

杨建帮, 姚文孔, 杨 丽, 等. 枸杞中的褪黑素含量及其积累特征[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(1): 169-174.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.01.019

## 枸杞中的褪黑素含量及其积累特征

杨建帮<sup>1</sup>, 姚文孔<sup>1,2</sup>, 杨 丽<sup>1</sup>, 冯 美<sup>1,2</sup>

(1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏现代设施园艺工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 为探究枸杞中的褪黑素含量及其积累特征, 使用宁夏 6 个枸杞材料, 通过高效液相色谱法测定褪黑素含量, 分析枸杞不同器官、果实不同发育期、不同成熟期、不同材料、不同立地条件下的褪黑素含量, 并分析土壤理化因子与枸杞不同器官中褪黑素含量间的关系。结果表明, 枸杞不同器官中的褪黑素含量存在一定差异, 其中褪黑素含量大小通常遵循花>叶>茎>根。在春果青果期与变色期的果实中检测到褪黑素, 在黄熟期与红熟期的春果果实中未检测到褪黑素; 在秋果不同果实发育时期的果实中均检测到褪黑素, 在青果期果实中的褪黑素含量最高, 之后随着果实的发育, 果实中的褪黑素含量逐渐下降, 到果实成熟时又有所上升。宁杞菜 1 号各器官中的褪黑素含量显著高于宁杞 1 号, 在不同材料的枸杞叶片中, 褪黑素含量排序为宁杞菜 1 号>宁杞 7 号>黄果枸杞>黑果枸杞>宁杞 10 号>宁杞 1 号。在盐分含量高的立地条件下, 枸杞各器官中的褪黑素含量显著增加。以上结果表明, 枸杞中含有丰富的褪黑素, 对于同一枸杞材料而言, 各器官中褪黑素含量的排序为花>叶>茎>根, 褪黑素含量在果实发育过程中的青果期、变色期较高, 秋果中各器官的褪黑素含量大于春果, 枸杞在高盐环境中有利于体内褪黑素的积累。

**关键词:** 枸杞; 褪黑素; 积累特征; 盐胁迫; 果实发育

**中图分类号:** S663.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)01-0169-06

## The content and accumulation characteristics of melatonin in *Lycium barbarum*

YANG Jianbang<sup>1</sup>, YAO Wenkong<sup>1,2</sup>, YANG Li<sup>1</sup>, FENG Mei<sup>1,2</sup>

(1. School of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Modern Facility Horticulture Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** To explore the content and accumulation characteristics of melatonin in *Lycium barbarum*, six *Lycium barbarum* materials in Ningxia were used, and the content of melatonin was determined by high performance liquid chromatography. The melatonin content in different organs of *Lycium barbarum*, at different developmental stages of the fruits, at different maturity stages, in different materials and under different site conditions was analyzed. Moreover, the relationship between soil physical and chemical factors and the melatonin content in different organs of *Lycium barbarum* was analyzed. The results showed that there were some differences in the content of melatonin in different organs of *Lycium barbarum*, and the content of melatonin usually followed the order of flower > leaf > stem > root. Melatonin was detected in spring fruits at green fruit stage and discoloration stage, and melatonin was not detected in fruits at yellow ripening stage and red ripening

stage. Melatonin was detected in autumn fruits at different developmental stages. Melatonin content was highest in fruits at the green fruit stage. Subsequently, as the fruits developed, the melatonin content in the fruits gradually declined, and then increased again when the fruits ripened. The content of melatonin in each organ of

收稿日期: 2023-12-16

基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金项目(2022AAC03095)

作者简介: 杨建帮(1998-), 男, 宁夏同心人, 硕士研究生, 主要从事经济林栽培与生理等方面的研究。(E-mail) 2225911860@qq.com

通讯作者: 冯 美, (E-mail) feng\_m@nxu.edu.cn

Ningqicai No.1 was significantly higher than that of Ningqi No.1. In the leaves of different materials, the melatonin content followed the order of Ningqicai No.1 > Ningqi No.7 > Huangguo wolfberry > Heiguo wolfberry > Ningqi No.10 > Ningqi No.1. Under high-salt conditions, the content of melatonin in each organ of *Lycium barbarum* increased significantly. The above results indicated that *Lycium barbarum* was rich in melatonin. For the same *Lycium barbarum* material, the order of melatonin content in each organ was flower > leaf > stem > root. Melatonin content was higher in the green fruit period and discoloration period during fruit development. The melatonin content of each organ in autumn fruits was higher than that in spring fruits. *Lycium barbarum* in high salt environment was conducive to the accumulation of melatonin.

**Key words:** *Lycium barbarum* L.; melatonin; accumulating characteristics; salt stress; fruit development

褪黑素 (Melatonin, MT) 又称褪黑激素, 化学名称为 *N*-乙酰基-5 甲氧基色胺 (*N*-acetyl-5-methoxytryptamine), 最初是由 Lerner 等<sup>[1]</sup> 从牛的松果体组织中检测到的一类吲哚类化合物。研究发现, 褪黑素具有很强的抗氧化性, 对人体具有许多重要的生理功能, 例如能增强机体免疫能力、减缓机体衰老、抗肿瘤、抗氧化和调节生理节律等<sup>[2]</sup>。相关研究发现, 人食用含有褪黑素的水果后, 人体内会检测到褪黑素的存在, 而且人体的抗氧化能力会显著提高<sup>[3]</sup>。

枸杞 (*Lycium barbarum*) 是茄科枸杞属多年生双子叶落叶灌木, 是栽培历史悠久、适应性强的中国道地药食同源植物之一, 除果实外, 其花、叶、根也有较高的药用、食用价值<sup>[4]</sup>。宁夏是中国枸杞的主要原产地, 2022 年宁夏回族自治区党委政府提出实施产业振兴战略, 确定了枸杞产业等自治区“六特”产业, 提出要进一步挖掘枸杞的药用价值, 开发枸杞叶作为新食品原料等规划<sup>[5]</sup>。目前, 在国内外的相关研究中, 关于枸杞各器官中是否存在有益于人体的褪黑素的报道较少。2003 年 Chen 等<sup>[6]</sup> 对中国 100 多种中草药的花、种子、叶片、根和茎进行分析, 并首次从枸杞中检测出褪黑素, 鲜重含量为 540 ng/g。2015 年赵建芬等<sup>[7]</sup> 用高效液相色谱法从枸杞叶片中检测出褪黑素, 干重含量高达  $1.235 \times 10^4$  ng/g, 说明在枸杞不同器官

中可能存在丰富的褪黑素。植物种类、组织部位、生长时期和生长环境不同, 植物中的褪黑素含量也不同<sup>[8]</sup>。因此, 本研究以宁夏地区主栽的枸杞为材料, 测定不同器官、不同果实发育阶段、不同材料、不同立地条件下枸杞中的褪黑素含量, 探索枸杞中褪黑素的积累特征, 以期为开发枸杞在食品、医药、保健行业的利用潜力及有效开拓枸杞中褪黑素积累的理论研究前景提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在宁夏回族自治区银川市西夏区进行, 西夏区平均海拔为 1 108 m, 属于中温带干旱地区, 具有典型的大陆性季风气候, 四季分明, 昼夜温差大, 气候干燥, 多风沙, 全生育期积温 ( $\geq 10^\circ\text{C}$ ) 为 3 400~3 800  $^\circ\text{C}$ , 气温日较差为 12~15  $^\circ\text{C}$ , 年降水量为 150~240 mm, 年蒸发量为 800~1 600 mm, 年平均日照时数为 2 800~3 000 h, 年平均气温为 5.3~10.1  $^\circ\text{C}$ , 无霜期为 160~180 d。取样地位于西夏区镇北堡镇刘传敬枸杞有机种植专业合作社枸杞园 (38°38'20"N, 106°6'56"E) 和西夏区芦花台园林场宁夏农林科学院枸杞研究所枸杞示范基地 (38°24'N, 106°10'E)。供试土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the experimental soil

试验田 所在地	土层 (cm)	pH 值	全氮含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	速效氮含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	有机碳含量 (%)	总盐含量 (g/kg)
园林场	0~30	7.39±0.05b	1.23±0.03b	8.48±0.16a	0.56±0.01b	24.79±0.26a	276.82±3.21b	181.09±5.25b	1.23±0.04a	2.38±0.15b
镇北堡	0~30	8.04±0.06a	1.35±0.08a	8.08±0.06b	0.71±0.02a	25.03±0.38a	447.18±3.38a	215.75±11.69a	1.03±0.04b	4.36±0.12a

同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 1.2 试验材料

供试材料为宁夏回族自治区银川市西夏区镇北堡镇种植的宁杞 1 号和宁夏回族自治区银川市西夏区芦花台园林场种植的宁杞 1 号、宁杞 7 号、宁杞

10 号、宁杞菜 1 号及黄果枸杞、黑果枸杞的盛果期果树, 树龄均为 15 年左右。

### 1.3 试验方法

1.3.1 枸杞样品的采集方法 采用随机区组设计, 设

3个重复,每个重复选择代表性植株5株。2023年6月9日在镇北堡样地选取树势相同的宁杞1号材料,采摘其根、嫩茎、叶、花及春果的青果期、变色期、黄熟期、红熟期等不同发育期的果实,各3份,用锡箔纸包裹后迅速放入液氮中冷冻,再置于干冰桶中带回实验室,于-80℃冰箱保存,用于不同器官、果实不同发育期褪黑素含量分析。此外,2023年6月9日在园林场样地采用相同方法采摘宁杞1号、宁杞菜1号的根、嫩茎、叶、花各3份,用于不同品种褪黑素含量的分析;用相同方法采摘宁杞7号、宁杞10号、黄果枸杞、黑果枸杞幼叶各3份,用于不同材料枸杞叶片中褪黑素含量的分析。2023年9月,用相同方法在镇北堡试验地采摘秋果不同发育期的果实,与春果进行不同成熟期果实中褪黑素含量的对比分析。

1.3.2 土壤样品的采集 土壤样品于2023年6月9日采集。采集0~30 cm土层土壤样品,2个试验地随机取6个代表性的样点,剔除石砾、植物残根等杂物,过2 mm筛以去除可见有机物,处理后的土壤用于理化性质的测定。

1.4 测定指标及测定方法

1.4.1 褪黑素含量的测定 称取约0.2 g鲜样,加入1 mL 80%甲醇研磨、过夜浸提后离心,取上清液。使用Rigol L3000高效液相色谱仪,激发波长为280 nm,发射波长为348 nm。色谱柱为Kromasil C<sub>18</sub>反相色谱柱(250.0 mm×4.6 mm, 5 μm),柱温为30℃,走样时间为45 min,流速为0.8 mL/min,进样体积为10 μL。流动相A为纯甲醇,流动相B为0.1%甲酸溶液,流动相A和流动相B的体积比为3.5:

6.5<sup>[9]</sup>,等度洗脱(流动相比比例不变)。标准品为褪黑素(MT),购自上海源叶生物科技有限公司。

1.4.2 土壤理化性质的测定 土壤pH值用pH计测定,土壤全氮含量用凯氏定氮法测定,土壤全钾含量、土壤速效钾含量用火焰光度法测定,土壤全磷含量与土壤速效磷含量用钼锑抗比色法测定,土壤速效氮含量用土壤速效氮试剂盒(扩散法)测定,土壤有机碳含量用土壤有机碳含量测试盒(有机碳光度法)测定,土壤全盐含量用重量法测定<sup>[10]</sup>。

1.5 数据统计与分析

试验数据用Excel 2019进行整理,用Origin 2022与Graphpad Pism 9.5绘图,用SPSS 25.0进行统计与分析。

2 结果与分析

2.1 宁杞1号春果与秋果果实不同发育期的褪黑素含量

如表2所示,宁杞1号春果仅在青果期、变色期检测到了褪黑素,其含量(以鲜重计)分别为63.84 ng/g、45.20 ng/g;在宁杞1号黄熟期、红熟期春果实中均未检测到褪黑素;宁杞1号秋果在青果期、变色期、黄熟期、红熟期的褪黑素含量分别为447.05 ng/g、72.81 ng/g、35.04 ng/g、45.38 ng/g。在宁杞1号果实发育的过程中,秋果在青果期至黄熟期的褪黑素含量呈下降趋势,至红熟期褪黑素含量又有所升高。宁杞1号秋果青果期、变色期的褪黑素含量显著高于春果相应发育期的含量。图1为不同果实发育期宁杞1号的外观。

表2 宁杞1号春果、秋果不同发育期的褪黑素含量

Table 2 Melatonin content in different development stages of spring fruits and autumn fruits of Ningqi No.1

果实类型	青果期褪黑素含量 (ng/g)	变色期褪黑素含量 (ng/g)	黄熟期褪黑素含量 (ng/g)	红熟期褪黑素含量 (ng/g)
春果	63.84±3.93b	45.20±2.75b	低于检测限	低于检测限
秋果	447.05±32.09a	72.81±4.34a	35.04±1.64	45.38±3.02

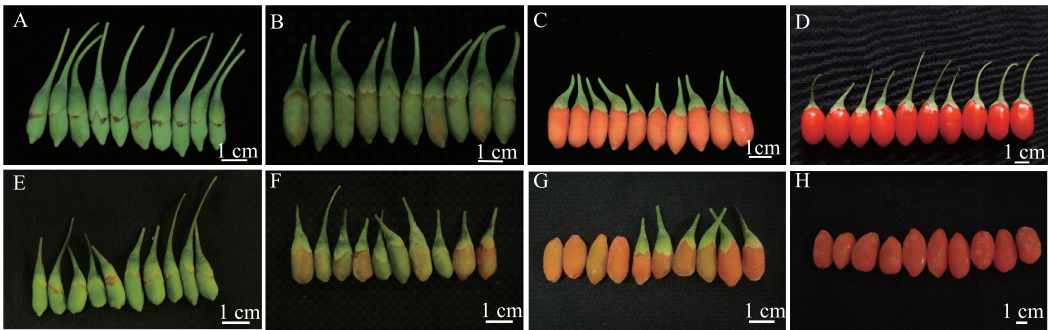
褪黑素含量以鲜重计,同列数据后标有不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

2.2 不同枸杞材料褪黑素含量的差异分析

如图2所示,园林场的宁杞1号、宁杞菜1号2个枸杞材料在花、叶、茎、根等不同器官中的褪黑素含量(以鲜重计)均表现为花>叶>茎>根,宁杞菜1号花、叶、茎和根中的褪黑素含量均显著高于宁杞1号相同器官中的含量。宁杞菜1号花中的褪黑素含

量为112.11 ng/g,叶中的褪黑素含量为69.26 ng/g,茎中的褪黑素含量为45.37 ng/g,根中的褪黑素含量为36.75 ng/g。宁杞1号花中的褪黑素含量为85.69 ng/g,叶中的褪黑素含量为48.92 ng/g,茎中的褪黑素含量为34.70 ng/g,根中的褪黑素含量为28.11 ng/g。





A: 春果青果期; B: 春果变色期; C: 春果黄熟期; D: 春果红熟期; E: 秋果青果期; F: 秋果变色期; G: 秋果黄熟期; H: 秋果红熟期。

图 1 不同果实发育期宁杞 1 号的外观

Fig.1 Appearance of Ningqi No.1 at different fruit development stages



A: 宁杞 1 号花; B: 宁杞 1 号叶; C: 宁杞 1 号茎; D: 宁杞 1 号根; E: 宁杞菜 1 号花; F: 宁杞菜 1 号叶; G: 宁杞菜 1 号茎; H: 宁杞菜 1 号根; I: 不同品种枸杞器官褪黑素含量。对于同一器官而言,不同品种对应的柱上标有不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 2 不同品种枸杞各器官中的褪黑素含量

Fig.2 Melatonin content in different organs of different varieties of *Lycium barbarum*

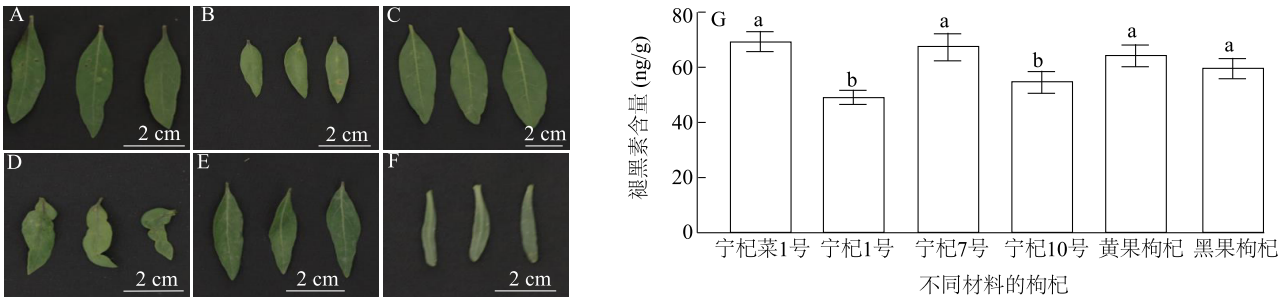
如图 3 所示,在不同材料枸杞叶片中,褪黑素含量排序为宁杞菜 1 号>宁杞 7 号>黄果枸杞>黑果枸杞>宁杞 10 号>宁杞 1 号,其中宁杞菜 1 号、宁杞 7 号、黄果枸杞、黑果枸杞叶片的褪黑素含量无显著差异,但均显著高于宁杞 10 号、宁杞 1 号,宁杞 10 号与宁杞 1 号叶片的褪黑素含量无显著差异。

2.3 不同立地条件下宁杞 1 号的褪黑素含量

如图 4 所示,2 个试验田中宁杞 1 号的褪黑素含量在不同器官间差异较大,镇北堡宁杞 1 号花、叶、茎与根中褪黑素的鲜重含量分别为 1 043.07 ng/g、969. 11 ng/g、905. 33 ng/g、802. 65 ng/g,园林场宁杞 1 号花、叶、茎与根中褪黑素的鲜重含量分别为 85. 69 ng/g、48. 92 ng/g、34. 70 ng/g、28. 11 ng/g。镇北堡的宁杞 1 号各器官中褪黑素的鲜重含量均显著高于园林场宁杞 1 号相同器官中褪黑素的鲜重含量,为园林场的 12. 17~28. 55 倍。

2.4 宁杞 1 号不同器官中褪黑素含量与土壤理化性质指标的相关性分析

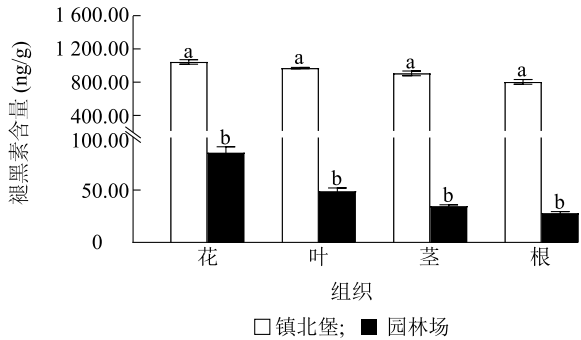
对宁杞 1 号不同器官中的褪黑素含量与土壤 pH 值、全氮含量、全钾含量、全磷含量、速效氮含量、速效钾含量、速效磷含量、有机碳含量、总盐含量进行相关性分析发现,宁杞 1 号根中的褪黑素含量与土壤 pH 值、全磷含量、速效钾含量、全盐含量呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ),与速效磷含量、全氮含量呈显著正相关 ( $P<0.05$ ),与土壤中的全钾含量、速效氮含量无明显相关,与土壤中的有机碳含量呈极显著负相关 ( $P<0.01$ )。宁杞 1 号花、叶、茎中的褪黑素含量与土壤 pH 值、全磷含量、速效钾含量、速效磷含量、全盐含量在 0.01 或 0.001 水平呈现显著正相关,与土壤全氮含量呈显著正相关 ( $P<0.05$ ),与土壤全钾含量、速效氮含量无明显相关,与土壤有机碳含量呈极显著负相关 ( $P<0.001$ ) (图 5)。



A: 宁杞菜 1 号叶片;B: 宁杞 1 号叶片;C: 宁杞 7 号叶片;D: 宁杞 10 号叶片;E: 黄果枸杞叶片;F: 黑果枸杞叶片;G: 不同品种褪黑素含量差异图。不同品种对应的柱上标有不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 3 不同材料的枸杞叶片的褪黑素含量

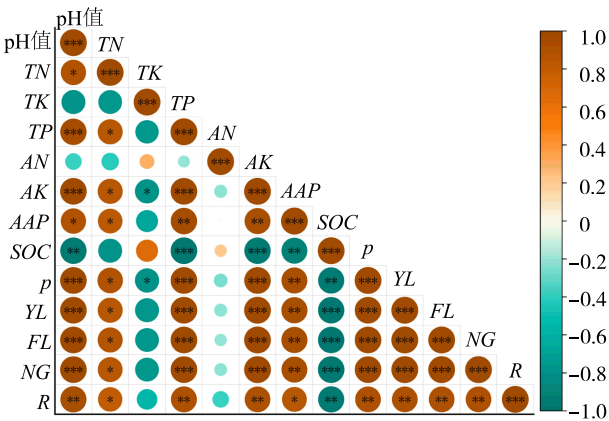
Fig.3 Melatonin content in leaves of different *Lycium barbarum* materials



对于同一器官而言,标有不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 4 不同立地条件下宁杞 1 号各器官中的褪黑素含量

Fig.4 Melatonin content in different organs of Ningqi No.1 under different site conditions



TN: 土壤全氮含量; TK: 土壤全钾含量; TP: 土壤全磷含量; AN: 土壤速效氮含量; AK: 土壤速效钾含量; AAP: 土壤速效磷含量; SOC: 土壤有机碳含量; P: 土壤全盐含量; YL: 叶片中褪黑素含量; FL: 花中褪黑素含量; NG: 茎中褪黑素含量; R: 根中褪黑素含量。\*: 显著相关 ( $P\leq 0.050$ ); \*\*: 极显著相关 ( $P\leq 0.010$ ); \*\*\*: 极显著相关 ( $P\leq 0.001$ )。

图 5 宁杞 1 号不同器官中褪黑素含量与土壤理化因子间的相关性  
Fig.5 Correlation between melatonin content in different organs of Ningqi No.1 and soil physical and chemical factors

### 3 讨论

在不同植物种类、植物的不同生长阶段、植物的不同器官及不同外界环境条件下,褪黑素含量存在较大差异<sup>[11]</sup>。枸杞果实为间歇式成熟型果实,在生产上一般按照果实成熟期将其分为春果枸杞、夏果枸杞和秋果枸杞。6-7 月初成熟的枸杞果实为春果枸杞,7 月上旬至 8 月成熟的枸杞果实为夏果枸杞,9-10 月成熟的枸杞果实为秋果枸杞。本研究发现,枸杞中的褪黑素含量在不同材料、不同器官、果实的不同发育期及不同立地条件下均存在差异。在枸杞各器官中,花中的褪黑素含量最高,其次是叶、茎中的褪黑素含量,而根中的褪黑素含量最少,这与刘定等<sup>[12]</sup>对芍药和 Erland 等<sup>[13]</sup>对贯叶连翘的花瓣、根系、叶片的研究结果相似。植物中的褪黑素含量受到生长环境(包括季节、光照度、光周期等<sup>[14]</sup>)的影响,本研究发现,枸杞果实中的褪黑素含量较低,且在春果与秋果的不同果实发育时期,褪黑素含量差异较大,说明枸杞果实中的褪黑素含量受到季节、发育时期的影响。吴艳迪<sup>[15]</sup>在研究美乐葡萄果实发育过程中褪黑素含量的变化时发现,在葡萄果实转色初期,果实中的褪黑素含量最高,之后随着果皮颜色的加深,褪黑素含量下降,到成熟时,果实中的褪黑素含量又上升。Korkmaz 等<sup>[16]</sup>通过研究 2 个辣椒品种果实不同发育时期褪黑素含量的变化发现,在 2 个品种辣椒果实成熟过程中,褪黑素含量在开花期最大,随后呈现下降趋势,但在果实红熟期时又有所增加,这与本研究中秋果果实不同发育时期褪黑素含量的变化趋势相似。已有大量研究发现,品种不同是植物中褪黑素含量差异的一个重要因素。本研究发现,不同材料枸杞叶片中的褪黑素含量也有一定差异,这与前人对桑树<sup>[17]</sup>、葡萄<sup>[18]</sup>、草莓<sup>[19]</sup>、辣椒和番茄<sup>[20]</sup>的研究结果一致。一般而言,不同植物品种之间的褪黑

素含量差异受到遗传因素和非遗传因素的影响<sup>[21]</sup>,而本研究中所用不同材料的枸杞均来自园林场试验基地,因此不同材料枸杞中褪黑素含量的差异可能主要受到遗传因素的影响。褪黑素具有调控植物生长、提高植物抵抗多种逆境胁迫的能力<sup>[22]</sup>。目前,研究者对青稞<sup>[23]</sup>、拟南芥<sup>[24]</sup>、黄瓜<sup>[25]</sup>、葡萄<sup>[14]</sup>等植物的研究结果证实,在盐碱胁迫条件下可以提高植物内源褪黑素含量。因此,我们在开发枸杞叶新食品原料的过程中,可以适当对枸杞采取盐胁迫栽培措施,从而促进枸杞叶片中褪黑素含量的积累,得到高褪黑素含量的原料。在本试验中,镇北堡试验地土壤的总盐含量约为园林场试验田的 2 倍,其各器官中的褪黑素含量为园林场各器官中褪黑素含量的 12.17~28.55 倍,与上述研究结果相似。宁夏枸杞含有多种活性物质,药用价值较高,全身是宝,其根、茎、叶、花、果实均可入药,通过对枸杞褪黑素含量及其积累特征的分析,对进一步挖掘枸杞的药用价值具有重要意义。

## 4 结 论

本研究发现,枸杞中含有丰富的褪黑素,明确了褪黑素在枸杞中的积累特征:在不同枸杞材料间,褪黑素含量有差异。对于同一枸杞材料而言,各器官中褪黑素含量的排序为花>叶>茎>根。在果实发育过程中,青果期、变色期的褪黑素含量较高,秋果各器官中的褪黑素含量大于春果,高盐环境有利于枸杞中褪黑素的积累。

## 参考文献:

- [1] LERNER A B, CASE J D, TAKAHASHI Y, et al. Isolation of melatonin, the pineal gland factor that lightens melanocytes[J]. Journal of the American Chemical Society, 1958, 80(10): 2587.
- [2] ARNAO M B, HERNÁNDEZ-RUIZ J. Melatonin in flowering, fruit set and fruit ripening[J]. Plant Reproduction, 2020, 33(2): 77-87.
- [3] REITER R J, MANCHESTER L C, TAN D X. Melatonin in walnuts; influence on levels of melatonin and total antioxidant capacity of blood[J]. Nutrition, 2005, 21(9): 920-924.
- [4] 魏雪松,王海洋,孙智轩,等. 宁夏枸杞化学成分及其药理活性研究进展[J]. 中成药, 2018, 40(11): 2513-2520.
- [5] 胡冬梅. 宁夏大力发展“六特”产业[N]. 中国食品安全报, 2022-07-26(A03).
- [6] CHEN G F, HUO Y S, TAN D X, et al. Melatonin in Chinese medicinal herbs[J]. Life Sciences, 2003, 73(1): 19-26.
- [7] 赵建芬,杨海贵,李静仪. HPLC-UV 法检测芦荟、枸杞叶和桑叶中的褪黑素[J]. 食品工业, 2015, 36(2): 266-270.
- [8] 刘 定. 芍药褪黑素积累规律及其合成基因 *TDC* 功能的初步研究[D]. 扬州:扬州大学, 2017.
- [9] 王 旭,任 琳,邹晓莉,等. 同时测定保健食品中褪黑素和维生素 B<sub>6</sub> 的高效液相色谱方法研究[J]. 现代预防医学, 2012, 39(23): 6245-6247, 6250.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000: 189-193.
- [11] 王 蕊,杨小龙,须 晖,等. 高等植物褪黑素的合成和代谢研究进展[J]. 植物生理学报, 2016, 52(5): 615-627.
- [12] 刘 定,赵大球,陆春良,等. 采用高效液相色谱-串联质谱法检测芍药中褪黑素含量[J]. 分子植物育种, 2017, 15(4): 1527-1534.
- [13] ERLAND L A E, CHATTOPADHYAY A, JONES A M P, et al. Melatonin in plants and plant culture systems: variability, stability and efficient quantification[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1721.
- [14] BYEON Y, PARK S, KIM Y S, et al. Light-regulated melatonin biosynthesis in rice during the senescence process in detached leaves[J]. Journal of Pineal Research, 2012, 53(1): 107-111.
- [15] 吴艳迪. 葡萄褪黑素含量变化及其合成基因 *SNAT* 原核表达分析[D]. 北京:中国农业科学院, 2018.
- [16] KORKMAZ A, DEGER Ö, CUCI Y. Profiling the melatonin content in organs of the pepper plant during different growth stages [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 172: 242-247.
- [17] 郑 莎. 桑树褪黑素及其异构体生物合成机制研究[D]. 重庆:西南大学, 2021.
- [18] 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.
- [19] STÜRTZ M, CEREZO A B, CANTOS-VILLAR E, et al. Determination of the melatonin content of different varieties of tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) and strawberries (*Fragaria ananassa*) [J]. Food Chemistry, 2011, 127(3): 1329-1334.
- [20] RIGA P, MEDINA S, GARCÍA-FLORES L A, et al. Melatonin content of pepper and tomato fruits; effects of cultivar and solar radiation[J]. Food Chemistry, 2014, 156: 347-352.
- [21] WANG C, YIN L Y, SHI X Y, et al. Effect of cultivar, temperature, and environmental conditions on the dynamic change of melatonin in mulberry fruit development and wine fermentation[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(4): M958-M967.
- [22] 王博美. 外施褪黑素对低氮下小麦生长的调控效应及其机理[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
- [23] 徐宁莉. 非生物胁迫对青稞褪黑素等功能成分影响及代谢组学分析[D]. 芜湖:安徽工程大学, 2023.
- [24] 李帆奇,袁 月,苗荣庆,等. 盐胁迫盐芥和拟南芥褪黑素含量及合成相关基因表达模式分析[J]. 生物技术通报, 2023, 39(5): 142-151.
- [25] 吴 鹏,吕 剑,郁继华,等. 褪黑素对盐碱复合胁迫下黄瓜幼苗光合特性和渗透调节物质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1901-1910.

(责任编辑:徐 艳)