

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.041.

连贝贝, 赵珊珊, 王百群. 铀胁迫下根施褪黑素和苏云金芽孢杆菌对上海青生长和铀吸收的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 230-236.

Lian Beibei, Zhao Shanshan, Wang Baiqun. Effect of melatonin and *Bacillus thuringiensis* on growth and Uranium uptake of *Brassica chinensis* L under Uranium stress[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 230-236.

铀胁迫下根施褪黑素和苏云金芽孢杆菌对 上海青生长和铀吸收的影响

连贝贝^{1,2}, 赵珊珊^{1,2}, 王百群^{1,2,3}

(1.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]揭示褪黑素和苏云金芽孢杆菌对上海青缓解铀胁迫的作用机制, 为褪黑素-抗性菌-植物联合修复铀污染土壤的应用提供理论依据。[方法]通过室内盆栽试验, 以添加铀(10 mg/kg)污染红壤为供试土壤, 研究褪黑素(100 μ mol/L)、铀抗性菌苏云金芽孢杆菌以及联合施用下对土壤 pH 和养分、上海青生长生理特性以及在土壤-上海青系统中铀含量和转运的影响。[结果](1) 褪黑素和苏云金芽孢杆菌显著促进了上海青的生长, 提高了上海青的株高(1.8%~11.8%)、生物量(0.8%~34.4%)、叶绿素含量(12.1%~50.2%)和养分含量(7.1%~39.5%); (2) 褪黑素和苏云金芽孢杆菌减弱了铀胁迫对上海青造成的氧化损伤, 增强了抗氧化损伤防御能力, 进而促进上海青的生长; (3) 褪黑素和苏云金芽孢杆菌增加了根的富集系数(9.26%), 降低了铀从根向叶的转运, 进而降低了食用上海青的风险; (4) 褪黑素和苏云金芽孢杆菌在减轻上海青中铀含量和促进上海青生长方面有协同作用, 联合施用效果更好。[结论]褪黑素和抗性菌通过显著增强土壤酶活性和上海青抗氧化防御, 增强上海青对养分的吸收、减弱氧化损伤, 维持细胞稳态, 来减弱上海青对铀的吸收与转运, 促进植物生长。

关键词: 褪黑素; 抗性菌; 铀; 氧化损伤; 上海青

中图分类号: X53; S634.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0230-07

Effect of Melatonin and *Bacillus thuringiensis* on Growth and Uranium Uptake of *Brassica chinensis* L Under Uranium Stress

Lian Beibei^{1,2}, Zhao Shanshan^{1,2}, Wang Baiqun^{1,2,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims at revealing the mechanism of melatonin and *Bacillus thuringiensis* on alleviating uranium stress in *Brassica chinensis* L, and providing a theoretical basis for the combined application of melatonin-resistant bacteria-plant to ameliorate uranium-contaminated soil. [Methods] Through indoor pot experiment of adding uranium (10 mg/kg), the effects of melatonin (100 μ mol/L), the uranium resistant bacteria *B. thuringiensis* on the growth and physiological characteristics of *B. chinensis*, and the uranium contents and transport in soil and *B. chinensis* system were studied. [Results] (1) Melatonin and *B. thuringiensis* significantly promoted the growth of *B. chinensis*, increased the plant height (1.8%~11.8%), biomass (0.8%~34.4%), chlorophyll content (12.1%~50.2%) and nutrient content (7.1%~39.5%). (2) Melatonin and *B. thuringiensis* attenuated the oxidative damage caused by uranium stress to *B.*

收稿日期: 2024-04-25

修回日期: 2024-05-24

资助项目: 国家自然科学基金联合基金“砷镉复合污染稻田的土壤微生物组阻控过程与机制”(U21A20237)

第一作者: 连贝贝(1998—), 女, 河南周口人, 在读硕士研究生, 研究方向为土壤重金属污染修复研究。E-mail: lianbeibei21@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 王百群(1968—), 男, 陕西渭南人, 副研究员, 主要从事土壤养分循环研究。E-mail: bqwang@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

chinensis, enhanced the defense of the oxidative damage system, and promoted the growth of *B. chinensis*. (3) Melatonin and *B. thuringiensis* significantly reduced the uranium enrichment coefficient (24.4%) and transport coefficient (33.3%), but increased the enrichment coefficient of roots (9.26%), reduced the risk of eating *B. chinensis*. (4) Melatonin and *B. thuringiensis* had a synergistic effect on reducing the uranium content and promoting the growth of *B. chinensis*, and the combined application effect was better. [Conclusion] Melatonin and resistant bacteria can significantly enhance the soil enzyme activity and antioxidant defense of *B. chinensis* to boost the absorption of nutrients and weaken oxidative damage, to maintain cell homeostasis, to weaken the absorption and transport of *B. chinensis*, and to promote plant growth.

Keywords: melatonin; resistant bacteria; uranium; oxidative damage; *Brassica chinensis*

自然沉积和人为释放导致铀(U)污染土壤,然后通过食物链进入到生物体内,通过 U 的化学毒性和放射性毒性对生态环境和人体健康造成严重危害^[1]。以往众多研究揭示了 U 胁迫对植物生长和生理功能方面的毒性机制^[2-5]。上海青作为世界上最重要的叶类蔬菜之一,对 U 有较强的耐受能力以及根部积累能力^[6]。

褪黑素是从牛松果体中被提取出来^[7],植物褪黑素于 1995 年被发现^[8-9]。已有很多研究报道,褪黑素通过作用于各种功能调节植物的生长生理^[10]。褪黑素通过刺激酶促/非酶促来减少氧化应激,还可以通过直接清除活性氧(ROS)来间接促进生长状态、光合效率等促进植物生长^[11]。抗性菌可以通过吸附固定重金属和改变重金属氧化态等不同的抵抗策略来帮助植物承受环境胁迫,抗性菌的修复主要是生物累积/固定、生物吸附、生物矿化^[12]。有些抗性菌可以产生一些植物激素,在重金属胁迫下促进植物生长^[13]。这些研究揭示了具有促生特性的抗性菌非常适合用于 U 污染土壤的植物修复。

褪黑素或抗性菌在对植物修复重金属污染已经被广泛研究,但大多数的研究仅限于单一褪黑素或抗性菌,很少有关到二者的共同作用。本研究通过盆栽试验研究褪黑素和抗性菌苏云金芽孢杆菌对上海青生长和 U 吸收转移的影响,以期褪黑素-抗性菌联合修复 U 污染土壤的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为江西省南昌市无污染油菜农田红壤(约 106°33'E, 33°48'N)经自然风干研磨过 2 mm 尼龙筛后的风干土, pH 为 5.83, 有机碳(SOC)为 3.54 g/kg, 全氮(TN)为 0.66 g/kg, 全磷(TP)为 0.34 g/kg。上海青(*Brassica chinensis* L)来自山东寿光欣欣园艺有限公司。供试菌株为苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*)。

1.2 试验设计

试验于 2023 年 7 月 25 日在中国科学院教育部

水土保持与生态环境研究中心温室和实验室进行。试验土壤为风干土与混合 10 mg/kg U(U 源为硝酸铀酰)和肥料(N 肥和 P 肥)的 U 污染土壤。花盆中装有土壤 2 kg(其中根际袋 0.5 kg),用称重法保持土壤水分在田间持水量的 60%~80%,14 d 后进行上海青种植。

选取饱满优质上海青种子消毒清洗后,育苗到双叶龄时,将生长良好的幼苗移栽至花盆中。然后按照试验设计(表 1)对盆栽进行处理。褪黑素:每株植物沿根部加入 100 μ mol/L 褪黑素溶液 5 ml,每 2 d 添加 1 次;苏云金芽孢杆菌:每株植物在根部接种 2 ml 菌悬液,每 7 d 接种 1 次;未接种褪黑素或苏云金芽孢杆菌的处理加入相同量的蒸馏水。在采样前的 1 周停止处理。

采集样品后, -80 $^{\circ}$ C 冰箱保存鲜样,烘箱 65 $^{\circ}$ C 烘干为植物干样。测量指标所用土样为根际土,取根际鲜土过 1 mm 筛,一部分置于 4 $^{\circ}$ C 冰箱保存。剩余土样自然风干后,并取少量研磨过 0.15 mm 筛备用。

表 1 盆栽处理

Table 1 Pot treatments

代号	处理
CK	上海青+U
M	上海青+U+褪黑素
B	上海青+U+苏云金芽孢杆菌
MB	上海青+U+褪黑素+苏云金芽孢杆菌

1.3 指标测定

1.3.1 土壤 pH 和养分含量测定 土壤 pH 用 pH 计(UB-10)测定;SOC 用重铬酸钾和浓硫酸外加热的条件下,用硫酸亚铁的滴定量计算。TN 用凯氏定氮法,用浓硫酸和加速剂消解,用全自动凯氏定氮仪(2300, 丹麦)测定;TP 用硫酸-高氯酸消解,钼锑抗比色法测定。AP 用碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定^[14]。

1.3.2 上海青株高和生物量测定 株高用测量尺测量记录植物地上部的高度。生物量:称植物样鲜重,在收集鲜样后,称取烘至恒重的植物样干重,计算生物量。

1.3.3 上海青叶绿素含量测定 植物叶片鲜样和 25

ml 丙酮(体积分数为 80%),放进全温振荡培养箱(QHZ-98 A,太仓市华美生化公司)中,避光,直至叶片变为灰白色。浸提液用紫外分光光度计(UV-6 300 PC,上海美谱达仪器有限公司)测量,通过公式计算叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素^[15]。

1.3.4 上海青养分含量测定 碳(C):重铬酸钾外加热法,用硫酸亚铁的滴定量来计算 C 含量。氮(N):浓硫酸-过氧化氢消解,全自动凯氏定氮仪。磷(P):浓硫酸-过氧化氢消解,钒钼黄比色法^[14]。

1.3.5 上海青氧化胁迫物质测定 氧化损伤指标:过氧化氢含量(H₂O₂)、丙二醛(MDA)和蛋白质羰基;抗氧化指标:还原性谷胱甘肽(GSH)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)。上述指标测定均采用试剂盒,用多功能酶标仪(Victor Nivo,美国 PerkinElmer LLC 公司)进行可见光测定和计算。

1.3.6 铀含量测定 采用酸消解(土样)/微波消解(植物样)和电感耦合等离子发射光谱仪(ICPE-9 820,岛津/SHIMADZU)测定 U 含量。土样消解:王水-高氯酸消解,3%硝酸溶液定容,0.22 mm 过滤器过滤保存。植物样消解:浓硝酸-过氧化氢,微波消解仪(Multiwave PRO,安东帕)进行消解,3%硝酸溶液定容,0.22 mm 过滤器过滤保存。最后用 ICP-OES 测定土样和植物样消煮液中的 U 含量。相应指

标计算公式如下:

$$BCF_{叶/根} = U_{叶/根} / U_{\pm} \tag{1}$$

$$TF = U_{叶} / U_{根} \tag{2}$$

式中:BCF_{叶/根}为叶(根)的 U 富集系数;TF 为 U 从根到叶的转运系数;U_{叶/根}为上海青叶/根的 U 含量(mg/kg);U_±为根际土中的 U 含量(mg/kg)。

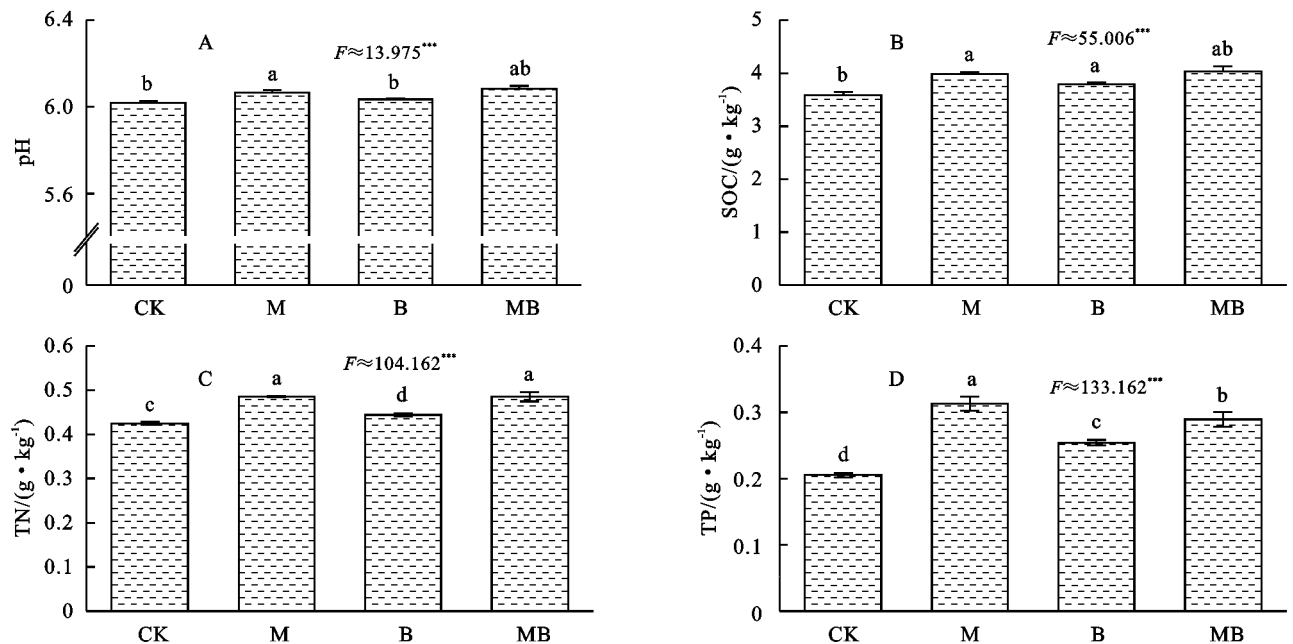
1.4 数据处理

采用 Excel 2016、SPSS 21.0 和 Origin 2024 对数据进行统计分析和图形绘制,使用 Duncan's 法进行多重比较($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对铀胁迫土壤 pH 和有机碳及养分的影响

如图 1 所示,与 CK 相比,褪黑素处理使 pH, SOC, TN 和 TP 增加了 0.7%,11.2%,14.2%和 52.6%,苏云金芽孢杆菌处理使其增加了 0.2%,5.7%,4.5%和 23.8%,联合施用使其增加了 1.1%,12.5%,14.2%和 41.0%。结果表明,在 U 胁迫下,褪黑素和苏云金芽孢杆菌能改善土壤酸碱环境和增加土壤养分含量,且施用褪黑素的改善效果比苏云金芽孢杆菌好,二者的联合施用进一步改善土壤环境(TP 除外)。



注:CK 表示对照,M 表示褪黑素,B 表示苏云金芽孢杆菌,MB 表示褪黑素+苏云金芽孢杆菌。每个柱子代表平均值±标准误差($n=4$)。小写字母代表不同处理间的显著性水平($p < 0.05$)。*, $p < 0.05$,**, $p < 0.01$,***, $p < 0.001$ 。下图同。

图 1 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对土壤 pH 和有机碳及养分的影响

Fig. 1 Effects of melatonin and *B. thuringiensis* on soil pH, organic carbon and nutrients

2.2 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对铀胁迫下上海青株高和生物量的影响

如图 2 所示,与 CK 相比,单独施用褪黑素使上海青

株高、地上部和地下部的生物量显著提高了 6.7%,8.0%和 9.0%,苏云金芽孢杆菌的促进作用并不明显;二者的联合施用对株高和生物量的改善效果均优于单独施用

褪黑素或苏云金芽孢杆菌,使株高和生物量显著提高了18.8%,34.4%和11.8%。整体来看,在U胁迫下,褪黑

素可以减轻U毒性,促进上海青的生长,苏云金芽孢杆菌的加入会进一步促进上海青的生长。

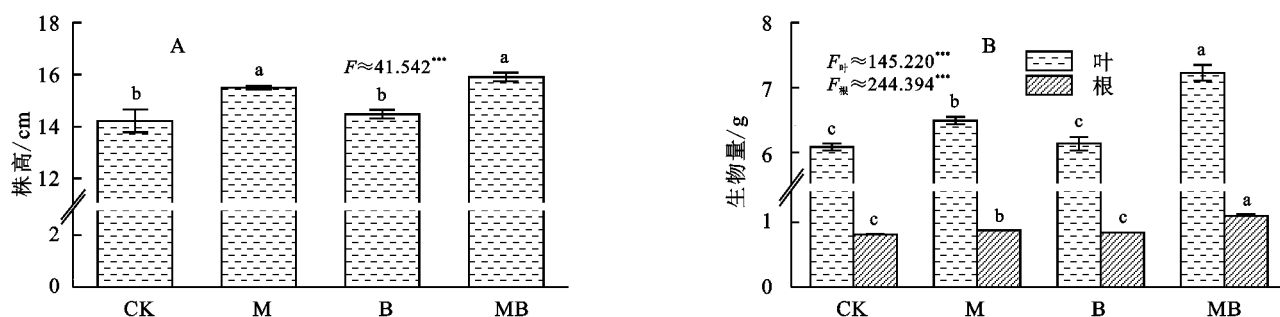


图2 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对上海青株高和生物量的影响

Fig. 2 Effects of melatonin and *B. thuringiensis* on plant height and biomass of *B. chinensis*

2.3 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对铈胁迫下上海青叶绿素含量的影响

如图3所示,与CK相比,苏云金芽孢杆菌使叶绿素a, b和类胡萝卜素浓度显著提高42.9%,22.1%和16.7%,且改善效果优于单独施用褪黑素;二者的联合施用对叶绿素含量的改善效果均优于单独施用褪黑素或苏云金芽孢杆菌,使叶绿素a, b和类胡萝卜素浓度显著提高50.2%,30.0%和38.1%。结果表明,褪黑素和苏云金芽孢杆菌缓解U对光合作用的影响,显著提高叶绿素含量,且二者联合施用效果最好。

2.4 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对铈胁迫下上海青养分含量的影响

如图4所示,U胁迫下,与CK相比,单独施用褪黑素使叶和根的C含量显著增加了24.2%和36.8%,且改善效果明显优于单独施用苏云金芽孢杆菌,二者的联合施用使C含量进一步增加;单独施用褪黑素和苏云金芽孢杆菌处理间没有显著差异,二者联合施用会显著增加上海青N和P含量,使叶和根的N含

量增加了13.8%和18.6%,使P含量增加了12.0%和27.7%。表明在U胁迫下,褪黑素和苏云金芽孢杆菌可以通过增加上海青对养分的吸收来促进生长,减轻U对上海青的毒害作用。

2.5 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对铈胁迫下上海青氧化损伤的影响

H_2O_2 是表征氧化自由基最直接的评价指标,MDA和蛋白质羰基含量反映了脂质和蛋白质氧化损伤程度^[16]。如图5所示,U胁迫下,与CK相比,单独施用褪黑素使 H_2O_2 显著降低了46.1%(叶)和48.9%(根)、MDA降低了18.0%(叶)和20.4%(根)、蛋白质羰基降低了20.6%(叶)和25.8%(根),对 H_2O_2 的抑制效果优于单独施用苏云金芽孢杆菌,二者联合施用均进一步降低了3个指标的含量,使 H_2O_2 显著降低了58.8%(叶)和55.1%(根)、MDA降低了21.8%(叶)和48.8%(根)、蛋白质羰基降低了48.0%(叶)和36.8%(根)。整体来看,褪黑素和苏云金芽孢杆菌可以降低ROS含量,缓解U对上海青的脂质和蛋白质氧化损伤。

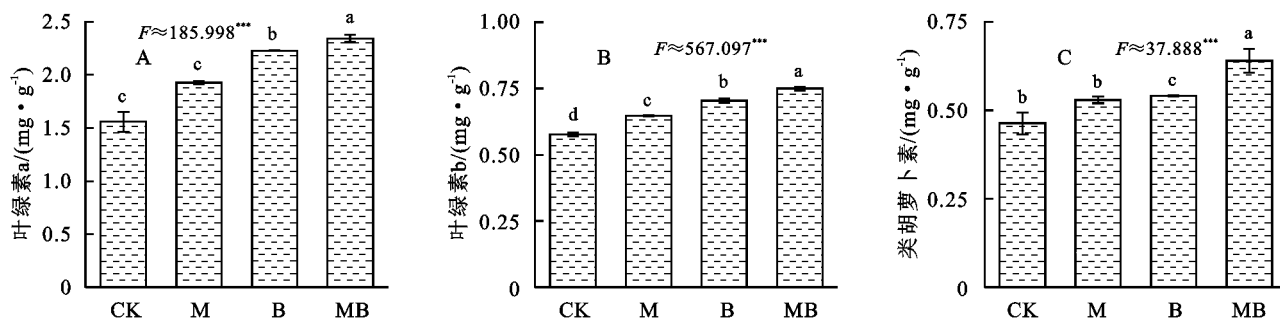


图3 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对上海青叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of melatonin and *B. thuringiensis* on chlorophyll of *B. chinensis*

2.6 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对铈胁迫下上海青抗氧化防御系统的影响

GSH参与对抗ROS的防御,SOD和POD通过分解ROS自由基来提高抗氧化损伤能力^[17]。如图6所示,U胁迫下,与CK相比,单独施用褪黑素使

GSH显著降低了26.9%(叶)和158.9%(根)、SOD降低了41.6%(叶)和33.7%(根)、POD降低了133.6%(叶)和16.4%(根),对3个指标的促进效果优于单独施用苏云金芽孢杆菌(除叶的GSH外),二者联合施用均进一步降低了3个指标的含量,使GSH显著降低了

220.0%(叶)和 109.8%(根)、SOD 降低了 38.3(叶)和 35.3%(根)、POD 降低了 214.0(叶)和 63.4%(根)。整体

来看,褪黑素和苏云金芽孢杆菌可以通过增强抗氧化防御能力,缓解 U 对上海青的氧化损伤。

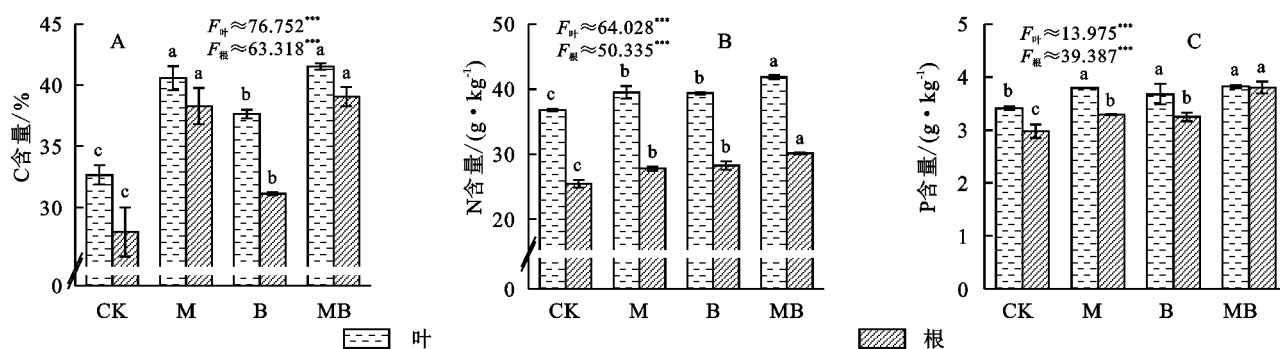


图 4 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对上海青养分含量的影响

Fig. 4 Effects of melatonin and *B. thuringiensis* on nutrients of *B. chinensis*

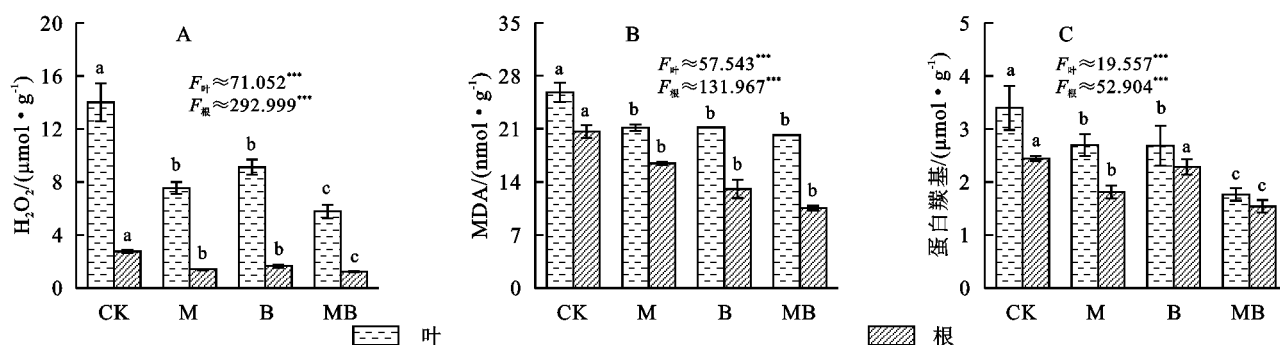


图 5 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对上海青氧化损伤的影响

Fig. 5 Effects of melatonin and *B. thuringiensis* on oxidative damage of *B. chinensis*

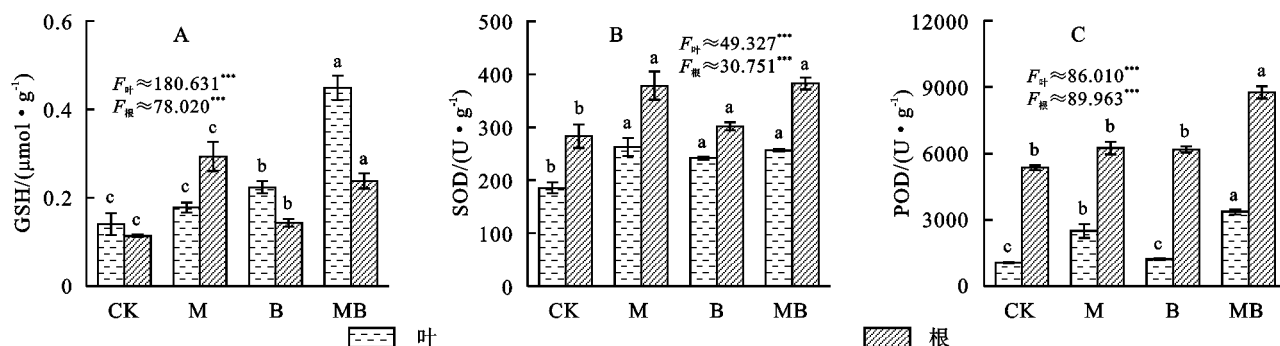


图 6 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对上海青抗氧化防御系统的影响

Fig. 6 Effects of melatonin and *B. thuringiensis* on anti-oxidative damage of *B. chinensis*

2.7 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对铀胁迫下上海青铀吸收的影响

由表 2 可以看出,与 CK 相比,单独施用褪黑素会使上海青叶、根和根际土中的 U 含量显著降低 31.8%, 28.4%和 26.7%,且对上海青 U 含量的改善效果优于单独施用苏云金芽孢杆菌,而二者联合施用仅进一步降低了叶 U 含量。褪黑素和苏云金芽孢杆菌降低叶的 BCF 和 TF,且二者联用的降低效果更好,而苏云金芽孢杆菌和二者联用会增加上海青根的富集系数,说明褪黑素会降低土壤中的 U 在上海青中富集,而苏云金芽孢杆菌的添加会进一步降低 U 在叶富集、增加 U 在根富集、阻碍 U 从根向叶的转移。

3 讨论

株高、生物量和植物中的重金属含量可以直接反映植物对重金属的响应^[18]。本研究, U 胁迫下,褪黑素、苏云金芽孢杆菌以及二者的联合施用增加了上海青株高和生物量,也增加了根际土和上海青中的养分含量,说明褪黑素和苏云金芽孢杆菌可以通过促进土壤养分循环,促进上海青对养分吸收,进而促进植物生长。以往研究表明,褪黑素可以改善叶和根部结构并提高植物从土壤中吸收养分的能力^[19]。抗性菌的添加不仅会提高植物对重金属的高浓度耐受能力,有的细菌还可以产生促生性状,直接促进植物生长^[20]。

表 2 褪黑素和苏云金芽孢杆菌对土壤-上海青铀吸收和转运的影响

Table 2 Effects of melatonin and *B. thuringiensis* on uranium absorption and transport in soil-*B. chinensis*

处理	$U_{\text{叶}} /$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$U_{\text{根}} /$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$U_{\text{土}} /$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{BCF}_{\text{叶}}$	$\text{BCF}_{\text{根}}$	TF
CK	$12.64 \pm 0.04\text{a}$	$146.33 \pm 1.55\text{a}$	$13.98 \pm 0.16\text{a}$	$0.90 \pm 0.01\text{a}$	$10.47 \pm 0.15\text{b}$	$0.09 \pm 0.00\text{a}$
M	$8.62 \pm 0.04\text{c}$	$104.71 \pm 1.70\text{c}$	$10.25 \pm 0.32\text{d}$	$0.84 \pm 0.03\text{ab}$	$10.23 \pm 0.31\text{b}$	$0.08 \pm 0.00\text{a}$
B	$9.67 \pm 0.24\text{b}$	$144.46 \pm 3.69\text{a}$	$12.44 \pm 0.37\text{b}$	$0.78 \pm 0.03\text{b}$	$11.62 \pm 0.52\text{a}$	$0.07 \pm 0.00\text{b}$
MB	$7.78 \pm 0.56\text{d}$	$130.76 \pm 0.82\text{b}$	$11.43 \pm 0.12\text{c}$	$0.68 \pm 0.05\text{c}$	$11.44 \pm 0.12\text{a}$	$0.06 \pm 0.00\text{c}$

注:CK 表示对照;M 表示褪黑素;B 表示苏云金芽孢杆菌;MB 表示褪黑素+苏云金芽孢杆菌。BCF 表示富集系数;TF 表示转运系数。表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。

重金属对植物的生长抑制主要是通过破坏植物的功能来实现^[1]。光合作用作为植物的重要功能之一,叶绿素则是叶片进行光合作用的物质基础^[21]。本研究中,U 胁迫下褪黑素和苏云金芽孢杆菌处理后,叶绿素 a, b 和类胡萝卜素浓度显著增加。Al-Huqail 等^[22]研究发现,褪黑素通过增强叶绿素合成相关酶的活性来减少小麦叶片中叶绿素降解。抗性菌对光合作用的影响主要通过固定重金属,降低重金属对植物的毒害作用,来促进叶绿素的合成^[23]。

重金属胁迫会使植物产生过量的 ROS,造成细胞膜损伤;相应地,植物体会产生酶类(例如 SOD,POD)和非酶类(例如 GSH)等抗氧化损伤物质来减轻植物受到的伤害^[24]。U 胁迫下,褪黑素和苏云金芽孢杆菌添加使 H_2O_2 , MDA 和蛋白质羰基显著降低,使 GSH,SOD 和 POD 显著增加,说明褪黑素和苏云金芽孢杆菌可以减少 ROS 以及减轻脂质过氧化和蛋白质氧化,同时增强上海青体内抗氧化防御能力来减弱 U 对植物体造成的氧化损伤。已有研究表明,褪黑素和抗性菌通过减少重金属产生的氧化损伤、脂质过氧化和维持膜的完整性,并增强抗氧化酶的活性和相关基因的表达来增强植物的抗氧化能力,促进植物生长^[25]。褪黑素与抗性菌的联合施用会进一步减轻植物的氧化损伤,增加酶促和非酶促抗氧化活性,进一步促进小麦生长^[26],与本研究结果相一致。

已有研究报道,褪黑素可以通过增强抗氧化防御能力,促进植物螯合素的合成来降低植物中重金属含量,通过降低番茄叶片中的镉含量来降低转运系数^[27]。接种抗性菌能增强 U 在植物根部的积累并抑制了 U 从根到芽的转运^[28]。在本研究中,与 CK 相比,褪黑素和苏云金芽孢杆菌降低上海青地上部和地下部的 U 含量,说明褪黑素和苏云金芽孢杆菌可以通过抑制上海青从土壤中吸收 U 来阻控 U 从土壤到上海青的迁移,且上海青地下部根的 U 积累能力要明显高于地上部的茎叶,可见上海青有作为 U 超富集植物的潜力,将土壤中的 U 富集到上海青根部。

综上所述,褪黑素和苏云金芽孢杆菌通过显著增强土壤中养分含量和上海青抗氧化防御系统,增强上海青光合作用以及对养分的吸收,减轻氧化损伤,维持细胞稳态,减少上海青对 U 的吸收与转运,促进植物生长。

4 结 论

(1) 褪黑素和苏云金芽孢杆菌减弱了 U 胁迫对上海青造成的氧化损伤,增强了抗氧化损伤系统的防御能力,促进了上海青的生长。

(2) 褪黑素和苏云金芽孢杆菌显著降低了上海青叶的 U 富集系数(24.4%)和转运系数(33.3%),增加了根的富集系数(9.26%),降低了食用上海青的风险。

(3) 褪黑素和苏云金芽孢杆菌在减轻上海青中 U 含量和促进上海青生长方面具有协同作用,联合施用效果更好,所以褪黑素和抗性菌修复土壤 U 污染具有一定的应用潜力。

参考文献(References):

- [1] Gao N, Huang Z H, Liu H Q, et al. Advances on the toxicity of uranium to different organisms[J]. Chemosphere, 2019,237:124548.
- [2] Lai J L, Liu Z W, Luo X G. A metabolomic, transcriptomic profiling, and mineral nutrient metabolism study of the phytotoxicity mechanism of uranium[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,386:121437.
- [3] Zhang Y, Lai J L, Ji X H, et al. Unraveling response mechanism of photosynthetic metabolism and respiratory metabolism to uranium-exposure in *Vicia faba* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,398:122997.
- [4] Huang F Y, Dong F Q, Chen L, et al. Biochar-mediated remediation of uranium-contaminated soils: Evidence, mechanisms, and perspectives [J]. Biochar, 2024,6(1):16.
- [5] Vanhoudt N, Vandenhove H, Horemans N, et al. Uranium induced effects on development and mineral nutrition of *Arabidopsis thaliana* [J]. Journal of Plant Nutrition, 2011,34(13):1940-1956.
- [6] Xie L, Tang W L, Xie S B, et al. Effects of uranium (VI) stress on physiological feature and its accumulation

- of Chinese cabbage[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 988:385-389.
- [7] Lerner A B, Case J D, Takahashi Y, et al. Isolation of melatonin, the pineal gland factor that lightens melanocytes¹[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1958, 80(10):2587.
- [8] Dubbels R, Reiter R J, Klenke E, et al. Melatonin in edible plants identified by radioimmunoassay and by high performance liquid chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Pineal Research*, 1995, 18(1):28-31.
- [9] Hattori A, Migitaka H, Iigo M, et al. Identification of melatonin in plants and its effects on plasma melatonin levels and binding to melatonin receptors in vertebrates [J]. *Biochemistry and Molecular Biology International*, 1995, 35(3):627-634.
- [10] Luis Castañares J, Alberto Bouzo C. Effect of exogenous melatonin on seed germination and seedling growth in melon (*Cucumis melo* L.) under salt stress [J]. *Horticultural Plant Journal*, 2019, 5(2):79-87.
- [11] Altaf M A, Sharma N, Srivastava D, et al. Deciphering the melatonin-mediated response and signalling in the regulation of heavy metal stress in plants[J]. *Planta*, 2023, 257(6):115.
- [12] Mathivanan K, Chandirika J U, Mathimani T, et al. Production and functionality of exopolysaccharides in bacteria exposed to a toxic metal environment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208:111567.
- [13] 王焯, 罗学刚, 丁翰林, 等. 一种耐铀植物促生菌的筛选及促生特性研究[J]. *生物技术通报*, 2019, 35(1):42-50.
Wang Z, Luo X G, Ding H L, et al. Isolation and identification of a uranium-resistant strain and effect of its characteristics on growth promoting[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(1):42-50.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. Beijing: China agriculture Press, 2005.
- [15] 苏正淑, 张宪政. 几种测定植物叶绿素含量的方法比较 [J]. *植物生理学通讯*, 1989, 25(5):77-78.
Su Z S, Zhang X Z. Comparison of several methods for determining chlorophyll content in plants [J]. *Plant Physiology Communications*, 1989, 25(5):77-78.
- [16] Andrade F R, da Silva G N, Guimarães K C, et al. Selenium protects rice plants from water deficit stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 164:562-570.
- [17] Meng Y, Zhang L, Wang L Q, et al. Antioxidative enzymes activity and thiol metabolism in three leafy vegetables under Cd stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 173:214-224.
- [18] 吕怡颖, 郑元仙, 王继明, 等. 外源褪黑素对镉胁迫烟草幼苗的缓解效应[J]. *中国烟草科学*, 2023, 44(4):25-32.
Lü Y Y, Zheng Y X, Wang J M, et al. Alleviative effect of exogenous melatonin on cadmium stress in tobacco seedlings[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2023, 44(4):25-32.
- [19] Iqbal N, Tanzeem-Ul-Haq H S, Gull-E-Faran, et al. Soil amendments and foliar melatonin reduced Pb uptake, and oxidative stress, and improved spinach quality in Pb-contaminated soil[J]. *Plants*, 2023, 12(9):1829.
- [20] Sultana R, Islam S M N, Sultana T. Arsenic and other heavy metals resistant bacteria in rice ecosystem: Potential role in promoting plant growth and tolerance to heavy metal stress[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 31:103160.
- [21] Hu Z W, Zhao C Y, Li Q, et al. Heavy metals can affect plant morphology and limit plant growth and photosynthesis processes[J]. *Agronomy*, 2023, 13(10):2601.
- [22] Al-Huqail A A, Khan M N, Ali H M, et al. Exogenous melatonin mitigates boron toxicity in wheat[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 201:110822.
- [23] Desoky E S M, Merwad A R M, Semida W M, et al. Heavy metals-resistant bacteria (HM-RB): Potential bioremediators of heavy metals-stressed *Spinacia oleracea* plant [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 198:110685.
- [24] Wu G, Chen X, Zheng T, et al. Effects of U on the growth, reactive oxygen metabolism and osmotic regulation in radish (*Raphanus sativus* L.) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(36):55081-55091.
- [25] Ali S, Gill R A, Ulhassan Z, et al. Exogenously applied melatonin enhanced the tolerance of *Brassica napus* against cobalt toxicity by modulating antioxidant defense, osmotic adjustment, and expression of stress response genes[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 252:114624.
- [26] Seleiman M F, Ali S, Refay Y, et al. Chromium resistant microbes and melatonin reduced Cr uptake and toxicity, improved physio-biochemical traits and yield of wheat in contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2020, 250:126239.
- [27] 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.
- [28] Tan W F, Guo F, Deng Q W, et al. The effects of *Leifsonia* sp. on bioavailability and immobilization mechanism of uranium in soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(3):1599-1608.