

硒酸盐和亚硒酸盐对 7 种不同基因型小麦种子萌发和幼苗生长的影响

缪树寅, 梁东丽*, 赵文龙, 胡 斌

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 选择全国 7 个主栽小麦品种, 通过培养试验研究了外源添加硒酸盐以及亚硒酸盐对小麦的生物毒害作用, 旨在确定小麦发芽阶段硒敏感指标并且为耐硒小麦品种的筛选提供依据。结果表明: 添加低浓度外源硒(硒酸盐 $<8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 亚硒酸盐 $<20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)能够促进发芽阶段小麦的生长, 高浓度硒(硒酸盐 $\geq 8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 亚硒酸盐 $\geq 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)则表现为显著的抑制作用; 同等硒浓度条件下($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 硒酸盐对小麦种子的毒害作用显著高于亚硒酸盐($P<0.05$)。指标综合相关性模型与 Bartlett 球形检验结果表明, 小麦的芽长抑制率可作为亚硒酸盐态硒生物毒性的敏感指标, 而根长抑制率可作为硒酸盐态硒的敏感指标。不同基因型小麦对硒的耐受程度不一, 以西农 979、小偃 22 和鲁麦 23 的耐受性较强, 适宜于富硒粮食的推广; 鄂麦 20、烟农 19 对亚硒酸盐耐受性较高, 对硒酸盐耐受性较弱, 可以作为土壤硒环境的指示品种; 陕麦 159、蒿优 2018 则对硒的耐受能力相对较差, 可以作为富硒土壤指示的敏感品种。

关键词: 硒酸盐; 亚硒酸盐; 小麦基因型; 生物毒性; 发芽指标

中图分类号: X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)10-1934-07 doi:10.11654/jaes.2013.10.005

Phytotoxicity Differences Among 7 Winter Wheat Genotypes in China when Amended Selenate and Selenite

MIAO Shu-yin, LIANG Dong-li*, ZHAO Wen-long, HU Bin

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

Abstract: The culture experiments were conducted to study the effects of exogenous selenite and selenate on seed emergence and seedling growth of 7 main winter wheat genotypes, in order to select the most sensitive indicator and provide the basis of Se-resistant wheat genotypes selection. The result showed that low concentration of Se(selenate $<8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, selenite $<20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) could promote the growth of wheat; and while higher concentration could inhibit the growth. The toxic effects of selenate were significantly higher than selenite on wheat at the same concentration($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). The statistic analysis showed that the inhibition of shoot height and root length could be regarded as the sensitive indicators of selenite and selenate, respectively. Different wheat genotypes varieties had different tolerance; Xinong979, Xiaoyan22, and Lumai23 had high tolerations and could be extended as Se-rich wheat; Shaanmai159, Shongyou2018 have low tolerance and could be used as the sensitive species of Se pollution in soil.

Keywords: selenate; selenite; wheat genotypes; biological toxicity; germination indicators

硒是动物必需的 14 种微量元素之一, 且兼具营养、毒性和解毒三重生物学功能, 被称为生命的保护剂^[1]。在我国有超过 70% 的人口长期处于贫硒状态, 这

对乙肝病毒(HBV)携带、癌症以及糖尿病的发病具有一定的负面贡献^[2]。尽管对于硒是否是植物的必需元素存在一定争议, 但是大量的研究结果表明, 适宜的外源硒供给能提高植物的抗氧化能力, 而施用过量外源硒则因为过氧化作用产生毒害效应^[3]。硒与其他重金属元素相比其具有更为狭窄的营养区间^[4-5]。

植物主要从土壤中吸收硒并通过食物链进入到人和动物体内, 进而影响其机体代谢和健康^[6-7], 生产

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(200903015-05); 西北农林科技大学“创新团队建设计划”资助

作者简介: 缪树寅(1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境化学。E-mail: miaoshuyin@163.com

* 通信作者: 梁东丽 E-mail: dongliliang2005@yahoo.com

实践中常用土壤施硒的方式来提高作物体硒含量,以实现通过日常饮食的安全补硒^[8],且适量施用硒肥具有明显的增产效果^[9]。在众多的富硒产品中富硒主食的研发与推广成为了研究的热点^[10]。小麦作为我国第二大粮食作物,也是北方人的主食,小麦硒生物毒性的确定和富硒品种的筛选对提高小麦中硒含量或发展富硒小麦具有重大意义。

现有的研究表明,硒对植物的影响主要表现在根系及其体内的结合蛋白两个方面:其可抑制根系表面积及根系活力^[11];替换蛋白质结构原子而导致功能缺失^[12]。不同植物类型对硒的耐受性具有显著的差异^[13],水稻耐硒方面的研究证实了不同基因型与耐硒特性的相关关系,并提出通过萌发实验及幼苗期观察的方法能有效地筛选出高硒耐受性品种^[14]。但国内外有关小麦不同基因型硒耐受性的研究尚未见系统报道。本文借助外源添加硒酸盐、亚硒酸盐对不同基因型小麦发芽情况的影响,对硒的小麦营养区间以及毒害浓度进行研究,并分析不同基因型小麦对硒敏感程度的差异,以期为富硒植物开发和富硒土壤的有效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用的 7 种小麦种子均为各地种子站提供的标准种子,分别为陕麦 159、西农 979、小偃 22、烟农 19、鄂麦 20、蒿优 2018 和鲁麦 23。

所用外源硒分别为硒酸钠(天津耀华试剂公司,2011)和亚硒酸钠(天津富晨试剂公司,2011),均为分析纯试剂。

1.2 试验设计

试验浓度的设计依据相关文献^[15-16]。亚硒酸盐处理设 7 个处理,硒浓度分别为 1、2、4、8、16、20、40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硒酸盐处理设 6 个处理,硒浓度分别为 0.5、1、2、4、8、10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,以蒸馏水为对照处理。共 14 个处理,每个处理重复 3 次。

挑选籽粒饱满,大小一致、无虫害、无破损的小麦种子,用 3%(V/V) H_2O_2 消毒 15 min,然后用去离子水冲洗 3 次,将种子在蒸馏水中浸泡 24 h,使其完全吸胀,将其整齐地排列在铺有滤纸的培养皿中,每皿 20 粒,每个培养皿加入 3 mL 对应浓度处理的溶液,使每粒种子之间留有均匀的间距,保证与溶液良好接触及足够的生长空间,放在暗处(室温)培养 72 h 后测定种子的发芽率。然后在自然光照条件下(室温)培养,

采用恒定体积的方式对失水进行补充,保持滤纸湿润,且无流动性液体。并随机调换培养皿位置。7 d 后发芽试验完成,测定每株茎长和根长,称量地上和地下部位生物量。

1.3 测定项目及方法

按照《农作物种子检验规程-发芽试验》(GB/T3543.4—1995),小麦种子的发芽率在处理 72 h 测定,7 d 后试验终止,此时测定各处理样品根长(根长的测定从胚轴与根之间的过度点开始)和芽长(芽长的测定从胚轴与芽之间的过度点开始),然后放入烘箱内在 65 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,称量地上部分与地下部分干重。

1.4 数据处理

平均值标准差的计算以及相关分析采用软件 SPSS 18.0,多重比较采用 LSD 法。不同生长参数的抑制率计算如下:

根长抑制率=(对照样品的芽长-各处理样品芽长) $\div$ 对照样品芽长 $\times 100\%$ 。

芽长抑制率=(对照样品的根长-各处理样品根长) $\div$ 对照样品根长 $\times 100\%$ 。

地上部分干重抑制率=(对照样品的地上部分干重-各处理样品地上部分干重) $\div$ 对照样品地上部分干重 $\times 100\%$ 。

地下部分干重抑制率=(对照样品的地下部分干重-各处理样品地下部分干重) $\div$ 对照样品地下部分干重 $\times 100\%$ 。

2 结果与分析

2.1 不同价态外源硒对小麦的生物毒害作用的差异

掩蔽不同基因型小麦对硒的响应因素,以各个基因型平均数表征不同价态/浓度外源硒对小麦发芽的影响,结果见图 1。

从图 1 可以看出,添加硒酸盐和亚硒酸盐对小麦发芽阶段的各个指标均有影响。表现为低浓度硒(亚硒酸盐 $\leq 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硒酸盐 $\leq 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)对小麦的发芽有促进作用,而高浓度硒(亚硒酸盐 $\geq 20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硒酸盐 $\geq 8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)却有显著的抑制作用,其中抑制率因指标而异,差别较大(16.4%~63.7%)。

相同硒浓度范围内(0~10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),亚硒酸盐的促进作用更为明显,0~10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度范围内各项指标均无抑制作用产生,而硒酸盐则表现为较高的毒害作用,在硒浓度 8~10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内各项指标均表现出显著的抑制作用,抑制率达 4.2%~52.7%。在相同指标

同等抑制率的条件下,外源添加硒酸盐的浓度显著小于亚硒酸盐($P<0.05$)。通过数据拟合,在10%抑制率条件下,亚硒酸盐添加浓度为 $11.4\sim 20.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硒酸盐添加浓度却为 $6.3\sim 8.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明硒酸盐的营养区间范围更为狭窄,毒害强度相对更大。

2.2 小麦发芽阶段对不同价态外源硒敏感指标的筛选

由图1还可以看出,添加不同价态外源硒对小麦的不同生长参数影响不一,将之统一来看,无法满足显著性要求。因此,必须通过必要的手段选取合适的敏感指标为后续耐受性研究提供指标基础。本文以不同浓度对不同生长指标的抑制率为基础研究数据,通过对其进行综合相关性模型分析及Bartlett球形检验的方式来确定硒对小麦生长影响的敏感指标。

2.2.1 指标综合相关性模型法确定敏感指标

综合相关性模型来自于统计学领域的案例替代

模型,其主旨是将不同维度的指标相关性进行统一,研究其可替代性,并以最佳替代性作为判断敏感指标的依据^[17]。具体模型如下:

$$C=(D,\alpha,\beta)$$

式中: D 代表不同维度的相关性系数之和; α 代表不同维度的相关性权重,在本研究中以7种小麦品种作为不同维度,其权重相等设置为1; β 代表不同指标之间的可替代性,以不同指标相关系数的差异性及覆盖率为表征依据; C 代表指标综合相关性,以 D,α,β 三项最大化为依据。

此外,指标覆盖率为在相同维度下不同指标与处理的相关系数之差的优先比例;将正数部分记作1,负数部分记作0,并利用下式进行计算:

$$P=(\sum_{i=1}^n X_i)/n$$

式中: n 代表第 n 个维度; X 代表第 n 个维度下指标

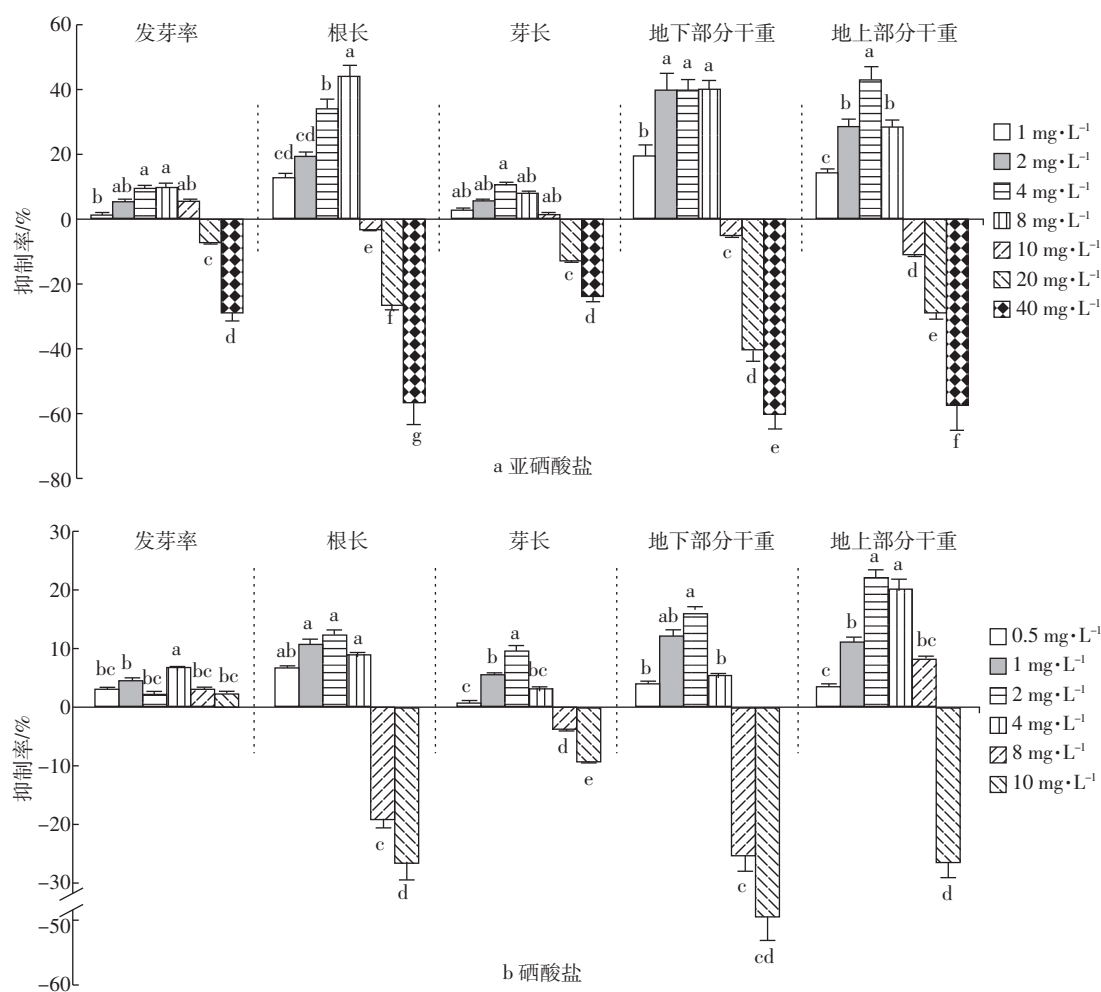


图1 外源硒酸盐和亚硒酸盐对小麦发芽阶段各生长指标的抑制率

Figure 1 Different concentration of selenate and selenite on the inhibition rate of the growth parameters in the seed germination stage of winter wheat

表 1 指标综合相关性模型计算结果
Table 1 The calculation results of indexes by comprehensive correlation model

指标 Index	亚硒酸盐 Selenite			硒酸盐 Selenate		
	D	α	β	D	α	β
芽长抑制率 Inhibition rate of wheat sprout height	6.147a	1	57.1%	4.503b	1	0.0%
地上部分干重抑制率 Inhibition rate of dry weight of sprout	5.869b	1	28.6%	4.347b	1	0.0%
根长抑制率 Inhibition rate of root length	5.272c	1	0.0%	5.922a	1	57.1%
地下部分干重抑制率 Inhibition rate of dry weight of root	5.727bc	1	14.3%	5.782a	1	42.9%

差异特征值; P 代表指标覆盖率。

通过对不同指标的抑制率以及不同维度的综合相关性模型分析,可以找到不同价态外源硒耐受性的敏感指标,结果如表 1。

由表 1 可以看出,亚硒酸盐处理 $C_{芽长抑制率}(D,\alpha,\beta)$ 三项均大于其他指标,说明芽长抑制率能有效反映亚硒酸盐处理对小麦发芽阶段生长的影响,可作为表征亚硒酸盐对小麦发芽阶段影响的敏感指标。而与其相反,硒酸盐 $C_{根长抑制率}(D,\alpha,\beta)$ 三项均大于其他指标,说明硒酸盐的添加对小麦的地上部分影响不显著,而对小麦的地下部分影响显著,因此,根长抑制率可以作为表征硒酸盐处理小麦发芽阶段生长情况的最优指标。

2.2.2 Bartlett 球形检验法确定敏感指标

本文利用 Bartlett 球形检验^[18]对已得数据进行主成分分析,进一步分析硒对小麦生长影响的敏感指标,并验证指标综合相关性模型的有效性。基于降低影响因素的原因,对全部指标进行 Bartlett 球形检验,得到 KMO 值为 0.713。根据相关定义 KMO 大于 0.5 时指标体系适用于 Bartlett 球形检验^[19]。

将影响指标按照不同价态的外源硒(硒酸盐和亚硒酸盐)添加进行分类,其中将亚硒酸盐处理下的各项指标汇总到 $F1$,将硒酸盐处理下的各项指标汇总到 $F2$ 。具体检验结果如表 2。

由表 2 可以看出,在亚硒酸盐处理中($F1$)芽长负载最大(0.69),可以解释 41.59%的方差,其在横向比较中显著高于 $F2$ 组,因此在理论上认为亚硒酸盐的毒害作用更易表现在小麦的芽长上。硒酸盐处理中($F2$)根长负载最大(0.77),可解释 38.23%的方差,因此可以认为硒酸盐的毒害作用更易于表现在小麦的根长上。Bartlett 球形检验的结果与指标综合相关性模型结果一致,在确定了外源硒对小麦发芽影响敏感指标的基础上也印证了指标综合相关性模型的有效性。

表 2 Bartlett 球形检验结果
Table 2 The check results of Bartlett spherical

响应指标 Index	F1	F2
发芽率 Germination rate	0.11	0.13
根长 Root length	0.24	0.77
芽长 Sprout length	0.69	0.38
地上部分干重 Dry weight of sprout	0.41	0.21
地下部分干重 Dry weight of root	0.33	0.42
总特征值 Eigenvalue	2.88	2.73
最大差异所占方差百分比 Maximum difference occupy variance percentage	41.59%	38.23%

2.3 不同小麦品种对不同价态外源硒的耐受性差异

2.3.1 小麦芽长对四价外源硒的耐受性比较

在上文讨论的基础上,我们以小麦幼苗期的芽长作为外源亚硒酸盐的敏感指标,其营养区间可以表达小麦对硒的耐受程度及硒作为营养元素对小麦生长的促进作用与作为毒害物质对小麦生长抑制的临界点。采用对小麦幼苗期芽长抑制率拟合二次函数的方式求得其最高促进浓度及 10%抑制浓度(EC_{10}),并用 EC_{10} 作为小麦对外源硒耐受性差异的主要依据。具体结果如表 3。

由表 3 可以看出不同基因型小麦对硒的耐受程

表 3 亚硒酸盐添加处理对幼小麦苗期芽生长的影响区间
Table 3 The interval concentration of sprout growth in wheat seedling stage when amended selenite

品种 Varieties	回归方程 Regression equation	R^2	$EC_{10}/mg \cdot L^{-1}$	最高促进浓度/ $mg \cdot L^{-1}$ Highest concentration
陕麦 159	$y=-0.230x^2+1.503x$	0.925	6.8	3.3
西农 979	$y=-0.104x^2+2.095x$	0.971	20.9	10.1
小偃 22	$y=-0.321x^2+4.896x$	0.752	15.7	7.6
烟农 19	$y=-0.307x^2+4.004x$	0.716	13.3	6.4
鄂麦 20	$y=-0.185x^2+2.592x$	0.948	14.6	7.0
嵩优 2018	$y=-0.437x^2+3.457x$	0.872	8.8	4.0
鲁麦 23	$y=-0.210x^2+3.789x$	0.883	19.1	9.0

注:以拟合曲线的最高峰值为最高促进浓度。

度不同,反之外源硒对不同基因型小麦的营养区间也有很大差异。由表 3 还可以看出,亚硒酸盐对小麦幼苗期的毒害起点分布在 $6.5\sim 20.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。对外源亚硒酸盐的耐受性大小分布为:西农 979>鲁麦 23>小偃 22>鄂麦 20>烟农 19>蒿优 2018>陕麦 159。毒害起点高的小麦品种,其相对耐受力要优于其他品种,适宜于在高硒地区或者作为富硒植物进行广泛种植。如:西农 979、小偃 22、鲁麦 23 等小麦品种适宜于选作富硒小麦,其中以西农 979 对四价外源硒的耐受性最高。

2.3.2 小麦根长对硒酸盐的耐受性比较

以小麦幼苗期根长抑制率作为外源硒酸盐的敏感指标,对小麦幼苗期根长抑制率拟合二次函数的方式求得其毒害起点,用 EC_{10} 值作为小麦对外源硒耐受性比较的主要依据。具体结果如表 4。

表 4 硒酸盐添加处理对小麦幼苗期根长生长的影响区间

Table 4 The interval of root growth on wheat seedling stage by selenate added

品种 Varieties	回归方程 Regression equation	R^2	$EC_{10}/$ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	最高促进浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Highest concentration
陕麦 159	$y=-0.957x^2+5.070x$	0.887	5.7	2.6
西农 979	$y=-1.037x^2+10.09x$	0.824	10.1	4.9
小偃 22	$y=-2.427x^2+21.77x$	0.718	9.5	4.5
烟农 19	$y=-2.347x^2+6.739x$	0.750	2.4	1.4
鄂麦 20	$y=-6.331x^2+7.448x$	0.718	1.2	0.6
蒿优 2018	$y=-0.826x^2+7.710x$	0.623	6.7	3.2
鲁麦 23	$y=-0.327x^2+4.690x$	0.881	10.6	4.7

由表 4 可以看出,不同小麦品种幼苗期生长对外源硒酸盐的耐受能力差异较大,且趋势与亚硒酸盐相似。不同基因型小麦对外源硒酸盐的耐受性大小顺序为:西农 979>鲁麦 23>小偃 22>蒿优 2018>陕麦 159>烟农 19>鄂麦 20。其中较高的营养区间均出现在西农 979、鲁麦 23 和小偃 22 3 个品种;营养区间相对较窄的品种则是陕麦 159、鄂麦 20 和蒿优 2018。

2.3.3 小麦硒耐受性的基因型分类

根据硒的耐受性差异可以将 7 个小麦品种进行分类(图 2),处于第一组的 3 种小麦品种(西农 979、鲁麦 23、小偃 22)对亚硒酸盐和硒酸盐的耐受性均较高。在外源亚硒酸盐和硒酸盐添加下,其最高促进浓度区间分别为 $7.6\sim 10.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.5\sim 4.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间;处于第二组的两种小麦品种(鄂麦 20、烟农 19)对亚硒酸盐的耐受浓度较高(最高促进浓度为 $6.4\sim 7.0$

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而对硒酸盐的耐受性较低(最高促进浓度为 $0.6\sim 1.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);处于第三组的两种小麦品种(蒿优 2018、陕麦 159)对亚硒酸盐以及硒酸盐的耐受性无显著差异,且均表现为较低水平,在外源亚硒酸盐和硒酸盐添加下其最高促进浓度范围分别为 $3.3\sim 4.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.6\sim 3.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

由此可见,小麦的硒耐受性与其基因型具有显著关系,可根据其对不同价态硒的耐受性(以 EC_{10} 值作为表征)将其进行分类。对于亚硒酸盐与硒酸盐耐受性均较高的品种(西农 979、鲁麦 23、小偃 22)适宜于用作富硒作物开发和富硒土壤修复作物等,可以定义为耐受品种;对于亚硒酸盐与硒酸盐耐受性不统一的小麦品种(鄂麦 20、烟农 19)可以用于指示功能,定义为敏感品种,可作为土壤硒有效性类型识别的辅助判断依据。

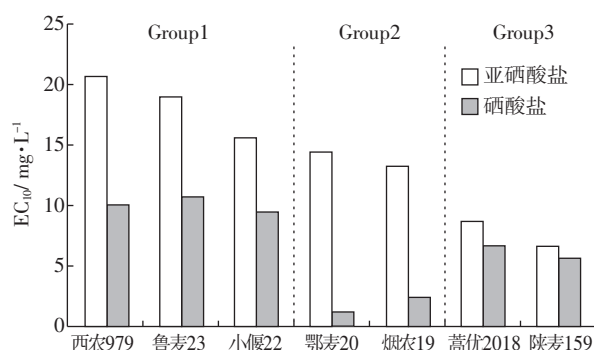


图 2 小麦品种对 $\text{Se}(\text{IV})/\text{Se}(\text{VI})$ 耐受性差异

Figure 2 The differences of tolerated on wheat varieties by $\text{Se}(\text{IV})/\text{Se}(\text{VI})$

3 讨论

小麦的发芽过程主要分为两个阶段,第一阶段为吸涨与发芽阶段,主要表征指标为发芽率,此阶段小麦种子与外界进行的主要物质交换为水,而生长的物质与能量来源主要依靠胚乳贮存物质的分解。因此,在吸涨阶段,萌发种子对盐类吸收接近于零,水分与盐离子浓度构成的渗透压成为限制因素^[20]。本研究证实了在小麦吸涨阶段(0~72 h),对发芽率的影响仅为盐离子浓度,与盐离子总类及价态无关,在外源硒对发芽率的影响中,仅高浓度亚硒酸盐($>20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)抑制了种子的发芽,而在亚硒酸盐其他浓度以及硒酸盐全部浓度下($0.5\sim 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)均促进其发芽(图 1),与前人研究吸涨阶段发芽率影响因素的结论一致^[20]。

小麦发芽的第二阶段为幼苗期生长阶段,此阶段

小麦幼苗利用根部与外界环境进行广泛的物质交换,由于幼苗期生物量较低,对毒害作用比较敏感^[9]。硒元素的进入首先影响了根尖细胞分裂与根系细胞形态,在宏观上表现为对根长的抑制^[11],本研究中根长抑制率的对比也说明了这一点。在添加亚硒酸盐时,高浓度硒($>10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)显著抑制了根部延长,在最高浓度下($40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),抑制率达 56.34%;添加硒酸盐时,高浓度硒($>8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)显著抑制了根部的伸长,在最高硒浓度处理下($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),根长抑制率达26.01%(图 1)。硒酸盐对根长抑制浓度(EC_{10})显著低于亚硒酸盐,说明硒酸盐的生物毒性更大(表 3、表 4)。植物体内硒对植物本身的影响包括两方面:一方面,硒在植物体内能转变为非蛋白氨基酸类化合物,进而将硒无害地储存在植物体内^[9];另一方面,当硒含量超出了植物能承受范围时,其通过取代正常酶类蛋白中的核心原子进行代谢,进而破坏了酶类的正常代谢功能造成相应的毒害效应^[21]。本研究亚硒酸盐处理中 7 个小麦品种在添加浓度 $>18.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时均出现了明显的抑制作用;硒酸盐处理的 7 种小麦在添加浓度 $>9.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时即表现出明显的抑制作用,达到相同抑制率时硒酸盐的浓度远低于亚硒酸盐浓度(图 1)。这主要是由于亚硒酸盐大部分累积在小麦的地下部分,而硒酸盐能够直接转移到小麦的地上部分,更容易通过蛋白中心原子替换的方式改变蛋白质结构进而破坏其正常功能。相对而言小麦对亚硒酸盐耐受性更大,这与付冬冬等^[21]在不同价态硒对小白菜生长影响方面的研究结果一致。

植物对硒的富集能力与其对硒的耐受性成正比,富集能力越强则抗性越高^[22]。不同的基因型对小麦的抗硒富硒能力有很大的影响^[23]。这种能力的来源主要包括了土壤类型、土壤环境、气象条件以及土壤硒背景值等因素对小麦基因型的长期自然选择^[24]。本研究中不同基因型小麦对硒的耐受性表现说明了这一点。

4 结论

(1)外源硒对小麦的发芽影响不显著,但是对小麦发芽阶段的生长指标影响显著。

(2)低浓度硒(硒酸盐 $<8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硒酸盐 $<20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)能促进幼苗期小麦的生长,高浓度硒(硒酸盐 $\geq 8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硒酸盐 $\geq 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)却对小麦生长产生抑制作用;同等硒浓度下,硒酸盐的毒害作用大于亚硒酸盐。

(3)外源添加亚硒酸盐对小麦幼苗期地上部分生长表现出明显的抑制作用,用芽长抑制率作为敏感指标。外源添加硒酸盐则对小麦地下部分影响明显,根长抑制率可作为硒酸盐的毒害指标。

(4)小麦的不同基因型决定了其外源硒耐受性及其富硒能力,在外源硒的营养范围方面具有显著差异。西农 979、小偃 22 和鲁麦 23 3 个品种对硒的耐受能力强;鄂麦 20、烟农 19 对亚硒酸盐耐受性较高,对硒酸盐耐受性较低;陕麦 159、鄂麦 20、蒿优 2018 则对硒的耐受能力相对较差。

参考文献:

- [1] Tapiero H, Townsend D M, Tew K D. The antioxidant role of selenium and selenocompounds[J]. *Biomedical Pharmacotherapy*, 2003, 57: 134–144.
- [2] 唐新欣, 贺 蓉. 中国缺硒状况的调查[J]. 医药世界, 2002, 6: 22–24.
TANG Xin-xin, HE Rong. Investigation of lack of selenium status in China[J]. *Medicine World*, 2002, 6: 22–24.
- [3] 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 Rui-ling, LIANG Dong-li, WU Xiong-ping, et al. Effects of selenite and selenate on growth and physiological characteristics of pakchoi [J]. *Acta Bot Boreal -Occident Sin*, 2010, 30(5): 974–980.
- [4] 段曼莉, 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(3): 658–665.
DUAN Man-li, FU Dong-dong, WANG Song-shan, et al. Absorption, bioaccumulation and translocation of selenium in four different vegetables by applying selenate[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011(3): 658–665.
- [5] 林匡飞, 徐小清, 郑 利, 等. Se 对小麦种子发芽与根伸长抑制的生态毒理效应[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 885–889.
LIN Kuang-fei, XU Xiao-qing, ZHENG Li, et al. Eco-toxicological effects of selenium on inhibition of seed germination and root elongation of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5): 885–889.
- [6] Rayman M P. Food-chain selenium and human health: Emphasis on intake[J]. *British Journal of Nutrition*, 2008, 100: 254–268.
- [7] 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: 301–313.
- [8] Graham L, Ivan O M, James S, et al. Selenium concentration in wheat grain: is there sufficient genotypic variation to use in breeding? [J]. *Plant and Soil*, 2005, 269: 369–380.
- [9] Sors T G, Ellis D R, Salt D E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants[J]. *Photosynthesis Research*, 2005, 86: 373–389.
- [10] 张忠信, 张新友, 汤丰收, 等. 硒的生理保健功能及富硒花生研究[J]. 中国食物与营养, 2012, 2: 61–63.
ZHANG Zhong-xin, ZHANG Xin-you, TANG Feng-shou, et al. Study

- on physiological health functions of selenium and selenium-enriched peanut[J]. *Food and Nutrition in China*, 2012, 2:61-63.
- [11] 赵中秋, 郑海雷, 张春光, 等. 土壤硒及其与植物硒营养的关系[J]. 生态学杂志, 2003, 22(1):22-25.
- ZHAO Zhong-qiu, ZHENG Hai-lei, ZHANG Chun-guang, et al. Advances in the studies on selenium in soil and selenium biological effect [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(1):22-25.
- [12] 雷红灵. 植物硒及其含硒蛋白的研究[J]. 生命科学, 2012, 02:123-129.
- LEI Hong-ling. Study of plant selenium and selenium-containing protein[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2012, 02:123-129.
- [13] 毛 晖, 王朝辉, Graham L, et al. 硒的价态与浓度水平对6种植物种子发芽和根际生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10):1958-1965.
- MAO Hui, WANG Zhao-hui, Graham L, et al. Effects of selenium valence states and concentration on germination root growth of six crop species[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10):1958-1965.
- [14] 吴露露, 杨安富, 耿建梅, 等. 硒对不同杂交水稻品种发芽特性的影响[J]. 热带作物学报, 2010, 31(5):711-718.
- WU Lu-lu, YANG An-fu, GENG Jian-mei, et al. The physiological effects of Se on the germinating of hybrid rice varieties[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(5):711-718.
- [15] Pilon-Smits E A H, Quinn C F, Tapken W, et al. Physiological functions of beneficial elements[J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2009, 12:267-274.
- [16] Lyons G H, Genc Y, Soole K, et al. Selenium increases seed production in Brassica[J]. *Plant and Soil*, 2009, 318:73-80.
- [17] 柳 玉, 贲可荣. 基于综合相关性的故障案例库维护方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(5):1038-1045.
- LIU Yu, BEN Ke-rong. Fault case base maintenance based on comprehensive correlation[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(5):1038-1045.
- [18] 李 晓. Bartlett 校正和校正经验似然的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2009.
- LI Xiao. Studies on the Bartlett correction and adjusted empirical likelihood[D]. Hefei: University of Science and Technology China, 2009.
- [19] 范永辉. Bartlett 分解与多元正态总体均值的广义推断[J]. 数学学报(中文版), 2010, 53(2):329-340.
- FAN Yong-hui. Bartlett's decomposition and generalized inferences on the means of several multivariate normal populations[J]. *Acta Mathematica Sinica(Chinese Series)*, 2010, 53(2):329-340.
- [20] 张瑞富, 王 云, 乔宏伟, 等. 盐胁迫对不同基因型小麦发芽的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2007(3):297-301.
- ZHANG Rui-fu, WANG Yun, QIAO Hong-wei, et al. Effect of salt stress on germination of different wheat varieties[J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities*, 2007(3):297-301.
- [21] 付冬冬, 段曼莉, 梁东丽, 等. 不同价态外源硒对小白菜生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2):358-365.
- FU Dong-dong, DUAN Man-li, LIANG Dong-li, et al. Effects of exogenous selenite and selenate on the growth and physiological metabolism of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(2):358-365.
- [22] 陈思杨, 江荣风, 李花粉. 苗期小麦和水稻对硒酸盐/亚硒酸盐的吸收及转运机制[J]. 环境科学, 2011(1):284-289.
- CHEN Si-yang, JIANG Rong-feng, LI Hua-fen. Uptake and translocation of selenate or selenite by wheat and rice seedlings[J]. *Environmental Science*, 2011(1):284-289.
- [23] Arvy M P. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44:1083-1087.
- [24] 耿建梅. 海南省稻田土壤硒的化学特征及水稻吸收累积硒的基因型差异与机理[D]. 海口:海南大学, 2010.
- GENG Jian-mei. Chemical characteristics of selenium in paddy soils and genotypic differences and mechanism of selenium absorption and accumulation of rice in Hainan Province[D]. Haikou: Hainan University, 2010.