

硼对藜麦抗氧化酶活性的影响

马琦琦^{1,2}, 李丽君^{2,3*}, 王斌^{2,3}, 刘平^{2,3}, 霍晓兰^{2,3}

(1. 山西大学生命科学学院, 山西太原 030006; 2. 山西农业大学资源环境学院(龙城校区), 山西太原 030031; 3. 山西省土壤环境与养分资源重点实验室, 山西太原 030031)

摘要 为研究硼(B)对藜麦生理特性的影响,进行喷施硼肥盆栽试验。选用3个藜麦品种(晋藜1号、晋藜2号、晋藜3号),在拔节期进行叶面喷施0%(CK)、0.1%(B₁)、0.2%(B₂)、0.3%(B₃)的硼酸溶液50 mL 2次。结果表明,相同生长期,随着施硼量的增加,藜麦叶片SOD活性逐渐下降,POD活性先升高后降低,CAT活性逐渐升高。相同浓度条件下,随生长期延长,3种酶活性均表现为先升高后降低。在灌浆期,3个藜麦品种SOD活性最高;硼浓度为0.3%时,与对照相比,3个藜麦品种叶片SOD活性分别降低21.24%、15.26%、10.33%。整体来看,3个藜麦品种叶片POD活性在抽穗期最高;硼浓度为0.3%时,与对照相比,3个藜麦品种叶片POD活性分别提高-3.99%、-5.21%、5.28%。3个藜麦品种叶片CAT活性在灌浆期最高;硼浓度为0.3%时,与对照相比,3个藜麦品种叶片CAT活性分别提高25.31%、26.19%、29.48%。说明施硼可以调节藜麦抗氧化酶水平,提高藜麦的抗逆性,缓解缺硼对藜麦生长造成的不利影响。总体来看,当硼浓度为0.3%时,3个藜麦品种生理特性良好。实际生产中,应选用0.3%的硼较合适。

关键词 藜麦;硼;超氧化物歧化酶;过氧化物酶活性;过氧化氢酶活性

中图分类号 S143.7⁺1 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)24-0139-05

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.030



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Boron on the Antioxidant Enzymes Activity of Quinoa

MA Qi-qi^{1,2}, LI Li-jun^{2,3}, WANG Bin^{2,3} et al (1. College of Life Science, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006; 2. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031; 3. Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030031)

Abstract To evaluate the impact of boron (B) on the antioxidant enzymes (SOD, POD and CAT) in quinoa leaves, a pot experiment was conducted. In this experiment, three varieties of quinoa (Jinli No.1, Jinli No.2 and Jinli No.3) were selected, and quinoa leaves surfaces were treated with a spray containing 0% (CK), 0.1% (B₁), 0.2% (B₂), and 0.3% (B₃) of B for each variety quinoa for 2 times at elongation period. The results indicated that the stress resistance of quinoa improved with different boron. The variation of SOD, POD and CAT activities were observed in response to different boron levels. At the same growing period, the SOD activity in the quinoa leaves decreased, the POD activity first increased and then decreased, and the CAT activity increased with the increasing boron concentrations. At the same boron concentration, with the extension of the growing period, these antioxidant enzymes first increased and then decreased. The SOD activities in the three varieties of quinoa leaves were the highest in the grouting period, and they were 21.24%, 15.26% and 10.33% lower at 0.3% B than that of CK, respectively. On the whole, the POD activities in the three varieties of quinoa leaves were the highest in the heading period, and they increased by -3.99%, -5.21% and 5.28% at 0.3% B than that of CK, respectively. The CAT activity in the three varieties quinoa leaves was the highest in the grouting period, and the CAT activity at 0.3% B were 25.31%, 26.19% and 29.48% higher than that of CK, respectively. At 0.3% B treatment, the SOD and POD activity in the three types of quinoa leaves were lower than those of CK, while CAT activity was higher. Boron was helpful to regulate the antioxidant enzyme level, remove reactive oxygen species and alleviate the adverse effects of boron deficiency on the growth of quinoa. The physiological characteristics in the three types of quinoa leaves at 0.3% B worked best. Above all, in actual production, 0.3% B was the best choice.

Key words *Chenopodium quinoa* Willd; Boron; SOD; POD; CAT

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd)种植源自南美洲,也被称作南美藜^[1],是一种苋科藜属植物^[2]。藜麦亦被称为假谷类作物^[3],其中所含营养物质十分丰富。藜麦中蛋白质含量高,维生素种类丰富,其中的膳食纤维和矿物质(钙、锌、铁)含量也较高^[4]。从藜麦种植初始,人们就认识到藜麦优良的营养特性,目前许多国家都意识到其重要的营养价值。联合国粮农组织极其认可藜麦的营养价值,认为藜麦可以满足人体需要的多种营养物质^[5],并于2013年定为国际藜麦年。藜麦中多种物质具有抗氧化作用,增强人体免疫力,预防一些疾病的发生^[6]。藜麦具有耐瘠、耐旱、耐寒以及适应性强等优良特性^[7],可以适应多种气候,因此得到广泛种植。近年来,我国多地(甘肃、山西、青海、吉林、西藏、河南等)陆续

广泛推广和种植藜麦^[8],2008年山西省静乐县开始大规模种植藜麦。

硼是植物生长不可缺少的微量元素,能有效促进植物代谢,提高植物抗逆性,从而促进植物的生长发育。农作物生长过程中,低硼胁迫可使根伸长受阻、抑制根系对养分的吸收、影响细胞壁结构的完整性、阻碍根瘤的形成^[9],农作物正常的生长发育受到影响,导致农作物产量受损、品质降低,造成农户经济利益损失^[10]。

在没有外界不利因素存在时,植物细胞正常代谢过程中会产生活性氧(ROS),它是一类具有很强的氧化能力的含氧物质。此时,植物体中ROS的产生速度和清除速度处于动态平衡状态,ROS不会在植物体中过量积累,不会因其浓度变化对植物体造成氧化损伤。当植物体受到不良环境因素胁迫时,ROS产生速度大于被清除速度,这种动态平衡被打破,其体内ROS会过量积累,对植物细胞结构功能造成氧化损伤^[11]。在这种情况下,过量累积的ROS必须及时被清除,才能保证植物体进行正常的生命活动。生物体在长期进化

基金项目 山西省科技成果转化引导专项“旱地藜麦减肥增效集成技术示范推广”(201904D131054);山西省专利推广实施资助专项“晋西北高寒山区藜麦专用肥示范与推广”(2019043)

作者简介 马琦琦(1996-),女,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向:植物营养。*通信作者,研究员,博士,从事养分资源高效利用研究。

收稿日期 2022-11-08

过程中,体内形成了活性氧防御系统对抗外界不利因素的胁迫^[12]。防御系统包括抗氧化酶与抗氧化剂,通过它们在植物体内的相互协作,清除植物自身正常代谢与在逆境条件下产生的活性氧。植物体内抗氧化酶主要有超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)^[13-14]。SOD第一个参与ROS的清除,可将 $O_2 \cdot$ 歧化为 H_2O_2 和 O_2 ,降低超氧化物对植物的伤害;POD以 H_2O_2 为底物进行植物体内的氧化还原反应,CAT将 H_2O_2 分解为 H_2O 与 O_2 ,二者作用机理不同,均发挥清除 H_2O_2 的作用,使植物体免受氧化损伤^[15]。缺硼会导致植物体中活性氧的产生^[16],对植物生长产生不利影响。SOD、POD、CAT均为植物体内重要的抗氧化酶,可以清除活性氧,保护植物免遭损伤。

由于藜麦的营养价值日益得到关注,不同地区与国家种植藜麦的面积逐渐增多。近年来,山西省藜麦种植面积不断扩大。藜麦作为一种新兴营养功能食品,未来将拥有更广阔的市场,利用硼肥提高藜麦的抗氧化作用至关重要。目前硼对其他农作物的影响研究较多,而对藜麦抗氧化酶方面的影响研究未见报道。笔者研究喷施硼肥对3个品种藜麦生理特性的影响,明确施硼对藜麦抗氧化作用的一般规律,为提高山西藜麦产量与改善品质提供理论依据与技术支持。

1 材料与与方法

1.1 试验材料 盆栽试验在山西农业大学资源环境学院日光温室进行。供试土壤取自山西省静乐县,土壤理化性质:全氮量0.75 g/kg,有效磷4.4 mg/kg,速效钾96 mg/kg,pH 8.57,有效硼0.05 mg/kg,有机质12.3 g/kg。根据土壤元素丰缺指标,试验用土为缺硼土壤^[17]。藜麦于2021年3月10日播种,2021年7月30日收获。

供试作物藜麦种子为晋藜1号、晋藜2号、晋藜3号,由山西省农业科学院生物中心提供。供试肥料为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P_2O_5 16%)、硫酸钾(K_2O 54%)、硼酸(H_3BO_3)。

1.2 试验设计 试验设为CK(不施硼)、 B_1 (0.1%硼酸)、 B_2

(0.2%硼酸)、 B_3 (0.3%硼酸)。晋藜1号、晋藜2号、晋藜3号均为以上处理。共12个处理,每个处理6次重复,72盆。

盆栽试验用塑料盆,上口直径30 cm,底部直径24 cm,盆高30 cm。每盆装风干土18 kg,将氮(0.54 g/kg)、磷(1.06 g/kg)、钾肥(0.26 g/kg)作为基肥一次性施入^[18]。每盆均匀播撒藜麦种子100粒。

试验期间,根据藜麦各生长期的缺水状况确定浇水量,用去离子水浇水。藜麦幼苗长至三叶一心时,挑选长势均匀的幼苗,进行定苗,每盆留15株。待藜麦生长至拔节期,对其叶面喷施0.1%、0.2%、0.3%的硼酸溶液^[19-20],每盆喷施50 mL,7 d后喷施第2次。

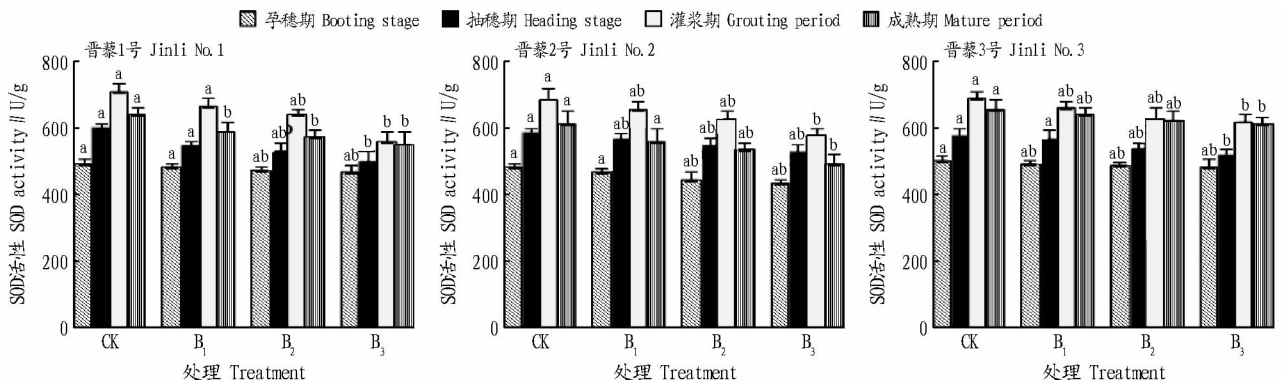
分别在孕穗期(2021年5月27日)、抽穗期(2021年6月17日)、灌浆期(2021年7月7日)、成熟期(2021年7月27日)进行整株藜麦采样。采样后置于 -78 °C冷冻保存,随后进行抗氧化酶(SOD、CAT、POD)活性的测定。

1.3 测定项目与方法 将样品从 -78 °C冰箱中取出,选取叶片部分,加入pH为7的磷酸盐缓冲液,在冰浴条件下研磨、离心,制成10%匀浆液。按照南京建成生物工程研究所试剂盒进行SOD、POD、CAT活性测定。

1.4 数据处理与分析 利用Excel 2018进行图表制作,用SPSS 20.0软件进行单因素方差分析,用LSD法和Duncan法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 硼对藜麦叶片SOD活性的影响 从图1可以看出,硼可诱导3个藜麦品种叶片SOD活性变化。试验范围内,晋藜1号叶片SOD活性从孕穗期的465.00~487.03 U/g,到抽穗期的499.11~600.85 U/g,到灌浆期的556.63~706.78 U/g,再到成熟期的548.65~637.11 U/g。同一生长期内,随着施硼量的增加,藜麦叶片SOD活性呈下降趋势。当硼为0.3%时,各生长期的藜麦叶片SOD活性最低,较CK分别降低4.52%、16.95%、21.24%、13.88%;除孕穗期外,其余生长期SOD活性与CK相比均显著降低。



注:不同小写字母表示同一时期不同处理在0.05水平差异显著。

Note: Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level during the same period.

图1 不同生育期藜麦叶片SOD活性

Fig.1 The activity of SOD in quinoa at different growth stages

对于晋藜2号,硼浓度在0.1%~0.3%时,藜麦叶片SOD活性为从孕穗期的432.48~479.69 U/g,到抽穗期的527.88~

584.44 U/g,到灌浆期的579.53~683.86 U/g,再到成熟期的488.48~607.61 U/g。各生长期内,随着硼浓度的提高,藜麦

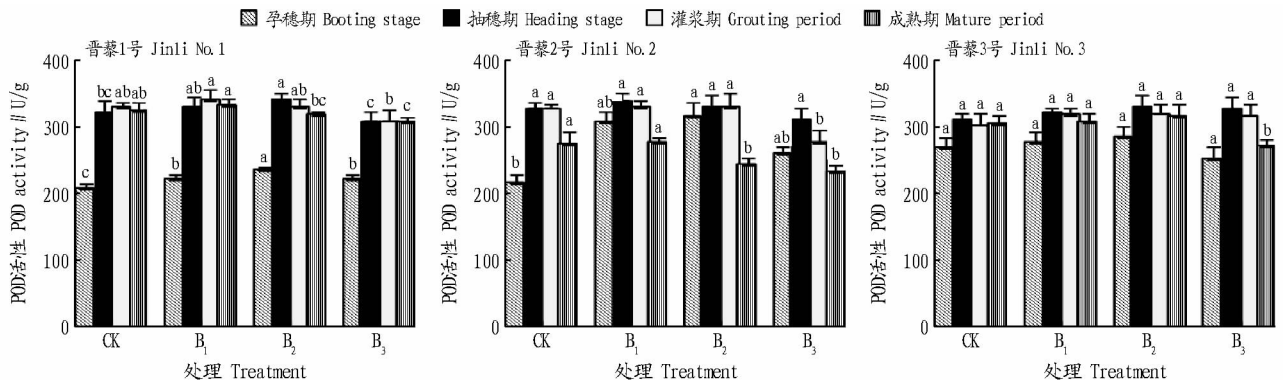
叶片 SOD 逐渐降低。当硼为 0.3% 时,各生长期藜麦叶片 SOD 活性最低,较 CK 分别降低 9.84%、9.67%、15.25%、19.60%;在灌浆期与成熟期,与 CK 相比,藜麦叶片 SOD 活性显著降低。

喷施不同浓度硼条件下,晋藜 3 号叶片 SOD 活性从孕穗期 479.08~498.17 g U/g,到抽穗期 518.65~575.42 U/g,到灌浆期 617.15~688.23 U/g,再到成熟期 607.52~653.01 U/g。同一生长期内,随着硼浓度的增加,藜麦叶片 SOD 活性呈下降趋势。当硼浓度为 0.3% 时,各生长期藜麦叶片 SOD 活性最低,较 CK 分别降低 3.81%、9.86%、10.33%、6.96%;除孕穗期外,与 CK 相比,其余生长期藜麦叶片 SOD 活性显著降低。

以上结果显示,相同生长期内,随着硼浓度的提高,3 个藜麦品种叶片 SOD 活性均表现为降低趋势;当硼为 0.3% 时,

藜麦叶片 SOD 活性最低。在相同硼浓度条件下,随着生长期的延续,SOD 活性表现为先升高后降低趋势,在灌浆期最高;当硼为 0.3% 时,与对照相比,3 个藜麦品种叶片 SOD 活性分别降低 21.24%、15.26%、10.33%。

2.2 硼对藜麦叶片 POD 活性的影响 由图 2 可知,不同硼浓度处理下,晋藜 1 号叶片 POD 活性孕穗期 206.67~234.47 U/g,抽穗期 309.66~342.99 U/g,灌浆期 309.62~340.45 U/g,成熟期 308.56~332.15 U/g。随着施硼量的增加,同一生长期藜麦叶片 POD 均呈先上升后降低趋势。当硼水平为 0.3% 时,与 CK 相比,孕穗期 POD 活性提高 7.09%,抽穗期、灌浆期、成熟期 POD 活性分别降低 3.99%、6.36%、4.63%。当硼浓度为 0.3% 时,与 CK 相比,孕穗期和成熟期的藜麦叶片 POD 活性差异显著。



注:不同小写字母表示同一时期不同处理在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level during the same period.

图 2 不同生育期藜麦叶片 POD 活性

Fig.2 The activity of POD in quinoa at different growth stages

对于晋藜 2 号,喷施不同浓度的硼,藜麦叶片 POD 活性为孕穗期 217.26~316.27 U/g,抽穗期 328.59~339.59 U/g,灌浆期 78.16~328.35 U/g,成熟期 233.48~278.17 U/g。同一生长期内,随着施硼量的增加,藜麦叶片 POD 活性先升高后降低。当硼浓度为 0.3% 时,各生长期(除孕穗期外)藜麦叶片 POD 活性最低,且均低于 CK。当硼水平为 0.3% 时,与 CK 相比,孕穗期 POD 活性提高 19.33%,抽穗期、灌浆期、成熟期 POD 活性分别降低 5.21%、15.29%、14.94%。当硼为 0.3% 时,与 CK 相比,灌浆期、成熟期藜麦叶片 POD 活性显著降低。

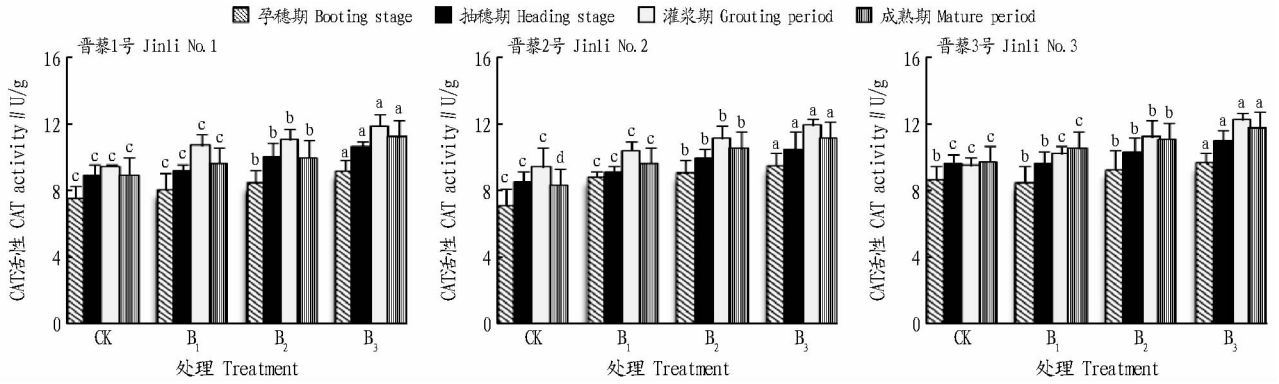
硼浓度在 0.1%~0.3% 时,晋藜 3 号叶片 POD 活性为孕穗期 253.13~284.48 U/g,抽穗期 310.06~330.31 U/g,灌浆期 304.15~320.26 U/g,成熟期 270.26~314.56 U/g。各生长期内,随着硼浓度的增加,藜麦叶片 POD 活性呈先上升后下降趋势。当硼浓度为 0.3% 时,孕穗期、成熟期的藜麦叶片 POD 活性最低,且均低于 CK;与 CK 相比,2 个生长期藜麦叶片 POD 活性降低 5.69% 和 11.43%;抽穗期、灌浆期 POD 活性分别提高 5.28%、4.27%;与 CK 相比,成熟期的藜麦叶片 POD 活性显著降低。

以上结果显示,相同生长期内,随着硼浓度的提高,3 个藜麦品种叶片 POD 活性均表现为先升高后降低趋势。整体来看,当硼浓度为 0.3% 时,藜麦叶片 POD 活性最低。相同硼

浓度时,随着生长期的延长,藜麦叶片 POD 活性表现为先增加后降低趋势,在抽穗期最高;当硼浓度为 0.3% 时,与对照相比 3 个藜麦品种叶片 POD 活性分别提高 -3.99%、-5.21%、5.28%。

2.3 硼对藜麦叶片 CAT 的影响 由图 3 可知,叶片喷施硼可提高 3 个藜麦品种叶片 CAT 活性。试验范围内,晋藜 1 号叶片 CAT 活性为孕穗期 7.54~9.23 U/g,抽穗期 8.97~10.64 U/g,灌浆期 9.48~11.88 U/g,成熟期 8.99~11.24 U/g。同一生长期内,随着硼浓度的增加,藜麦叶片 CAT 活性呈上升趋势,CAT 活性最高时的施硼水平均为 0.3%。当硼浓度为 0.3% 时,各生长期藜麦叶片 CAT 活性较 CK 分别增加 22.51%、18.58%、25.31%、25.07%;与 CK 相比,各生长期 CAT 活性显著提高。

硼浓度为 0.1%~0.3% 时,晋藜 2 号叶片 CAT 活性为孕穗期 7.14~9.56 U/g,抽穗期 8.50~10.52 U/g,灌浆期 9.46~11.93 U/g,成熟期 8.35~11.18 U/g。同一生长期,随着施硼量的增加,藜麦叶片 CAT 活性逐渐上升;硼为 0.3% 时,CAT 活性最高,各生长期藜麦叶片 CAT 活性较 CK 分别增加 33.88%、23.68%、26.19%、33.85%,且各生长期藜麦叶片 CAT 活性显著高于相应生长期 CK。同一硼浓度时,随着生长期的延长,CAT 活性表现为先升高后降低趋势,在灌浆期最高。



注:不同小写字母表示同一时期不同处理在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level during the same period.

图 3 不同生育期藜麦叶片 CAT 活性

Fig.3 The activity of CAT in quinoa at different growth stages

对于晋藜 3 号,不同硼肥处理下,藜麦叶片 CAT 活性为孕穗期 8.71~9.68 U/g,抽穗期 9.61~10.98 U/g,灌浆期 9.50~12.30 U/g,成熟期 9.75~11.78 U/g。同一生长期内,随硼喷施量的增加,藜麦叶片 CAT 活性逐渐上升。硼浓度为 0.3% 时,藜麦叶片 CAT 活性最高;与 CK 相比,各生长期藜麦叶片 CAT 活性较 CK 分别增加 11.22%、14.33%、29.48%、20.82%,且各生长期 CAT 活性显著高于相应生长期 CK 值。相同硼浓度的 CAT 活性,随生长期延长表现为先升高后降低,在灌浆期最高。

随着硼浓度的提高,在相同生长期内,3 个藜麦品种叶片 CAT 活性均表现为上升趋势。在相同硼浓度条件下,随着生长期的延长,CAT 活性表现为先升高后降低趋势,在灌浆期最高。

3 讨论

硼可调节植物体内一些酶活性,对它们产生激活或抑制作用^[21]。植物体内缺硼时,其体内 ROS 产生与清除间的平衡被打破,导致大量 ROS 在细胞间积累,对植物体造成氧化损伤^[22]。适宜补充硼可降低 ROS 含量,抑制膜质过氧化作用,起到保护植物免受氧化损伤的作用^[23]。因此,对生长在缺硼土壤上的植物补充硼至关重要。

随着生育进程的延续,喷施相同硼浓度时,藜麦叶片 SOD、CAT、POD 活性逐渐提高,SOD、CAT 活性在灌浆期达到最大,之后有所下降。说明在不同生长发育阶段,藜麦叶片中 3 种抗氧化酶活性存在差异,灌浆期藜麦叶片的抗氧化酶活性最高,此时的藜麦抗氧化能力较孕穗期、抽穗期、成熟期强。在植物生长周期中,抗氧化酶活性在营养生长阶段比开花期低。不同生育期叶片对相同环境条件下的氧化应激反应不同。随着叶龄的延长,叶片中 ROS 浓度表现为先增加后减少趋势,其抗氧化能力也同样表现为先升高后降低趋势^[11]。这种现象在其他作物中也可以看到^[11,24-25]。

在正常情况时,植物代谢过程中产生活性氧(ROS)速度和清除速度处于一动态平衡状态中,ROS 不会对植物体造成氧化损伤。当植物体受到外界不良环境胁迫时,ROS 产生速度会大于清除速度,对植物造成氧化损伤^[11]。此时,生物体

内的 SOD 可将 $O_2 \cdot$ 歧化为 H_2O_2 和 O_2 ,降低 $O_2 \cdot$ 对细胞的伤害^[26]。对藜麦喷施硼肥后,缺硼对藜麦生长造成的氧化损伤得到缓解,其体内自由基的累积相对减少^[22],SOD 活性降低,且随着喷施硼量的增加而降低。即随着硼浓度的增加,超氧自由基在藜麦体内的累积逐渐减少,SOD 活性也随之减低,缓解了缺硼对藜麦生长的抑制作用。这一现象可在利用 H_2S 缓解硼毒害下星星草试验中观察到^[27]。POD、CAT 在植物体内的主要作用是将 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2 ,降低 H_2O_2 浓度,但二者的作用机理不同^[15]。当硼浓度为 0.1%、0.2% 时,由于缺硼导致高浓度 H_2O_2 累积在藜麦叶片中还没有及时被清除,POD 活性继续保持上升趋势,将过量的 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2 ,降低 H_2O_2 对藜麦的氧化损伤;硼浓度为 0.3% 时,由于高浓度硼的喷施,缓解了缺硼对藜麦氧化损伤程度,POD 活性开始降低。这与利用 H_2S 缓解硼毒害下星星草的 POD 活性变化^[27]、硒对硼胁迫油菜幼苗活性氧伤害 POD 活性影响^[22] 以及在严重缺硼土壤上,施用硼对油菜苗期叶片 POD 活性影响^[28] 现象类似。在试验范围内,CAT 活性呈升高趋势,说明 CAT 清除 H_2O_2 能力不断提高,缓解了缺硼对藜麦叶片的氧化损伤。这一现象在油菜、大豆中也可观察到^[24,28]。

以上结果可以看出,喷施硼肥起到了调节藜麦叶片抗氧化酶活性的作用。随着硼肥浓度的提高,抗氧化酶活性表现出不同程度的变化,SOD 活性下降较早,POD 活性下降较迟,而 CAT 活性保持升高趋势^[29]。俞莉莉等^[16] 研究表明,在不同硼浓度下,红掌叶片中的 SOD 和 POD 活性变化趋势一致。何子平等^[28] 在严重缺硼土壤上施用硼肥显著降低油菜苗期叶片 POD 活性,提高 CAT 活性。区焯林等^[30] 研究发现,钼肥和硼肥配施显著提高冬季草坪草 CAT 活性。徐建明等^[31] 研究表明,小麦幼苗用 0.6 mg/kg 的硼浓度处理时长势最佳,根系活力加强,SOD 和 POD 的活性提高。这与该研究结果不同,可能是由于不同植物,不同生长阶段,土壤缺硼程度不同,喷施硼肥浓度不同,导致植物中抗氧化酶发生作用的程度不同,酶活性变化也不同^[22]。藜麦叶片 SOD、POD 和 CAT 活性变化趋势是这 3 种酶彼此协调的结果,3 种酶共同作用

恢复藜麦体内 ROS 产生与清除的动态平衡,维持 ROS 在较低水平,解除 ROS 的氧化胁迫,使藜麦的机体代偿功能增强,确保藜麦的正常生长和代谢^[14,32]。

4 结论

该研究表明,硼对 3 个藜麦品种叶片抗氧化酶均有诱导作用。相同生长期,随着硼浓度提高,藜麦叶片中 SOD 活性逐渐降低,POD 活性先升高后降低,CAT 活性逐渐升高;当硼浓度为 0.3% 时,SOD 活性最低,CAT 活性最高。相同硼浓度条件下,随生长期延长,3 种抗氧化酶活性均表现为先升高后降低趋势,SOD、CAT 活性在灌浆期最高。

叶面喷施适宜的硼肥(0.3%),可以优化藜麦的生理特性。0.3% 硼肥可以降低藜麦叶片中 SOD、POD 活性,提高 CAT 活性。微量元素硼的施用对藜麦氧化酶活性有一定调节作用,缓解缺硼对藜麦生长造成的不利影响,能够促进藜麦生长发育,提高藜麦的抗逆性。

参考文献

[1] TANG Y, TSAO R. Phytochemicals in quinoa and amaranth grains and their antioxidant, anti-inflammatory, and potential health beneficial effects: A review[J]. *Molecular nutrition & food research*, 2017, 61(7): 1-39.

[2] 阿图尔·博汗格瓦, 希尔皮·斯利瓦斯塔瓦. 藜麦生产与应用[M]. 任贵兴, 叶全宝, 等译. 北京: 科学出版社, 2013: 49-50.

[3] 陈树俊, 胡洁, 庞震鹏, 等. 藜麦营养成分及多酚抗氧化活性的研究进展[J]. *山西农业科学*, 2016, 44(1): 110-114, 122.

[4] 顾娟, 黄杰, 魏玉明, 等. 藜麦研究进展及发展前景[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(30): 201-204.

[5] 魏爱春, 杨修仕, 么杨, 等. 藜麦营养成分及生物活性研究进展[J]. *食品科学*, 2015, 36(15): 272-276.

[6] FILHO A M, PIROZI M R, BORGES J T, et al. Quinoa: Nutritional, functional, and antinutritional aspects[J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2017, 57(8): 1618-1630.

[7] JACOBSEN S E, LIU F L, JENSEN C R. Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)[J]. *Scientia horticulturae*, 2009, 122(2): 281-287.

[8] 卢宇, 张美莉. 藜麦生物活性物质研究进展[J]. *农产品加工*, 2015(19): 58-62.

[9] 董肖昌, 姜存仓, 刘桂东, 等. 低硼胁迫对根系调控及生理代谢的影响研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2014, 33(3): 133-137.

[10] 方益华. 高硼胁迫对油菜光合作用的影响研究[J]. *植物营养与肥料科学*

报, 2001, 7(1): 109-112.

[11] 徐松华. 逆境条件下植物体内活性氧代谢研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(21): 29-32.

[12] 马旭俊, 朱大海. 植物超氧化物歧化酶(SOD)的研究进展[J]. *遗传*, 2003, 25(2): 225-231.

[13] 白英俊, 李国瑞, 黄凤兰, 等. 活性氧与植物抗氧化系统研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(36): 1-3.

[14] 李海峰, 王瑞华, 韩琛. 农药胁迫对植物抗氧化系统的研究现状[J]. *农产品加工*, 2018(2): 59-62.

[15] 申圣圣. NaCl 胁迫对藜麦种子萌发和幼苗生长的影响[D]. 太原: 山西师范大学, 2020.

[16] 俞莉莉, 周力, 何小弟. 硼及基质对红掌 SOD、POD 比活性及 MDA 含量影响[J]. *林业科技开发*, 2012, 26(4): 120-122.

[17] 许新廷. 基于土壤养分丰缺指标的章丘市冬小麦-夏玉米轮作推荐施肥技术的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.

[18] 惠薇, 王斌, 李丽君, 等. 钾肥对藜麦生长及养分吸收的影响[J]. *山西农业科学*, 2021, 49(6): 734-738.

[19] 樊卫国, 叶双全. 花期喷硼对刺梨果实产量及品质的影响[J]. *中国南方果树*, 2016, 45(4): 111-113.

[20] 张景全, 周同永. 叶面喷施硼肥对蓝莓产量及品质的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2021, 36(3): 553-557.

[21] 黄益宗. 植物对硼素不足的反应及其成因探讨[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(4): 434-438.

[22] 段碧辉. 硼对硼胁迫下油菜幼苗生长、活性氧代谢以及养分吸收的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.

[23] 祁寒, 孙光明, 李绍鹏, 等. 硼在作物生长过程中的研究现状[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(16): 6649-6650, 6652.

[24] 姜佰文, 戴建军, 王春宏, 等. 干旱胁迫下硼对大豆植株保护酶活性的影响[J]. *作物杂志*, 2009(1): 50-53.

[25] 刘鹏, 杨玉爱. 钼、硼对大豆叶片膜脂过氧化及体内保护系统的影响[J]. *植物学报*, 2000, 42(5): 461-466.

[26] 李妍, 张超, 王士岭, 等. NaCl 胁迫对芥麦生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *现代农业科技*, 2021(1): 9-11, 14.

[27] 宫艳超, 靳华蕾, 郑永丽. 硫化氢对耐毒害下星星草幼苗 SOD、POD 活性的影响[J]. *天津职业院校联合学报*, 2019, 21(9): 96-101.

[28] 何子平, 皮美美, 刘武定. 硼钾营养相互配合对油菜叶片 CAT 和 POD 活性及根膜透性的影响[J]. *华中农业大学学报*, 1993, 12(5): 468-471.

[29] 王娟, 李德全. 逆境条件下植物体内渗透调节物质的积累与活性氧代谢[J]. *植物学通报*, 2001, 36(4): 459-465.

[30] 区焯林, 喻敏, 王灼明, 钼、硅对草坪草海滨雀稗 CAT 和 POD 活性的影响[J]. *韶关学院学报*, 2009, 30(6): 57-60.

[31] 徐建明, 毛善国, 张美圆. 硼对小麦幼苗生长及体内 SOD、POD 活性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2006, 34(6): 49-51.

[32] 万春阳, 王丹, 侯俊玲, 等. NaCl 胁迫对甘草生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *现代生物医学进展*, 2011, 11(10): 1805-1809.

(上接第 138 页)

3 结论

就外观质量而言,随着烟叶着生部位的下降,各处理对烟叶外观质量的提升作用越明显,总体上以 LaCl₃ 作用效果较好。就物理指标而言,各处理均能显著增加各部位烟叶的叶重,降低烟叶的含梗率,其中 LaCl₃ 能显著增加上部叶的宽度和下部叶的厚度。从化学成分检测结果来看,3 个处理均能显著增加烟叶总糖、还原糖、烟碱和钾含量,降低烟碱,提升糖碱比,对烤烟经济性性状都有一定改善效果。LaCl₃ 与对照及 6-BA 相比,烟叶的产量和产值显著提高,但各处理对烤烟均价、上等烟比例及中上等烟比例的影响不显著。

综上,喷施 6-BA、DA-6 和 LaCl₃ 这 3 种植物生长调节剂对烤烟质量均有一定程度的提升效果,对于各植物生长调节剂复配有协同作用有待进一步研究。

参考文献

[1] 张义, 刘云利, 刘子森, 等. 植物生长调节剂的研究及应用进展[J]. *水生*

生物学报, 2021, 45(3): 700-708.

[2] 杨江山. 氨基酸叶面肥对设施延后‘红地球’葡萄光合特性和品质的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2012, 47(6): 81-86.

[3] 李瑞海, 徐大兵, 黄自为, 等. 叶面肥对苗期油菜生长特性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2008, 31(3): 91-96.

[4] 申明, 成学慧, 谢荔, 等. 氨基酸叶面肥对砂梨叶片光合作用的促进效应[J]. *南京农业大学学报*, 2012, 35(2): 81-86.

[5] 徐福利, 梁银丽, 杜社妮, 等. 不同施肥结构对日光温室黄瓜发育及产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(1): 171-174.

[6] 李彩龙, 李毛毛, 高彦龙, 等. 外源 6-BA 对干旱胁迫下苹果砧木 M26 的生理效应[J]. *甘肃农业大学学报*, 2022, 57(5): 126-137.

[7] 谷宇超, 杨懿德, 郇敏, 等. 打顶后喷施不同浓度 GA₃ 和 6-BA 对烤烟农艺性状和化学成分的影响[J]. *作物杂志*, 2021(6): 171-176.

[8] 王英杰, 唐才宝, 潘素君, 等. 外源 6-BA 和 BR 对不灌溉方式下水稻光合特性及产量的影响[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(20): 6930-6938.

[9] 邱玉宾, 张海良, 王佰晨, 等. DA-6 对不同品种北美冬青生长和生理特性的影响[J]. *江苏林业科技*, 2021, 48(2): 1-5.

[10] 郝青南, 汪媛媛, 龙泽福, 等. DA-6 对南方大豆品种性状、产量和品质的影响[J]. *大豆科学*, 2021, 40(6): 799-804.

[11] 吴文杰, 潘冰毅. 氯化镧对铜胁迫水稻幼苗生长的缓解作用[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(4): 912-913.

[12] 陈桂华, 刘芬, 王悦, 等. 氯化镧对不同叶色水稻叶绿素含量及抗氧化酶活性的影响[J]. *分子植物育种*, 2020, 18(8): 2695-2701.