

不同价态外源硒对冬小麦生长及生理代谢的影响

付冬冬, 王松山, 梁东丽*, 缪树寅, 段曼莉, 胡 斌

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:用盆栽试验研究了不同浓度外源硒(四价和六价)处理土壤对小麦生长和生理代谢的影响,旨在为富硒小麦的种植和开发提供理论依据。结果表明:外源硒抑制了苗期小麦的生长(株高和生物量);而在生长后期,随外源硒浓度增加表现为先促进后抑制作用。 Se(IV) 和 Se(VI) 处理对小麦生物量影响的 EC_{10} 分别从苗期的 $1.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到收获期的 $28.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明小麦对硒的耐受浓度随生长时间的延长逐渐增大。 Se(VI) 低浓度($\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对小麦生长的促进作用及高浓度($\geq 2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对小麦生长的抑制作用均大于 Se(IV) 。小麦籽粒产量随外源 Se(IV) 和 Se(VI) 浓度的增大先升高而后降低,分别在 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度处理时达到最大。低浓度硒处理($\text{Se(IV)} \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\text{Se(VI)} \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)能促进拔节期小麦叶片中GSH和POD等抗氧化酶活性,显著降低叶片过氧化物物质MDA($\text{Se} \leq 2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)含量,高浓度硒处理则与之相反。

关键词:外源硒;生长;生理代谢;冬小麦

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)08-1500-08

Effects of Exogenetic Selenite and Selenate on the Growth and Physiological Metabolism of Winter Wheat

FU Dong-dong, WANG Song-shan, LIANG Dong-li*, MIAO Shu-yin, DUAN Man-li, HU Bin

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to investigate the effects of exogenetic selenite and selenate on the growth and physiological metabolism of winter wheat in order to provide theoretical basis for the planting of selenium-enriched wheat. The results showed that exogenetic selenium inhibited wheat seedling growth (plant height and biomass) at all selenium levels. However, selenium first stimulated and then inhibited wheat growth as the increase of exogenetic selenium concentration in the late growth stage. The EC_{10} for Se(IV) and Se(VI) increased from $1.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ at seedling stage to $28.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $4.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ at the harvest stage, respectively. Selenite had greater influence on the growth of wheat than selenate. Wheat yield first increased and then decreased as the increase of added selenium, and reached the maximum values at $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for selenite and $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for selenate treated plants. Physiological metabolism analysis of winter wheat leaves showed that lower concentration of selenium in soil ($\text{Se(IV)} \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $\text{Se(VI)} \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) stimulated the activity of GSH and POD, and decreased MDA ($\text{Se} \leq 2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) contents significantly; the contrary results were found for higher concentration selenium treated plants.

Keywords: selenium; growth; physiological metabolism; winter wheat

硒是人体和动物谷胱甘肽过氧化物酶的组成成分及酶家族活性部位的辅基,具有抗氧化、解毒、提高机体免疫能力的作用^[1]。世界范围大部分人日常膳食

中硒摄入量不足^[2],主要是由于土壤普遍缺硒,导致农作物含硒量低^[3-4],这严重地影响着人们的健康^[5-6,2]。目前常利用叶面喷硒或土壤施硒肥来提高作物的硒含量,来增加食物链中的硒,以满足人体和动物硒营养需求^[7]。谷物、肉类和鱼是饮食中硒的主要来源^[8],谷物和谷物产品占据了70%中国缺硒区的硒来源^[9]。小麦是我国仅次于水稻的第二大粮食作物,也是北方地区的主食。小麦从土壤中吸收的Se有63%分布在籽

收稿日期:2011-01-11

基金项目:国家小麦现代农业产业技术体系建设专项;西北农林科技大学“创新团队建设计划”

作者简介:付冬冬(1985—),女,山东聊城人,硕士研究生,主要从事环境化学的研究。E-mail:daoweideguangyang@163.com

* 通讯作者:梁东丽 E-mail:dongliliang2005@yahoo.com

粒中,且主要以有机硒形式存在^[10],因此食用含硒小麦合理补充人体需要的硒是缺硒地区安全和有效的补硒途径^[11]。

Se(IV)和Se(VI)是作物吸收硒的主要形式^[12-13]。但由于Se(IV)和Se(VI)在土壤中迁移转化方式的不同,导致了其在土壤中移动性、生物有效性和毒性大小的差异。水培条件下,植物对硒酸盐和亚硒酸盐的吸收速率的研究结果一致^[14];但在土培条件下,硒酸盐更易被吸收和转运,因而生物有效性更高^[15-16],而亚硒酸盐更容易被土壤表面所吸附^[17],也更容易累积在植物的根部^[18],所以在生产上常选用硒酸盐作为肥料^[19],但是在田间喷施上由于六价硒必须首先在叶中转化为二价硒再转化为有机硒,而四价硒不需要酶催化就能直接转化为有机硒而进入籽粒,故多选用亚硒酸盐^[20]。硒在小麦体内通过吸收转化促进生长发育,提高产量,改善品质^[21-22],主要源于硒的抗氧化功能^[23],且已经被证明主要是通过谷胱甘肽过氧化物酶的机制来实现的^[24]。麦苗喷施 $30\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}\text{Se(IV)}$ -硒溶液,在某些生长期可显著提高小麦植株体内SOD、POD、CAT和ASP酶活性,降低MDA含量;有利于小麦植株体组织抗氧化而延缓衰老,籽粒硒含量提高,同时达到增产的作用^[25]。但现有的研究主要集中在喷施Se(IV)和土施Se(VI)处理小麦上,对于两种价态硒土施时对小麦生长和生理代谢的影响研究未见报道。本文系统研究了两种不同价态不同浓度外源硒施入土壤后对小麦生长的影响及其生理机理,旨在为富硒小麦的种植和开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

土样采自试验田的红油土,多点取样法采集表层0~20 cm土壤。自然风干,研磨后过2 mm筛备用。土壤的基本理化性状为:pH 7.75,CEC $23.34\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,黏粒 39.5%,碳酸钙 $55.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质 $16.33\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $1.113\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全硒 $0.131\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。供试硒有两种,分别为Se(VI)和Se(IV),均为分析纯试剂。盆栽作物为小麦,品种为小堰22。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验共设13个处理,分别为:对照(CK),以Se(VI)和Se(IV)形式施入硒浓度分别为0.5、1、2.5、5、10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 各5个处理,考虑到两种硒毒害大小的不同,增设Se(VI) $0.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和Se(IV) $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 2个处

理。硒的最高浓度设定参照其他研究中硒的最高浓度设定值^[15],及有关陕西硒中毒地区土壤硒含量^[26]。每个处理重复4次。

方法为:选择内径为30 cm、深度为30 cm的塑料盆,每盆装土14 kg,每千克土施入0.15 g N,0.033 g P。种植小麦,时间为2009年9月24日至2010年5月24日,生长期为240 d,小麦出苗后每盆定植10株,植株在自然光照下生长,定期浇水保持土壤湿度为田间持水量的70%。分别在苗期(2009年11月20日)、拔节期(2010年3月5日)、收获期(2010年5月24日)测定植株高度,拔节期测定小麦叶片的生理指标,收获时计算小麦各器官生物量、籽粒产量。

1.2.2 样品采集与分析测定

(1)拔节期植物生理指标的测定

谷胱甘肽过氧化物酶GSH-Px采用二硫代对二硝基苯甲酸(DTNB)比色法测定^[27];过氧化物酶(POD)采用愈创木酚比色法;超氧化物歧化酶SOD采用氮蓝四唑(NBT)比色法;膜质过氧化物酶(丙二醛,MDA)采用硫代巴比妥酸显色法。

(2)植株生长指标的测定

收获时将土培小麦连根取出,去除根上土壤,自来水冲洗,并经蒸馏水洗涤,吸水纸吸干,然后用剪刀将植株地上部及根部分开并晾干。新鲜植株于90℃下杀青30 min,60℃烘干至恒重,称取各器官生物量,计算产量。

1.3 数据统计分析

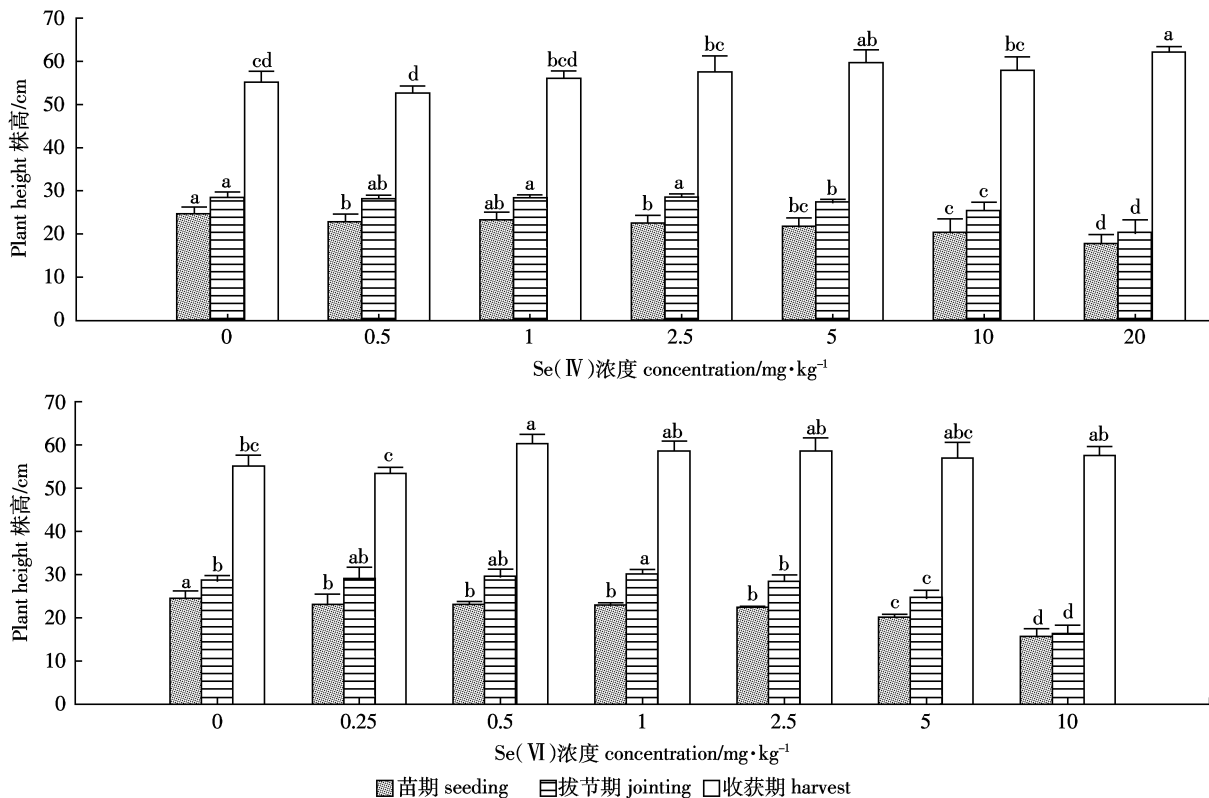
数据处理用DPS13.0统计分析软件和Origin75分析处理。

2 结果与讨论

2.1 不同价态外源硒对小麦生长的影响

2.1.1 不同价态外源硒对小麦株高的影响

由图1可见,两种外源硒处理苗期小麦株高显著低于对照($P<0.05$),且随硒处理含量增加而降低。拔节期,小麦株高在Se(IV) $<5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时与对照无显著差异,当Se(IV) $\geq 5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时其随硒含量增加显著下降($P<0.05$),最高浓度处理($20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)较对照下降了29.05%。与此不同,Se(VI)处理小麦株高随外源硒浓度增加先增大,在硒浓度 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达最大,而后随外源硒浓度的增加显著下降($P<0.05$)。收获期,小麦株高随Se(IV)处理硒含量增加而增大,Se(IV) $\leq 2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时小麦株高与对照无显著差异,Se(IV) $> 5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时其显著高于对照($P<0.05$);小麦株高随外



图中不同小写字母表示不同浓度间在 0.05 水平差异显著(LSD 检验)。下同。
The different normal letters in the same row refer to significant difference among concentrations at 0.05 levels(LSD test). The same as below.

图 1 不同价态外源硒对不同生育期小麦株高的影响

Figure 1 The effect of different selenium contents on wheat plant height of different growth stages

源 Se(VI)浓度的增加呈先升高,在硒浓度 0.5 mg·kg⁻¹ 时达最大,而后逐渐降低,但各个硒浓度处理间差异不显著。3 个生育期小麦株高相比较,伴随着小麦生长和外源硒在土壤中迁移转化,小麦株高达最大时外源硒浓度有增大的趋势。

2.1.2 不同价态外源硒对小麦生物量的影响

对于 Se(IV)处理来说(图 2),苗期小麦生物量均低于对照 38.91%~4.91%,且差异达到显著水平($P<0.05$),生物量随外源硒浓度的增大显著下降($r=-0.833\ 4$, $P<0.05$)。收获期,除硒最高浓度处理(20 mg·kg⁻¹)小麦生物量低于对照、硒 0.5 mg·kg⁻¹ 处理与对照差异不显著外,其余各硒浓度处理小麦生物量均显著大于对照($P<0.05$),以硒 2.5 mg·kg⁻¹ 处理的小麦生物量最

大,较对照处理提高了 7.02%。
对于 Se(VI)处理来说(图 2),苗期小麦生物量均低于对照处理,小麦生物量与外源硒浓度呈显著负相关($-0.793\ 9$, $P<0.05$);在硒浓度 5 mg·kg⁻¹ 和 10 mg·kg⁻¹ 处理小麦生物量分别较对照处理下降了 25.41%和 26.02%。与此不同,收获期小麦生物量随外源硒浓度的增大呈先增加,在硒浓度 1 mg·kg⁻¹ 时达最大,较对照处理提高了 16.41%,而后小麦的生物量随外源硒浓度的增大而显著下降 ($r=-0.891\ 7$, $P<0.05$);在 Se(VI)最高浓度(10 mg·kg⁻¹)处理降到最低,较对照下降了 31.31%。
两个价态硒比较,小麦对 Se(IV)的耐受能力大于 Se(VI),表现为相同硒含量水平下,Se(IV)处理小

表 1 不同时期不同硒处理对小麦生物量影响的 EC₁₀ 值

Table 1 The value of EC₁₀ on the effect of different selenium contents on wheat biomass

不同处理	苗期		收获期	
	EC ₁₀ /mg·kg ⁻¹ Seedling	生物量下降区方程 Equation of biomass	EC ₁₀ /mg·kg ⁻¹ Harvest	生物量下降区方程 Equation of biomass
Se(IV)	1.40	y=0.000 1x ² -0.004 2x+0.064 8(R ² =0.944 6)	28.48	y=-0.037 7x+4.633 7(R ² =1)
Se(VI)	0.28	y=0.000 2x ² -0.003 2x+0.06(R ² =0.930 7)	4.56	y=0.014 2x ² -0.360 9x+4.909 5(R ² =0.993 1)

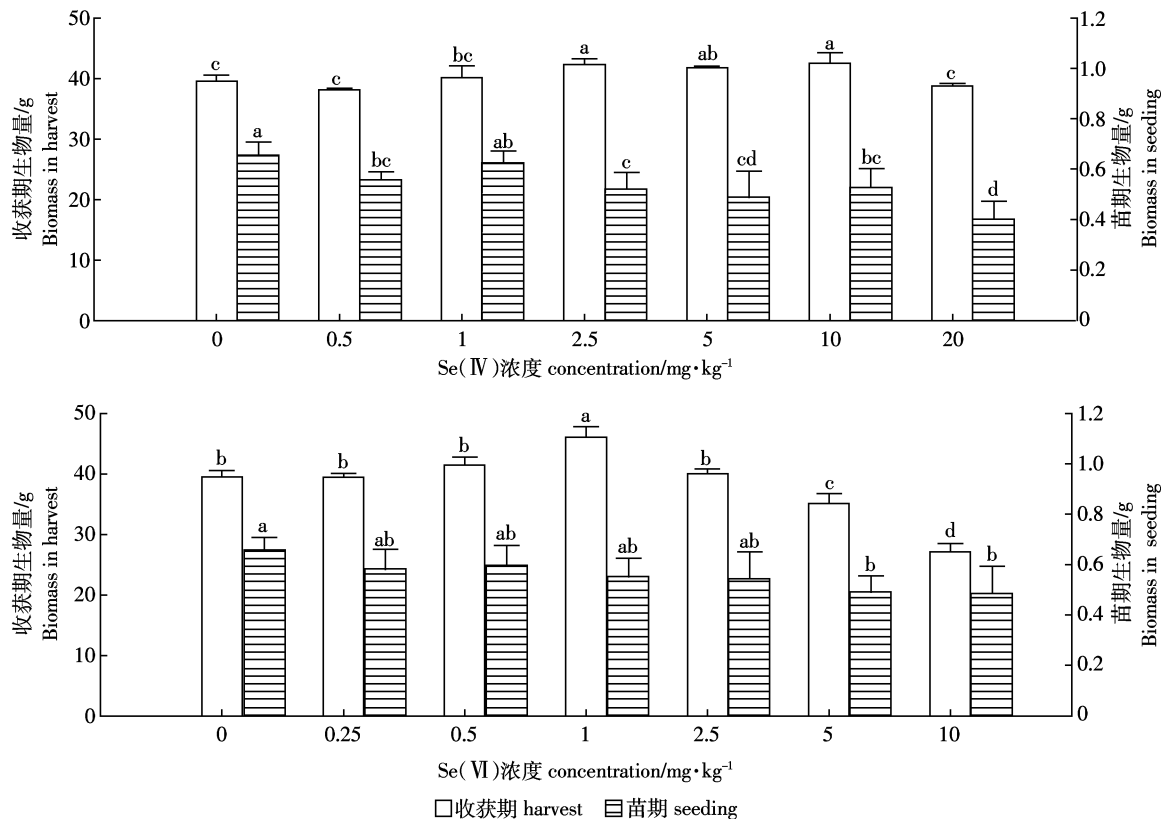


图 2 不同价态外源硒对小麦生物量的影响

Figure 2 The effect of different selenium contents on wheat biomass

麦生物量的变化小于 Se(Ⅵ)处理。研究者常用相对于对照产量下降 10%时的硒浓度表征为硒毒害的临界浓度(EC₁₀)^[28]。表 1 给出了两种外源硒处理小麦不同时期生物量的 EC₁₀ 值。

由表 1 可以看出,在苗期 Se(Ⅳ)和 Se(Ⅵ)处理对小麦生物量影响的 EC₁₀ 分别是 1.40 mg·kg⁻¹ 和 0.28 mg·kg⁻¹,收获期分别升高到 28.48 mg·kg⁻¹ 和 4.56 mg·kg⁻¹(与图 2 一致)。苗期和收获期 Se(Ⅳ)处理的 EC₁₀ 分别是 Se(Ⅵ)处理的 5 倍和 6.25 倍,进一步证明了

同一生长期 Se(Ⅵ)的毒害作用显著大于 Se(Ⅳ)。

2.2 不同价态外源硒对小麦产量及产量构成因子的影响

小麦的籽粒产量构成来主要取决于穗数、穗粒数和千粒重,本试验每盆的穗数是相同的,此时小麦籽粒的产量主要取决于穗粒数和千粒重。表 2 给出两种价态硒处理小麦的穗粒数和千粒重及籽粒产量。

由表 2 可知,小麦千粒重随着 Se(Ⅳ)浓度的增大呈现先增大后减小的趋势,在硒浓度 10 mg·kg⁻¹ 时

表 2 不同价态外源硒对小麦产量的影响

Table 2 The effect of different selenium contents on wheat yield

Se(Ⅳ)				Se(Ⅵ)			
Se/mg·kg ⁻¹	穗粒数 grain number per spike/个·ind	千粒重 1000-kernel weight/g	籽粒产量 yield/g	Se/mg·kg ⁻¹	穗粒数 grain number per spike/个·ind	千粒重 1000-kernel weight/g	籽粒产量 yield/g
0	29.24±2.02c	35.74±1.63ab	12.72±0.38a	0	29.24±2.02cd	35.74±1.63ab	12.72±0.38ab
0.5	35.02±3.7ab	34.06±0.56b	12.35±1.43a	0.25	34.18±0.61b	33.6±3.23b	12.69±0.54ab
1	37.48±4.16a	34.34±1.01b	12.79±0.76a	0.5	33.83±0.71b	35.96±0.21ab	13.07±0.19ab
2.5	35.47±2.87ab	35.07±0.74ab	13.56±0.33a	1	37.45±2.66a	32.69±1.27b	14.1±0.61a
5	31.9±1.13bc	36.24±2.34ab	13.05±0.72a	2.5	32.24±0.76bc	40.51±3.74a	12.63±0.49ab
10	33.45±3.13abc	38.5±1.99a	12.59±0.89a	5	27.65±2.06d	36.86±3.39ab	11.96±1.23b
20	34.27±0.47abc	33.93±0.7b	12.89±0.4a	10	19.73±2.93e	27.15±3.32c	8.55±0.93c

达到最大,较对照提高了 7.72%,各个硒浓度处理间差异不显著。除 Se(Ⅵ)最高浓度处理($10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)小麦的千粒重显著低于对照外,其余各硒浓度处理对小麦千粒重的无显著影响。

小麦穗粒数随外源硒浓度的增大呈现先增大后减小的趋势,两个价态的硒处理均在浓度 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大,分别较对照提高了 28.18%和 28.08%,此后小麦穗粒数随硒浓度增大而下降。值得指出的是,Se(Ⅳ)处理小麦穗粒数随硒浓度的增加下降不明显,但 Se(Ⅵ)处理各浓度小麦穗粒数随硒浓度的增加下降显著($P<0.05$),在硒最高浓度处理($10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时达到最低点,较对照降低了 32.52%。说明适量施硒对小麦产量的提高主要源于小麦穗粒数的增加。

小麦籽粒产量随着 Se(Ⅳ)处理浓度的增大呈现先增加后降低的趋势,在 $2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度时达到峰值,较对照提高了 6.63%,但各处理间差异不显著。Se(Ⅵ)处理小麦籽粒产量随硒浓度变化趋势与 Se(Ⅳ)处理相同,与生物量的结果一致(图 2):最高值出现在 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处,较对照提高了 10.91%;最低值出现在 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,较对照下降了 32.76%,达显著差异水平($P<0.05$)。

2.3 不同价态硒对小麦生理代谢的影响

表 3 列出了两种价态硒处理下小麦拔节期叶片各生理指标的结果。

2.3.1 不同价态硒对小麦抗氧化酶活性的影响

由表 3 可见,土壤外源施硒后,小麦叶 SOD 活性随外源硒浓度增大呈先降低后升高的趋势。对于 Se(Ⅳ)处理来说,最低值出现在硒浓度 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,较对照下降了 65.73%。在硒 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度处理时,其活性有回升,较对照提高了 4.80%。对于 Se(Ⅵ)处理来说,其最低值出现在硒 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理,较对照下降了 16.03%,此后 SOD 活性随外源硒浓度的增加而增大,

在 Se(Ⅵ)最高浓度处理($10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时达最大,较对照高 20.01%。

各硒浓度处理下小麦叶片的 POD 活性均高于对照,且均随外源硒浓度的增大呈现先增加后降低的趋势,分别在 Se(Ⅳ) $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Se(Ⅵ) $2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 达到最大,分别较对照提高了 38.43%和 3.42%。

两个价态硒处理小麦叶片中 GSH 的活性均显著大于对照($P<0.05$),且均呈现随外源硒浓度的增大先增加后减少的趋势。对于 Se(Ⅳ)处理来说,GSH 酶活性在硒浓度 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理达最大,较对照提高了 33.33%,Se(Ⅵ)处理小麦叶片中 GSH 活性却在硒浓度 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理达到峰值,较对照提高了 43.33%。

2.3.2 不同价态硒对小麦膜质过氧化作用的影响

由表 3 还可以看出,小麦叶片中 MDA 含量均随外源硒浓度的升高呈现先降低后升高的趋势。两个价态外源硒处理最低值均出现在硒浓度 $2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,Se(Ⅳ)和 Se(Ⅵ)处理分别较对照下降了 28.01%和 24.02%,此后在试验浓度范围内小麦叶片的 MDA 含量均随外源硒浓度的增大而增加,但仍低于对照处理。在本试验浓度范围内硒 Se(Ⅳ)($\leq 20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和 Se(Ⅵ)($\leq 10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)都能抑制小麦叶片 MDA 的合成,减轻了小麦叶片的膜质过氧化作用。

3 讨论

两种价态的硒对小麦不同阶段的生长影响不同。Se(Ⅳ)各浓度处理的小麦苗期株高均显著低于对照($P<0.05$),而拔节期则随外源硒浓度增大呈先增加后降低的趋势。伴随着外源硒在土壤中的迁移转化及小麦生长,小麦株高达到最大的外源硒浓度逐渐增大,苗期、拔节期和收获期 Se(Ⅳ)浓度分别为 1.0、2.5、 $20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 Se(Ⅵ)浓度分别是 0.25、1、 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。说明小麦对硒的耐受浓度随生长时间的延长逐渐增大,

表 3 不同价态外源硒对小麦生理指标的影响

Table 3 Effects of different selenium contents on physiological indexes of wheat

Se(Ⅳ)					Se(Ⅵ)				
Se/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	GSH-Px/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	POD/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	SOD/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	MDA/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	Se/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	GSH-Px/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	POD/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	SOD/ $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	MDA/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$
0	427.50c	4 230c	13.54a	7.72ab	0	427.50c	4 230be	13.54bc	7.72a
0.5	473.47b	5 135b	10.10b	7.73ab	0.25	528.07b	4 020c	12.70cd	7.71a
1	468.09b	5 135b	9.47bc	7.16ab	0.5	633.80a	4 484a	11.37d	7.69a
2.5	537.00a	5 440ab	7.42d	5.56c	1	578.66b	4 432a	14.26b	6.97a
5	546.64a	5 856a	4.64e	6.75b	2.5	563.86b	4 475a	14.54b	5.87b
10	570.00a	5 041b	8.04cd	7.95a	5	573.54b	4 349ab	15.22b	7.35a
20	467.01b	4 730bc	14.19a	-	10	570.31b	-	16.25a	7.16a

这与刘睿等在苦荞上的研究结果一致^[29]。这可能是由于前期小麦生物量小,其自身对外来毒害的抵抗作用低;而随着小麦生长,其生物量变大,同时各器官发育完全,小麦体内自身的适应和抵抗作用得到加强,也与生物量增大后硒的稀释效应有关。本试验还发现,Se(VI)对于小麦生长在低浓度时的促进作用更强和高浓度时的毒害作用均大于Se(IV)。这也通过两种价态硒对小麦生物量影响的 EC_{10} 值大小得到验证,即小麦苗期和收获期Se(VI)处理的 EC_{10} 分别是Se(IV)处理的5倍和6.25倍。这与Sharma等^[30]在油菜上的研究结果一致。

小麦产量随着两种硒浓度的增大均呈现先升高后降低的趋势,这与一些研究者在其他作物上得到的结果一致^[31-32]。综合考虑两种硒处理下小麦各个生长和产量指标,土壤外源加硒时硒浓度以 $Se(IV) \leq 2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $Se(VI) \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为宜。

GSH-Px是一种含硒抗氧化酶^[33],有抗自由基、抗衰老、抗氧化等多种重要的生理功能,尤其是在维持生物体内适宜的氧化还原环境中起着至关重要的作用^[34]。本研究发现硒处理的小麦叶片中GSH活性均高于对照,GSH活性在低浓度时显著升高。这是因为硒取代硫成为GSH的组成成分,使得小麦GSH活性升高^[28,35]。POD是植物体内活性氧清除酶促防御系统中主要的保护酶^[36],对植物抗逆和抗氧化作用明显,可作为生理指标来验证营养与毒害的临界值^[37-38]。本试验发现低浓度外源硒能刺激POD的活性,高浓度硒却抑制了POD的活性,说明低浓度硒能促进小麦叶片的抗氧化能力。环境胁迫也能够诱导植物SOD基因得表达^[39],很多研究表明外源加入硒使得植物叶片中SOD活性提高^[28,40]。本试验中小麦叶片中SOD活性在低浓度时并没有提高,但在高浓度硒处理时有所提高。这可能是由于土壤外源施入硒后,小麦叶GSH-Px活性增加,使得整个抗氧化酶系统之间的动态平衡发生变化:低浓度硒($Se(IV) \leq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $Se(VI) \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)时SOD酶活性降低,GSH、POD等活性升高。由于叶片GSH-Px活性的升高,更多的脂质过氧化物和 H_2O_2 被GSH-Px所清除,使SOD的作用底物减少,而机体保持正常生理功能对SOD的需求相对降低,从而导致SOD活性的降低^[21]。对此这还需要进一步证实。

在试验浓度范围内,两种不同价态硒对小麦叶片中MDA含量的变化影响表现为先降低后升高的趋势,但小麦叶片MDA含量均低于对照,说明硒可以

有效地抑制膜质过氧化作用的发生,这与宋家永等^[38]在烤烟上得到的结论一致。由GSH活性变化的转折点($Se(IV)=10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $Se(VI)=0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和POD活性变化转折点($Se(IV)=5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $Se(VI)=0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)说明低浓度硒所表现的抗氧化作用及高浓度硒所引起的过氧化作用,均为Se(VI)大于Se(IV)。

综上所述,两种硒处理下,小麦拔节期叶中生理指标的变化不同,不同价态外源硒对小麦生长的影响程度和临界值也各不相同。但小麦生长指标,拔节期的生理指标的变化以及小麦收获时的产量的变化具有一致性。因此由生理指标的变化可以解释小麦生长指标和产量的变化趋势,也可以解释两种硒处理情况下,Se(VI)的低浓度的促进作用和高浓度的毒害作用均大于Se(IV)的原因。

4 结论

(1)两种价态外源硒对不同生长阶段小麦生长指标影响趋势相同,均为随硒浓度增大先促进后抑制。但Se(VI)对于小麦生长的影响大于Se(IV)。小麦对硒的耐受浓度随生长时间的延长逐渐增大,土壤施入外源硒以 $Se(IV) \leq 2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $Se(VI) \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为宜。

(2)低浓度硒($Se(IV) \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $Se(VI) \leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理能促进拔节期小麦叶片中GSH、POD等抗氧化酶活性,使得叶片过氧化物MDA($Se \leq 2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)含量显著下降,从而促进了小麦的生长,而高浓度硒则因为增加了小麦的过氧化作用而抑制了小麦的生长。

参考文献:

- [1] Hawkesford M J, Zhao F J. Strategies for increasing the selenium content of wheat[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46(3):282-292.
- [2] Stroud J L, Broadley M R, Foot I, et al. Soil factors affecting selenium concentration in wheat grain and the fate and speciation of Se fertilisers applied to soil[J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1-2):19-30.
- [3] Tinggi U. Essentiality and toxicity of selenium and its status in Australia: A review[J]. *Toxicology Letters*, 2003, 137(1-2):103-110.
- [4] Lenz M, Lens P N L. The essential toxin: The changing perception of selenium in environmental sciences[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(12):3620-3633.
- [5] Regina E, Franz J. Selenium deficiency as a putative risk factor for osteoporosis[J]. *International Congress Series*, 2007, 1297:158-164.
- [6] Rayman M P. The importance of selenium to human health[J]. *The Lancet*, 2000, 356(15):233-241.
- [7] 陈历程, 张 勇. 微量元素硒的研究现状及其食品强化[J]. 食品科学,

- 2002, 23(10):134-137.
CHEN Li-cheng, ZHANG Yong. Status of selenium research and selenium-fortified food[J]. *Food Science*, 2002, 23(10):134-137.
- [8] Combs G F. Selenium in global food systems[J]. *British Journal of Nutrition*, 2001, 85(5):517-547.
- [9] FAO/WHO. Human vitamin and mineral requirements[C]//Report of a joint FAO/WHO expert consultation. Bangkok, Thailand, Food and Nutrition Division, FAO, Rome. 2001:7-8.
- [10] 孙文静. 春小麦锌硒吸收规律及其富集技术的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2006.
SUN Wen-jing. Study of zinc, selenium absorption regularity of spring wheat and their enrichment technology[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University Master Degree Thesis, 2006.
- [11] Lyons G, Ivan O M, Stangoulis J, et al. Selenium concentration in wheat grain: Is there sufficient genotypic variation to use in breeding? [J]. *Plant and Soil*, 2005, 269(1-2):369-380.
- [12] Nowak J, Kaklewski K, Ligoeki M. Influence of selenium on oxidative enzymes activity in soil and plants[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(10):1553-1558.
- [13] Banuelos G S, Lin Z Q. Phytoremediation management of selenium-laden drainage sediments in the San Luis Drain: A greenhouse feasibility study[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005(3), 62: 309-316.
- [14] Li H F, McGrath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. *New Phytologist*, 2008, 178(1):92-102.
- [15] Cartes P, Gianfreda L, Mora M L. Uptake of selenium and its antioxidant activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms[J]. *Plant and Soil*, 2005, 276(1-2):359-367.
- [16] 吴雄平, 梁东丽, 鲍俊丹, 等. Se(IV)和Se(VI)对小白菜生长及生理效应的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(10):2163-2171.
WU Xiong-ping, LIANG Dong-li, BAO Jun-dan, et al. Effects of different concentrations of selenate and selenite on growth and physiology of Chinese cabbage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(10): 2163-2171.
- [17] Susanne E G, Trine A S, Anne F O, et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertilizer as influenced by soil organic matter content and pH[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79(3):221-231.
- [18] 王松山, 吴雄平, 梁东丽, 等. 不同价态外源硒在石灰性土壤中的形态转化及其生物有效性[J]. 环境科学学报, 2010, 30(12):2499-2505.
WANG Song-shan, WU Xiong-ping, LIANG Dong-li, et al. Transformation and bioavailability for Pak choi (*Brassica chinensis*) of different forms of selenium added to calcareous soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(12):2499-2505.
- [19] Broadly M R, White P J, Bryson R J, et al. Biofortification of UK food crops with selenium[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2006, 65(2):169-181.
- [20] Keskinen R, Turakainen M, Hartikainen H. Plant availability of soil selenate additions and selenium distribution within wheat and ryegrass[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1-2):301-313.
- [21] 王海红, 宋家永, 朱喜霞, 等. 硒对小麦生理功能的影响之研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(09):335-338.
WANG Hai-hong, SONG Jia-yong, ZHU Xi-xia, et al. General survey on physiological function of selenium in wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(09):335-338.
- [22] Graham H L, Robin J C R, Graham S D. Tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) to high soil and solution selenium levels[J]. *Plant and Soil*, 2005, 270(1):179-188.
- [23] 薛泰麟, 侯少藩, 谭见安, 等. 硒在高等植物中的抗氧化作用[J]. 科学通报, 1993, 38(3/4):274-277, 356-358.
XUE Tai-lin, HOU Shao-pan, TAN Jian-an, et al. Antioxidant effects of selenium in higher plants[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(3/4): 274-277, 356-358.
- [24] Hartikainen H. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine & Biology*, 2005, 18(4):309-318.
- [25] 何家红, 张 铮, 乔亚红. 硒对小麦生长过程中几种保护酶活性的影响[C]. 中国化学会: 全国微量元素研究和进展学术研讨会, 2004, (6): 136-140.
HE Jia-hong, ZHANG Zheng, QIAO Ya-hong. Effects of Selenium on antioxidant enzymes system of wheat [C]. CCS: The National Scientific Seminar On Trace Elements, 2004(6):136-140.
- [26] Luo K L, Xu L D, Tan J A, et al. Selenium source in the selenosis area of the Daba region, South Qinling Mountain, China[J]. *Environmental Geology*, 2004, 45(3):426-432.
- [27] 李道强, 邱艳昌, 段祖安. 聊红国槐谷胱甘肽过氧化物酶活性测定[J]. 北方园艺, 2008, 31(3):186-188.
LI Dao-qiang, QIU Yan-chang, DUAN Zu-an. Determination of glutathione peroxidase activity in liaohong[J]. *Northern Horticulture*, 2008, 31(3):186-188.
- [28] 林匡飞, 徐小清, 金 霞, 等. 硒对小麦的生态毒理效应及临界指标研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6):1982-1985.
LIN K F, XU X Q, JIN X, et al. Eco-toxicological effects of selenium stress on wheat (*Triticum aestivum* L.) and its critical value[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6):1982-1985.
- [29] 刘 睿. 硒对苦荞营养效应的研究[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2007.
LIU Rui. Nutritional effect of selenium on tartary buckwheat [D]. Chongqing: South-west University Master Degree Thesis, 2007.
- [30] Sharma S, Bansal A, Dhillon S K, et al. Comparative effects of selenate and selenite on growth and biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2010, 329(1-2):339-348.
- [31] Dumont E, Vanhaecke F, Cornelis R. Selenium speciation from food source to metabolites: A critical review [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2006, 385(3):1304-1323.
- [32] Hu Q H, Pan G X, Zhu J C. Effect of fertilization on selenium content of tea and the nutritional function of Se-enriched tea in rats[J]. *Plant and Soil*, 2002, 238(1):91-95.
- [33] Gillham D J, Dodge A D. Hydrogen peroxide scavenging systems within pea chloroplasts: A quantitative study[J]. *Planta*, 1986, 167:246-251.
- [34] 刘 萍, 吕艳娜, 张小冰, 等. GSH 与 ASA 对牡丹花瓣生理生化的

- 调控研究[J]. 北方园艺, 2010, 33(11):107-109.
- LIU Ping, LV Yan-na, ZHANG Xiao-bing, et al. Study of GSH and ASA on biological and physiological changes of the peony petals[J]. *Northern Horticulture*, 2010, 33(11):107-109.
- [35] Samis K, Bowley S, Mc Kersie B. Pyramiding Mn-superoxide dismutase transgenes to improve persistence and biomass production in alfalfa[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(372):1343-1350.
- [36] Rotruck J T, Pope A L, Ganther H E, et al. Selenium:biochemical role as a component of glutathione peroxidase[J]. *Science*, 1973, 179(73):588-590.
- [37] 程 华, 李琳玲, 常 杰, 等. 植物抗氧化酶的研究进展[C]//2008 园艺学进展(第八辑)--中国园艺学会第八届青年学术讨论会暨现代园艺论坛论文集, 2008:766-773.
- CHENG Hua, LI Lin-ling, CHANG Jie, et al. Advance in research on antioxidant enzymes in plants[A]. *Advances In Horticulture*, 2008:766-773.
- [38] Yu X Z, Gu J D. Metabolic responses of weeping willows to selenate and selenite[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2007, 14(7):510-517.
- [39] 汪本勤. 植物 SOD 的研究进展[J]. 河北农业科学, 2008, 12(3):6-9, 12.
- WANG Ben-qin. The research progress of the plant SOD [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2008, 12(3):6-9, 12.
- [40] 宋家永, 贾宏昉, 王海红, 等. 喷硒对烤烟生理效应及硒含量的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(21):191-193.
- SONG Jia-yong, JIA Hong-fang, WANG Hai-hong, et al. Effect of selenium to the tobacco on the physiology and the content of selenium[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(21):191-193.

第四届全国农业环境科学学术研讨会落下帷幕

由中国农业生态环境保护协会与农业部环境保护科研监测所联合主办、内蒙古农业大学承办的第四届全国农业环境科学学术研讨会于2011年7月22日至25日在内蒙古呼和浩特市成功召开。来自全国各地的大专院校、科研院所等105个单位的230多位专家学者参加了会议,会议共收到学术论文180余篇,其中161篇论文经评选后入编论文集,26篇被评为会议优秀论文。

开幕式由农业部环境保护科研监测所副所长唐世荣研究员主持,承办单位内蒙古农业大学李畅游校长致欢迎辞,中国农业生态环境保护协会理事长马世青、农业部环境保护科研监测所所长高尚宾分别致辞,并对大会的召开表示热烈的祝贺。

会议回顾了“十一五”期间我国农业环境研究所取得的主要进展和重要成果,展望了“十二五”乃至今后更长一段时间的学科发展趋势,并结合当前我国农业环境科学研究领域重点、要点问题开展了学术交流。李文华院士作了大会主题报告,中国农科院一级岗位杰出人才徐明岗研究员和唐世荣研究员、国家自然科学基金获得者王学军教授、长江学者特聘教授周启星博士、中国环境科学研究院副总工程师李发生研究员、农业部产业体系岗位首席专家廖新伟教授等9位专家作特邀报告,34位专家分别围绕“污染生态及土壤修复”、“水土环境和面源控制”、“节能减排及资源利用”三个专题进行分组报告。李文华院士作《生态农业的成就与展望》的主题报告,他从现代农业发展的生态学思潮、中国生态农业的特点、对我国生态农业发展的反思及新时期生态农业发展的思路几个方面回顾了我国生态农业的成就,指出了存在的问题,展望了我国生态农业未来发展趋势,提出了如何让传统农业的经验服务于农业的可持续发展的建议。特邀报告和专题报告分别涉及土壤生态修复与农业环境生态安全、土壤环境科学与工程、寒旱区典型湖泊水环境修复、汞的排放与迁移、施肥与环境修复、家畜粪便的社会属性、重金属与有机污染物污染土壤诊断与修复、生物黑炭与绿色农业、金属-臭氧-紫外辐射-融雪剂等胁迫对陆生与水生植物生长发育影响的生理生化机理、农业温室气体减排、新材料的应用与土壤修复、秸秆利用与沼气技术等,内容相当丰富,既有深度又有广度,较好地覆盖了我国农业环保方方面面的工作。报告内容既有较微观的理论探索,又有农业环保技术方面的最新成果展示,学术交流围绕我国农业环保出现的新问题和新技术动向,尤其是生物黑炭、纳米材料与持久性污染物、污染土壤修复、产地环境与农产品安全方面的问题,以大量的数据和图片展示了他们各自的研究成果和应用效果,内容切合实际、示范性强,对我国农业环境科学研究工作的深入有很好的推进作用。

在闭幕式上,各分会场的主持人分别总结了各自分会场的情况,农业部环境保护科研监测所唐世荣副所长作了大会总结发言。会议取得了圆满成功。

(本刊编辑部)