

褪黑素浸种对豌豆幼苗生长及镉积累的影响^①

唐 懿¹, 任 纬², 刘副刚³, 李焕秀¹, 廖明安³, 蒋 伟⁴, 林立金^{1*}

(1 四川农业大学果蔬研究所, 成都 611130; 2 四川省内江市农业科学院玉米研究所, 四川内江 641000; 3 四川农业大学园艺学院, 成都 611130; 4 成都师范学院化学与生命科学学院, 成都 611130)

摘 要: 通过盆栽试验, 研究了不同浓度褪黑素浸种对豌豆幼苗生长及镉积累的影响。结果表明: 用 50、100、150、200 $\mu\text{mol/L}$ 的褪黑素浸种处理后, 豌豆幼苗的生物量、含水量、光合色素含量、抗氧化酶活性均高于对照, 且豌豆幼苗植株的镉含量明显降低。当褪黑素浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ 时, 豌豆幼苗的生物量、光合色素含量均达到最大值; 而根系及地上部分的镉含量最低, 分别为 6.72 mg/kg 和 0.104 mg/kg, 较对照分别降低了 20.28% 和 46.39%。因此, 褪黑素浸种能够促进豌豆幼苗生长, 降低其对镉的吸收, 其中 200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素效果最好。

关键词: 褪黑素; 豌豆幼苗; 生长; 镉

中图分类号: X53; S482.8 文献标识码: A

土壤是人类赖以生存的最重要资源之一, 但是, 近年来土壤镉污染日益加重。据统计, 现如今中国镉污染土地面积已经达到了 $1.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 涉及了 11 个省市 25 个地区^[1]。镉是植物非必需元素, 也是毒性最大的重金属污染物之一, 极易被植物根系吸收并转移到其他部位^[2]。此外, 镉还具有累积效应, 通过食物链进入人体, 若摄入过多, 会致突变、致畸、致癌, 严重影响人体健康^[3-4]。另一方面, 蔬菜镉污染正逐渐成为人们关注的焦点, 其污染主要来源为污灌和污泥施用等^[5-6]。值得注意的是, 近几年随着菜地大量化肥的不合理施用, 肥料已成为蔬菜镉污染的一个重要来源^[7]。蔬菜是人们生活必不可少的食材, 但重金属元素进入蔬菜体内后, 对蔬菜的生长发育产生毒害作用, 降低蔬菜的产量和品质^[8]。

褪黑素又称松果体素, 化学名称为 N-乙酰基-5-甲氧基-色胺, 是生物进化中的一种保守分子, 广泛存在于动、植物和微生物中, 具有促进睡眠、调节时差、抗衰老、调节免疫、抗肿瘤、抗氧化等多项生理功能^[9]。有研究发现, 褪黑素处理可缓解低温对松蓝种子膜脂过氧化物的伤害, 提高松蓝种子在低温胁迫条件下的萌发, 促进其幼苗的生长^[10]。褪黑素还能提高 NaCl 胁迫下狼尾草种子的发芽势和发芽率, 提高狼尾草胚根的直径, 促进其壮根^[11]。

在镉胁迫条件下, 褪黑素可以有效地缓解镉对水稻的毒害作用, 可提高水稻种子的发芽率和发芽势, 促进水稻幼根和幼芽的生长^[12]。因此, 源褪黑素可能是一种抗氧化剂而缓解逆境胁迫对植物造成的伤害。

豌豆是一种豆科蔬菜植物, 含有人体所必须的多种氨基酸和分解亚硝胺的酶, 具有高营养价值和防癌、抗癌的作用, 在全国各地大面积栽培^[13]。然而, 近年来的菜地镉污染直接影响到豌豆的安全生产^[5-6]。鉴于此, 本试验采用褪黑素浸种的方式研究其对豌豆幼苗生长及镉积累的影响, 以期筛选出能降低豌豆幼苗镉积累及提升豌豆幼苗生产效益的褪黑素浓度, 为豌豆安全生产提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

豌豆品种为成豌 8 号, 市场购买, 其生长势旺, 分枝多, 稳定性好, 适应性广。

土壤为潮土, 取自四川省成都市温江区农田, 其基本理化性质为: pH 6.29, 有机质 21.16 g/kg, 全氮 1.09 g/kg, 全磷 1.20 g/kg, 全钾 22.21 g/kg, 碱解氮 68.12 mg/kg, 有效磷 16.22 mg/kg, 速效钾 156.21 mg/kg, 镉含量 0.10 mg/kg, 有效态镉含量 0.028 mg/kg。

基金项目: 四川省教育厅青年项目(15ZA0011)资助。

* 通讯作者(11j800924@163.com)

作者简介: 唐懿(1984—), 女, 四川内江人, 博士, 副研究员, 主要从事蔬菜遗传育种及栽培研究。E-mail: tangyi84@qq.com

1.2 试验设计

将土壤风干,用 11 cm × 15 cm(直径×高)塑料盆装入过 6.72 mm(3 目)筛的风干土 0.5 kg,加入镉溶液(以 CdCl₂·2.5H₂O 分析纯形式加入土壤中),使土壤镉含量为 10 mg/kg^[14],保持土壤湿润,放置 30 d,不定期翻土混合,使土壤充分混合均匀。

将豌豆用浓度分别 0(CK,清水)、50、100、150、200 μmol/L 的褪黑素溶液浸种 24 h,每个处理重复 3 次,催芽,种植在已经装好土壤的 PVC 盆中。每盆种植 8 粒,种植深度浅,保持湿润,放置于培养室中,保持培养室的温度在 24℃左右。待出苗后将 PVC 盆移至遮雨棚中,育苗,每盆保留生长一致的幼苗 5 株,并及时浇水以保持土壤湿润。

豌豆在种植 40 d 后整株收获,测定株高、根长、根基部直径、茎基部直径、根系体积和生物量。采用丙酮-乙醇混合浸提法^[15]测定光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量及类胡萝卜素)含量;可溶性蛋白含量用考马斯亮白 G250 法测定;过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)的活性按照《植物生理学实验教程》^[15]的方法进行测定。称取 5.000 g 植物鲜样并磨成匀浆,加入硝酸-高氯酸(体积比为 4 : 1)放置 12 h 后消化至溶液透明,过滤,定容至 50 ml,用 iCAP 6300 型 ICP 光谱仪(Thermo Scientific, USA)测定镉含量^[16]。

1.3 数据统计与分析

所有数据用 SPSS 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 豌豆幼苗的形态指标

由表 1 可知,与对照比较,褪黑素浸种处理后豌豆幼苗的株高、根长、根基部直径和茎基部直径都有所提高,且随着褪黑素浓度的增加同步增长。当褪黑素浓度为 200 μmol/L 时,豌豆幼苗的株高、根长、根基部直径和茎基部直径均达到最大值,分别较各自对照提高了 14.27%($P < 0.05$)、16.75%($P < 0.05$)、220.29%($P < 0.05$)和 193.42%($P < 0.05$)。由此可见,褪黑素浸种可改善、提高豌豆幼苗的外部形态指标,且 200 μmol/L 的浓度效果最显著。

2.2 豌豆幼苗的生物量

如表 2 所示,与对照相比,褪黑素浸种处理后,豌豆幼苗的鲜重及根系体积均得到提高。随着褪黑素浓度的增加,豌豆幼苗的根系、茎秆、叶片及地上部分鲜重呈增加的趋势。当褪黑素浓度为 200 μmol/L 时,豌豆幼苗的根系、茎秆、叶片及地上部分鲜重达最大值,较各自对照分别提高了 56.93%($P < 0.05$)、33.53%($P < 0.05$)、51.46%($P < 0.05$)和 43.56%($P < 0.05$)。不仅如此,褪黑素浸种后,豌豆幼苗的根系体积也得到提高,且随着褪黑素浓度的增加而呈增大的趋势。当褪黑素浓度为 50、100、150、200 μmol/L 时,豌豆幼苗的根系体积分别提高了 6.38%($P < 0.05$)、13.09%($P < 0.05$)、31.17%($P < 0.05$)和 36.17%($P < 0.05$)。由此可见,褪黑素浸种促进豌豆幼苗的生长,且 200 μmol/L 的浓度效果最佳。

表 1 豌豆幼苗的形态指标

Table 1 Morphological indexes of pea seedlings

褪黑素浓度(μmol/L)	株高(cm)	根长(cm)	根基部直径(cm)	茎基部直径(cm)
0	24.533 ± 0.320 e	17.538 ± 0.504 d	0.207 ± 0.020 d	0.228 ± 0.013 d
50	25.317 ± 0.475 d	18.025 ± 0.555 d	0.363 ± 0.040 d	0.352 ± 0.024 d
100	25.717 ± 0.331 c	18.588 ± 0.610 c	0.442 ± 0.048 c	0.522 ± 0.010 c
150	27.417 ± 0.256 b	19.225 ± 0.654 b	0.546 ± 0.027 b	0.589 ± 0.013 b
200	28.033 ± 0.441 a	20.475 ± 0.506 a	0.663 ± 0.032 a	0.669 ± 0.011 a

注:同列不同小写字母表示各处理间差异达到显著水平($P < 0.05$),下同。

表 2 豌豆幼苗的生物量(以鲜重计)

Table 2 Biomass of pea seedlings

褪黑素浓度(μmol/L)	根系(g/株)	茎秆(g/株)	叶片(g/株)	地上部分(g/株)	根系体积(ml/株)
0	0.860 ± 0.021 c	0.513 ± 0.012 d	0.651 ± 0.018 d	1.164 ± 0.041 e	0.940 ± 0.024 e
50	0.962 ± 0.024 bc	0.590 ± 0.014 c	0.767 ± 0.021 c	1.357 ± 0.047 d	1.000 ± 0.028 b
100	1.074 ± 0.027 b	0.640 ± 0.015 b	0.801 ± 0.022 c	1.440 ± 0.050 c	1.063 ± 0.026 c
150	1.237 ± 0.031 a	0.659 ± 0.015 ab	0.866 ± 0.024 b	1.526 ± 0.053 b	1.233 ± 0.032 d
200	1.341 ± 0.034 a	0.685 ± 0.016 a	0.986 ± 0.028 a	1.671 ± 0.058 a	1.280 ± 0.035 a

2.3 豌豆幼苗的含水量

随着褪黑素的浓度增加,豌豆幼苗根系、茎秆、叶片及地上部分的含水量都呈增加的趋势(表 3)。当褪黑素浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ 时,豌豆幼苗根系、茎秆、叶片及地上部分的含水量分别较各自对照提高了 2.51% ($P < 0.05$)、2.67% ($P > 0.05$)、4.65% ($P > 0.05$) 和 3.89% ($P < 0.05$)。可见,褪黑素浸种可以提高豌豆幼苗的含水量,且褪黑素浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ 时效果最佳。

表 3 豌豆幼苗的含水量(g/kg)
Table 3 Water contents in pea seedlings

褪黑素浓度 ($\mu\text{mol/L}$)	根系	茎秆	叶片	地上部分
0	918 \pm 3 c	861 \pm 3 a	839 \pm 4 a	848 \pm 3 c
50	926 \pm 3 bc	878 \pm 3 a	857 \pm 2 a	866 \pm 3 c
100	930 \pm 2 ab	882 \pm 2 a	859 \pm 3 a	869 \pm 4 bc
150	937 \pm 4 a	882 \pm 6 a	866 \pm 5 a	873 \pm 3 b
200	941 \pm 3 a	884 \pm 4 a	878 \pm 4 a	881 \pm 5 a

2.4 豌豆幼苗的光合色素含量

褪黑素浸种处理后,豌豆幼苗的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量及类胡萝卜素含量较对照均有提高(表 4)。随着褪黑素浓度的增加,豌豆幼苗的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量及类胡萝卜素含量呈增加的趋势,说明褪黑素能够提高豌豆幼苗的叶绿素含量。褪黑素浸种处理的豌豆幼苗叶绿素 a 和叶绿素 b 与各自对照相比,差异均不显著 ($P > 0.05$)。当褪黑素浓度为 50、100、150、200 $\mu\text{mol/L}$ 时,豌豆幼苗叶绿素总量较对照分别提高了 1.04% ($P > 0.05$)、2.07% ($P > 0.05$)、9.84% ($P < 0.05$) 和 11.40% ($P < 0.05$), 类胡萝卜素含量较对照分别提高了 5.41% ($P > 0.05$)、21.62% ($P < 0.05$)、35.14% ($P < 0.05$) 和 43.24% ($P < 0.05$)。从叶绿素 a/b 来看,褪黑素浓度增加的同时,豌豆幼苗叶绿素 a/b 也在提高,且在褪黑素浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ 最大。

表 4 豌豆幼苗的光合色素含量
Table 4 Photosynthetic pigment contents in pea seedlings

褪黑素浓度($\mu\text{mol/L}$)	叶绿素 a(mg/g)	叶绿素 b(mg/g)	叶绿素总量(mg/g)	叶绿素 a/b	类胡萝卜素(mg/g)
0	1.55 \pm 0.04 a	0.47 \pm 0.02 a	1.93 \pm 0.05 b	3.30	0.37 \pm 0.01 c
50	1.55 \pm 0.06 a	0.47 \pm 0.03 a	1.95 \pm 0.04 b	3.30	0.39 \pm 0.01 c
100	1.59 \pm 0.05 a	0.48 \pm 0.02 a	1.97 \pm 0.08 b	3.34	0.45 \pm 0.02 b
150	1.62 \pm 0.06 a	0.48 \pm 0.02 a	2.12 \pm 0.09 a	3.35	0.50 \pm 0.02 a
200	1.66 \pm 0.07 a	0.48 \pm 0.02 a	2.15 \pm 0.07 a	3.42	0.53 \pm 0.02 a

2.5 豌豆幼苗的抗氧化酶活性

从表 5 可知,褪黑素浸种后,豌豆幼苗的 POD、SOD、CAT 活性及可溶性蛋白含量均随着褪黑素浓度的增加而呈增加的趋势。当褪黑素浓度为 50、100、150、200 $\mu\text{mol/L}$ 时,豌豆幼苗 POD 活性较对照分别提高了 3.86% ($P > 0.05$)、19.93% ($P < 0.05$)、49.22% ($P < 0.05$) 和 54.63% ($P < 0.05$), SOD 活性较对照分别提高了 16.05% ($P < 0.05$)、46.91% ($P < 0.05$)、97.53% (P

< 0.05) 和 114.81% ($P < 0.05$), CAT 活性较对照分别提高了 25.00% ($P < 0.05$)、43.75% ($P < 0.05$)、65.63% ($P < 0.05$) 和 100.00% ($P < 0.05$)。褪黑素浸种也提高了豌豆幼苗可溶性蛋白含量,且随褪黑素浓度的增加而增加(表 5)。当褪黑素浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ 时,豌豆幼苗可溶性蛋白含量较对照提高了 96.26% ($P < 0.05$)。由此可见,褪黑素可以提高豌豆幼苗的抗氧化酶活性和可溶性蛋白的含量,从而提高其抗逆性。

表 5 豌豆幼苗的抗氧化酶活性
Table 5 Antioxidant enzyme activity of pea seedlings

褪黑素浓度($\mu\text{mol/L}$)	POD 活性(U/g)	SOD 活性(U/g)	CAT 活性(mg/(g min))	可溶性蛋白含量(mg/g)
0	1 219 \pm 39 c	81 \pm 3 e	32 \pm 1 e	4.54 \pm 0.09 c
50	1 266 \pm 27 bc	94 \pm 3 d	40 \pm 1 d	7.52 \pm 0.21 b
100	1 462 \pm 75 b	119 \pm 5 c	46 \pm 2 c	7.76 \pm 0.17 b
150	1 819 \pm 69 a	160 \pm 6 b	53 \pm 2 b	7.93 \pm 0.45 b
200	1 885 \pm 58 a	174 \pm 5 a	64 \pm 3 a	8.91 \pm 0.45 a

2.6 豌豆幼苗的镉含量

褪黑素浸种处理后,豌豆幼苗各个器官的镉含量均有所降低(表 6)。随着褪黑素浓度的增加,豌豆幼

苗的镉含量呈降低的趋势,这说明褪黑素可以降低豌豆幼苗的镉含量。当褪黑素浓度达到 200 $\mu\text{mol/L}$ 时,豌豆幼苗根系、茎秆和叶片的镉含量分别较各自对照

降低了 20.28% ($P < 0.05$)、44.10% ($P < 0.05$) 和 46.94% ($P < 0.05$)。当褪黑素浓度达到 50、100、150、200 $\mu\text{mol/L}$ 时,豌豆幼苗地上部分的镉含量分别较对

照降低了 18.56% ($P < 0.05$)、34.02% ($P < 0.05$)、42.27% ($P < 0.05$) 和 46.39% ($P < 0.05$)。由此可见,褪黑素浸种可有效降低豌豆幼苗的镉含量。

表 6 豌豆幼苗的镉含量
Table 6 Cadmium contents in pea seedlings

褪黑素浓度($\mu\text{mol/L}$)	根系(mg/kg FW)	茎秆(mg/kg FW)	叶片(mg/kg FW)	地上部分(mg/kg FW)
0	8.43 \pm 0.20 a	0.161 \pm 0.005 a	0.213 \pm 0.213 a	0.194 \pm 0.009 a
50	7.69 \pm 0.20 b	0.138 \pm 0.003 b	0.177 \pm 0.177 b	0.158 \pm 0.003 b
100	7.19 \pm 0.22 c	0.134 \pm 0.004 b	0.123 \pm 0.123 c	0.128 \pm 0.005 c
150	6.86 \pm 0.15 cd	0.108 \pm 0.003 c	0.115 \pm 0.115 cd	0.112 \pm 0.003 d
200	6.72 \pm 0.14 d	0.090 \pm 0.003 d	0.113 \pm 0.113 d	0.104 \pm 0.004 e

3 讨论

本试验研究表明,在镉胁迫下,褪黑素浸种处理促进了豌豆幼苗的生长,缓解了镉对豌豆幼苗的毒害,增强了豌豆幼苗对镉胁迫的抗性,这与王立新等^[17]、崔晓峰等^[18]的研究类似。同时,褪黑素浸种处理也改变了豌豆幼苗的形态,促进其长高、根系增长、增粗,可能的原因是褪黑素在植物中起着生长调节作用,如促进细胞膨大、促进根的再生、促进节间生长、叶片扩大等^[19],因而使得豌豆幼苗生长更加良好,也说明褪黑素能缓解镉对豌豆生长的抑制作用。

叶绿素与植物光合作用密切相关,其含量多少能够直接影响到植物的生长发育^[20]。在重金属污染条件下,植物体内叶绿素酸酯还原酶活性受到抑制,叶绿体膜结构受到破坏、矿物质的吸收减少,反应酶活性降低,叶绿素被降解,导致了光合作用下降,生物量降低^[21]。本试验研究表明,褪黑素浸种后,豌豆幼苗的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量及类胡萝卜素含量都有所增加,这可能与褪黑素防止植物叶绿素的降解有关^[12, 21]。此外,这也可能是褪黑素缓解了镉对植物叶绿素酸酯还原酶活性的抑制作用,保护了叶绿体膜结构免受破坏,增强了矿质元素的吸收能力,提高了参与光合反应酶的活性,从而使得叶绿素含量提高,光合作用增强^[21]。

在逆境条件下,植物产生的活性氧自由基含量会明显增加,严重影响植物的生长,使得植物保护系统平衡被打破,且当自由基的产生和积累达到一定值时,就会发生膜伤害,最终导致植物死亡^[22]。此时,植物体内的 SOD、POD 和 CAT 等保护酶在一定程度上能够分解活性氧自由基,保护植物免受伤害^[23]。本试验研究表明,随着褪黑素浓度的增加,豌豆幼苗的抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT)活性也呈升高的趋

势,且可溶性蛋白含量也呈增加的趋势,可能的原因是褪黑素提高了豌豆幼苗的 SOD、POD 和 CAT 活性,从而提高了其清除活性氧自由基的能力,增强了豌豆幼苗对镉的抗性。同时,褪黑素作为一种抗氧化剂直接参与清除活性氧自由基的反应^[24],也间接地增强了豌豆幼苗对镉的抗性。

有研究表明,重金属进入植株体内后,会大量聚集于根部,导致植物根系的重金属含量升高,因而根系最容易受到毒害^[25]。重金属进入植物体后也会与许多物质结合,如蛋白质、多糖、有机酸等,降低其对植物的毒性^[26]。Casterlin 和 Barnett^[27]发现在植物体内有类似金属硫蛋白的物质存在,而褪黑素可以通过半胱氨酸残基上的巯基与金属离子结合形成无毒或低毒的络合物,降低金属对植物的毒害作用。多数重金属会诱导植物形成植物络合物,且镉诱导速度最快,数量最多,这也是植物降低重金属毒性的一种方式^[28]。本试验研究表明,褪黑素浸种可降低豌豆幼苗的镉含量,且随褪黑素浓度的增加,豌豆幼苗的镉含量呈降低的趋势,可能与褪黑素提高了豌豆幼苗对镉的抗性,从而降低其对镉的吸收有关,这有待进一步研究。

4 结论

褪黑素浸种可促进豌豆幼苗的生长,降低其对镉的吸收与积累。本试验中,效果最佳的褪黑素浓度是试验设计的最大浓度,即 200 $\mu\text{mol/L}$ 。因此,在今后的研究中,还可以进一步提高褪黑素的浓度,最大程度的降低豌豆植株镉含量,促进豌豆生长。

参考文献:

- [1] 马彩云,蔡定健,严宏. 土壤镉污染及其治理技术研究进展[J]. 河南化工, 2013, 30(9): 17-21

- [2] 杨居荣, 贺建新. Cd 污染对植物生理生化的影响[J]. 农业环境保护, 1995, 14(5): 193-197
- [3] 邓新, 温璐璐, 迟鑫妹. 镉对人体健康危害及防治研究进展[J]. 中国医疗前沿, 2010, 5(10): 4-5
- [4] 黄秋婵, 韦友欢, 黎晓峰. 镉对人体健康的危害效应及其机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(9): 2528-2531
- [5] 张庆利, 史学正, 黄标, 等. 南京城郊蔬菜基地土壤有效态铅、锌、铜和镉的空间分异及其驱动因子研究[J]. 土壤, 2005, 37(1): 41-47
- [6] 宋金茜, 朱权, 姜小三, 等. 基于 GIS 的农业土壤重金属风险评价研究——以南京市八卦洲为例[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 81-91
- [7] 万欣, 董元华, 王辉, 等. 山东海阳地区番茄大棚土壤重金属元素分布特征[J]. 土壤, 2013, 45(4): 695-699
- [8] 韩承华, 江解增. 重金属污染对蔬菜生产的危害以及缓解重金属污染措施的研究进展[J]. 中国蔬菜, 2014(4): 7-13
- [9] Chen G F, Huo Y S, Tan D X, et al. Melatonin in Chinese medicinal herbs [J]. Life Science, 2003, 73(1): 19-26
- [10] 潘红艳, 张晓庆, 李婕, 等. 褪黑素对低温胁迫后菘蓝种子苗抗氧化性影响[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2013, 43(2): 238-242
- [11] 张娜, 蒋庆, 李殿波, 等. 外源施加褪黑素对 NaCl 胁迫下狼尾草种子萌发及相关生理指标的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(4): 54-60
- [12] 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
- [13] 蔡琳雅, 李友杰, 刘慧, 等. 豌豆营养价值探析[J]. 宁夏农林科技, 2013, 54(7): 71-72
- [14] 汤福义, 林立金, 杨代宇, 等. 少花龙葵种间嫁接后代对小白菜生长及镉积累的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 207-212
- [15] 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: 52-56
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 45-46
- [17] 王立新, 郁建铎, 张海芸. 硒对镉胁迫下豌豆幼苗生长发育的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(24): 11502-11504
- [18] 崔晓峰, 李淑仪, 廖新荣, 等. 喷施硅铈溶胶缓解镉铅对小白菜毒害的研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 171-177
- [19] 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
- [20] 向洋, 丁志宝, 吴筱媚, 等. 植物生长调节剂对呼吸作用及光合作用等有关性状的影() [J]. 长沙水电师院学报(自然科学版), 1997, 12(1): 106-109
- [21] 杨丹慧. 重金属离子对高等植物光合膜结构与功能的影响[J]. 植物学报, 1991, 8(3): 26-29
- [22] 邹强. 基于高光谱图像技术的番茄叶片和植株抗氧化酶系统活性测定研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012
- [23] 何学利. 植物体内的保护酶系统[J]. 现代农业科技, 2010, (10): 37-38
- [24] 徐芳, 周海鹏, 郭早霞. 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
- [25] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 92-99
- [26] 谭万能, 李志安, 邹碧. 植物对重金属耐性的分子生态机理[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 703-712
- [27] Casterlin J L, Bamett N M. Isolation and characterization of cadmium-binding components in soybean plant [J]. Plant Physiology, 1977, 59(Z): 124-125
- [28] Huang B, Hatch E, Goldsbrough P B. Selection and characterization of cadmium tolerance cells in tomato [J]. Plants Science, 1987, 52: 211-221

Effects of Melatonin Soaking on Growth and Cadmium Accumulation of Pea Seedlings

TANG Yi¹, REN Wei², LIU Fugang³, LI Huanxiu¹, LIAO Ming'an³, JIANG Wei⁴, LIN Lijin^{1*}

(1 *Institute of Pomology and Olericulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China*; 2 *Maize Research Institute, Neijiang Academy of Agricultural Sciences, Neijiang, Sichuan 641000, China*; 3 *College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China*; 4 *College of Chemistry and Life Science, Chengdu Normal University, Chengdu 611130, China*)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of different concentrations of melatonin soaking on the growth and cadmium accumulation of pea seedlings. The results showed that the doses of 50, 100, 150 and 200 $\mu\text{mol/L}$ melatonin treatments increased the biomasses, water contents, photosynthetic pigment contents and antioxidant enzyme activities of pea seedlings compared with the control, and cadmium contents in pea seedlings reduced significantly. When the dose of melatonin was 200 $\mu\text{mol/L}$, the biomasses and photosynthetic pigment contents of pea seedlings reached the maxima, and cadmium contents in roots and shoots of pea seedlings were the minima of 6.72 and 0.104 mg/kg, reduced by 20.28% and 46.39% respectively compared with the control. Therefore, melatonin soaking could promote the growth of pea seedlings and reduce cadmium uptake, and the best dose of melatonin is 200 $\mu\text{mol/L}$.

Key words: Melatonin; Pea seedlings; Growth; Cadmium