



张珂,李依,厉萌萌,等.外源褪黑素对镉胁迫下小麦幼苗生长生理特征及镉含量的影响[J].轻工学报,2022,37(4):111-117.
ZHANG K,LI Y,LI M M,et al.Effects of exogenous melatonin on growth and physiological characteristics and Cd content of wheat seeding under Cd stresses[J].Journal of Light Industry,2022,37(4):111-117.
DOI:10.12187/2022.04.015

外源褪黑素对镉胁迫下小麦幼苗生长生理特征及镉含量的影响

张珂^{1,2},李依¹,厉萌萌³,刘德权¹,刘可欣¹,张凌基¹,马闯^{1,2,3}

1. 郑州轻工业大学 材料与化学工程学院,河南 郑州 450001;
2. 环境污染治理与生态修复河南省协同创新中心,河南 郑州 450001;
3. 森特士兴集团股份有限公司,北京 100176

摘要:以小麦矮抗58为研究对象,采用室内培养实验对不同浓度镉(Cd)胁迫下外源褪黑素处理对小麦幼苗生长生理特征及Cd含量进行了研究。结果显示:在Cd胁迫下,外源褪黑素处理在一定程度上促进了小麦幼苗的生长;随着褪黑素浓度的增加,小麦芽中超氧化物歧化酶活性、过氧化氢酶活性和过氧化物酶活性总体上呈先增加后降低的趋势,丙二醛含量则在低浓度Cd胁迫下有所降低、在高浓度Cd胁迫下有所增加;外源褪黑素在一定程度上显著降低了小麦根部和芽中的Cd含量,在低水平Cd胁迫浓度(100 μmol·L⁻¹)时,Cd在小麦中的转移系数显著增加,说明外源褪黑素在影响小麦对Cd吸收的同时促进了Cd在小麦中的转移,但在Cd浓度增加的情况下,较高浓度褪黑素对Cd在小麦幼苗中转移的影响并不显著。

关键词:褪黑素;镉胁迫;小麦幼苗;生长生理特征;重金属污染

中图分类号:S512 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2022)04-0111-07

0 引言

在经济全球化进程中,工业生产过程中的废气、废水和废渣的大量排放及农业生产过程中化肥、农药的不合理施用,造成含有重金属的污染物以各种途径进入到土壤中,对土壤环境和土壤质量构成严重危害^[1-2]。目前,我国耕地总面积中,受重金属污染的耕地面积高达10%以上,其中,受重金属镉(Cd)污染的耕地面积占重金属污染耕地面积的25.2%,且每年所产出的Cd超标农产品高达 1.46×10^9 kg^[3]。土壤中的Cd并不参与生物的代谢活动,但当植物过量吸收Cd时,植物的生长、发育、

生理生化等会受到不同程度的抑制,使植物生长发育迟缓、代谢紊乱、果实或作物产量和质量下降,甚至导致植物死亡^[4-6]。近年来,为减轻Cd对农作物的毒性并阻隔其在作物器官中的积累,外源添加生长调节剂是一种缓解农作物受Cd影响的有效方法^[7-9]。

褪黑素(松果体素)是一种吲哚类激素,具有抗氧化功效,在动、植物的生理活动和代谢活动中发挥着重要作用^[10]。褪黑素在生物体内含量微少,研究发现^[11-12],外源褪黑素的添加能通过清除自由基、提高抗氧化酶活性等方式提高植物对逆境(紫外线辐射、高温、低温、干旱、重金属胁迫等)的耐受性及

收稿日期:2021-04-28;修回日期:2022-01-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(418011086)

作者简介:张珂(1988—),女,河南省泌阳县人,郑州轻工业大学讲师,博士,主要研究方向为恢复生态学。E-mail:zkecolgy@163.com

对病虫害的抵抗能力。J. Ni 等^[13]的研究结果显示,外源褪黑素的添加大大减轻了 Cd 对小麦幼苗的毒性,促进了根系的生长,增加了小麦幼苗的高度和生物量的积累,小麦幼苗中抗坏血酸过氧化物酶和超氧化物歧化酶的活性均有显著的提高;此外,该研究还发现,褪黑素能够通过平衡 Cd 胁迫诱导的内源性过氧化氢水平来防止外源过氧化氢对根的毒害。由此可见,外源褪黑素可通过对作物抗氧化系统的调节有效减缓 Cd 对作物生长发育的影响。

小麦是我国仅次于水稻和玉米的第三大粮食作物。农田土壤中的 Cd 易被小麦根系吸收、转运到地上部分,并在籽粒中积累^[14]。作物幼苗的生长情况是作物生物量和产量的重要基础。因此,研究外源褪黑素对缓解重金属胁迫下作物幼苗生长的影响具有重要的现实意义。然而,关于外源褪黑素添加对植物生长的影响研究主要集中在干旱、盐等^[15-16]自然因素的胁迫,而对重金属胁迫下褪黑素对植物的影响研究较少。鉴于此,本研究拟通过室内培养实验,探讨外源褪黑素的添加对 Cd 胁迫下小麦幼苗生长、生理特征及小麦对 Cd 吸收的影响,以期为农田土壤的 Cd 污染防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料与仪器

主要材料:小麦种子矮抗 58,购自河南省农业科学院;Cd 胁迫试剂氯化镉 ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$) 和外源褪黑素,均购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

主要仪器:JOANLAB 型万分之一电子分析天平(感量 0.000 1 g),宁波市鄞州群安实验仪器有限公司产;QHX-400BS-III 型人工气候箱,上海新苗医疗器械制造有限公司产;UV-5500 型紫外可见分光光度计,上海元析仪器有限公司产;ZEENIT 700P 型耶拿火焰石墨炉原子吸收光谱仪,德国耶拿分析仪器股份公司产。

1.2 实验设计

采用双因素随机实验设计,设置 Cd 胁迫和外源褪黑素处理 2 个因素。根据前期研究结果^[17],本实验 Cd 胁迫设置 2 个水平,分别为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、

$200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每个 Cd 胁迫水平下设置 4 个浓度的外源褪黑素处理,分别为 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[18]。

取籽粒饱满、大小一致的小麦种子,用体积分数 0.5% 的次氯酸钠溶液浸泡 30 min 后,去离子水冲洗数次。将清洗后的种子浸泡在去离子水中 24 h 后,取出种子,用滤纸吸干表面水分,将其均匀摆放在于铺有 2 层滤纸的直径为 9 cm 的培养皿中。每个培养皿中放入 60 粒小麦种子,每组处理设 5 个重复,共 40 个培养皿。将培养皿置于温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、光暗比为 12 h/12 h 的光照培养箱中培养,每天更换滤纸并添加同等浓度的溶液。待种子萌发 15 d 后测定其生长、生理及 Cd 含量等指标。

1.3 测定指标及方法

小麦幼苗萌发培养 15 d 后,测量小麦幼苗的根长、芽长,并测定小麦芽中超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)含量。SOD、CAT、POD 活性和 MDA 含量分别采用氮蓝四唑、高锰酸钾滴定法、愈创木酚法和硫代巴比妥酸法测定^[19]。

将小麦幼苗根和芽分离,用超纯水洗净,在温度为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干后用研钵磨碎。样品经过消解和赶酸处理后冷却至室温,所得溶液定容于 25 mL 锥形瓶中,过滤后用石墨炉原子吸收法测定根和芽中的 Cd 含量。相应指标的计算公式如下:

$$\text{Cd 转移系数} = \frac{\text{小麦芽中 Cd 含量}}{\text{小麦根中 Cd 含量}} \times 100\%$$

$$\text{小麦根对 Cd 的滞留率} =$$

$$\frac{\text{小麦根中 Cd 含量} - \text{小麦芽中 Cd 含量}}{\text{小麦根中 Cd 含量}} \times 100\%$$

1.4 数据处理

采用 SPSS 16.0 统计分析软件进行数据分析和显著性差异检验。数据以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 外源褪黑素对 Cd 胁迫下小麦幼苗生长指标的影响

外源褪黑素对 Cd 胁迫下小麦幼苗生长的影响如图 1 所示(同一折线上不同字母表示在 0.05 水平上有显著性差异($P < 0.05$);同一折线上相同字母表

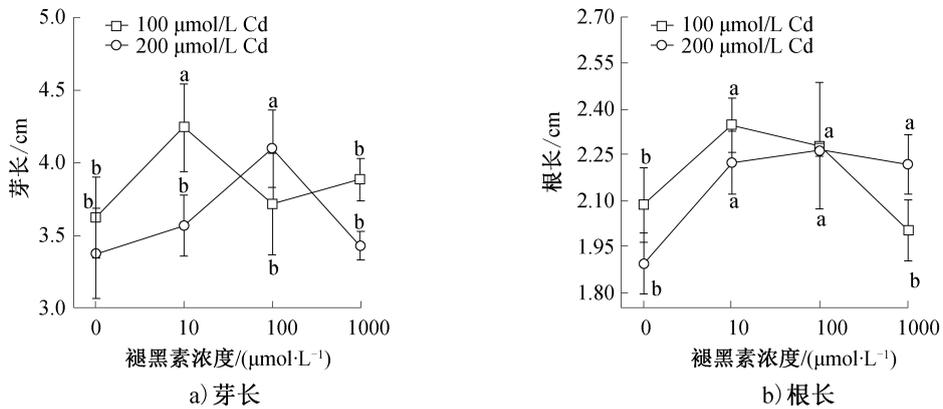


图1 外源褪黑素对Cd胁迫下小麦幼苗生长的影响

Fig. 1 Effect of melatonin on the growth of wheat seedling under Cd stress

示在 0.05 水平上无显著性差 ($P < 0.05$, 下同)。由图 1 可知, 当 Cd 浓度为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 相对于褪黑素浓度 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度为 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的褪黑素添加分别使小麦幼苗芽长增加了 17.09%、2.57% 和 7.30%; 当 Cd 浓度为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 上述浓度褪黑素的添加分别使小麦幼苗芽长增加了 5.75%、21.45% 和 1.60%。当 Cd 浓度为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 相对于褪黑素浓度 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度为 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的褪黑素添加分别使小麦幼苗根长增加了 12.45%、9.24%, 而浓度为 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的褪黑素添加使根长降低了 4.02%; 当 Cd 浓度为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 上述浓度褪黑素的添加分别使小麦幼苗根长增加了 17.41%、19.58% 和 17.09%。整体来看, 不同浓度 Cd 胁迫下, 低浓度褪黑素能显著促进小麦幼苗芽和根的生长。前期研究^[17]发现, 在 Cd 胁迫下, 小麦芽和根的生长明显受到抑制。本研究结果则显示, 随着褪黑素浓度的增加, 小麦幼苗根长和芽长均呈现先增加后降低的趋势, 说明适量的褪黑素能缓解 Cd 胁迫对小麦幼苗生长的影响, 而超过一定浓度的褪黑素对 Cd 胁迫下小麦幼苗生长起抑制作用, 这与刘仕翔等^[20]和李冬等^[21]关于外源褪黑素对 Cd 胁迫下水稻及豌豆生长的影响研究结果一致。这说明在 Cd 胁迫下, 适宜浓度的外源褪黑素可以提高植物对 Cd 胁迫的抗逆性, 缓解 Cd 对小麦幼苗的毒害作用, 而高浓度褪黑素可能抑制了小麦体内吲哚乙酸的合成, 并通过钙调蛋白引起微管蛋白的解聚, 破坏了细胞的纺锤体结构进而影响了小麦幼苗的生长^[22]。

2.2 外源褪黑素对 Cd 胁迫下小麦幼苗生理指标的影响

外源褪黑素对 Cd 胁迫下小麦幼苗生理指标的影响如图 2 所示。由图 2a) 可见, 在 Cd 胁迫下, 小麦幼苗的 SOD 活性随着褪黑素浓度的增加呈先增加后下降的趋势。在 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下, 与浓度 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素相比, $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素的添加分别使小麦幼苗的 SOD 活性上升了 7.14% 和 13.3%, 而 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素的添加使 SOD 活性下降了 2.79%; 在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下, $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素的添加使小麦幼苗 SOD 活性上升了 2.39%, 但 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素的添加分别使 SOD 活性下降了 5.97% 和 1.48%。由图 2b) 和 2c) 可知, 在 Cd 胁迫下, 小麦幼苗的 CAT 活性亦随着褪黑素浓度的增加呈先增加后下降的趋势, 且褪黑素的添加能提高 Cd 胁迫下小麦幼苗的 POD 活性。由此可见, 在 Cd 胁迫下, 一定浓度的褪黑素可提高 SOD、CAT 和 POD 的活性, 这说明植物在 Cd 胁迫下抗氧化系统会受损, 植物体内酶促防御系统的重要保护酶 (SOD、CAT 等) 的活性会降低, 而适量的褪黑素则能提高逆境胁迫下植物体内的活性氧清除能力^[23]。这与 M. M. Posmuk 等^[24]在研究不同浓度褪黑素处理对紫甘蓝在 Cu 胁迫下种子萌发的影响时所得结论一致, 说明褪黑素具有明显的剂量效应, 低浓度褪黑素可显著提高小麦幼苗抗 Cd 胁迫。

有研究^[25-26]发现, MDA 含量的高低常用来反映细胞膜损伤程度和植物抗逆性强弱。由图 2d) 可见,

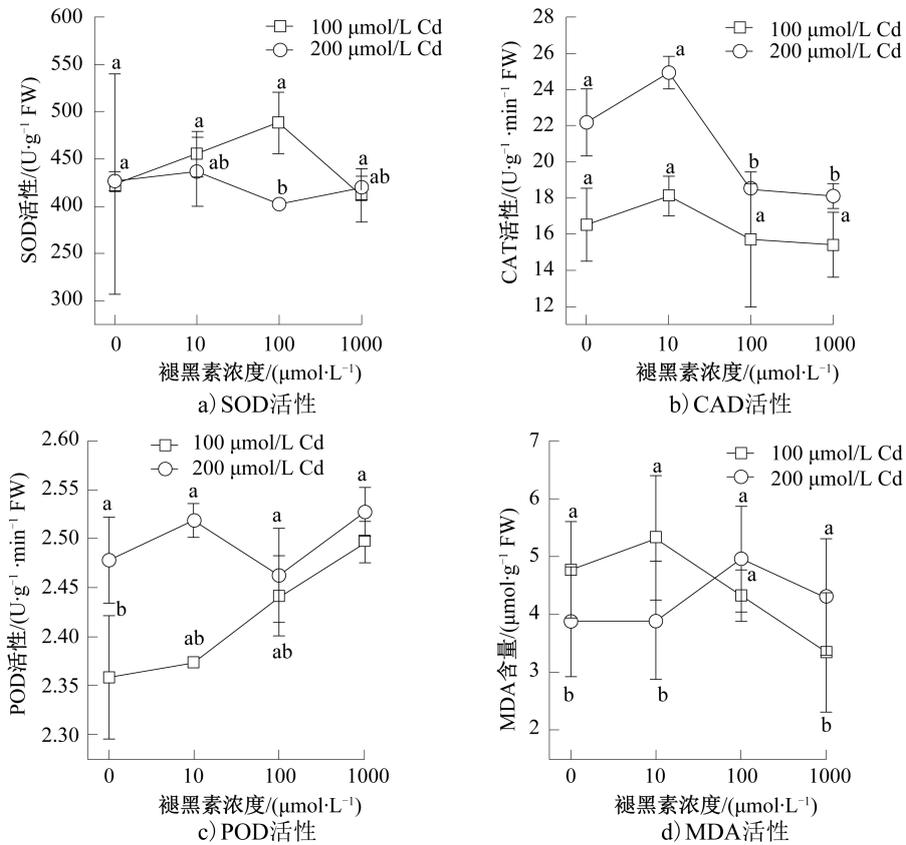


图2 外源褪黑素对Cd胁迫下小麦幼苗生理指标的影响

Fig. 2 Effects of melatonin on physiological characteristics of wheat seedling under Cd stress

在Cd胁迫下小麦幼苗的MDA含量随着褪黑素浓度的增加呈先增加后下降的趋势。在100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫下,相对于0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素,添加10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素的小麦幼苗MDA含量提高了10.30%,添加100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素的小麦幼苗MDA含量分别降低了10.50%和43.00%;在200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd胁迫下,添加10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素的小麦幼苗MDA含量分别比0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素处理提高了0.58%、21.84%和10.03%。由此可见,在低浓度Cd胁迫下,随着褪黑素浓度的升高小麦幼苗MDA含量有所降低,这与刘仕翔等^[20]研究结果一致,说明褪黑素可有效缓解小麦体内的过氧化胁迫,从而提高小麦幼苗对Cd胁迫的抵抗能力。在高浓度Cd胁迫下,较高浓度外源褪黑素的添加反而使MDA含量增加,进一步表明高浓度褪黑素可能成为限制小麦幼苗生长的一个胁迫因子,增加的MDA通过与小麦幼苗蛋白质发生反应使其变性,导致膜流动性降低,进而影响小麦幼苗的生长^[25-26]。

2.3 外源褪黑素对Cd胁迫下小麦幼苗Cd含量的影响

外源褪黑素对Cd胁迫下小麦幼苗根和芽中Cd含量的影响如表1所示。由表1可见,外源褪黑素的添加显著降低了小麦幼苗中的Cd含量。Cd胁迫浓度为100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,与0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素相比,添加10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素分别使小麦幼苗根部Cd含量降低了56.00%、68.00%和28.00%,小麦芽中Cd含量分别降低了55.89%、32.35%和55.88%;当Cd浓度为200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,上述浓度的褪黑素分别使小麦幼苗根部Cd含量降低了93.70%、65.20%和66.06%,小麦芽中Cd含量分别降低了33.33%、77.78%和70.37%。当Cd浓度为100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,与0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素相比,添加10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素后,Cd在小麦幼苗中的转移系数增加显著,Cd在根系中的滞留率相应降低;添加1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素后,转移系数降低,滞留率则增加。当Cd浓度为200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,添加不同浓度褪黑素后Cd的转移系数均比Cd浓

表1 外源褪黑素对 Cd 胁迫下小麦幼苗根和芽中 Cd 含量的影响

Table 1 Effect of exogenous melatonin on Cd content in root and shoot of wheat seedling under Cd stress

Cd 胁迫浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	褪黑素浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	Cd 总量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$)	根中 Cd 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$)	芽中 Cd 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$)	转移系数/ %	根中 Cd 滞留率/ %
100	0	0.06±0.003 ^a	0.025±0.002 ^a	0.034±0.006 ^a	136.00	-36.00
	10	0.03±0.003 ^b	0.011±0.001 ^{ab}	0.015±0.002 ^b	136.36	-36.36
	100	0.03±0.001 ^b	0.008±0.002 ^b	0.023±0.003 ^{ab}	287.50	-187.50
	1000	0.04±0.007 ^{ab}	0.018±0.003 ^{ab}	0.015±0.003 ^b	83.33	16.67
200	0	1.19±0.036 ^a	1.158±0.039 ^a	0.027±0.003 ^a	2.33	97.67
	10	0.09±0.009 ^b	0.073±0.006 ^b	0.018±0.004 ^{ab}	24.66	75.34
	100	0.40±0.091 ^{ab}	0.403±0.09 ^{ab}	0.006±0.002 ^b	1.49	98.51
	1000	0.40±0.017 ^{ab}	0.393±0.018 ^{ab}	0.008±0.001 ^b	2.04	97.96

注:不同肩标小写字母表示在 0.05 水平上有显著性差异;相同肩标小写字母表示在 0.05 水平上无显著性差异。

度为 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时小,在根系中滞留率则相应较大。由此可见,在 Cd 胁迫下,添加不同浓度的褪黑素均可显著降低小麦中 Cd 的含量,且随着外源褪黑素的增加,小麦中的 Cd 含量呈现先下降后上升的趋势,说明较低浓度的褪黑素在一定程度上显著抑制了小麦对 Cd 的吸收,这与以往研究结果一致^[22,27-28]。此外,本研究发现在 Cd 浓度为 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,较高浓度外源褪黑素($100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)的添加不仅显著降低了小麦幼苗中的 Cd 含量,而且显著增加了 Cd 在小麦中的转移系数,致使根中 Cd 的滞留量减少,而 Cd 浓度为 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,较高浓度外源褪黑素对 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 在小麦中的转移影响并不显著。以上结果说明,外源褪黑素在降低小麦 Cd 吸收量的同时,一定程度上也促进了 Cd 在小麦中的转移,这可能与褪黑素能够影响植物装载转运 Cd 元素的相关基因转录水平有关^[29],还有待于进一步研究。

3 结论

本文通过室内培养实验分析了外源褪黑素对 Cd 胁迫下小麦幼苗生长生理特征及 Cd 含量的影响,结果表明:1)适量的褪黑素能有效缓解 Cd 胁迫对小麦根长和芽长的抑制,促进小麦幼苗生长;2)低浓度褪黑素可通过影响小麦幼苗中 SOD、CAT 和 POD 活性来提高小麦幼苗对 Cd 胁迫的抵抗力,且低浓度褪黑素对 Cd 胁迫下小麦体内的过氧化胁迫有缓解作用,而较高浓度褪黑素使得高浓度 Cd 胁迫下小麦幼苗的 MDA 含量增加,说明较高浓度褪黑素可能是限制小麦幼苗生长的胁迫因子;3)褪黑

素在一定程度上通过抑制小麦对 Cd 的吸收来降低小麦幼苗中的 Cd 含量,且低浓度褪黑素可促进 Cd 在小麦中的转移。以上结果,一方面体现了低浓度外源褪黑素能够提高小麦对 Cd 胁迫的抵抗力,另一方面为探索有效改善作物在 Cd 胁迫下如何稳定生长提供了新思路,这也将是后期开展研究的重点。

参考文献:

- [1] 李玲,陈进红,祝水金. 镉胁迫对转基因棉花 SGK3 和 ZD-90 种子品质性状的影响[J]. 作物学报,2011,37(5):929-933.
- [2] 任丽娟. 紫花苜蓿吸收土壤中重金属 Cd、Co 影响因素的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2015.
- [3] 刘衡. 土壤镉污染对小麦植物络合素合成的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [4] 何俊,王学东. 典型污灌区土壤中 Cd 的形态有效性及其影响因子[J]. 中国环境科学,2016,36(10):3056-3063.
- [5] 慈敦伟,姜东,戴廷波,等. 镉毒害对小麦幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 麦类作物学报,2005,25(5):88-91.
- [6] 张玲,王焕校. 镉胁迫下小麦根系分泌物的变化[J]. 生态学报,2002,22(4):496-502.
- [7] WU Q, SU N N, CAI J T, et al. Hydrogen-rich water enhances cadmium tolerance in Chinese cabbage by reducing cadmium uptake and increasing antioxidant capacities [J]. Journal of

- Plant Physiology, 2015, 175: 174–182.
- [8] RIZWAN M, MEUNIER J D, DAVIDIAN J C, et al. Silicon alleviates Cd stress of wheat seedlings (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio) grown in hydroponics [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(2): 1414–1427.
- [9] 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.
- [10] 张娜, 张海军, 杨荣超, 等. 褪黑素在植物中的功能研究进展 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(9): 16–20.
- [11] AFREEN F, ZOBAYED S M A, KOZAI T. Melatonin in *Glycyrrhiza uralensis*: Response of plant roots to spectral quality of light and UV-B radiation [J]. Journal of Pineal Research, 2006, 41(2): 108–115.
- [12] TIRYAKI I, KELES H. Reversal of the inhibitory effect of light and high temperature on germination of *Phacelia tanacetifolia* seeds by melatonin [J]. Journal of Pineal Research, 2012, 52(3): 332–339.
- [13] NI J, WANG Q, SHAH F A, et al. Exogenous melatonin confers cadmium tolerance by counterbalancing the hydrogen peroxide homeostasis in wheat seedlings [J]. Molecules, 2018, 23(4): 00799.
- [14] 李惠英, 田魁祥, 赵欣胜. 不同小麦品系耐镉能力对比研究 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(4): 279–282.
- [15] 苗含笑, 李东晓, 王久红, 等. 褪黑素对干旱胁迫下小麦生长发育和产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 161–167.
- [16] 刘佳奇, 李丽, 杨红红, 等. 盐胁迫下褪黑素对小麦种子萌发和幼苗生理特性的影响 [J/OL]. (2022-07-05) [2022-07-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=MLZW20220702003&uniplat-form=NZKPT&v=Qe5AhlUzw1rAIMczguEt-j-VINc17VDWzuluHvJBHrXllrj9G8-WtsguT3ih69ov>.
- [17] 张珂, 厉萌萌, 刘德权, 等. 镉胁迫对小麦、玉米种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 种子, 2019, 38(5): 90–94.
- [18] ZHANG H J, ZHANG N, YANG R C, et al. Melatonin promotes seed germination under high salinity by regulating antioxidant systems, ABA and GA4 interaction in cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. Journal of Pineal Research, 2014, 57(3): 269–279.
- [19] 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.
- [20] 刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 等. 外源褪黑素处理对镉胁迫下水稻种子萌发的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1034–1041.
- [21] 李冬, 王艳芳, 王悦华, 等. 外源褪黑素对镉胁迫下豌豆种子萌发、幼苗抗性生理及镉含量的影响 [J]. 核农学报, 2019, 33(11): 2271–2279.
- [22] 黄科文, 林立金, 王均, 等. 不同浓度褪黑素对豆瓣菜镉积累的影响 [J]. 华北农学报, 2019, 34(4): 140–147.
- [23] 杨波, 何俊瑜, 任艳芳, 等. 过氧化氢对镉胁迫下水稻种子萌发的缓解效应 [J]. 植物生理学报, 2018, 54(6): 1111–1118.
- [24] POSMYK M M, KURAN H, MARCINIAK K, et al. Presowing seed treatment with melatonin protects red cabbage seedlings against toxic copper ion concentrations [J]. Journal of Pineal Research, 2008, 45(1): 24–31.
- [25] 单长卷, 赵新亮, 汤菊香. 水杨酸对干旱胁迫下小麦幼苗抗氧化特性的影响 [J]. 麦类作物学报, 2014, 34(1): 91–95.
- [26] MITTAL S, KUMARI N, SHARMA V. Differential response of salt stress on *Brassica juncea*: Photosynthetic performance, pigment, proline, D1 and antioxidant enzymes [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 54: 17–26.

- [27] 张锐敏. 褪黑素预处理对镉胁迫和硝酸盐胁迫下黄瓜生长的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [28] 黄益宗,蒋航,王农,等. 外源褪黑素对砷胁迫下水稻幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2018,37(6):1738-1743.
- [29] 刘自力,黄一凡,朱正波,等. 叶面喷施褪黑素对小白菜幼苗镉耐性的影响[J]. 植物生理学报,2018,54(4):660-668.

Effects of exogenous melatonin on growth and physiological characteristics and Cd content of wheat seedling under Cd stresses

ZHANG Ke^{1,2}, LI Yi¹, LI Mengmeng³, LIU Dequan¹, LIU Kexin¹, ZHANG Lingji¹, MA Chuang^{1,2,3}

1. College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Collaborative Innovation Center of Environmental Pollution Control and Ecological Restoration, Zhengzhou 450001, China;

3. Center International Group Co., Ltd., Beijing 100176, China

Abstract: To investigate the effects of exogenous melatonin on the growth physiology and Cd content of wheat seedling under Cd stress, the present research selected wheat seed Aikang No. 58 as test material and adopted indoor culture method to study the effects of different concentrations exogenous melatonin under the stress of different Cd concentrations on the growth, physiological characteristics, and Cd absorption of wheat seedling. Results showed that under Cd stress, the addition of exogenous melatonin promoted the growth of wheat seedling to some extent. With the increase of melatonin concentration, the activities of peroxidase, catalase, and superoxide dismutase in wheat shoot tended to increase first and then decrease, while the content of malondialdehyde decreased under low concentration of Cd stress and increased under high concentration of Cd stress. Exogenous melatonin significantly decreased the Cd content in wheat root and shoot to some extent. Moreover, when the Cd concentration was $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, the transfer coefficient of Cd in wheat seedling increased significantly, which indicated that exogenous melatonin not only reduced Cd absorption in wheat seedling, but also promoted Cd transfer in wheat seedling to some extent. However, when the Cd concentration increased, the higher concentration of melatonin had no significant effect on the transfer of Cd in wheat seedling.

Key words: melatonin; Cd stress; wheat seedling; growth and physiological characteristic; heavy metal pollution

(责任编辑:王晓波)