

## 不同硒形态对玉米根系形态和养分吸收的影响

位晶, 牛乐, 唐宏亮\* (河北大学生命科学学院, 河北保定 071002)

**摘要** [目的]明确玉米幼苗在不同浓度 Se(VI) 和 Se(IV) 处理下根系形态和养分吸收的效应, 为缺硒土壤合理补硒提供科学依据。[方法]以玉米品种郑单 958 为材料, 采用营养液培养方法研究了不同浓度 Se(VI) 和 Se(IV) 对玉米生长和养分吸收的影响。[结果]相同硒浓度下, Se(VI) 处理的玉米地上部干重显著高于 Se(IV) 处理; 低浓度硒处理 [Se(VI)  $\leq$  12.50  $\mu\text{mol/L}$ , Se(IV)  $\leq$  25.00  $\mu\text{mol/L}$ ] 玉米幼苗中硒含量均随硒浓度的增加而增加。相同硒浓度下, 硒浓度  $< 12.50 \mu\text{mol/L}$  时, 玉米地上部 Se(VI) 的累积量低于 Se(IV) 累积量, 硒浓度  $\geq 12.50 \mu\text{mol/L}$  时, 玉米地上部 Se(VI) 的累积量显著高于 Se(IV) 累积量。相同硒浓度下, Se(VI) 处理的玉米幼苗氮、磷、钾累积量显著高于 Se(IV) 处理。[结论]低浓度硒 [Se(IV)  $\leq$  6.25  $\mu\text{mol/L}$ , Se(VI)  $\leq$  12.50  $\mu\text{mol/L}$ ] 可促进玉米生长和养分吸收, 表现为根长伸长、根增粗以及氮、磷和钾累积量的增加, 高浓度硒导致玉米生长受到抑制, 氮、磷和钾累积量减小。

**关键词** 玉米; 硒酸钠; 亚硒酸钠; 根系形态; 养分吸收

**中图分类号** S143.7<sup>+</sup>9 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2019)04-0153-05

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.04.042



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Effects of Different Selenium Forms on Maize Root Morphology and Nutrients Absorption

WEI Jing, NIU Le, TANG Hong-liang (College of Life Sciences, Hebei University, Baoding, Hebei 071002)

**Abstract** [Objective] The effects of root morphology and nutrient uptake of Se(VI) and Se(IV) in different concentrations of maize seedlings were determined, which provided a scientific basis for crop remediation of selenium-enriched soils with reasonable selenium. [Method] The effects of different concentrations of Se(VI) and Se(IV) on corn growth and nutrient uptake were studied by using nutrient solution culture method. [Result] Under the same selenium concentration, the dry weight of Se(VI) treated maize was significantly higher than Se(IV) treatment; Low concentration selenium treatment [Se(VI)  $\leq$  12.50  $\mu\text{mol/L}$ , Se(IV)  $\leq$  25.00  $\mu\text{mol/L}$ ], selenium content increased with the increase of selenium concentration. At the same selenium concentration, when the concentration of selenium was  $< 12.50 \mu\text{mol/L}$ , the accumulation of Se(VI) in the aboveground part of maize was lower than that of Se(IV). When the concentration of selenium was  $\geq 12.50 \mu\text{mol/L}$ , the accumulation of Se(VI) in the aboveground part of corn was significantly higher than the amount of accumulation in Se(IV). Under the same selenium concentration, the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in Se(VI)-treated maize seedlings was significantly higher than that in Se(IV) treatment. [Conclusion] Low concentration of selenium [Se(IV)  $\leq$  6.25  $\mu\text{mol/L}$ , Se(VI)  $\leq$  12.50  $\mu\text{mol/L}$ ] can promote the growth of maize and nutrient uptake, which is characterized by root length elongation, root thickening, nitrogen, phosphorus and potassium accumulation, high concentration of selenium. The growth of maize was inhibited, and the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium decreased.

**Key words** Corn; Sodium selenate; Sodium selenite; Root morphology; Nutrient absorption

硒是人类、动物所必需的微量元素, 缺硒可引起人体某些重要的器官功能失调, 进而产生病变, 如克山病、大骨节病<sup>[1]</sup>。许多研究表明, 硒具有防癌、抗肿瘤和抗衰老的作用<sup>[2]</sup>。虽然目前硒未被确定为高等植物必需的营养元素<sup>[3]</sup>, 但它对植物的有益作用已经有了许多证明<sup>[4-5]</sup>。硒可以提高植物应对低温、干旱、高光、水害、盐害和重金属等多种非生物胁迫<sup>[6]</sup>。低浓度的硒可以提高作物的叶绿素含量, 促进植物的光合作用, 增强作物的抗氧化作用<sup>[4,7-8]</sup>。

植物根系既是水分和养分吸收的主要器官, 又是多种激素、有机酸和氨基酸合成的重要场所, 其形态和生理特性与地上部生长发育、同化产物运输与分配、产量和品质形成皆有着密切的关系<sup>[9]</sup>。植物根际会因根系分泌物营造的微生物环境而影响到土壤中硒的氧化还原转化<sup>[10]</sup>。因此, 硒必然会引起植物根系形态和生理特性变化, 进而影响其生长发育和养分吸收。

土壤中可供植物吸收利用的硒化合物主要是 Se(IV) 和 Se(VI)<sup>[11]</sup>, 但由于 Se(IV) 和 Se(VI) 在土壤中的迁移转化方式

以及被植物根部吸收的活性位点不同<sup>[12]</sup>, 它们在土壤中的移动性和毒性大小存在差异。已有研究表明, 适量的硒可以促进植物生长发育, 提高作物产量和硒含量, 改善作物品质, 增强作物的抗逆性<sup>[13-14]</sup>, 抵抗某些重金属毒害及盐分胁迫; 过量硒会抑制作物生长, 甚至产生毒害作用<sup>[15-17]</sup>。目前, 国内外对植物硒的研究主要集中在土壤施硒或叶面喷硒开发富硒植物, 以满足缺硒地区人体健康对硒的需求<sup>[18-21]</sup>, 或筛选出富硒作物用于硒毒害土壤的植物修复<sup>[22]</sup>。但关于硒形态对生物有效性方面的研究较少<sup>[10]</sup>, 笔者以玉米 (*Zea mays* L. cv. 'ZD958') 为研究对象, 采用营养液培养的方法, 研究不同浓度 Se(VI) 和 Se(IV) 对玉米根系形态和养分吸收的双重效应, 以为合理补硒和硒污染土壤的作物修复提供科学依据。

## 1 材料与方法

**1.1 植物培养** 挑选健康饱满玉米种子 (郑单 958, *Z. mays* L. cv. ZD958), 用 10% (V/V)  $\text{H}_2\text{O}_2$  表面消毒 10 min 后, 置于 2 层湿润的滤纸上, 室温下避光培养 3 d。待种子萌发, 叶完全展开, 选取地上部和根系发育一致的幼苗, 去离子水将根冲洗干净后, 移栽到含有 2.0 L 的营养液中进行培养 (每盆 3 棵苗)。营养液成分如下:  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  2 000  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  250  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  750  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{MgSO}_4$  650  $\mu\text{mol/L}$ ,  $\text{KCl}$

**基金项目** 河北省自然科学基金项目 (C2018201206)。

**作者简介** 位晶 (1993—), 女, 山东滨州人, 硕士研究生, 研究方向: 根系代谢与生物调控。\* 通信作者, 副教授, 从事植物根际营养方面的研究。

**收稿日期** 2018-12-21

100  $\mu\text{mol/L}$ 、 $\text{H}_3\text{BO}_3$  10  $\mu\text{mol/L}$ 、 $\text{ZnSO}_4$  0.5  $\mu\text{mol/L}$ 、 $\text{MnSO}_4$  0.5  $\mu\text{mol/L}$ 、 $\text{CuSO}_4$  0.2  $\mu\text{mol/L}$ 、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$  0.01  $\mu\text{mol/L}$ 、 $\text{EDTA-FeNa}$  100  $\mu\text{mol/L}$ 。营养液 pH 用 0.05  $\mu\text{mol/L}$  的盐酸或氢氧化钠调至 5.8,每隔 5 d 更换一次营养液,昼夜连续通气。硒以亚硒酸钠[Se(IV)]和硒酸钠[Se(VI)]的形式加入,设 5 个浓度处理(0、6.25、12.50、25.00、50.00  $\mu\text{mol/L}$ ),每个处理设 4 个重复,完全随机排列,每 3 d 改变盆的位置,以最大化消除环境的效应。植物按如下条件培养:光照时间(昼夜 14 h/10 h),昼夜温度 28/22  $^{\circ}\text{C}$ ,光照强度 300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,相对湿度 75%~85%。出苗后第 22 天收获,分别测定各处理苗干重,根干重,根形态参数(总根长、根表面积、平均根直径、根体积),地上部氮、磷、钾和硒含量,以评价不同形态硒对玉米生长和养分吸收的影响。

## 1.2 测定指标和方法

**1.2.1 植物生物量测定。**植物收获时,用剪刀从根茎交界处剪取地上部,在 105  $^{\circ}\text{C}$  下杀青 30 min 后,75  $^{\circ}\text{C}$  烘干 72 h 至恒重后称干重(g);根样冲洗干净后,直接装入塑封袋中,于 -20  $^{\circ}\text{C}$  下保存供根系扫描分析用。根质量比=根干重/(根干重+苗干重) $\times 100\%$ 。

**1.2.2 根系参数测定。**取冷冻保存的根系,解冻后用 EPSON 根系扫描仪(EPSON GT-X900)进行扫描。扫描后用 WinRHIZO 2009 Pro 根系分析软件进行根系图像分析,获得总根长、根表面积、平均根直径、根体积等根形态参数。

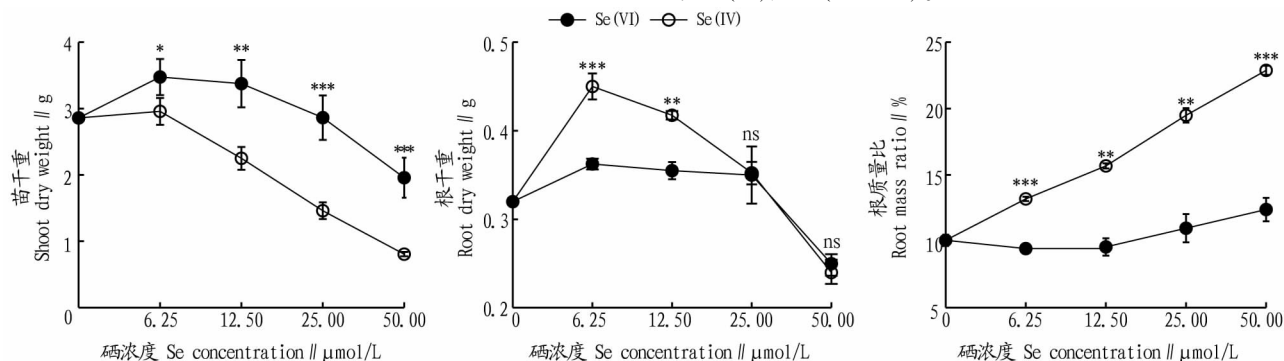
**1.2.3 地上部硒含量测定。**准确称取研磨好的样品 0.1 g,采用“湿灰化法”(HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub>=8:2)消化,ICP-AES 确定消煮液中的硒浓度<sup>[23]</sup>。

**1.2.4 地上部氮、磷、钾含量测定。**烘干的玉米植株样品用粉碎机研磨成细粉状,过 1 mm 筛,称取约 0.3 g,用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消化样品。消化液氮浓度用凯氏定氮仪测定<sup>[24]</sup>;磷浓度用钒钼黄比色法测定<sup>[25]</sup>;钾浓度采用火焰光度法测定。

**1.3 数据统计分析** 采用 SPSS 13.0 for Windows(September 2004,SPSS Inc.,USA)对数据统计分析。独立样本 *t* 检验用于比较 2 种硒形态之间的差异显著性。

## 2 结果与分析

**2.1 不同硒形态对玉米生物量积累和分配的影响** 由图 1 可以看出,6.25  $\mu\text{mol/L}$  的 Se(VI)处理明显增加了玉米的苗干重和根干重,随着硒浓度的增加,玉米苗干重和根干重呈现明显下降的趋势。就 Se(VI)处理而言,硒浓度  $\leq 12.50 \mu\text{mol/L}$  时,苗干重比不施用硒的对照高 15.30%;6.25  $\mu\text{mol/L}$  的 Se(IV)处理苗干重比对照高 3.30%。相同硒浓度下,Se(VI)处理的玉米苗干重均高于 Se(IV)处理。当硒浓度  $< 25.00 \mu\text{mol/L}$  时,Se(IV)处理的玉米根干重显著高于 Se(VI)处理( $P<0.01$ );但硒浓度  $\geq 25.00 \mu\text{mol/L}$  时,Se(IV)处理的玉米根干重与 Se(VI)处理无显著差异。随硒浓度的增大,根质量比稳定增加,Se(IV)处理的玉米根质量比显著高于 Se(VI)处理( $P<0.01$ )。



注:ns, $P>0.05$ ;\*, $P<0.05$ ;\*\*, $P<0.01$ ;\*\*\*, $P<0.001$

图 1 不同硒形态对玉米生物量积累和分配的影响

Fig.1 Effects of different selenium speciation on biomass accumulation and allocation of maize

**2.2 不同硒形态对玉米根系形态的影响** 从图 2 可以看出,6.25  $\mu\text{mol/L}$  的 Se(IV)处理的玉米总根长、根表面积和根体积较不施用硒的对照明显高。随着硒浓度的增加,玉米的总根长、根表面积和根体积减小;Se(VI)处理的玉米总根长、根表面积和根体积表现出随硒浓度的增加先增大后减小的趋势。同等硒浓度处理条件下,硒浓度为 6.25  $\mu\text{mol/L}$  时,Se(IV)处理的玉米总根长、根表面积分别比 Se(VI)处理高 2.99%和 4.85%;当硒浓度  $\geq 12.50 \mu\text{mol/L}$  时,Se(IV)处理玉米总根长、根表面积明显低于 Se(VI)处理( $P<0.05$ );硒浓度为 6.25  $\mu\text{mol/L}$ ,Se(IV)处理的玉米根体积明显高于 Se(VI)处理( $P<0.05$ );当硒浓度  $\geq 12.50 \mu\text{mol/L}$ ,Se(IV)处理的玉米根体积与 Se(VI)处理间无明显差异。Se(IV)处理的玉米总根长、根表面积在浓度 6.25  $\mu\text{mol/L}$  时最大,Se(VI)处理的玉米

根体积在浓度 12.50  $\mu\text{mol/L}$  时最大。

随硒浓度的增加,Se(VI)处理的玉米平均根直径呈现先增后减小的趋势;Se(IV)处理的玉米平均根直径随硒浓度的增加呈现稳定增加的趋势。相同硒浓度下,Se(IV)处理的玉米平均根直径显著高于 Se(VI)处理( $P<0.05$ )。

**2.3 不同硒形态对玉米养分元素积累的影响** 从图 3 可以看出,玉米的氮、磷和钾累积量均随硒浓度的增大呈先增大后减小的趋势,峰值均出现在 6.25  $\mu\text{mol/L}$ 。同等硒浓度处理下,Se(VI)处理的玉米氮累积量均显著大于 Se(IV)处理( $P<0.001$ ),如 6.25、50.00  $\mu\text{mol/L}$  Se(VI)处理的玉米氮累积量分别比 Se(IV)处理上升了 19.81%和 63.82%。对 Se(VI)处理而言,硒浓度  $\leq 12.50 \mu\text{mol/L}$  时,Se(VI)处理的玉米氮累积量高于对照,硒浓度  $> 25.00 \mu\text{mol/L}$  时,Se(VI)处理的玉米氮

累积量小于对照;除 6.25  $\mu\text{mol/L}$  Se(IV) 处理的玉米氮累积量高于对照外,其余浓度的 Se(IV) 处理的玉米氮累积量均小于对照。同等硒浓度处理下,Se(VI) 处理的玉米磷累积量均大于 Se(IV) 处理,如 25.00、50.00  $\mu\text{mol/L}$  Se(VI) 处理的玉米磷累积量分别比 Se(IV) 处理上升了 62.66% 和 71.02%。硒浓度  $\leq 6.25$   $\mu\text{mol/L}$  时,Se(VI) 处理与相应 Se(IV) 处理的玉米

磷累积量无明显差异;硒浓度  $> 6.25$   $\mu\text{mol/L}$  时,Se(VI) 处理的玉米磷累积量显著高于相应 Se(IV) 处理 ( $P < 0.05$ )。同等浓度处理下,Se(VI) 处理的玉米钾累积量显著高于 Se(IV) 处理 ( $P < 0.01$ ),如 25.00、50.00  $\mu\text{mol/L}$  Se(VI) 处理分别比 Se(IV) 处理高了 57.18%、66.78%。

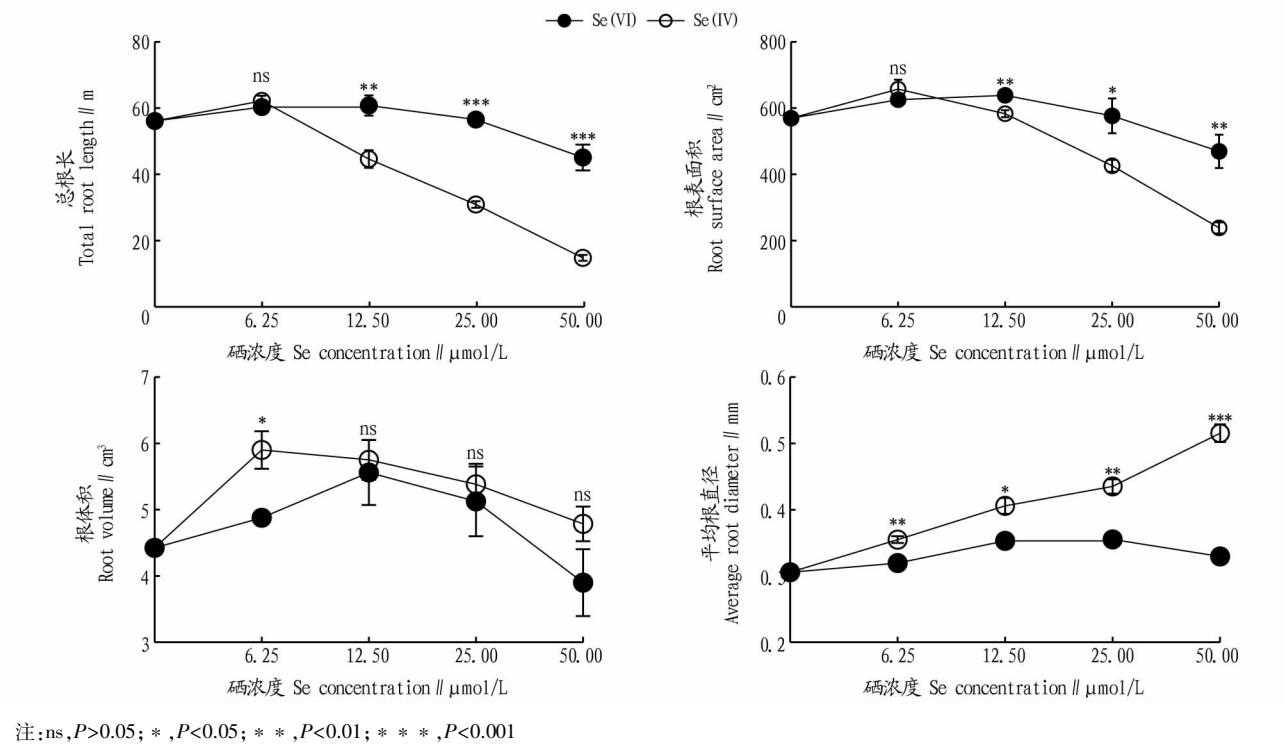


图2 不同硒形态对玉米根系形态的影响

Fig.2 Effects of different selenium speciation on root morphological parameters of maize

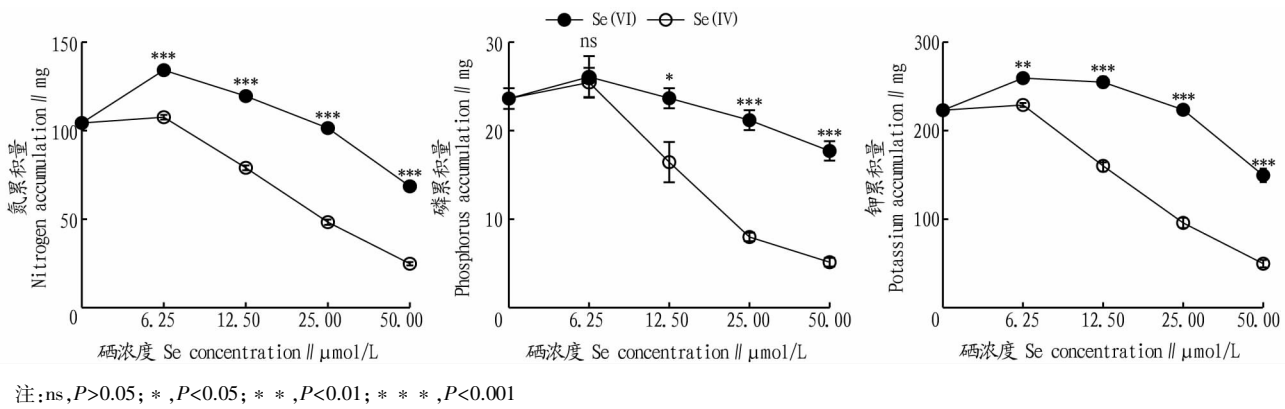


图3 不同硒形态对玉米氮、磷和钾累积量的影响

Fig.3 Effects of different selenium speciation on the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium of maize

**2.4 不同硒形态对玉米地上部硒含量和累积量的影响** 从图4可以看出,玉米地上部硒含量随硒浓度的增大呈现先增大后减小的趋势,Se(VI)处理和Se(IV)处理的峰值分别出现在12.50、25.00  $\mu\text{mol/L}$ 。硒浓度  $< 50.00$   $\mu\text{mol/L}$  时,Se(VI)处理的硒含量显著低于相应Se(IV)处理 ( $P < 0.001$ );硒浓度为50.00  $\mu\text{mol/L}$  时,Se(VI)处理的硒含量显著高于相应Se(IV)处理 ( $P < 0.001$ )。玉米地上部的硒累积量均随硒浓度的增大呈现先增大后减小的趋势,Se(VI)处理和Se(IV)处理的硒累

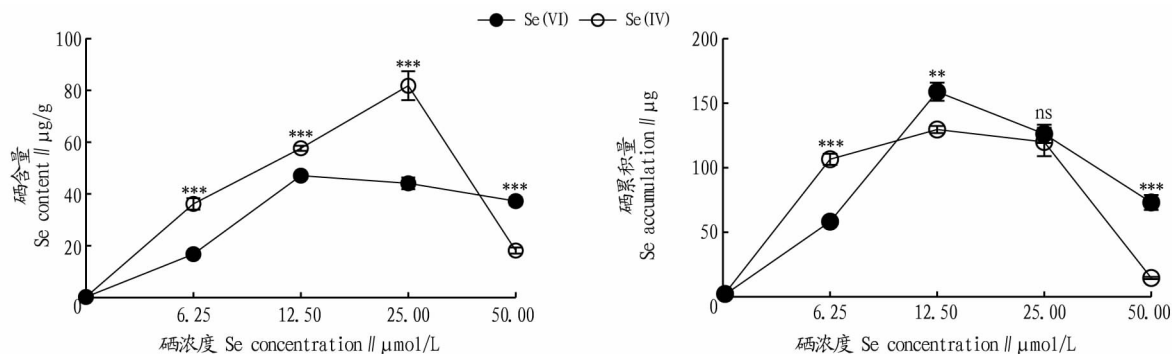
积量峰值均出现在12.50  $\mu\text{mol/L}$ 。硒浓度  $< 12.50$   $\mu\text{mol/L}$  时,Se(IV)处理的硒累积量显著高于相应Se(VI)处理 ( $P < 0.001$ );硒浓度  $\geq 12.50$   $\mu\text{mol/L}$  时,Se(IV)处理的硒含量显著低于相应Se(VI)处理。

### 3 结论与讨论

大多数重金属对植物都有一定的毒害作用,而植物首先受害的是根尖。重金属抑制细胞分裂和伸长导致植物根伸长受阻<sup>[26]</sup>。Yi等<sup>[27]</sup>对蚕豆根细胞的研究表明,低浓度Se

(IV) ( $<10.0 \text{ mg/L}$ ) 有利于根系的生长;而高浓度 Se(IV) 可以减缓根尖细胞的分裂速度,抑制根系生长。吴雄平等<sup>[28]</sup> 对小白菜的研究表明,当 Se(IV) 含量低于  $20.00 \text{ mg/kg}$  时对根伸长的影响不明显,但使根系变粗,当 Se(VI) 含量低于  $2.50 \text{ mg/kg}$  能促进小白菜根系伸长和增粗。该研究结果表明,低浓度 Se(IV) ( $\leq 6.25 \text{ } \mu\text{mol/L}$ ) 和 Se(VI) ( $\leq 25.00 \text{ } \mu\text{mol/L}$ ) 能促进根系伸长和增粗,高浓度的 Se(IV) 和 Se(VI) 均抑制玉米根系的生长,但使玉米根变粗。Cartes

等<sup>[29]</sup> 对黑麦草的研究结果表明,Se(VI)  $\leq 1.0 \text{ mg/kg}$  能够显著促进黑麦草的生长,Se(IV)  $\leq 10.0 \text{ mg/kg}$  对黑麦草无显著影响,高于此浓度后,黑麦草各生长参数随硒浓度的增加而呈明显下降的趋势。Hawrylak-Nowak<sup>[30]</sup> 对生菜的研究表明,Se(VI)  $\geq 20 \text{ } \mu\text{mol/L}$  和 Se(IV)  $\geq 15 \text{ } \mu\text{mol/L}$  处理显著降低了生菜的生长。该研究结果表明,Se(VI)  $\leq 12.50 \text{ } \mu\text{mol/L}$  和 Se(IV)  $\leq 6.25 \text{ } \mu\text{mol/L}$  显著提高了玉米的苗干重,促进了玉米生长,高浓度的 Se(VI) 和 Se(IV) 抑制了玉米生长。



注: ns,  $P>0.05$ ; \*,  $P<0.05$ ; \*\*,  $P<0.01$ ; \*\*\*,  $P<0.001$

图4 不同硒形态对玉米地上部硒含量和累积量的影响

Fig.4 Effects of different selenium speciation on the selenium content and accumulation in the aboveground part of maize

该研究结果表明,在低硒浓度下[Se(VI)  $\leq 12.5 \text{ } \mu\text{mol/L}$ 、Se(IV)  $\leq 6.25 \text{ } \mu\text{mol/L}$ ],玉米氮累积量在对照水平以上,高于以上浓度的硒处理使玉米苗氮累积量减少。Owusu-Sekyere等<sup>[31]</sup>发现,Se(VI)处理对苜蓿苗氮含量影响不显著。Kopsell等<sup>[32]</sup>报道 Se(VI) 处理使小白菜磷含量减少。Ramos等<sup>[33]</sup>对莴苣的研究表明,Se(IV)处理减少了磷的积累,而Se(VI)处理下的磷保持不变。该研究发现,6.25  $\mu\text{mol/L}$  的 Se(IV) 处理导致地上部磷累积量增加,随着硒浓度的增加,磷累积量明显下降,低浓度[Se(VI)  $\leq 12.5 \text{ } \mu\text{mol/L}$ ]处理的磷累积量增加,高浓度 Se(VI) 处理的磷累积量减少;Se(IV) 处理的磷累积量低于 Se(VI) 处理。Kopsell等<sup>[32]</sup>和 Feng等<sup>[34]</sup>报道 Se(VI) 或 Se(IV) 的添加增加了钾浓度。Hawrylak-Nowak<sup>[35]</sup>报道 Se(IV) 的毒性可以降低玉米幼苗中的钾含量。该研究中,低浓度 Se(VI) ( $\leq 25.00 \text{ } \mu\text{mol/L}$ ) 和 Se(IV) ( $\leq 6.25 \text{ } \mu\text{mol/L}$ ) 增加了玉米幼苗的钾累积量,高浓度 Se(VI) 和 Se(IV) 处理降低了钾累积量。

作物对 Se(VI) 的吸收速度远高于 Se(IV)<sup>[36]</sup>,并且作物吸收的 Se(VI) 可以全部毫无变化地转运到地上部<sup>[37]</sup>。印度芥菜的根系仅将 10% 的 Se(IV) 吸收并转运到地上部分,却可把 85% 以上的 Se(VI) 快速转运到地上部[其吸收速度为 Se(IV) 的 2 倍多]<sup>[38]</sup>。该研究结果表明,硒浓度 $<12.50 \text{ } \mu\text{mol/L}$  时,Se(IV) 处理的玉米地上部硒累积量显著高于相应 Se(VI) 处理;硒浓度 $\geq 12.50 \text{ } \mu\text{mol/L}$  时,Se(IV) 处理的硒含量显著低于相应 Se(VI) 处理,表明玉米对硒的吸收在很大程度上依赖于硒供应的形态。

综合来看,该研究结果表明,低浓度 Se(IV) 和 Se(VI) 处理可以促进玉米生长,高浓度 Se(IV) 和 Se(VI) 处理抑制玉米生长;Se(VI) 处理的玉米幼苗氮、磷、钾累积量显著高于 Se

(IV) 处理,说明 Se(IV) 处理抑制玉米幼苗养分吸收作用大于 Se(VI) 处理。

#### 参考文献

- [1] 刘铮.中国土壤微量元素[M].南京:江苏科学技术出版社,1996:330-332.
- [2] 程伯容,鞠山见,岳淑婧,等.硒粮与人体硒水平:山东邹县老林大队粮食作物喷施亚硒酸钠是提高人体硒水平的研究[J].中国环境科学,1982,2(5):28-31.
- [3] TERRY N,ZAYED A M,DE SOUZA M P,et al.Selenium in higher plants[J].Annu Rev Plant Physiol Mol Biol,2000,51:401-432.
- [4] LYONS G H,GENC Y,SOOLE K,et al.Selenium increases seed production in Brassica[J].Plant soil,2009,318(1/2):73-80.
- [5] PILON-SMITS E A H,LEDUC D L.Phytoremediation of selenium using transgenic plants[J].Curr Opin Plant Biol,2009,20(2):207-212.
- [6] FENG R W,WEI C Y,TU S X.The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses[J].Environ Exp Bot,2013,87:58-68.
- [7] HAN D,LI X H,XIONG S L,et al.Selenium uptake speciation and stressed response of *Nicotiana tabacum* L.[J].Environ Exp Bot,2013,95:6-14.
- [8] 黄宇,张宏伟,徐芳森.植物酸性磷酸酶的研究进展[J].华中农业大学学报,2008,27(1):148-154.
- [9] 杨建昌.水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J].中国农业科学,2011,44(1):36-46.
- [10] DI GREGORIO S,LAMPIS S,MALORGIO F,et al.Brassica juncea can improve selenite and selenate abatement in selenium contaminated soils through the aid of its rhizospheric bacterial population[J].Plant soil,2006,285(1/2):233-244.
- [11] BAÑUELOS G S,LIN Z Q.Phytoremediation management of selenium-laden drainage sediments in the San Luis Drain: A greenhouse feasibility study[J].Ecotox Environ Safe,2005,62(3):309-316.
- [12] ARVY M P.Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*) [J].J Exp Bot,1993,44(6):1083-1087.
- [13] K AKLEWSKI K,NOWAK J,LIGOCKI M.Effects of selenium content in green parts of plants on the amount of ATP and ascorbate-glutathione cycle enzyme activity at various growth stages of wheat and oilseed rape[J].J Plant Physiol,2008,165(10):1011-1022.
- [14] GERM M,KREFT I,STIBILJ V,et al.Combined effects of selenium and drought on photosynthesis and mitochondrial respiration in potato[J].Plant Physiol Biochem,2007,45(2):162-167.
- [15] 田应兵,陈芬,熊明标,等.黑麦草对硒的吸收、分配与累积[J].植物营

养与肥科学报,2005,11(1):122-127.

[16] DHILLON K S,DHILLON S K.Selenium accumulation by sequentially grown wheat and riceas influenced by gypsum application in a seleniferous soil[J].Plant soil,2000,227(1/2):243-248.

[17] ZHANG L H,ACKLEY A R,PILON-SMITS E A H.Variation in selenium tolerance and accumulation among 19 *Arabidopsis thaliana* accessions[J]. J Plant Physiol,2007,164:327-336.

[18] 王晋民,赵之重,段冰.叶面施砷对不同蔬菜硒富集和产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(7):103-106.

[19] ZHANG Y L,PAN G X,CHEN J,et al.Uptake and transport of selenate and selenate by soybean seedlings of two genotypes[J].Plant soil,2003,253:437-443.

[20] CARTES P,SHENE C,DE LA LUZ MORA M.Selenium distribution in ryegrass and its antioxidant role as affected by sulfur fertilization[J].Plant soil,2006,285(1/2):187-195.

[21] FINLEY J W.Bioavailability of selenium from foods[J].Nutr Rev,2006,64(3):146-151.

[22] BHARAGAVA R N,CHANDRA R,RAI V.Phytoextraction of trace elements and physiological changes in Indian mustard plants(*Brassica nigra* L.)grown in post methanated distillery effluent(PMDE)irrigated soil[J]. Bioresour Technol,2008,99(17):8316-8324.

[23] 刘新伟,王巧兰,段碧辉,等.亚硒酸盐对油菜幼苗硒吸收、根系形态及生理指标的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):2050-2056.

[24] 张志良,瞿伟菁,李小方.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2009:106.

[25] LIGABA A,SHEN H,SHIBATA K,et al.The role of phosphorus in aluminium-induced citrate and malate exudation from rape(*Brassica napus*) [J].Physiol Plant,2004,120(4):575-584.

[26] 韩阳,李雪梅,朱延姝,等.环境污染与植物功能[M].北京:化学工业出版社,2005:70-76.

[27] YI H L,SI L Y.Vicia root-mirconucleus and sister chromatid exchange assays on the genotoxicity of selenium compounds[J].Mutation research,

2007,630(1/2):92-96.

[28] 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.

[29] 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 soil,2005,276(1/2):359-367.

[30] HAWRYLAK-NOWAK B.Comparative effects of selenite and selenate on growth and selenium accumulation in lettuce plants under hydroponic conditions[J].Plant Growth Regul,2013,70(2):149-157.

[31] OWUSU-SEKYERE A,KONTTURI J,HAJIBOLAND R,et al.Influence of selenium(Se)on carbohydrate metabolism,nodulation and growth in alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J].Plant soil,2013,373(1/2):541-552.

[32] KOPSELL D A,RANDLE W M,MILLS H A.Nutrient accumulation in leaf tissue of rapid-cycling *Brassica oleracea* responds to increasing sodium selenate concentrations[J].J Plant Nutr,2000,23(7):927-935.

[33] RAMOS S J,FAQUIN V,DE ALMEIDA H Jr,et al.Selenate and selenite on yield,mineral nutrition and biofortification with selenium in lettuce cultivars[J].Rev Bras Cienc Solo,2011,35(4):1347-1355.

[34] FENG R W,WEI C Y,TU S X,et al.Effects of Se on the uptake of essential elements in *Pteris vittata* L.[J].Plant soil,2009,325(1/2):123-132.

[35] HAWRYLAK-NOWAK B.Effect of selenium on selected macronutrients in maize plants[J].J Elem,2008,13(4):513-519.

[36] YU X Z,GU J D.Differences in uptake and translocation of selenate and selenite by the weeping willow and hybridwillow[J].Environ Sci Pollut Res,2008,15:499-508.

[37] HOPPER J L,PARKER D R.Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulfate[J].Plant soil,1999,21:199-207.

[38] DE SOUZA M P,PILON-SMITS E A H,LYTLE C M,et al.Rate-limiting steps in selenium assimilation and volatilization by Indian mustard[J]. Plant Physiol,1998,117:1487-1494.

(上接第 152 页)

表 2 不同品种辣椒接种辣椒疫霉菌产生的病斑长度  
Table 2 Lesion length of different peppers inoculated with *Phytophthora capsici* mm

| 品种<br>Varieties | 辣椒疫霉菌 Bz<br><i>Phytophthora capsici</i> Bz | 标准菌株 CT<br>Standard strain CT |
|-----------------|--------------------------------------------|-------------------------------|
| 瑞郎 Ruilang      | 77.00±3.31 aA                              | 24.00±2.16 bcB                |
| 瑞丰 Ruifeng      | 75.40±3.80 aA                              | 26.83±10.11 bcB               |
| 长健 Changjian    | 78.70±7.16 aA                              | 32.00±3.36 bB                 |
| 尖椒 1 号 Pepper 1 | 78.00±18.89 aA                             | 44.80±10.31 aA                |
| 133             | 69.56±16.63 aA                             | 21.80±9.73 cB                 |

注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异明显, 不同大写字母表示在 0.01 水平差异明显  
Note: Different lowercase letters in the same column indicate that the difference is obvious at 0.05 level, while different uppercase letters indicate that the difference is obvious at 0.01 level

发现辣椒疫霉菌在玉米粉和燕麦培养基上生长最佳;张世才等<sup>[11]</sup>发现辣椒疫霉菌在燕麦培养基上生长速度最快,但在 V<sub>8</sub> 培养基上产孢最多。该研究结果表明,辣椒疫霉菌在燕麦培养基上的生长最快,在 10% V<sub>8</sub> 培养基上产生大量孢子囊和游动孢子,这与前人的研究结果一致。传统疫霉属卵菌的鉴定主要依据其形态特征,但难于区分形态相似的种。研究发现,rDNA-ITS 序列在疫霉属种内不同菌株间高度保守,而种间序列变异丰富,为卵菌的分类鉴定提供丰富的遗传信息<sup>[12]</sup>。因此,该研究根据形态学特征和 ITS 序列分析明确了

邯郸大名县辣椒疫病的病原分类地位,为辣椒疫病的防治提供理论依据。该研究采用活体刺茎接种法进行致病力测定,结果表明,所分离的辣椒疫霉菌 Bz 接种到 5 个辣椒品种后均引起辣椒发病,显示菌株 Bz 为辣椒疫病的病原菌。

参考文献

[1] 姜国庆,丁和明.辣椒疫病的发生及防治技术[J].湖北植保,2014(1):26,28.

[2] KAMOUN S,FURZER O,JONES J D,et al.The top 10 oomycete pathogens in molecular plant pathology [J].Molecular plant pathology,2015,16(4):413-434.

[3] 曲丹丹,马莉莉,周海洋.辣椒疫病发病原因及综合防治措施[J].现代农业科技,2017(18):90,92.

[4] 武玉环,章彦俊,张红杰,等.辣椒疫霉菌的分离纯化及室内药剂筛选[J].北方园艺,2013(8):138-140.

[5] 郑小波.疫霉菌及其研究技术[M].北京:中国农业出版社,1997.

[6] 邱小燕,汤智鹏,张敏,等.一种适用于多数植物病原真菌的孢单分离方法[J].安徽农业科学,2011,39(9):5263-5264.

[7] 杨叔青,胡栓红,杨志刚,等.不同地区辣椒疫霉菌生理小种的鉴定和生物学特性的研究[J].华业农学报,2015,30(2):104-109.

[8] SAITOU N,NEI M.The neighbor-joining method:A new method for reconstructing phylogenetic trees [J].Molecular biology and evolution,1987,4(4):406-425.

[9] 李萍,江涛,高智谋,等.辣椒疫霉 (*Phytophthora capsici*) 对辣椒的致病力分化研究[J].植物病理学报,2012,42(4):431-435.

[10] 徐作珽,李林,魏道君,等.大棚辣椒疫病菌的分离培养及药剂防治[J].植物保护,1999,25(2):29-31.

[11] 张世才,熊艳,黄任中,等.重庆地区辣椒疫霉菌的分离培养及生理小种鉴定[J].植物保护,2015,41(3):183-187.

[12] 程亮,温国泉,吴永官,等.广西南瓜疫病的病原分离与鉴定[J].西南农业学报,2014,27(6):2398-2401.