

朱磊,胡婷,刘德明,等.叶面喷施硒对萝卜硒吸收及抗氧化能力的影响[J].江苏农业科学,2019,47(3):127-131.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.03.032

# 叶面喷施硒对萝卜硒吸收及抗氧化能力的影响

朱磊<sup>1</sup>,胡婷<sup>2</sup>,刘德明<sup>3</sup>,向昌国<sup>1</sup>

(1. 吉首大学林产化工工程湖南省重点实验室,湖南张家界 427000;2. 中国农业大学资源与环境学院/生物多样性与有机农业北京市重点实验室,北京 100193;3. 湖南农业大学分析测试中心,湖南长沙 410005)

**摘要:**以华灵高科笋都四季满身红萝卜为试验材料,采用盆栽试验,设置 6 个施硒组分(0、0.5、2.5、10.0、20.0、40.0 mg/L)分别在叶旺盛生长期、块根膨大期、成熟期叶面喷施亚硒酸钠,研究叶面施硒浓度对萝卜生长、硒吸收和转化、硒形态分布以及对萝卜抗氧化能力的影响。结果表明,2.5 mg/L 硒处理提高了萝卜果实产量,40.0 mg/L 硒处理对萝卜果实生长具有抑制作用。随着叶面施硒浓度增加,萝卜叶子和果实中硒含量显著增加,且含量最高分别达到 6.37、0.63 mg/kg。硒在萝卜叶子中主要以硒代蛋氨酸(SeMet)形式存在,含量为 1.51 mg/kg;萝卜果实中硒主要以硒代胱氨酸(SeCys<sub>2</sub>)存在,含量为 0.29 mg/kg。与对照组相比,2.5 mg/L 处理组谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性增加了 106.26% ( $P < 0.05$ ),过氧化物酶(POD)活性增加了 14.87% ( $P < 0.05$ ),超氧化物歧化酶(SOD)活性无显著变化。适宜浓度的外源施硒能够增加萝卜产量、提高萝卜硒含量和增强抗氧化能力。因此,叶面施硒浓度 2.5 mg/L 为萝卜最佳施用量。

**关键词:**亚硒酸钠;萝卜;硒形态;抗氧化能力;叶面喷施

**中图分类号:** S631.106 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)03-0127-05

硒是人体所必需的微量元素之一<sup>[1]</sup>,具有抗氧化、抗炎、抗肿瘤、增强人体免疫力和拮抗重金属等生理功能<sup>[2-4]</sup>。人体缺硒会导致多发性硬化症、肌肉萎缩症、心脏病、免疫系统受损、癌症和生殖系统疾病等<sup>[5]</sup>。全球约有 29 个国家存在缺硒现象<sup>[6]</sup>,我国有约 72% 的地区属于缺硒地区,约 7 亿人口有着不同程度的硒摄入量不足的情况<sup>[7]</sup>。中国营养学会规定成年人膳食硒摄入量最少为 40 μg/d,可耐受最大量为 400 μg/d<sup>[8]</sup>。

硒不是高等植物所必需的微量元素,但适宜浓度的硒能促进植物生长<sup>[9]</sup>。适宜浓度的外源施硒能够促进十字花科植物生长,提高产量,硒浓度过高会对植物产生毒害作用,抑制植物生长<sup>[10-12]</sup>。这可能是适宜浓度补硒增加了植物对硫元素的吸收转运、抗氧化活性,减少了脂质过氧化和食草性昆虫对植物的迫害<sup>[13-15]</sup>。硒对植物的毒域范围取决于物种和环境,影响植物吸收硒能力的主要因素是基因遗传其次是生物因素,如环境条件(微生物群落)和硫、氮等元素之间的相互作用<sup>[16]</sup>。硒能够参与合成硒代半胱氨酸且是一些硒蛋白酶的活性中心<sup>[17]</sup>。谷胱甘肽过氧化物酶能够通过降低过氧化氢、有机氢过氧化物、磷脂有机过氧化物含量来增强植物抗氧化能力<sup>[18]</sup>。研究发现,适宜浓度外源硒能够提高植物谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、过氧化物酶(POD)、超氧

化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶活性从而增强植物的抗氧化能力,防止细胞氧化损伤<sup>[19-21]</sup>。

近年来,以植物为基料作为富硒源是一种较为安全的补硒方式,植物通过吸收和转化将无机硒转为人能够吸收的安全有效的有机硒,从而满足人体日常膳食需求。有研究表明,富硒土壤地区生长的植物未达到富硒标准可能是土壤本底重金属含量过高拮抗硒的吸收、土壤中硒活化率较低、不同物种对硒的吸收能力差异等因素造成的<sup>[22-24]</sup>。蔬菜是人类日常膳食最常见的食物,其中十字花科类的蔬菜具有较强的富硒能力,如芥菜、小白菜、萝卜等。萝卜(*Raphanus sativus* L.)属一、二年生蔬菜作物,南北方皆可栽培,为重要的经济作物,叶果皆可食用。以蔬菜作为人类补硒来源,研究其对硒的吸收转化和抗氧化能力,具有非常大的科学意义。

基于植物在天然富硒地区对硒的吸收效率较低的现象,本研究通过叶面喷施硒来干预富硒地区植物对硒吸收及利用效率,揭示叶面施硒对萝卜根际根围土壤中硒的动态分布的影响以及硒对萝卜生长、硒吸收与转化及抗氧化能力的影响。本试验通过对萝卜叶面喷施不同浓度梯度的亚硒酸钠的方式,探究外源施硒对萝卜生长、硒吸收转化和抗氧化能力的影响,从而确定最佳叶面施硒浓度,为富硒萝卜生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为盆栽萝卜(*Raphanus sativus* L.),品种为华灵高科笋都四季满身红。盆栽土壤采自湖南省张家界市永定区富硒地区<sup>[25]</sup>,土壤本底全硒含量为 1.67 mg/kg。

### 1.2 试验设计

盆栽试验于 2017 年 10 月至 2018 年 1 月在张家界市永

收稿日期:2018-07-12

基金项目:生态旅游湖南省重点实验室开放性课题(编号:JDZ201706);吉首大学科研项目(编号:JDY44)。

作者简介:朱磊(1993—),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事富硒食品开发研究。E-mail:zhulei132412@163.com。

通信作者:向昌国,博士,教授,主要从事旅游生态和土壤生态研究。

E-mail:changguox@aliyun.com。

定区林产化工工程湖南省重点实验室进行。试验共设 6 个处理,分别为 0、0.5、2.5、10.0、20.0、40.0 mg/L,每个处理 10 个重复。盆栽试验采用上口内径为 29 cm,下口内径为 19 cm,高为 23 cm 的不透光圆柱形塑料花盆,每盆装土 10 kg,定苗为 4 株。分别在萝卜(叶旺盛生长期、块根膨大期、成熟期)叶面正反共喷 3 次亚硒酸钠溶液,间隔时间为 10 d,每次每盆喷施 10 mL,以喷纯水为对照组,选阴天或晴天 16:00 后施喷。2018 年 1 月 18 日萝卜成熟,共培养 90 d,每盆选择 2 株代表性植株,整株收获。用蒸馏水清洗干净,拍照记录,以叶子和果实来检测萝卜总硒含量、硒形态和抗氧化能力。

### 1.3 测定方法

**1.3.1 萝卜总硒含量测定** 参照国家标准(GB 5009.93—2017《食品安全国家标准 食品中硒的测定》)将采集到的萝卜叶子和果实先用自来水充分洗净后,再用超纯水反复冲洗干净,放入 70 ℃ 烘箱中烘干,粉碎后过 60 目筛制成样品,精确称取 0.200 0 g,加 6 mL 硝酸冷浸过夜,加 2 mL  $H_2O_2$ ,电热板上消解至澄清,再加 3 mL 6 mol/L 盐酸消解 0.5 h。冷却后从电热板取下,定容至 25 mL 容量瓶,利用 SA-10 氢化物发生-原子荧光法测定<sup>[26]</sup>。

**1.3.2 土壤总硒含量测定** 参照(NY/T 1104—2006《土壤中全硒的测定》)将萝卜盆栽所用土壤放入 70 ℃ 烘箱中烘干,粉碎后过 60 目筛制成样品,精确称取 0.200 0 g,加 5 mL 硝酸冷浸过夜,再加 5 mL 高氯酸,电热板上消解至澄清,再加 3 mL 6 mol/L 盐酸消解 0.5 h。冷却后从电热板取下,定容至 25 mL 容量瓶,利用 SA-10 氢化物发生-原子荧光法测定。

**1.3.3 硒形态测定** 参照文献[27—28]将冷冻干燥后的萝卜鲜样粉碎,过 60 目筛,取 0.500 0 g 于离心管中,称取 8 mg 链霉菌蛋白酶 E 溶于 10 mL 水,加入到离心管中,混匀,37 ℃ 恒温水浴振荡提取 24 h。上述提取完成,12 000 r/min 离心 10 min,取上清液,过 0.22  $\mu$ m 有机滤膜,再利用 SA-10 液相色谱-原子荧光形态分析仪(HPLC-HG-AFS)进行测定。

**1.3.4 抗氧化能力测定** 称取新鲜萝卜叶 3.000 0 g,在冰

冷的生理盐水中漂洗干净,用滤纸擦干,在冰水浴中剪碎萝卜叶子,放入研钵,配置 30 mL 0.86% 冷生理盐水作为匀浆介质,倒 1/3 于研钵使萝卜叶子充分研碎,制成匀浆,再用剩余 2/3 冷生理盐水冲洗残留在研钵上的萝卜匀浆,得到 10% 萝卜叶子匀浆,在 3 000 r/min 离心 15 min 取上清液测定谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性,分别在 412、420、550 nm 波长条件下测定其吸光度,显色过程和计算方法均参照南京建成试剂盒说明方法进行,以上 3 种抗氧化酶活性测定均重复 3 次,结果取平均值。

### 1.4 数据分析

采用软件 Excel 2010、Origin 8.5 软件进行数据处理分析,SAS 9.2 Duncan's 新负极差法进行多重比较。

转移系数(TF)是元素转移到植物体内及在植株不同部位间转移的效率。本研究以萝卜果实和叶片硒含量的比值来表示转移系数的大小。萝卜硒转移系数=萝卜果实硒含量/萝卜叶片硒含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶面喷施亚硒酸钠对萝卜生长发育的影响

叶面喷施亚硒酸钠对萝卜生长的影响结果如图 1 所示,结果表明,0(对照组)、0.5、2.5 mg/L 硒处理组的萝卜叶色葱绿,果实壮硕,长势较好。而 10.0、20.0、40.0 mg/L 硒处理组萝卜叶片微卷,且 40.0 mg/L 处理组果实矮小,切开果肉发紫,出现一定的病变症状。

叶面喷施亚硒酸钠对萝卜生物量的影响如图 2 所示,结果表明,与对照组相比,0.5、2.5 mg/L 硒处理组果实生物量有一定的提高,分别增加了 7.49%、7.61%;40.0 mg/L 硒处理组果实的生物量降低了 38.91%,但与对照差异不显著。随着叶面喷施亚硒酸钠的浓度增加,萝卜叶生物量无显著变化,但萝卜果实生物量呈降低趋势,且 40.0 mg/L 处理组萝卜果实生物量与 0.5、2.5 mg/L 硒处理组相比显著降低。

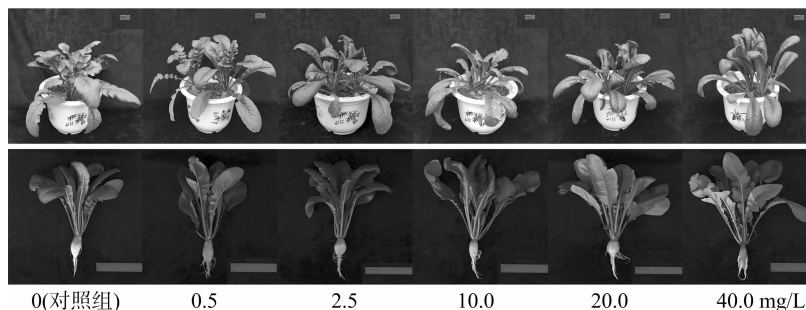


图1 叶面施硒对萝卜叶和果实生长状况的影响

### 2.2 叶面喷施亚硒酸钠对萝卜总硒含量的影响

随着叶面喷施硒浓度增加,萝卜叶和果实中硒含量均呈明显的增加趋势(图 3)。萝卜叶对硒的积累明显高于果实,40.0 mg/L 处理组叶子和果实中硒含量达到 6.37、0.63 mg/kg,是对照组的萝卜叶子硒含量的 33.5 倍和果实硒含量的 7 倍。不同施硒浓度处理间硒含量表现出明显差异,其中 0.5 mg/L 处理组与对照组相比叶和果实中硒含量略有提升,但差异不显著,2.5、10.0、20.0、40.0 mg/L 处理组处理

后萝卜叶和果实硒含量显著高于对照组分( $P < 0.05$ ),其中 40.0 mg/L 处理组效果最为明显,这说明随着外源施硒浓度的增加,萝卜叶和果实对硒的富集能力增强,叶面施硒能够有效提高萝卜叶、果实中硒含量,萝卜对硒具有较好的吸收和富集能力。对照组和硒处理组中叶硒含量均高于果实,说明叶面施硒后萝卜对硒的吸收转化主要存在于叶中,只有部分转运至萝卜果实。

如表 1 所示,随着叶面喷施硒浓度的增加,萝卜硒转移系

数呈下降趋势,表明较低浓度的硒能够高效地被植物吸收转运,但当施硒浓度过高时植物对硒的转运率会降低。

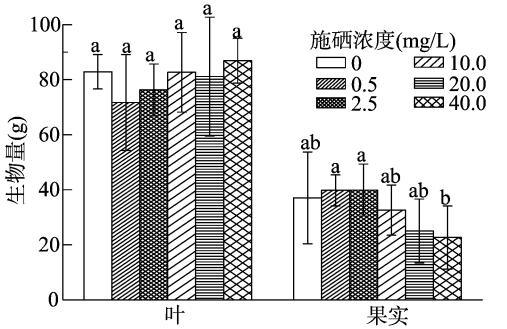


图2 叶面施硒对萝卜叶和果实生物量的影响

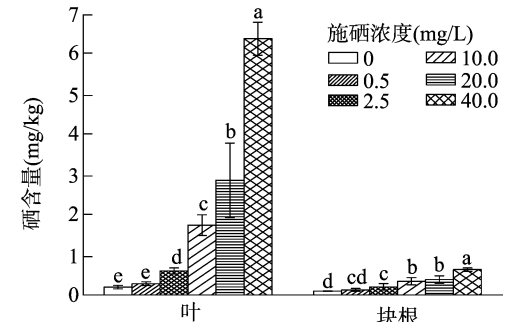


图3 叶面施硒对萝卜叶和果实硒含量的影响

表 1 不同施硒浓度下萝卜硒的转移系数

施硒浓度 (mg/L)	转移系数
0	0.48
0.5	0.45
2.5	0.34
10.0	0.20
20.0	0.14
40.0	0.10

2.3 叶面喷施亚硒酸钠对萝卜盆栽土壤中硒转运的影响

如图 4 所示,叶面喷施亚硒酸钠各处理中,除 10.0 mg/L 处理以外其他各处理间萝卜生长根际土壤硒含量均无显著差异。在 10.0 mg/L 硒处理条件下,根际土壤硒含量显著降低,说明该浓度促进根部生长,使得根部从土壤中硒吸收的能力增强。0.5、2.5、10.0 mg/L 硒处理条件下根围土壤硒含量显著低于对照组。在 2.5 mg/L 硒处理条件下,根际土壤硒含量显著高于根围土壤硒含量 ( $P = 0.0231 < 0.05$ ) 而 0.5、10.0、20.0、40.0 mg/L 硒处理组根际土壤硒含量与根围土壤硒含量没有显著差异,这说明 2.5 mg/L 硒处理萝卜植株生长旺盛、根系发达,从根围吸收硒的能力较强。但当外源硒浓度过高时,抑制了萝卜对根围土壤中硒含量的吸收和转运。

2.4 叶面喷施亚硒酸钠对萝卜硒形态的影响

萝卜叶中硒主要以 SeMet、SeCys<sub>2</sub>、Se (IV) 3 种形式存在 (图 5、表 2、表 3),其中 SeMet 含量达 1.51 mg/kg, SeCys<sub>2</sub> 含量 0.47 mg/kg, Se (IV) 含量 0.08 mg/kg;萝卜果实中硒主要以 SeMet、SeCys<sub>2</sub> 等 2 种形式存在,其中 SeCys<sub>2</sub> 含量 0.29 mg/kg, SeMet 含量达 0.10 mg/kg, 且没有四价硒存在,说

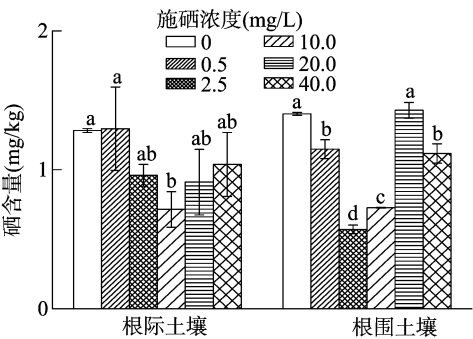
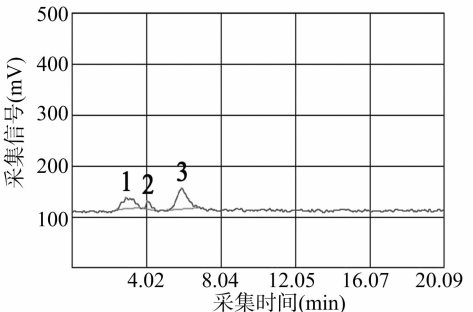
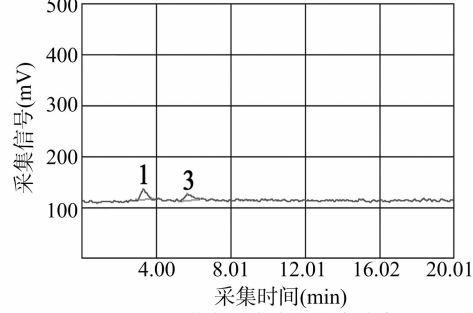


图4 叶面施硒对萝卜生长环境土壤硒含量的影响



A. 萝卜叶中硒形态分布



B. 萝卜果实中硒形态分布

图5 萝卜叶和果实中硒形态分布

表 2 萝卜叶硒形态含量

峰号	组分名	硒形态含量 (mg/kg)	硒形态所占比例 (%)
1	SeCys <sub>2</sub>	0.47	22.82
2	Se (IV)	0.08	3.88
3	SeMet	1.51	73.30

表 3 萝卜果实硒形态含量

峰号	组分名	硒形态含量 (mg/kg)	硒形态所占比例 (%)
1	SeCys <sub>2</sub>	0.29	74.36
3	SeMet	0.10	25.64

明萝卜从叶中吸收无机硒在体内进行转化变为有机硒。

2.5 叶面喷施亚硒酸钠对萝卜抗氧化能力的影响

6 个处理组的萝卜叶片中 GSH - Px、POD、SOD 的活性差异见图 6,可以看出与对照组相比,萝卜叶中 GSH - Px 活性随着施硒浓度升高有着显著变化,0.5、2.5 mg/L 硒处理先增大,10.0、20.0、40.0 mg/L 硒处理又有明显的下降趋势。可见适宜浓度的硒能够促进 GSH - Px 合成,从而提高酶的活

性,但是过量的硒可能会破坏植物体内的代谢平衡,本研究中,与对照组相比,2.5 mg/L 硒处理组叶片中 GSH - Px 活性增加了 106.26% ( $P < 0.05$ ),40.0 mg/L 处理组叶中 GSH - Px 活性降低了 5.86%。这可能是高浓度的硒影响了 GSH - Px 合成的诱导信号,从而破坏了植物体内环境平衡,导致 GSH - Px 活性降低。

与对照组相比,POD 活性在 0.5、2.5 mg/L 硒处理条件下显著增加,分别增加了 10.46%、14.87% ( $P < 0.05$ );在 10.0、20.0、40.0 mg/L 硒处理组有一定的降低趋势。与对照组相比,总 SOD 活性在 0.5、2.5、10.0、20.0 mg/L 硒处理下有一定的上升趋势,无显著性差异,但是在 40.0 mg/L 硒处理组却显著降低了 40.49% ( $P < 0.05$ )。本研究中 POD、SOD 活性没有随着外源施硒浓度的增加而出现显著性变化趋势,可能是由于 POD 的辅酶因子是铁,SOD 的辅酶因子是铁、锰、铜、锌,外源硒通过影响辅酶因子的吸收和在分布,从而调节抗氧化酶活性。因此对 POD、SOD 2 种酶活性的影响不是十分显著。

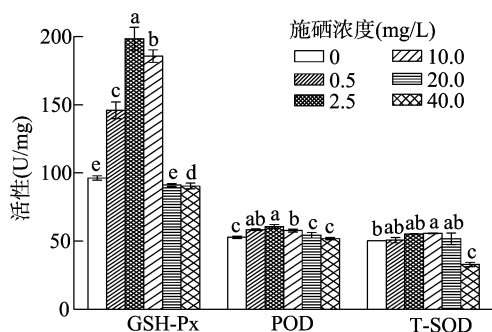


图6 叶面施硒对萝卜叶中 GSH-Px、POD、SOD 活性的影响

### 3 讨论与结论

硒不是植物必需微量元素,但一定浓度的硒能够影响植物的生长发育、果实品质和产量<sup>[29-30]</sup>。本试验中,叶面喷施 2.5 mg/L 的亚硒酸钠对萝卜果实有增产作用,随着喷施浓度的升高,产量下降,果实颜色发紫,有明显的病变现象。可见萝卜的产量受施硒浓度的影响,适量的施硒浓度能够促进萝卜生长,提高产量,但是过量的硒则会抑制萝卜生长,还可能出现病变。该结果与硒对小麦和油菜<sup>[31]</sup>、苜蓿<sup>[32]</sup>生物量影响的研究结果一致。

萝卜叶和果实中硒吸收富集量随着外源施硒浓度增加而增加,并未出现对硒吸收同化的抑制作用,但萝卜对硒的转移系数是逐渐降低的,这与硒在小麦<sup>[33]</sup>、紫甘薯<sup>[34]</sup>中富集规律一致,说明高等植物对硒的吸收富集机制是相当复杂的,值得进一步研究。萝卜不同部位吸收硒的能力有差异,本研究发现硒主要累积在萝卜叶中,果实中转移量较少。这与在甜菜、大麦、番茄上的研究结果<sup>[35-36]</sup>一致,植物的可食用部位富硒能力低于非食用部位。研究发现,十字花科芜菁甘蓝硒吸收含量和土壤本底中硒含量没有显著的相关性<sup>[37]</sup>。本试验所用盆栽土壤本底硒含量为 1.67 mg/kg,但对照组萝卜叶和果实中硒含量较低,说明在自然土壤条件下萝卜对硒的吸收和转运能力较低,可能是由于土壤有效态硒含量较低等因素

导致<sup>[23]</sup>。并且不同种属的植物在同环境下硒富集能力也是有差异的<sup>[24]</sup>。通过叶面施硒能够显著提高萝卜对硒的吸收富集能力,因此不同植物对硒的富集能力是由外源施硒方式、施硒浓度、生长环境有效硒含量和植物种类等多重因素共同决定的。

大多数植物性硒源中有机硒主要以硒代蛋氨酸形式存在的<sup>[38]</sup>。叶用莴苣以四价硒作为硒源,发现约有 1/3 转化为硒代蛋氨酸<sup>[39]</sup>。本试验中萝卜叶中有机硒主要以硒代蛋氨酸为主,含量为 1.51 mg/kg,而萝卜果实中有机硒为硒代胱氨酸和硒代蛋氨酸,其中硒代胱氨酸的含量达 0.29 mg/kg,未检出四价硒,说明叶面喷施亚硒酸钠经萝卜转化吸收变为有机硒存在于萝卜果实中。

硒能够通过影响抗氧化酶活性从而增强植物的抗氧化能力。硒作为植物生长有益的元素之一,参与合成谷胱甘肽过氧化物酶(GSH - Px),通过调节植物内环境离子平衡,来提高过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)的活性<sup>[40]</sup>。三叶草施加低浓度(1~5 μmol/L)硒能够提高 SOD、POD 活性,高浓度(10~30 μmol/L)条件则会出现降低<sup>[41]</sup>。本研究中在一定硒浓度范围内,能够不同程度提高 3 种抗氧化酶(GSH - Px、POD、SOD)的活性。随着施硒浓度的增加,GSH - Px、POD、SOD 活性呈现明显的先增大后降低的趋势,40 mg/L 硒处理组时 3 种酶活明显降低,可能是由于当硒浓度过高会对植物产生毒害作用,导致抗氧化酶活性出现明显降低。因此,适宜浓度的外源施硒能够提高 GSH - Px、POD、SOD 酶活性,从而增强植物的抗氧化能力。

外源叶面施硒能够促进生长在土壤有效硒含量较低的环境中的萝卜吸收富集硒。综合本研究结果发现,叶面喷施 2.5 mg/L 硒处理有利于促进萝卜生长,提高萝卜硒含量,增强抗氧化能力。40.0 mg/L 硒处理会抑制萝卜生长,降低其抗氧化能力,出现病变症状,导致植物产量、品质降低。植物虽然处在富硒环境土壤中但其对土壤中硒的吸收和转运受植物种类和生长环境等因素的影响,导致植物对硒的吸收转化差异化,因此结合外源叶面施硒能够较好地达到植物富硒要求。

### 参考文献:

- [1] Rayman M P. The importance of selenium to human health [J]. Lancet, 2000, 356 (9225): 233 - 241.
- [2] Hoffmann F W, Hashimoto A C, Shafer L A, et al. Dietary selenium modulates activation and differentiation of CD<sub>4</sub><sup>+</sup> T cells in mice through a mechanism involving cellular free thiols [J]. Journal of Nutrition, 2010, 140 (6): 1155 - 1161.
- [3] Ferguson L R, Karunasinghe N, Zhu S T, et al. Selenium and its' role in the maintenance of genomic stability [J]. Mutation Research, 2012, 733 (1/2): 100 - 110.
- [4] Yong F, Zi X, Yi S, et al. Protection mechanism of Se - containing protein hydrolysates from Se - enriched rice on Pb<sup>2+</sup> - induced apoptosis in PC12 and RAW264.7 cells [J]. Food Chemistry, 2017, 219: 391 - 398.
- [5] El - Ramady H, Abdalla N, Alshaal T A, et al. Selenium in soils under climate change, implication for human health [J]. Environmental Chemistry Letters, 2015, 13 (1): 1 - 19.

- [6] Yuan L, Yin X, Zhu Y, et al. Selenium in plants and soils, and selenosis in Enshi, China; implications for selenium biofortification [M]//Phytoremediation and biofortification. Dordrecht: Springer, 2012:7-31.
- [7] Gao J, Liu Y, Huang Y, et al. Daily selenium intake in a moderate selenium deficiency area of Suzhou, China [J]. Food Chemistry, 2011, 126(3):1088-1093.
- [8] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量:2013版[M]. 北京:科学出版社, 2014:48-51.
- [9] Hamilton S J. Review of selenium toxicity in the aquatic food chain [J]. Science of the Total Environment, 2004, 326(1/2/3):1-31.
- [10] Terry N, Zayed A M, de Souza M P, et al. Selenium in higher plants [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 2000, 51:401-432.
- [11] Cappa J J, Yetter C, Fakra S, et al. Evolution of selenium hyperaccumulation in *Stanleya* (Brassicaceae) as inferred from phylogeny, physiology and X-ray microprobe analysis [J]. New Phytologist, 2015, 205(2):583-595.
- [12] 段蔓莉, 付冬冬, 王松山, 等. 亚硒酸盐对四种蔬菜生长、吸收及转运硒的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3):658-665.
- [13] Boldrin P F, de Figueiredo M A, Yang Yong And lu, hongmei, et al. Selenium promotes Sulfur accumulation and plant growth in wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Physiologia Plantarum, 2016, 158(1):80-91.
- [14] Hartikainen H, Xue T L, Piironen V. Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass [J]. Plant and Soil, 2000, 225(1/2):193-200.
- [15] Allah A, F E, Abeer, et al. Mitigation of cadmium induced stress in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) by selenium [J]. Pakistan J Bot, 2016, 48(3):953-961.
- [16] Wiesner-Reinhold M, Schreiner M, Baldermann S, et al. Mechanisms of selenium enrichment and measurement in brassicaceous vegetables, and their application to human health [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8:1365.
- [17] Broadley M R. Selenium in human health and disease [J]. Antioxidants & Redox Signaling, 2011, 14(7):1337-1383.
- [18] Brigelius-Flohé R, Maiorino M. Glutathione peroxidases [J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2013, 1830(5):3289-3303.
- [19] Castillo-Godina R G, Foroughbakhch-Pournavab R. Effect of selenium on elemental concentration and antioxidant enzymatic activity of tomato plants [J]. Journal of Agricultural Science, 2016, 18(1):233-244.
- [20] Balakhmina T I, Nadezhkina E S. Effect of selenium on growth and antioxidant capacity of *Triticum aestivum* L. during development of lead-induced oxidative stress [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2017, 64(2):215-223.
- [21] Habibi G. Effect of drought stress and Selenium spraying on photosynthesis and antioxidant activity of spring barley [J]. Acta Agriculturae Slovenica, 2013, 101(1):31-39.
- [22] 于洋. 富硒区蔬菜根-土微界面过程镉的物理化学作用及生物有效性特征[D]. 海口:海南大学, 2015.
- [23] 赵妍, 宗良纲, 曹丹, 等. 江苏省典型茶园土壤硒分布特性及其有效性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):2467-2474.
- [24] De Temmerman L, Waegeneers N, Thiry C, et al. Selenium content of Belgian cultivated soils and its uptake by field crops and vegetables [J]. Science of the Total Environment, 2014, 468-469:77-82.
- [25] 胡婷, 李文芳, 聂亚文, 等. 张家界市土壤硒分布规律和富硒作物研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(6):821-824.
- [26] 胡婷, 李文芳, 向昌国, 等. 氢化物发生-原子荧光光谱法测定植物样品中的硒[J]. 分析科学学报, 2015, 31(4):579-582.
- [27] 王铁良, 张会芳, 魏亮亮, 等. 高效液相色谱-氢化物发生-原子荧光光谱联用技术测定富硒大米中的5种硒形态[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(6):2185-2190.
- [28] 胡婷. 张家界市富硒植物中硒形态分布及种植规划研究[D]. 吉首:吉首大学, 2015.
- [29] 刘群龙, 郝燕燕, 吴国良, 等. 外源硒对砀山酥梨果实品质和硒含量的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(8):113-117.
- [30] 张琳, 孙炎鑫, 廖上强. 叶面喷施硒对生菜长势和品质的影响[J]. 现代农业科技, 2017(12):61-62.
- [31] 付小丽. 不同硒源对小麦和油菜生长及硒累积的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2013.
- [32] Owusu-Sekyere A, Kontturi J, Hajiboland R A, et al. Influence of selenium (Se) on carbohydrate metabolism, nodulation and growth in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Plant and Soil, 2013, 373(1/2):541-552.
- [33] 刘庆, 田侠, 史衍玺. 施硒对小麦籽粒硒富集、转化及蛋白质与矿质元素含量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(5):778-783.
- [34] 侯松, 田侠, 刘庆. 叶面喷施硒对紫甘薯硒吸收、分配及品质的影响[J]. 作物学报, 2018(3):1-8.
- [35] Hamilton J W, Beath O A. Selenium uptake and conversion by certain crop plants [J]. Agronomy Journal, 1963, 55(6):528-531.
- [36] Wan H F, Mikkelsen R L, Page A L. Selenium uptake by some agricultural crops from central California soils [J]. Journal of Environmental Quality, 1988, 17(2):269-272.
- [37] Arthur M A, Woodbury P B, Schneider R E, et al. Uptake and accumulation of selenium by terrestrial plants growing on a coal fly ash landfill. Part 2. Forage and root crops [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 1992, 11(9):1289-1299.
- [38] Sargent M. Food-chain selenium and human health: spotlight on speciation [J]. The British Journal of Nutrition, 2008, 100(2):238-253.
- [39] Do N E, Aureli F, D'amato M, et al. Selenium bioaccessibility and speciation in selenium-enriched lettuce: investigation of the selenocompounds liberated after in vitro simulated human digestion using two-dimensional HPLC-ICP-MS [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2017, 65(43):3031-3038.
- [40] El-Ramady H, Abdalla N, Alshaal T, et al. Selenium and its role in higher plants [J]//Pollutants in Buildings, Water and Living Organisms. Cham:Springer, 2015:235-296.
- [41] Kong L A, Wang M, Bi D L. Selenium modulates the activities of antioxidant enzymes, osmotic homeostasis and promotes the growth of sorrel seedlings under salt stress [J]. Plant Growth Regulation, 2005, 45(2):155-163.