

网络出版日期:2018-01-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20180112.0934.028.html>

硒、硫互作对青花菜幼苗渗透调节物质和抗氧化酶的影响

成 凯^{1,2}, 何 茂¹, 黄 志¹, 许炜萍¹, 赖 艳¹

(1. 四川农业大学 园艺学院, 成都 611130; 2. 贵州大学 农学院, 贵阳 550025)

摘 要 以青花菜‘碧秀1号’为材料,通过盆栽试验研究不同浓度 S、Se 配施对青花菜幼苗抗氧化酶[过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)]活性、可溶性糖质量分数、可溶性蛋白质量分数、脯氨酸质量浓度、丙二醛(MDA)质量摩尔浓度与相对电导率的影响。结果表明,与对照(未施硫硒肥, S0Se0)相比,含 1 mmol/L S、10 μ mol/L Se (S1Se10)处理显著提高青花菜 CAT、POD、SOD 的活性;且随处理时间延长酶活性逐渐增强,显著提高可溶性糖、可溶性蛋白质量分数和脯氨酸质量浓度,但显著降低 MDA 质量摩尔浓度与相对电导率。硒胁迫(20 μ mol/L)下高浓度硫(5、10 mmol/L)处理抑制 3 种抗氧化酶活性,提高青花菜幼苗叶片中 MDA 质量摩尔浓度与相对电导率,降低可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸质量浓度,胁迫效应明显。S1Se10 处理可明显增强青花菜幼苗抗氧化能力,保护细胞膜稳定性,提高其抗逆性,可作为实际青花菜富硒生产参考。

关键词 青花菜;硫;硒;抗氧化酶;渗透调节

中图分类号 S635

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2018)01-0098-10

硒是动物体必需的微量元素,具有保护心脏、抗癌、防止大骨节病、克山病、延缓衰老等作用,因其对人类和动物的健康具有重要作用,日渐受到人们关注^[1]。中国为严重缺硒国家,72%国土面积缺硒,还存在如恩施、永福等高硒地区,同时,自然条件下植物硒含量不高,利用硒资源开发富硒产品具有广阔前景^[2]。植物能将环境中不易被人体吸收的无机硒在体内转化为有机硒,并提高其生物有效活性^[3],是动物和人类获得硒的主要来源。硒对植物的生长发育具有二重性,低浓度时促进植物生长发育,而高浓度时则对植物的生长发育起抑制作用,过量时甚至会发生毒害现象^[4-5]。研究证明,低浓度的硒可能通过调控超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)等的活性、丙二醛(MDA)含量参与梨叶片衰老进程的调控,从而降低膜脂过氧化水平,延长叶片功能期^[6];硒也能通过促进蛋白质的合成使作物产量增加、品质改善^[7]。另一方面,高浓度的硒在植物体内诱导产生大量活性氧,并刺激植物产生大量抗氧化物质来抵御胁迫^[8],还可能影响铁

硫蛋白合成从而影响光合作用,还有研究发现高浓度硒能破坏植物花粉发育与受精作用,从而抑制植物生长发育与繁殖^[9]。

硫是植物生长的重要中量元素,在活化多种酶和提高抗逆性等方面具有重要作用,适宜浓度的硫能提高植株可溶性蛋白及可溶糖含量,降低MDA含量,提高叶片中过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、SOD活性,从而增强植物的抗逆性^[10],促进植物的生长^[11-12]。

硒和硫属同族元素,具有较多相似特性。研究证明,硫是影响硒吸收转运的重要因素^[13],高等植物同化 Se^{6+} 的途径与同化 SO_4^{2-} 的途径基本相同,硒的吸收转化量受硫含量的影响,硒能够促进植物对硫的吸收,硫可以增强土壤中的硒可利用性,但高浓度的硫会抑制硒酸盐摄取^[14],硫硒配施因浓度和比例不同对植物有促进或者抑制作用^[15-16]。

青花菜(*Brassica oleracea* L. var. *italica*)亦称西兰花、绿花菜、绿花椰菜等,为十字花科芸苔属甘蓝种中的一个变种,具有营养丰富、较高药用

收稿日期:2017-06-20 修回日期:2017-08-20

基金项目:留学回国人员科技项目择优资助(2016);四川农业大学双支计划资助(2016)。

第一作者:成 凯,男,硕士研究生,从事园艺植物生理生化研究。E-mail:cheng0406kai@163.com

通信作者:黄 志,男,副教授,主要从事设施园艺研究。E-mail:dr.huangzhi@qq.com

价值的特点,各器官均可加以综合利用^[17],在预防癌症、调节高血压、心脏病等方面有一定功效,能安全控制糖尿病^[18]。青花菜具有较强富集硒的能力^[19],是进行富硒研究与栽培的可行材料。目前,硫硒配施在青花菜中的研究较少,本试验以青花菜为材料,研究硫硒配施对青花菜幼苗植株渗透调节与抗氧化酶的影响,旨在为青花菜的合理施肥,提高硒、硫利用率提供理论支撑,为富硒青花菜安全、优质、高效生产提供有价值的应用依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在四川农业大学实验农场内进行。供试青花菜品种为‘碧秀1号’,购于四川东叶科技有限公司。硒、硫元素分别以硒酸钠(Na_2SeO_4)、硫酸钠(Na_2SO_4)形式加入营养液,以硒、硫元素计算加入量。试验营养液配方采用霍格兰德营养液配方^[20],低硫浓度时用 MgCl_2 替代 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,铁盐制剂用 FeCl_2 或者 FeCl_3 代替 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。

1.2 试验设计

将青花菜种子于 $55\text{ }^\circ\text{C}$ 下不断搅拌 15 min ,冷却至室温浸泡 5 h 后,于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 催芽箱中保湿催芽,待 60% 露白,播种于上口内径 15 cm 、底内径 9 cm 、高 10.5 cm 带底盘塑料盆中。盆中为 $155\text{ }^\circ\text{C}$ 预灭菌 2 h 蛭石珍珠岩(体积比 $3:1$)混合基质。每盆 4 株,常规营养液培至二叶一心,选取一致性好的植株进行后续试验以及常规管理。试验采用双因素区组设计,设置 3 组 10 个不同的硫、硒处理。分别为普通硫(1 mmol/L)浓度下,不同浓度硒(0 、 10 、 20 、 $100\text{ }\mu\text{mol/L}$)处理;无硫情况下,不同浓度硒(0 、 5 、 10 、 $20\text{ }\mu\text{mol/L}$)处理;硒胁迫($20\text{ }\mu\text{mol/L}$)下,不同浓度硫(0 、 1 、 5 、 10 mmol/L)处理对青花菜幼苗的影响。各试验设计分别用 S1Se0 、 S1Se10 、 S1Se20 、 S1Se100 、 S0Se0 、 S0Se5 、 S0Se10 、 S0Se20 、 S5Se20 和 S10Se20 表示,以 S0Se0 为对照。硫、硒溶液 2 d 浇 1 次,每次每盆浇 15 mL ,共处理 6 次。从处理时开始计算,分别在第 0 、 4 、 8 、 12 天测定相关数据。重复 3 次。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 膜质渗透相关指标 相对电导率采用浸泡法测定^[21];可溶性蛋白采用考马斯亮兰法测定^[22];可溶性糖采用蒽酮法测定^[22];脯氨酸(Pro)质量浓度用酸性茚三酮法测定^[21];MDA 质量摩

尔浓度用硫代巴比妥酸法测定^[21]。

1.3.2 抗氧化酶活性测定 SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法^[21];POD 活性采用愈创木酚法测定^[21];CAT 活性采用紫外分光光度法测定^[21]。

1.4 数据分析

采用 EXCEL 2010 和 SPSS 19.0 对试验数据进行分析,并用 Duncan's 新复极差法对不同处理进行显著性检验。

2 结果与分析

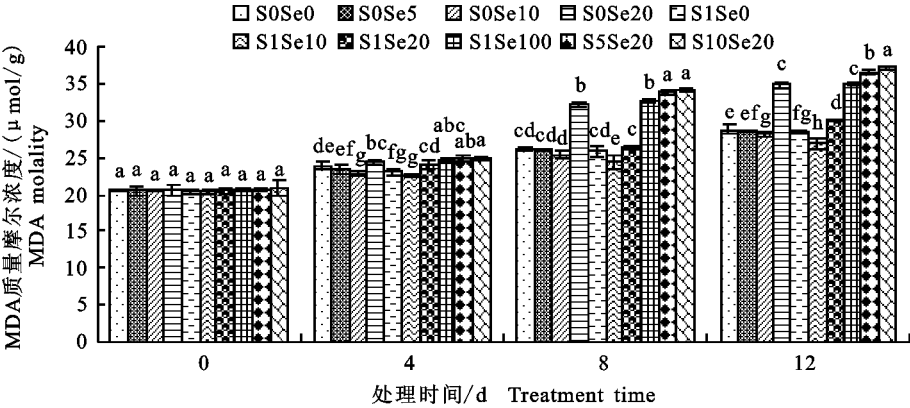
2.1 硒、硫互作对青花菜幼苗渗透调节系统的影响

2.1.1 对青花菜幼苗 MDA 质量摩尔浓度与相对电导率的影响 由图 1 可知,在无硫(S0)或普通硫(S1)处理下,青花菜幼苗叶片的 MDA 质量摩尔浓度随硒浓度的增加呈先减小后增大的趋势,并分别于 S0Se10 、 S1Se10 处理下出现无硫、普通硫不同硒浓度处理结果中的最小值,且随生长时间的增加变化趋势越来越明显;高硒(Se20)处理下,随硫浓度的增加青花菜 MDA 质量摩尔浓度呈先减小后增大的趋势,在 S1Se20 时出现高硒不同硫浓度处理结果中的最小值,随生长时间的增加,无硫(S0Se20)和高硫(S5Se20 和 S10Se20)处理下 MDA 质量摩尔浓度显著高于普通硫处理(S1Se20)。图 1 表明,与对照相比, S1Se10 、 S0Se10 、 S1Se0 、 S0Se5 处理下 MDA 质量摩尔浓度均较低,青花菜在 S1Se10 处理下,处理后第 0 天、第 4 天、第 8 天和第 12 天青花菜幼苗 MDA 质量摩尔浓度分别是对照的 99% 、 94% 、 94% 、 94% ,除处理后 0 d 差异不显著外,其他均显著低于对照; S1Se20 、 S0Se20 、 S1Se100 、 S5Se20 、 S10Se20 处理的 MDA 质量摩尔浓度均较高,且从处理后的第 8 天开始, S0Se20 、 S1Se100 、 S5Se20 、 S10Se20 处理的 MDA 质量摩尔浓度显著高于对照。

由图 2 可知,在无硫或普通硫处理下,青花菜幼苗相对电导率随硒浓度的增加呈先减小后增大的趋势,并分别于 S0Se10 、 S1Se10 处理下出现无硫、普通硫不同硒浓度处理结果中的最小值;高硒(Se20)处理下,青花菜幼苗的相对电导率随硫浓度的增加呈先减小后增大的趋势,在 S1Se20 时出现高硒不同硫浓度处理结果中的最小值。与对照相比, S1Se10 相对电导率较低且达显著差异,

S1Se100、S5Se20 的相对电导率随着时间的延长显著高于对照。由此表明,S1Se10 处理能有效减少青花菜幼苗的 MDA 质量摩尔浓度和相对电导

率,延缓植株衰老。硒胁迫下,低 S 处理能缓解硒胁迫导致的 MDA 质量摩尔浓度增多、相对电导率增大。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同 Different lowercase letters indicate the significant differences ($P < 0.05$) under various treatments, The same below

图 1 硒、硫互作对青花菜幼苗 MDA 质量摩尔浓度的影响

Fig. 1 Effect of interaction between selenium and sulfur on malondialdehyde molality of broccoli seedlings

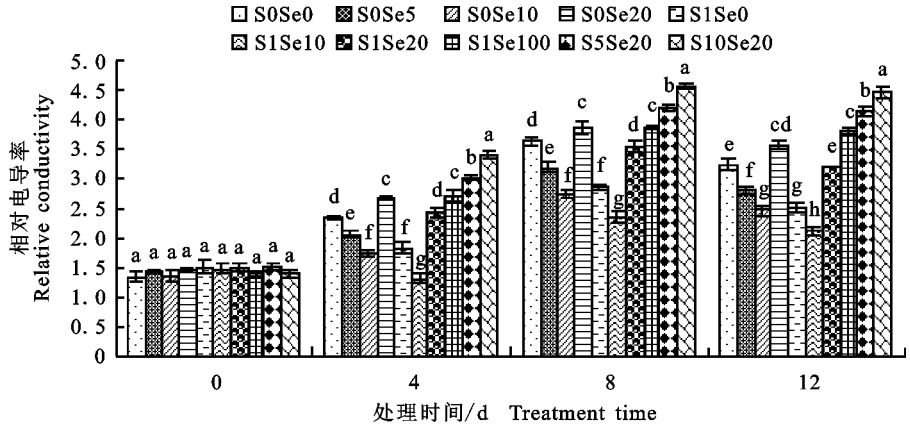


图 2 硒、硫互作对青花菜幼苗相对电导率的影响

Fig. 2 Effect of interaction between selenium and sulfur on relative conductivity of broccoli seedlings

2.1.2 对青花菜幼苗可溶性糖、可溶性蛋白质质量分数和脯氨酸质量浓度的影响 由表 1 可知, S1Se10 组合的硒硫配施能显著提高青花菜幼苗可溶性糖质量分数。在无硫或普通硫(S1)处理下,青花菜幼苗的可溶性糖质量分数随硒浓度的增加呈先增大后减小趋势,并分别于 S0Se10、S1Se10 处理下出现试验中无硫、普通硫不同硒浓度处理结果中的最大值,S0Se10 处理可溶性糖质量分数显著高于对照,且随时间的增加差异越来越明显。随时间的增加,S1Se10 处理可溶性糖质量分数与 S1Se0 相比,差异越来越明显,且均达显著差异;S1Se100 处理可溶性糖质量分数始终显著低于 S1Se0 处理可溶性糖质量分数。高硒

(Se20)水平下,青花菜幼苗可溶性糖质量分数随硫的增加呈先增大后减小趋势,初期在处理浓度内未达显著差异,直至处理第 12 天,S1Se20 处理可溶性糖质量分数显著高于 S5Se20 和 S10Se20。由表 2 可知,单硒处理下,随硒浓度的增加,青花菜幼苗可溶性蛋白质量分数呈先增大后减小的抛物线,在硒 10 μmol/L 时,可溶性蛋白质量分数最大,且 S0Se10、S0Se5 处理可溶性蛋白质量分数显著高于 S0Se0 和 S0Se20;S0Se20 可溶性蛋白质量分数显著低于 S0Se0。普通硫水平下,可溶性蛋白质量分数随硒浓度的增加呈先增大后减小的趋势,转折点出现在硒为 10 μmol/L 时,且 S1Se10 的可溶性蛋白质量分数显著高于

S1Se0、S1Se20 和 S1Se100;S1Se20 和 S1Se100 处理可溶性蛋白质质量分数均显著低 S1Se0。高硒(Se20)水平下,青花菜幼苗可溶性蛋白质量分数随硫浓度的增加呈先增加后减少的趋势,S1Se20 与 S0Se20 相比,其可溶性蛋白质量分数有差异但未达显著;S1Se20、S0Se20 和 S5Se20、S10Se20 相比,其可溶性蛋白质量分数较高且达到显著差异。与对照 S0Se0 相比, S0Se5、S0Se10、S1Se0、

S1Se10 处理可溶性蛋白质量分数较高且达到显著差异; S0Se20、S1Se20、S1Se100、S5Se20、S10Se20 处理可溶性蛋白质量分数低于对照且达显著差异。结果表明,Se、S 处理随着时间的增加,能影响青花菜幼苗体内的可溶性糖与可溶性蛋白质量分数,且较低浓度的 Se、S 配合能显著增加其质量分数,高浓度则显著降低其质量分数。

表 1 硒、硫互作对青花菜幼苗可溶性糖质量分数的影响

Table 1 Effect of interaction between selenium and sulfur on soluble sugar mass fraction of broccoli seedlings %				
处 理 Treatment	处理时间/d Treatment time			
	0	4	8	12
S0Se0	2.00±0.01 a	1.93±0.010 bcd	1.95±0.01 cd	1.96±0.02 cd
S0Se5	1.98±0.02 a	1.97±0.010 abc	1.98±0.01 bc	2.00±0.03 bc
S0Se10	1.99±0.02 a	1.99±0.028 a	2.01±0.04 b	2.03±0.02 b
S0Se20	1.98±0.07 a	1.92±0.010 cde	1.92±0.01 de	1.89±0.03 ef
S1Se0	1.97±0.02 a	1.98±0.010 ab	1.99±0.01 bc	2.01±0.01 bc
S1Se10	2.00±0.02 a	2.00±0.024 a	2.07±0.01 a	2.14±0.03 a
S1Se20	1.98±0.06 a	1.92±0.010 cde	1.93±0.01 de	1.92±0.01 de
S1Se100	1.97±0.10 a	1.92±0.030 cde	1.90±0.01 de	1.86±0.01 f
S5Se20	1.98±0.03 a	1.89±0.010 de	1.88±0.01 e	1.85±0.01 f
S10Se20	1.95±0.05 a	1.88±0.010 e	1.87±0.02 e	1.83±0.01 f

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

表 2 硒、硫互作对青花菜幼苗可溶性蛋白质质量分数的影响

Table 2 Effect of interaction between selenium and sulfur on soluble protein mass fraction of broccoli seedlings mg/g				
处 理 Treatment	处理时间/d Treatment time			
	0	4	8	12
S0Se0	46.02±1.06 a	53.35±0.27 bcd	56.02±0.26 c	59.28±0.33 c
S0Se5	45.81±0.94 a	54.14±0.36 abc	57.47±0.33 b	60.81±0.52 b
S0Se10	46.50±1.19 a	54.95±0.59 a	58.17±0.10 b	61.83±0.27 b
S0Se20	46.90±0.46 a	52.90±0.28 cd	54.27±0.46 de	57.99±0.36 d
S1Se0	44.89±1.28 a	54.39±0.57 ab	57.95±0.27 b	60.95±0.31 b
S1Se10	45.87±0.93 a	55.24±0.67 a	59.21±0.50 a	63.79±0.45 a
S1Se20	44.69±0.30 a	53.03±0.38 bcd	55.04±0.37 d	58.26±0.36 d
S1Se100	44.58±1.02 a	52.24±0.47 d	53.57±0.32 e	57.33±0.16 d
S5Se20	44.47±0.99 a	50.47±0.25 e	51.69±0.23 f	55.90±0.16 e
S10Se20	44.40±0.74 a	49.73±0.27 e	51.31±0.14 f	54.64±0.24 f

由图 3 可知,在无硫或普通硫处理下,青花菜幼苗体内脯氨酸质量分数随硒浓度的增加呈先增大后减少的趋势,并分别于 S0Se10、S1Se10 处理下出现无硫、普通硫不同硒浓度处理结果中的最大值。说明补硒能促进植物积累脯氨酸,从而提

高抗逆性,但补硒超过一定浓度也会对植物积累脯氨酸造成一定的负面影响。高硒水平下,青花菜幼苗体内脯氨酸质量分数随硫浓度的增加呈先增大后减小的趋势,在 S1Se20 时出现高硒不同硫浓度处理结果中的最大值,说明高硒处理下,一定

浓度的硫能促进植物体内脯氨酸积累,而硫浓度过高则抑制植物积累脯氨酸。与对照相比,S0Se5、S0Se10、S1Se0、S1Se10 处理下,脯氨酸质量分数较高且达显著差异,S0Se20、S1Se100、S5Se20、S10Se20 的脯氨酸质量分数较低且达显著差异。

2.2 硫、硒互作对青花菜幼苗抗氧化酶活性的影响

图 4、图 5、图 6 显示,在无硫或普通硫(S1)处理下,随硒浓度的增加,CAT、POD、SOD 3 种酶的活性逐渐增大,随时间的增加酶活性逐渐增强,3 种酶均在相同处理时间分别于 S0Se10、S1Se10 处理下出现试验中无硫、普通硫不同硒浓度处理结果中的最大值,显著高于对照,且随时间变化,CAT 活性差异越来越明显;高硒(Se20)水平下,CAT 活性随硫浓度的增加呈先增加后降低趋势,在 S1Se20 时出现高硒不同硫浓度处理结果中的最大值,除第 12 天与对照无显著差异,但 S1Se20、S0Se20 处理 CAT 活性却显著高于

S5Se20、S10Se20;高硒水平下,SOD、POD 活性的变化与 CAT 变化基本相似。与对照相比,S1Se10 处理 CAT 活性最高且差异显著,随着时间的增加,S0Se10、S1Se0 处理的 CAT 活性显著高于对照,S0Se5 处理 CAT 活性高于对照却无显著差异,S0Se20、S5Se20 处理 CAT 活性低于对照差异显著,S1Se20、S1Se100 处理 CAT 活性低于对照于第 8 天达显著差异。就 POD 活性而言,S0Se5、S1Se0、S1Se20 与 S0Se0 相比有差异却未达显著,S1Se10、S0Se10 显著高于 S0Se0,而 S0Se20、S1Se100、S5Se20、S10Se20 显著低于 S0Se0。就 SOD 活性而言,S0Se5、S1Se0、S1Se20 与 S0Se0 相比有差异却未达显著,S1Se10、S0Se10 显著高于 S0Se0,而 S0Se20、S1Se100、S5Se20、S10Se20 显著低于 S0Se0。结果表明,低浓度的硒硫配合处理能有效提高青花菜幼苗的抗氧化能力,高浓度处理则易发生胁迫作用。

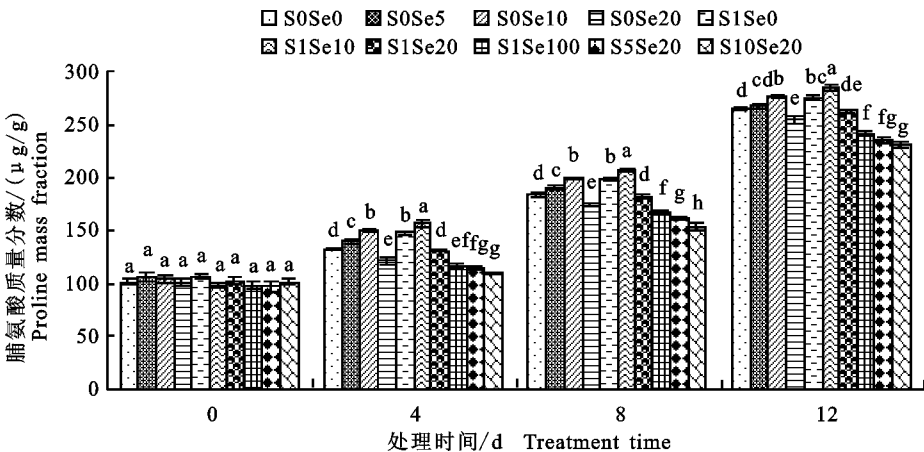


图 3 硒、硫互作对青花菜幼苗脯氨酸质量分数的影响

Fig. 3 Effect of interaction between selenium and sulfur on proline mass fraction of broccoli seedlings

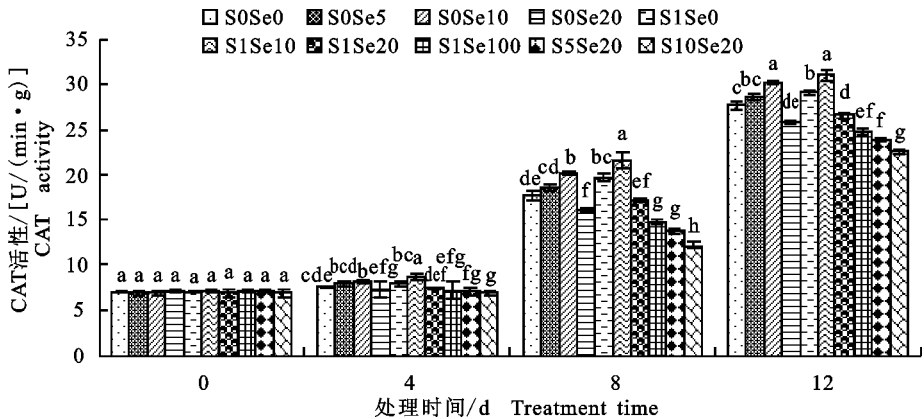


图 4 硒、硫互作对青花菜幼苗 CAT 活性的影响

Fig. 4 Effect of interaction between selenium and sulfur on CAT activity of broccoli seedlings

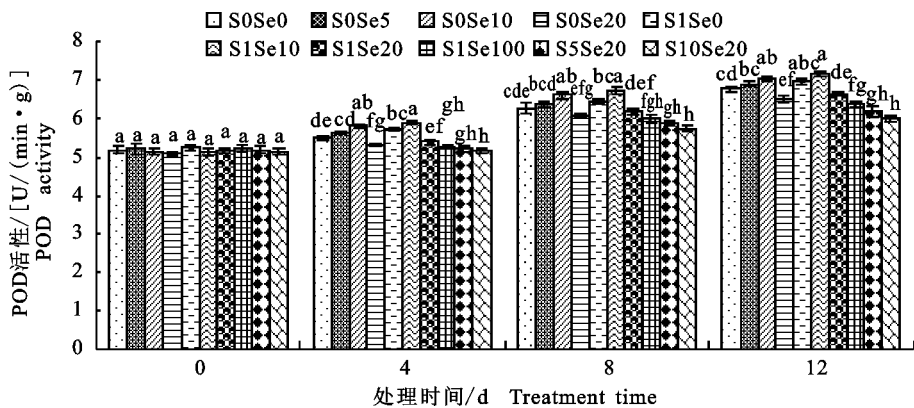


图 5 硒、硫互作对青花菜幼苗 POD 活性的影响

Fig. 5 Effect of interaction between selenium and sulfur on POD activity of broccoli seedlings

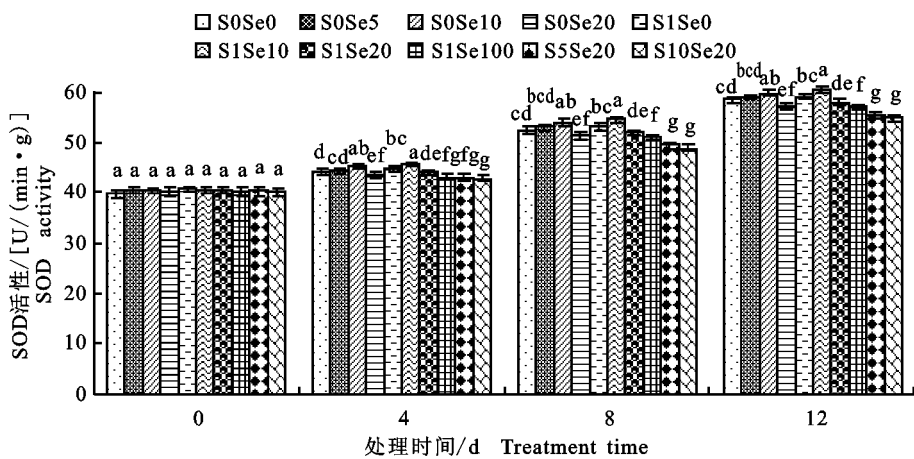


图 6 硒、硫互作对青花菜幼苗 SOD 活性的影响

Fig. 6 Effect of interaction between selenium and sulfur on SOD activity of broccoli seedlings

3 讨论

过氧化物 MDA 是膜脂过氧化指标之一,可反映植物细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件适应的强弱;相对电导率的大小可用来衡量细胞膜透性的大小,相对电导率越高,细胞膜完整性遭到破坏的程度就越大,细胞膜的透性程度也就越大。李瑞平等^[23]研究表明,施用 5 mg/L 硒能显著降低汞胁迫下小麦的 MDA 质量摩尔浓度,而 10 mg/L 处理则使 MDA 质量摩尔浓度升高。Zembala 等^[24]研究表明,硒可以通过减轻小麦镉胁迫下细胞质膜受伤害的程度,即减轻镉对细胞质膜破坏性生理影响保护小麦免受镉胁迫。可溶性糖是光合作用的直接产物,是植物体内碳代谢的重要产物,其含量多少反映植物的生长水平。一定浓度范围内的硒促进青花菜幼苗可溶性蛋白质质量分数的增加,而硒浓度增大后,对青花菜幼苗造成胁迫,使得青花菜幼苗可溶性蛋白合成减少

或者青花菜幼苗为了缓解胁迫以致蛋白质被蛋白水解酶水解,从而降低青花菜幼苗可溶性蛋白质质量分数。适量硒硫比能促进硒硫发挥其功效,进而促进植株生长,促进蛋白质合成;而硒硫比不合适导致硒硫相互抑制,对青花菜幼苗造成胁迫,进而使得可溶性蛋白合成减少或者引起青花菜幼苗抵抗胁迫而水解蛋白质。夏永香等^[25]研究发现,叶面喷施亚硒酸钠溶液可显著提高叶片中可溶性糖、可溶性蛋白质质量分数。在低硫水平下,适量硒浓度均能提高芥菜可溶性糖、可溶性蛋白质质量分数^[15],增施硫硒肥也能显著提高茎瘤芥的粗蛋白与可溶糖质量分数^[26]。李海云等^[27]研究认为,施硫能提高大白菜叶片可溶性蛋白及可溶性糖质量分数,降低 MDA 质量摩尔浓度。脯氨酸作为植物蛋白质的组成成分,是一种植物渗透调节物质,其含量在一定程度上可以反映植物的抗逆性,测定脯氨酸含量可以在一定范围内反映出硒硫配施对青花菜幼苗的促进或者抑制作用以及是否合

理。薛瑞玲等^[28]研究指出,施少量的硒能诱导小白菜体内脯氨酸的产生且质量分数与外源 Se (IV)浓度呈极显著正相关。本试验中,单硒与普通硫处理下,青花菜幼苗叶片的 MDA 质量摩尔浓度、相对电导率随硒浓度的增加呈先减小后增大的趋势,并在硒浓度为 $10 \mu\text{mol/L}$ 时出现最小值,且随生长时间的增加变化趋势越来越明显,这说明高浓度硒对青花菜幼苗有胁迫作用,进而加剧了青花菜幼苗叶片的膜脂过氧化水平;可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸质量分数伴随硒浓度的增加呈先增大后减小的趋势,并在硒浓度为 $10 \mu\text{mol/L}$ 时出现最大值。据 Rios 等^[29]发现,植物中硒在代谢过程中形成的半胱氨酸(Cys)可能主要用于形成有机硫酸盐化合物,具有降低硒的毒性作用。本试验中, $20 \mu\text{mol/L}$ 硒处理下,随硫浓度的增加青花菜幼苗 MDA 质量摩尔浓度、相对电导率呈先减小后增大,可溶性糖、可溶性蛋白质量分数和脯氨酸质量浓度随硫浓度的增加呈先增大后减小,这些与已有研究结果相似。

硒在高等植物中具有抗氧化功能,其组成谷胱甘肽过氧化物酶的必需成分,影响植物体内抗氧化物质的合成^[15]。研究证明,亚硒酸盐影响植物代谢途径,其诱导植物产生氧化应激作用,可能提高植物耐硒和积累^[30]。Yu 等^[31]发现硒富集绿茶比普通绿茶具有较高的抗氧化活性。刘群龙等^[6]认为低浓度的硒可能通过提高 SOD、GSH-Px 等酶的活性参与叶片衰老进程的调控。Lyi 等^[32]发现青花菜中 Se-甲基硒代半胱氨酸(SeM-SC)积累与青花菜硒甲基蛋氨酸合成酶(BoSMT)的基因表达与总硒位置密切相关,高浓度硫酸盐抑制硒摄取。尚庆茂等^[33]研究表明,外源硒可以提高辣椒叶片的 SOD、POD 和 CAT 等活性。硒与镉还可能产生协同作用,提高谷胱甘肽-抗坏血酸代谢相关酶的活性,证明利用低浓度外源硒能提高种子对镉的耐受性,增强抗氧化防御和丙酮醛解毒系统^[34]。硫作为植物所需的中量元素及植物蛋白质、氨基酸的组成成分,是酶化反应活性中心的必需元素。经水稻耐重金属试验发现,硫通过激活抗氧化酶类活性迅速增加可消除胁迫产生的膜脂过氧化胁迫^[35]。刘中良等^[36]水培大蒜试验也表明,在一定浓度范围内,增加营养液中硫的浓度可提高大蒜叶片保护酶(SOD、POD、CAT)的活性,从而有效减缓叶片的衰老速度。本试验研究表明,低浓度的硒能提高青花菜幼苗

叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性,而高浓度硒则抑制 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶的活性,3 种酶活性最大值均出现在硒浓度为 $10 \mu\text{mol/L}$ 时,随时间的增加酶活性有较大幅度的提高;S1Se10 组合的硒硫配施能显著提高 SOD、POD 和 CAT 的活性,且显著高于 S0Se0 的酶活性;S5Se20、S10Se20 组合的硒硫配施处理下,SOD、POD 和 CAT 活性显著低于对照的酶活性。王越等^[37]研究同样表明,硫肥配合低浓度的硒能显著提高蒜苗叶片的 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶的活性,高浓度的硒配合硫肥处理的蒜苗酶活性较对照也能明显提高,但促进作用不及低硒水平,这与本研究结果相似。

综上所述,硒硫配施影响青花菜幼苗渗透调节系统及抗氧化酶活性,低浓度的硒硫配合能提高青花菜幼苗的抗逆性与部分品质,在高硒情况下,增施少量硫能一定程度上缓解硒胁迫,其中施用 1 mmol/L S 、 $10 \mu\text{mol/L Se}$ 可作为生产中青花菜富硒栽培的参考。硒在植物体中的吸收转化,及硒硫配施在青花菜中硒及含硒蛋白含量的影响及其复杂相互作用还有待进一步研究。

参考文献 Reference:

- [1] RAYMAN M P. The importance of selenium to human health[J]. *Lancet*, 2000, 356(9225): 233-241.
- [2] 张雯,耿增超. 外源硒对蔬菜硒积累和产量品质影响的研究现状[J]. *园艺学报*, 2012, 39(9): 1749-1756.
ZHANG W, GENG Z CH. Research progress regarding the effect of exogenous selenium on vegetables[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39(9): 1749-1756.
- [3] SORS T G, ELLIS D R, SALT D E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants[J]. *Photosynthesis Research*, 2005, 86(3): 373-389.
- [4] 张华华,康玉凡,葛军勇,等. 土壤施硒对蚕豆出苗及生长指标的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(1): 57-62.
ZHANG H H, KANG Y F, GE J Y, et al. Effect of selenium on emergence and growth parameters of fava bean (*Vicia faba* L.) [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2014(1): 57-62.
- [5] 王永勤,曹家树,李建华,等. 施硒对大蒜产量和含硒量的影响[J]. *园艺学报*, 2001, 28(5): 425-429.
WANG Y Q, CAO J SH, LI J H, et al. Effect of selenium application on the yield of garlic and its selenium mass fraction [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2001, 28(5): 425-429.
- [6] 刘群龙,王朵,吴国良,等. 硒对酥梨叶片衰老及抗氧化酶系统的影响[J]. *园艺学报*, 2011, 38(11): 2059-2066.
LIU Q L, WANG D, WU G L, et al. Effects of selenium on leaf senescence and antioxidant system in *Pyrus bretschnei*

- der 'DangshanSuli' [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(11):2059-2066.
- [7] 铁 梅,韩 杰,李宝瑞,等.土壤施硒对黑豆和黄豆硒质量分数及产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(10):90-96.
- TIE M, HAN J, LI B R, *et al.* Effects of selenium fertilization on the yield and selenium mass fraction of black soya beans and soya [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(10):90-96.
- [8] FREEMAN J L, TAMAOKI M, STUSHNOFF C, *et al.* Molecular mechanisms of selenium tolerance and hyperaccumulation in *Stanleya pinnata* [J]. *Plant Physiology*, 2010, 153(4):1630-1652.
- [9] QUINN C F, PRINS C N, FREEMAN J L, *et al.* Selenium accumulation in flowers and its effects on pollination [J]. *New Phytologist*, 2011, 192(3):727-737.
- [10] 许 洁. 硫营养对环境胁迫下作物一些生理特性的影响 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2007.
- XU J. Effect of sulfur nutrition on physiology parameters of crops under environmental stress [D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2007.
- [11] 杨凤娟,刘世琦,王秀峰,等.硫对大蒜生理生化指标及营养品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11):2095-2098.
- YANG F J, LIU SH Q, WANG X F, *et al.* Effects of sulfur on physiological and biochemical indices and nutrition quality of garlic [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11):2095-2098.
- [12] 李 冰,王昌全,周 瑾,等.紫色土增施单质硫对大蒜生长发育和硫素营养的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35(5):608-611.
- LI B, WANG CH Q, ZHOU J, *et al.* Effect of sulphur applied on the purple soil on the growth and sulfur nutrition of garlic (*Allium Sativum* L.) [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5):608-611.
- [13] LIU X, ZHAO Z, DUAN B, *et al.* Effect of applied sulphur on the uptake by wheat of selenium applied as selenite [J]. *Plant and Soil*, 2015, 386(1):35-45.
- [14] STROUD J L, LI H F, LOPEZ-BELLIDO F J, *et al.* Impact of sulphur fertilization on crop response to selenium fertilization [J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1):31-40.
- [15] 李 娟,朱祝军. 硒硫处理对叶用芥菜品质及抗氧化物质的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2007, 33(5):539-543.
- LI J, ZHU ZH J. Effects of selenium and sulfur treatments on nutritional quality and antioxidant substances of leaf mustard [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2007, 33(5):539-543.
- [16] 王昌全,李 冰,周 瑾,等. 硒硫配施对大蒜的营养效应研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(2):206-211.
- WANG CH Q, LI B, ZHOU J, *et al.* Study of selenium-sulphur combined application on nutrition function of garlic [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2):206-211.
- [17] 孙 勃,许映君,徐铁锋,等. 青花菜不同器官生物活性物质和营养成分的研究[J]. *园艺学报*, 2010, 37(1):59-64.
- SUN B, XU Y J, XU T F, *et al.* Variation of bioactive compounds and nutrients among different organs of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Planck) [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(1):59-64.
- [18] FELKER P, BUNCH R, LEUNG A M. Concentrations of thiocyanate and goitrin in human plasma, their precursor concentrations in brassica vegetables, and associated potential risk for hypothyroidism [J]. *Nutrition Reviews*, 2016, 74(4):248-258.
- [19] 王晋民,赵之重,段 冰. 叶面施硒对不同蔬菜硒富集和产量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(7):103-106.
- WANG J M, ZHAO ZH ZH, DUAN B. Effect of selenium applications on the selenium accumulation and yield on several kinds of vegetables [J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(7):103-106.
- [20] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京:中国农业出版社, 2011.
- GUO SH R. Science of Soilless Culture [M]. Beijing, China Agriculture Press, 2011.
- [21] 刘家尧,刘 新. 植物生理学实验教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2010.
- LIU J Y, LIU X. Plant Physiology Experiment Instruction [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [22] 张以顺,黄 霞,陈云凤. 植物生理学实验教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2009.
- ZHANG Y SH, HUANG X, CHEN Y X. Plant Physiology Experiment Instruction [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [23] 李瑞平,李光德,袁宇飞,等. 硒对汞胁迫小麦幼苗生理特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(5):975-979.
- LI R P, LI G D, YUAN Y F, *et al.* Effects of Se on some physiological characteristics of wheat seedling under Hg stress [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(5):975-979.
- [24] ZEMBALA M, FILEK M, WALAS S, *et al.* Effect of selenium on macro- and microelement distribution and physiological parameters of rape and wheat seedlings exposed to cadmium stress [J]. *Plant and Soil*, 2010, 329(1):457-468.
- [25] 夏永香,刘世琦,李 贺,等. 硒对大蒜生理特性、含硒量及品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3):733-741.
- XIA Y X, LIU SH Q, LI H, *et al.* Effects of selenium on physiological characteristics, selenium mass fraction and quality of garlic [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3):733-741.
- [26] 王丽霞,汤举红,罗庆熙,等. 硫硒配施对茎瘤芥生长和营

- 养效应的研究[J]. 西北植物学报. 2012, 32(5): 1002-1006.
- WANG L X, TANG J H, LUO Q X, *et al.* Effect of sulfur and selenium combination on the growth and nutrition of tuber mustard [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(5): 1002-1006.
- [27] 李海云, 孙 洁. 硫对大白菜幼苗抗冷性的影响[J]. 西北农业学报, 2008, 17(5): 263-266.
- LI H Y, SUN J. The effect of sulfur on the cold resistance of Chinese cabbage seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2008, 17(5): 263-266.
- [28] 薛瑞玲, 梁东丽, 吴雄平, 等. 亚硒酸钠和硒酸钠对小白菜生长生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(5): 974-980.
- XUE R L, LIANG D L, WU X P, *et al.* Effects of selenite and selenate on growth and physiological characteristics of pakchoi[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(5): 974-980.
- [29] RÍOS J J, BLASCO B, CERVILLA L M, *et al.* Regulation of sulphur assimilation in lettuce plants in the presence of selenium[J]. *Plant Growth Regulation*, 2008, 56(1): 43-51.
- [30] DIMKOVIKJ A, VAN HOEWYK D. Selenite activates the alternative oxidase pathway and alters primary metabolism in *Brassica napus* roots; evidence of a mitochondrial stress response[J]. *BMC Plant Biology*, 2014, 14(1): 259.
- [31] YU F, SHENG J, XU J, *et al.* Antioxidant activities of crude tea polyphenols, polysaccharides and proteins of selenium-enriched tea and regular green tea[J]. *European Food Research and Technology*, 2007, 225(5): 843-848.
- [32] LYI S M. Molecular and biochemical characterization of the selenocysteine Se-Methyltransferase gene and Se-Methyl selenocysteine synthesis in broccoli [J]. *Plant Physiology*, 2005, 138(1): 409-420.
- [33] 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.
- SHANG Q M, CHEN SH F, ZHANG ZH G. Regulation of selenium on antioxidative enzymes activity in pepper leaves under high temperature stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2005, 32(1): 35-38.
- [34] HASANUZZAMAN M, HOSSAIN M A, FUJITA M. Exogenous selenium pretreatment protects rapeseed seedlings from cadmium-induced oxidative stress by upregulating antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems [J]. *Biological Trace Element Research*, 2012, 149(2): 248-261.
- [35] 王海鸥, 钟广蓉, 徐海洋, 等. S元素对水稻耐重金属Cu毒性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2319-2324.
- WANG H O, ZHONG G R, XU H Y, *et al.* Effect of sulfate on copper toxicity to rice seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2319-2324.
- [36] 刘中良, 刘世琦, 张自坤, 等. 硫对设施水培大蒜光合特性和鳞茎品质的影响[J]. 园艺学报, 2010, 37(4): 581-588.
- LIU ZH L, LIU SH Q, ZHANG Z K, *et al.* Effects of sulfur mass fraction in nutrient solution on photosynthetic characteristics and quality of garlic[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(4): 581-588.
- [37] 王 越. 硒、硫对大蒜生理特性及品质的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2014.
- WANG Y. Effect of selenium and sulfur on the physiological characteristic and quality of garlic[D]. Tai'an Shandong: Shandong Agricultural University, 2014.

Effect of Interaction between Selenium and Sulfur on Osmotic Regulation and Antioxidant Enzymes of Broccoli Seedlings

CHENG Kai^{1,2}, HE Mao¹, HUANG Zhi¹, XU Weiping¹ and LAI Yan¹

(1. College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. College of Agronomy, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract Ten interactions of different selenium(Se) and sulfur(S) of activities of the anti-oxidative enzymes and the mass fraction s of osmosis-regulating substances in seedlings of broccoli(*Brassica oleracea* L. var. *italiea*) were evaluated to provide the basis for the cultivation of the broccoli containing selenium. The results showed that the activities of antioxidant enzymes (CAT, POD, SOD) were improved significantly with treatment of 1 mmol/L S and 10 μ mol/L Se(S1Se10) compared with control group (S0Se0, without S or Se). The enzyme activities were increasingly enhanced with time going on. There sults significant increased mass fraction of the soluble sugar, the soluble protein and the proline, mean while the results significant decreased in the malondialdehyde (MDA) molality and the relative conductivity. Under the treatment of selenium stress (20 μ mol/L) with the high concentration

of sulfur(5,10 mmol/L),three antioxidant enzymes were inhibited, the MDA molality and the relative conductivity increased, mass fraction of the soluble sugar, the soluble protein and the proline decreased, and the stress effect was more obvious. S1Se10 treatment significantly increased the antioxidant capacity of broccoli seedlings, and it could protect the stability of cell membrane and improve the stress resistance, hence, it provided references for production of broccoli.

Key words Broccoli; Selenium; Sulfur; Antioxidative systems; Osmotic regulation

Received 2017-06-20 **Returned** 2017-08-20

Foundation item Supported by Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars(No. 2016);MOHRSS and Foundation of Sichuan Agricultural University(No. 2016).

First author CHENG Kai,male,master student. Research area:physiology and biochemistry of vegetable. E-mail:cheng0406kai@163.com

Corresponding author HUANG Zhi, male, Ph. D. associate professor. Research area: protected horticulture. E-mail: dr. huangzhi@qq.com

(责任编辑:史亚歌 **Responsible editor:SHI Yage**)



苹果逆境生物学团队揭示自噬在提高苹果抗低氮胁迫中的调控机制

近日,中科院生物学一区 and TOP 期刊 *Plant Cell and Environment* (IF=6.173)在线发表了我校园艺学院旱区作物逆境生物学国家重点实验室苹果逆境生物学团队的论文“*MdATG18a* overexpression improves tolerance to nitrogen deficiency and regulates anthocyanin accumulation through increased autophagy in transgenic apple”,博士生孙逊为该论文第一作者,马锋旺教授为通讯作者。该工作阐明了苹果 *MdATG18a* 基因在低氮胁迫下能够增强植株抗性并且通过降解淀粉提高可溶性糖含量来改善花青苷含量。

自噬被认为在细胞寿命调节和通过降解细胞冗余或受损的细胞器来重新利用营养物质过程中起到关键作用,但是自噬调控低氮条件下花青苷积累的机制仍不清楚。作者前期研究发现苹果自噬相关基因 *MdATG18a* 能够转录响应低氮胁迫,并且在苹果中过表达能够增强植株的抗旱性。在本研究中,作者探究了 *MdATG18a* 响应低氮胁迫下的生物学功能。研究发现,苹果中过表达 *MdATG18a* 能够显著提高植株对低氮胁迫的抗性和花青苷的积累。转基因苹果植株的花青苷的积累是由于过表达 *MdATG18a* 上调了黄酮类物质合成和调控基因的表达及可溶性糖含量来实现的。过表达 *MdATG18a* 增强了转基因苹果植株中淀粉的降解并且伴随着淀粉酶以及可溶性糖合成相关基因表达的上调。此外,*MdATG18a* 通过上调硝酸还原酶和高亲和性硝酸盐转运蛋白基因的表达来提高转基因植株对硝酸盐的吸收与同化能力。低氮胁迫下,过表达 *MdATG18a* 提高了其他一些重要自噬基因的表达和自噬体的形成。这说明,过表达 *MdATG18a* 通过增强自噬活性来提高花青苷的积累并增强苹果植株对低氮胁迫的抗性。

该研究得到国家自然科学基金和国家苹果产业技术体系的资助。

原文链接:<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/pce.13110/epdf>

(西北农林科技大学 园艺学院 孙光丽,李春梅)