

硼钼对烟草苗期叶片光合性能和抗氧化系统的影响

杨建¹, 王金合¹, 鄢敏¹, 刘勇¹, 陈佛源¹, 李钊², 吴凯¹, 卢军¹, 景延秋², 肖文洋^{1*}

¹四川省烟草公司宜宾市公司, 四川 宜宾

²河南农业大学烟草学院, 河南 郑州

收稿日期: 2023年5月26日; 录用日期: 2023年6月23日; 发布日期: 2023年6月30日

摘要

目的: 为研究硼钼元素对烤烟幼苗期光合系统和抗氧化系统的影响。方法: 以云烟87为材料进行室内水培试验, 设置施硼 + 钼、施钼、施硼和缺硼 + 钼四个处理。结果: 结果表明, 在30 d时, 单施硼、单施钼和缺硼 + 钼处理的叶绿素含量降低, 净光合速率降低, 蒸腾速率、气孔导度和胞间CO₂含量升高; 三个处理MDA含量均高于施硼 + 钼处理, POD、CAT、APX活性先急剧升高后降低, CAT活性先急剧升高后稳定增长。结论: 由此可知, 硼钼会影响烤烟苗期光合色素的合成和降低光合效率, 施硼和钼可以提高烤烟苗期光合色素含量和净光合速率, 提高烟株光合作用效率; 缺硼或缺钼会使烤烟苗期叶片膜脂过氧化程度加剧, 导致叶片发育异常。

关键词

硼, 钼, 光合特性, 抗氧化系统

Effects of Boron and Molybdenum on Photosynthetic Performance and Antioxidant System of Tobacco Leaves at Seedling Stage

Jian Yang¹, Jinhe Wang¹, Min Yan¹, Yong Liu¹, Foyuan Chen¹, Zhao Li², Kai Wu¹, Jun Lu¹, Yanqiu Jing², Wenyang Xiao^{1*}

¹Sichuan Tobacco Company Yibin City Company, Yibin Sichuan

²College of Tobacco, Henan Agricultural University, Zhengzhou Henan

*通讯作者。

文章引用: 杨建, 王金合, 鄢敏, 刘勇, 陈佛源, 李钊, 吴凯, 卢军, 景延秋, 肖文洋. 硼钼对烟草苗期叶片光合性能和抗氧化系统的影响[J]. 农业科学, 2023, 13(6): 611-618. DOI: 10.12677/hjas.2023.136083

Abstract

Objective: To study the effects of boron and molybdenum on photosynthetic and antioxidant systems of roasted tobacco seedlings at the seedling stage. **Methods:** An indoor hydroponic experiment was conducted with Yunnan tobacco 87 as the material, and four treatments were set up: boron + molybdenum, molybdenum, boron application and boron + molybdenum deficiency. **Results:** The results showed that the chlorophyll content decreased, net photosynthetic rate decreased and transpiration rate, stomatal conductance and intercellular CO₂ content increased in the treatments of boron alone, molybdenum alone and boron deficiency + molybdenum at 30 d. The MDA content was higher in all three treatments than in the treatment of boron + molybdenum, and the POD, CAT and APX activities increased sharply and then decreased, while CAT activity increased sharply and then increased steadily. **Conclusion:** In conclusion, boron and molybdenum can affect the synthesis of photosynthetic pigments and reduce photosynthetic efficiency of flue-cured tobacco seedlings. Boron and molybdenum can increase the photosynthetic pigment content and net photosynthetic rate, and improve the photosynthetic efficiency of the tobacco plant; boron or molybdenum deficiency will intensify the membrane lipid peroxidation of the tobacco seedling leaves and lead to abnormal leaf development.

Keywords

Boron, Molybdenum, Photosynthetic Characteristics, Antioxidant System

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

硼[B]是高等植物生长发育所必需的微量元素之一,主要以H₃BO₃的形式被植物所吸收[1]。硼对植物多种生理作用有影响作用,研究表明,缺硼胁迫会降低甜菜叶片光合色素含量,降低叶片光合作用能力[2];硼可以提高植物的抗逆性,耿明建等[3]的研究结果表明,棉花叶片缺硼后抗氧化酶活性降低,导致膜脂过氧化,膜透性增加。烟草属于中等需硼作物[4],缺硼会导致烟叶叶基部组织坏死,抗病能力下降。崔国明等[5]的研究表明,施硼可以提高烤烟光合强度和蒸腾速率;景延秋等[6]的研究表明,施硼对抗氧化酶活性有影响。但前人的研究都是对烤烟生长后期的影响,对于烤烟苗期的影响鲜有报道。钼可以抑制膜脂过氧化胁迫,它通过调控活性氧的代谢过程来影响作物的抗逆性,从而延缓叶片衰老。此外,有研究表明[7],钼通过提高植株的过氧化物酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶等呼吸酶的活性,进而影响呼吸速率。微量元素能够促进烟草幼苗生长,研究表明,在烟草幼苗中加入适量的硼钼可以增强其抗氧化系统功能,如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(POD)和过氧化物酶(CAT)等的活性增加,从而减少自由基的积累,保护细胞膜和相关生物分子免受氧化损伤。此外,硼钼也可以促进烟草光合作用的进行,提高光能利用效率和光合产物的积累量,从而增加烟草的生长速度和产量。本文通过水培试验,分析硼元素对烤烟苗期光合特性和抗氧化系统的影响。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料、药品和试剂

供试品种为云烟 87；主要药品和试剂有：硝酸铵，磷酸二氢钾，硝酸钾，硝酸钙，氯化钙，硫酸镁，氯化锰，钼酸铵，硫酸锌，硫酸铜，硫酸铁 - 乙二胺四乙酸二钠螯合液，硼酸，均为国药集团化学试剂有限公司产品；抗氧化酶选用索莱宝试剂盒，所有操作均按照试剂盒说明书进行。

2.2. 试验方法

2.2.1. 水培实验

于 2022 年于宜宾市筠连县高坪烟站实验室进行室内水培试验。供试烟草品种为云烟 87，选取生长基本一致的五叶一心壮苗，按株距 30 cm 移栽至水培箱中，并用定植篮和海绵固定烟叶根茎。移栽前使用 75% 乙醇对容器和所有工具进行消毒，使用去离子水将烟苗洗净，并将烟叶放置于去离子水中浸泡 5 d 进行预培养，提高烟苗成活率。光照时间为每天 12 h，暗处理 12 h。每隔三天更换一次营养液，实验持续时间为 30 天，实验共设置 4 个处理，CK 为对照处理，T1 为施用钼酸铵，T2 为施用硼酸，T3 为缺硼钼处理，每个处理设置 3 个重复。

2.2.2. 营养液配置

营养液配置参考 Hoagland 配方，培养液母液配置为：硝酸铵 80.04 g/L，磷酸二氢钾 156.01 g/L，硝酸钾 202.22 g/L，硝酸钙 118.07 g/L，氯化钙 36.75 g/L，硫酸镁 123.25 g/L，氯化锰 1.781 g/L，硫酸锌 2.3005 g/L，硫酸铜 0.749 g/L，硫酸铁 - 乙二胺四乙酸二钠螯合液 5.57 g/L，试验对照硼酸母液浓度为 2.86 g/L，钼酸铵 1.93 g/L，所有母液稀释 1000 倍使用，所有试剂为分析纯，所有操作使用去离子水。

2.2.3. 取样与检测

将加入营养液的时间设为 0 d，分别在 5 d、10 d、15 d、20 d、25 d、30 d 时进行取样。取样烟叶快速放入液氮中速冻，于 -80℃ 超低温冰箱中保存，用于烟苗叶片抗氧化酶活性的检测。使用光合测定仪在晴天 9:00~11:00 时段烟叶光合特性指标。

3. 结果与分析

3.1. 硼钼对烤烟苗期光合性能的影响

叶绿素是绿色植物进行光合作用的关键驱动因素[8]，含量的多少反映了烟株捕获光能的多少。由表 1 可知，所有处理初期烟叶叶绿素含量无显著差异，在 10~15 d 时，CK 处理较施钼、施硼和缺硼 + 钼处理叶绿素含量显著上升，在 30 d 时，CK 较施钼、施硼和缺硼 + 钼叶绿素含量分别提高 26.74%、27.80% 和 37.27%。

Table 1. Effects of boron and molybdenum on photosynthetic parameters of flue-cured tobacco seedlings

表 1. 硼钼对烤烟幼苗叶片叶片光合参数的影响

指标	处理	时间(d)					
		5	10	15	20	25	30
净光合速率 Pn μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	CK	3.467 ± 0.432a	3.773 ± 0.200a	4.410 ± 0.352a	6.697 ± 0.189a	7.250 ± 0.262a	8.947 ± 0.435a
	T1	3.263 ± 0.525a	3.620 ± 0.361a	3.87 ± 0.451ab	4.267 ± 0.438b	4.734 ± 0.075b	4.620 ± 0.341b
	T2	3.207 ± 0.165a	3.347 ± 0.188ab	3.503 ± 0.055bc	4.077 ± 0.261b	4.453 ± 0.215b	4.890 ± 0.520bc
	T3	2.81 ± 0.137a	2.977 ± 0.380b	3.097 ± 0.274c	3.637 ± 0.732b	3.903 ± 0.136c	4.220 ± 0.050c

Continued

蒸腾速率 Tr $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	CK	1.353 ± 0.493a	1.340 ± 0.036a	1.343 ± 0.042b	1.423 ± 0.015b	1.423 ± 0.006b	1.437 ± 0.025b
	T1	1.433 ± 0.147a	1.367 ± 0.057a	1.433 ± 0.060ab	1.543 ± 0.070a	1.437 ± 0.012b	1.447 ± 0.021b
	T2	1.263 ± 0.211a	1.327 ± 0.015a	1.367 ± 0.066b	1.567 ± 0.042a	1.547 ± 0.021a	1.453 ± 0.153b
	T3	1.353 ± 0.252a	1.403 ± 0.040a	1.477 ± 0.025a	1.5967 ± 0.074a	1.553 ± 0.153a	1.503 ± 0.029a
气孔导度 Gs $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	CK	0.307 ± 0.008a	0.317 ± 0.007a	0.324 ± 0.009b	0.380 ± 0.014c	0.320 ± 0.023c	0.312 ± 0.007a
	T1	0.309 ± 0.042a	0.315 ± 0.003a	0.334 ± 0.001b	0.393 ± 0.023bc	0.399 ± 0.046ab	0.342 ± 0.009b
	T2	0.308 ± 0.060a	0.321 ± 0.011a	0.330 ± 0.009b	0.428 ± 0.030b	0.359 ± 0.038bc	0.3137 ± 0.009a
	T3	0.330 ± 0.012a	0.326 ± 0.002a	0.348 ± 0.007a	0.472 ± 0.015a	0.434 ± 0.005a	0.351 ± 0.025a
胞间 CO ₂ 浓度 Ci $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	CK	238.567 ± 11.015a	230.900 ± 5.411a	221.967 ± 6.240a	217.567 ± 6.311b	223.300 ± 6.151b	229.733 ± 2.875b
	T1	232.433 ± 16.892a	222.567 ± 9.329a	229.467 ± 5.065a	234.233 ± 15.168ab	240.733 ± 4.022a	237.033 ± 7.240ab
	T2	230.600 ± 12.040a	226.333 ± 29.285a	230.333 ± 8.353a	228.167 ± 13.773ab	236.867 ± 4.384a	234.200 ± 6.322ab
	T3	264.567 ± 32.654a	238.533 ± 8.458a	232.267 ± 5.798a	245.567 ± 5.608a	244.767 ± 3.014a	242.467 ± 4.499a
总叶绿素 Chl $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	CK	0.988 ± 0.013a	1.222 ± 0.009a	1.492 ± 0.026a	1.917 ± 0.017a	2.300 ± 0.023a	2.831 ± 0.024a
	T1	0.939 ± 0.040a	1.184 ± 0.028a	1.402 ± 0.242b	1.729 ± 0.027b	1.976 ± 0.046b	2.074 ± 0.011b
	T2	0.986 ± 0.015a	1.025 ± 0.019b	1.410 ± 0.010b	1.663 ± 0.041c	1.845 ± 0.018c	2.044 ± 0.024b
	T3	0.939 ± 0.022a	0.990 ± 0.043b	1.169 ± 0.019c	1.538 ± 0.017d	1.706 ± 0.015d	1.776 ± 0.046c

注：同行不同小写字母表示不同处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著，下同。

净光合速率是植物光合作用能力强弱的直观体现指标，其值的大小直接决定植物光合能力的强弱[9]。由表 1 可知，在处理前期时，处理烟叶与正常施肥的对照组之间并无显著差异；但随着生育期的推后，从 15 d 开始，正常施肥的烟叶净光合速率持续增加，而三个处理的烟叶的净光合速率虽然有所增加，但增加的幅度很小，尤其是缺硼 + 钼的烟叶，增加的幅度最小；与 CK 处理相比，施钼、施硼和缺硼 + 钼处理烟叶的气孔导度和蒸腾速率均有所上升，于 15~20 d 差异显著；胞间 CO₂ 浓度整体呈下降趋势，但施钼、施硼和缺硼 + 钼处理相较于 CK 处理，胞间 CO₂ 浓度含量较高。

由结果可知，试验初期缺少硼、钼元素对烟株并无明显影响，可能是由于烟株本身还有硼、钼的残留，缺少硼、钼元素短时间内也不会影响烟叶的生长，但是难以满足烟株后期生长的需要。

3.2. 硼钼对烤烟苗期抗氧化系统的影响

3.2.1. 硼钼对烤烟苗期丙二醛(MDA)含量的影响

丙二醛(MDA)是膜脂过氧化反应的最终产物，其含量的高低反映了质膜被破坏的程度[10]。由图 1 可知，施钼、施硼和缺硼 + 钼处理 MDA 含量均显著高于施硼 + 钼处理，说明其膜脂过氧化程度较缺钼 + 硼处理而言较严重。

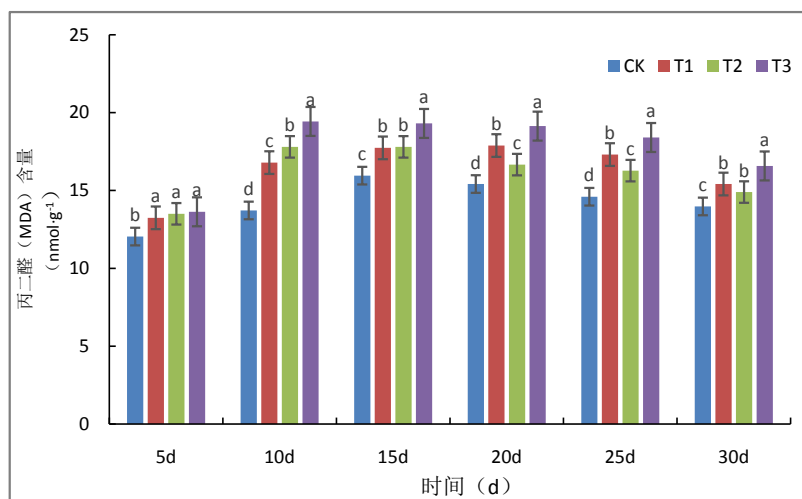


Figure 1. Effects of boron and molybdenum on malondialdehyde (MDA) content in flue-cured tobacco seedlings

图 1. 硼钼对烤烟幼苗丙二醛(MDA)含量的影响

3.2.2. 硼钼对烤烟苗期抗氧化酶活性的影响

植物在正常情况下的酶促反应、叶绿体和线粒体的电子传递过程和一些低分子有机物的自动氧化反应，都会产生 O_2^- 和 H_2O_2 等活性氧物质，但它们很快能被植物体内的 SOD、POD、CAT、APX 等保护酶所清除。而在逆境胁迫下，这种活性氧的产生与清除之间的平衡会被破坏，植物的清除能力下降，活性氧量增加。

本试验结果表明：前期施钼、施硼和缺硼 + 钼处理 SOD 急剧增加，由图 2 可知，于 10 d 达到最大值后开始下降，至 30 d 时值小于施硼 + 钼，CAT 与其余三种酶不同，由图 3 可知，三种处理的 CAT 值 10 d 内急剧增长，之后稳定增长，可能是由于胁迫条件下，前期产生了大量的 H_2O_2 和过氧自由基，由于 CAT 与 H_2O_2 亲和性较强，激发了 CAT 的活性，导致其产生这样的变化。由图 4 和图 5 可知，POD 和 APX 活性的趋势与 SOD 基本一致。综上所述，施硼 + 钼处理四种抗氧化酶活性都稳定增长。

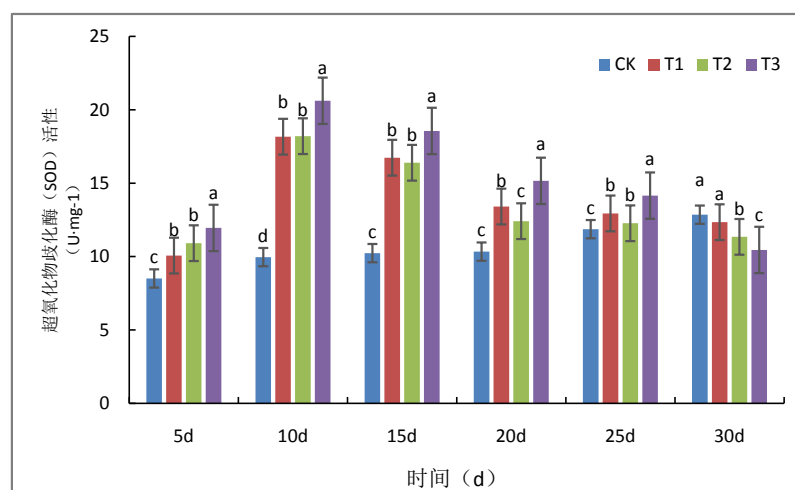


Figure 2. Effects of boron and molybdenum on superoxide dismutase (SOD) content in flue-cured tobacco seedlings

图 2. 硼钼对烤烟幼苗超氧化物歧化酶(SOD)含量的影响

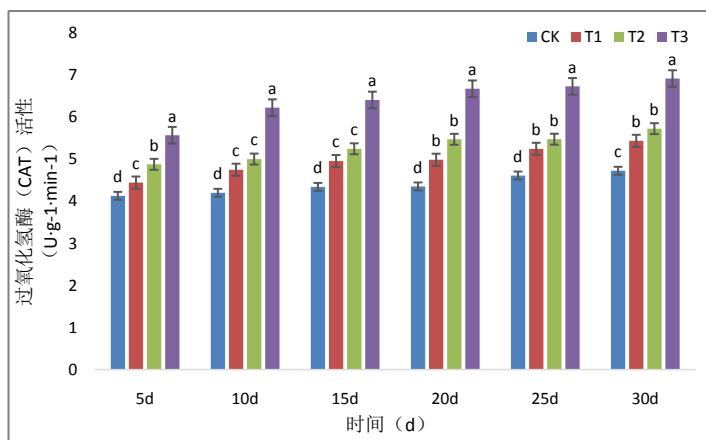


Figure 3. Effects of boron and molybdenum on catalase (CAT) content in flue-cured tobacco seedlings

图 3. 硼钼对烤烟幼苗过氧化氢酶(CAT)含量的影响

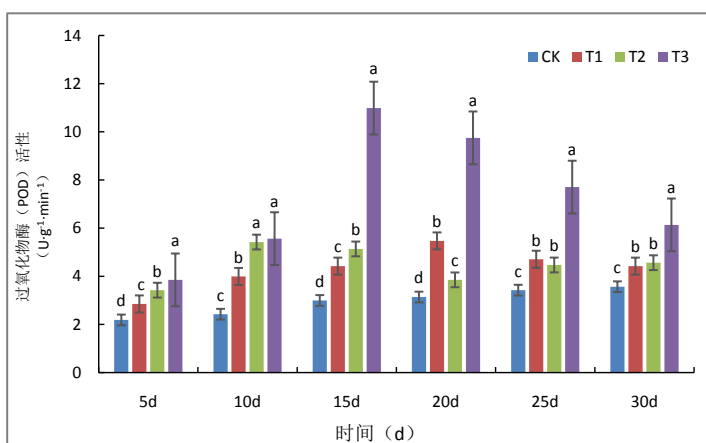


Figure 4. Effects of boron and molybdenum on peroxidase (POD) content in flue-cured tobacco seedlings

图 4. 硼钼对烤烟幼苗过氧化物酶(POD)含量的影响

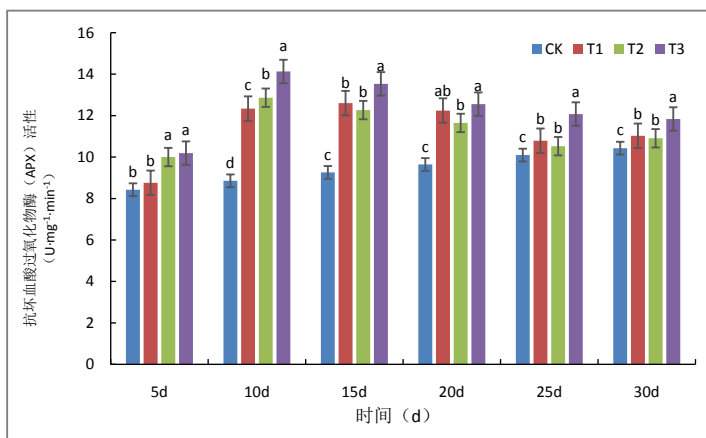


Figure 5. Effects of boron and molybdenum on ascorbic acid peroxidase (APX) content in flue-cured tobacco seedlings

图 5. 硼钼对烤烟幼苗抗坏血酸过氧化物酶(APX)含量的影响

试验前期, 施硼处理四种抗氧化酶活性都大于施钼处理, 于 10~15 d 后, 施钼处理的抗氧化酶活性大于施硼处理, 可能由于在烟株正常的生长中, 钼元素合成含钼酶直接对烟株的各项生理活动产生影响, 当施硼时产生的影响会在短时间内体现, 而硼元素主要通过调节离子、代谢物和激素的运输, 间接影响烟株的生理反应, 因此对烟株的影响需要相对较长的时间才能体现出来。

4. 讨论

光合色素是植株进行光合作用的功能色素, 直接影响植物光能吸收、传递及合成同化力(ATP、NADPH)的量[11]。Han 等[12]的研究表明, 缺硼直接作用影响柑橘叶片叶绿素功能, 影响植物光合效率; 而卢晓佩等[13]的研究表明, 硼对叶片中叶绿素含量影响不大, 但可以降低柑橘光合速率。钼作为植物必需的微量元素之一, 对植物叶绿素含量、光合作用及可溶性糖影响也有不少报道。胡承孝等[14]的研究了黄棕壤钼对冬小麦叶绿素、可溶性糖的影响, 结果表明, 缺钼和低钼水平使小麦叶片叶绿素及植株可溶性糖含量下降, 并可能导致植株抗寒力减弱。喻敏等[15] [16]进一步研究发现, 缺钼影响 δ -氨基酮戊酸(ALA)向尿卟啉原Ⅲ(UroⅢ)的转化, 导致叶绿素合成受阻, 同时缺钼时, 细胞叶绿体数目减少、体积变小、叶绿体基粒数目少、堆叠层数少且发育不良。本试验结果表明, 缺硼或缺钼会降低烟株叶绿素含量, 降低烟株光合速率, 与 Han 等的试验结果相同。

活性氧类物质(ROS)包括处于自由基状态的氧(如超氧阴离子 O_2^- 和羟自由基-OH)以及不属于自由基的过氧化氢等。Luna 等[17]的研究表明, 正常燕麦幼苗体内 ROS 处于清除和产生之间保持动态平衡的状态, 但当受到逆境胁迫的条件下时会诱导 ROS 积累, 打破代谢的平衡状态, 降低燕麦幼苗的抗逆能力; Mehta 等[18]的研究表明, 当活性氧代谢的平衡状态被打破, 植物会产生膜脂过氧化作用, 会攻击自身蛋白质等生物大分子。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的最终产物, 某种程度上其含量可以反映植物膜脂过氧化的程度和植株被破坏的程度[19]。大量研究表明[20] [21] [22], 钼能提高过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶及抗坏血酸酶等防御酶系的活性, 增加赤霉素、吲哚乙酸、叶片多胺和抗坏血酸的含量, 降低多酚氧化酶的活性, 减少脱落酸、丙二醛和脯氨酸的含量, 降低质膜透性和自动氧化速率。本试验结果表明, 缺硼会使 MDA 含量升高, 破坏膜脂过氧化的平衡。缺硼时, POD、SOD 和 APX 三种酶活性会先升高后降低, 可能是因为烟株对逆境环境的响应; CAT 活性会持续上升。

本试验结果表明, 缺硼、缺钼条件会影响烤烟苗期光合色素含量降低, 光合速率下降, 破坏烟株膜脂过氧化的平衡, 导致抗氧化系统紊乱。因此, 合理施用硼肥和钼肥对烤烟正常生长有着重要的意义。

5. 结论

综合试验和研究表明, 硼钼的适量配施可以促进烟草幼苗中抗氧化酶活性的提高, 减少自由基的积累, 保护细胞膜和相关生物分子免受氧化损伤。与此同时, 硼钼的添加还能够增强烟草光合作用的进行, 从而提高光能利用效率和光合产物的积累量, 促进烟草幼苗的生长和发育。在烟草种植过程中, 针对烟区植烟土壤硼钼元素的缺失, 可以对其施用适量的硼钼, 能有效地改善烟草幼苗的抗性能、增加其产量。

参考文献

- [1] 杨万霞, 陈松峰. 植物中硼在微观水平上的作用机制及研究展望[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(23): 34-40.
- [2] 郝学明, 王响玲, 吴贞贞, 宋柏权, 周建朝. 不同缺硼处理对甜菜苗期叶片生长及光合性能的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(18): 27-32.
- [3] 耿明建, 朱建华, 吴礼树, 曹享云, 刘武定. 硼对不同硼效率棉花品种苗期叶片膜脂过氧化和多胺含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 337-341.
- [4] 唐先干, 韩延, 何宽信, 齐飞, 李祖章, 杨启冰. 江西紫色土有效硼含量及对烤烟硼元素分布特征的影响[J]. 中

- 国土壤与肥料, 2013(1): 64-67.
- [5] 崔国明, 黄必志, 柴家荣, 黄继梅, 孙曙华, 张国楠, 李永平. 硼对烤烟生理生化及产质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2000, 21(3): 16-20.
- [6] 景延秋, 张豹林, 袁秀秀, 徐敏, 张月华, 鲁平, 刘剑君. 喷施硼肥和磷肥对烟株酶活性的影响[J]. 湖南农业科学, 2015(1): 70-73.
- [7] 刘鹏, 杨玉爱. 钼、硼浸种对大豆幼苗生理特性的影响[J]. 浙江大学学报(理学版), 2003, 30(1): 83-88.
- [8] 马春艳, 王艺琳, 翟丽婷, 郭辅臣, 李长春, 牛海鹏. 冬小麦不同叶位叶片的叶绿素含量高光谱估算模型[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 217-225+358.
- [9] 杜洋文, 邓先珍, 程军勇. 不同尿素施肥量对薄壳山核桃嫁接苗光合作用日变化的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(1): 27-35.
- [10] 李金奥, 张思唯, 刘博远, 钟秋, 秦艳青, 邹宇航, 赵铭钦. 种植密度对雪茄烟膜脂过氧化特性及烟叶质量的影响[J]. 作物杂志, 2021(3): 178-184.
- [11] 武丽. 烤烟钼素营养作用机理及生产应用[D]: [博士学位论文]. 合肥: 安徽农业大学, 2014: 128.
- [12] Han, S., Chen, L. and Jiang, H. (2007) Boron Deficiency Decreases Growth and Photosynthesis, and Increases Starch and Hexoses in Leaves of Citrus Seedlings. *Journal of Plant Physiology*, **165**, 1331-1341. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2007.11.002>
- [13] 卢晓佩, 姜存仓, 董肖昌, 吴秀文, 闫磊. 硼胁迫下不同柑橘砧木叶片物质组成及结构的 FTIR 表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(5): 1380-1385.
- [14] 胡承孝, 王运华, 魏文学, 等. 黄棕壤有效钼水平对冬小麦产量结构及叶绿素、可溶性糖的影响[J]. 土壤肥料, 1998(1): 19-22.
- [15] 喻敏, 胡承孝, 王运华. 低温条件下钼对冬小麦叶绿素合成前体的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(4): 702-708.
- [16] 喻敏, 胡承孝, 王运华. 钼对冬小麦叶绿素含量变化的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(2): 113-116.
- [17] Luna, C.M., González, C.A. and Trippi, V.S. (1994) Oxidative Damage Caused by an Excess of Copper in Oat Leaves. *Plant and Cell Physiology*, **35**, 11-15.
- [18] Mehta, R.A., Fawcett, T.W., Porath, D. and Mattoo, A.K. (1992) Oxidative Stress Causes Rapid Membrane Translocation and *in Vivo* Degradation of Ribulose-1,5-bisphosphate Carboxylase/Oxygenase. *The Journal of Biological Chemistry*, **267**, 2810-2816. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)45951-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)45951-0)
- [19] 和秋兰, 张航, 王正维, 万丽嫻, 海梅荣. 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.
- [20] 刘碧容, 甄畅迪, 萧洪东, 等. 硼对草坪草超氧化物歧化酶活性、超氧阴离子产生速率和丙二醛含量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2008, 27(3): 378-381.
- [21] 孙学成, 谭启玲, 胡承孝, 等. 低温胁迫下钼对冬小麦抗氧化酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(5): 952-959.
- [22] 施木田, 陈如凯. 锌钼营养对苦瓜产量、叶片多胺、激素含量与活性氧代谢的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(3): 247-251.