



# 施硒对人参菜生长及生理特性的影响

仰路希, 谢永东, 贺忠群\*

(四川农业大学 园艺学院, 成都 611130)

**摘要:**为研究施硒对人参菜生长的影响并培育富硒人参菜,采用盆栽试验,测定了施硒(0、2.5、5、10、20 mg/kg)对人参菜生长、叶片光合色素含量、生理特性以及硒积累的变化情况。结果显示:(1)施硒对人参菜生长有“低促高抑”的影响,人参菜的株高、茎粗、根长、分支数、生物量均呈先升高后降低的趋势。(2)施硒能增加人参菜叶片中光合色素的含量,其中高浓度硒( $\geq 10$  mg/kg)对人参菜叶片中光合色素含量影响显著。(3)人参菜叶片 SOD、POD 活性在硒浓度为 2.5 mg/kg 时最高( $P < 0.05$ ),CAT 活性在硒浓度为 5 mg/kg 时最高( $P < 0.05$ );随着硒浓度的增加,人参菜叶片中维生素 C 含量逐渐升高,可溶性蛋白含量先升后降,可溶性糖含量下降。(4)人参菜中硒含量的分布表现为:根>叶>茎,且随硒浓度升高而升高,表明人参菜根系是硒积累的主要部位。研究认为,硒浓度为 5 mg/kg 是培育富硒人参菜的最佳浓度。

**关键词:**人参菜;硒;生长;生理特性

中图分类号:Q945.12

文献标志码:A

## Effect of Selenium Application on the Growth and Physiological Characteristics of *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn

YANG Luxi, XIE Yongdong, HE Zhongqun\*

(College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** To study the effect of selenium on the growth of ginseng and cultivate selenium-enriched *Talinum paniculatum*, we conducted pot experiment to determine the changes of *T. paniculatum* growth, leaf photosynthetic pigment content, physiological characteristics and selenium accumulation with selenium application (0, 2.5, 5, 10, 20 mg/kg). The results showed that: (1) selenium application had the effect of “low promotion and high inhibition” on the growth of *T. paniculatum*. The plant height, stem diameter, root length, number of branches and biomass of *T. paniculatum* increased first and then decreased. (2) Selenium application can increase the content of photosynthetic pigment in *T. paniculatum* leaves, and high concentration selenium ( $\geq 10$  mg/kg) has significant effects on photosynthetic pigment content in *T. paniculatum* leaves. (3) The SOD and POD activities of *T. paniculatum* leaves were the highest at the concentration of 2.5 mg/kg ( $P < 0.05$ ), and the highest at CAT activity was 5 mg/kg ( $P < 0.05$ ). With the increase of selenium concentration, the content of vitamin C in the leaves of *T. paniculatum* increased gradually, the content of soluble protein increased first and then decreased, and the content of soluble sugar decreased. (4) The distribution of selenium in *T. paniculatum* was: root>leaf>stem, and it increased with the increase of selenium application; *T. paniculatum* root was the main part of selenium accumula-

收稿日期:2019-06-27;修改稿收到日期:2019-09-17

基金项目:雅安雨城区项目(063H0201)

作者简介:仰路希(1993—),女,在读硕士研究生,主要从事园艺植物栽培生理研究。E-mail: 1039379834@qq.com

\* 通信作者:贺忠群,教授,主要从事园艺植物栽培生理研究。E-mail: hzqun328@163.com

tion. According to the study, the concentration of selenium is 5 mg/kg, which is the best concentration for cultivating selenium-enriched *T. paniculatum*.

**Key words:** *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn; selenium; growing; physiological characteristics

人参菜 [*Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn] 是马齿苋科土人参属一年或多年生草本植物, 是一种集食用、药用、观赏为一体的蔬菜。它风味独特、营养价值高、保健功能强<sup>[1]</sup>, 可做中药补中益气、凉血消肿, 主治尿毒症、糖尿病、潮热等疾病<sup>[2]</sup>。人参菜也具有较好的绿化观赏价值, 它原产热带美洲, 为庭院观赏植物<sup>[3]</sup>。人参菜繁殖迅速, 病少虫微, 在中国多地均有栽培。

硒是人和动物必需的微量元素<sup>[4]</sup>, 具有抗癌、抗衰老、提高免疫力等作用。由于中国大部分地区缺硒, 从食物中摄取硒成为了人体补硒的重要途径。硒以硒酸盐、亚硒酸盐或有机硒的形式被植物吸收<sup>[5]</sup>, 植物的根和叶都具有一定的吸收能力。较多研究表明, 外源施硒可促进蔬菜生长, 改善其品质。水培莴苣加硒提高了莴苣叶的总糖、还原糖、叶绿素、可溶性蛋白质含量, 降低了粗纤维和亚硝酸盐的含量, 对保护人体健康起到很好的作用<sup>[6]</sup>。低含量硒促进了玉米生长, 植株生物量和籽粒产量均显著增加<sup>[7]</sup>。郭开秀等<sup>[8]</sup>通过土壤施硒肥发现可明显提高鸡毛菜中总硒含量, 鸡毛菜的 Vc 含量随着硒浓度的增加而增加。Mozafariany 等<sup>[9]</sup>通过在水培番茄中施硒发现, 硒可以通过增加植株的光合色素, 相对含水量和抗氧化酶活性来促进植物生长。人参菜作为一种营养价值极高的新型保健蔬菜, 目前国内外关于土壤施硒对人参菜的影响的研究鲜有报道, 而且发展富硒人参菜可产生巨大的经济效益, 具有广阔的市场前景。

本试验采用盆栽试验, 探索不同浓度的硒对人参菜生长及生理特性的影响, 从而找出人参菜生长的最佳硒浓度, 为富硒蔬菜的开发提供技术支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试人参菜由四川农业大学园艺学院提供。选取一年生人参菜 6~8 cm 长的分枝进行扦插, 生根后用多菌灵消毒杀菌, 再进行移栽。扦插繁殖所使用的基质为干热灭菌后的珍珠岩和蛭石按照 1:1 配置。供试元素为亚硒酸钠 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> (分析纯)。

供试土壤为水稻土, 取自四川农业大学成都校区周边农田。土壤经风干后过 1 mm 筛, 经 160 ℃

高温消毒 2 h, 冷却后备用。土壤 pH 6.6, 速效氮 53.6 mg/kg, 速效磷 44.1 mg/kg, 速效钾 176.7 mg/kg, 有机质 10.2 mg/kg, 硒含量未检出。

### 1.2 试验方法

试验于 2018 年 4 月至 7 月在四川农业大学成都校区 (30°42'N, 103°51'E, 海拔 530 m) 进行。将 Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 配制成不同浓度的硒溶液, 以不添加硒作为对照 (CK), 分别将浓度为 2.5、5、10 和 20 mg/kg 的硒溶液加入土壤中混匀, 选用规格为 215 mm × 130 mm (上径 × 高) 的塑料盆, 用 70% 酒精擦后晾干, 每盆装土 2.5 kg。选取一年生人参菜扦插苗进行移栽, 每盆移栽人参菜幼苗 5 株, 每个处理重复 3 次, 共 30 盆。随机摆放塑料盆, 并不定期交换盆与盆的位置以减弱边际效应, 定期浇水至田间持水量的 70% 左右。人参菜植株现蕾前 (约 40 d) 进行采样, 随机选取人参菜苗相同部位的成熟叶片, 用蒸馏水清洗干净, 液氮速冻并保存于 -80 ℃ 冰箱中用于各项指标测定。

### 1.3 指标测定方法

**1.3.1 生长指标测定** 在处理结束 (40 d) 时, 用直尺和游标卡尺测量植株的株高、茎粗、根长。记录植株分支数, 测定 9 株植株取平均值。

将人参菜从营养钵中取出, 用流水将根部的土壤冲洗掉后, 用蒸馏水冲洗 3~5 次, 再用吸水纸吸去根部的水分, 分为根部和地上部分, 测定其鲜重。接着放入电热恒温鼓风干燥箱内, 105 ℃ 杀青 15 min 后在 70 ℃ 下烘干至恒重, 测定其干重。

**1.3.2 光合色素的测定** 光合色素含量采用丙酮乙醇混合液浸提法<sup>[10]</sup>。

**1.3.3 生理指标的测定** 叶片可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法<sup>[11]</sup>; 叶片可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法<sup>[12]</sup>; 维生素 C 含量测定采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法<sup>[13]</sup>; 超氧化物歧化酶 SOD 的活性采用核黄素-NBT 法测定<sup>[14]</sup>; 过氧化物酶 POD 的活性采用愈创木酚法测定; 过氧化氢酶 CAT 的活性采用高锰酸钾滴定法测定<sup>[15]</sup>。

**1.3.4 人参菜根茎叶中硒含量的测定** 人参菜不同部位硒含量参考食品安全国家标准食品中硒的测定 (GB5009.93-2017)<sup>[16]</sup>, 用原子荧光光谱仪 (SK-2003A) 测硒含量。

## 1.4 数据分析

用Excel 2016对试验数据进行统计分析,用SPSS 20.0软件(LSD法)对数据进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施硒对人参菜生长的影响

随着硒浓度的增加人参菜的株高、茎粗、根长、分支数呈现先升高后降低的变化趋势(表1),人参菜的生长表现出“低促高抑”的现象。低浓度硒可显著提高人参菜的株高,在硒浓度为5 mg/kg时最高,比对照增加了13.30%。土壤施硒增加了人参菜的茎粗,在硒浓度为5 mg/kg时最粗,但各处理之间与对照差异不显著。人参菜的根长在硒浓度为5 mg/kg时最长,其余处理与对照无显著差异。硒浓度为5 mg/kg时人参菜的分支数显著高于对照,高浓度的硒抑制了人参菜的分支数。

### 2.2 施硒对人参菜生物量的影响

不同浓度硒处理后,人参菜的生物量呈先升高后降低的变化趋势(表2)。人参菜地上部鲜重在硒浓度为5和10 mg/kg时显著高于对照,分别较对照增加了22.01%和9.59%;而20 mg/kg时则显著下降。硒浓度为5 mg/kg时人参菜地上部干重、根系干重均显著高于对照,但硒浓度为20 mg/kg时

人参菜的生长受到了毒害,其地上部与根系生物量受到显著抑制( $P<0.05$ )。人参菜的根冠比在施硒处理后呈先升高后降低的变化趋势,硒浓度为2.5 mg/kg时人参菜最高( $P<0.05$ ),且硒浓度大于5 mg/kg时根冠比下降。

### 2.3 施硒对人参菜叶片光合色素含量的影响

施硒增加了人参菜叶片中的光合色素含量,其中高浓度硒对人参菜叶片中光合色素含量影响显著(表3)。随着硒浓度的增加人参菜的光合色素含量增加,在硒浓度为20 mg/kg时叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总含量最高,分别较对照增加了55.00%、45.28%和52.77%;硒浓度为10 mg/kg时类胡萝卜素含量最高,较对照增加了41.93%。

### 2.4 施硒对人参菜叶片抗氧化酶活性的影响

随着硒浓度的增加人参菜叶片的抗氧化物酶活性均呈现先升高后降低的变化趋势(表4)。硒浓度为2.5~5 mg/kg时人参菜叶片的SOD活性增加,与对照差异显著;当硒浓度 $\geq 10$  mg/kg时,SOD活性逐渐下降,且显著低于对照。人参菜叶片的POD活性在硒浓度为2.5 mg/kg时最高( $P<0.05$ ),5 mg/kg次之( $P<0.05$ ),分别较对照增加了22.54%和11.93%;其余处理与对照无显著差异。人参菜叶片的CAT活性在硒浓度为5 mg/kg时显著高于

表1 施硒对人参菜生长的影响

Table 1 Effect of selenium application on the growth of *T. paniculatum*

硒浓度 Selenium concentration/(mg/kg)	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem thick/mm	根长 Root length/cm	分支数 Number of branches
CK	28.57 $\pm$ 1.30cd	0.43 $\pm$ 0.00a	11.27 $\pm$ 0.85b	3.67 $\pm$ 0.29b
2.5	29.93 $\pm$ 0.93bc	0.45 $\pm$ 0.01a	12.40 $\pm$ 0.17b	3.83 $\pm$ 0.14b
5	32.37 $\pm$ 0.85a	0.47 $\pm$ 0.04a	13.93 $\pm$ 0.97a	4.58 $\pm$ 0.38a
10	30.65 $\pm$ 1.05ab	0.47 $\pm$ 0.04a	12.13 $\pm$ 0.31b	3.58 $\pm$ 0.14b
20	27.03 $\pm$ 0.69d	0.44 $\pm$ 0.01a	11.73 $\pm$ 0.71b	3.08 $\pm$ 0.29c

注:不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同

Note: Different normal letters indicate significant differences at 0.05 level. The same as below

表2 施硒对人参菜生物量的影响

Table 2 Effect of selenium application on the biomass of *T. paniculatum*

硒浓度 Selenium concentration/(mg/kg)	地上部鲜重 Fresh weight on the ground/g	地上部干重 Dry weight on the ground/g	根系干重 Root dry weight/g	总干重 Total dry weight/g	根冠比 Root to crown ratio
CK	8.45 $\pm$ 0.23c	0.84 $\pm$ 0.05b	0.19 $\pm$ 0.01b	1.03 $\pm$ 0.05c	0.22 $\pm$ 0.01a
2.5	8.48 $\pm$ 0.38c	0.91 $\pm$ 0.04a	0.21 $\pm$ 0.01a	1.12 $\pm$ 0.03ab	0.24 $\pm$ 0.02a
5	10.31 $\pm$ 0.59a	0.94 $\pm$ 0.04a	0.22 $\pm$ 0.00a	1.15 $\pm$ 0.03a	0.23 $\pm$ 0.01a
10	9.26 $\pm$ 0.43b	0.92 $\pm$ 0.02a	0.16 $\pm$ 0.01c	1.08 $\pm$ 0.02bc	0.17 $\pm$ 0.01b
20	6.08 $\pm$ 0.34d	0.50 $\pm$ 0.00c	0.08 $\pm$ 0.01d	0.58 $\pm$ 0.01d	0.15 $\pm$ 0.01b

表3 施硒对人参菜叶片光合色素含量的影响

Table 3 Effect of selenium application on photosynthetic pigment content in leaves of *T. paniculatum*/(mg/g)

硒浓度 Selenium concentration (mg/kg)	叶绿素a Chlorophyll a	叶绿素b Chlorophyll b	叶绿素总含量 Total chlorophyll content	类胡萝卜素 Carotenoid
CK	0.71±0.04b	0.21±0.01c	0.92±0.05c	0.15±0.01c
2.5	0.73±0.02b	0.21±0.01c	0.94±0.02c	0.16±0.00c
5	0.80±0.06b	0.23±0.02c	1.03±0.08c	0.18±0.01b
10	1.02±0.05a	0.27±0.01b	1.29±0.06b	0.22±0.00a
20	1.10±0.06a	0.31±0.01a	1.41±0.08a	0.21±0.01a

对照,而20 mg/kg时显著低于对照。

## 2.5 施硒对人参菜生理指标的影响

施硒对人参菜叶片的可溶性糖、可溶性蛋白、维生素C含量的影响不同(表5)。随着硒浓度的增加,人参菜叶片的可溶性糖含量逐渐减少,硒浓度为20 mg/kg时最低( $P<0.05$ ),较对照减少了44.69%。施硒能提高人参菜叶片的可溶性蛋白含量,硒浓度为5 mg/kg时最高( $P<0.05$ ),较对照增加了9.8%。人参菜叶片的维生素C含量随着硒浓度的增加呈现先升高后降低的变化趋势,硒浓度为2.5~10 mg/kg时,人参菜叶片的维生素C含量增加,均与对照差异显著;硒浓度为20 mg/kg时,维生素C含量降低,较对照显著降低了39.29%。

## 2.6 不同浓度硒对人参菜硒含量的影响

施硒使人参菜根、茎、叶中硒含量随着硒浓度的增加而升高(表6)。人参菜中硒含量的分布情况为根>叶>茎,根系是硒元素积累的主要部位。低浓度硒( $\leq 5$  mg/kg)对人参菜根、茎、叶中硒含量的增加无显著影响。随着施硒浓度的增加,高浓度硒( $\geq 10$  mg/kg)对人参菜根、茎、叶中硒含量的增加有明显的影响( $P<0.05$ ),且高浓度施硒处理( $\geq 10$  mg/kg)的人参菜根茎叶中的硒含量显著高于低浓度硒处理( $\leq 5$  mg/kg)。

## 3 讨 论

大量研究表明,适量浓度的硒可以促进植株生长,提高产量及品质,但过量硒对植株有毒害作用<sup>[17]</sup>,这在白菜<sup>[18]</sup>和生菜<sup>[19]</sup>等蔬菜上得到了证实。本试验研究发现,随着硒浓度的增加人参菜的株高、茎粗、根长、分支数呈现先升高后降低的变化趋势。人参菜的株高、茎粗、根长、植株分支数均在硒浓度为5 mg/kg时最大,硒浓度 $\geq 10$  mg/kg时人参菜生长受到抑制;人参菜生物量在硒浓度为0~5 mg/kg时显著增加,10~20 mg/kg时下降,表明高浓度硒( $\geq 10$  mg/kg)抑制了人参菜株高、茎粗、根长的

表4 施硒对人参菜叶片抗氧化酶活性的影响

Table 4 Effect of selenium application on antioxidant enzyme activities in leaves of *T. paniculatum*

硒浓度 Selenium concentration (mg/kg)	SOD活性 SOD activity (U/g)	POD活性 POD activity (U/g)	CAT活性 CAT activity (U/g)
CK	204.27±5.43b	2 171.14±16.88c	2.36±0.03c
2.5	222.13±1.92a	2 660.49±39.50a	2.72±0.04b
5	217.93±6.10a	2 430.16±57.69b	2.97±0.03a
10	165.08±8.43c	2 232.34±75.18c	2.37±0.10c
20	157.86±3.28c	2 164.82±47.24c	1.97±0.08d

表5 施硒对人参菜生理指标的影响

Table 5 Effect of selenium application on physiology indexes of *T. paniculatum*

硒浓度 Selenium concentration (mg/kg)	可溶性糖 Soluble sugar/%	可溶性蛋白 Soluble protein (mg/g)	维生素C Vitamin C (mg/100g)
CK	0.132±0.004a	34.462±1.009c	122.326±1.777b
2.5	0.121±0.002b	37.350±0.456ab	140.780±1.323a
5	0.101±0.003c	37.847±1.140a	139.517±1.452a
10	0.102±0.008c	37.556±0.074ab	141.007±1.490a
20	0.073±0.005d	35.840±1.288bc	74.257±1.550c

表6 不同浓度硒对人参菜硒含量的影响

Table 6 Effects of different concentrations of selenium on selenium content in *T. paniculatum*

硒浓度 Selenium concentration (mg/kg)	根 root (mg/kg)	茎 stem (mg/kg)	叶 leaf (mg/kg)
CK	—	—	—
2.5	0.22±0.01c	0.07±0.01c	0.02±0.01c
5	0.41±0.03c	0.10±0.01c	0.13±0.01c
10	1.23±0.11b	0.39±0.03b	0.48±0.13b
20	2.45±0.51a	0.71±0.03a	0.75±0.03a

增加,从而导致人参菜生物量的降低。人参菜根、茎、叶中硒含量的分布情况是:根>叶>茎,且随着硒浓度的增加而增加。根系是硒积累的主要部位,

硒浓度的升高导致人参菜根系受到毒害,生长受抑制,从而造成产量降低。这与郭文惠等<sup>[20]</sup>对不同品种紫甘薯施硒后的综合表现进行比较,发现施硒可以使‘浙紫1号’和‘越南紫’产量降低,‘徐8008’和‘紫菁2号’的产量升高,对其他8个品种产量影响不显著的研究结果相似。

光合色素是植物代谢过程中进行光合作用、同化物质的基础,光合色素含量的多少可以影响植物光合作用的强弱。大量研究表明,硒能够影响植物的光合色素含量,硒通过发挥其抗氧化、促进矿质元素吸收及调节酶活性等作用,在植物叶绿素合成过程中起关键作用<sup>[21]</sup>。本试验研究结果表明,随着硒浓度的增加人参菜的叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总量和类胡萝卜素含量增加,硒浓度 $\geq 10\text{ mg/kg}$ 时,人参菜的光合色素含量显著高于对照。这与代惠萍<sup>[22]</sup>的研究结果一致。

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>[23]</sup>。朱磊等<sup>[24]</sup>研究发现,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和SOD)的活性。本试验研究发现,人参菜施加低浓度硒能提高SOD、POD和CAT活性,随着硒浓度的增加人参菜的抗氧化酶活性降低。这与三叶草施加低浓度硒能够提高SOD、POD活性,高浓度条件则会出现降低<sup>[25]</sup>的情况相似。

适量施硒可以促进植株生长,提高产量及品质。

张杨杨等<sup>[26]</sup>的研究结果发现,不同浓度施硒处理显著提高了厚皮甜瓜果肉中有机硒、无机硒、可溶性蛋白、游离氨基酸和维生素C的含量。本试验研究发现,施硒对人参菜叶片的可溶性糖、可溶性蛋白、维生素C含量的影响不同。施硒降低了人参菜叶片的可溶性糖含量;可溶性蛋白含量、维生素C含量随着硒浓度的增加呈现先升高后降低的变化趋势,硒浓度为5 mg/kg时,可溶性蛋白含量最高;硒浓度为10 mg/kg时,维生素C含量最高。与谢启鑫等<sup>[27]</sup>在所试验的亚硒酸钠浓度范围内,芦笋嫩茎的Vc含量逐渐升高,总蛋白质含量先升后降,可溶性糖含量则呈下降趋势的结果相似。

中国营养学会推荐硒摄入量的最低限值为50  $\mu\text{g}/\text{d}$ ,膳食硒最大安全摄入量为400  $\mu\text{g}/\text{d}$ <sup>[28]</sup>,生活中通过正常饮食摄入是很难达到的。硒浓度为5 mg/kg时,人参菜叶片中硒含量为0.13 mg/kg,此时人参菜作为食叶蔬菜食用能满足最低硒摄入量,且不会超过最大硒摄入量。

## 4 结 论

施硒对人参菜生长具有“低促高抑”的影响,低浓度硒可以促进人参菜生长,增加人参菜生物量的积累,提高抗氧化酶活性,而高浓度硒抑制了植株的生长。施硒能增加人参菜叶片中光合色素的含量,促进植株光合作用。但施硒降低了人参菜叶片的可溶性糖含量。人参菜中硒含量随硒浓度升高而升高,综合考虑,认为硒浓度为5 mg/kg是实际种植的最佳浓度。

## 参考文献:

- 王红艳,黄群策. 蔬菜新秀—人参菜的潜在价值研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(4): 203-204.  
WANG H Y, HUANG Q C. The research in potential value of *Talinum paniculatum* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(4): 203-204.
- 潘廷敏,文全泰,黄礼德,等. 土人参多糖的抗氧化活性研究[J]. 时珍国医国药, 2014, 25(01): 30-32.  
PAN T Q, WEN Q T, HUANG L D, et al. Study on the antioxidation activities of polysaccharides from the *Talinum paniculatum* [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2014, 25(1): 30-32.
- 王红艳,王鸿磊,黄群策. 马齿苋科植物的潜在价值研究[J]. 中国野生植物资源, 2006, 25(1): 23-25.  
WANG H Y, WANG H L, HUANG Q C. Potential value in the research of portulaceae plants[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2006, 25(1): 23-25.
- ROTRUCK J T, POPE A L, GANTHER H E, et al. Selenium: biochemical role as a component of glutathione peroxidase [J]. *Science*, 1973, 179(4 073): 588-590.
- 姜英,曾昭海,杨麒生,等. 植物硒吸收转化机制及生理作用研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, (12): 4 067-4 076.  
JIANG Y, ZENG Z H, YANG Q S, et al. Selenium (Se) uptake and transformation mechanisms and physiological function in plant: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, (12): 4 067-4 076.
- 尚庆茂,高丽红,李式军. 硒素营养对水培生菜品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 1998, (3): 67-71.  
SHANG Q M, GAO L H, LI S J. Effect of selenium nutrition on the quality of hydroponic lettuce[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1998, (3): 67-71.

- [7] 郝玉波,刘华琳,慈晓科,等.施硒对两种类型玉米硒元素分配及产量、品质的影响[J].应用生态学报,2012,23(2): 411-418.  
HAO Y B, LIU H L, CI X K, et al. Effects of applying selenium on selenium allocation, grain yield, and grain quality of two maize cultivars [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(2): 411-418.
- [8] 郭开秀,姚春霞,周守标,等.施用硒肥对鸡毛菜产量、品质及生理特性的影响[J].水土保持学报,2010,24(5): 195-198, 203.  
GUO K X, YAO C X, ZHOU S B, et al. Effects of selenium application on the Selenium content, yield, qualities and biological characteristics of greens[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(5): 195-198, 203.
- [9] MOZAFARIYAN M, PESSARALI M, SAGHAFI K. Effects of selenium on some morphological and physiological traits of tomato plants grown under hydroponic condition[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, **40**(2): 139-144.
- [10] ARNON DI. Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoloxidase in beta vulgaris[J]. *Plant Physiology*, 1949, **24**(1): 1-15.
- [11] FANGXU X, YRFEI L, XIUFENG S, et al. Evaluation of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment combined with nano-packaging on quality of *Pleurotus eryngii*[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, **55**(11): 4 424-4 431.
- [12] BRADFORD M M. A rapid method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, **72**(1-2): 248-254.
- [13] AOAC. Vitamin C (Ascorbic Acid) in Vitamin Preparations and Juices. 2, 6 Dichloroindophenol Titrimetric Method [M]// Final action 1968. In AOAC Official Methods of Analysis, 15th edn (ed. K. Helrich), Association of Official Analytical Chemists, Inc., Arlington, VA, 1990, 967: 21.
- [14] 张顺以,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.
- [15] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [16] 中华人民共和国卫生部. GB5009.93-2017, 食品安全国家标准食品中硒的测定[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [17] 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): 1 749-1 756.  
ZHANG W, GENG Z C. Research progress regarding the effect of exogenous selenium on vegetables [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, **39**(9): 1 749-1 756.
- [18] 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 Boreai-Occidentalis Sinica*, 2010, **30**(5): 974-980.
- [19] XUE T, HARTIKAINEN H, PIIRONEN V. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce [J]. *Plant and Soil*, 2001, **237**(1): 55-61.
- [20] 郭文慧,刘庆,史衍玺.施硒对紫甘薯硒素累积及产量和品质的影响研究[J].中国粮油学报,2016,31(9): 31-37.  
GUO W H, LIU Q, SHI Y X. Effects of applying selenium on the accumulation of selenium, yield, and quality of purple sweetpotato[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, **31**(9): 31-37.
- [21] 金小琬,朱茜,黄进,等.硒对叶绿体及光合作用的影响[J].分子植物育种,2019,17(1): 288-294.  
JIN X W, ZHU X, HUANG J, et al. Effects of selenium on chloroplast and photosynthesis[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, **17**(1): 288-294.
- [22] 代惠萍,赵桦,贾根良,等.硒对紫花苜蓿叶片光合特性的影响[J].食品工业科技,2016,37(19): 363-365+371.  
DAI H P, ZHAO H, JIA G L, et al. Effects of Se stress on photosynthetic pigments in the leaves of *Medicago sativa* L. [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, **37**(19): 363-365.
- [23] 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.
- [24] 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.  
ZHU L, HU T, LIU D M, et al. Effects of foliar application of selenium on selenium absorption and antioxidant capacity of radish[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2019, **47**(3): 127-131.
- [25] 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.
- [26] 张杨杨,焦自高,艾希珍,等.土壤增施蛋氨酸硒对厚皮甜瓜生理特性和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2): 476-485.  
ZHANG Y Y, JIAO Z G, AI X Z, et al. Effects of methionine-selenium added in soil on physiological characteristics and quality of muskmelon[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, **22**(2): 476-485.
- [27] 谢启鑫,罗绍春,尹玉玲,等.施硒对芦笋硒含量与品质的影响[J].土壤通报,2016,47(1): 125-128.  
XIE Q X, LUO S C, YIN Y L, et al. Effect of selenium application on selenium content and nutrient quality of green asparagus[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, **47**(1): 125-128.
- [28] 王张民,袁林喜,朱元元,等.我国富硒农产品与土壤标准研究[J].土壤,2018,50(6): 1 080-1 086.  
WANG Z M, YUAN L X, ZHU Y Y, et al. On standards of selenium enriched agricultural products and selenium-rich soil in China[J], *Soils*, 2018, **50**(6): 1 080-1 086.