

张地莲, 肖云英, 李 婉, 等. 褪黑素对镉胁迫条件下毛桃幼苗生长及镉含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(3): 573-579.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2025.03.016

褪黑素对镉胁迫条件下毛桃幼苗生长及镉含量的影响

张地莲^{1,2}, 肖云英², 李 婉², 周万木², 张晓丽², 林立金², 唐 懿², 胡容平¹

(1.四川省农业科学院植物保护研究所/农业部西南作物有害生物综合治理重点实验室, 四川 成都 610066; 2.四川农业大学园艺学院, 四川 成都 611130)

摘要: 为明确褪黑素对镉胁迫下毛桃生长的影响, 本研究拟分析 1 mg/L 镉胁迫下施用不同浓度褪黑素 (50 $\mu\text{mol/L}$ 、100 $\mu\text{mol/L}$ 、150 $\mu\text{mol/L}$ 、200 $\mu\text{mol/L}$) 和不施褪黑素处理对毛桃幼苗生长及镉含量的影响。结果表明, 1 mg/L 镉胁迫能降低毛桃幼苗生物量、株高和部分光合色素含量, 提高抗氧化酶活性。镉胁迫下, 150 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理的毛桃幼苗生物量和株高显著高于不施褪黑素处理, 其中, 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理的效果最好, 毛桃幼苗根系生物量、地上部生物量及株高分别较不施褪黑素处理提高 14.74%、23.48% 和 5.35%。100 $\mu\text{mol/L}$ 、150 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理的毛桃幼苗叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量均高于不施褪黑素处理, 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理的类胡萝卜素含量高于不施褪黑素处理。不同浓度褪黑素处理的毛桃幼苗超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 和过氧化物酶 (POD) 活性均低于不施褪黑素处理。50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理的毛桃幼苗根系和地上部镉含量分别较不施褪黑素处理降低 23.87% 和 34.39%, 其他浓度褪黑素处理的毛桃幼苗根系和地上部镉含量则比不施褪黑素处理有所增加或无显著差异。因此, 1 mg/L 镉胁迫下, 高浓度 (150 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$) 褪黑素处理能够促进毛桃生长, 而 50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理能够降低毛桃的镉积累量。

关键词: 褪黑素; 镉胁迫; 镉积累; 毛桃; 生长

中图分类号: S662.1; X505; S482.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2025)03-0573-07

Effects of melatonin on the growth and cadmium contents of peach seedlings under cadmium stress

ZHANG Dilian^{1,2}, XIAO Yunying², LI Wan², ZHOU Wanmu², ZHANG Xiaoli², LIN Lijin², TANG Yi², HU Rongping¹

(1. Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Integrated Crop Pest Management in Southwest China, Ministry of Agriculture, Chengdu 610066, China; 2. College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to clarify the effect of melatonin on the growth of peach under cadmium stress, an experiment was designed to analyze the effects of different concentrations of melatonin (50 $\mu\text{mol/L}$, 100 $\mu\text{mol/L}$, 150 $\mu\text{mol/L}$, 200 $\mu\text{mol/L}$) and no melatonin treatment on the growth and cadmium content of peach seedlings under 1 mg/L cadmium stress. The results showed that 1 mg/L cadmium stress could reduce the biomass, plant height and partial photosynthetic pigment

content of peach seedlings, and increase the activities of antioxidant enzymes. Under cadmium stress, the biomass and plant height of peach seedlings treated with 150 $\mu\text{mol/L}$ and 200 $\mu\text{mol/L}$ melatonin were significantly higher than those without melatonin treatment. Among them, the effect of 150 $\mu\text{mol/L}$ melatonin treatment was the best, and the root biomass, aboveground biomass and plant height of peach seedlings were 14.74%, 23.48% and

收稿日期: 2024-08-06

基金项目: 国家现代农业产业技术体系四川水果创新团队项目 (SC-CXTD-2024-04); 四川农业大学本科生科研兴趣培养计划项目 (2023505)

作者简介: 张地莲 (2003-), 女, 四川成都人, 本科生, 主要从事果树生理生态研究工作。 (E-mail) 1900611014@qq.com

通讯作者: 胡容平, (E-mail) hurongping1215@163.com

5.35% higher than those without melatonin treatment, respectively. The chlorophyll a and chlorophyll b contents of peach seedlings treated with 100 $\mu\text{mol/L}$, 150 $\mu\text{mol/L}$ and 200 $\mu\text{mol/L}$ melatonin were higher than those of no melatonin treatment, and the carotenoid content of 150 $\mu\text{mol/L}$ melatonin treatment was higher than that of no melatonin treatment. The activities of superoxide dismutase (*SOD*), catalase (*CAT*) and peroxidase (*POD*) in peach seedlings treated with different concentrations of melatonin were lower than those without melatonin treatment. The cadmium contents in roots and shoots of peach seedlings treated with 50 $\mu\text{mol/L}$ melatonin were 23.87% and 34.39% lower than those without melatonin treatment, respectively. The cadmium contents in roots and shoots of peach seedlings treated with other concentrations of melatonin were increased or weren't significantly different from those without melatonin treatment. Therefore, under 1 mg/L cadmium stress, high concentrations (150 $\mu\text{mol/L}$ and 200 $\mu\text{mol/L}$) of melatonin treatments can promote the growth of peach, while 50 $\mu\text{mol/L}$ melatonin treatment can reduce the cadmium accumulation of peach.

Key words: melatonin; cadmium stress; cadmium accumulation; peach; growth

由于工农业快速发展,受矿物、肥料、药剂、废物处理和工业污染的影响,土壤重金属污染已成为世界性的问题^[1-2]。其中,镉是污染土壤面积较大的重金属之一^[3]。目前,中国各地、各种类型的果园土壤已遭受不同程度的镉污染,导致水果的安全生产受到影响^[4]。因此,采取必要的措施降低土壤镉污染对作物的影响具有重要意义。

目前,利用植物生长调节剂降低作物对重金属的吸收取得了较多的成果^[4-5]。褪黑素作为一种多功能的植物生长调节剂,能够提高作物对低温、高温、干旱、盐等胁迫的抗性^[6-10]。在重金属胁迫下,施用褪黑素可以提高植物抗氧化酶活性和金属螯合防御基因表达水平来降低重金属对植物的毒性^[11]。褪黑素还能够减少作物中重金属的积累量^[12],降低重金属从根系向地上器官的转运量^[13]。在镉污染条件下,施用褪黑素能够降低烟草、大白菜和拟南芥等作物中的镉含量,促进这些作物的生长^[14-16]。但施用褪黑素能促进镉富集植物紫苏、牛繁缕和牛膝菊对镉的吸收,提高这些植物植株的镉含量和镉积累量^[17-18]。Lin 等^[19]研究发现,低浓度的褪黑素能降低树番茄的镉积累量,而高浓度的褪黑素能促进树番茄对镉的吸收和积累。因此,褪黑素对不同作物镉积累的影响存在较大差异。

毛桃为蔷薇科李属果树,是生产上广泛使用的桃和李的砧木^[20]。近年来,受到镉污染的桃园面积不断增大,桃园受到的镉胁迫程度呈不断加深的趋势,镉对桃的安全生产造成重要影响^[21-22]。目前镉对桃树生长的影响已有一些初步分析^[23],但在褪黑素对镉胁迫下毛桃生长的影响方面还缺乏深入分析。鉴于此,本研究以无镉胁迫为对照,分析了 1 mg/L 镉胁迫下施用不同浓度褪黑素对毛桃幼苗生长及镉含量

的影响,以期筛选出适宜的降镉褪黑素浓度,为毛桃安全生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及制备

毛桃种子购自四川省成都市温江区天府花城花卉市场。褪黑素购自北京索莱宝化学药品公司,采用去离子水配制成 500 $\mu\text{mol/L}$ 的母液,再用去离子水稀释成浓度为 50 $\mu\text{mol/L}$ 、100 $\mu\text{mol/L}$ 、150 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$ 的溶液。

霍格兰营养液(粉剂,不含硝酸钙)购自青岛海博生物技术有限公司,硝酸钙购自广东大小化工有限公司。将霍格兰营养液和硝酸钙按使用说明书上的比例分别用去离子水溶解后混合,再用去离子水定容。

氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)购自国药集团化学试剂有限公司,采用去离子水配制得到含镉量 1 g/L 的母液。取镉母液 1 mL,用前面配制得到的霍格兰营养液定容至 1 L,即得含镉量为 1 mg/L 的霍格兰营养液。

1.2 试验设计

试验于 2023 年 3–5 月在四川农业大学成都校区进行。2023 年 3 月,将已发芽的毛桃种子播种于装有珍珠岩的 50 孔穴盘(长 54 cm、宽 28 cm 和高 4 cm)中并置于人工气候室中进行育苗。人工气候室白天温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 70%,光照强度为 10 000 lx,光照时长为 14 h;夜间温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 90%。出苗后,根据珍珠岩水分状况适时浇灌霍格兰营养液。2023 年 4 月,将株高为 8 cm 左右的毛桃幼苗移栽至装有珍珠岩的 21 孔穴盘(长 54.0 cm、宽 28.0 cm 和高 6.5 cm)中,隔穴移栽,每个穴盘移栽毛桃幼苗 11 株,放置在避雨棚中,每 3 d

浇灌适量霍格兰营养液。10 d 后进行施镉和褪黑素处理。以浇灌不含镉营养液为对照(CK),设置浇灌镉含量 1 mg/L 的营养液(T0)、浇灌镉含量 1 mg/L 的营养液+喷施 50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素(T1)、浇灌镉含量 1 mg/L 的营养液+喷施 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素(T2)、浇灌镉含量 1 mg/L 的营养液+喷施 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素(T3)、浇灌镉含量 1 mg/L 的营养液+喷施 200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素(T4)等处理^[17-18],每个处理 1 个穴盘,重复 3 次。营养液每 3 d 浇灌 1 次,直至收获。褪黑素溶液每 7 d 喷施 1 次,每个穴盘喷施 100 mL,共喷施 4 次。从第 1 次喷施褪黑素处理开始计算,毛桃幼苗处理 30 d 后进行整株收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长指标的测定 毛桃幼苗收获后,用卷尺测量株高,并将整株植物分成根系和地上部,清洗干净,烘干,称量根系和地上部生物量。

1.3.2 生理指标的测定 取毛桃幼苗叶片用于测定光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素)含量和抗氧化酶[超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)]活性,测定方法均按照文献[24]。

1.3.3 镉含量的测定 将烘干的根系和地上部样品粉碎,过 100 目筛,分别称取 0.500 g 根系和 1.000 g 地上部样品,消煮后,用 iCAP 6300 型 ICP 光谱仪(美国 Thermo Scientific 公司产品)测定镉含量^[25],并计算镉转运系数(地上部镉含量/根系镉含量)^[26]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 27.0 软件和 Duncan 氏新复极差法进行处理间差异性分析($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 褪黑素对毛桃幼苗生长的影响

镉胁迫下,不同浓度褪黑素处理对毛桃幼苗生长的影响如表 1 所示。从表中可以看出,1 mg/L 镉胁迫处理(T0)的毛桃幼苗根系生物量、地上部生物量和株高都显著低于不施镉对照(CK),分别下降 16.30%、28.53%和 13.66%,说明镉胁迫能显著抑制毛桃幼苗的生长。1 mg/L 镉胁迫下,随着外源褪黑素施用浓度的增加,毛桃幼苗根系生物量、地上部生物量及株高均呈现出先升后降的趋势。T1 处理的毛桃幼苗根系生物量、地上部生物量和株高与 T0 处理均

无显著差异,T2 处理的毛桃幼苗根系生物量显著高于 T0 处理,而地上部生物量和株高差异不显著。T3 处理和 T4 处理的毛桃幼苗根系生物量、地上部生物量和株高均显著高于 T0 处理,其中,T3 处理的毛桃幼苗根系生物量、地上部生物量及株高分别比 T0 处理增加 14.74%、23.48%和 5.35%,促生效果更好。

表 1 镉胁迫下不同浓度褪黑素处理对毛桃幼苗生长的影响

Table 1 Effects of melatonin treatments at different concentrations on the growth of peach seedlings under cadmium stress

处理	根系生物量 (g, 1 株)	地上部生物量 (g, 1 株)	株高 (cm)
CK	0.454 \pm 0.011a	2.306 \pm 0.102a	47.6 \pm 1.2a
T0	0.380 \pm 0.012c	1.648 \pm 0.005d	41.1 \pm 1.3c
T1	0.397 \pm 0.015bc	1.715 \pm 0.078d	41.5 \pm 1.1bc
T2	0.404 \pm 0.013b	1.772 \pm 0.074d	42.2 \pm 1.1bc
T3	0.436 \pm 0.014a	2.035 \pm 0.068b	43.3 \pm 0.5b
T4	0.411 \pm 0.004b	1.908 \pm 0.036c	43.1 \pm 0.6b

CK:不施镉和褪黑素对照;T0:1 mg/L 镉处理;T1:1 mg/L 镉+50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理;T2:1 mg/L 镉+100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理;T3:1 mg/L 镉+150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理;T4:1 mg/L 镉+200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理。同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 褪黑素对毛桃幼苗光合色素含量的影响

镉胁迫下,不同浓度褪黑素处理对毛桃幼苗光合色素含量的影响如表 2 所示。从表中可以看出,1 mg/L 镉胁迫处理(T0)的毛桃幼苗叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量均显著低于 CK,而类胡萝卜素含量与 CK 无显著差异。镉胁迫下,随着褪黑素浓度的增加,毛桃幼苗叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和类胡萝卜素含量亦呈先增后减的趋势,T3 处理最高。T3 处理的毛桃幼苗叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和类胡萝卜素含量分别比 T0 处理增加 21.10%、18.41%和 20.41%,且 T3 处理毛桃幼苗叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量与不施镉对照(CK)无显著差异。

2.3 褪黑素对毛桃幼苗抗氧化酶活性的影响

镉胁迫下,不同浓度褪黑素处理对毛桃幼苗抗氧化酶活性的影响如表 3 所示。从表中可以看出,1 mg/L 镉胁迫处理(T0)的毛桃幼苗 SOD 活性、CAT 活性和 POD 活性显著高于不施镉对照(CK)。镉胁迫下,随着施用褪黑素浓度的增加,毛桃幼苗 SOD、CAT 和 POD 活性都呈持续减少趋势。T1、T2、T3 和 T4 处理的 SOD 活性分别比 T0 处理降低 9.65%、23.20%、35.34%和 40.56%,CAT 活性分别降低 20.61%、29.22%、39.32%和 46.30%,POD 活性分别降低 10.33%、13.14%、17.27%和 22.19%。

表 2 镉胁迫下不同浓度褪黑素处理对毛桃幼苗光合色素含量的影响

Table 2 Effects of melatonin treatments at different concentrations on photosynthetic pigment content of peach seedlings under cadmium stress

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)
CK	1.525±0.103ab	0.457±0.024a	0.369±0.009b
T0	1.289±0.035c	0.364±0.018c	0.343±0.012b
T1	1.401±0.106bc	0.405±0.025b	0.349±0.019b
T2	1.439±0.073ab	0.414±0.019b	0.358±0.016b
T3	1.561±0.088a	0.431±0.015ab	0.413±0.016a
T4	1.558±0.021a	0.423±0.010ab	0.357±0.009b

CK、T0、T1、T2、T3、T4 见表 1 注。同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 3 镉胁迫下不同浓度褪黑素处理对毛桃幼苗抗氧化酶活性的影响

Table 3 Effects of melatonin treatments at different concentrations on antioxidant enzyme activities of peach seedlings under cadmium stress

处理	超氧化物歧化酶(SOD)活性 (U/g)	过氧化氢酶(CAT)活性 [mg/(g·min)]	过氧化物酶(POD)活性 [U/(g·min)]
CK	34.28±1.70e	14.06±0.89e	109.17±2.16e
T0	62.28±1.75a	34.84±1.48a	148.46±2.48a
T1	56.27±1.71b	27.66±1.08b	133.13±1.91b
T2	47.83±1.44c	24.66±0.62c	128.95±1.32b
T3	40.27±1.50d	21.14±1.07d	122.82±2.57c
T4	37.02±1.52de	18.71±0.40d	115.51±1.50d

CK、T0、T1、T2、T3、T4 见表 1 注。同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 4 镉胁迫下不同浓度褪黑素处理对毛桃幼苗镉含量及转运系数的影响

Table 4 Effects of melatonin treatments at different concentrations on cadmium content and translocation coefficient of peach seedlings under cadmium stress

处理	根系镉含量 (mg/kg)	地上部镉含量 (mg/kg)	镉转运系数
CK	-	-	-
T0	138.67±4.51c	1.870±0.075ab	0.013 5±0.000 5a
T1	105.57±2.14d	1.227±0.095c	0.011 6±0.000 9b
T2	147.00±6.93c	1.847±0.083b	0.012 6±0.000 7ab
T3	157.67±4.73b	2.007±0.095a	0.012 7±0.001 0ab
T4	169.67±7.51a	1.720±0.046b	0.010 2±0.000 7c

CK、T0、T1、T2、T3、T4 见表 1 注。-：未检出。同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

镉胁迫环境下,植物根系是最先受到伤害的器

2.4 褪黑素对毛桃幼苗镉含量及转运系数的影响

镉胁迫下,不同浓度褪黑素处理对毛桃幼苗镉含量及转运系数的影响如表 4 所示。从表中可以看出,镉胁迫下,1 mg/L 镉 + 50 μ mol/L 褪黑素处理(T1)的毛桃幼苗根系镉含量、地上部镉含量和镉转运系数都显著低于 1 mg/L 镉处理(T0),分别下降 23.87%、34.39% 和 14.07%;而 1 mg/L 镉 + 50 μ mol/L 褪黑素处理(T2)的毛桃幼苗根系镉含量、地上部镉含量和镉转运系数与 T0 处理均无显著差异。T3 处理毛桃幼苗根系镉含量比 T0 处理增加 13.70%,而地上部镉含量和镉转运系数与 T0 处理无显著差异;T4 处理毛桃幼苗根系镉含量比 T0 处理增加 22.36%,地上部镉含量无差异,而镉转运系数下降 24.44%。

官,根系的受伤导致整个植株生长受阻,生物量减少^[27-30]。镉在植物体内积累后,植物体内活性氧增加,抗氧化酶活性升高,叶绿素的生物合成受到抑制^[31-33]。镉胁迫下,施用褪黑素能够促进大白菜、烟草和拟南芥等植物的生长^[14-16]。本研究结果表明,1 mg/L 镉处理能显著降低毛桃幼苗的生物量、株高和部分光合色素含量,提高抗氧化酶活性,这与前人的研究结果^[27-33]一致。促进毛桃幼苗生长的褪黑素溶液适宜浓度是 150 μ mol/L,这与前人在大白菜等其他作物上的研究结果^[14-18]一致。50 μ mol/L 和 100 μ mol/L 褪黑素处理对毛桃幼苗生物量和株高的影响不显著。褪黑素促进镉胁迫下毛桃幼苗生长的原因在于其是一种类似吡啶乙酸的萜类化合物,具有促进植物细胞扩张、诱导植物侧根和不定根形成等功能^[34]。

重金属胁迫下,褪黑素可以保护植物细胞膜结构和叶绿体结构的完整性,从而提高光合作用^[35]。

作为一种抗氧化剂,褪黑素能够降低植物体内因镉胁迫产生的过量活性氧,还能保护叶绿素生物合成途径的前体,降低其降解速率来维持叶绿素含量^[36-38]。本试验结果表明,在镉胁迫下,施用褪黑素能提高毛桃幼苗的叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量,这与前人的研究结果^[39]一致。施用褪黑素还能调控叶绿素相关基因的表达水平来提高或维持叶绿素含量^[40]。此外,150 $\mu\text{mol/L}$ 的褪黑素处理还能提高毛桃幼苗类胡萝卜素含量,进一步减少镉诱导的氧化损伤,从而保护叶绿素不被降解^[41]。

镉胁迫条件下,施用褪黑素能提高紫苏、牛繁缕、牛膝菊和树番茄等植物的 *SOD*、*POD* 和 *CAT* 活性^[17-19]。本试验结果表明,施用褪黑素能降低毛桃幼苗 *SOD*、*POD* 和 *CAT* 活性,这与前人的研究结果^[42-43]不同。产生这种结果的原因可能有 2 个:一是作为一种有效的活性氧清除剂的褪黑素与活性氧反应形成更强的抗氧化剂 *N1*-乙酰基-*N2*-甲酰基-5-甲氧基犬尿素酰胺,进一步增强植物抗性,降低活性氧含量,从而导致抗氧化酶活性降低^[44-45];二是褪黑素通过诱导植物的抗氧化系统来加强应激反应^[46-47]。本研究结果说明褪黑素对镉胁迫下植物抗氧化酶活性的影响与褪黑素浓度及植物种类有关,其机制还需进一步研究。

褪黑素可与土壤重金属离子螯合降低根际重金属浓度,并通过诱导植物体内金属硫蛋白和植物螯合素的合成,减少植物对重金属的吸收^[35]。较高浓度的褪黑素可以螯合更多的重金属离子,减轻重金属离子对植物细胞的伤害^[48]。Byeon 等^[49]的研究结果表明,镉胁迫下,褪黑素对水稻根系镉含量没有显著影响,但能降低叶片镉含量,这是因为镉经植物根系吸收后只有少量转移到地上部,茎节部位对镉运输有一定阻滞作用^[50]。植物镉含量与植物根系的吸收能力、根系分泌物及土壤镉含量有关^[51-54]。本研究结果表明,50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理能降低毛桃幼苗根系和地上部镉含量,而高浓度的褪黑素处理毛桃幼苗根系的镉含量呈增加趋势,这表明低浓度褪黑素处理可抑制毛桃根系对镉的吸收,这与芥菜等作物的响应特征一致^[55]。高浓度的褪黑素处理(150 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$)能提高毛桃根系镉含量,原因可能是高浓度的褪黑素能激活毛桃根系中的某些特定转运蛋白或通道而促进其对镉的吸收有关^[56]。50 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理能降

低毛桃幼苗镉转运系数,而 100 $\mu\text{mol/L}$ 和 150 $\mu\text{mol/L}$ 的褪黑素处理影响不显著,这亦与前人研究结果^[55]一致。其原因可能在于褪黑素能影响植物螯合素的合成和重金属在叶部的限制性转运^[57-58]。因此,只有较低浓度的褪黑素可以降低毛桃幼苗对镉的积累量,并且褪黑素处理有利于将镉保留在根系中,减少镉从根系向地上部的转运。

4 结论

镉胁迫环境下,150 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理能够提高毛桃幼苗根系生物量和地上部生物量、株高和部分光合色素含量,且 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理效果相对更好。随着褪黑素浓度的增加,毛桃幼苗抗氧化酶活性总体呈下降趋势。低浓度的褪黑素处理(50 $\mu\text{mol/L}$)能降低毛桃幼苗根系和地上部的镉含量,而在高浓度的褪黑素处理下,根系镉含量增加,地上部镉含量与 CK 无显著差异。因此,1 mg/L 镉胁迫下,高浓度(150 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$)的褪黑素对毛桃生长促进效应明显,低浓度(50 $\mu\text{mol/L}$)的褪黑素处理能减少毛桃植株的镉含量。

参考文献:

- [1] ADAMS S V, PASSARELLI M N, NEWCOMB P A. Cadmium exposure and cancer mortality in the Third National Health and Nutrition Examination Survey cohort[J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2012, 69(2): 153-156.
- [2] LIU L W, LI W, SONG W P, et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 206-219.
- [3] 赵 慧,何 博,王铁宇,等. 我国南方典型城市土壤重金属污染特征及源汇关系分析[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(7): 2231-2239.
- [4] 林立金,廖明安. 果园土壤重金属镉污染与植物修复[M]. 成都:四川大学出版社,2020.
- [5] ASGHER M, KHAN M I R, ANJUM N A, et al. Minimising toxicity of cadmium in plants—role of plant growth regulators[J]. *Protoplasma*, 2015, 252(2): 399-413.
- [6] 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.
- [7] 和秋兰,张 航,王正维,等. 外源褪黑素对低温胁迫下马铃薯幼苗抗氧化系统的影响[J]. *华北农学报*, 2022, 37(1): 103-111.

- [8] 齐晓媛,王文莉,胡少卿,等. 外源褪黑素对高温胁迫下菊花光合和生理特性的影响[J]. 应用生态学报,2021,32(7):2496-2504.
- [9] 张明聪,何松榆,秦 彬,等. 外源褪黑素对干旱胁迫下春大豆品种绥农 26 形态、光合生理及产量的影响[J]. 作物学报,2021,47(9):1791-1805.
- [10] 聂萌恩,宁 娜,张一中,等. 褪黑素对盐胁迫下高粱种子萌发的缓解效应及生理机制[J]. 种子,2023,42(4):31-40,63.
- [11] YANG H, FANG R, LUO L, et al. Potential roles of melatonin in mitigating the heavy metals toxicity in horticultural plants[J]. Scientia Horticulturae,2023,321:112269.
- [12] SUN S S, LIU A R, LI Z, et al. Anthocyanin synthesis is critical for melatonin-induced chromium stress tolerance in tomato [J]. Journal of Hazardous Materials,2023,453:131456.
- [13] XU L, ZHANG F, TANG M J, et al. Melatonin confers cadmium tolerance by modulating critical heavy metal chelators and transporters in radish plants[J]. Journal of Pineal Research,2020,69(1):e12659.
- [14] WANG T, SONG J X, LIU Z, et al. Melatonin alleviates cadmium toxicity by reducing nitric oxide accumulation and *IRT1* expression in Chinese cabbage seedlings[J]. Environmental Science and Pollution Research,2021,28(12):15394-15405.
- [15] WANG M, DUAN S H, ZHOU Z C, et al. Foliar spraying of melatonin confers cadmium tolerance in *Nicotiana tabacum* L. [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2019,170:68-76.
- [16] ZHANG J R, LI D X, WEI J, et al. Melatonin alleviates aluminum-induced root growth inhibition by interfering with nitric oxide production in *Arabidopsis* [J]. Environmental and Experimental Botany,2019,161:157-165.
- [17] XIANG G, LIN L J, LIAO M A, et al. Effects of melatonin on cadmium accumulation in the accumulator plant *Perilla frutescens* [J]. Chemistry and Ecology, 2019, 35(6): 553-562.
- [18] TANG Y, LIN L J, XIE Y D, et al. Melatonin affects the growth and cadmium accumulation of *Malachium aquaticum* and *Galinsoga parviflora* [J]. International Journal of Phytoremediation, 2018,20(4):295-300.
- [19] LIN L J, LI J H, CHEN F B, et al. Effects of melatonin on the growth and cadmium characteristics of *Cyphomandra betacea* seedlings[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2018,190(3):119.
- [20] 徐迎澳,肖元松,宁斯逸,等. 桃砧木耐涝性研究进展[J]. 落叶果树,2021,53(6):38-43.
- [21] 汤 民. 果园土壤 Pb、Cd 污染及其原位钝化研究[D]. 重庆:西南大学,2012.
- [22] 刘 纳,高 琴,钟 攀,等. 桃中铅镉含量对人体健康风险评估[J]. 农产品加工,2019(12):66-67,73.
- [23] 关 伟,王有年,师光禄,等. 两个桃树品种对土壤中不同镉水平的响应[J]. 生态学杂志,2007,26(6):859-864.
- [24] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都:四川科学技术出版社,2003.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [26] RASTMANESH F, MOORE F, KESHAVARZI B. Speciation and phytoavailability of heavy metals in contaminated soils in Sarcheshmeh area, Kerman Province, Iran [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2010,85(5):515-519.
- [27] ROMBEL-BRYZEK A, BOJARSKI B, SWISLOWSKI P, et al. The effects of cadmium on selected oxidative stress parameters and the content of photosynthetic pigments in cucumber *Cucumis sativus* L. [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology,2024,84:127463.
- [28] REHMAN M Z, RIZWAN M, GHAFOR A, et al. Effect of inorganic amendments for in situ stabilization of cadmium in contaminated soils and its phyto-availability to wheat and rice under rotation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015,22(21):16897-16906.
- [29] VACULÍK M, PAVLOVIC A, LUX A. Silicon alleviates cadmium toxicity by enhanced photosynthetic rate and modified bundle sheath's cell chloroplasts ultrastructure in maize[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2015,120:66-73.
- [30] HÉDIJI H, DJEBALI W, BELKADHI A, et al. Impact of long-term cadmium exposure on mineral content of *Solanum lycopersicum* plants: consequences on fruit production [J]. South African Journal of Botany,2015,97:176-181.
- [31] PRIYADARSHINI B, SUJATHA B. Cadmium effects on photosynthetic pigments of germinating seedlings of pigeonpea (*Cajanus cajan* L.) [J]. International Journal of Advanced Research,2014,2(12):483-492.
- [32] 裴红宾,张永清,上官铁梁. 根区温度胁迫对小麦抗氧化酶活性及根苗生长的影响[J]. 山西师范大学学报(自然科学版),2006,20(2):78-81.
- [33] 张 岩,胡 军,郭长虹,等. 植物谷胱甘肽-S-转移酶的分子生物学研究进展[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报,2007,23(4):76-79.
- [34] ARNAO M B, HERNÁNDEZ-RUIZ J. Functions of melatonin in plants:a review [J]. Journal of Pineal Research,2015,59(2):133-150.
- [35] LI L, YAN X Y. Insights into the roles of melatonin in alleviating heavy metal toxicity in crop plants [J]. Phytom, 2021, 90(6): 1559-1572.
- [36] ZOUFAN P, ZARE BAVANI M R, TOUSI S, et al. Effect of exogenous melatonin on improvement of chlorophyll content and photochemical efficiency of PS II in mallow plants (*Malva parviflora* L.) treated with cadmium[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants,2023,29(1):145-157.
- [37] PARK S, LEE D E, JANG H, et al. Melatonin-rich transgenic rice plants exhibit resistance to herbicide-induced oxidative stress [J]. Journal of Pineal Research,2013,54(3):258-263.
- [38] KAYA C, OKANT M, UGURLAR F, et al. Melatonin-mediated nitric oxide improves tolerance to cadmium toxicity by reducing ox-

- idative stress in wheat plants [J]. *Chemosphere*, 2019, 225: 627-638.
- [39] NAWAZ M A, JIAO Y Y, CHEN C, et al. Melatonin pretreatment improves vanadium stress tolerance of watermelon seedlings by reducing vanadium concentration in the leaves and regulating melatonin biosynthesis and antioxidant-related gene expression [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 220: 115-127.
- [40] LIANG D, SHEN Y Q, NI Z Y, et al. Exogenous melatonin application delays senescence of kiwifruit leaves by regulating the antioxidant capacity and biosynthesis of flavonoids [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 426.
- [41] TOUSI S, ZOUFAN P, GHAFARROKHIE A R. Alleviation of cadmium-induced phytotoxicity and growth improvement by exogenous melatonin pretreatment in mallow (*Malva parviflora*) plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 206: 111403.
- [42] 王 均, 王 进, 刘 继, 等. 褪黑素浸枝对葡萄扦插苗镉积累的影响 [J]. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2020, 46 (4): 419-424.
- [43] 孙舒畅. 褪黑素在番茄镉胁迫抗性中的功能研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [44] ZHANG N, ZHAO B, ZHANG H J, et al. Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. *Journal of Pineal Research*, 2013, 54 (1): 15-23.
- [45] 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.
- [46] BASIT F, CHEN M, AHMED T, et al. Seed priming with brassinosteroids alleviates chromium stress in rice cultivars via improving ROS metabolism and antioxidant defense response at biochemical and molecular levels [J]. *Antioxidants*, 2021, 10 (7): 1089.
- [47] NI J, WANG Q J, SHAH F A, et al. Exogenous melatonin confers cadmium tolerance by counterbalancing the hydrogen peroxide homeostasis in wheat seedlings [J]. *Molecules*, 2018, 23 (4): 799.
- [48] 寇士伟. 重金属 Cd、Cu、Pb 复合污染对芥菜的胁迫及芥菜对其吸收累积特征研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2011.
- [49] BYEON Y, CHOI G H, LEE H Y, et al. Melatonin biosynthesis requires N-acetylserotonin methyltransferase activity of caffeic acid O-methyltransferase in rice [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66 (21): 6917-6925.
- [50] HAIDER F U, CAI L Q, COULTER J A, et al. Cadmium toxicity in plants: impacts and remediation strategies [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 211: 111887.
- [51] 吴 香, 李 娟, 曹 艳, 等. 植物根系分泌物响应镉胁迫的研究进展 [J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25 (7): 12-20.
- [52] 陈炬廷, 毛 云, 杨佳豪, 等. KOH 改性烟秆生物炭对铅、镉复合污染土壤中烤烟铅、镉吸收的影响 [J]. *南方农业学报*, 2024, 55 (2): 460-467.
- [53] 杨晓锋, 姜永雷, 蔺璟煜, 等. 不同裂解温度生物炭对镉胁迫下烤烟生长特性和镉积累的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2023, 51 (9): 227-233.
- [54] 彭红宇, 刘红恩, 王秋红, 等. 低温生物炭和化肥配施对冬小麦生长和土壤铅镉生物有效性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2023, 51 (4): 212-219.
- [55] 万 常. 外源褪黑素对芥菜镉毒害的缓解效应研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- [56] YU X F, YANG L, FAN C Y, et al. Abscisic acid (ABA) alleviates cadmium toxicity by enhancing the adsorption of cadmium to root cell walls and inducing antioxidant defense system of *Cosmos bipinnatus* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 261: 115101.
- [57] MOUSTAFA-FARAG M, ELKELISH A, DAFEA M, et al. Role of melatonin in plant tolerance to soil stressors: salinity, pH and heavy metals [J]. *Molecules*, 2020, 25 (22): 5359.
- [58] HASAN M K, AHAMMED G J, YIN L L, et al. Melatonin mitigates cadmium phytotoxicity through modulation of phytochelatin biosynthesis, vacuolar sequestration, and antioxidant potential in *Solanum lycopersicum* L. [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 601.

(责任编辑: 石春林)