

## 研究报告 Original Papers

## 硫硒配施对衰老期大蒜生长、品质及抗氧化能力的影响

成波, 连海峰, 刘世琦\*, 郭会平, 于新会, 孙亚丽

山东农业大学园艺科学与工程学院/作物生物学国家重点实验室/农业部黄淮地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 山东泰安271018

**摘要:** 本文研究了衰老过程中硫硒配施对大蒜生长、品质及抗氧化能力的影响。结果显示, 硒的施用显著提高大蒜干鲜重、鳞茎鲜重和横径, 降低了MDA含量, 提高了处理200 d的 $F_v/F_m$ 值与叶绿素含量, 促进了大蒜的生长。硒处理均显著提高了谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性; 降低了超氧化物歧化酶(SOD)活性; 低硫浓度下低硒处理提高了过氧化氢酶(CAT)活性, 高硫浓度下, CAT活性随硒浓度升高而升高; 处理160 d的过氧化物酶(POD)活性变化与CAT相同, 硒处理200 d时, 低硫浓度下POD活性降低, 高硫浓度下POD活性呈先上升后下降趋势。硒处理提高了大蒜鳞茎Vc和大蒜素含量。可溶性蛋白含量在低硫浓度下随硒浓度升高而降低, 而在高硫浓度随之升高; 可溶性糖含量变化与可溶性蛋白恰好相反。综合各指标以低硫低硒处理( $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ S} + 3 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Se}$ )为最优。

**关键词:** 大蒜; 硫; 硒; 抗氧化能力; 品质; 生长

## Effects of Sulfur and Selenium Combination Fertilizing on the Growth, Quality and Antioxidant Ability of *Allium sativum* during Senescence

CHENG Bo, LIAN Hai-Feng, LIU Shi-Qi\*, GUO Hui-Ping, YU Xin-Hui, SUN Ya-Li

College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology/Agriculture Ministry Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (Huanghuai Region), Tai'an, Shandong 271018, China

**Abstract:** Garlic (*Allium sativum*) under hydroponic culture were studied to investigate the effect of sulfur (S) and selenium (Se) combination fertilizing on the growth, quality and antioxidant ability. The results showed that Se application significantly increased dry weight and fresh weight of garlic, fresh weight and diameter of bulbs, reduced the MDA content, improved  $F_v/F_m$  value and chlorophyll content at 200 days, promoted the growth of garlic. And Se treatment significantly increased glutathione peroxidase (GSH-Px) activity, while decreased superoxide dismutase (SOD) activity. At the low sulfur level, the low selenium treatment increased catalase (CAT) activity; under high sulfur concentration, the CAT activity enhanced with the increase of Se concentration. The changes of POD activities were same with CAT at 160 d, and at 200 d under the low sulfur level, Se-treatments decreased the POD activity, under the high sulfur level, the POD activity increased firstly and then decreased. Se treatment increased the contents of vitamin C and allicin. With the increase of Se concentration, the soluble protein content decreased at low sulfur level, but increased at high sulfur level. The changes of soluble sugar contents were opposite to the soluble protein. Based on comprehensive indexes, the treatments of  $\text{S}_2\text{Se}_3$  ( $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ S} + 3 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Se}$ ) was the best.

**Key words:** garlic (*Allium sativum*); sulfur; selenium; antioxidant ability; quality; growth

硒是瑞典化学家Berzelius于1817年首次发现的, 此后一直被认为是一种有毒元素。1957年, Schwarz和Foltz首次证明了硒是动物的必须营养元素。随着研究的进展, 硒被证明具有抗癌、抗衰老及提高免疫力的作用(Ellis和Salt 2003; El-Bayoumy 2001; Sinha和El-Bayoumy 2004; El-Bayoumy和Sinha 2004)。研究还表明硒在植物生长发育过程中也起到了非常重要的作用: 硒可以提

高植物的抗氧化能力(李登超等2003), 可促进叶绿素合成代谢(王海波等2011), 促进植物生长, 提高产量和品质(孙发仁1999; Munshi等1990)。且植物是人和动物摄入硒的主要来源, 生产富硒植物是

收稿 2014-09-19 修定 2014-12-01  
资助 国家公益性行业科研专项(200903018)和山东省农业重大创新项目。

\* 通讯作者(E-mail: sqliu@sdau.edu.cn; Tel: 0538-8246818)。

补充人体硒的有效途径(吴永尧等1997)。大蒜作为一种对硒具有较强富集能力的蔬菜,其新鲜蒜头中硒含量高达 $0.276 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,远高于一般蔬菜的平均硒含量 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。且有研究表明大蒜中硒化合物抗癌能力优于硫化物(Zembala等2010),硫和硒作为同主族元素,在原子大小、键能、电离性质等方面存在许多相似性(Mikkelsen等1990),因而植物根系周围硫浓度的高低会显著影响硒的吸收利用(Hajiboland和Amlad 2008),进而影响植物的生长发育。国内关于硒的研究主要集中在禾本科植物和豆科植物上,关于硫硒配施对大蒜生产的研究还未多见。为此,本文通过深液流水培的方式,定量控制根系环境中硫硒浓度,来研究不同硫水平下硒在大蒜衰老期延缓衰老中的作用及对生长与品质的影响,为富硒大蒜合理施肥、提高产量及品质提供参考。

## 材料与方法

### 1 试验材料与设计

试验于2013年10月至2014年5月在山东农业大学科技创新园进行。以深液流技术(deep flow technique, DFT)进行了对大蒜(*Allium sativum* L.)‘金蒜3号’的水培研究。深液流技术是植株根系生长在较为深厚并且是流动的营养液层的一种水培技术,采用微电脑控时器控制时间,每3 h供应营养液6 min, 30 min内自动回流完毕。以Hoagland和Amon营养液为基础营养液(除硫硒外),微量元素参照其通用配方,用去离子水配制,pH控制在6.0左右。试验设定2个硫浓度水平和3个硒浓度水平,共6个处理,分别为 $\text{S}_2\text{Se}_0$ 、 $\text{S}_2\text{Se}_3$ 、 $\text{S}_2\text{Se}_6$ 、 $\text{S}_4\text{Se}_0$ 、 $\text{S}_4\text{Se}_3$ 和 $\text{S}_4\text{Se}_6$ (表1)。硫由 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 提供,其他提供大量元素的化合物分别为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{KNO}_3$ 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_3$ ,营养液中N含量为 $15.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,P含量为 $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,K含量为 $6.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,Mg含量为 $2.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 及Ca含量为 $4.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。幼苗前期每隔7 d更换1次营养液,旺盛生长期则3 d更换1次。试验所用盆为65 cm(L) $\times$ 50 cm(W) $\times$ 35 cm(H)硬质塑料盆,每盆定植大蒜12株,每个处理20盆。

表1 不同处理中硫和硒的浓度

Table 1 The experimental design for sulfur and selenium concentrations

处理	S浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	Se浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
$\text{S}_2\text{Se}_0$	2	0
$\text{S}_2\text{Se}_3$	2	3
$\text{S}_2\text{Se}_6$	2	6
$\text{S}_4\text{Se}_0$	4	0
$\text{S}_4\text{Se}_3$	4	3
$\text{S}_4\text{Se}_6$	4	6

### 2 相关指标测定

2013年10月28日在覆盖聚乙烯无滴膜的拱棚内播种,播种蒜瓣饱满无瑕疵且大小一致,控制棚内温度 $0\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,自然光周期。分别于播种后160和200 d测定水培青蒜苗的地上部干鲜重,叶片的叶绿素含量、PSII最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、丙二醛(MDA)含量及叶片的谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)活性。并在鳞茎收获后测定其鲜重、横径及维生素C(Vc)、大蒜素、可溶性蛋白、可溶性糖含量等品质指标。各处理取代表性植株10株,去除干老部分,混匀,3次重复。

用电子天平测量干鲜重,用游标卡尺(精确到 $0.02 \text{ mm}$ )测量鳞茎横径, $F_v/F_m$ 采用汉莎FMS-2便携调制式荧光仪测定。叶绿素含量的测定采用丙酮比色法(赵世杰等2002),大蒜素含量的测定采用苯胺法(屈姝存和周朴华1998),可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法(赵世杰等2002),可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝法(赵世杰等2002),Vc含量的测定采用2,6-二氯酚比色法(王学魁2006),MDA含量的测定采用硫代巴比妥酸显色法(赵世杰等2002),SOD活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)法(赵世杰等2002),CAT活性的测定采用紫外吸收法(赵世杰等2002),以及POD活性的测定采用愈创木酚法(李合生2000)测定。GSH-Px参照Flohé和Günzler(1984)的方法测定。

### 3 数据处理

试验数据采用DPS 6.55和Excel进行统计分析。

## 实验结果

### 1 硫硒配施对蒜苗生长及鳞茎外观品质的影响

表2显示, 适量施硒能提高大蒜地上部的干鲜重和鳞茎的外观品质。低硫浓度下, 低硒浓度处理 ( $S_2Se_3$ ) 显著提高了地上部干鲜重、鳞茎鲜重及横径, 其中地上部干重、鳞茎鲜重和鳞茎横径均为6个处理中最大值, 较  $S_2Se_0$  处理分别提高了7.98% (160 d干重)、13.74% (200 d干重)、37.16%、8.71%; 高硒浓度处理的各指标较低硒处理显著下降。高硫浓度下, 地上部干鲜重、鳞茎鲜重及横径均随硒浓度的增加而增长,  $S_4Se_6$  处理的达到最大值。从表1中地上部干鲜重变化还可看出, 高浓度的硒提高了植株中的水分含量。可见, 硒的适当施用可以促进蒜苗的生长, 改善鳞茎的外观品质。

### 2 硫硒配施对蒜苗 $F_v/F_m$ 、叶绿素含量及MDA含量的影响

由表3可以看出, 播种后160 d, 各处理的  $F_v/F_m$  差异并不显著; 在播种后200 d, 施硒处理的  $F_v/F_m$  值均高于不施硒处理的, 且高硫处理均高于低硫处理的。衰老期不同处理的叶绿素含量逐渐下

降。播种后160 d, 施硒处理显著降低了叶绿素含量; 而播种后200 d, 硒的施用则提高了叶绿素含量。施硒在衰老时显著降低了叶片MDA含量, 有效延缓了衰老的进行。不同时期的MDA含量变化趋势一致。低硫浓度下, 低硒处理 ( $S_2Se_3$ ) 显著降低了叶片中MDA的含量, 达43.4%; 而高硒处理 ( $S_2Se_6$ ) 较低硒处理提高了MDA含量, 但仍显著低于  $S_2Se_0$ 。高硫浓度下, 叶片MDA含量随硒含量的升高而降低。处理200 d的MDA含量显著高于160 d的, 这表明衰老加剧了膜脂过氧化作用, 虽然Se的施用降低了MDA含量, 但并不足以抵消衰老带来的伤害。由此可见, 适宜的硫硒浓度可以改善大蒜的光合作用, 降低不利氧化物质的积累, 从而起到延缓衰老的作用。

### 3 硫硒配施对大蒜叶片GSH-Px、SOD、CAT和POD活性的影响

表4显示, 硒的施用显著影响了大蒜叶片中各酶的活性。随着衰老的进行, GSH-Px活性显著提高。在播种后, 在同一硫浓度下, GSH-Px活性均随硒浓度的提高而显著升高, 而且高硫浓度下GSH-Px活性均高于低硫浓度处理的。不同时期的SOD

表2 硫硒配施对大蒜地上部干鲜重及鳞茎鲜重、横径的影响

Table 2 Effect of S and Se application on fresh and dry weight, bulb fresh weight, diameter of garlic shoots

处理	地上部鲜重/g		地上部干重/g		鳞茎	
	160 d	200 d	160 d	200 d	鲜重/g	横径/cm
$S_2Se_0$	231.68±0.3 <sup>c</sup>	204.53±7.4 <sup>b</sup>	18.83±0.28 <sup>b</sup>	26.19±0.62 <sup>b</sup>	55.36±1.1 <sup>e</sup>	5.28±0.031 <sup>e</sup>
$S_2Se_3$	241.10±5.4 <sup>b</sup>	229.03±5.5 <sup>a</sup>	20.31±0.46 <sup>a</sup>	29.80±1.07 <sup>a</sup>	75.93±1.4 <sup>a</sup>	5.74±0.030 <sup>a</sup>
$S_2Se_6$	227.98±8.3 <sup>c</sup>	188.10±2.2 <sup>c</sup>	17.61±0.25 <sup>c</sup>	20.94±0.25 <sup>c</sup>	60.48±0.7 <sup>d</sup>	5.37±0.035 <sup>d</sup>
$S_4Se_0$	213.55±5.6 <sup>d</sup>	167.26±2.9 <sup>c</sup>	16.69±0.44 <sup>d</sup>	18.83±0.33 <sup>f</sup>	61.89±1.3 <sup>d</sup>	5.38±0.038 <sup>d</sup>
$S_4Se_3$	216.59±2.6 <sup>d</sup>	177.63±2.2 <sup>d</sup>	17.14±0.21 <sup>cd</sup>	22.29±0.27 <sup>d</sup>	64.96±1.5 <sup>c</sup>	5.58±0.040 <sup>c</sup>
$S_4Se_6$	248.37±1.0 <sup>a</sup>	236.37±3.8 <sup>a</sup>	19.78±0.08 <sup>a</sup>	23.60±0.38 <sup>c</sup>	71.78±1.2 <sup>b</sup>	5.65±0.025 <sup>b</sup>

表中同列数据后不同小写字母表示5%显著差异水平, 下表同此。

表3 硫硒配施对大蒜叶片  $F_v/F_m$ 、叶绿素含量及MDA含量的影响

Table 3 Effect of S and Se application on  $F_v/F_m$ , total chlorophyll contents and MDA contents in garlic leaves

处理	$F_v/F_m$		叶绿素含量/ $mg \cdot g^{-1}$ (FW)		MDA含量/ $nmol \cdot g^{-1}$ (FW)	
	160 d	200 d	160 d	200 d	160 d	200 d
$S_2Se_0$	0.8310±0.04 <sup>a</sup>	0.6777±0.06 <sup>b</sup>	0.7442±0.02 <sup>bc</sup>	0.4833±0.03 <sup>d</sup>	5.3±0.17 <sup>a</sup>	9.4±0.77 <sup>ab</sup>
$S_2Se_3$	0.8270±0.01 <sup>a</sup>	0.8127±0.03 <sup>a</sup>	0.6969±0.09 <sup>cd</sup>	0.4904±0.01 <sup>cd</sup>	3.0±0.09 <sup>d</sup>	7.1±0.32 <sup>d</sup>
$S_2Se_6$	0.8330±0.01 <sup>a</sup>	0.6910±0.01 <sup>b</sup>	0.6235±0.01 <sup>d</sup>	0.5491±0.03 <sup>cd</sup>	4.1±0.29 <sup>b</sup>	7.6±0.26 <sup>cd</sup>
$S_4Se_0$	0.7997±0.03 <sup>a</sup>	0.7273±0.01 <sup>a</sup>	0.9913±0.04 <sup>a</sup>	0.5556±0.05 <sup>c</sup>	4.0±0.25 <sup>bc</sup>	9.8±0.50 <sup>a</sup>
$S_4Se_3$	0.8230±0.01 <sup>a</sup>	0.8143±0.01 <sup>a</sup>	0.8246±0.03 <sup>b</sup>	0.7960±0.05 <sup>a</sup>	3.8±0.19 <sup>bc</sup>	8.4±0.27 <sup>bc</sup>
$S_4Se_6$	0.8140±0.02 <sup>a</sup>	0.7803±0.04 <sup>a</sup>	0.7451±0.01 <sup>bc</sup>	0.6694±0.04 <sup>b</sup>	3.7±0.31 <sup>c</sup>	6.1±0.57 <sup>c</sup>

活性变化趋势相同,在同一硫浓度下均随硒浓度的升高而降低。且与GSH-Px相同,SOD活性随时间推移而升高。CAT活性变化较为复杂。低硫浓度下,低硒处理(S<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)提高了大蒜叶片CAT活性;而高硒处理(S<sub>2</sub>Se<sub>6</sub>)的CAT活性较S<sub>2</sub>Se<sub>0</sub>处理则有所下降。高硫浓度下,CAT活性随硒浓度的提高而升高。低硫浓度下不同处理的CAT活性随时间延长有所下降,与之相反,在高硫浓度下CAT活性则呈升高趋势。播种后160 d,在低硫浓度下,低硒处理(S<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)提高了POD活性,而高硒处理(S<sub>2</sub>Se<sub>6</sub>)降低了其活性;在高硫浓度下,POD活性随硒浓度的提高先降低后升高。播种后200 d,在低硫浓度下硒的施用降低了POD活性,而在高硫浓度下,POD活性变化趋势与160 d时低硫浓度下相同,这表明,高硫浓度可能延迟了衰老的到来。从表4还可看出,播种后200 d时POD活性均高于160 d。可见,硫硒配施显著影响了大蒜叶片中抗氧化酶系统活性,且

对各酶的影响是有差异的。

#### 4 硫硒配施对大蒜鳞茎Vc、大蒜素、可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

由表5可知,低硫浓度下,低硒处理(S<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)显著提高了大蒜鳞茎的Vc含量,较对照S<sub>2</sub>Se<sub>0</sub>提高了9.6%;而高硒处理(S<sub>2</sub>Se<sub>6</sub>)的Vc含量较低硒处理有所下降。高硫浓度下,Vc含量随硒浓度的升高而增加,较对照增幅达8.9%。鳞茎中大蒜素含量变化趋势与Vc相同,低硫低硒(S<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)与高硫高硒(S<sub>4</sub>Se<sub>6</sub>)处理对大蒜素的增幅分别达11.2%和11.4%。低硫浓度下,鳞茎可溶性蛋白含量随硒浓度升高而降低;而高硫浓度下,可溶性蛋白含量变化趋势与低硫浓度下正好相反。鳞茎可溶性糖含量与Vc和大蒜素变化趋势相同,均为在低硫浓度下低硒处理提高其含量,高硒处理降低其含量;在高硫浓度下,硒的施用降低了鳞茎可溶性糖含量。

表4 硫硒配施对大蒜叶片GSH-Px、SOD、CAT及POD活性的影响

Table 4 Effect of S and Se application on GSH-Px, SOD, CAT and POD activities in garlic leaves

处理	GSH-Px活性/ μmol (GSH)·mg <sup>-1</sup> (蛋白)·min <sup>-1</sup>		SOD活性/ U·mg <sup>-1</sup> (FW)·min <sup>-1</sup>		CAT活性/ ΔOD <sub>240</sub> ·g <sup>-1</sup> (FW)·min <sup>-1</sup>		POD活性/ ΔOD <sub>470</sub> ·g <sup>-1</sup> (FW)·min <sup>-1</sup>	
	160 d	200 d	160 d	200 d	160 d	200 d	160 d	200 d
	S <sub>2</sub> Se <sub>0</sub>	0.28±0.03 <sup>c</sup>	5.38±0.28 <sup>c</sup>	131±11.54 <sup>a</sup>	205±9.82 <sup>bc</sup>	6.84±0.42 <sup>c</sup>	5.46±0.10 <sup>e</sup>	0.0367±0.002 <sup>c</sup>
S <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	3.07±0.23 <sup>d</sup>	12.57±1.02 <sup>b</sup>	129±14.20 <sup>a</sup>	162±4.27 <sup>d</sup>	12.50±0.91 <sup>a</sup>	6.85±0.20 <sup>d</sup>	0.0752±0.003 <sup>a</sup>	0.0795±0.001 <sup>c</sup>
S <sub>2</sub> Se <sub>6</sub>	6.56±0.06 <sup>b</sup>	16.32±0.58 <sup>a</sup>	105±1.64 <sup>bc</sup>	153±7.94 <sup>d</sup>	6.45±0.39 <sup>c</sup>	3.72±0.14 <sup>f</sup>	0.0372±0.002 <sup>c</sup>	0.0604±0.001 <sup>d</sup>
S <sub>4</sub> Se <sub>0</sub>	2.63±0.26 <sup>d</sup>	12.21±0.24 <sup>b</sup>	134±1.64 <sup>a</sup>	255±23.0 <sup>a</sup>	6.73±0.34 <sup>c</sup>	7.46±0.26 <sup>c</sup>	0.0318±0.003 <sup>cd</sup>	0.0666±0.003 <sup>d</sup>
S <sub>4</sub> Se <sub>3</sub>	3.94±0.20 <sup>c</sup>	17.62±0.88 <sup>a</sup>	113±3.38 <sup>b</sup>	209±3.79 <sup>b</sup>	9.69±0.68 <sup>b</sup>	13.30±0.17 <sup>b</sup>	0.0308±0.001 <sup>d</sup>	0.1360±0.005 <sup>d</sup>
S <sub>4</sub> Se <sub>6</sub>	10.50±0.42 <sup>a</sup>	16.25±1.46 <sup>a</sup>	91±3.32 <sup>c</sup>	188±5.03 <sup>c</sup>	9.12±0.44 <sup>b</sup>	14.20±0.29 <sup>a</sup>	0.0485±0.002 <sup>b</sup>	0.0589±0.002 <sup>d</sup>

表5 硫配施对大蒜鳞茎Vc、大蒜素、可溶性蛋白、可溶性糖含量的影响

Table 5 Effect of S and Se application on Vc, allicin, soluble protein and soluble sugar contents in garlic bulbs

处理	Vc含量/mg·g <sup>-1</sup> (FW)	大蒜素含量/mg·g <sup>-1</sup> (FW)	可溶性蛋白含量/mg·g <sup>-1</sup> (FW)	可溶性糖含量/%
S <sub>2</sub> Se <sub>0</sub>	2.90±0.0095 <sup>c</sup>	4.10±0.06 <sup>bc</sup>	18.30±0.035 <sup>a</sup>	21.27±0.35 <sup>c</sup>
S <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	3.18±0.0068 <sup>a</sup>	4.56±0.03 <sup>a</sup>	16.53±0.230 <sup>cd</sup>	25.59±0.17 <sup>a</sup>
S <sub>2</sub> Se <sub>6</sub>	2.90±0.0103 <sup>c</sup>	4.07±0.07 <sup>c</sup>	16.30±0.024 <sup>de</sup>	17.82±0.39 <sup>d</sup>
S <sub>4</sub> Se <sub>0</sub>	2.91±0.0046 <sup>c</sup>	4.12±0.01 <sup>bc</sup>	16.20±0.21 <sup>4c</sup>	22.11±0.30 <sup>b</sup>
S <sub>4</sub> Se <sub>3</sub>	3.07±0.0103 <sup>b</sup>	4.16±0.01 <sup>b</sup>	16.69±0.044 <sup>c</sup>	18.42±0.59 <sup>d</sup>
S <sub>4</sub> Se <sub>6</sub>	3.17±0.0207 <sup>a</sup>	4.59±0.01 <sup>a</sup>	17.27±0.077 <sup>b</sup>	16.02±0.18 <sup>c</sup>

## 讨 论

一般认为,硒在植物中的作用受其浓度影响:在低浓度下起抗氧化剂的作用,而在高浓度下自

身作为氧化剂参与细胞内过氧化反应,起毒害作用(Hartikainen等2000)。本试验结果表明,硒对大蒜生长、品质及抗氧化作用还受到硫浓度和生长时期的影响。

硒可以通过作用于植物体内某些生化过程,进而直接影响作物的生物量。李登超等(2003)将小白菜和菠菜栽培到含不同硒浓度的营养液中,结果表明,硒浓度低于 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时可促进小白菜和菠菜的生长,增加植株产量;高于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时则抑制小白菜和菠菜的生长,降低植株产量。Xue等(2001)研究表明硒在生菜幼苗时期抑制了其生长,而在衰老期促进了其干鲜重的积累。其他学者在黑麦草(Hartikainen等2000)、土豆(Turakainen等2004)、玉米(郝玉波等2012)、绿茶(Hu等2003)、和大豆(咎亚玲等2010)上的研究同样表明适宜浓度的硒可以提高植物的生长速率。王越等(2014)研究发现配合施用适宜硫浓度,硒可以更好地促进大蒜的生长,提升大蒜品质。本试验结果与之相一致。本研究结果显示,低硫浓度下,适量的硒可显著提高大蒜干鲜重,改善鳞茎的外观品质,过量的硒则会对大蒜产生不利影响,产生毒害;高硫浓度下,大蒜对高浓度硒的耐受能力提高,未产生毒害现象,这可能是由于大蒜根系环境中高浓度的硫通过竞争抑制了硒的吸收利用,从而相对降低了植株中硒的含量。硒促进植物生长的作用与其抗氧化能力紧密相关。有研究表明硒主要是通过启动与GSH-Px合成有关的特异基因,提高酶含量和增强酶活性(汪志君等2002),来降低膜质过氧化产物MDA的含量、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的产生速率和自由基的生成量(吴永尧等2000),从而改善植物细胞内环境,促进植物生长。

高硒浓度提高了大蒜植株的含水量,这可能是高硒引起的代谢紊乱。硒可以取代硫形成硒代氨基酸,在此过程中,乙烯的合成增强,而乙烯可以改变膜透性,导致 $\text{K}^+$ 外泄(Xue等2001)。由此可以假设,植物通过提高细胞间隙内水分含量来维持自身渗透压平衡。

吴永尧等(2000)发现线粒体呼吸速率和叶绿体电子传递速率都与硒的存在以及硒含量的多少有显著的相关性。在一定范围内( $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下),硒增强了线粒体呼吸速率和叶绿体电子传递速率。而当处在较高硒浓度( $\geq 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )时,则导致其速率降低,说明硒可能参与了植物体内的能量代谢过程。硒对大蒜叶绿素含量的作用受生长时期的影响。硒在播种160 d降低了大蒜叶片中叶

绿素含量,而在200 d时提高了叶片中叶绿素含量。这之前Hartikainen等(2000)在黑麦草上的研究结果相似。但黑麦草叶绿素只在高硒浓度下升高,且增幅过大超过700%,被认为是代谢异常的表现。硒能显著提高柿树和核桃树中的叶绿素含量,柿树中叶绿素含量增幅最高达63.89%,核桃树可达30.69% (吴国良等2004)。在豌豆(郁建锋等2009)、生菜(尚庆茂等1998)和胡萝卜(王晋民等2006)等蔬菜上也证实了硒能够提高叶绿素含量。

$F_v/F_m$ 代表了PSII最大光化学效率,是植物光合性能的重要指标,非胁迫条件下该参数的变化极小,不受物种和生长条件的影响,胁迫条件下该参数明显下降(张守仁1999)。160 d时,硒的施用对大蒜叶片 $F_v/F_m$ 值无显著影响;200 d时,各处理 $F_v/F_m$ 值均小于160 d。但施硒处理降幅远小于未施硒处理,这表明施硒缓解了衰老造成的胁迫。未施硒处理的PSII光化学效率下调,可能会导致光抑制和活性氧的积累,而施硒处理GSH-Px活性高,利于活性氧的清除,从而维持了较高的PSII光化学效率(Foyer和Noctor 2000; Seppanen等2003)。

丙二醛(MDA)作为膜脂氧化的主要产物之一,其积累是自由基毒害作用的表现,因此,MDA可以代表细胞的脂质过氧化水平和生物膜损伤程度的大小(王金胜等1997),且已成为判断膜脂过氧化作用的一个重要指标(詹少华等2005)。试验结果显示,施硒显著降低了大蒜叶片中MDA含量,低硫浓度下高硒处理较低硒处理略提高了其含量,但仍低于对照,这可能是高硒产生了一定的毒害作用。高硫浓度处理显示,高硫有助于降低高硒的毒害作用。MDA的下降得益于施硒提高了处理中GSH-Px等相关酶的活性和含量,清除了更多衰老过程中产生的自由基,从而减少了自由基的毒害作用,降低了膜脂过氧化作用。

硒通过酶促机制和非酶促机制参与自由基清除系统而产生抗氧化功能,其在园艺植物体内的抗氧化作用主要是通过酶促机制实现的(郭艳等2013)。本试验结果表明,适宜的硒浓度可以提高GSH-Px与CAT活性,施硒降低了SOD的活性,而施硒对POD活性的影响较复杂,受硫浓度和生长时期的影响。尚庆茂等(2005)在辣椒上的研究发现施硒( $\leq 0.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )可分别使GSH-Px和POD活性提

高11.5倍和63.6%,对SOD和CAT则表现为负效应。而段咏新等(1997)在大蒜上的研究表明施硒可提高GSH-Px、SOD和CAT活性,降低POD活性。GSH-Px的活性中心是硒半胱氨酸,硒浓度的高低对其活性有直接作用。SOD、CAT和POD虽然不是含硒酶,但硒可能影响了其基因表达的转录水平,从而影响了其活性和含量,不同研究在SOD、CAT和POD活性变化上的不同结果还可能与生物抗氧化系统在细胞内的定位性有关(薛泰麟等1993)。

本试验结果显示,适宜硫硒配施可提高大蒜鳞茎中大蒜素的含量,过量的硒会降低其含量,这与王越等(2014)和王昌全等(2004)在大蒜上的研究结果相似。结果还表明,施硒提高了大蒜鳞茎的Vc含量,这与其他学者在生菜(尚庆茂等1998)和葡萄(王海波等2011)上的研究结果相一致,但与王丽霞等(2012a)和王晋民等(2006)指出的施硒降低了茎瘤芥和胡萝卜Vc含量的观点不同。硒对大蒜中可溶性蛋白含量的作用受硫浓度的影响较大。低硫浓度下,硒的施用降低了可溶性蛋白的含量,而硒提高了高硫浓度下可溶性蛋白的含量。低硫浓度下施硒提高了大蒜中可溶性糖含量,而高硫浓度下硒的施用降低了其含量。这与王丽霞(2012b)等硒对茎瘤芥可溶性糖含量无影响的研究结果不同。硒对植物酶系统及品质影响的具体作用机制还有待进一步探究。

综合分析本试验研究结果,选择以 $S_2Se_3$  ( $S=2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $Se=3\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )为适合硫硒施用量,该处理虽不是大蒜鲜重最大处理,但是其干重及鳞茎指标最优,且在衰老时提高了大蒜 $F_v/F_m$ 值及叶绿素含量。虽然降低了个别酶活性和可溶性蛋白含量,但提高了整体保护酶系统的活性,改善了大蒜综合营养品质,综合效果以此处理最佳。

### 参考文献

段咏新,傅庭治,傅家瑞(1997). 硒在大蒜体内的生物富集及其抗氧化作用. 园艺学报, 24 (1-4): 343~347  
郭艳,张江萍,刘和(2013). 微量元素硒在园艺植物中的生理功能研究进展. 中国农学通报, 29 (1): 76~79  
郝玉波,刘华琳,慈晓科,安宏明,董树亭,张吉旺,刘鹏,赵斌(2012). 施硒对两种类型玉米硒元素分配及产量、品质的影响. 应用生态学报, 23 (2): 411~418  
李登超,朱祝军,韩秋敏,徐志豪(2003). 硒对菠菜、小白菜生长及

抗氧化活性的研究. 上海交通大学学报(农业科学版), 21 (1): 5~8  
李合生(2000). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 119~120, 125~127, 164~165, 167~169, 260~261  
屈姝存,周朴华(1998). 大蒜油提取及大蒜油与大蒜渣的化学成分分析. 湖南农业大学学报(自然科学版), 24 (3): 235~237  
尚庆茂,陈淑芳,张志刚(2005). 硒对高温胁迫下辣椒叶片抗氧化酶活性的调节作用. 园艺学报, 32 (1): 35~38  
尚庆茂,高丽红,李式军(1998). 硒素营养对水培生菜品质的影响. 中国农业大学学报, 3 (3): 67~71  
孙发仁(1999). 富硒蔬菜的研究与开发. 西北园艺, (3): 7~8  
王昌全,李冰,李焕秀(2004). 硒硫配合喷施对大蒜营养品质的影响. 园艺学报, 31 (4): 461~466  
王海波,王孝娣,姚秀业,谢计蒙,王宝亮,魏长存,刘凤之(2011). 氨基酸硒叶面肥在玫瑰香葡萄上的应用效果. 中外葡萄与葡萄酒, (5): 47~49  
王金胜,郭春绒,张映(1997). 农业生物化学技术. 太原: 山西科学技术出版社, 162~163  
王晋民,赵之重,李国荣(2006). 硒对胡萝卜含硒量、产量及品质的影响. 植物营养与肥料学报, 12 (2): 240~244  
王丽霞,汤举红,罗庆熙,段九菊(2012a). 不同浓度硫、硒处理对茎瘤芥营养元素吸收和营养品质的影响. 东北农业大学学报, 43 (7): 131~136  
王丽霞,汤举红,罗庆熙,段九菊(2012b). 硫硒配施对茎瘤芥生长和营养效应的研究. 西北植物学报, 32 (5): 1002~1006  
王学魁(2006). 植物生理生化实验原理与技术. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 267~268  
王越,刘世琦,李贺,成波,刘庆,马桂芹(2014). 硫硒配施对大蒜光合特性、产量及品质的影响. 山东农业科学, 46 (5): 66~71  
汪志君,蒋士龙,李式军(2002). 麦芽富硒及其生化特性的研究. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 23 (2): 74~78  
吴国良,刘群龙,刘和,季兰,阎和健,王丽萍,王勇(2004). 树木自动滴输微肥对果树生理和果实品质的影响. 应用与环境生物学报, 10 (2): 154~157  
吴永尧,卢向阳,彭振坤,罗泽民(2000). 硒在水稻中的生理生化作用探讨. 中国农业科学, 33 (1): 100~103  
吴永尧,彭振坤,罗泽民(1997). 硒的多重生理学功能及对人和动物健康的影响. 湖南农业大学学报, 23 (3): 294~300  
薛泰麟,侯少范,谭见安,刘更另(1993). 硒在高等植物体内的抗氧化作用I. 硒对过氧化作用的抑制效应及酶促机制的探讨. 科学通报, 38 (3): 274~277  
郁建锋,王立新,张海芸,黄姗姗,杜兰芳(2009). 硒对铅胁迫下豌豆幼苗生长发育的影响. 北方园艺, (3): 30~31  
管亚玲,王朝辉,毛晖, Graham Lyons (2010). 施用硒、锌、铁对玉米和大豆产量与营养品质的影响. 植物营养与肥料学报, 16 (1): 252~256  
詹少华,林毅,吕凯(2005). 天然彩色棉过氧化物酶-丙二醛及硝酸还原酶的测定. 安徽农业科学, 33 (1): 17~18  
张守仁(1999). 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. 植物学通报, 16 (4): 444~448  
赵世杰,史国安,董新纯(2002). 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科学技术出版社, 55~57, 138~139  
El-Bayoumy K (2001). The protective role of selenium on genetic damage and on cancer. Mutat Res, 475 (1-2): 123~39

- El-Bayoumy K, Sinha R (2004). Mechanisms of mammary cancer chemoprevention by organoselenium compounds. *Mutat Res*, 551 (1-2): 181~97
- Ellis DR, Salt DE (2003). Plants, selenium and human health. *Curr Opin Plant Biol*, 6 (3): 273~279
- Flohé L, Günzler WA (1984). Assays of glutathione peroxidase. In: Ed Packer L (ed). *Methods in Enzymology*. New York: Academic Press, 114~121
- Foyer CH, Noctor G (2000). Oxygen processing in photosynthesis regulation and signaling, *Trends Plant Sci*, 1 (12): 359~388
- Hajibolani R, Amlad L (2008). The effects of selenate and sulphate supply on the accumulation and volatilization of Se by cabbage, kohlrabi and alfalfa plants grown hydroponically. *Agr Food Sci*, 17 (2): 177~190
- Hartikainen H, Xue T, Piironen V (2000). Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass. *Plant Soil*, 225 (1-2): 193~200
- Hu QH, Xu J, Pang GX (2003). Effect of selenium on the yield and quality of green tea leaves harvested in early spring. *J Agric Food Chem*, 51 (11): 3379~3381
- Mikkelsen RL, Wan HF (1990). The effect of selenium on sulfur uptake by barley and rice. *Plant Soil*, 121 (1): 151~153
- Munshi CB, Combs GFJ, Mondy NI (1990). Effect of selenium on the nitrogenous constituents of the potato. *J Agric Food Chem*, 38 (11): 2000~2002
- Seppänen M, Turakainen M, Hartikainen H (2003). Selenium effects on oxidative stress in potato. *Plant Sci*, 165 (2): 311~319
- Sinha R, El-Bayoumy K (2004). Apoptosis is a critical cellular event in cancer chemoprevention and chemotherapy by selenium compounds. *Curr Cancer Drug Tar*, 4 (1): 13~28
- Turakainen M, Hartikainen H, Seppänen MM (2004). Effects of selenium treatments on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and concentrations of soluble sugars and starch. *J Agric Food Chem*, 52 (17): 5378~5382
- Xue T, Hartikainen H, Piironen V (2001). Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce. *Plant Soil*, 237 (1): 55~61
- Zembala M, Filek M, Walas S, Mrowiec H, Kornaś A, Miszalski Z, Hartikainen H (2010). Effect of selenium on macro- and micro-element distribution and physiological parameters of rape and wheat seedlings exposed to cadmium stress. *Plant Soil*, 329 (1-2): 457~468