

无机硒肥对土壤有效氮含量及菠菜品质的影响

史雅静¹, 史雅娟^{2*}, 王玉荣¹, 王慧敏¹, 秦礼凯¹

(1 辽宁科技学院生物医药与化学工程学院/辽宁省生物医药与化学工程重点实验室, 辽宁本溪 117004;

2 中国科学院生态环境研究中心/城市与区域国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:【目的】研究不同浓度亚硒酸钠(Na_2SeO_3)对土壤脲酶活性、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量及菠菜品质的影响,综合分析 Na_2SeO_3 在土壤-根部-作物之间被吸收、转运、转化的可能路径,为生物强化生产富硒农产品及调控硒的安全水平提供参考。【方法】进行连续42天盆栽试验,共设置4个处理,每千克土施 Na_2SeO_3 0(对照)、1、10、30 mg,分别于定植后的14、28、42天测定菠菜叶可溶性糖、可溶性蛋白、维生素C、硝酸盐含量,并测定土壤铵态氮、硝态氮含量及土壤脲酶活性等指标。【结果】在菠菜生长期间, ≤ 10 mg/kg Na_2SeO_3 处理可使土壤脲酶活性表现为先被激活后减弱至对照水平,土壤硝态氮含量也表现出相同的变化趋势,但铵态氮变化趋势正好相反;30 mg/kg Na_2SeO_3 处理对土壤脲酶活性没有明显的影响,在整个培养时期与对照水平相当,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量后期明显减少,转化成的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量明显增加,有利于菠菜吸收利用。同等 Na_2SeO_3 添加量条件下, Na_2SeO_3 对三个取样时间菠菜叶的硝酸盐、维生素C(Vc)、可溶性蛋白、可溶性糖含量影响各异。1 mg/kg Na_2SeO_3 处理组可使菠菜叶的硝酸盐含量明显增加,Vc含量先增后减,可溶性蛋白含量减少,可溶性糖含量没有变化;10 mg/kg处理组可使菠菜叶中的硝酸盐、可溶性糖含量表现为先增后减,Vc含量、可溶性蛋白含量均有不同程度增加;30 mg/kg处理组可使菠菜叶的硝酸盐含量先增后减,可溶性蛋白、可溶性糖含量减少,Vc含量没有变化。【结论】不同浓度亚硒酸钠对土壤有效氮及菠菜品质有不同程度的影响。富硒作物生产中无机硒肥施用量要综合考虑硒在作物体内的转化率及硒对作物品质影响的各项因素而确定。

关键词: 亚硒酸钠;菠菜;铵态氮;硝态氮;品质

Effects of inorganic selenium fertilizer on available nitrogen content in soil and spinach quality

SHI Ya-jing¹, SHI Ya-juan^{2*}, WANG Yu-rong¹, WANG Hui-min¹, QIN Li-kai¹

(1 School of Biomedical and Chemical Engineering/Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi, Liaoning 117004, China;

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology/Research Center for Eco-Environmental Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract:【Objectives】The effects of different concentrations of Na_2SeO_3 on soil ammonium and nitrate nitrogen contents and spinach quality were studied. The possible pathways for Na_2SeO_3 to be absorbed, transported and transformed among soil-root-crop were comprehensive analyzed. It will provided reference for bio-enhanced production of selenium-rich agricultural products and regulation of selenium safety level.

【Methods】A pot experiment were conducted using spinach. Four treatments of control (without Na_2SeO_3) and 1, 10, 30 mg/kg Na_2SeO_3 were applied to potted soil. Soluble sugar, soluble protein, vitamin C and nitrate contents in spinach leaves were determined at 14, 28 and 42 days after planting, respectively. The contents of $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and urease activity in soil were determined.【Results】At the low dosage (< 10 mg/kg) of Na_2SeO_3 treatments, the soil urease activity was activated first and then decreased to the control level during the spinach growing period, soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content showed the same trend with the enzyme activity, while $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content showed the opposite trend. High dosage (30 mg/kg) Na_2SeO_3 treatment had no significant effect on soil urease

收稿日期: 2018-08-28 接受日期: 2018-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671483)资助。

联系方式: 史雅娟 E-mail: 921083771@qq.com; *通信作者 史雅娟 E-mail: yajuanshi@rcees.ac.cn

activity, and all of them were at the control level. The $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents in soil decreased obviously in the later period, and the $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content increased obviously, which was more favorite of the N absorption by spinach. Under the same concentration, Na_2SeO_3 had different effects on the contents of nitrate, vitamin C, soluble protein and soluble sugar in spinach leaves. In the 1 mg/kg treatment groups, the nitrate content was increased significantly, the content of Vc increased first and then decreased, the content of soluble protein decreased first and then recovered, and the content of soluble sugar did not change. In the 10 mg/kg treatment groups, the content of nitrate and soluble sugar increased first and then decreased to the control level, while the content of Vc and soluble protein increased in varying degrees. In the 30 mg/kg treatment groups, the nitrate content of spinach leaves increased first and then decreased, the content of soluble protein and soluble sugar decreased, the content of Vc remained unchanged at the later stage. 【Conclusions】 Under the experimental condition, low dosage of Na_2SeO_3 could stimulate the nitrogen supply in the early growing stage of plants, but not has significant effect on the later nutrient supply and leaf quality of spinach. Relatively high dosage could improve the availability of soil nitrogen and favorite the formation of good quality of spinach. The application rate of inorganic selenium fertilizer in selenium-enriched crop production should be determined by considering comprehensively the conversion rate of selenium in crop and the various factors affecting crop quality.

Key words: sodium selenite; spinach; nitrate nitrogen; ammonium nitrogen; quality

硒被公认为人类和动物必需的微量营养素, 具有防癌抗癌、清除体内自由基、抗衰老等多种功能^[1-2], 据估计全球约有 10 亿人口硒摄入量不足^[3]。因此, 适量补硒是增强人体健康、防治疾病和延年益寿的有效措施, 而食用富硒植物吸收硒元素仍然是人体补硒的有效途径^[4-6]。生产上常用亚硒酸钠 (Na_2SeO_3) 作为富硒植物的无机硒肥, 施加的剂量因施肥方式不同而异。有研究显示, 采用喷施、浸泡作物等方式施肥的 Na_2SeO_3 浓度一般在 2~15 mg/kg 范围^[7-8], 土壤中施 Na_2SeO_3 浓度一般在 0.25~5 mg/kg 范围^[9-10]。多年来, 在富硒生产中人们更多关注的是植物从根部、叶面将外源硒吸收转化为可食部分的转化率, 这决定了作物的富硒效果^[7, 11-13], 并成为富硒生产的关键, 而在硒肥对富硒作物其他营养品质的影响方面关注却较少。

目前, 国内外学者已开展了 Na_2SeO_3 对土壤中微生物代谢能力, 植物吸收、转运硒、促进作物生长能力等方面的研究^[7, 14-17], 认为施加适量 Na_2SeO_3 对土壤酶活性、微生物的数量会产生一定影响, 可以促进植物生长发育, 进而提高作物产量^[4, 18-20]。但 Na_2SeO_3 对土壤氮素代谢影响研究还不够完善, 并且缺少 Na_2SeO_3 在土壤中被根部吸收并转化为作物品质的路径的综合分析。因此, 本研究选取常见蔬菜—菠菜作为栽培植物, 选用 3 个与富硒生产接近的 Na_2SeO_3 浓度, 研究不同浓度 Na_2SeO_3 对土壤有效氮含量、脲酶活性, 以及菠菜硝酸盐、维生素 C、

可溶性蛋白、可溶性糖含量等指标的影响, 综合分析 Na_2SeO_3 在土壤中被根部吸收、转化的可能路径, 为生物强化生产富硒农产品及调控硒的安全水平提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试菠菜 (*Spinacia oleracea* L.) 为小尖叶本地土菠菜, 青县艾森蔬菜良种推广中心生产。

供试土壤采自山东省淄博市清洁自然土壤, 以多点取样法采集表层 0—30 cm 深的土壤, 自然风干, 研磨后过 2 mm 筛。土壤基本理化性质为 pH 值 7.34, 粘粒 28.9%, 有机质含量 5.73 g/kg, 全氮含量 0.650 g/kg, 总硒含量 0.790 mg/kg。

供试有机肥 (总氮 0.86%, 有机碳 73.12%) 主要为通过赤子爱胜蚓 (*Eisenia foetida*) 处理有机固体废弃物 (秸秆: 菇渣: 牛粪=3: 2: 1) 后制成的蚓粪有机肥。

供试亚硒酸钠 (Na_2SeO_3) (分析纯, 纯度 > 98%) 为沈阳化学试剂厂生产。

1.2 试验设计

采用盆栽试验, 设 4 个处理为每千克土施用亚硒酸钠 0 (CK)、1、10、30 mg, 每个处理 10 个重复。具体试验方法为: 选择内径 18 cm、深度 15 cm 的塑料盆, 将不同浓度的 Na_2SeO_3 用去离子水配成溶

液后加入土中充分拌匀,每盆装土 1.5 kg,均施入有机肥 50 g 作为底肥,每盆播种 40 粒种子,5 天出苗,7 天后间苗至 10 株,14 天后每盆定植 5 株,并置于人工气候箱中培养(相对湿度 60%,温度 20℃,光照/黑暗各 12 h),分别于定植后的第 14、28、42 天每个处理随机取 4 盆,测定其菠菜叶中可溶性糖、可溶性蛋白、Vc、硝酸盐含量及土壤铵态氮、硝态氮的含量、脲酶活性等指标。

1.3 测定方法

土壤 pH 采用水土 1:10 浸提, pH 计测定;粘粒含量用激光粒度仪测定;土壤有机质用重铬酸钾容量法;全氮用凯氏定氮法; NH_4^+ -N 含量采用靛酚蓝比色法; NO_3^- -N 含量采用紫外分光光度法(双波长法);脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法; Vc (鲜样) 含量采用 2, 6-二氯酚靛酚比色法;还原糖(鲜样) 含量采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法;可溶性蛋白(鲜样) 含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法;硝酸盐(鲜样) 含量采用紫外吸收法。

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2016 软件对数据进行处理和作图;运用 SPSS19.0 统计软件中单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差异(LSD)分析不同处理间的差异显著性($\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同浓度的 Na_2SeO_3 处理对土壤脲酶活性的影响

如图 1 所示,培养初期(14 天),低剂量(≤ 10 mg/kg)的 Na_2SeO_3 处理,可使土壤脲酶活性较对照明显增加($P < 0.05$),30 mg/kg Na_2SeO_3 处理组的土壤脲酶活性没有明显变化,处于对照水平。培养到中期(28 天)时,除了 10 mg/kg Na_2SeO_3 处理组的土壤脲酶活性较对照有明显增加以外,其余各处理均没有明显变化。培养进入到后期, Na_2SeO_3 各处理组的土壤酶活性较对照均没有明显变化($P > 0.05$)。可见低浓度 Na_2SeO_3 对土壤脲酶活性有一定影响,较高浓度对其没有影响。

2.2 不同浓度的 Na_2SeO_3 处理对土壤有效氮含量的影响

2.2.1 不同浓度的 Na_2SeO_3 处理对土壤 NO_3^- -N 含量的影响 图 2 表明,1 mg/kg 和 30 mg/kg Na_2SeO_3 处理组在整个培养期内均使土壤 NO_3^- -N 含量明显增

加,到后期(42 天)均有下降趋势,但仍然高于 CK 处理组,具有显著性差异($P < 0.05$),其中在 28 天时 1 mg/kg Na_2SeO_3 处理组较 CK 提高了 75%,达到最大值;而 10 mg/kg Na_2SeO_3 处理组对土壤的 NO_3^- -N 含量影响,在培养初期(14 天)略有增加($P < 0.05$),到中后期(28 天、42 天)硝态氮含量下降至对照水平,差异不显著($P > 0.05$)。可见不同浓度的 Na_2SeO_3 对土壤 NO_3^- -N 含量影响不同。

2.2.2 Na_2SeO_3 对土壤 NH_4^+ -N 含量的影响 如图 3 所示,1 mg/kg 和 30 mg/kg Na_2SeO_3 处理组在整个培养过程中对土壤 NH_4^+ -N 含量影响表现为降低或接近对照水平,而 10 mg/kg Na_2SeO_3 处理组的土壤 NH_4^+ -N 含量,随着暴露时间的增加表现为逐渐下降趋势,

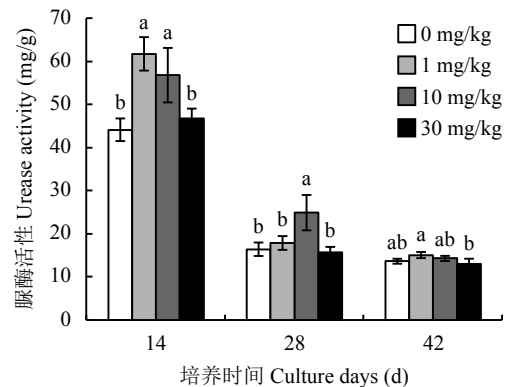


图 1 不同浓度亚硒酸钠处理土壤脲酶活性

Fig. 1 Urease activity in soil treated different concentrations of Na_2SeO_3

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments $P < 0.05$.]

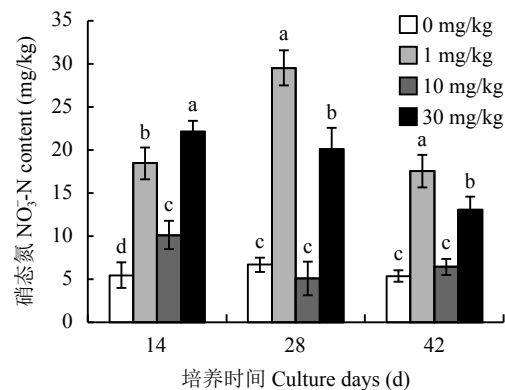


图 2 不同浓度 Na_2SeO_3 处理土壤硝态氮含量

Fig. 2 NO_3^- -N content in soil treated with different concentrations of Na_2SeO_3

[注 (Note): 方柱上不同小写字母表示处理间差异显著 Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments $P < 0.05$.]

但均明显高于 CK 处理组 ($P < 0.05$)。可见, 适量浓度的 Na_2SeO_3 可以使土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量增加。

2.2.3 Na_2SeO_3 对土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比的影响

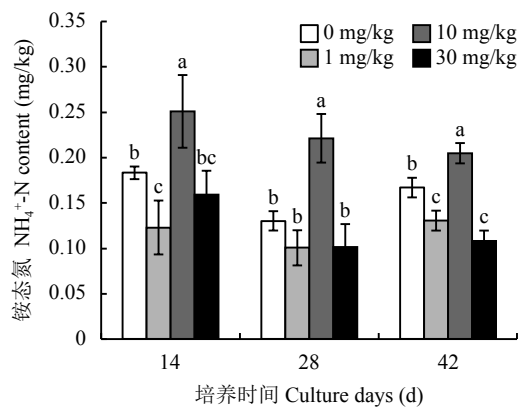


图 3 不同浓度 Na_2SeO_3 处理土壤铵态氮含量
Fig. 3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in soil treated with different concentrations of Na_2SeO_3

[注 (Note): 方柱上不同小写字母表示处理间差异显著 Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.]

同 Na_2SeO_3 处理不仅影响土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量, 而且会影响到 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比值, 同时也将影响到作物硝酸盐含量的变化。

由表 1 可知, 1 mg/kg 和 30 mg/kg Na_2SeO_3 处理组在整个培养期内 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比值呈下降趋势, 且均高于 CK 处理, 而且在 14 天时, $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比值均 > 1 , 说明在培养初期土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占优势, 后期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量逐渐增加, 使 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比值逐渐减少; 10 mg/kg 处理组在整个培养期内 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比值均在对照水平上下波动, 说明土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之间转化速度接近对照水平。

2.3 不同浓度的 Na_2SeO_3 处理对菠菜品质的影响

2.3.1 不同浓度的 Na_2SeO_3 处理对菠菜硝酸盐含量的影响

如图 4 所示, 1 mg/kg Na_2SeO_3 处理组在整个培养过程中, 可使菠菜中的硝酸盐含量较 CK 明显增加, 差异显著 ($P < 0.05$)。10 mg/kg Na_2SeO_3 处理组菠菜硝酸盐含量, 培养初期 (14 天) 略有增加 ($P < 0.05$), 中后期 (28 天、42 天) 均在对照水平 ($P >$

表 1 不同浓度 Na_2SeO_3 对土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比值的影响

Table 1 Effect of different concentrations of Na_2SeO_3 on $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ ratios in soil

Na_2SeO_3 (mg/kg)	14 d			28 d			42 d		
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/kg)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/kg)	$\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/kg)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/kg)	$\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/kg)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/kg)	$\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$
0	54.86	183.02	0.30	6.68	130.11	0.05	5.38	166.78	0.03
1	184.68	122.80	1.50	29.57	100.38	0.29	17.57	130.38	0.13
10	101.51	250.73	0.40	5.10	221.10	0.02	6.43	204.64	0.03
30	221.46	158.76	1.39	20.12	101.41	0.20	13.12	108.08	0.12

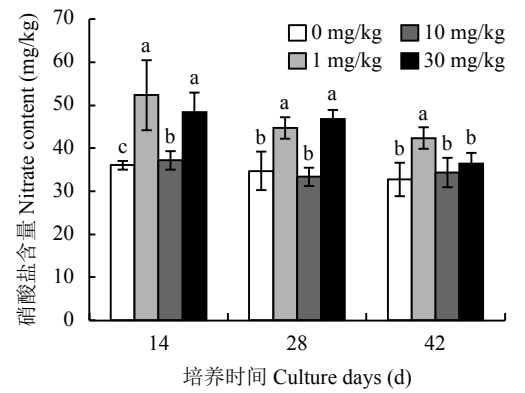


图 4 不同浓度 Na_2SeO_3 处理菠菜硝酸盐含量
Fig. 4 Nitrate content in spinach leaves in soils treated with different concentrations of Na_2SeO_3

[注 (Note): 方柱上不同小写字母表示处理间差异显著 Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.]

0.05)。30 mg/kg Na_2SeO_3 处理组在整个培养过程中, 菠菜叶中硝酸盐含量表现为初期 (14 天) 和中期 (28 天) 明显高于对照 ($P < 0.05$), 但是到后期 (42 天) 下降接近对照水平 ($P > 0.05$)。

2.3.2 不同浓度的 Na_2SeO_3 处理对菠菜可溶性蛋白含量的影响

从图 5 可以看出, Na_2SeO_3 对菠菜可溶性蛋白含量的影响, 随着培养时间的延长整体上表现为上升趋势, 但不同浓度的 Na_2SeO_3 处理对菠菜可溶性蛋白含量影响略有不同。其中 1 mg/kg Na_2SeO_3 处理组在整个培养过程中, 对菠菜可溶性蛋白含量影响表现为先降低后恢复到对照水平的趋势; 10 mg/kg Na_2SeO_3 处理组对可溶性蛋白含量影响较对照均有明显的增加, 差异显著 ($P < 0.05$); 30 mg/kg Na_2SeO_3 处理组可溶性蛋白含量则表现降低—恢复—降低的趋势。

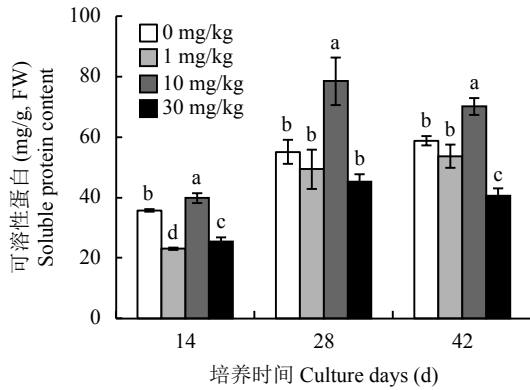


图5 不同浓度 Na_2SeO_3 处理菠菜可溶性蛋白含量

Fig. 5 Soluble protein content in spinach leaves in soil treated with different concentrations of Na_2SeO_3

[注 (Note): 方柱上不同小写字母表示处理间差异显著 Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.]

2.3.3 不同浓度的 Na_2SeO_3 处理对菠菜 Vc 含量的影响 从图6可以看出, 不同浓度的 Na_2SeO_3 处理对菠菜 Vc 含量的影响不同。1 mg/kg Na_2SeO_3 处理组菠菜 Vc 含量在培养初期明显增加 ($P < 0.05$), 中后期均在对照水平 ($P > 0.05$); 10 mg/kg Na_2SeO_3 处理组使菠菜 Vc 含量增加明显 ($P < 0.05$); 30 mg/kg Na_2SeO_3 处理组菠菜 Vc 含量较对照均没有变化 ($P > 0.05$)。

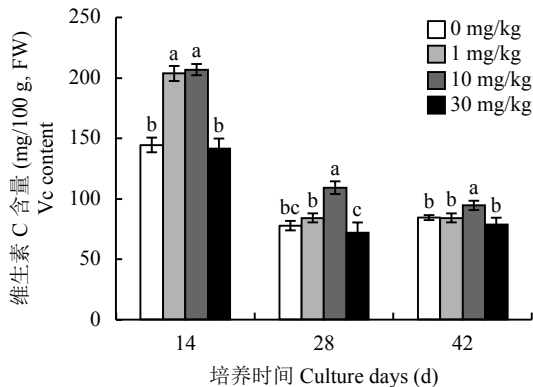


图6 不同浓度 Na_2SeO_3 处理菠菜 Vc 含量

Fig. 6 Vc content in spinach leaves in soil treated with different concentrations of Na_2SeO_3

[注 (Note): 方柱上不同小写字母表示处理间差异显著 Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.]

2.3.4 不同浓度的 Na_2SeO_3 处理对菠菜可溶性糖含量的影响 从图7可知, 与对照相比, 除了 10 mg/kg Na_2SeO_3 处理组在 28 天内菠菜可溶性糖明显增加和 30 mg/kg 处理组在培养后期 (42 天) 菠菜可溶性糖明

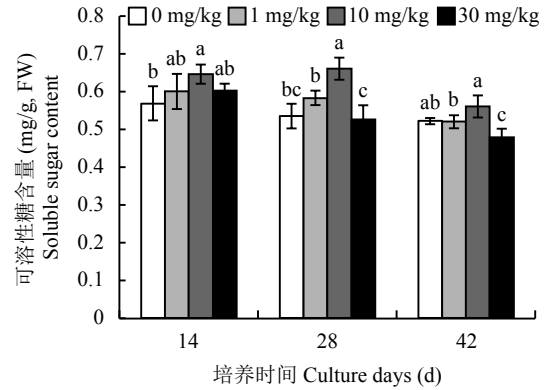


图7 不同浓度 Na_2SeO_3 处理菠菜可溶性糖含量

Fig. 7 Soluble sugar content in spinach leaves in soil treated with different concentrations of Na_2SeO_3

[注 (Note): 方柱上不同小写字母表示处理间差异显著 Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.]

显减少以外 ($P < 0.05$), 其余各处理对菠菜可溶性糖含量影响不大 ($P > 0.05$)。

2.3.5 Na_2SeO_3 对土壤有效氮含量及菠菜品质影响路径分析 Na_2SeO_3 是水溶性的, 是植物的重要硒源。 Na_2SeO_3 进入土壤在根部—作物之间被吸收、转运、转化的路径如图8所示。

当 Na_2SeO_3 被施入土壤内, 一种路径是其通过影响土壤酶系统, 进而影响土壤的氮素代谢, 最终反映在土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的变化上^[21]; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是植物吸收的主要 N 素形态, 进入根细胞内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 直接参与含 N 化合物的合成, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 一部分贮存在液泡, 或者进入质体在硝酸还原酶 (NR) 作用下, 形成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 参与含 N 化合物的合成。根细胞中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在导管中随蒸腾流到达叶肉细胞内, 分布于细胞的液泡和原生质体中, 由于 NR 主要存在于原生质中, 其中的 NR 可以迅速还原, 不易积累; 而液泡中的 NR 活性低, 硝酸盐主要起渗透调节作用, 难以被还原利用, 因而易被累积^[22], 进而影响到蔬菜的安全品质。同时 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在原生质和叶绿体内均可以转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 为蛋白质、叶绿素等含氮化合物的合成提供原料, 并且间接影响到光合作用的产物可溶性糖和 Vc 含量变化。

另一条路径是 Na_2SeO_3 进入土壤直接被根部吸收, 进入作物体内发生形态上转化, 直接或间接参与蛋白质的合成。有研究表明, Na_2SeO_3 通过磷酸盐转运子进入根部, 进入根部后可转化为硒酸盐和其他硒化物向地上部分运输到叶片, 再由无机硒转化为有机硒, 一方面有机硒非特异性参与蛋白质合

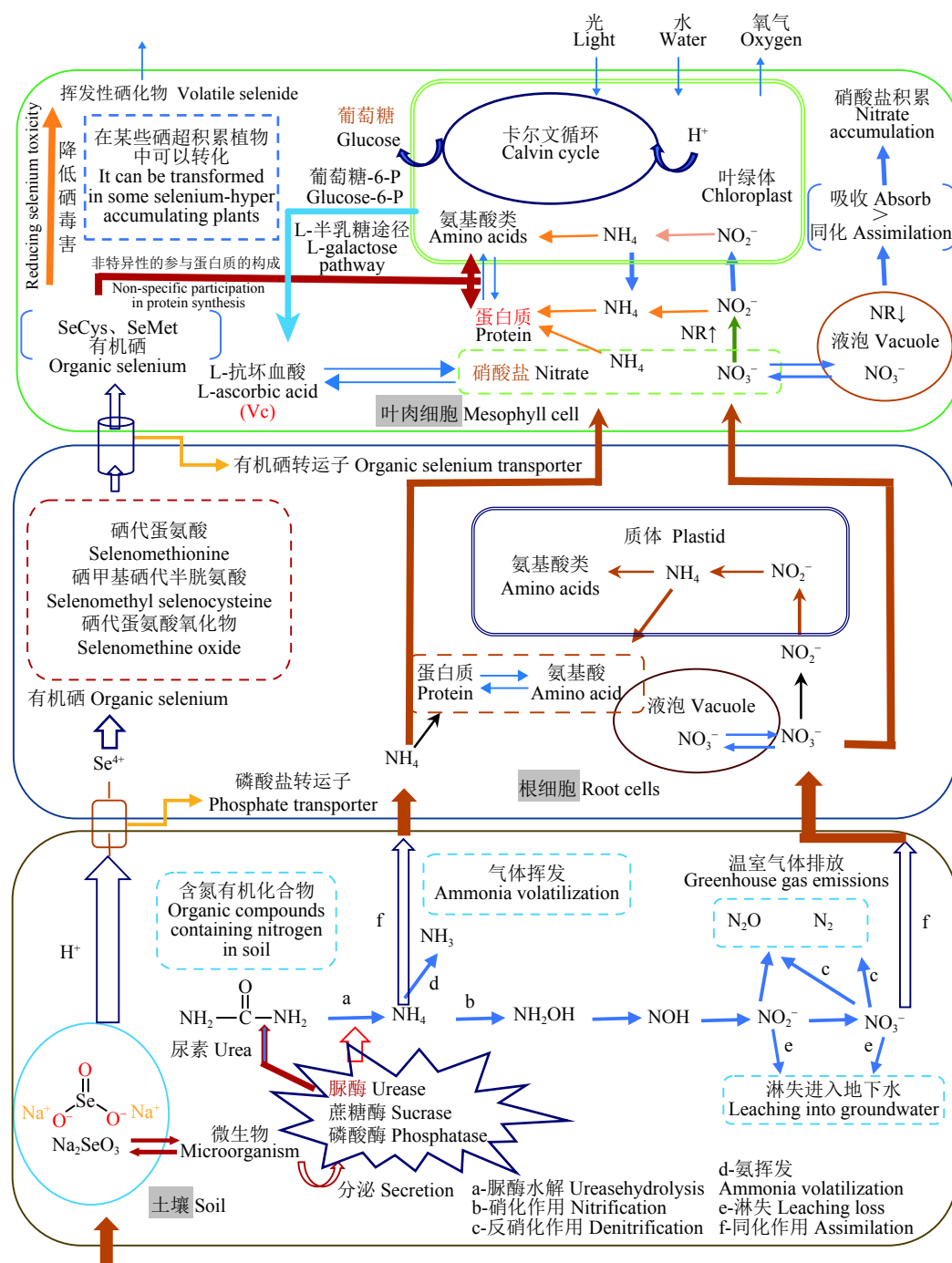


图 8 亚硒酸钠对土壤有效氮含量及作物品质影响路径

Fig. 8 Pathway of the effect of Na_2SeO_3 on soil available nitrogen content and crop quality

成, 影响作物蛋白含量变化。另一方面在某些硒超积累植物中可以转化为挥发性硒化物, 从而降低硒与蛋白的结合, 达到降低硒毒害的作用用^[11]。

综合分析 Na_2SeO_3 在土壤中被根部吸收并转化为作物品质的路径可以看出, 不同浓度 Na_2SeO_3 不仅对土壤脲酶、有效态氮含量及其 $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ -N 比有一定的影响, 而且也影响作物从根部、叶面将外源硒吸收转化为可食部分的转化率^[9, 12, 14], 同时作物品质

也随着发生不同程度的变化。有试验表明, 低浓度 (1.095 mg/kg) 亚硒酸钠处理的作物中硒含量明显高于对照组^[9], 而本试验显示, 相似剂量亚硒酸钠处理条件下, 作物各项营养指标品质含量有不同程度变化, 如 1 mg/kg Na_2SeO_3 处理组可使菠菜叶的硝酸盐含量明显增加, Vc 含量先增后减, 可溶性蛋白含量减少, 可溶性糖含量没有变化。可见硒在植物体内转化率与硒对作物品质影响之间没有明显的相关性。

3 讨论

土壤中一切生化过程都是在酶的参与下进行的,土壤酶活性直接影响着土壤有效养分的释放,其中脲酶是土壤氮素循环中的关键酶之一,也是专一水解尿素的酰胺酶,其活性高低在一定程度上反映了土壤氮素水平状况和植物有效氮源的利用^[23]。土壤中氮素的形态可分为有机态氮和无机态氮两大类。土壤中的氮绝大部分以有机态形式存在,大多数是不能直接被作物吸收利用的含氮化合物,它们需经微生物分解转变为无机态氮后才能为作物利用^[24]。无机态氮主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 形式存在,它们是植物从土壤中直接吸收利用的主要氮形态^[25],其含量受诸多因素的影响,如土壤温度、水分、理化性质、有机、无机肥的施用等^[26]。本研究发现,低剂量 ($\leq 10 \text{ mg/kg}$) 的 Na_2SeO_3 处理下土壤脲酶活性表现为先被激活后减弱至对照水平的变化趋势。土壤硝态氮含量也表现出相同的变化趋势,而铵态氮与硝态氮含量变化趋势正好相反。可能是由于低剂量的亚硒酸钠在土壤微生物的作用下能被微生物分解、利用,有利于微生物的生长,促进土壤中细菌、真菌和放线菌等微生物数量增加,而微生物数量的增加有助于土壤酶的合成与分泌,导致脲酶活性增加^[15],使脲酶水解产物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不断转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量不断增加,铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量变化不明显。但随着培养时间的延长,大部分的 Na_2SeO_3 被微生物分解完成,微生物可利用的有效态减少,致使微生物的数量减少,同时未被同化的 Na_2SeO_3 一是可能被植物根部直接吸收,二是可能被土壤吸附,与有机物和碳酸盐、铁锰氧化物结合,从而降低其有效性,因此导致后期脲酶活性减弱^[27]。而较高剂量 (30 mg/kg) Na_2SeO_3 处理对细菌和真菌数量有降低作用,减少了菌体的合成和分泌^[15],导致土壤脲酶活性减弱。蔬菜生长过程中又不断产生根系分泌物进入土壤中,使根际微生物的数量发生变化^[28],致使土壤脲酶活性减弱不明显,产生的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在后期由于转化成大量 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 供植物吸收利用,使土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较少。

不同浓度 Na_2SeO_3 不仅对土壤酶活性、有效态氮含量及其 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比有一定的影响,而且也影响菠菜的品质。

硝酸盐含量高低是衡量蔬菜安全品质好坏的一个重要指标,而菠菜属于硝酸盐高累积蔬菜之一^[29-30]。硝酸盐在植物体内的积累是一个氮素在植物体内吸

收转化与积累的过程,基质中铵态氮和硝态氮的比例是决定硝酸盐含量的重要因素^[31]。本研究显示,1、30 mg/kg Na_2SeO_3 处理组可使菠菜中的硝酸盐含量较对照有不同程度增加。可能是由于其 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比值均高于对照,而且土壤中硝态氮占的比例高,如果植物吸收的硝态氮的速率大于同化的速率,硝态氮会在植物体内积累,硝酸盐含量也相应增加^[32]。而 10 mg/kg Na_2SeO_3 处理组菠菜硝酸盐含量增加很少,或接近对照水平,可能是由于初期 (14 d) 的 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比值略高于对照,而中后期的 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比值接近或略低于对照,当铵态氮占优势时,植物硝酸盐含量下降。因为铵态氮被植物吸收后,立即参与合成作用,而硝态氮被植物吸收后要先还原成铵态氮后才能参与合成过程,此还原过程需耗能且需有相应的酶系统参与^[31]。

可溶性蛋白是构成果蔬中酶的重要组成部分,参与多种生理生化代谢过程的调控,与果蔬的生长发育、成熟衰老和抗性密切相关^[33-34]。有研究表明,喷施亚硒酸钠可使苦苣中可溶性蛋白含量表现为降低-升高-降低的变化趋势^[35]。本研究在 1、30 mg/kg Na_2SeO_3 处理组的可溶性蛋白含量也表现出相似的变化趋势。可能的原因是 Na_2SeO_3 供给植物后,在根部被吸收并转化为硒酸盐和其它硒化物向地上部运输至叶片,并由无机硒转化为有机硒,非特异性的参与蛋白质的合成,这一转化速度小于根吸收过程,因此在根内常积累一定量的硒^[36],表现为土壤脲酶活性受到不同程度的影响,土壤有效氮也随之变化,而有效氮被植物吸收进入叶肉细胞以后, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在原质体和叶绿体内均可以转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,为蛋白质的合成提供原料。并且通过本试验发现在 10 mg/kg 处理组对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响大于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占优势,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被植物吸收后,立即参与合成作用,致使可溶性蛋白含量增加^[31]。

Vc 又称抗坏血酸,是一种普遍存在于植物组织的抗氧化物质^[37],主要利用光和产物葡萄糖-6-磷酸为原料通过 L-半乳糖途径在线粒体中合成的^[38-39]。 Na_2SeO_3 通过影响土壤的有效氮含量变化,间接影响到光合作用产物 Vc 含量的变化。有研究表明,适量硒肥可以提高番茄、菠菜等作物的 Vc 含量^[32, 40]。本研究中 10 mg/kg Na_2SeO_3 处理组使菠菜 Vc 含量增加明显,这也证实了这一结论。可能原因是由于硒能够提高植株中硒蛋白的含量,从而减轻植株细胞内过氧化氢和脂质过氧化物对 Vc 的氧化作用^[19, 41]。另外,10 mg/kg Na_2SeO_3 处理组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量增加明

显, 可以为蛋白质和叶绿素等含氮化合物的合成提供更多原料, 从而间接影响与光合产物相关的 Vc 含量的变化。

可溶性糖是植物的光合产物^[42], 也是碳水化合物代谢和短暂贮藏的主要形式, 对高等植物生长发育及生殖有重要影响^[43]。有研究表明, 用适量的 Na_2SeO_3 处理可使苹果、苦苣等果蔬的可溶性糖含量增加^[35, 44]。本试验中 10 mg/kg Na_2SeO_3 处理组 28 d 内菠菜可溶性糖含量变化也显示同样的结果。可能原因是由于 Na_2SeO_3 处理使土壤中的铵态氮含量占优势, 植物吸收后为叶绿素提供原料, 间接使光合作用产物可溶性糖含量增加。而 30 mg/kg 处理组在培养后期 (42 天) 可溶性糖含量出现下降, 可能是在培养后期 (42 天) 的土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量减少, 植物吸收后为叶绿素提供原料减少, 使光合作用产物可溶性糖的含量相应减少, 这与王建飞等^[32]、张春兰等^[45]研究的结果是一致的。

4 结论

1) 低剂量 ($\leq 10 \text{ mg/kg}$) 的 Na_2SeO_3 处理下土壤脲酶活性表现为先被激活后减弱至对照水平的趋势。土壤硝态氮含量也表现出相同的变化趋势, 而铵态氮含量变化趋势正好相反; 较高剂量 (30 mg/kg) Na_2SeO_3 处理对土壤脲酶活性没有明显的影响, 在整个培养时期均在对照水平。土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量表现为后期明显减少, 转化成的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 明显增加, 有利于吸收利用。

2) 不同浓度的 Na_2SeO_3 不仅对土壤脲酶、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量及 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比值产生不同影响, 而且也影响到菠菜品质。本研究结果显示, 1 mg/kg Na_2SeO_3 处理组可使菠菜叶的硝酸盐含量明显增加, Vc 含量先增后减, 可溶性蛋白含量减少, 可溶性糖含量没有变化; 10 mg/kg 处理组可使菠菜叶中的硝酸盐、可溶性糖含量表现为先增后减, Vc 含量、可溶性蛋白含量均有不同程度增加; 30 mg/kg 处理组可使菠菜叶的硝酸盐含量先增后减, 可溶性蛋白、可溶性糖含量减少, Vc 含量没有变化。

3) 硒在植物体内转化率与硒对作物品质影响之间没有明显的相关性。富硒作物生产中无机硒肥施用量要综合考虑硒在作物体内的转化率及硒对作物品质影响的各项因素而确定。

致谢: 本试验过程中得到本钢板材股份有限公司徐明的帮助, 特此感谢!

参考文献:

- [1] Zhu C L F, Qian W, Zhang T, Li F. Combined effect of sodium selenite and ginsenoside Rh2 on HCT116 human colorectal carcinoma cells[J]. Archives of Iranian Medicine, 2016, 19(1): 23–29.
- [2] Erkhembayar S M A, Eriksson L C. The effect of sodium selenite on liver growth and thioredoxin reductase expression in regenerative and neoplastic liver cell proliferation[J]. Biochemical Pharmacology, 2012, 83(5): 687–693.
- [3] Williams P N, Enzo L, Sun G X. Selenium characterization in the global rice supply chain[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 43: 6024–6030.
- [4] 王晓芳, 陈思杨, 罗章, 等. 植物对硒的吸收转运和形态转化机制[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(6): 539–544.
Wang X F, Chen S Y, Luo Z, et al. Mechanisms of selenium uptake, translocation and chemical speciation transformation in plants[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(6): 539–544.
- [5] Freitas R G, Nogueira R J, Antonio M A, et al. Selenium deficiency and the effects of supplementation on preterm infants[J]. Revista Paulista Pediatria, 2014, 32(1): 126–135.
- [6] Lyubenova L S X, Schröder P, Michalke B. Selenium species in the roots and shoots of chickpea plants treated with different concentrations of sodium selenite[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(21): 16978–16986.
- [7] 王晓芳, 罗章, 万亚男, 等. 叶面喷施不同形态硒对草莓吸收和转运硒的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 334–339.
Wang X F, Luo Z, Wang Y N, et al. Effects of foliar-applied selenite and selenate on selenium accumulation in strawberry[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(4): 334–339.
- [8] 李根林, 高红梅. 喷施亚硒酸钠对小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(18): 253–255.
Li G L, Gao H M. Effects of spraying Na_2SeO_3 on yield of wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(18): 253–255.
- [9] 黄青青, 杜威, 王琪, 等. 水稻对不同土壤中硒酸盐/亚硒酸盐的吸收和富集[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1423–1429.
Huang Q Q, Du W, Wang Q, et al. Uptake and accumulation of Se by rice in different soil supplied with selenite or selenate[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(5): 1423–1429.
- [10] 付小丽. 不同硒源对小麦和油菜生长及硒累积的影响[D]. 长沙: 华中农业大学, 2013.
Fu X L. The influence of different selenium sources on the growth and selenium accumulation of wheat and oil seed rape[D]. Changsha: Huazhong Agriculture University, 2013.
- [11] 陈锦平, 刘永贤, 曾成城, 等. 植物对土壤硒的吸收转化研究进展[J]. 生物技术进展, 2017, 7(05): 421–427.
Chen J P, Liu Y X, Zeng C C, et al. Advance on uptake and transformation of selenium from soil to plants[J]. Current Biotechnology, 2017, 7(05): 421–427.
- [12] 栗敏, 雷济华, 杨帆, 等. 丹参植株对亚硒酸钠和硒酸钠的吸收和积累[J]. 中国科技论文, 2017, 12(6): 647–651.
Li M, Lei J H, Yang F, et al. Uptake and accumulation of solum selenite and selenate in Danshen (*Salvia miltiorrhiza*) plants[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(6): 647–651.

- [13] 万亚男, 王晓芳, 罗章, 等. 不同形态硒对韭菜吸收富集及土壤累积硒的影响[J]. 园艺学报, 2017, 44(4): 703–711.
Wan Y N, Wang X F, Luo Z. Effects of soil-applied selenite and selenate on accumulation in Chinese leek and retention in soil of selenium[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, 44(4): 703–711.
- [14] 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, 31(3): 658–665.
Duan M L, Fu D D, Wang S S, *et al.* Effects of different selenite concentration on plant growth, absorption and transportation of selenium in four different vegetables[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(3): 658–665.
- [15] 樊俊, 王瑞, 胡红青, 等. 不同价态外源硒对土壤硒形态及酶活性、微生物数量的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 137–141.
Fan J, Wang R, Hu H Q, *et al.* Effects of exogenous selenium with different valences on Se forms, enzyme activities and microbial quantity of soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 137–141.
- [16] Li J LD, Qin S, Feng P, *et al.* Effects of selenite and selenate application on growth and shoot selenium accumulation of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) during successive planting conditions[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(14): 11076–11086.
- [17] Peng Q, Wang M, Cui Z, *et al.* Assessment of bioavailability of selenium in different plant-soil systems by diffusive gradients in thin-films (DGT)[J]. Environmental Pollution, 2017, 225: 637–643.
- [18] 史雅静, 史雅娟, 王玉荣, 等. 土壤酶对外源有机硒和无机硒的动态响应[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1189–1196.
Shi Y J, Shi Y J, Wang Y R, *et al.* Dynamic responses of soil enzymes to exogenous sodium selenite and selenomethionine[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 1189–1196.
- [19] 殷金岩, 耿增超, 李致颖, 等. 硒肥对马铃薯硒吸收、转化及产量、品质的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 823–829.
Yin J Y, Geng Z C, Li Z Y, *et al.* Effects of three fertilizers on uptake, transformation, yield and quality of potatoes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 823–829.
- [20] Tran TAT, Dinh Q T, Cui Z, *et al.* Comparing the influence of selenite (Se^{4+}) and selenate (Se^{6+}) on the inhibition of the mercury (Hg) phytotoxicity to pakchoi[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, (147): 897–904.
- [21] 彭星, 刘嫦娥, 段昌群, 等. 四种除草剂对土壤脲酶活性的影响研究[J]. 现代农药, 2009, 8(6): 31–36.
Peng X, Liu C E, Duan C Q, *et al.* Effect of four herbicides on urease activity in soil[J]. Modern Agrochemicals, 2009, 8(6): 31–36.
- [22] Marschner HRV, Horst WJ, Martin P. Root-induced changes in the rhizosphere: Importance for the mineral nutrition of plants[J]. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1986, 149: 441–456.
- [23] 李伟华, 张崇邦, 林洁筠, 等. 外来入侵植物的氮代谢及其土壤氮特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2008, (4): 321–327.
Li W H, Zhang C B, Lin J Y, *et al.* Characteristics of nitrogen metabolism and soil nitrogen of invasive plants[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2008, (4): 321–327.
- [24] 李树山, 杨俊诚, 姜慧敏, 等. 有机无机肥氮素对冬小麦季潮土氮库的影响及残留形态分布[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6): 1185–1193.
Li SS, Yang J C, Jiang H M, *et al.* Effects of organic and inorganic fertilizer on nitrogen pool and distribution of residual N fractions in fluvo-aquic soil under the winter wheat system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(6): 1185–1193.
- [25] 陈立新, 段文标. 模拟氮沉降对温带典型森林土壤有效氮形态和含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2005–2012.
Chen L X, Duan W B. Effects of simulated nitrogen deposition on soil available nitrogen forms and their contents in typical temperate forest stands[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2005–2012.
- [26] 李琴. 农田土壤氮素循环及其对土壤氮流失的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, (11): 3310–3312.
Li Q. Soil Nitrogen cycle in agro-ecosystem and its influence on soil nitrogen loss[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, (11): 3310–3312.
- [27] 韩桂琪, 王彬, 徐卫红, 等. 重金属Cd、Zn、Cu、Pb复合污染对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 238–242.
Han G Q, Wang B, Xu W H, *et al.* Effects of heavy metal combined pollution on soil microbial indicators and soil enzymatic activity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 238–242.
- [28] 张豆豆, 梁新华, 王俊. 植物根系分泌物研究综述[J]. 中国农学通报, 2014, 30(35): 314–320.
Zhang D D, Liang X H, Wang J. A review of plant exudates[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(35): 314–320.
- [29] Mondal S, Nad B K. Nitrate accumulation in spinach as influenced by sulfur and phosphorus application under increasing nitrogen levels[J]. Journal of Plant Nutrition, 2012, 35(14): 2081–2088.
- [30] 袁伟, 董元华, 王辉. 菠菜对不同施肥模式的响应及其生态化学计量学特征研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(10): 164–170.
Yuan W, Dong Y H, Wang H. The response and ecological stoichiometry characteristics of spinach under different fertilizations[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(10): 164–170.
- [31] 史雅娟, 刘敏超, 吴成. 施用沼肥对油菜硝酸盐含量及土壤速效氮的影响[J]. 农业现代化研究, 2001, (4): 242–245.
Shi Y J, Liu M C, Wu C. Effects of anaerobic fermentation residues on nitrate accumulation in rape and available nitrogen in soil[J]. Research of Agricultural Modernization, 2001, (4): 242–245.
- [32] 汪建飞, 董彩霞, 沈其荣. 不同铵硝比对菠菜生长、安全和营养品质的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 683–688.
Wang J F, Dong C X, Shen Q R. Effects of $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ ratio on growth, food safety and nutritional quality of spinach (*Spinacia Oleracea* L.)[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(4): 683–688.
- [33] Lin Y H HHE, Chen Y R, Liao P L, *et al.* C-terminal region of plant ferredoxin-like protein is required to enhance resistance to bacterial disease in *Arabidopsis thaliana*[J]. Phytopathology, 2011, 101(6): 741–749.
- [34] Kelly G SN, Attia Z, Secchi F, *et al.* Relationship between hexokinase and the aquaporin PIP1 in the regulation of photosynthesis and plant growth[J]. PLoS One, 2014, 9(2): e87888.
- [35] 倪蕾, 孙涌栋, 李艳华, 等. 不同浓度亚硒酸钠对水培苦苣生长及营

- 养品质的影响[J]. 北方园艺, 2016, (14): 40–43.
- Ni L, Sun Y D, Li Y H, *et al.* Effect of different concentrations of Na_2SeO_3 on the growth and nutritional quality of *Cichorium endivia*[J]. Northern Horticulture, 2016, (14): 40–43.
- [36] 左银虎. 环境与植物中硒形态研究进展[J]. 植物学通报, 1999, (4): 378–380, 364.
- Zuo Y H. Advances in the studies on forms of selenium in environment and in plant[J]. Chinese Bulltin of Botany, 1999, (4): 378–380, 364.
- [37] 胡俊茹, 王安利, 曹俊明, 等. 维生素C对水生动物生长、繁殖及免疫的调节作用[J]. 水产科学, 2009, 28(01): 40–46.
- Hu J R, Wang A L, Cao J M, *et al.* Regulation of vitamin C in growth, reproduction and immune in aquatic animals[J]. Fisheries Science, 2009, 28(01): 40–46.
- [38] 邓载安, 张治礼, 张执金, 等. 水稻L-半乳糖途径相关基因的表达特性[J]. 中国农业科技导报, 2010, 12(04): 95–100.
- Deng Z A, Zhang Z L, Zhang Z J, *et al.* Gene expression characteristics related to L-galactose pathway in rice[J]. Journal of Agricultural Science and Thchnolohy, 2010, 12(04): 95–100.
- [39] 邹礼平, 陈锦华. 植物抗坏血酸的合成和代谢以及相关酶基因的调控[J]. 植物生理学通讯, 2009, 45(9): 925–930.
- Zou L P, Chen J H. Biosynthesis and metabolism of ascorbic acid and regulation of related genes in plants[J]. Plant Physiology Communications, 2009, 45(9): 925–930.
- [40] 李彦, 罗盛国, 刘元英, 等. 硒对番茄叶片中谷胱甘肽过氧化物酶活性及产量和品质的影响[J]. 山东农业科学, 1999, (6): 38–39.
- Li Y, Luo S G, Liu Y Y, *et al.* Effects of selenium on glutathione peroxidase activity and yield and quality in tomato leaves[J]. Shandong Agricultural Science, 1999, (6): 38–39.
- [41] 李春霞, 刘伟, 陈凌云, 等. 有机硒营养液对蓝莓营养品质和抗氧化作用的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(3): 179–185.
- Li C X, Liu W, Chen L Y, *et al.* Effect of organic selenium solution on the nutrition quality and antioxidant function of blueberry[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(3): 179–185.
- [42] 史雅静, 庞月, 王玉荣, 等. 不同肥料配施对西瓜果实营养积累及土壤脲酶活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(16): 133–136.
- Shi Y J, Pang Y, Wang Y R, *et al.* Effect of vermicompost co-applide with different fertilizer on fruit nutrition accumulation and the urease activity in rhizosphere soil of watermelon[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(16): 133–136.
- [43] 孙艳斐. 长春花不同生活史型可溶性糖动态变化规律的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文, 2007.
- Sun Y F. Study on dynamic changes of soluble sugar in different life forms of Changchun flowers[D]. Harbin: MS Thesis of Northeast Forestry University, 2007.
- [44] 宁婵娟, 丁宁, 吴国良, 等. 喷硒时期与浓度对红富士苹果果实品质及各部位全硒和有机态硒含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1109–1117.
- Ning C J, Ding N, Wu G L, *et al.* Effects of different selenium spraying scheme on the fruit quality, tital selenium and organic selenium contents in ‘Red Fuji’ apple trees[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1109–1117.
- [45] 张春兰, 高祖明, 张耀栋, 等. 氮素形态和 NO_3^- -N与 NH_4^+ -N配比对菠菜生长和品质的影响[J]. 南京农业大学学报, 1990, (3): 70–74.
- Zhang C L, Gao Z M, Zhang Y D, *et al.* The effects of different nitrogen forms and their concentration combinations on the growth and quality of spinach[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1990, (3): 70–74.