

钼、硒单施及配施对盐胁迫下小白菜生长的影响

张 木^{1,2} 胡承孝¹ 孙学成¹ 谭启玲¹ 赵小虎¹ 张晓栋¹

1. 华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070;
2. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 广州 510640

摘要 通过盆栽试验研究钼(Mo)、硒(Se)单施及配施对盐胁迫下小白菜抗氧化系统及渗透调节系统的影响。结果表明:施 Mo 以及 Mo、Se 配施可以提高盐胁迫条件下小白菜的产量;Mo、Se 配施可以提高小白菜的抗氧化能力和渗透调节能力;单施 Mo 对提高小白菜抗氧化能力和渗透调节能力均有着较好的作用,而单施 Se 并没有显著的效果。Mo、Se 配施对小白菜 Mo、Se 含量有着显著的正交互效应。因此,Mo、Se 配施不但能增强小白菜对盐胁迫的抵御能力,而且还能生产出富硒的蔬菜。

关键词 钼; 硒; 小白菜; 盐胁迫; 渗透调节

中图分类号 S 625.5.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2014)05-0050-07

钼(Mo)是植物必需的矿质营养元素,作为硝酸还原酶的成分参与到植物体内氮的代谢过程,可以增强植物的光合作用,促进植物体的呼吸代谢作用及繁殖器官的发育。Mo 可以称作蔬菜的品质元素,施 Mo 可以提高蔬菜 Vc 含量、可溶性蛋白含量。同时,Mo 还是逆境防御元素,可以增强作物对多种逆境的防御能力,例如施 Mo 能提高冬小麦的抗寒力^[1]、增强大麦对水分胁迫的防御能力^[2]以及缓解钨对莴苣的毒害作用^[3]。从中国盐渍化土壤分布图可以看出,中国的盐渍化土壤面积约约有 1 亿 hm²,分布在我国的多个粮食和蔬菜主产区,而且其中有些地区还伴随着 Mo 的缺乏^[4-5]。不仅如此,中国约有 2/3 的土壤缺硒(Se)。Se 同样也被称为逆境防御元素,施用 Se 肥也能提高作物对多种逆境的防御能力^[6-7]。如果在生产富硒蔬菜的同时又能兼顾提高蔬菜对盐渍化的防御能力,将会是一种很好的蔬菜生产模式。因此,研究钼(Mo)、硒(Se)单施和配施对缓解小白菜盐胁迫的效应既丰富和发展了植物 Mo、Se 研究理论,又在大田生产上有着重要的实践意义。本研究以小白菜(*Brassica chinensis* L.)为研究对象,从抗氧化作用、渗透调节作用等方面考察钼(Mo)、硒(Se)单施和配施对盐胁迫下小白菜生长的影响,旨在探明钼(Mo)、硒(Se)单施和配施对盐胁迫下小白菜的生长是否有着缓解作用以及是否能

兼顾到生产富硒蔬菜。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验采用盆栽方式进行,供试小白菜为上海青(*Brassica chinensis* L.),试验地点为华中农业大学微量元素研究中心盆栽场。供试土壤为采自武汉市新洲区的酸性黄棕壤,其中有机质含量 2.06%、碱解 N 72.37 mg/kg、速效 P 31.38 mg/kg、速效 K 48.86 mg/kg、pH 值 4.6、有效 Mo 0.09 mg/kg、有效 Se 11.52 μg/kg。试验时每盆盛土 6.0 kg,大量元素肥料纯 N、P₂O₅、K₂O 的用量分别为 0.20、0.15、0.20 g/kg,肥源依次为尿素、NH₄H₂PO₄ 和 KCl;每千克土壤中加入 1 mL 缺 Mo 的 Arnon 营养液(1 000 倍)作为微量元素肥料。

1.2 试验设计

正常生长环境和盐胁迫生长环境均设 4 个处理,即 CK、0.3 mg/kg Mo (Mo_{0.3})、0.4 mg/kg Se (Se_{0.4}) 和 0.3 mg/kg Mo + 0.4 mg/kg Se (Mo_{0.3}Se_{0.4}),分别以 (NH₄)₂MoO₄ · 4H₂O(钼酸铵)和 Na₂SeO₃(亚硒酸钠)为肥源,各处理重复 8 次,出苗后 1 周每盆定苗 8 株。大量元素肥料及微量元素肥料在播种前均配成溶液一次性施入土壤,整个生长期采用去离子水浇灌,置于玻璃钢棚内防止雨水淋洗。盐胁迫

收稿日期: 2013-07-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2010PY025、2011PY150)和华中农业大学科技创新专项(2011ZC024)

张 木, 博士, 研究方向: 植物微量元素营养机理. E-mail: zhangmu1123@126.com

通信作者: 胡承孝, 博士, 教授, 研究方向: 施肥与生态. E-mail: hucx@mail.hzau.edu.cn

迫采用分步胁迫的方式进行，分别在出苗后第 10 天、第 20 天和第 30 天添加 500 mL 0.8% 的 NaCl 溶液。

1) 养分含量测定。取各处理相同部位的小白菜叶片，用去离子水迅速洗净并按待测指标个数分别装于盛有液氮的取样盒内，然后转存于超低温冰箱（-80℃）内以待分析。各处理剩余的 4 个重复用去离子水洗净后，先在 105℃ 杀青 30 min，然后于 65℃ 烘干至恒质量，最后样品经粉碎过筛后测定养分含量。

2) 胡萝卜素 (CAR)、可溶性蛋白、抗坏血酸 (ASA)、脯氨酸含量、可溶性糖含量及膜透性的测定。胡萝卜素含量采用乙醇提取比色法测定，可溶性蛋白采用考马斯亮蓝法测定，抗坏血酸含量采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定，脯氨酸含量采用茚三酮比色法测定，可溶性糖采用蒽酮比色法测定，膜透性采用电导法测定^[8]。

3) 抗氧化酶活性测定。POD 活性采用愈创木酚法测定，CAT 活性采用紫外吸收法测定，SOD 活性采用 NBT 法测定，上述指标均参考李合生^[9]的方法测定。

4) GSH 的测定^[10]。称 0.5 g 小白菜样品加入 5 mL 5% 的三氯乙酸研磨，10 000 r/min 下离心 10 min。取离心后的上清液 0.25 mL，加入 0.18 mL DTNB 和 2.6 mL 150 mmol/L 的 NaH₂PO₄，以磷酸缓冲液作对照，30℃ 保温反应 5 min，分光光度计测定 412 nm 的吸光度，根据标准曲线计算样品中 GSH 含量。

5) Mo、Se、K、Na、Ca 和 Mg 的测定。小白菜 Mo 含量采用催化极谱法测定^[11]；植株内 Se 含量采用原子荧光氢化物发生法测定^[12]。小白菜样品经消化后，溶液中的 K⁺、Na⁺ 采用火焰光度法测定，Ca²⁺、Mg²⁺ 采用原子吸收分光光度法测定^[13]。

1.3 数据处理

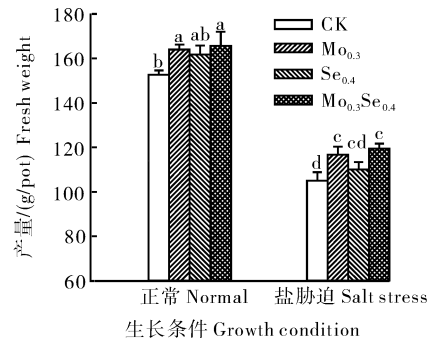
使用 Excel 2003 进行数据处理，Sigmaplot 10.0 作图，各因素主效应分析采用 *F*-test 法，处理平均值的多重比较采用 Duncan-test (*P*<0.05) 法。方差分析中，*F*(NaCl) 表示盐胁迫的效应，*F*(Mo) 表示 Mo 的主效应，*F*(Se) 表示 Se 的主效应，*F*(NaCl×Mo) 表示 Mo 和 NaCl 的交互作用，*F*(NaCl×Se) 表示 Se 和 NaCl 的交互作用，*F*(NaCl×Mo×Se) 表示 Mo、Se 及 NaCl 之间的交互作用，其中 * 和 ** 分别表示 *F* 值检验显著性

P<0.05 和 *P*<0.01，图中不同小写字母表示差异显著性 *P*<0.05。

2 结果与分析

2.1 Mo、Se 单施及配施对小白菜产量的影响

盐胁迫导致小白菜产量显著 (*P*<0.01) 降低，单施 Mo 及 Mo、Se 配施不但显著地 (*P*<0.05) 提高了正常生长环境下小白菜的产量，而且也显著地提高了盐胁迫下小白菜的产量。同时也可以看出，单独施 Se 虽然提高了正常生长及胁迫环境下小白菜的产量，但均未达到显著水平 (图 1)。单施 Mo 及 Mo、Se 配施对小白菜产量提高的幅度基本相当，因此，Mo、Se 配施并没有表现出显著的交互作用。结果表明，盐胁迫下小白菜遭受了严重的逆境伤害，而 Mo、Se 配施则对其有一定的缓解作用。



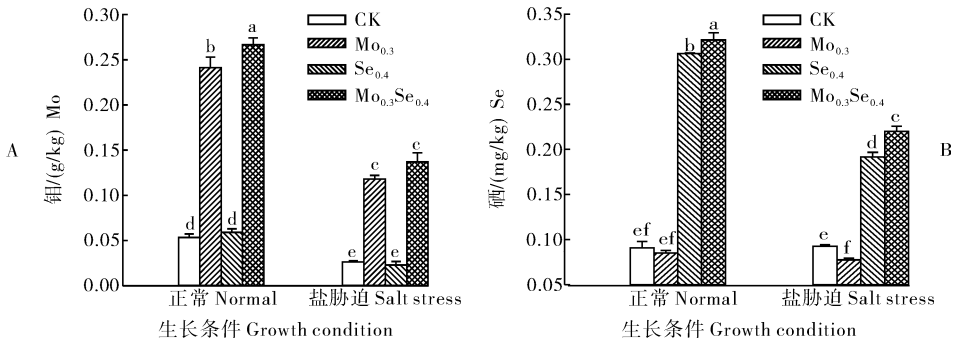
F(Mo)=15.69*, *F*(Se)=4.07, *F*(Mo×Se)=1.15.

图 1 Mo、Se 单施及配施对小白菜产量的影响

Fig. 1 Interactive effects of Mo and Se on fresh weight of pakchoi cabbage

2.2 Mo、Se 单施及配施对小白菜 Mo、Se 含量的影响

盐胁迫显著降低了小白菜 Mo 的含量，而施 Mo 同时显著提高了正常生长条件下和盐胁迫条件下小白菜体内 Mo 的含量，改善了小白菜的 Mo 营养水平；Mo、Se 配施不但显著促进了正常生长条件下小白菜对 Mo 的吸收，而且也促进了盐胁迫条件下小白菜对 Mo 的吸收 (图 2 A)。尽管盐胁迫降低了正常生长条件下和盐胁迫条件下小白菜体内 Se 的含量，但是施 Se 同时提高了正常生长条件下和盐胁迫下小白菜 Se 的含量 (图 2 B)；Mo、Se 配施同时促进了正常生长及胁迫环境下小白菜对 Se 的吸收，增加了 Se 的含量。Mo、Se 配施对小白菜 Mo 含量及 Se 含量均表现出了显著的交互作用。结果表明，施用 Mo、Se 可以很好地改善盐胁迫下小白菜的 Mo、Se 营养水平。



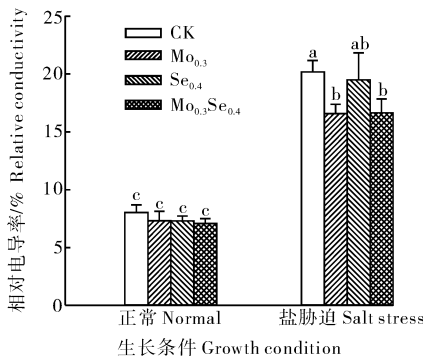
A: $F(\text{Mo})=988.33^{**}$, $F(\text{Se})=5.98^{*}$, $F(\text{Mo} \times \text{Se})=4.88^{*}$; B: $F(\text{Mo})=2.78$, $F(\text{Se})=2705.46^{**}$, $F(\text{Mo} \times \text{Se})=23.20^{**}$.

图 2 Mo、Se 单施及配施对小白菜 Mo、Se 含量的影响

Fig. 2 Interactive effects of Mo and Se on Mo and Se contents of pakchoi cabbage

2.3 Mo、Se 单施及配施对小白菜细胞膜透性的影响

盐胁迫条件下细胞膜遭受到一定的损伤,对离子的选择透过性降低,增加了电解质的外渗。施 Mo、施 Se 以及二者配施对正常生长环境下小白菜细胞膜透性影响不大,而施 Mo 及 Mo、Se 配施对盐胁迫下小白菜电解质的外渗有着缓解作用,有利于维持细胞膜的完整性,增强了小白菜细胞膜的选择透过能力,同时也可以看出单独施 Se 虽然对降低盐胁迫下小白菜电解质外渗有一定的作用,但并不显著(图 3)。结果表明,施 Mo 及 Mo、Se 配施有利于维持细胞膜的完整性。



$F(\text{Mo})=5.57^{*}$, $F(\text{Se})=0.26$, $F(\text{Mo} \times \text{Se})=0.16$.

图 3 Mo、Se 单施及配施对小白菜膜透性的影响

Fig. 3 Interactive effects of Mo and Se on electrolyte leakage of pakchoi cabbage

2.4 Mo、Se 单施及配施对小白菜抗氧化系统的影响

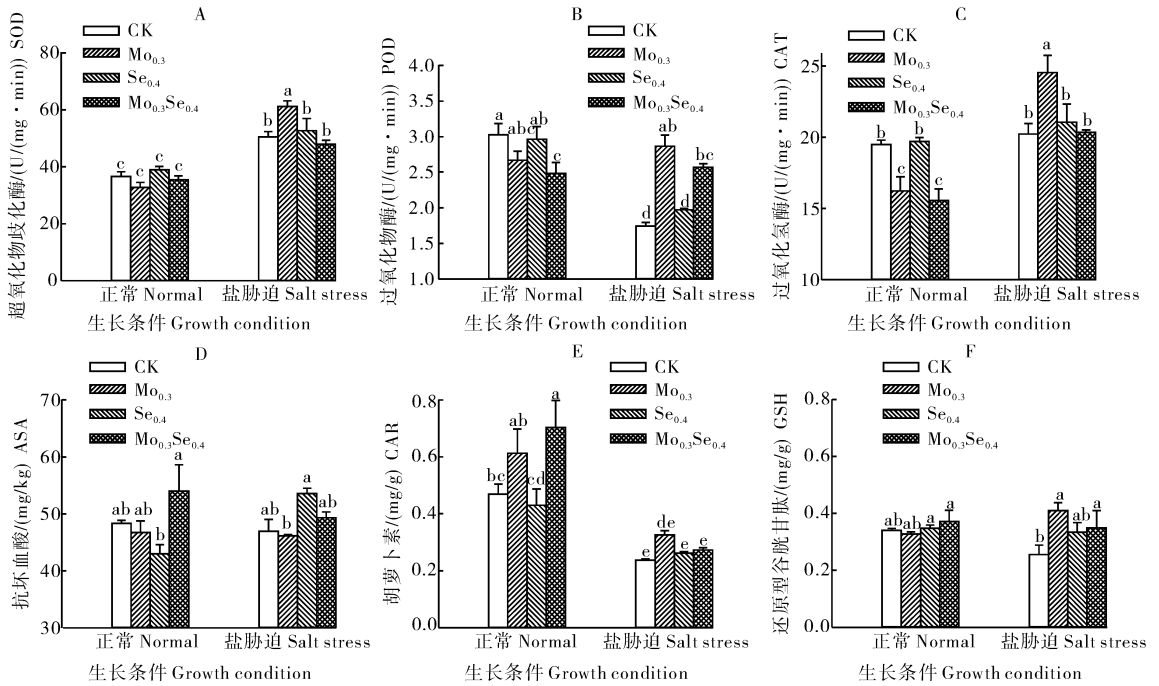
1) Mo、Se 单施及配施对小白菜抗氧化酶活性的影响(图 4 A-C)。盐胁迫对超氧化物歧化酶(SOD)的活性有着显著的影响,同时施 Mo 也显著地提高了盐胁迫条件下小白菜体内 SOD 的活性,施 Se 以及 Mo、Se 配施没有影响到胁迫条件下小白菜

SOD 的活性。施 Mo、施 Se 以及 Mo、Se 配施提高了盐胁迫条件下小白菜体内过氧化物酶(POD)的活性,施 Mo 以及 Mo、Se 配施的处理达到了显著水平。施 Mo 以及 Mo、Se 配施显著地降低了正常生长条件下小白菜体内过氧化氢酶 CAT 的活性,施 Se 对 CAT 活性影响不大;但是施 Mo 显著提高了盐胁迫条件下小白菜体内过氧化氢酶(CAT)的活性,施 Se 以及 Mo、Se 配施则对其影响不大,说明施 Mo 及 Mo、Se 配施对提高抗氧化酶类活性效果较好,能增强小白菜的抗氧化能力。

2) Mo、Se 单施及配施对小白菜非酶类抗氧化物质含量的影响(图 4 D-F)。Mo、Se 配施对正常生长条件下小白菜抗坏血酸(ASA)的含量有着显著的提高作用,而施 Se 以及 Mo、Se 配施对盐胁迫下小白菜 ASA 含量也有着较好的提高作用。施 Mo 以及 Mo、Se 配施对增加正常生长条件下小白菜胡萝卜素(CAR)的含量较为有效,但施 Se 并没有显著效果;盐胁迫致使小白菜 CAR 含量显著地降低,施 Mo、施 Se 以及 Mo、Se 配施对盐胁迫下 CAR 含量的提升虽然有一定的效果但并不显著。施 Mo、施 Se 以及 Mo、Se 配施对提高盐胁迫下小白菜 GSH 均有较好的效果,特别是施 Mo 以及 Mo、Se 配施效果最佳。结果表明,Mo、Se 配施对提高非酶类抗氧化物质含量大多有着较好的效果。

2.5 Mo、Se 单施及配施对小白菜渗透调节系统的影响

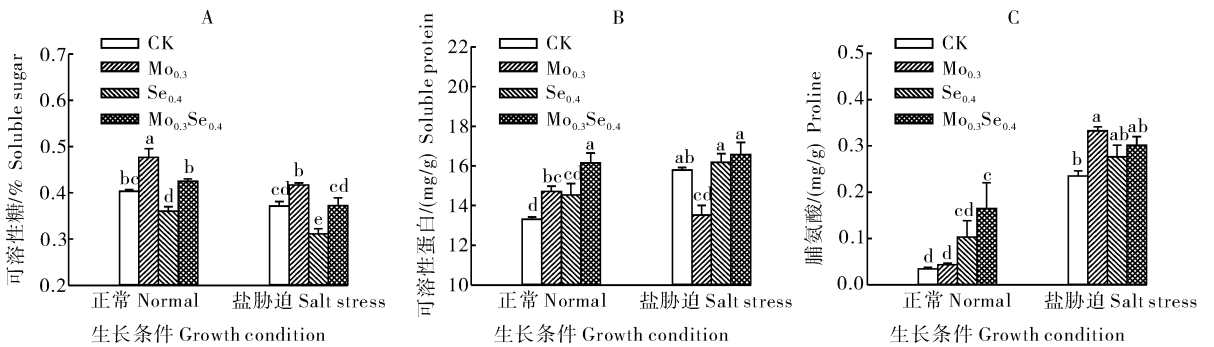
Mo、Se 单施及配施对小白菜有机渗透调节物质含量的影响见图 5。施 Mo 以及 Mo、Se 配施对提高盐胁迫下小白菜可溶性糖的含量效果较好;施 Mo 及 Mo、Se 配施在一定程度上增加盐胁迫条件下小白菜可溶性蛋白的含量,并且单独施 Mo 处理可溶性糖含量得到了显著地提高。施 Mo、施 Se 以



A; $F(\text{Mo})=0.05, F(\text{Se})=1.02, F(\text{Mo} \times \text{Se})=6.23^*$; B; $F(\text{Mo})=5.00^*, F(\text{Se})=1.36, F(\text{Mo} \times \text{Se})=2.39$; C; $F(\text{Mo})=5.38^*, F(\text{Se})=0.78, F(\text{Mo} \times \text{Se})=6.09^*$; D; $F(\text{Mo})=0.75, F(\text{Se})=3.20, F(\text{Mo} \times \text{Se})=1.89$; E; $F(\text{Mo})=13.29^{**}, F(\text{Se})=0.00, F(\text{Mo} \times \text{Se})=0.30$; F; $F(\text{Mo})=7.05^*, F(\text{Se})=0.99, F(\text{Mo} \times \text{Se})=2.29$.

图 4 Mo、Se 单施及配施对小白菜 SOD、POD、CAT 活性以及 ASA、CAR、GSH 含量的影响

Fig. 4 Interactive effects of Mo and Se on activities of SOD, POD, CAT and contents of ASA, CAR and GSH of pakchoi cabbage



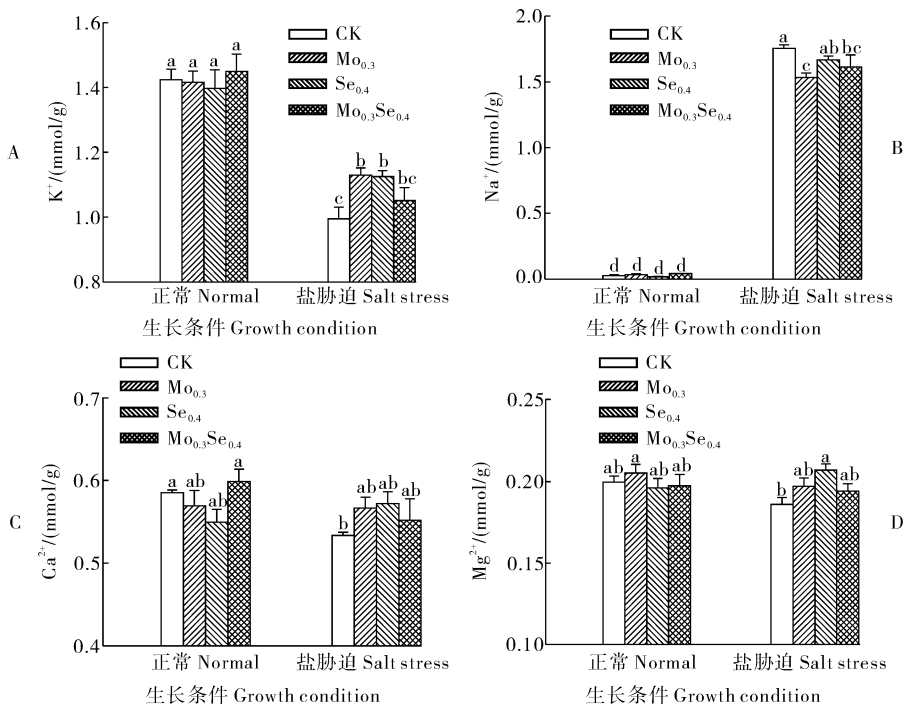
A; $F(\text{Mo})=66.56^{**}, F(\text{Se})=43.97^{**}, F(\text{Mo} \times \text{Se})=0.05$; B; $F(\text{Mo})=1.16, F(\text{Se})=31.88^{**}, F(\text{Mo} \times \text{Se})=7.12$; C; $F(\text{Mo})=7.57^*, F(\text{Se})=8.03^*, F(\text{Mo} \times \text{Se})=1.00$.

图 5 Mo、Se 单施及配施对小白菜可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量的影响

Fig. 5 Interactive effects of Mo and Se on soluble sugar, soluble protein and proline contents of pakchoi cabbage

及 Mo、Se 配施对正常生长环境下小白菜可溶性蛋白含量有着提高作用，而且施 Mo 及 Mo、Se 配施的处理达到了显著水平；施 Se 以及 Mo、Se 配施对提高盐胁迫下小白菜可溶性蛋白的含量也较为有效。胁迫环境导致小白菜脯氨酸含量大量累积，而施 Mo、施 Se 以及 Mo、Se 配施又能增加盐胁迫下小白菜脯氨酸含量。因此，单施 Mo 及 Mo、Se 配施对提高盐胁迫下小白菜的渗透调节能力较为有效，从而有助于小白菜对水分的吸收。

Mo、Se 单施及配施对小白菜无机渗透调节离子含量的影响(图 6)。施加氯化钠导致了小白菜 K⁺ 的显著降低，但是施 Mo、施 Se 以及 Mo、Se 配施增加了盐胁迫下小白菜体内 K⁺ 的含量，并且施 Mo 及施 Se 的处理达到了显著水平。盐胁迫提高了小白菜体内 Na⁺ 的含量，而施 Mo 及 Mo、Se 配施的处理显著降低了盐胁迫条件下小白菜体内 Na⁺ 的含量，施 Se 虽然对盐胁迫下小白菜体内 Na⁺ 含量有一定的降低作用但并不显著。施 Mo、施 Se 以及



A: $F(\text{Mo})=0.88, F(\text{Se})=0.29, F(\text{Mo} \times \text{Se})=1.80$; B: $F(\text{Mo})=5.29^*, F(\text{Se})=0.01, F(\text{Mo} \times \text{Se})=3.09$; C: $F(\text{Mo})=0.63, F(\text{Se})=0.02, F(\text{Mo} \times \text{Se})=0.26$; D: $F(\text{Mo})=0.13, F(\text{Se})=0.22, F(\text{Mo} \times \text{Se})=4.03$.

图 6 Mo、Se 单施及配施对小白菜 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的影响

Fig. 6 Interactive effects of Mo and Se on K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} contents of pakchoi cabbage

Mo、Se 配施对盐胁迫下小白菜 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量均有着一定的提升作用。结果表明, Mo、Se 配施有利于维持盐胁迫下小白菜体内渗透调节离子含量进而增强保持渗透调节平衡的能力。

3 讨论

盐胁迫会显著地抑制作物生长, 导致作物产量大幅地降低, 作物的抗逆性得到提高后生长状况就会得到好转, 因此, 能否增加作物的产量及生物量就成为判断植物对逆境防御能力强弱的重要标准^[14]。本研究发现施 Mo、施 Se 以及 Mo、Se 配施对盐胁迫下小白菜的产量有着提高作用, 以单施 Mo 及 Mo、Se 配合施用的处理效果最好, 说明在该处理下小白菜抵御盐胁迫的能力有了一定程度的增强。本试验中盐胁迫同时降低了小白菜体内 Mo、Se 的含量, 可能是在盐胁迫环境下植物根系活力降低进而对养分元素的吸收能力变弱。Mo 是植物所必需的营养元素, 施 Mo 可以提高小白菜的 Mo 营养水平, 有利于保持正常的生长代谢; 施 Se 也显著增加了盐胁迫下小白菜体内 Se 的含量。因此, 从小白菜产量和 Mo、Se 含量上可以推断出 Mo、Se 配施增强了小白菜的抗盐胁迫能力。

植物在正常环境中生长时, 植物体内产生的自

由基相对较少, 而且抗氧化系统的清除速率与自由基的产生速率基本相当, 但是在植物遭受逆境时这个相对稳定的平衡状态就会被打破^[15]。清除这类活性氧自由基的物质包括抗氧化酶类物质如 SOD、POD 以及 CAT 等, 此外还有一些非酶物质如 ASA、GSH 和 CAR 等, 这个由酶类和非酶类物质组成的抗氧化系统对增强小白菜盐胁迫的抗性能力至关重要^[16]。本研究中施 Mo 能提高盐胁迫下小白菜体内 SOD、POD 和 CAT 的活性, 而施 Se 以及 Mo、Se 配施的处理对这 3 种抗氧化酶活性影响不大, 但是施 Se 以及 Mo、Se 配施却增强了小白菜细胞膜的选择透过性, 这可能是由于 Se 自身的抗氧化能力具有较强的自由基清除功能, 进而使得小白菜体内活性氧代谢维持在较低水平, 而这 3 种抗氧化酶又是诱导酶, 它们易受逆境环境下所产生自由基的诱导, 因此, 施 Se 以及 Mo、Se 配施的处理并没有增强这 3 种酶的活性。

非酶类抗氧化物质 ASA 对增强小白菜的抗氧化能力也十分重要。本试验中施 Se 以及 Mo、Se 配施的处理对盐胁迫下小白菜 ASA 含量均有着提高作用。研究表明, Mo 能促进抗坏血酸的代谢循环, 因此, 施 Mo 可以提高 ASA 的含量^[17]。植物体内不同价态的 Se 本身就是很好的抗氧化物质, 对清除

自由基较为有效,可以减少 ASA 在清除自由基中的消耗量,进而增加了小白菜 ASA 的含量。在光合作用中具有吸收并传递光电子作用的胡萝卜素 CAR 同样也具有较强的抗氧化防御能力^[18],施 Mo、施 Se 以及 Mo、Se 配施同样也提高了盐胁迫下小白菜体内 CAR 的含量。GSH 能够清除 H₂O₂ 和修复细胞膜损伤,施 Mo、施 Se 以及 Mo、Se 配施对盐胁迫下小白菜体内 GSH 含量有提高作用。因此,Mo、Se 配施可以通过提高小白菜抗氧化酶活性和非酶类抗氧化物质含量来增强小白菜在盐胁迫环境下清除活性氧自由基的能力。

在盐胁迫环境下植物根系吸收水分的能力大小是决定植物能否正常生长的关键因素^[19],外界盐分浓度大、渗透压高,植物细胞失水,造成植物根系吸水困难。此时,为了缓解组织细胞内的渗透胁迫,植物需要进行渗透势的调节,加强一些小分子有机物溶质的合成代谢如脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白等^[20]。研究发现,施 Mo 能提高盐胁迫下小白菜体内可溶性糖及脯氨酸含量,而施 Se 的处理能提高盐胁迫下小白菜体内可溶性蛋白及脯氨酸的含量,而 Mo、Se 配施的处理能同时提高小白菜可溶性糖、可溶性蛋白及脯氨酸的含量。维持较高的钾钠比值是植物具有较强抗盐胁迫能力的重要生理特征^[21-24],K⁺、Na⁺的离子半径及水合能较为相似,因此,Na⁺会与 K⁺竞争质膜上的结合位点,有着较高的钾钠比值暗示着植物体内 K⁺竞争结合位点的能力更强^[25]。小白菜对盐胁迫的防御能力就取决于能否保持较高的 K⁺含量和限制较多的 Na⁺进入植物体,钾钠比是用来判断植物抗盐能力强弱的重要参照标准^[26]。本研究中,施 Mo、施 Se 以及 Mo、Se 配施提高了盐胁迫下小白菜 K⁺的含量降低了 Na⁺的含量,进而提高了小白菜的钾钠比,增强了小白菜对盐胁迫的防御能力。研究表明,Mo 可以影响 ABA 的代谢^[27-28],进而诱导基因 *GhNHX1* 的表达,而该基因表达的产物正是可以外排 Na⁺的 Na⁺/H⁺反向转运子^[29-30]。当植物感知到逆境信号时,细胞质中 Ca²⁺浓度会发生变化,进而诱导钙调蛋白 CAM 活性变化,做出相应的生理调节^[31]。在盐胁迫时,Na⁺可以置换下质膜上的 Ca²⁺,置换下的 Ca²⁺进入细胞组织后,组织内的游离钙就会增多,Ca-CAM 复合体的代谢调节功能就会紊乱。不仅如此,Ca²⁺还具有稳定细胞膜的作用,Ca²⁺的缺失还会降低细胞膜的选择透过性^[32]。Mg 作为叶绿素 a 和叶绿素 b 卟啉环的中心原子,在叶绿素合成过程中有着重要

的作用,缺 Mg 会直接导致光合作用的降低^[33],进而会影响到盐胁迫下抵御有害胁迫所消耗的物质和能量供应。本试验中施 Mo、施 Se 以及 Mo、Se 配施对盐胁迫下小白菜体内 Ca²⁺、Mg²⁺的含量均有提高作用。因此,Mo、Se 配施可以通过增强小白菜的渗透调节作用来提高小白菜对盐胁迫的防御力。

参 考 文 献

- [1] 赵秋芳,胡承孝,孙学成. 冬小麦不同钼效率品种钼吸收差异及其与根系形态特征的关系[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(2): 67-71.
- [2] WALKER S M, KUDRNA D A, WARNER R L. Reduced accumulation of ABA during water stress in a molybdenum cofactor mutant of barley[J]. Plant Physiology, 1989, 90(2): 728-733.
- [3] GUNES A, POST W H K. Effect of various levels and combinations of molybdenum and tungsten on the growth and nitrate accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in nutrient solution [J]. Agrochimica, 1996, 40: 166-172.
- [4] 中国科学院南京土壤研究所. 中华人民共和国土壤图[M]. 北京: 中国地图出版社, 1986.
- [5] 张木, 胡承孝, 赵小虎. 钼硒互作对小白菜产量及营养品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(3): 72-76.
- [6] 尚庆茂, 陈淑芳, 张志刚. 硒对高温胁迫下辣椒叶片抗氧化酶活性的调节作用[J]. 园艺学报, 2005, 32(1): 35-38.
- [7] 李彦, 史衍玺, 张英鹏, 等. 盐胁迫条件下硒对小白菜抗氧化活性及膜脂过氧化作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 749-753.
- [8] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2005: 134-270.
- [9] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164-169.
- [10] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 224-226.
- [11] 张木, 胡承孝, 赵小虎, 等. 钼、硒互作对 2 茬小白菜钼、硒含量及土壤钼、硒有效性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(6): 75-80.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 21729—2008 茶叶中硒含量的检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 141-147.
- [14] ZHANG M, HU C X, ZHAO X H, et al. Molybdenum improves antioxidant and osmotic-adjustment ability against salt stress in Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis*) [J]. Plant and Soil, 2012, 355: 375-383.
- [15] 陆景陵. 植物营养学: 上册[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 1994: 18-20.
- [16] BOHNERT H J, JENSEN R G. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants [J]. Trends in Biotechnology, 1996, 14: 89-97.
- [17] NIE Z J, HU C X, SUN X C, et al. Effects of molybdenum on a-

- scorbate-glutathione cycle metabolism in Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis*) [J]. *Plant and Soil*, 2007, 295: 13-21.
- [18] STILLWELL W, TIEN H T. Protection of chlorophyll by phospholipids from photooxidation [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 1997, 76(2): 232-238.
- [19] FLEXAN J, BOTA J, GALMES J, et al. Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress [J]. *Physiol Plantarum*, 2006, 127(3): 343-352.
- [20] PARIDA A K, DAS A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60: 324-349.
- [21] MAAS E V, GRIEVE C M. Sodium-induced calcium deficiency in salt-stressed corn [J]. *Plant Cell and Environment*, 1987, 10: 559-564.
- [22] 刘遵春, 刘用生. 盐胁迫对果树生理化的影响及耐盐性指标的研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2006, 23(14): 3273-3274.
- [23] 杨晓慧, 蒋卫杰, 魏珉, 等. 植物对盐胁迫的反应及其抗盐机理研究进展 [J]. *山东农业大学学报*, 2006, 37(2): 302-305.
- [24] 宁建凤, 郑青松, 杨少海, 等. 高盐胁迫对罗布麻生长及离子平衡的影响 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 325-330.
- [25] BLUMWALD E. Sodium transport and salt tolerance in plants [J]. *Current Opinion in Cell Biology*, 2000, 12: 431-434.
- [26] MAATHUIS F J, AMTANN A. K^+ nutrition and Na^+ toxicity: the basis of cellular K^+/Na^+ ratios [J]. *Annals of Botany*, 1999, 84: 123-133.
- [27] SUN X C, HU C X, TAN Q L, et al. Effects of molybdenum on cold-responsive genes in abscisic acid (ABA)-dependent and ABA-independent pathways in winter wheat under low temperature stress [J]. *Annals of Botany*, 2009, 104: 345-356.
- [28] XIONG L, ISHITANI M, LEE H, et al. The arabidopsis LOS5/ABA3 locus encodes a molybdenum cofactor sulfurase and modulates cold stress- and osmotic stress-responsive gene expression [J]. *Plant Cell*, 2001, 13: 2063-2083.
- [29] WU C A, GUO D Y, QING W M, et al. The cotton *GhNHX1* gene encoding a novel putative tonoplast Na^+/H^+ antiporter plays an important role in salt stress [J]. *Plant Cell Physiol*, 2004(5): 600-607.
- [30] FUKUDA A, NAKAMURA A, TAGIRI A, et al. Function, intracellular Na^+/H^+ antiporter from rice [J]. *Plant Cell Physiol*, 2004(2): 146-159.
- [31] SHEEN J. Ca^{2+} -dependent protein kinases and stress signal transduction in plants [J]. *Science*, 1996, 274 (5294): 1900-1902.
- [32] TUNA A L, KAYA C, ASHRAF M, et al. The effects of calcium sulphate on growth, membranestability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(2): 173-178.
- [33] SALEH B. Ion partitioning and Mg^+/Na^+ ratio under salt stress application in cotton [J]. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 2011, 7(4): 292-300.

Effects of applying molybdenum and selenium on growth of pakchoi cabbage under salt stress

ZHANG Mu^{1,2} HU Cheng-xiao¹ SUN Xue-cheng¹ TAN Qi-ling¹
ZHAO Xiao-hu¹ ZHANG Xiao-dong¹

1. *Micro-element Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

2. *Agricultural Resources and Environmental Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China*

Abstract A pot experiment was conducted to investigate effects of applying molybdenum and selenium on antio-xidative defense system and osmotic-adjustment system of pakchoi cabbage under salt stress. The results showed that both Mo and combination of Mo and Se increased yield of pakchoi cabbage. Co-application of Mo and Se increased the capacity of pakchoi cabbage to eliminate active oxygen and increased the ability of osmotic-adjustment of pakchoi cabbage. Single Mo also increased the capacity of pakchoi cabbage to eliminate active oxygen and the ability of osmotic-adjustment of pakchoi cabbage. Single Se had a very small role in enhancing salt stress tolerance of pakchoi cabbage. Mo and Se had synergistic effects on increasing Mo and Se uptaking of pakchoi cabbage. Co-application of Mo and Se not only increased salt tolerance but also produced Se-enriched cabbage.

Key words molybdenum; selenium; pakchoi cabbage; salt stress; osmotic-adjustment

(责任编辑:陆文昌)