

## 钼缓解烟草镉毒害的生理效应及其机制

毕浩东, 牛慧伟, 贾玮, 刘晶晶, 宋绍森, 黄五星, 韩丹, 许自成, 许嘉阳

### 引用本文:

毕浩东, 牛慧伟, 贾玮, 刘晶晶, 宋绍森, 黄五星, 韩丹, 许自成, 许嘉阳. 钼缓解烟草镉毒害的生理效应及其机制[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 799-809.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0757>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 外源NO对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响

肖家昶, 郑开敏, 马俊英, 郑阳霞

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1650-1658 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0145>

#### 镉胁迫对姬松茸菌丝生理指标与镉吸收的影响

刘朋虎, 陈华, 李波, 王义祥, 翁伯琦

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1675-1682 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0469>

#### 外源硒和耐硒细菌对镉胁迫下水稻生长、生理和硒镉积累的影响

王波, 张然然, 杨如意, 石晓菁, 苏楠楠, 朱濛, 咎树婷

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2710-2718 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0437>

#### 施硒对花生镉吸收与抗性及化学形态的影响

卞威尔斯, 闫家普, 崔良, 张磊

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1094-1101 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1436>

#### 卤代阻燃剂和镉对旱稻种子萌发和生长的影响

江秀兰, 谢慧, 常晓云

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1460-1469 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0023>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

毕浩东, 牛慧伟, 贾玮, 等. 钼缓解烟草镉毒害的生理效应及其机制[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 799–809.

BI H D, NIU H W, JIA W, et al. Physiological effects and mechanisms of molybdenum on alleviating cadmium toxicity in tobacco[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(4): 799–809.



开放科学 OSID

## 钼缓解烟草镉毒害的生理效应及其机制

毕浩东<sup>1</sup>, 牛慧伟<sup>2</sup>, 贾玮<sup>1</sup>, 刘晶晶<sup>1</sup>, 宋绍森<sup>1</sup>, 黄五星<sup>1</sup>, 韩丹<sup>1</sup>, 许自成<sup>1</sup>, 许嘉阳<sup>1,3\*</sup>

(1. 河南农业大学烟草学院, 郑州 450046; 2. 中国烟草总公司职工进修学院, 郑州 450008; 3. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046)

**摘要:**为探究施钼对镉胁迫下烟草幼苗生理特征的缓解效果,本研究以烟草品种K326为供试作物,采集镉污染农田土壤开展盆栽实验,设置0、0.25、0.5 mg·kg<sup>-1</sup>和1 mg·kg<sup>-1</sup>四种钼梯度,研究钼对镉毒害下烟草幼苗外观表征、酶活性、镉积累、光合作用和抗氧化能力等生理特征的影响。结果表明,施钼改善了镉毒害下烟苗长势矮小、叶片失绿的情况,并促进了根系的生长,其中以0.5 mg·kg<sup>-1</sup>的浓度处理效果最好。相较于未施钼处理,施用0.5 mg·kg<sup>-1</sup>的钼促进了土壤酶的活性,分别降低了烟苗叶片和根系中17.39%和40.00%的镉含量,促进了钼的吸收;0.5 mg·kg<sup>-1</sup>的钼能显著减少烟叶中活性氧等物质的积累并提高烟株的防御酶活性和抗逆激素的含量,0.25、0.5、1 mg·kg<sup>-1</sup>钼处理的总抗氧化能力分别为未施钼处理的1.17、1.20倍和1.09倍。此外,施钼增强了镉胁迫下烟草的光合作用和钼酶活性,对镉胁迫下烟草的生理代谢发挥了重要的调节作用。研究表明,施用0.5 mg·kg<sup>-1</sup>的钼对镉胁迫下烟草幼苗的生理特征有更好的缓解效果。

**关键词:**烟草; 镉胁迫; 钼; 光合作用; 抗氧化系统; 酶活性; 激素含量; 元素积累

中图分类号: X173 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)04-0799-11 doi:10.11654/jaes.2023-0757

### Physiological effects and mechanisms of molybdenum on alleviating cadmium toxicity in tobacco

BI Haodong<sup>1</sup>, NIU Huiwei<sup>2</sup>, JIA Wei<sup>1</sup>, LIU Jingjing<sup>1</sup>, SONG Shaosen<sup>1</sup>, HUANG Wuxing<sup>1</sup>, HAN Dan<sup>1</sup>, XU Zicheng<sup>1</sup>, XU Jiayang<sup>1,3\*</sup>

(1. College of Tobacco, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 2. Employee Training College of China National Tobacco Corporation, Zhengzhou 450008, China; 3. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** This study used tobacco variety K326 as the test crop. Cadmium-contaminated farmland soil was collected for pot experiments to investigate the alleviating effect of molybdenum application on the physiological characteristics of tobacco seedlings under cadmium stress. Four molybdenum gradients of 0, 0.25, 0.5, and 1 mg·kg<sup>-1</sup> were set up to study the effects of molybdenum on the physiological characteristics of tobacco seedlings under cadmium toxicity, including appearance characterization, enzyme activity, cadmium accumulation, photosynthesis, and antioxidant capacity. The results showed that molybdenum application improved the growth of tobacco seedlings that show signs of stunted growth and leaf chlorosis under cadmium toxicity. It also promoted root growth, with the best effect observed at a concentration of 0.5 mg·kg<sup>-1</sup>. Compared with the untreated treatment, the application of 0.5 mg·kg<sup>-1</sup> of molybdenum promoted the activity of soil enzymes, reduced the cadmium content in tobacco leaves and roots by 17.39% and 40.00%, respectively, and promoted the absorption of molybdenum; 0.5 mg·kg<sup>-1</sup> of molybdenum could significantly reduce the accumulation of reactive oxygen species and other substances in tobacco leaves, and increase the activity of defense enzymes and the content of stress hormones in tobacco plants. The total antioxidant capacity of 0.25, 0.5, and 1 mg·kg<sup>-1</sup> of molybdenum treatment was 1.17, 1.20, and 1.09 times that of the untreated

收稿日期: 2023-09-15 录用日期: 2023-11-19

作者简介: 毕浩东(1998—),男,山东青岛人,硕士研究生,从事烟草品质生态研究。E-mail: 1642825604@qq.com

\*通信作者: 许嘉阳 E-mail: jiyangxu@henau.edu.cn

基金项目: 河南省自然科学基金青年基金项目(222300420176); 河南农业大学青年英才启动基金项目(30500999)

Project supported: Henan Provincial Natural Science Foundation Youth Fund(222300420176); Henan Agricultural University Youth Talent Launch Fund Project(30500999)

treatment, respectively. In addition, molybdenum application enhanced the photosynthesis and molybdenum enzyme activity of tobacco under cadmium stress, playing an important regulatory role in the physiological metabolism of tobacco under cadmium stress. This study has shown that applying  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  of molybdenum has a higher alleviating effect on the physiological characteristics of tobacco seedlings under cadmium stress.

**Keywords:** tobacco; cadmium stress; molybdenum; photosynthesis; antioxidant system; enzyme activity; hormone content; elemental accumulation

重金属污染是目前世界上污染面积最大、危害最为严重的环境问题之一,也是制约植物正常生长发育最为严重的非生物胁迫因素之一。近年来,随着我国工业化快速发展,工业废弃物排放以及垃圾焚烧等造成的重金属污染状况愈发严峻。其中,镉是广泛存在于环境中的毒性最大的重金属之一,在土壤中具有较强的化学活性,也是造成土壤污染面积最大、危害最严重的重金属之一<sup>[1]</sup>。镉不是植物生长的必需元素,且较低含量的镉即可对植物产生危害,如改变细胞膜的通透性、破坏植物保护酶系统、降低光合强度、造成代谢紊乱、阻碍根系生长以及抑制水分的吸收转运,最终造成作物产量和品质的下降<sup>[2-5]</sup>。镉被植物吸收后会累积在植物体内,随食物链传递最终进入人体内造成严重危害,烟草虽然不是可以直接供人类食用的植物,但烟草内的镉通过卷烟制品的抽吸危害人体健康。传统重金属污染土壤的修复手段虽然起到了一定的治理效果,但因存在易造成土体结构破坏,二次污染以及受环境因素限制等局限导致难以达到永久修复的目的。因此,寻找一种安全、生态、有效的方法降低烟草镉毒害、提高卷烟安全性显得尤为重要。

钼元素作为植物生长发育所必需的微量元素,是构成固氮酶、硝酸还原酶、醛氧化酶、黄嘌呤氧化酶和亚硫酸盐氧化酶等多种酶的重要组分,参与影响机体的脂肪、含硫氨基酸、蛋白质和核酸的代谢,是人体及动植物必需的微量元素,对机体的生长发育和遗传起着重要作用。钼不仅调节着植物的生长发育和碳氮代谢过程,还在提高植物的抗逆能力方面发挥着重要作用。目前已有大量研究表明镉的毒性作用会对作物的生长性能、理化性质和分子过程造成严重干扰。钼作为一种植物必需的微量元素,可以调节高等植物中氮同化酶的活性和表达,并且在氮代谢和氧化胁迫耐受性等方面起着关键作用<sup>[6]</sup>,而钼调控的氧化胁迫耐受性在植物抵御重金属胁迫中可能发挥着巨大的应用潜力。因而,为探究钼对烟草镉毒害的缓解效果及作用机制,本试验以钼酸铵作为钼源,开展钼缓解烟草镉毒害的生理机制研究,为利用微量元素降低植物的重金属毒害以及提高卷烟安全性提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计及处理

#### 1.1.1 试验材料

供试烟草为全国广泛种植的品种 K326,烟草种子由河南农业大学烟草学院育种实验室提供。试验土壤取自新乡市镉污染土壤,全镉含量为  $3.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤基本理化性质:碱解氮  $84.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $183.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷  $168.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有机质  $16.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效钼  $0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH8.23。四水合钼酸铵固体粉剂购置于郑州艾克姆化工有限公司,含量为99%的分析纯试剂。

#### 1.1.2 培育方法

烟草种子培育:试验地点为河南农业大学烟草学院烟草品质生态实验室,选用饱满均匀的烟草种子先用10%的次氯酸钠溶液消毒,室温浸泡3~5 min,倒去次氯酸钠溶液后,再用70%的无水乙醇于室温浸泡30 s,用无菌水冲洗3~4次,随后超纯水冲洗5~6遍并浸泡种子8 h,以育苗盘和工字格海绵为介质,将种子均匀点在海绵中,放入人工气候培养箱中进行催芽。

烟草幼苗培育:采用土培法育苗,待烟草种子在人工气候培养箱中发芽至三叶后选取长势一致的幼苗用镊子移至蛭石中生长。烟草幼苗长至四叶期时移至加入外源四水合钼酸铵的花盆中生长。

整个培养期在人工培养箱中进行,维持培养箱环境为:昼夜  $28 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C} / 18 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;光周期 14 h/10 h 循环;相对湿度 70%;光照强度  $440 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

#### 1.1.3 试验处理

土壤样品置于阴凉通风处自然风干后用非金属磨土盘研磨,过60目筛,储存备用。以四水合钼酸铵为钼源,兑水配制成钼酸铵溶液施加到试验土壤中,搅拌混匀后静置一周,待钼酸铵充分与土壤混合后移栽烟草幼苗。待烟株出现明显胁迫表征时(移栽后30 d)取样并进行相关指标测定。钼浓度设置参考 Muhammad 等<sup>[7]</sup>的方法分为四个不同处理:0(对照)、0.25、0.5、 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。每个处理作4次重复,每盆栽烟1株,共有16盆。每盆装土800 g。

## 1.2 测定项目与方法

### 1.2.1 表观情况调查

待烟苗出现明显胁迫表征时(移栽后30 d),对各处理烟苗长势情况进行拍照记录,而后将烟苗整株挖出,洗刷干净根部泥土,将根系切掉置入扫描仪中对根系发育情况进行扫描拍照记录。

### 1.2.2 镉、钼含量

**镉的测定:**将采摘下的烟苗叶片和根系于105℃下杀青15 min,再于65℃烘干至质量恒定后将干样磨碎混匀,称取0.05 g于试管中,加5 mL消解液( $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4=9:1$ ),待完全消解后,蒸发去酸,用蒸馏水定容至50 mL,0.45  $\mu\text{m}$ 膜过滤,利用原子吸收分光光度计测定重金属镉的含量。

**钼的测定:**将烟苗干样磨碎混匀,称取0.3 g于瓷坩埚中,在电炉上碳化,待烟气散尽后,移入高温电炉中,于525℃灰化8 h。加入2 mL 2.5  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸,1 mL 0.5  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯羟乙酸,5 mL饱和氯酸钠溶液,摇匀,静置0.5 h后于示波极谱仪上进行测定。

### 1.2.3 酶活性

土壤样品和烟株样品于移栽后30 d采集,将烟草整株挖出,轻轻抖落根部表层泥土,用灭菌消毒处理过的刷子将烟苗根际约1~10 mm的土壤刷下来放入离心管中,用自来水清洗烟株并用超纯水润洗,分为叶片和根部,根际土和烟草组织经液氮速冻后保存在-80℃的超低温冰箱中备用。

多酚氧化酶(PPO)活性采用邻苯二酚比色法<sup>[8]</sup>测定;苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性采用苯丙氨酸比色法<sup>[9]</sup>测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光还原法测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定;硝酸还原酶(NR)、黄嘌呤脱氢酶(XDH)、亚硫酸

盐氧化酶(SUOX)和醛氧化酶(AO)活性采用ELISA检测试剂盒(上海酶联生物)检测;土壤硝酸还原酶(S-NR)、亚硝酸还原酶(S-NIR)、过氧化氢酶(S-CAT)、脲酶(S-UE)、酸性磷酸酶(S-ACP)和蔗糖酶(S-SC)的活性采用微量法试剂盒(北京索莱宝)检测。

### 1.2.4 光合作用

待烟株移栽30 d时,选取各处理长势一致的烟株选择晴天上午的9:00—11:00,利用杭州LS-1020(杭州绿博仪器有限公司)光合仪对叶片的光合指标进行测定,包括净光合速率( $P_n$ ,以 $\text{CO}_2$ 计)、气孔导度( $G_s$ ,以 $\text{H}_2\text{O}$ 计)、蒸腾速率( $T_r$ ,以 $\text{H}_2\text{O}$ 计)和胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i$ )。每张叶片测定4次,取其平均值。

### 1.2.5 活性氧代谢和抗氧化能力

鲜烟叶的过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )含量采用紫外吸收法测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥反应法测定;超氧阴离子( $\text{O}_2\cdot^-$ )含量参照王爱国等<sup>[10]</sup>的方法测定;总抗氧化能力(T-AOC)采用 $\text{Fe}^{3+}$ 还原试剂盒法测定。

### 1.2.6 激素含量

使用ELISA检测试剂盒(上海酶联生物)检测鲜烟叶茉莉酸(GA)和水杨酸(SA)含量。

## 1.3 数据分析

所有相关数据采用Excel 2010软件进行基本处理,SPSS 26软件进行数据统计分析,再采用Origin 2021软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 钼对镉胁迫下烟草表观的影响

图1是土壤施钼对镉胁迫下烟草幼苗地上部和地下部表观的影响状况,由图1可知,各处理表观相比对照烟苗的长势矮小且叶片失绿现象最严重,根

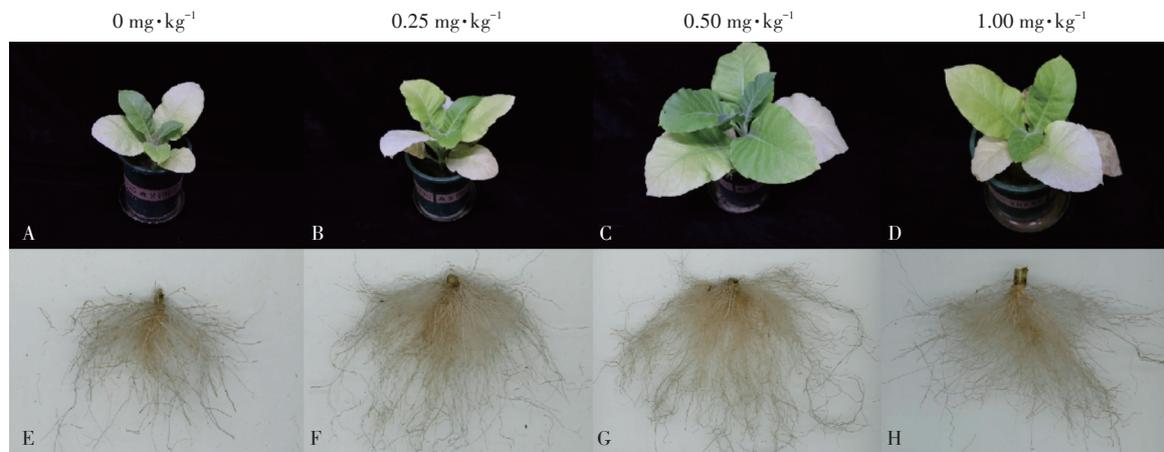


图1 施钼对镉胁迫下烟草表观的影响

Figure 1 Effects of Mo application on the appearance of tobacco under Cd stress

系发育稍弱。地上部表现中,施钼处理烟苗生长被抑制的状况得到明显缓解,但  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理烟苗的叶片仍有较严重的失绿现象,可能是过量钼的施用对烟草幼苗造成了毒害作用。地下部表现中,施钼处理明显促进了烟苗根系生长,烟苗根系体积更大且根毛更加密集。可以看出,  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的施钼处理对缓解镉毒害,促进烟草生长发育的作用最明显。

### 2.2 钼对镉胁迫下烟草元素含量的影响

表1展示了施钼对镉胁迫下烟草钼和镉含量的影响,可见4个处理烟草植株镉累积量差异不显著,但施钼条件下的烟草植株镉累积量均表现出降低的趋势,尤其在  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理下,无论是叶片还是根系的镉含量累积量最少。以上结果表明,土壤施钼可有效抑制烟草对有害金属镉的吸收与转运。此外,随着土壤施钼量的提高,烟株叶片和根系的钼含量均有

不同程度的提高,且在  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理下的积累量最高,与其他处理差异显著。

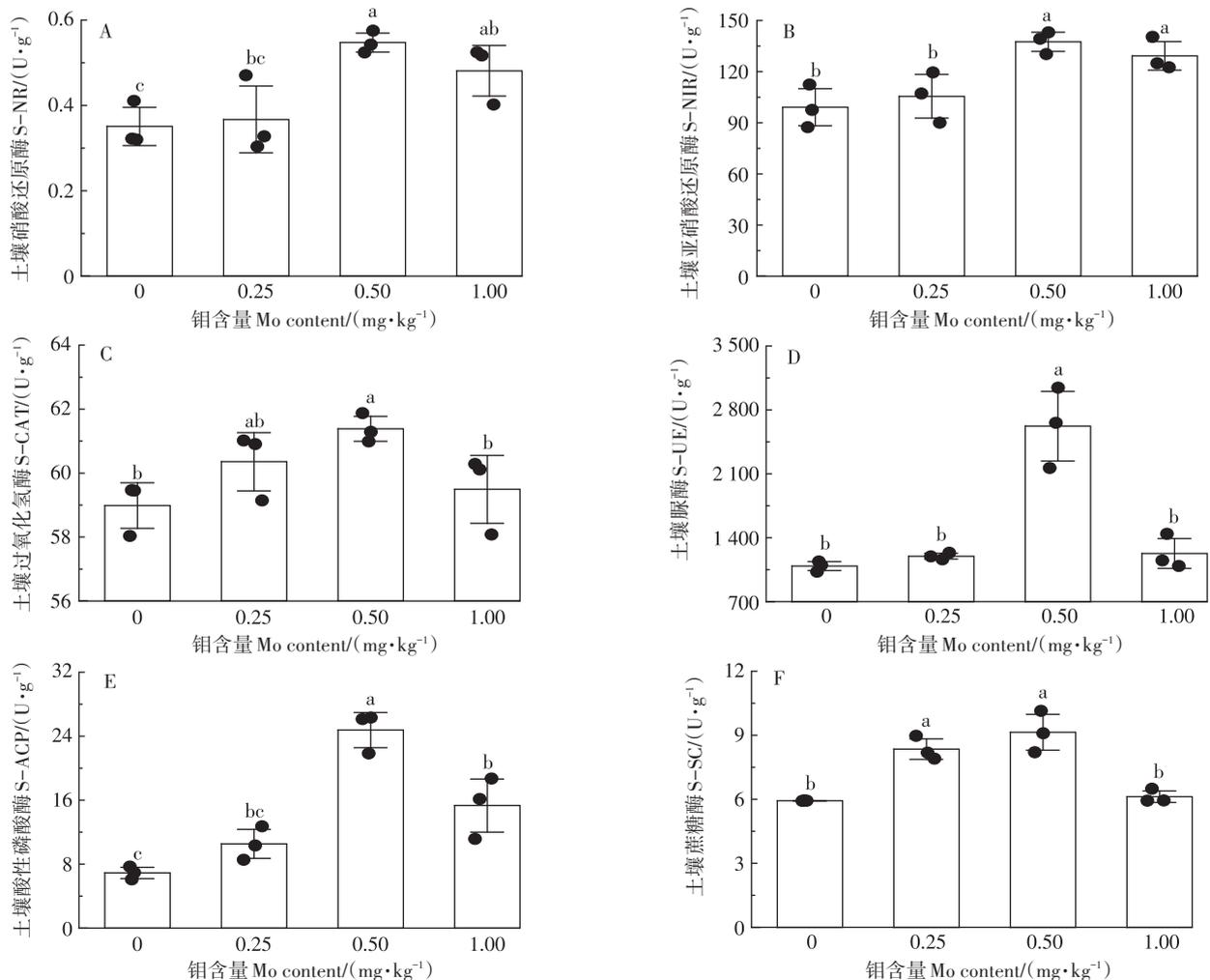
### 2.3 钼对镉胁迫下烟草土壤酶活性的影响

施钼对镉胁迫下烟草土壤酶活性的影响如图2

表1 施钼对镉胁迫下烟草钼、镉含量的影响( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )  
Table 1 Effects of Mo application on the content of Mo and Cd in tobacco under Cd stress ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

处理 Treatment	叶片镉含量 Cd content in leave	根系镉含量 Cd content in roots	叶片钼含量 Mo content in leave	根系钼含量 Mo content in roots
0	$4.60 \pm 0.54a$	$1.50 \pm 0.36a$	$3.00 \pm 0.59d$	$4.90 \pm 0.62b$
0.25	$4.20 \pm 0.51a$	$1.30 \pm 0.33a$	$11.90 \pm 1.23c$	$7.10 \pm 1.10b$
0.5	$3.80 \pm 0.37a$	$0.90 \pm 0.16a$	$34.70 \pm 5.59b$	$14.50 \pm 1.58a$
1	$3.90 \pm 0.29a$	$1.40 \pm 0.16a$	$68.10 \pm 3.43a$	$17.20 \pm 1.61a$

注:不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。  
Note: The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ). The same below.



图中黑点表示各处理对应指标的原始数据。下同。

The black dots in the figure represent the raw data of the corresponding indicators for each processing. The same below.

图2 施钼对镉胁迫下土壤酶活性的影响

Figure 2 Effects of Mo application on soil enzyme activity under Cd stress

所示。随着施钼量的增加,S-NR、S-NIR、S-CAT、S-UE、S-ACP和S-SC的活性均呈现先升高后降低的趋势,3组施钼处理均在一定程度上促进了土壤酶活性的升高,其中 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组的结果最显著,相较于对照分别增加了上述6种酶55.84%、38.76%、4.07%、140.80%、259.08%和55.10%的生物活性。

#### 2.4 钼对镉胁迫下烟叶光合作用的影响

不同施钼处理对镉胁迫下烟草光合作用的影响结果如表2所示, $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度最高,较其他处理高出20.86%~78.71%、46.67%~60%和78.57%~85.74%,且净光合速率和蒸腾速率与其他处理均有显著性差异,而对照处理的此三项指标在所有处理中最低, $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理对烟草的光合性能有较好的促进作用,烟叶吸收和运输水分的动力更强。4组处理胞间 $\text{CO}_2$ 浓度表现为 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理 $>0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理 $>1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理 $>0.25$

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理,施用外源钼后,烟草叶片的 $\text{C}_i$ 呈下降趋势。对水分利用效率的结果分析可以发现 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理 $>0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理 $>0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理 $>1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理,各处理间差异不显著。

#### 2.5 钼对镉胁迫下烟叶抗逆能力的影响

##### 2.5.1 钼对镉胁迫下烟叶活性氧代谢和抗氧化能力的影响

图3展示了施钼对镉胁迫下烟叶活性氧代谢和抗氧化能力的影响。四个处理中 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、MDA和 $\text{O}_2\cdot^-$ 的含量都表现为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组最低,且随着施钼量的增加呈现先降低后升高的趋势,除 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组MDA含量显著高于对照组以外,其他施钼组均显著降低了烟草叶片中 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、MDA和 $\text{O}_2\cdot^-$ 的含量。图3D的结果表明,随着施钼量的增加,烟叶T-AOC呈先升高后降低的趋势。与对照相比,施钼组均显著提高了烟叶的总抗氧化能力,分别提高了17.00%、19.85%和9.43%。整体看来,土壤施

表2 施钼对镉胁迫下烟草光合作用的影响

Table 2 Effects of Mo application on photosynthesis of tobacco under Cd stress

钼含量 Mo content/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	Pn/( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Tr/( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Gs/( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\text{C}_i$ /( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	WUE/( $\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
0	2.746±0.989b	0.006±0.002b	0.000 2±0.000 1a	1 239.050±375.454a	61.868±18.114a
0.25	6.059±4.945ab	0.008±0.005b	0.000 3±0.000 2a	921.350±425.886a	39.450±17.549a
0.5	12.901±4.622a	0.015±0.002a	0.001 4±0.001 5a	1 005.380±154.822a	55.760±17.623a
1	10.210±4.610ab	0.008±0.003b	0.000 3±0.000 1a	928.000±229.289a	38.510±15.901a

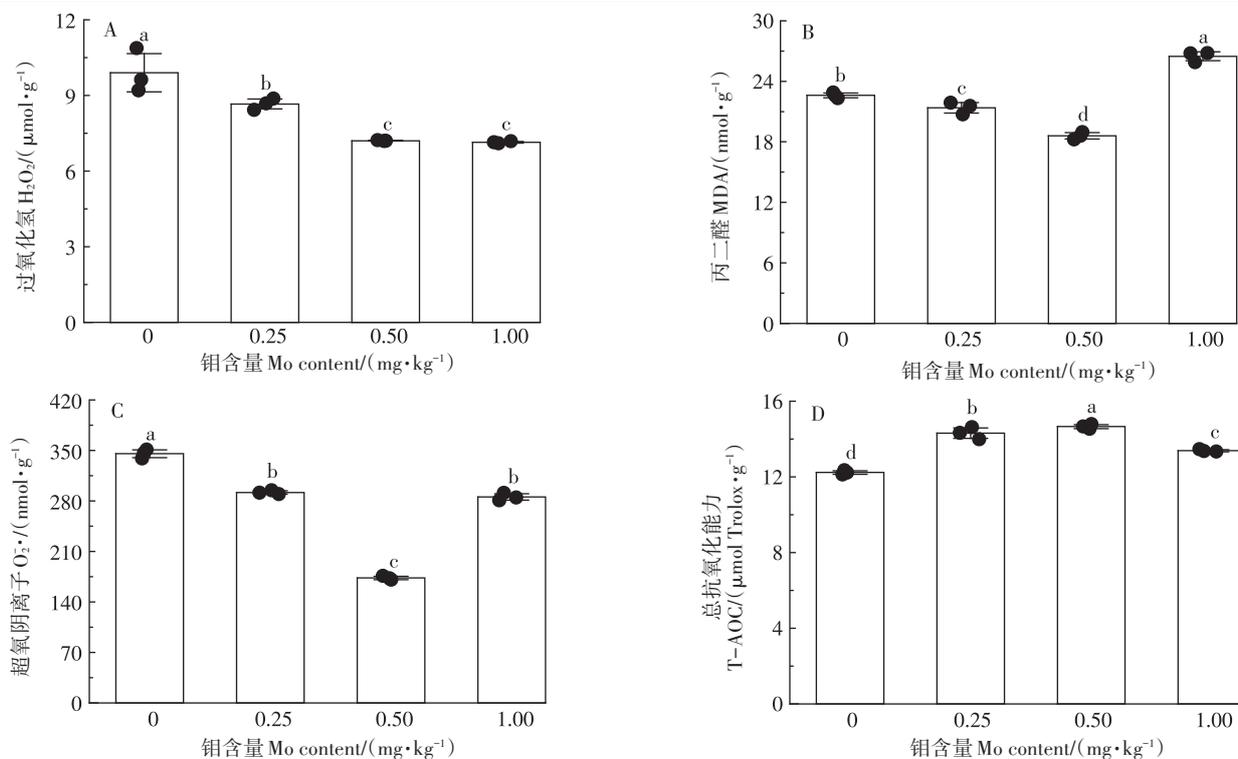


图3 施钼对镉胁迫下烟草叶片活性氧代谢和抗氧化能力的影响

Figure 3 Effects of Mo application on active oxygen metabolism and antioxidant capacity of tobacco leave under Cd stress

钼能显著提高镉胁迫下烟草的抗氧化能力,清除活性氧等物质,以 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的钼素效果最为明显,但是过量钼可能会产生毒性,加剧烟草胁迫程度。

### 2.5.2 钼对镉胁迫下烟草叶片防御酶活性的影响

施钼对镉胁迫下烟草叶片防御酶活性的影响如图4所示。结果表明,随着施钼量的增加,烟草叶片中的PPO和PAL活性均呈现先升高后降低的趋势,其中 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下两种酶活性最高且与其他处理呈显著性差异(图4A、B)。随着施钼量的增加,烟株的CAT活性呈现先升高后降低的趋势,其中 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组活性最高,且显著高于对照组(图4C)。而SOD活性随着施钼量增加呈现先降低后升高的趋

势,四个处理中 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组活性最高,且显著高于其他两个施钼处理(图4D),这可能是由于适量钼的施入降低了镉对烟草的毒害,而当钼施入过多时反而与镉一起对烟草造成胁迫,破坏了细胞内氧化还原的平衡状态,进而导致SOD活性升高。综合以上结果,可以认为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的钼提高烟草防御酶活性的效果最明显。

### 2.5.3 钼对镉胁迫下烟叶激素含量的影响

施钼对镉胁迫下烟叶激素含量的影响结果见图5。随着施钼量的增加,JA和SA两种激素含量均呈现先增加后降低的趋势,分别在 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理条件下达到最大值。相较于对照, $0.25$

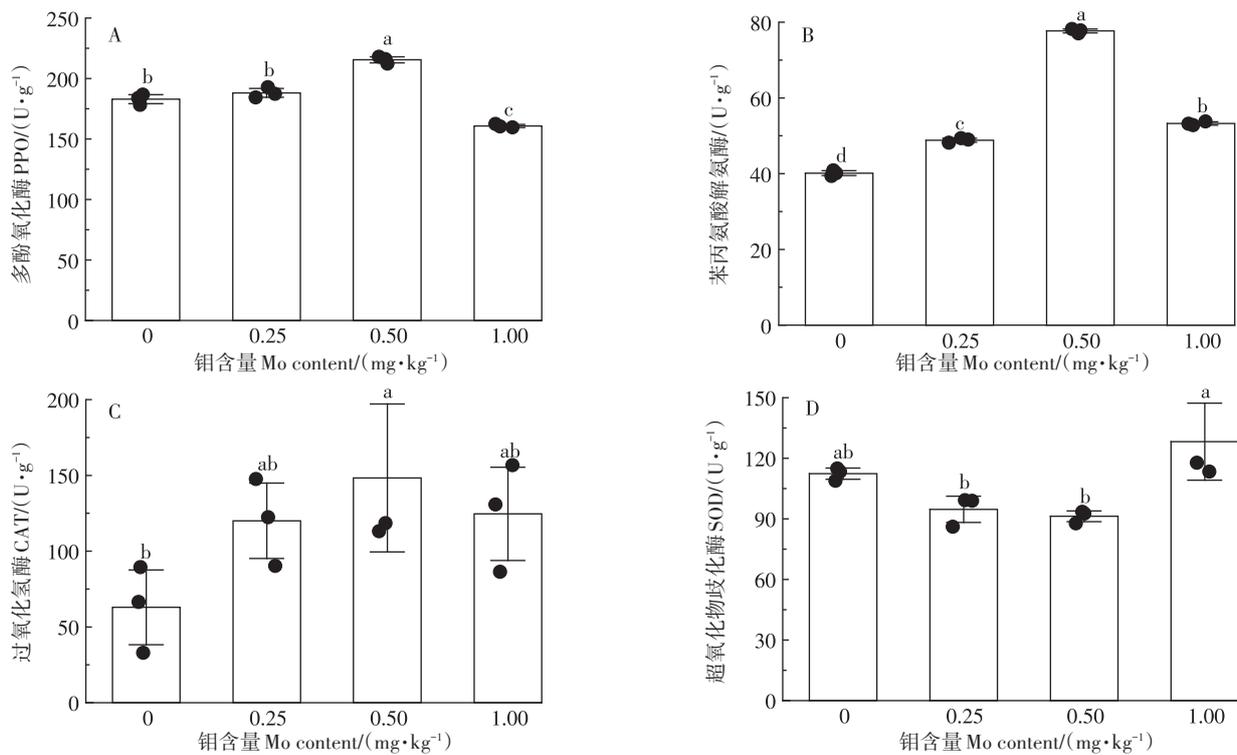


图4 施钼对镉胁迫下烟草叶片防御酶活性的影响

Figure 4 Effects of Mo application on the activity of defense enzymes in tobacco leaf under Cd stress

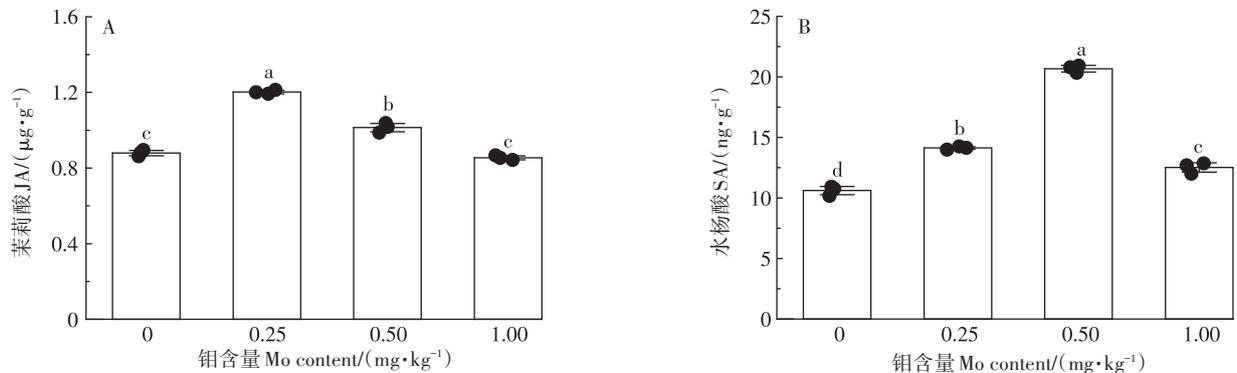


图5 施钼对镉胁迫下烟草叶片激素含量的影响

Figure 5 Effects of Mo application on hormone content in tobacco leaf under Cd stress

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理分别增加了 36.73%、15.33% 的 JA 含量以及 33.12%、94.84% 的 SA 含量。但是在  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理下,烟叶中的 JA 和 SA 的含量显著降低。以上结果表明,适宜钼浓度能够调节镉污染条件下烟叶的激素含量,提高烟草应对逆境胁迫的能力,而过量的钼可能加剧烟叶的胁迫程度。

## 2.6 钼对镉胁迫下烟株钼酶活性的影响

为探讨施钼对烟株体内含钼酶活性的影响,测定了烟株叶片和根系的硝酸还原酶(NR)、黄嘌呤脱氢酶(XDH)、亚硫酸盐氧化酶(SUOX)和醛氧化酶(AO) 4种关键含钼酶活性。钼酶活性的结果如图6所示,随着施钼量的增加,四个含钼酶活性均呈现先升高后降低的趋势,三个施钼处理均在一定程度上增加了烟草钼酶的活性,这可能是由于钼直接参与含钼酶的钼辅因子合成,其中  $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的效果最为显著。而高浓度处理下( $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )含钼酶活性的下降可能是过量钼造成植株的氧化应激反应,产生过多的活性氧自由基影响含钼酶的结构和功能,进而导致酶活性降低。

## 3 讨论

### 3.1 钼缓解镉污染对烟株外观表征的损伤

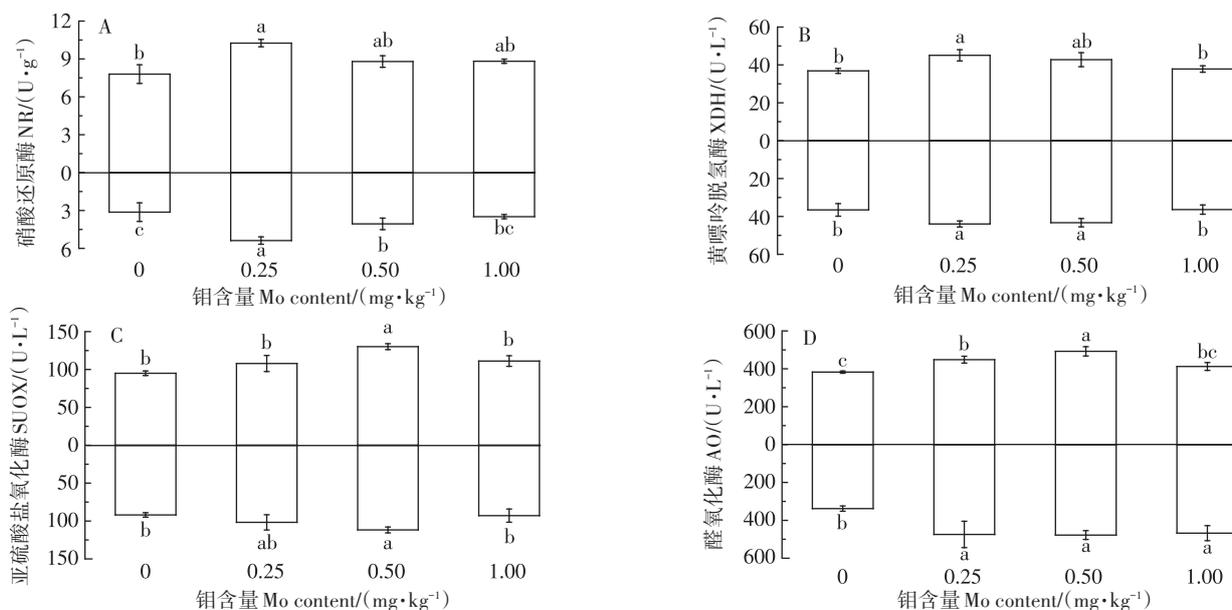
重金属胁迫会对植物造成不可逆的损伤,植物受镉毒害的影响后表型的变化是最直观的体现。本研究发现,土壤施钼能够有效改善镉毒害导致的烟草长

势缓慢、叶片失绿的情况,并明显促进根系体积的增大和根毛密度的增加。Imran等<sup>[11]</sup>研究发现钼减轻了镉诱导对香稻苗期生长性能的抑制作用,此外 Han等<sup>[12]</sup>也发现外源钼的施入能显著减轻镉对油菜植物枝和根的长度和质量,与本研究的結果一致。

### 3.2 钼通过影响土壤酶活调控烟株对镉的吸收

本研究发现施钼促进了烟草对微量元素钼的吸收转运,并降低了重金属镉的积累,对烟草的生长发育起到一定的促进作用,且不同器官中钼和镉的积累表现为叶片高于根系。目前已有很多研究得出了相同的结论,如 Moussa等<sup>[13]</sup>研究发现相较于缺钼处理,施钼增加了小麦器官对钼的吸收,且旗叶和茎秆中的钼含量比其他器官中高。刘智琛等<sup>[14]</sup>研究表明增施钼肥显著提高了小白菜菜心的钼含量,与不施钼处理相比,施钼后小白菜地上部钼含量增幅显著。此外,在烟草<sup>[15]</sup>、油菜<sup>[16]</sup>等作物中增施钼肥也被发现植株钼含量的增加,这与本研究的結果是一致的。

土壤酶作为土壤的重要组成部分,在外来有机质的降解以及土壤物质转化和能力代谢等方面发挥了重要的作用,其活性可以作为土壤生化反应方向和物质代谢旺盛程度的表征,是反映土壤肥力状况和环境质量的重要指标<sup>[17-20]</sup>。钼是植物体内固氮酶和硝酸还原酶的重要组分,直接参与硝态氮还原为铵的化学反应,对促进植物体内氮代谢有重要作用<sup>[21]</sup>。本研究发现,不施钼条件下,受镉胁迫的影响土壤中碳氮磷



图中0刻度处分界线上部为烟叶,下部为根系。

The upper part of the 0 scale boundary in the figure is the tobacco leaf, and the lower part is the root.

图6 施钼对镉胁迫下烟草钼酶活性的影响

Figure 6 Effects of Mo application on molybdenum enzyme activity in tobacco under Cd stress

循环相关的酶以及抗氧化酶的活性都较低;在施钼后,这些酶的活性都有不同程度的提高,说明四水合钼酸铵能够改善镉污染下的土壤环境,促进土壤中碳素营养、磷素营养和氮素形态间的相互转化,提高土壤的抗氧化能力。Moussa等<sup>[22]</sup>研究发现,施钼影响了冬小麦-土壤系统的生物固氮过程,能够提高S-NR的活性,这与本研究的结果一致。本研究还发现,施钼提高了镉污染土壤中S-NIR的活性,说明钼的施用促进了土壤硝酸盐还原为亚硝酸盐,并进一步还原成铵为烟草吸收利用的过程,维持了烟草正常的氮素营养和代谢。本研究发现未施钼处理的土壤酶活性均受到镉胁迫的抑制。与此结果相一致,程通等<sup>[23]</sup>认为,重金属镉对S-SC、S-UE和S-CAT的活性有明显的抑制作用;周兵爽等<sup>[24]</sup>发现,随着镉处理浓度的增加,S-ACP的活性逐渐降低。外源添加钼后,镉污染植烟土壤酶(S-NR、S-NIR、S-CAT、S-UE、S-ACP和S-SC)活性均有一定程度的升高。申洪涛等<sup>[25]</sup>也认为,钼酸铵的施用提高了植烟土壤中S-SC、S-UE和S-CAT的活性。因此,可以认为,土壤施钼能够有效改善土壤环境,降低镉的毒害效应,促进有机质的转化并保持土壤养分的有效性。

### 3.3 钼增强镉污染烟株的光合作用

重金属镉具有很强的生物毒性,且在土壤中有很强的化学活性,植物吸收镉以后便会出现严重的毒害症状。Tan等<sup>[26]</sup>研究发现4个耐镉性较强的向日葵品种暴露于镉胁迫环境中后,叶片的净光合速率、蒸腾速率以及气孔导度均受到显著抑制,且高浓度镉的抑制作用更明显,光合能力明显降低。钼作为植物必需的微量元素之一,可以促进植物光合作用,有利于糖类物质的形成、积累和转化<sup>[27]</sup>。在本研究中,镉使烟叶净光合速率、蒸腾速率和气孔导度显著下降,而经钼处理后则明显升高,且施钼还显著降低了胞间CO<sub>2</sub>浓度,这与郭美俊等<sup>[28]</sup>的研究发现钼能有效提高谷子的净光合速率和气孔导度,减少胞内CO<sub>2</sub>浓度的结果相一致。说明施钼可以有效缓解烟草叶片在镉胁迫下的非气孔限制,增强细胞呼吸能力,提高叶片的光合作用。此外目前也有较多文献报道,施钼可以提高油菜<sup>[29]</sup>、谷子<sup>[28]</sup>和水稻<sup>[30]</sup>等作物的光合速率。

### 3.4 钼提高镉胁迫烟株抗氧化能力和激素表达

在正常情况下,植物体内的活性氧(ROS)产生与清除保持平衡,当环境胁迫长期作用于植物体,ROS的产生大于清除系统的清除能力时,这种平衡便会被打破,ROS大量积累产生氧化伤害,对细胞功能造成

破坏,机体出现各种自由基综合征<sup>[31]</sup>。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>是植物光呼吸过程的代谢产物<sup>[32]</sup>,作为ROS的重要代表之一,可以作用于质膜使其过氧化受损。MDA的含量作为反映膜质过氧化作用强弱的一个指标,可通过产生共价结合物对蛋白质造成损害,这些共价结合物可能在老化的过程中参与了对组织的破坏<sup>[33]</sup>。在本研究中,镉胁迫下施钼后,烟草幼苗MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>·<sup>-</sup>的含量整体上均有所降低,烟苗的总抗氧化能力整体上均有所升高,可见施钼降低了烟草的氧化胁迫,这与前人的研究结果是一致的。李莹莹等<sup>[34]</sup>研究发现,镉胁迫可以增加广藿香幼苗中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和MDA的积累,加剧细胞膜质过氧化程度,降低小麦幼苗的抗氧化能力。Wu等<sup>[35]</sup>研究发现,通过在干旱胁迫下的小麦中加钼可以明显减少植株MDA的积累,增加抗氧化物含量,清除活性氧,增强抗氧化防御,提高小麦对胁迫环境的耐受能力。

重金属胁迫会导致植物体内发生一系列的生理生化反应,影响植物体内活性氧代谢系统的平衡,破坏活性氧清除系统的酶系统,导致自由基积累,这是植物面临重金属胁迫时不能正常生长的原因。此外,植物在镉胁迫的影响下会产生过量的ROS,破坏细胞质膜并阻碍正常生长发育,此时植株体内防御酶的活性会发生变化,通过各种生理生化反应提高植物应对逆境胁迫的能力。其中SOD和CAT是组成植物体内清除ROS的有效酶系统。刘金钊等<sup>[36]</sup>研究发现镉胁迫显著提高了豌豆幼苗CAT和SOD的活性。而张浩等<sup>[37]</sup>发现随着镉浓度的增加烟草CAT的活性逐渐下降,SOD的活性先上升后下降。此外,李朝阳等<sup>[38]</sup>发现施钼条件下烟草CAT和SOD的活性较缺钼条件下显著增强。在本研究中随着施钼浓度的增加,CAT的活性呈先升高后降低的趋势,而SOD的活性变化与之相反,这可能是CAT和SOD对于镉和钼的浓度感受程度不同,适量钼的施入增加了CAT的活性,以抵御镉胁迫的影响,同时施钼降低了膜脂过氧化程度,降低了SOD的活性,而过量钼的施入可能与镉一起对烟草造成胁迫,破坏了细胞内氧化还原的平衡状态,进而导致SOD活性的升高。

PPO是植物提高自身抗病性的物质代谢基础,它能够催化细胞壁酚类化合物氧化形成更疏水的聚合物,加固细胞壁并减少植物被病原菌侵染的可能性。PAL是催化苯丙烷代谢途径第一步反应的酶,其活性与植物抗逆性密切相关,可作为衡量植物抗逆能力的生化指标之一。本研究结果表明,镉污染土壤中烟叶

PPO和PAL的活性均受到抑制,经施钼处理后其活性得到提高,这与崔宏莉等<sup>[39]</sup>研究中在污灌与镉胁迫的复合处理下菠菜的PPO和PAL的活性均受到抑制的结果一致。此外,郑世燕等<sup>[40]</sup>研究表明,经施钼处理后感染青枯病烟株体内PPO和PAL的活性均得到了提高,施钼增强了烟株的抗病能力,有效延缓了病害的发生。说明镉污染可以破坏烟草的自我保护系统,降低烟草抵抗逆境的能力,而施钼则可以缓解这一过程。

研究发现,镉胁迫下植物激素分泌明显增加,并认为激素作为植物信号传导物质,也是植物耐镉胁迫的重要机制之一<sup>[41]</sup>。JA和SA等植物激素都参与了植物对镉的抗性。Awad等<sup>[42]</sup>研究发现将外源SA施加在镉胁迫下芥菜叶片的表面可以显著提高芥菜的光合作用率、生长和生产力,有效缓解芥菜受到的毒害作用。陈锦平等<sup>[43]</sup>研究发现,JA和SA可有效减少小白菜地上部镉含量和镉积累量,且JA的抑制效果更为显著。在本研究中,施钼提高了镉污染土壤中烟草JA和SA的含量,增加了烟苗抵御镉毒害的能力,这与前人研究的结论一致。

目前,在镉毒害影响植物抗氧化能力、防御酶以及激素含量等指标方面已有大量的研究,而对于施用钼素对于降镉毒害方面的研究仍然较少,本试验在前人研究的基础,通过添加钼素的方法研究对镉胁迫的缓解效果,最终发现,钼素的施用能够显著提高镉胁迫下烟草的抗氧化能力、抗逆激素的含量以及抗逆酶的活性等,其中以施用 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 钼素的缓解效果最为明显。

### 3.5 钼上调镉污染烟株的含钼酶活性

NR、XDH、SUOX和AO是植物中4种重要的含钼酶<sup>[44]</sup>,钼是其钼辅因子的金属组分,施钼能合成有活性的钼辅因子,其活性均受钼浓度的影响。武丽等<sup>[45]</sup>研究发现,缺钼会显著降低烟草中钼酶的活性,而在施钼处理中稳中有升。秦世玉等<sup>[46]</sup>研究发现施钼可以提高甘蓝型油菜薹期含钼酶活性。本研究发现,钼酶活性的变化随施钼量的增加呈现先升高后降低的趋势,适量施用钼素促进了与钼酶的辅酶因子合成, $0.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的施钼量对镉胁迫下钼酶的活性提高最为显著,这与前人的研究结果一致。在此基础上继续施钼反而导致钼酶活性的降低,可能是过量的钼对烟草的生长造成了胁迫,抑制了钼酶的活性以及碳氮代谢的过程,进而导致了蛋白质和亚硝酸盐等次生代谢物质合成与积累的变化,由此可见土壤

施钼可以降低镉的毒性作用,适量钼素营养对烟草关键酶的活性以及生理代谢过程起着重要的调节作用。

综上所述,外源钼能有效降低镉对烟草的毒害作用。就本研究结论看来,在全镉含量为 $3.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤中施加钼浓度 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,对于烟草的各项生理指标调控效果最好,而 $0.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理可能由于施钼量少而对镉胁迫的缓解效果不明显, $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理可能由于施钼过多产生毒性加剧了胁迫过程。这为探究土壤镉污染、作用植物(烟草)和钼元素三者间的关系和从营养调控方面应对植物重金属胁迫有一定的参考价值。

## 4 结论

(1)在土壤中施用 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的钼能显著降低镉毒害对烟草表观的损伤,改善烟草长势矮小、叶片失绿的情况,促进了烟草根系体积的增大和根毛密度的增加。

(2)与对照相比,土壤施钼提高了土壤酶的活性,抑制烟草根系中的镉积累和镉向叶片的转运,并促进了烟株对钼元素的吸收。

(3)土壤施钼提高烟草在镉胁迫下的防御能力,其中以 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 钼浓度效果最好,具体表现为抑制活性氧和丙二醛积累,降低细胞遭受氧化胁迫的程度;增加烟草防御酶和钼酶活性,提高烟叶光合速率,诱导激素表达。

### 参考文献:

- [1] 韩俊艳,王敬言,刘诗琦,等. 重金属镉胁迫对大豆种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2023, 35(2): 108-115. HAN J Y, WANG J Y, LIU S Q, et al. The effect of heavy metal cadmium stress on soybean seed germination and seedling growth[J]. *Journal of Shenyang University (Natural Science Edition)*, 2023, 35(2): 108-115.
- [2] ZULFIQAR U, AYUB A, HUSSAIN S, et al. Cadmium toxicity in plants: recent progress on morpho-physiological effects and remediation strategies[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(1): 212-269.
- [3] 翟夜雨,黄五星,袁岐山,等. 植物镉毒害与硒对镉胁迫的缓解作用研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(3): 372-382, 392. ZHAI Y Y, HUANG W X, YUAN Q S, et al. Research progress on cadmium toxicity in plants and the alleviating effect of selenium on cadmium stress[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2023, 57(3): 372-382, 392.
- [4] 王金香,张阿良,秦敏,等. 镉胁迫对玉米幼苗光合特性及活性氧代谢的影响[J]. 天津农业科学, 2023, 29(1): 1-6. WANG J X, ZHANG A L, QIN M, et al. The effect of cadmium stress on the photo-

- synthetic characteristics and reactive oxygen species metabolism of maize seedlings[J]. *Tianjin Agricultural Science*, 2023, 29(1):1-6.
- [5] 马凤仪, 赵宝平, 张茹, 等. 燕麦植株生长及叶片生理活性对土壤镉胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 2022, 42(8):1347-1354. MA F Y, ZHAO B P, ZHANG R, et al. Response of oat plant growth and leaf physiological activity to soil cadmium stress[J]. *Northwest Botanical Journal*, 2022, 42(8):1347-1354.
- [6] 李良木, 范艺宽, 许自成. 烟草钼素营养研究进展[J]. 作物杂志, 2017(6):12-16. LI L M, FAN Y K, XU Z C. Research progress on molybdenum nutrition in tobacco[J]. *Crop Journal*, 2017(6):12-16.
- [7] MUHAMMAD I, SADDAM H, MUHAMMAD S R, et al. Molybdenum improves 2-acetyl-1-pyrroline, grain quality traits and yield attributes in fragrant rice through efficient nitrogen assimilation under cadmium toxicity[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 211:111911.
- [8] 袁斌, 周诗雨, 刘昌伟, 等. 多酚氧化酶的提取工艺与活性测定研究[J]. 茶叶通讯, 2020, 47(2):291-296. YUAN B, ZHOU S Y, LIU C W, et al. Study on the extraction process and activity determination of polyphenol oxidase[J]. *Tea Communication*, 2020, 47(2):291-296.
- [9] 赵进红, 王玉山, 冯殿齐, 等. 药物处理对疯枣枝过氧化物酶和苯丙氨酸解氨酶活性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2010, 41(3):360-364. ZHAO J H, WANG Y S, FENG D Q, et al. The effect of drug treatment on the activities of peroxidase and phenylalanine ammonia lyase in wild jujube branches[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2010, 41(3):360-364.
- [10] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J]. 植物生理学通讯, 1990(6):55-57. WANG A G, LUO G H. Quantitative relationship between superoxide free radicals and hydroxylamine reactions in plants[J]. *Plant Physiology Communication*, 1990(6):55-57.
- [11] IMRAN M, HUSSAIN S, EL-ESAWI MA, et al. Molybdenum supply alleviates the cadmium toxicity in fragrant rice by modulating oxidative stress and antioxidant gene expression[J]. *Biomolecules*, 2020, 10(11):1582.
- [12] HAN Z, WEI X, WAN D, et al. Effect of molybdenum on plant physiology and cadmium uptake and translocation in rape (*Brassica napus* L.) under different levels of cadmium stress[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(7):2355.
- [13] MOUSSA M G, SUN X, ISMAEL M A, et al. Molybdenum-induced effects on grain yield, macro-micro-nutrient uptake, and allocation in Mo-inefficient winter wheat[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 41(4):1516-1531.
- [14] 刘智琛, 李启彪, 黄刊, 等. 不同形态钼肥对小白菜产量及品质的影响[J]. 华中农业大学学报(自然科学版), 2022, 41(2):30-37. LIU Z C, LI Q B, HUANG K, et al. The effect of different forms of molybdenum fertilizer on the yield and quality of Chinese cabbage[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(2):30-37.
- [15] 曾宇, 李小勇, 韩助君, 等. 增施钼肥对烤烟叶片矿质元素含量及常规化学成分的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(11):2226-2228. ZENG Y, LI X Y, HAN Z J, et al. The effect of adding molybdenum fertilizer on the mineral element content and conventional chemical composition of flue-cured tobacco leaves[J]. *Zhejiang Agricultural Science*, 2021, 62(11):2226-2228.
- [16] 胡权, 赵继献, 戴祥来, 等. 钼在油菜中吸收积累分布特征及其对产质量影响的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2022, 50(2):22-28. HU Q, ZHAO J X, DAI X L, et al. Research progress on the distribution characteristics of molybdenum absorption and accumulation in rapeseed and its impact on yield and quality[J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2022, 50(2):22-28.
- [17] NIKOLOVA R, BOTEVA S, KENAROVA A, et al. Enzyme activities in soils under heavy metal pollution: a case study from the surroundings of a non-ferrous metal plant in Bulgaria[J]. *Biotechnology and Biotechnology Equipment*, 2023, 37(1):49-57.
- [18] 卢秀霞, 赵洋, 王晶, 等. 尾菜再生水灌溉对土壤酶活性与重金属含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023(5):110-120. LU X X, ZHAO Y, WANG J, et al. The effect of reclaimed water irrigation on soil enzyme activity and heavy metal content in tail vegetables[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2023(5):110-120.
- [19] 吴金平, 周洁, 矫振彪, 等. 不同施肥方式对甘蓝生长、产量、品质及土壤酶活性的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(9):75-79. WU J P, ZHOU J, JIAO Z B, et al. The effects of different fertilization methods on the growth, yield, quality, and soil enzyme activity of cabbage[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2023, 36(9):75-79.
- [20] KARACA U C, CHALABEE O A H. The effect of increasing doses of vermicompost application on cadmium contaminated soils on some soil enzyme activities[J]. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2023, 18(1):79-88.
- [21] 刘咏艳, 宋正熊, 金佳威, 等. 钼锌营养对烤烟生理特性及品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(6):216-224. LIU Y Y, SONG Z X, JIN J W, et al. The effect of molybdenum and zinc nutrition on the physiological characteristics and quality of flue-cured tobacco[J]. *China Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(6):216-224.
- [22] MOUSSA M G, SUN X, EL-TOHORY S, et al. Molybdenum role in nitrogen bioavailability of wheat-soil system using the natural <sup>15</sup>N abundance technique[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(3):3611-3624.
- [23] 程通, 王小兵, 董君能, 等. 原位钝化对稻田镉污染土壤修复效果及土壤酶活性的影响[J]. 中国稻米, 2023, 29(2):28-33. CHENG T, WANG X B, DONG J N, et al. The effect of *in-situ* passivation on the remediation of cadmium contaminated soil in paddy fields and the activity of soil enzymes[J]. *Chinese Rice*, 2023, 29(2):28-33.
- [24] 周兵爽, 梁小明, 吴建勇, 等. 镉对草海湿地沉积物中酸性磷酸酶活性的影响研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(3):37-42. ZHOU B S, LIANG X M, WU J Y, et al. Study on the effect of cadmium on acid phosphatase activity in sediments of Caohai Wetland[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 39(3):37-42.
- [25] 申洪涛, 段卫东, 李冬, 等. 钼肥对植烟土壤酶活性及烤烟产量和品质的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(6):42-47. SHEN H T, DUAN W D, LI D, et al. The effect of molybdenum fertilizer on enzyme activity in tobacco planting soil and yield and quality of flue-

- cured tobacco[J]. *Henan Agricultural Science*, 2020, 49(6):42-47.
- [26] TAN D, ZHANG L L, ZHANG S, et al. Physiological response of four widely cultivated sunflower cultivars to cadmium stress[J]. *Horticulturae*, 2023, 9(3):320.
- [27] 罗勇军, 张庆华, 杨志忠, 等. 黔东南地区耕地土壤中硒与钼元素的关系及应用前景[J]. 西部探矿工程, 2023, 35(6):157-161. LUO Y J, ZHANG Q H, YANG Z Z, et al. The relationship and application prospects of selenium and molybdenum elements in cultivated soil of southeast Guizhou Province[J]. *Western Exploration Engineering*, 2023, 35(6):157-161.
- [28] 郭美俊, 白亚青, 杨艳君, 等. 钼肥喷施对谷子生长生理及干物质积累分配的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(9):103-111. GUO M J, BAI Y Q, YANG Y J, et al. The effect of molybdenum fertilizer spraying on the growth physiology and dry matter accumulation and distribution of millet[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2023, 51(9):103-111.
- [29] 刘红恩, 胡承孝, 聂兆君, 等. 酸性黄棕壤中钼磷配施对甘蓝型油菜苗期碳氮代谢的影响[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(1):62-68. LIU H E, HU X C, NIE Z J, et al. The effect of molybdenum and phosphorus combined application on carbon and nitrogen metabolism of *Brassica napus* seedlings in acidic yellow brown soil[J]. *Chinese Journal of Oil Crops*, 2012, 34(1):62-68.
- [30] 陈志青, 冯源, 王锐, 等. 外源钼对水稻产量形成及氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(9):2325-2338. CHEN Z Q, FENG Y, WANG R, et al. The effect of exogenous molybdenum on rice yield formation and nitrogen utilization[J]. *Journal of Crops*, 2022, 48(9):2325-2338.
- [31] ZENG Q P, GUO Y. A diversity response and systematic resistance induction in plants[J]. *Chemistry of Life*, 1997, 17(3):31-33.
- [32] 田蜜蜜, 穆秀杰, 张瑞含, 等. 拟南芥 *GOX1* 基因的克隆和表达分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(5):698-703. TIAN M M, MU X J, ZHANG R H, et al. Cloning and expression analysis of the *GOX1* gene in arabidopsis[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science Edition)*, 2023, 46(5):698-703.
- [33] 王安可, 柴庆辉, 朱玉兰, 等. 毛竹林下套种珍贵树种生长及生理生化特性的研究[J]. 竹子学报, 2023, 42(3):27-32. WANG A K, CHAI Q H, ZHU Y L, et al. A Study on the growth and physiological and biochemical characteristics of rare tree species intercropped under moso bamboo forests[J]. *Journal of Bamboo*, 2023, 42(3):27-32.
- [34] 李莹莹, 何梦玲, 姚尹伊, 等. 镉胁迫下广藿香幼苗的生理响应[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21):8996-9003. LI Y Y, HE M L, YAO Y Y, et al. Physiological response of patchouli seedlings under cadmium stress[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(21):8996-9003.
- [35] WU S W, HU C X, TAN Q L, et al. Effects of molybdenum on water utilization, antioxidative defense system and osmotic adjustment ability in winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 83:365-374.
- [36] 刘金钊, 王悦华, 严正阳, 等. 叶面喷施褪黑素对镉胁迫下豌豆生长及镉含量的影响[J]. 现代农业科技, 2023(19):62-66, 76. LIU J Z, WANG Y H, YAN Z Y, et al. The effect of foliar spraying of melatonin on the growth and cadmium content of peas under cadmium stress[J]. *Modern Agricultural Technology*, 2023(19):62-66, 76.
- [37] 张浩, 陆宁, 钱晓刚, 等. 重金属胁迫对烟草生理特性及其生物量的影响[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(11):25-29. ZHANG H, LU N, QIAN X G, et al. The effects of heavy metal stress on the physiological characteristics and biomass of tobacco[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, 41(11):25-29.
- [38] 李朝阳, 夏志林, 苟剑渝, 等. 钼对烤烟不同品种叶绿素荧光、抗氧化及氮代谢酶活性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(2):321-326. LI C Y, XIA Z L, GOU J Y, et al. The effects of molybdenum on chlorophyll fluorescence, antioxidant and nitrogen metabolism enzyme activity in different tobacco varieties[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, 44(2):321-326.
- [39] 崔宏莉, 解静芳, 杨彪, 等. 污灌与镉胁迫对菠菜几种抗氧化酶活性的影响[J]. 生态毒理学报, 2010, 5(2):274-279. CUI H L, XIE J F, YANG B, et al. The effects of sewage irrigation and cadmium stress on the activity of several antioxidant enzymes in spinach[J]. *Journal of Ecotoxicology*, 2010, 5(2):274-279.
- [40] 郑世燕. 矿质营养 Mo 对烟草抗青枯病的影响及生理生化机理[D]. 重庆: 西南大学, 2014:35-45. ZHENG S Y. The effect of mineral nutrient Mo on tobacco resistance to bacterial wilt and its physiological and biochemical mechanisms[D]. Chongqing: Southwest University, 2014:35-45.
- [41] CHMIELOWSK-BAK J, DECKERT J. A common response to command danger? Comparison of animal and plant signaling pathways involved in cadmium sensing[J]. *Journal of Cell Communication & Signaling*, 2012, 6(4):191-204.
- [42] AWARD M, MOUSTAFA-FARAG M, LIU Z, et al. Combined effect of biochar and salicylic acid in alleviating heavy metal stress, antioxidant enhancement, and Chinese mustard growth in a contaminated soil [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(4):4194-4120.
- [43] 陈锦平, 黄太庆, 邢颖, 等. 外源植物激素对小白菜硒、镉富集及生理特性的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(5):1083-1089. CHEN J P, HUANG T Q, XING Y, et al. The effect of exogenous plant hormones on selenium and cadmium enrichment and physiological characteristics of Chinese cabbage[J]. *Journal of Ecology*, 2023, 42(5):1083-1089.
- [44] 孙学成, 胡承孝. 高等植物含钼酶与钼营养[J]. 植物生理学通讯, 2005, 41(3):395-400. SUN X C, HU C X. Molybdenum containing enzymes and molybdenum nutrition in higher plants[J]. *Plant Physiology Communication*, 2005, 41(3):395-400.
- [45] 武丽, 张西仲, 唐兴贵, 等. 钼胁迫对烟草含钼酶和碳氮代谢关键酶的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(12):2385-2393. WU L, ZHANG X Z, TANG X G, et al. The effect of molybdenum stress on molybdenum containing enzymes and key enzymes in carbon and nitrogen metabolism in tobacco[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2015, 29(12):2385-2393.
- [46] 秦世玉, 孙学成, 胡承孝, 等. 钼肥对甘蓝型油菜薹期碳氮代谢的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(4):227-232. QIN S Y, SUN X C, HU X C, et al. The effect of molybdenum fertilizer on carbon and nitrogen metabolism during the flowering stage of *Brassica napus*[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(4):227-232.

(责任编辑:叶飞)