

# 腐殖酸对水培小麦吸收硒酸态硒和亚硒酸态硒的影响

刘亚军, 王大成 (化学应用与污染控制四川省重点实验室, 西华师范大学化学化工学院, 四川南充 637000)

**摘要** [目的]研究腐殖酸对水培小麦吸收硒酸态硒和亚硒酸态硒的影响。[方法]采用水培试验,研究小麦对10~80  $\mu\text{g/L}$  硒酸态硒( $\text{Se}^{6+}$ )及亚硒酸态硒( $\text{Se}^{4+}$ )的吸收和腐殖酸的影响。[结果]小麦对 $\text{Se}^{4+}$ 和 $\text{Se}^{6+}$ 的吸收与其在培养液中的浓度呈线性关系,小麦对 $\text{Se}^{6+}$ 的吸收是 $\text{Se}^{4+}$ 的6.0~10.5倍。腐殖酸促进小麦对 $\text{Se}^{4+}$ 的吸收,平均增加12.1%;但腐殖酸抑制小麦对 $\text{Se}^{6+}$ 的吸收,平均减少18.6%,且随 $\text{Se}^{6+}$ 浓度的增加抑制作用增强。有腐殖酸存在时小麦吸收 $\text{Se}^{6+}$ 是 $\text{Se}^{4+}$ 的4.3~7.4倍;有腐殖酸时 $\text{Se}^{4+}$ 和 $\text{Se}^{6+}$ 促进小麦生长, $\text{Se}^{6+}$ 促进作用更为明显,生物量平均增加12.3%。40和80  $\mu\text{g/L}$   $\text{Se}^{4+}$ 培养小麦地上部分吸收的硒分别为初始加入量的3.76%和3.31%,在这2个浓度下,小麦吸收的 $\text{Se}^{6+}$ 分别为初始加入量的27.2%和27.8%。施用 $\text{Se}^{6+}$ 是 $\text{Se}^{4+}$ 作物利用率的7.2~8.4倍。[结论]可以通过土壤溶液 $\text{Se}^{4+}$ 或 $\text{Se}^{6+}$ 的浓度调控农作物硒含量,应用 $\text{Se}^{6+}$ 更为经济环保。

**关键词** 硒;小麦;腐殖酸;水培

中图分类号 S143.7 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2016)28-0053-04

## Effects of Humic Acid on the Absorption of Selenite and Selenate by Hydroponic Wheat

LIU Ya-jun, WANG Da-cheng (Key Laboratory of Chemical Synthesis and Pollution Control of Sichuan Province, College of Chemistry and Chemical Engineering, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637000)

**Abstract** [Objective] To research the effects of humic acid on the absorption of selenite and selenate by hydroponic wheat. [Method] The absorption of selenite ( $\text{Se}^{4+}$ ) and selenate ( $\text{Se}^{6+}$ ) at 10-80  $\mu\text{g/L}$  by hydroponic wheat was studied under the effect of humic sodium. [Result] The absorptivity of selenite and selenate by wheat was positively correlated with the concentration, the wheat absorbed 6.0-10.5 times more of selenate than that of selenite. Humic sodium increased the absorption of selenite by wheat, which was 12.1% on average. But humic sodium inhibited the absorption of selenate by wheat, which was 18.6% on average. The inhibiting ability increased with the concentration increase of selenate. Wheat absorbed 4.3-7.4 times more selenate than selenite with the adding of humic sodium. Under such condition, both selenite and selenate promoted the growth of wheat. But selenate had more significant promotion effects with the average biomass increase being 12.3%. At the concentrations of 40 and 80  $\mu\text{g/L}$  selenite, shoots absorbed 3.76% and 3.31% selenite of the initially added amount, respectively, and the shoots absorbed 27.2% and 27.8% selenate. The efficiency of selenate applied was 7.2-8.4 times of that selenite. [Conclusion] The selenium content of cereals could be regulated by adjusting the selenite or selenate concentration in soil solution, and the selenate is the better choice in terms of economic and environmental protection.

**Key words** Selenium; Wheat; Humic acid; Hydroponics

硒是动物和人体必需的微量元素<sup>[1]</sup>,缺硒会导致地方性疾病,如大骨节病、克山病等,硒还与人体其他多种疾病有关,如肿瘤、银屑病、肝病、糖尿病、心脏病等<sup>[2]</sup>。中国营养学会建议成人硒摄入量为60~200  $\mu\text{g/d}$ <sup>[3]</sup>,摄入过多会导致中毒。研究表明,人长期食用硒含量高于1 mg/kg的粮食或硒摄入量大于800  $\mu\text{g/d}$ (以指甲变形为限)会引起中毒<sup>[4-5]</sup>。中国营养学会及世界卫生组织(WHO)等机构已确定正常成人硒的最低需求量(以预防克山病发生为限)为17  $\mu\text{g/d}$ (全血硒约0.05  $\mu\text{g/mL}$ ),最高安全摄入量为400  $\mu\text{g/d}$ (全血硒0.6  $\mu\text{g/mL}$ )<sup>[6-7]</sup>。用于富硒农产品生产的是易被植物吸收利用的亚硒酸态硒( $\text{Se}^{4+}$ )和硒酸态硒( $\text{Se}^{6+}$ )。由于硒的营养与毒性之间浓度范围很窄<sup>[8-9]</sup>, $\text{Se}^{6+}$ 易造成植物体内硒含量过高,引起人或动物中毒,实际生产中多施用 $\text{Se}^{4+}$ 调控作物硒含量<sup>[10]</sup>。但植物对 $\text{Se}^{6+}$ 的利用率远大于 $\text{Se}^{4+}$ ,因此,用更低浓度的 $\text{Se}^{6+}$ 可以生产相同硒含量的作物,有利于保护环境和合理利用资源。植物吸收 $\text{Se}^{4+}$ 、 $\text{Se}^{6+}$ 浓度之间的相关关系是生产富硒农产品、改善低硒环境、预防疾病和保障人体健康的科学依据。在大骨节病和克山病病区腐殖酸与硒存在拮抗作用<sup>[11]</sup>,我国从东北到西南是大骨节病和克山病高发带,

其原因之一是病区环境中的腐殖酸对硒有一定的吸附固定作用<sup>[12]</sup>。病区土壤和水环境都以高腐殖酸含量为特征,腐殖酸是影响土壤中硒的植物有效性的主要因素。自然环境下硒的形态、土壤质地、土壤硒含量、土壤有机质含量、土壤pH、Eh、成土母质及土壤中的蛋白质、氨基酸、水溶性氮素、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、土壤腐殖酸含量等都能影响土壤中硒的植物有效性<sup>[13-15]</sup>。因此,特定土壤栽培试验得出的硒的植物有效性结果难以应用于其他土壤类型。而水培条件下小麦对不同浓度 $\text{Se}^{4+}$ 和 $\text{Se}^{6+}$ 的吸收以及腐殖酸对硒的有效性的影响是排除其他因素条件下,植物对硒的吸收数量关系的表达,可作为估算土壤溶液中硒的形态、浓度与作物硒含量之间关系的依据。笔者采用水培试验,研究腐殖酸对水培小麦吸收硒酸态硒和亚硒酸态硒的影响。

## 1 材料与方法

**1.1 试剂与材料** 硝酸、高氯酸、硫酸、氢溴酸(均为优级纯),30%过氧化氢(分析纯), $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ (分析纯)、腐殖酸钠(化学纯,天津市光复精细化工研究所),本地小麦品种,硒含量为0.070 mg/kg。

腐殖酸和腐殖酸钠的结构相似,官能团种类相同(图1),均在3500~3300  $\text{cm}^{-1}$ 处出现—O—H和—N—H的伸缩振动峰,在2960和2870  $\text{cm}^{-1}$ 是甲基— $\text{CH}_3$ 的伸缩振动,在2930和2850  $\text{cm}^{-1}$ 出现亚甲基— $\text{CH}_2$ 的伸缩振动,在1560  $\text{cm}^{-1}$ 是—N—H的弯曲振动,在1380  $\text{cm}^{-1}$ 是甲基的弯

**基金项目** 国家自然科学基金项目“我国典型低硒环境特征与调控研究”(41172326)。

**作者简介** 刘亚军(1990-),女,四川彭州人,硕士研究生,研究方向:环境地球化学。

**收稿日期** 2016-08-17

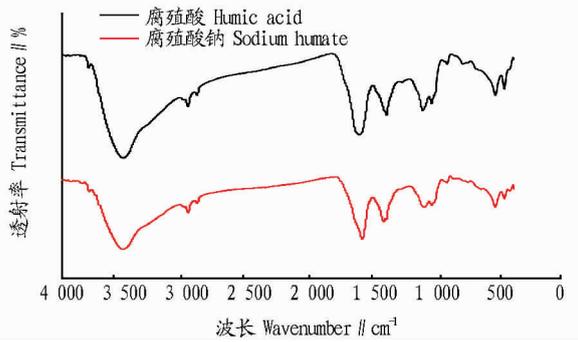


图1 腐殖酸和腐殖酸钠红外谱

Fig. 1 The Fourier transform infrared spectra of humic acid and sodium humate

曲振动,在 $1\ 090\ \text{cm}^{-1}$ 左右出现 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰,在指纹区是烷基的面外振动形式。腐殖酸不溶于水,而腐殖酸钠易溶于水,因此,选择腐殖酸钠进行水培试验。

**1.2 仪器和设备** ICP-MS(NexION 300X,Perkin Elmer),电子分析天平(FA2104,上海舜宇恒平科学仪器有限公司),可调式电热板(ML-2-4,北京中兴伟业仪器有限公司),超纯水机(Master-D,上海和泰仪器有限公司),立式鼓风干燥箱(DGC9140A,上海森信实验仪器有限公司),九阳料理机。

**1.3 试验设计** 水培试验共设11个处理,分别为空白对照, $\text{Se}^{4+}$ 和 $\text{Se}^{6+}$ 浓度分别为10、20、40、60、80  $\mu\text{g/L}$ ,空白和每个浓度各设3个平行。每个处理加入0.5 g/L腐殖酸钠。选取大小均匀、饱满的小麦种子,并用30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ 消毒5 min后用蒸馏水冲洗干净,再放入蒸馏水中浸泡10 h,过滤称重计算种子吸水率,按照干种约35 g称取浸泡后的麦种平铺于双层塑料盘(茶花牌双层茶盘,PP材质,35.5 cm  $\times$  27.0 cm  $\times$  4.5 cm)的上层网孔铺设的棉布上,生长面积为29.0 cm  $\times$  21.5 cm。将配制的2 L培养液加入下层塑料盘,在培养液中浸湿棉布和麦种4~6次/d,在温度20~23  $^{\circ}\text{C}$ 、空气湿度60%~70%下发芽生长,浸湿的棉布可以提供小麦生长所需水分。麦苗培养14 d后收割,分别收取茎和叶并称重,去离子水淋洗后,置于110  $^{\circ}\text{C}$ 的电热鼓风干燥箱中杀青15 min后,调节温度至60  $^{\circ}\text{C}$ ,烘干至恒重,称量干重后用食品加工机磨碎装袋防潮保存。量取剩余培养液的体积,并留样测定硒含量。以国家标准物质小麦(GBW10011)作为质量监控样品,其标准值为(0.053  $\pm$  0.007)mg/kg,实测值为(0.050  $\pm$  0.007)mg/kg。

**1.4 样品硒含量的测定方法** 小麦硒含量测定:准确称取0.100 0 g粉碎的小麦样品,加入2.5 mL去硒硫酸(5%)和5 mL混酸(硝酸:高氯酸=2:1),冷消化过夜。次日于电热板上加热消解,至溶液剩余1.0 mL左右且澄清透明,转移至容量瓶并定容至25 mL,采用ICP-MS(DRC模式, $\text{CH}_4$ 气体)测定硒含量。

培养液硒含量测定方法:准确量取5 mL培养液,加入2.5 mL混酸(硝酸:高氯酸=2:1)于电热板上消解,冷却后加入1 mL  $\text{H}_2\text{O}_2$ 剧烈反应至溶液剩余1.0 mL左右且澄清透明,转移溶液至容量瓶并定容至25 mL,采用ICP-MS测定硒含量。

**1.5 数据分析** 采用Excel软件对试验数据进行分析。

## 2 结果与分析

**2.1 小麦对亚硒酸态硒和硒酸态硒的吸收** 由图2可知,随着 $\text{Se}^{4+}$ 浓度的增加,小麦硒含量逐渐增加。水培14 d收获的空白对照小麦硒含量为0.074 mg/kg。当培养液 $\text{Se}^{4+}$ 浓度为10  $\mu\text{g/L}$ 时,小麦硒含量为0.181 mg/kg。培养液 $\text{Se}^{4+}$ 浓度从20  $\mu\text{g/L}$ 增加到80  $\mu\text{g/L}$ ,小麦硒含量从0.298 mg/kg增加到1.080 mg/kg。 $\text{Se}^{4+}$ 浓度和小麦硒含量呈显著相关( $r=0.996\ 6$ )。

随着 $\text{Se}^{6+}$ 浓度的增加,小麦硒含量逐渐增加。当 $\text{Se}^{6+}$ 浓度为10  $\mu\text{g/L}$ 时,小麦硒含量为1.08 mg/kg,与80  $\mu\text{g/L}$   $\text{Se}^{4+}$ 培养相当。 $\text{Se}^{6+}$ 浓度从20  $\mu\text{g/L}$ 增加到80  $\mu\text{g/L}$ ,小麦硒含量由2.54 mg/kg增加到11.3 mg/kg。 $\text{Se}^{6+}$ 浓度和小麦硒含量呈显著正相关( $r=0.998\ 7$ )。

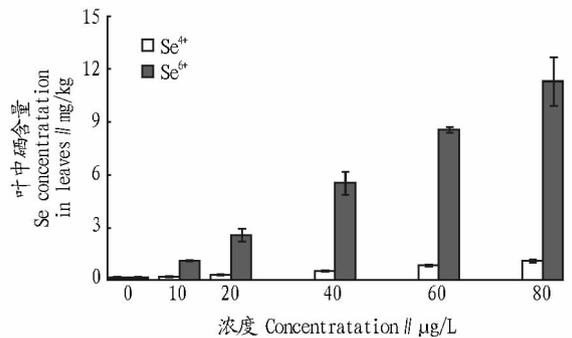


图2 小麦对亚硒酸态硒和硒酸态硒的吸收

Fig. 2 The absorption of selenite and selenate by hydroponic wheat

当培养液硒浓度均为10  $\mu\text{g/L}$ 时,小麦吸收的 $\text{Se}^{6+}$ 是 $\text{Se}^{4+}$ 的6.0倍,在20  $\mu\text{g/L}$ 时是8.5倍,而在40、60和80  $\mu\text{g/L}$ 时分别为10.5倍、10.2倍和10.5倍。研究表明,水培小麦和其他植物对 $\text{Se}^{4+}$ 和 $\text{Se}^{6+}$ 的吸收倍数都在2.0~10.0倍<sup>[14,16-18]</sup>,无论有无营养添加,不同作物吸收 $\text{Se}^{4+}$ 和 $\text{Se}^{6+}$ 的差异趋势相同。

**2.2 腐殖酸对小麦吸收亚硒酸态硒和硒酸态硒的影响** 由图3可知,添加腐殖酸钠的空白对照小麦硒含量为0.023 mg/kg,低于未添加腐殖酸钠的空白对照的0.074 mg/kg。所加腐殖酸钠中硒含量为3.91 mg/kg,其中21.1%为 $\text{Se}^{4+}$ ,10.2%为 $\text{Se}^{6+}$ 。添加0.5 g/L腐殖酸钠相当于添加0.410  $\mu\text{g/L}$   $\text{Se}^{4+}$ 和0.195  $\mu\text{g/L}$   $\text{Se}^{6+}$ 。结果表明这些硒并未被小麦吸收,而是被腐殖酸钠的活性官能团络合固定。

添加腐殖酸钠的各 $\text{Se}^{4+}$ 浓度处理小麦硒含量从10  $\mu\text{g/L}$ 的0.333 mg/kg增加到80  $\mu\text{g/L}$ 的1.200 mg/kg(图3)。与未添加腐殖酸钠相比添加腐殖酸钠小麦对 $\text{Se}^{4+}$ 的吸收明显增加,从1.9%增加到27.8%,平均增加12.1%。当 $\text{Se}^{6+}$ 浓度从10  $\mu\text{g/L}$ 增加到80  $\mu\text{g/L}$ 时,添加腐殖酸钠的小麦硒含量从1.33 mg/kg增加到7.69 mg/kg(图4)。与未添加腐殖酸钠的 $\text{Se}^{6+}$ 培养相比,小麦对 $\text{Se}^{6+}$ 的吸收从浓度20  $\mu\text{g/L}$ 到80  $\mu\text{g/L}$ 减少了9.1%~31.9%,平均减少18.6%,且随着 $\text{Se}^{6+}$ 浓度的增加腐殖酸对小麦吸收 $\text{Se}^{6+}$ 的抑制作用增强。

随着培养时间的增加,腐殖酸的活性官能团与  $\text{Se}^{6+}$  络合成不易被植物吸收的腐殖酸结合态砷,使小麦吸收的  $\text{Se}^{6+}$  减少。

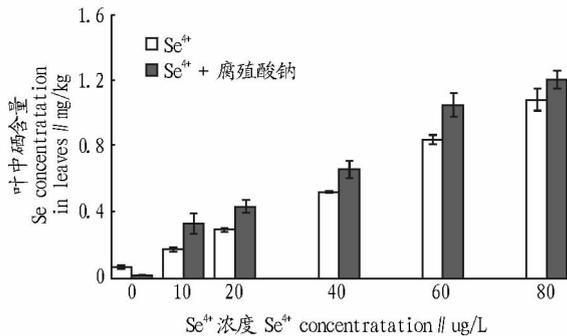


图3 腐殖酸钠对小麦吸收亚砷酸盐砷的影响

Fig. 3 Effects of humic sodium on the absorption of selenite by wheat

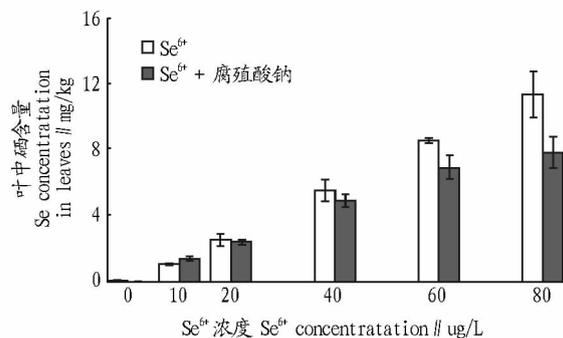


图4 腐殖酸钠对小麦吸收砷酸盐砷的影响

Fig. 4 Effects of sodium humate on the absorption of selenate by wheat

添加腐殖酸的  $\text{Se}^{6+}$  培养小麦硒含量是  $\text{Se}^{4+}$  的 4.3 ~ 7.4 倍,比未加腐殖酸的二者差别(6.0 ~ 10.5)倍小。腐殖酸分子含有活性官能团,能够络合微量元素<sup>[11]</sup>包括  $\text{Se}^{6+}$ 。腐殖酸作为天然氧化还原剂,可以提高溶液中  $\text{Se}^{4+}/\text{Se}^{6+}$  的还原能力,使  $\text{Se}^{6+}$  缓慢转化为  $\text{Se}^{4+}$ <sup>[19]</sup>,从而减少小麦的吸收。

**2.3 砷和腐殖酸对小麦地上部分生物量的影响** 由表 1 可知,小麦地上部分生物量与  $\text{Se}^{4+}$ 、 $\text{Se}^{6+}$  浓度无关。这说明在试验浓度范围内 2 种形态砷均对小麦生长既无促进作用也无毒性反应。添加腐殖酸钠的  $\text{Se}^{4+}$  和  $\text{Se}^{6+}$  培养的小麦生物量均增加,且  $\text{Se}^{6+}$  处理小麦生物量随砷浓度的增加增加更为明显,从空白处理的 6.43 g 增加到 80  $\mu\text{g/L}$  的 7.44 g。

表 1 亚砷酸盐砷和砷酸盐砷对小麦地上部分生物量的影响

Table 1 Effects of selenite and selenate on growth of wheat g

砷浓度 Selenium Concentration $\mu\text{g/L}$	地上部分生物量 Aboveground biomass			
	亚砷酸钠 Selenite	砷酸钠 Selenate	亚砷酸钠 + 腐殖酸钠 Selenite + sodium humate	砷酸钠 + 腐殖酸钠 Selenate + sodium humate
0	6.37	6.37	6.43	6.43
10	6.43	6.36	6.50	7.11
20	6.62	6.34	7.51	7.15
40	6.54	6.22	7.27	7.20
60	6.04	6.43	6.69	7.19
80	6.21	6.27	6.70	7.44

**2.4 小麦吸收水培液中砷的比例** 在试验结束时,40 和 80  $\mu\text{g/L}$   $\text{Se}^{4+}$  培养液剩余的砷分别为 19.5 和 28.2  $\mu\text{g}$ ,在这 2 个培养浓度下,小麦地上部分吸收的砷分别是初始加入量的 3.76% 和 3.31%。试验结束时,40 和 80  $\mu\text{g/L}$   $\text{Se}^{6+}$  培养液剩余的砷分别为 18.10 和 23.41  $\mu\text{g}$ ,在这 2 个培养浓度下,小麦地上部分吸收的砷分别为初始加入量的 27.2% 和 27.8%。施用  $\text{Se}^{6+}$  是  $\text{Se}^{4+}$  作物利用率的 7.2 ~ 8.4 倍。施用  $\text{Se}^{6+}$  农作物吸收比例更高,调控农产品砷含量以  $\text{Se}^{6+}$  为宜。

### 3 结论与讨论

(1) 水培小麦对  $\text{Se}^{4+}$  和  $\text{Se}^{6+}$  的吸收分别与培养液浓度呈线性相关关系;相同浓度下小麦对  $\text{Se}^{6+}$  的吸收是  $\text{Se}^{4+}$  的 6.0 ~ 10.5 倍。植物对  $\text{Se}^{4+}$  的吸收能力远小于  $\text{Se}^{6+}$ ,主要是由于植物对  $\text{Se}^{4+}$  和  $\text{Se}^{6+}$  的吸收机理不同。吸收  $\text{Se}^{4+}$  不需要能量<sup>[18]</sup>,且参与根部新陈代谢,大多留在根部<sup>[20]</sup>;而吸收  $\text{Se}^{6+}$  则需要能量<sup>[21]</sup>,且大部分直接往地上部迁移<sup>[16]</sup>。研究表明,有营养添加时水培小麦吸收  $\text{Se}^{4+}$  和  $\text{Se}^{6+}$  的差别倍数较小,最多 5.8 倍;无营养添加时小麦对  $\text{Se}^{6+}$  的吸收为  $\text{Se}^{4+}$  的 10.5 倍。陈思杨等<sup>[14]</sup>指出土壤环境中阴离子影响植物对砷的吸收,如磷酸根、硫酸根等。缺磷时小麦地上和地下部分砷含量均增加,缺硫时施用  $\text{Se}^{6+}$  小麦地上部分砷含量增加,缺硫时施用  $\text{Se}^{4+}$  地上部分砷含量略减少。该研究水培试验二者倍数关系比有营养添加时大。小麦水培试验可以反映不同植物吸收  $\text{Se}^{4+}$  和  $\text{Se}^{6+}$  的差异。

(2) 腐殖酸促进小麦对  $\text{Se}^{4+}$  的吸收,平均增加 12.1%;但腐殖酸抑制小麦对  $\text{Se}^{6+}$  的吸收,平均减少 18.6%,且随  $\text{Se}^{6+}$  浓度的增加抑制作用增强。添加腐殖酸小麦吸收  $\text{Se}^{6+}$  是  $\text{Se}^{4+}$  的 4.3 ~ 7.4 倍,小于无腐殖酸培养时二者差别。在试验浓度范围内,有无腐殖酸的培养小麦地上部分砷含量均与砷浓度呈显著正相关。可以通过调控砷在土壤溶液中的浓度生产所需砷含量的粮食,而施用  $\text{Se}^{6+}$  可以用所需  $\text{Se}^{4+}$  的 1/4 ~ 1/10 用量达到同样效果。在自然条件下,植物对砷的吸收与土壤环境中阴离子有关,如磷酸根、硫酸根等<sup>[14]</sup>,还与土壤 pH、腐殖酸<sup>[13]</sup>、铁锰氧化物、二氧化硅、高岭土含量<sup>[19]</sup>等有关。土壤栽培小麦对  $\text{Se}^{4+}$  和  $\text{Se}^{6+}$  的吸收以及腐殖酸的影响可以为调控该土壤粮食砷含量的具体技术措施提供理论依据。

(3) 水培小麦生物量与  $\text{Se}^{4+}$  和  $\text{Se}^{6+}$  浓度无关;但有腐殖酸存在条件下  $\text{Se}^{4+}$  和  $\text{Se}^{6+}$  促进小麦生长, $\text{Se}^{6+}$  的促进作用更为明显,平均增加 12.3%。砷是动物和人体必需的微量元素<sup>[1]</sup>,但砷对植物的营养作用至今尚无定论。研究表明,在一定浓度范围内砷能促进马铃薯<sup>[22]</sup>、胡萝卜<sup>[23]</sup>、水稻<sup>[24]</sup>、小白菜<sup>[25]</sup>等作物的生长。但该试验在砷浓度  $\leq 80 \mu\text{g/L}$  无其他营养元素条件下  $\text{Se}^{4+}$  及  $\text{Se}^{6+}$  对小麦地上部分生物量均无显著影响。

(4) 在 40 和 80  $\mu\text{g/L}$   $\text{Se}^{4+}$  培养小麦地上部分吸收的砷分别为初始加入量的 3.76% 和 3.31%,而在这 2 个培养浓度下,小麦地上部分吸收的  $\text{Se}^{6+}$  分别为初始加入量的 27.2% 和 27.8%。施用  $\text{Se}^{6+}$  是  $\text{Se}^{4+}$  作物利用率的 7.2 ~ 8.4 倍。

## 参考文献

- [1] 王强,徐辉碧. 微量元素硒的毒性[J]. 生命的化学,1994(2):34-35.
- [2] 荀黎红,吴丛雅. 低硒与疾病[J]. 国外医学(医学地理分册),2005,26(1):4-7.
- [3] 黄峙. 食品硒源的生物学研究进展[J]. 食品科学,2001,1(5):90-94.
- [4] TAN J A,ZHENG D X,HOU S F,et al. Selenium ecological chemicoecography and endemic Keshan disease and Kaschin-Beck disease in China [C]//COMBS G F JR,SPALLHOLZ J E,LEVANDER O A,et al. Selenium in biology and medicine:Proceedings of the 3rd international symposium on selenium in biology and medicine:Part B. New York: AVI Press, 1987:876.
- [5] 张奇志. 硒与人体健康及富硒食品的开发建议[J]. 广东农工商职业技术学院学报,2009,25(4):79-82.
- [6] 陈亮,李桃. 元素硒与人体健康[J]. 微量元素与健康研究,2004,21(3):58-59.
- [7] 吴正奇,刘建林. 硒的生理保健功能和富硒食品的相关标准[J]. 中国食物与营养,2005(5):43-46.
- [8] BANUELOS G S,LIN Z Q,MORAES M F. Global advances in selenium research from theory to application[C]. Boca Raton,Florida: CRC Press, 2015:5-6.
- [9] SEALE L A,BERRY M J. Selenium in human health and disease[J]. Antioxidants & redox signaling,2011,14(7):1337-1383.
- [10] 管凌飞. 富硒植物中硒的形态分析研究[D]. 成都:成都理工大学,2007.
- [11] 韩立新,曾完成. 腐植酸与硒[J]. 腐植酸,2009(5):42-44.
- [12] 王予健,彭斌,彭安. 大骨节病区水土中有机物对硒存在形态和生物有利[J]. 环境科学,1991(4):86-89.
- [13] 陈铭,刘更另. 高等植物的硒营养及在食物链中的作用(二)[J]. 土壤通报,1996(4):185-188.
- [14] 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,2011,32(1):284-289.
- [15] 徐文. 硒的生物有效性及植物对硒的吸收[J]. 安徽农学通报,2009,15(23):46-47.
- [16] HOPPER J L,PARKER D R. Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulfate[J]. Plant & soil, 1999,210(2):199-207.
- [17] 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.
- [18] SHRIFT A,ULRICH J M. Transport of selenate and selenite into astragalus roots[J]. Plant physiology,1969,44(6):893-896.
- [19] 徐朗秋,彭安. 腐植酸对硒环境化学行为及其生物效应的影响[J]. 中国科学院大学学报,1986(2):111-117.
- [20] ZAYED A,LYTLE C M,TERRY N. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants [J]. Planta, 1998,206(2):284-292.
- [21] SMITH F W,HAWKESFORD M J,EALING P M,et al. Regulation of expression of a cDNA from barley roots encoding a high affinity sulphate transporter[J]. Plant journal for cell & molecular biology,1997,12(4):875-884.
- [22] 殷金岩,耿增超,孟令军,等. 不同硒肥对马铃薯产量、硒含量及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2012(9):122-127.
- [23] 王晋民,赵之重,李国荣. 硒对胡萝卜含硒量、产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(2):240-244.
- [24] 周文美. 硒对水稻生长,根系活性及籽粒性状的影响[J]. 贵州农业科学,1990(5):29-32.
- [25] 薛瑞玲,梁东丽,王松山,等. 外源亚硒酸盐和硒酸盐在土壤中的价态转化及其生物有效性[J]. 环境科学,2011,32(6):1726-1733.

(上接第20页)

## 参考文献

- [1] 魏佳. 新疆阿尔泰山和天山地区岩画调查与研究[D]. 西安:西北大学,2014.
- [2] 颜琦,刘新平,张洁,等. 阿勒泰市农业与牧业协调发展综合评价研究[J]. 湖北农业科学,2013(17):4294-4299.
- [3] 付爱良,杨刚,郑晓红,等. 新疆荒漠草地退化的原因分析与修复对策讨论[J]. 草食家畜,2009(1):6-7.
- [4] 玛哈巴丽·朱满,安沙舟,靳瑰丽,等. 天山北坡中段家庭牧场典型牧户草场植被特征分析[J]. 新疆农业科学,2013,50(9):1675-1685.
- [5] 王德利,吕新龙,罗卫东. 不同放牧密度对草原植被特征的影响分析[J]. 草原学报,1998,5(3):28-33.
- [6] 段疆风,张平. 建设人工饲草料基地保护和改善天然草场[J]. 新疆水利,2006(6):39-41.
- [7] 农垦部赴内蒙古农牧场调查组. 内蒙农牧场提高生产经营水平的几个问题[J]. 中国农垦,1980(4):2-4.
- [8] 包和平. 玉米生育期的划分及注意事项[J]. 吉林农业,2010(20):21-22.