez D, Lozano M, Fernández-León M F, et al. Detection and quantification of melatonin and serotonin in eight sweet cherry cultivars (*Prunus avium* L.) [J]. European Food Research and Technology, 2009, 229(2): 223-229.
- [53] Garrido M, Rodríguez A B, Lozano M, et al. Formulation and characterization of a new nutraceutical product based on sweet cherries (*Prunus avium* L.) grown in the jerte valley of Spain[J]. Acta Horticulturae, 2014(1020): 149-152.

吕重阳,张晓燕,黄璐,等.不同绿豆品种的芽用特性评价及其专用品种筛选[J].江苏农业科学,2023,51(4):152-163.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.04.023

不同绿豆品种的芽用特性评价及其专用品种筛选

吕重阳^{1,2}, 张晓燕², 黄璐², 薛晨晨², 袁星星², 陈新^{1,2}

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏南京 210023;

2. 江苏省农业科学院经济作物研究所/江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室, 江苏南京 210014)

摘要:为了筛选出芽用特性优良的绿豆品种,为绿豆芽菜生产及芽用绿豆品种的培育提供资源材料,以来自亚洲不同地区的 67 份绿豆种质资源为研究材料,测定了不同绿豆芽菜的外观及生长指标和营养功能品质指标等 13 项芽用特性指标,利用主成分分析和隶属函数分析等方法对各材料的芽用特性进行了综合评价。结果表明,不同绿豆芽菜的 13 项芽用特性存在较大差异。利用主成分分析将 13 个芽用特性指标转换为 4 个独立的综合指标,其累计贡献率达到 68.42%。结合隶属函数分析结果,筛选出产量、功能性成分、基本营养成分与外观品质特性较好的品种各 10 份,为芽用绿豆的品种改良提供了材料基础。依据芽用特性综合指标值筛选出南阳大绿豆、苏绿 1 号、保定 1028、苏绿 7 号和化西 2019 等芽用特性优异的绿豆品种 10 份,为绿豆芽菜的生产提供了优异种质材料。采用逐步回归分析法建立了绿豆芽用特性评价的数学模型,筛选出可食鲜质量、可溶性蛋白含量、总酚含量、DPPH 自由基清除率和下胚轴长等 5 个鉴定指标,可作为绿豆芽用特性的评价指标。

关键词:绿豆芽菜;芽用特性;主成分分析;隶属函数;综合评价

中图分类号:S643.903.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)04-0152-12

绿豆(*Vigna radiate* L.)在中国已有 2 000 多年

的栽培史,是我国种植的主要食用豆之一。绿豆营养丰富,是饮食中蛋白质、生物活性物质、矿物质和维生素等的优质来源^[1]。绿豆芽菜是绿豆种子在一定条件下萌发形成的可供食用的芽苗类蔬菜,是我国的传统蔬菜,也是日益受到青睐的“活体蔬菜”和功能食品。越来越多的研究表明,与绿豆种子相比,绿豆芽菜中的维生素 C、酚类化合物、黄酮类化合物、有机酸和氨基酸等营养物质含量显著提高,从而具有更高的营养价值^[2]。近年来,国内外在绿

收稿日期:2022-05-16

基金项目:国家自然科学基金(编号:31902001);国家现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-08)。

作者简介:吕重阳(1997—),男,安徽滁州人;硕士研究生,从事绿豆芽菜营养功能品质调控研究。E-mail: chongyang2721628525@foxmail.com。

通信作者:张晓燕,博士,副研究员,主要从事豆类功能育种与应用研究。E-mail:xyzhang@jaas.ac.cn。

[54] Harumi T, Matsushima S. Separation and assay methods for melatonin and its precursors [J]. Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications, 2000, 747 (1/2): 95-110.

[55] Xia H, Shen Y Q, Shen T, et al. Melatonin accumulation in sweet cherry and its influence on fruit quality and antioxidant properties [J]. Molecules, 2020, 25 (3): 753.

[56] 卞凤娥. 葡萄中的褪黑素及外源褪黑素的抗逆功能[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.

[57] Ahn H R, Kim Y J, Lim Y J, et al. Key genes in the melatonin biosynthesis pathway with circadian rhythm are associated with various abiotic stresses [J]. Plants, 2021, 10 (1): 129.

[58] Sharafi Y, Jannatizadeh A, Fard J R, et al. Melatonin treatment delays senescence and improves antioxidant potential of sweet cherry fruits during cold storage [J]. Scientia Horticulturae, 2021,

288:110304.

[59] Tan D X, Reiter R J. An evolutionary view of melatonin synthesis and metabolism related to its biological functions in plants [J]. Journal of Experimental Botany, 2020, 71 (16): 4677-4689.

[60] Li M Q, Hasan M K, Li C X, et al. Melatonin mediates selenium-induced tolerance to cadmium stress in tomato plants [J]. Journal of Pineal Research, 2016, 61 (3): 291-302.

[61] Lee K, Back K. Overexpression of rice serotonin *N*-acetyltransferase 1 in transgenic rice plants confers resistance to cadmium and senescence and increases grain yield [J]. Journal of Pineal Research, 2017, 62 (3): e12392.

[62] Ulhassan Z, Huang Q, Gill R A, et al. Protective mechanisms of melatonin against selenium toxicity in *Brassica napus*: insights into physiological traits, thiol biosynthesis and antioxidant machinery [J]. BMC Plant Biology, 2019, 19 (1): 507.