

## 4 种蔬菜对硒酸盐的吸收、富集与转运特征的研究

段曼莉, 胡 斌, 梁东丽\*, 赵文龙, 付冬冬, 毕文扬

(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含量硒酸钠对 4 种蔬菜(小白菜、芥菜、生菜和菠菜) 生长、硒吸收及转运特征的影响, 为富硒蔬菜的开发和硒污染土壤的植物修复提供理论依据。结果表明, 低含量的硒酸钠态硒 ( $<1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 可促进 4 种蔬菜的根和茎的生长, 增加其生物量, 但过量硒酸盐态硒 ( $>2.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 对蔬菜有明显的毒害作用。供试的 4 种蔬菜地上、地下部硒含量均随外源硒含量的增加显著增大 ( $P<0.01$ ), 其中小白菜和芥菜地上硒含量是生菜和菠菜的 5.8~8.5 倍; 4 种蔬菜地下部硒含量的大小依次为芥菜>小白菜>菠菜>生菜。所有施硒处理小白菜、芥菜和生菜地上硒含量约是地下硒含量的 1~2 倍, 菠菜地上与地下硒含量与土壤硒含量高低有关, 当土壤硒含量  $<5.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 菠菜的地下硒含量大于地上部, 当土壤中硒含量  $>5.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 地上部硒含量大于地下部。4 种蔬菜相比较, 地上部硒富集系数 ( $BCF_{\text{shoot/soil}}$ ) 值的大小依次为小白菜  $\approx$  芥菜 > 菠菜 > 生菜, 地下部富集系数 ( $BCF_{\text{root/soil}}$ ) 值的大小依次为芥菜 > 小白菜 > 菠菜 > 生菜; 以小白菜对硒的转运系数 (TF) 值最大, 菠菜最小。供试的 4 种蔬菜中, 小白菜因具有较高的将六价硒从地下转运到地上的能力, 且拥有较高的地上生物量, 可作为富硒蔬菜和硒污染土壤修复植物。

**关键词:** 蔬菜; 硒酸盐; 吸收和转运

中图分类号: X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)03-0422-07

### Absorption, Bioaccumulation and Translocation of Selenium in Four Different Vegetables by Applying Selenate

DUAN Man-li, HU Bin, LIANG Dong-li\*, ZHAO Wen-long, FU Dong-dong, BI Wen-yang

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

**Abstract:** Pot experiment was carried out to study effects of different levels of selenate applied to soil on selenium absorption and translocation in four vegetables (pak choi, mustard, lettuce and spinach). The objective of the study was to provide the theoretical basis for selecting vegetables which have higher capacity for selenium enrichment and phytoremediation of soil contaminated by selenium. The results showed that lower selenate supply rates ( $<1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) stimulated the growth of four vegetables, but higher selenate supply rates ( $>2.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) exerted toxic effects on vegetables. Selenium concentrations in shoots and roots of four vegetables increased with the increasing of selenate levels in soil ( $P<0.01$ ). Among four tested vegetables, selenium concentrations within pak choi and mustard shoots were 5.8~8.5 times greater than those within lettuce and spinach. The selenium concentrations in roots of the four vegetables showed the follows sequence: mustard>pak choi>spinach>lettuce. For different treatments with selenate application rates, selenium concentrations in shoot were 1~2 times greater than those in roots of pak choi, mustard and lettuce. Selenium concentrations in shoot and root of spinach were related to selenate application rates in soil. When selenate application rates in soil were less than  $5.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , selenium concentrations in root of spinach were larger than those in shoot, while selenate application rates in soil were more than  $5.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , selenium concentrations in shoot of spinach were larger than those in roots.  $BCF_{\text{shoot/soil}}$  (Ratio of selenium concentrations in shoot to selenate application rates to soil) of shoots of four vegetables showed the follows order: pak choi  $\approx$  mustard > spinach > lettuce, and that sequence of roots was as: pak choi > mustard > spinach > lettuce. Overall comparison results illustrated that, pak choi had the greatest level of TF ( $BCF_{\text{shoot/soil}}/BCF_{\text{root/soil}}$ ), while that of spinach showed the smallest. Thus, pak choi was the most suitable species among four tested vegetables to eliminate soil selenium contamination because of its relatively larger biomass and better selenium translocation capacity.

**Keywords:** vegetables; selenate; absorption and transportation

收稿日期: 2010-10-19

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

作者简介: 段曼莉(1986—), 女, 主要从事土壤环境化学方面的研究。E-mail: manli0815@yahoo.com.cn

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

硒是人和动物必需的微量元素,它的丰缺与人和动植物的健康有着密切关系<sup>[1-2]</sup>,长期缺硒会引起克山病、大骨节病等地方性疾病,但高水平的硒却对生物机体有一定的毒害作用。研究表明,我国有72%的县(市)存在不同程度的缺硒现象<sup>[3]</sup>,而植物硒被认为是人体摄入硒的主要来源<sup>[4]</sup>,所以通过土壤施用硒肥来提高饮食中的硒含量是世界范围内低硒地区补硒的有效途径<sup>[5]</sup>。目前国内外对富硒作物已有较多研究<sup>[6-7]</sup>。近年来由于地质原因和工农业的发展引发的硒污染问题越来越受到全球环境学者的关注<sup>[8]</sup>,通过富硒植物自身的生理代谢将无机硒转化为低毒性且易挥发的有机硒来减少土壤中的硒含量已经成为硒污染地区生物修复的重要方法<sup>[9]</sup>。

植物吸收硒的形式主要是硒酸盐和亚硒酸盐<sup>[10-11]</sup>,土施或叶面喷施六价硒可使植物中的硒含量显著高于施用四价硒<sup>[12]</sup>,不同种类或基因型作物对硒的吸收、累积各异<sup>[13-15]</sup>,现阶段国内外对蔬菜硒吸收和积累的研究已有报道<sup>[16-18]</sup>,但对相同条件下,不同作物对六价硒吸收、积累和转运方面却未见报道。本文选择十字花科(小白菜和芥菜)、菊科(生菜)和藜科(菠菜)蔬菜为载体进行盆栽试验,研究了不同含量外源硒酸盐对4种蔬菜生长、硒吸收、累积和转运能力的影响,旨在为富硒蔬菜的开发和硒污染的植物修复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试土壤类型为壤土。土样采自西北农林科技大学试验田,以多点取样法采集0~20 cm深度土壤,自然风干,研磨后过2 mm筛。土壤的基本理化性状为:pH=7.75,阳离子交换量(CEC)为23.34 cmol·kg<sup>-1</sup>,黏粒含量为39.50%,碳酸钙55.00 g·kg<sup>-1</sup>,有机质16.33 g·kg<sup>-1</sup>,全氮1.11 g·kg<sup>-1</sup>,土壤全硒含量0.113 mg·kg<sup>-1</sup>。

盆栽作物为小白菜(*Brassica chinensis*)、芥菜(*Brassica juncea* L)、生菜(*Lactuca sativa* L var. *capitata* L)和菠菜(*Spinacia oleracea*),品种分别为秦白2号、秦芥2008、香港玻璃生菜和日本原叶大菠菜,全部由西北农林科技大学园艺学院种子公司提供。供试硒酸钠为分析纯试剂。

### 1.2 试验设计

试验采用土培盆栽方法,土壤于2008年4月分别施入7个硒梯度水平(0、1、2.5、5、10、20、40 mg·kg<sup>-1</sup>)的硒酸钠,并连续种植过7茬小白菜,每个处理重复

4次<sup>[19]</sup>。播种前经测定各施硒处理土壤总硒含量分别为1.12、1.45、2.04、5.02、17.28、34.84 mg·kg<sup>-1</sup>。具体试验方法是:将原来各个处理的每盆土壤分成4份来种植4种蔬菜作物,每千克土中分别施入0.15 g N和0.033 g P,充分混匀后,装到内径18 cm、深度15 cm的小盆中,每盆装土2.5 kg,每个处理设4个重复。于2009年8月29日播种,第3 d出苗(菠菜第5 d出苗),7 d后间苗至10株,12 d后定苗到5株,在生长过程中用称重的方法保持土壤含水量为田间持水量的70%,注意除草和防治病虫害,40 d后收获。

### 1.3 样品采集和指标测定

将蔬菜连根收获后用水冲洗,再用蒸馏水洗涤,吸水纸吸干水分,将植株地上、地下部分分开,分别测定株高、根长等生长指标。然后装于纸袋中90℃杀青30 min后70℃烘干,称量地上和地下部干重。蔬菜样及土壤样均用HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>(体积比为4:1)消解,用氢化物发生-原子荧光光谱法(北京吉天AFS-930双道原子荧光光度计)测定硒含量。同时用石灰岩土(GBW07404)和圆白菜样(GBW10014)作为质量控制样品,实测质控样值为石灰岩土(0.61±0.13) mg·kg<sup>-1</sup>[标准值为(0.63±0.18) mg·kg<sup>-1</sup>],圆白菜为(0.21±0.01) mg·kg<sup>-1</sup>[标准值为(0.20±0.03) mg·kg<sup>-1</sup>]。土壤理化性质用常规法测定<sup>[20]</sup>。

### 1.4 数据分析

数据处理用SPSS 13.0统计分析软件。同时,本文引入了以下概念:

抑制率(*IR*, inhibition Ratio)  $IR = (c - a) / c \times 100\%$

式中:*IR<sub>L</sub>*、*IR<sub>W</sub>*和*IR<sub>H</sub>*分别为根长、根粗或株高抑制率,cm·cm<sup>-1</sup>; *c*为对照处理蔬菜根长、根粗或株高,cm; *a*为施硒处理蔬菜对应的根长、根粗或株高,cm。抑制率为负值表示施硒有促进作用,抑制率为正值表示施硒有抑制作用,抑制率的绝对值越大表示促进或抑制作用越强。

生物富集系数( $BCF_{shoot/soil}$ 和 $BCF_{root/soil}$ )和转移系数(*TF*, Translocation Factors)值可以用来表征不同蔬菜富集和转运污染物的能力<sup>[21-22]</sup>。*BCF*值越高代表植物富硒能力越强,*TF*值越高代表植物根系吸收的硒转运到地上部分的能力越强,越有利于土壤硒污染的植物修复。

地上部富集系数  $BCF_{shoot/soil} = C_{地上部分} / C_{生长介质}$

地下部富集系数  $BCF_{root/soil} = C_{地下部分} / C_{生长介质}$

转运系数  $TF = C_{地上部分} / C_{地下部分}$

其中*C*代表污染物的含量,mg·kg<sup>-1</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同含量硒酸盐对4种蔬菜生长情况的影响

由表1可知,除生菜的根长随外源硒含量的升高而降低外,小白菜、芥菜和菠菜的根长均随外源硒含量的增大呈先升高后降低的趋势( $P<0.01$ ),最低含量外源硒处理( $1.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )对生菜根伸长呈抑制作用。从根粗抑制率来看,低含量硒对生菜( $\leq 5.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、菠菜( $\leq 2.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )的根粗有明显的促进作用,但所有硒处理均对小白菜和芥菜的根粗有明显的抑制作用,且抑制作用随外源硒含量的增加而增大。4种蔬菜的株高随硒含量的增加呈先增大后减小的趋势,在硒含量为 $1.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时对生菜株高的促进作用达到最大。低含量硒( $\leq 2.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )处理时4种蔬菜的根长、根粗和株高抑制率差异不大,但高含量硒( $>5.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )处理时,其差异显著,说明高含量硒对蔬菜的生长影响更大。

从表1还可以看出,蔬菜各生长指标均与土壤硒处理水平和蔬菜品种呈显著差异( $P<0.01$ )。双因素方差分析得知,外源硒含量水平对芥菜的根长抑制率和株高抑制率影响最大,其次是菠菜、小白菜,最后是生菜;对根粗的抑制作用大小为芥菜>小白菜>生菜>菠菜,这说明在供试的4种蔬菜中以芥菜对硒酸盐含量反应最敏感。

### 2.2 不同含量硒酸盐对4种蔬菜生物量的影响

图1(a)和图1(b)分别给出了4种蔬菜地上、地下生物量随外源硒酸盐含量的变化情况。由图1(a)可见,除菠菜地上部生物量随外源硒酸盐含量的增大而减小外,其余3种蔬菜的地上部生物量均随外源硒含量的增大呈先增加后减小的趋势,其中芥菜地上生物量的最大值出现在硒含量为 $1.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,且与其他3种蔬菜的地上生物量间差异显著( $P<0.05$ );其余3种蔬菜地上生物量的最高值均出现在硒含量 $\leq 2.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,且地上生物量间差异不显著。在硒处理含量 $\leq 5.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时供试的4种蔬菜地上生物量的大小依次为芥菜>小白菜>生菜>菠菜。

由图1(b)可看出,生菜的地下生物量随土壤硒含量的增大呈先升高后降低的趋势,在硒含量为 $1.12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大,较CK处理增加了94.5%。小白菜、芥菜和菠菜的地下生物量随土壤硒含量的升高逐渐下降,说明添加外源硒抑制了这3种蔬菜根部的生长(表1)。在土壤硒 $\leq 5.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,4种蔬菜中以生菜的地下生物量最大,小白菜、芥菜次之,菠菜最小,但在高含量硒时( $\geq 17.28\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )却以菠菜的生物量最大。在最高硒浓度处理下( $34.84\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),小白菜和生菜已经死亡,而芥菜和菠菜还能生长,且菠菜的地下生物量大于芥菜,说明菠菜对高含量的硒毒害有一定的耐受能力。

表1 不同含量硒酸盐处理对4种蔬菜生长的影响

Table 1 Effects of different concentrations of selenate on the growth in four kinds of vegetables

蔬菜	处理水平/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$IR_l$ / $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}$	$IR_w$ / $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}$	$IR_{\sqrt{}}$ / $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}$	蔬菜	处理水平/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$IR_l$ / $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}$	$IR_w$ / $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}$	$IR_{\sqrt{}}$ / $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-1}$
小白菜	1.12	$-0.18\pm 5.73\%a$	$14.45\pm 3.34\%a$	$-0.72\pm 2.00\%a$	生菜	1.12	$2.89\pm 4.95\%a$	$-14.09\pm 11.15\%a$	$-13.06\pm 9.89\%a$
	1.45	$-5.81\pm 1.97\%a$	$9.83\pm 5.09\%ab$	$6.64\pm 4.14\%b$		1.45	$2.45\pm 3.79\%a$	$-15.12\pm 12.55\%a$	$-4.57\pm 13.46\%ab$
	2.04	$10.77\pm 3.29\%b$	$22.01\pm 5.76\%b$	$10.88\pm 1.71\%b$		2.04	$18.64\pm 8.58\%b$	$-6.76\pm 11.55\%a$	$7.59\pm 2.03\%b$
	5.02	$26.74\pm 6.13\%c$	$42.97\pm 7.32\%c$	$34.61\pm 3.78\%c$		5.02	$17.98\pm 6.26\%b$	$-7.33\pm 5.17\%a$	$24.58\pm 0.91\%c$
	17.28	$69.91\pm 0.71\%d$	$83.20\pm 0.39\%d$	$64.67\pm 2.79\%d$		17.28	$54.72\pm 2.78\%c$	$75.26\pm 2.43\%b$	$80.49\pm 0.25\%d$
	34.84	-	-	-		34.84	-	-	-
芥菜	1.12	$-10.90\pm 4.19\%a$	$28.39\pm 4.77\%a$	$0.31\pm 2.18\%a$	菠菜	1.12	$-28.80\pm 6.90\%a$	$-23.51\pm 11.84\%a$	$0.23\pm 6.36\%a$
	1.45	$1.76\pm 0.74\%b$	$18.40\pm 2.53\%b$	$-2.55\pm 4.27\%a$		1.45	$-22.85\pm 5.24\%a$	$-15.61\pm 5.99\%a$	$-7.31\pm 5.74\%a$
	2.04	$16.56\pm 8.40\%c$	$31.34\pm 2.03\%b$	$15.07\pm 2.82\%b$		2.04	$0.48\pm 9.91\%b$	$-8.25\pm 7.37\%a$	$0.00\pm 9.82\%a$
	5.02	$39.30\pm 6.57\%d$	$57.20\pm 9.37\%c$	$41.94\pm 2.77\%c$		5.02	$0.70\pm 2.67\%b$	$22.11\pm 9.22\%b$	$40.53\pm 5.90\%b$
	17.28	$48.09\pm 3.17\%e$	$90.96\pm 3.47\%d$	$77.02\pm 2.12\%d$		17.28	$37.03\pm 9.11\%c$	$26.67\pm 2.19\%b$	$69.36\pm 2.94\%c$
	34.84	$60.02\pm 1.94\%f$	$94.74\pm 0.66\%d$	$91.19\pm 0.52\%e$		34.84	$55.09\pm 4.76\%d$	$67.19\pm 2.90\%c$	$74.94\pm 1.43\%c$

品种及硒处理水平对蔬菜生长指标显著性分析

品种 \*\* \*\* \*\* 品种 \*\* \*\* \*\*

硒处理 \*\* \*\* \*\*

注:表中数据为平均值±标准差( $n=4$ ),同列不同字母者表示各指标抑制率差异显著( $P<0.05$ ),表中星号表示双因素方差分析显著性差异水平,\*\*表示达到99%的差异显著性( $P<0.01$ )。

### 2.3 4种蔬菜对不同含量硒酸盐硒吸收能力的比较

不同品种蔬菜对硒的吸收富集能力不同,从图2可以看出,4种蔬菜地上部硒含量随土壤硒含量的增大而增加( $P<0.01$ )。外源硒含量 $\geq 2.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后,蔬菜硒含量急剧增大,说明增加外源硒含量能加剧蔬菜植株体对硒的累积。在所有的的外源硒含量处理下,4种蔬菜硒含量最大值均出现在土壤施用外源硒含量最大时( $17.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),此时,小白菜和芥菜地上含硒量分别为生菜和菠菜的5.8~8.5倍。

从图3中可以看出,4种蔬菜的地下硒含量随着外源硒含量的增加而升高( $P<0.01$ ),同样,在外源硒含量 $\geq 2.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,蔬菜地下硒含量急剧增大,说明高含量外源硒可加剧蔬菜根对硒的累积。各个硒处理下4种蔬菜地下部硒含量的大小均为:芥菜>小白菜>菠菜>生菜。

蔬菜的地上和地下部硒含量相比较,小白菜、芥菜和生菜地上硒含量约是地下硒含量的1~2倍,说明六价硒在这3种蔬菜的地上部积累较多。菠菜地上与

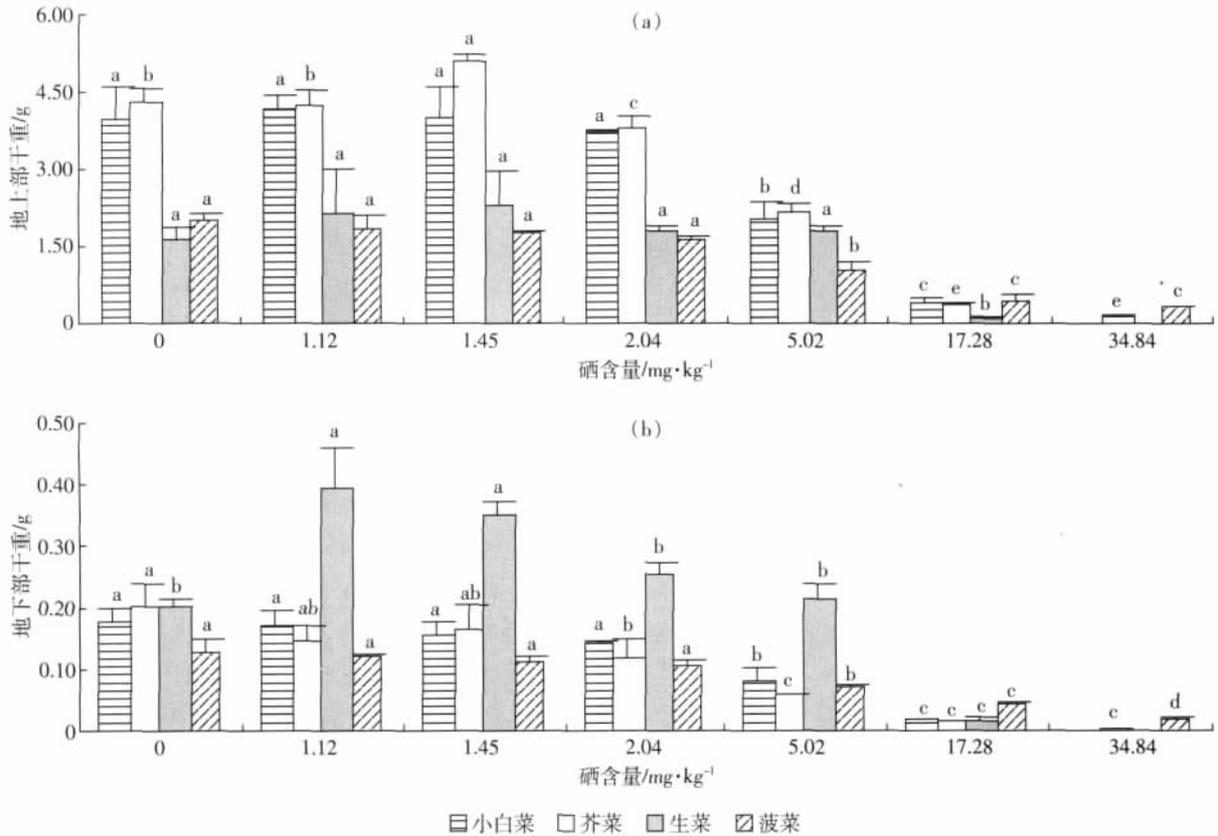


图1 不同含量硒酸盐处理对4种蔬菜生物量的影响

Figure 1 Effects of different concentrations of selenate on the biomass in four kinds of vegetables

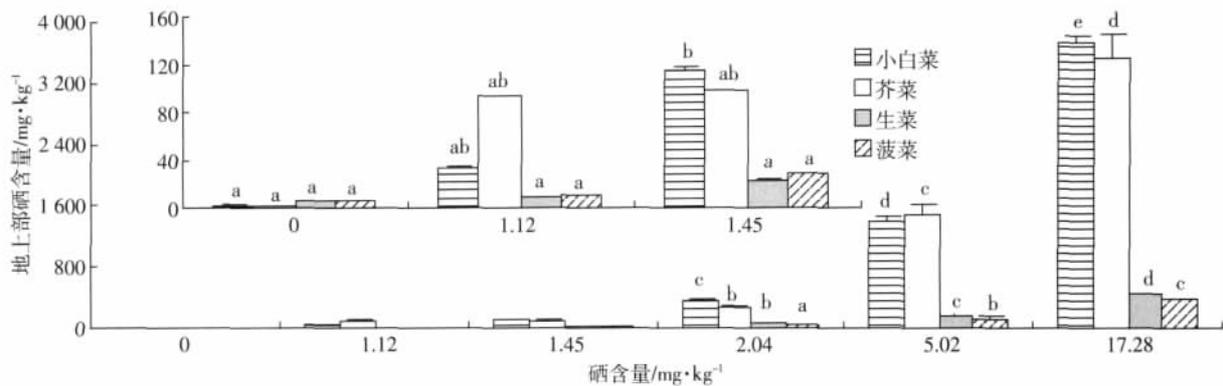
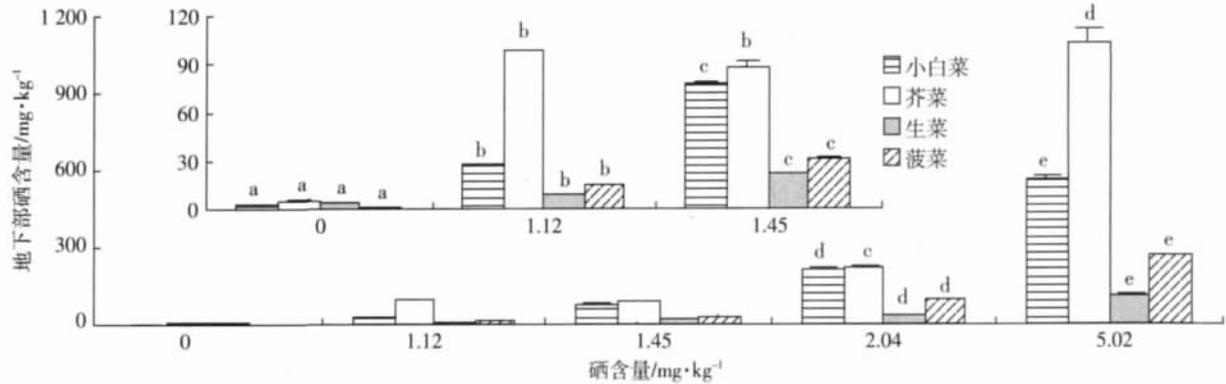


图2 不同含量硒酸盐处理对4种蔬菜地上部分硒含量的影响

Figure 2 Effects of different concentrations of selenate on the selenium content of ground part in four kinds of vegetables



注:硒浓度>5.02 mg·kg<sup>-1</sup>时,蔬菜地下生物量过小,所以无硒含量测定结果。

图3 不同含量亚硒酸盐处理对4种蔬菜地下部分硒含量的影响

Figure 3 Effects of different concentrations of selenate on the selenium content of underground part in four kinds of vegetables

地下硒含量与土壤硒含量高低有关,当土壤硒含量<5.02 mg·kg<sup>-1</sup>时,菠菜的地下硒含量大于地上部,当土壤中硒含量>5.02 mg·kg<sup>-1</sup>时,地上部硒含量大于地下部,这也是菠菜不同于其他3种供试蔬菜的地方。

2.4 4种蔬菜对硒酸盐硒的转运能力的比较

从表2可以看出,土壤硒含量≤5.02 mg·kg<sup>-1</sup>,供试的4种蔬菜地上部的 $BCF_{shoot/soil}$ 值和地下部的 $BCF_{root/soil}$ 值都随外源硒含量的增大而增加,说明在一定硒浓度范围内,土壤介质中硒含量越大,蔬菜从土壤中吸收的硒越多;但当施入的硒含量为17.28 mg·kg<sup>-1</sup>时, $BCF_{shoot/soil}$ 又显著下降,这是由于植物体内累积了较多硒而导致其生理代谢破坏,从而使得地上部转运能力减小的缘故。小白菜和芥菜对硒的转运系数(TF值)同样也随外源硒含量的增大而增大,说明土壤硒含量越大,蔬菜将体内硒从地下转运到地上的能力越强。

但菠菜在土壤硒含量≤2.04 mg·kg<sup>-1</sup>时,TF值小于1,说明其地上硒含量小于地下硒含量(图2和图3),但当土壤硒含量为5.02 mg·kg<sup>-1</sup>,TF值又显著增大,说明高含量硒有助于菠菜地上部对硒的转运和积累。

双因素方差分析表明,4种蔬菜的 $BCF_{shoot/soil}$ 值为小白菜≈芥菜>菠菜>生菜;4种蔬菜的 $BCF_{root/soil}$ 值间差异显著,以芥菜的地下富集系数最大,其次是小白菜,最后是生菜和菠菜;以小白菜对硒的转运能力TF值最大,菠菜最小,说明供试的4种蔬菜中以小白菜将六价硒转运到地上部分的能力最强,而菠菜最弱。4种蔬菜相比较,小白菜和芥菜均拥有较高的 $BCF_{shoot/soil}$ ,且芥菜的 $BCF_{root/soil}$ 显著大于小白菜,但小白菜的TF值显著大于芥菜,说明芥菜从土壤中吸收的硒较多的积累在根部,而小白菜将更多的硒转运到植株地上部分,结合小白菜的地上生物量较高,所以小白菜是供

表2 4种蔬菜 $BCF_{shoot/soil}$ 、 $BCF_{root/soil}$ 和TF值比较

Table 2  $BCF_{shoot/soil}$ ,  $BCF_{root/soil}$  and TF values of four tested vegetables

蔬菜	处理/mg·kg <sup>-1</sup>	$BCF_{shoot/soil}$	$BCF_{root/soil}$	TF	蔬菜	处理/mg·kg <sup>-1</sup>	$BCF_{shoot/soil}$	$BCF_{root/soil}$	TF
小白菜	1.12	29.94±3.39a	24.60±0.01a	1.22±0.14a	生菜	1.12	7.53±1.92a	7.87±0.19a	0.96±0.24a
	1.45	79.59±5.11b	53.53±0.64b	1.49±0.10b		1.45	15.52±2.15b	14.95±0.16b	1.04±0.14a
	2.04	169.92±10.84c	104.11±2.98c	1.63±0.10b		2.04	30.19±1.57c	17.82±0.30c	1.69±0.09b
	5.02	274.05±15.65e	110.83±3.51d	2.47±0.14c		5.02	30.22±4.80c	22.33±0.54d	1.35±0.21ab
	17.28	213.95±5.37d	-	-		17.28	25.43±0.49c	-	-
芥菜	1.12	83.00±8.11a	87.48±0.27a	0.95±0.09a	菠菜	1.12	9.23±0.28a	9.73±0.19a	0.70±0.02a
	1.45	67.29±11.08a	60.01±2.65b	1.12±0.18ab		1.45	19.87±2.28b	15.93±0.77b	0.95±0.11b
	2.04	129.62±13.25b	106.12±4.54c	1.22±0.12ab		2.04	34.44±1.65c	22.36±0.41c	0.73±0.04a
	5.02	295.54±25.30d	215.94±10.67d	1.37±0.12b		5.02	85.84±6.24d	38.70±0.51d	1.62±0.12c
	17.28	188.02±29.31c	-	-		17.28	35.23±0.62c	-	-
小白菜		153.49a	73.27b	1.70a	生菜		21.52c	15.74d	1.26b
芥菜		152.36a	117.39a	1.16b	菠菜		36.92b	21.68c	1.00c

注:下两行表示4种蔬菜双因素方差分析,同一行指标不同字母者表示差异显著(P<0.05),字母顺序越后表示BCF、BCF'、TF值越小。

试的4种蔬菜中硒污染修复最佳的植物。

### 3 讨论

与许多学者的研究结果相同<sup>[23-24]</sup>,本试验结果表明,适量的硒酸盐态硒( $<1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )可促进4种蔬菜根和茎的生长,增加其生物量,但不同蔬菜施入的最佳硒含量各不相同。究其原因:首先,根是植物体中最重要的络合重金属的部位,也是最易受重金属毒性影响的部位,重金属对细胞分裂和伸长的抑制是导致植株根伸长受阻的主要原因<sup>[25]</sup>;其次,硒会影响植物叶绿素的合成代谢,调节光合作用和呼吸作用中的电子传递,从而调节光合作用和呼吸作用,促进了植物的物质积累<sup>[26]</sup>;最后,硒作为谷胱甘肽过氧化物酶系(GSH-Px)的组成成分,参与植物体内自由基的清除,进而提高了植物的抗氧化能力和对逆境的抗性<sup>[27-28]</sup>,这些都为作物的生长奠定了基础。

许多研究证明,土壤中施硒能有效地提高植物体中的硒含量<sup>[19,29]</sup>,本试验也得到同样的结果,即4种蔬菜地上、地下部硒含量均随外源硒含量的增加而显著升高。值得指出的是,尽管硒在蔬菜中积累随外源硒含量的增加逐渐增加,但当硒含量较高时作物对硒吸收处于奢侈吸收状态,硒的毒害作用越来越明显,因此蔬菜作物的生物量反而随外源硒含量的增大而显著下降。植物对硒的吸收与植物种类有关,4种蔬菜中以小白菜和芥菜吸收的硒量大,原因是小白菜和芥菜为十字花科植物,其有较强的吸收并挥发硒的能力<sup>[30]</sup>,但其耐硒的原因和代谢机理尚不清楚。小白菜、芥菜和生菜地上部硒含量大于地下部,这主要是因为植物根系吸收六价硒后,直接通过木质部转运到地上部,并通过硫转运蛋白以主动运输方式进入细胞质膜,所以植株吸收六价硒速率较快,地上部要比地下部积累的硒多<sup>[31-32]</sup>。而菠菜在硒处理含量 $<5.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,地上硒积累量小于地下硒含量,且TF值最小,但当外源硒含量 $>5.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,菠菜的TF值显著增大,说明菠菜吸收的硒从地下部向地上部转运能力变强,不同土壤硒含量水平菠菜硒转运能力的差异还需从植物学以及基因水平角度深入研究。

富硒植物是指富硒含量大于 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的植物<sup>[33]</sup>,它是研究硒在植物中的营养代谢机理、提取有效抗癌有机硒化物和修复硒生态污染的最佳材料。以陕西紫阳为例,其高硒土壤硒含量平均达 $15.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最高达 $26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[34]</sup>。本试验中在土壤硒含量 $\geq 5.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,生长的小白菜和芥菜硒含量均大于

$1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,但芥菜从土壤中吸收的硒较多的积累在根部,所以从植物修复角度来看,小白菜可作为富硒植物用于硒污染的修复。

### 4 结论

(1) 土壤中添加适量的六价硒( $<1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )可促进4种蔬菜(小白菜、芥菜、生菜和菠菜)的根和茎的生长,增加其生物量,但过量的硒( $>2.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )对植物有明显的毒害作用,4种蔬菜地上生物量的大小依次为芥菜 $>$ 小白菜 $>$ 生菜 $>$ 菠菜,且以生菜的地下生物量最大。

(2) 4种蔬菜地上、地下部硒含量随着外源硒酸盐含量的增加而增大,小白菜和芥菜地上硒含量是生菜和菠菜的5.8~8.5倍;地下部硒含量的大小依次为芥菜 $>$ 小白菜 $>$ 菠菜 $>$ 生菜。而各施硒处理小白菜、芥菜和生菜地上部积累硒较多,地上硒含量约是其地下硒含量的1~2倍;而菠菜在土壤硒含量 $<5.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,地下部硒含量高于地上部。

(3) 4种蔬菜地上富集系数( $BCF_{\text{shoot/soil}}$ )值的大小依次为小白菜 $\approx$ 芥菜 $>$ 菠菜 $>$ 生菜,地下部富集系数( $BCF_{\text{root/soil}}$ )值的大小依次为芥菜 $>$ 小白菜 $>$ 菠菜 $>$ 生菜,以小白菜对硒的转运系数(TF)值最大,菠菜最小。供试的4种蔬菜中,小白菜因具有较高的将六价硒从地下转运到地上的能力,且拥有较高的地上生物量,其可作为富硒蔬菜和硒污染土壤修复植物。

#### 参考文献:

- [1] Hamilton S J. Review of selenium toxicity in the aquatic food chain[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 326: 1-31.
- [2] Tapiero H, Townsend D M, Tew K D. The antioxidant role of selenium and seleno-compounds[J]. *Biomedical Pharmacotherapy*, 2003, 57: 134-144.
- [3] 杜振宇, 史衍玺, 王清华. 土壤施硒对萝卜吸收转化硒及品质的影响[J]. *土壤*, 2004, 36(1): 56-60.  
DU Zhen-yu, SHI Yan-xi, WANG Qing-hua. Effect of selenium application in soil on absorption and transformation of selenium and quality of radish[J]. *Soils*, 2004, 36(1): 56-60.
- [4] Rayman M P. Food-chain selenium and human health: Emphasis on intake[J]. *Nutr*, 2008, 100: 254-268.
- [5] 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.
- [6] 郑文杰, 贺鸿志, 黄 峙, 等. 螺旋藻富集和转化硒研究进展[J]. *中国生物工程杂志*, 2003, 23(1): 57-60.  
ZHENG Wen-jie, HE Hong-zhi, HUANG Zhi, et al. The progress in spirulina accumulating and transforming inorganic selenium[J]. *Journal of Chinese Biotechnology*, 2003, 23(1): 57-60.

- [7] Keskinen R, Turakainen M, Hartikainen H. Plant availability of soil selenate additions and selenium distribution within wheat and ryegrass[J]. *Plant Soil*, 2010, 333: 301–313.
- [8] Fordyce F M, Zhang G D, Green K, et al. Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District of China[J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 25: 117–132.
- [9] 李莉萍, 王 军. 土壤-植物系统中硒的赋存形态及其分析方法研究进展[J]. *热带农业科学*, 2009, 29: 58–66.  
LI Li-ping, WANG Jun. Advances on existing form of and analysis methods for selenium in soil-plant system[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2009, 29: 58–66.
- [10] Nowak J, Kaklewski K, Ligocki M. Influence of selenium on oxidoreductive enzymes activity in soil and plants[J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, 36: 1553–1558.
- [11] Banuelos G S, Lin Z Q. Phytoremediation management of selenium-laden drainage sediments in the San Luis Drain: A greenhouse feasibility study[J]. *Ecotox Environ Safety*, 2005, 62: 309–316.
- [12] 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: 359–367.
- [13] Dhillon S K, Hundal B K, Dhillon K S. Bioavailability of selenium to forage crops in a sandy loam soil amended with Se-rich plant materials[J]. *Chemosphere*, 2007, 66: 1737–1743.
- [14] Zhang L H, Ashley R A, Elizabeth A H, et al. Variation in selenium tolerance and accumulation among 19 *Arabidopsis thaliana* accessions[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, 164: 327–336.
- [15] Yu X Z, Gu J D. Differences in uptake and translocation of selenate and selenite by the weeping willow and hybrid willow[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2008, 15: 499–508.
- [16] 张喜琦, 张 卉, 王 骏, 等. 不同蔬菜中硒累积量及硒生物富集能力差异研究[J]. *江苏农业科学*, 2009, 4: 170–171.  
ZHANG Xi-qi, ZHANG Hui, WANG Jun, et al. Research on the difference of selenium accumulation amount and ability in various vegetables[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2009, 4: 170–171.
- [17] 余光辉, 温琰茂, 张 磊, 等. 广州市蔬菜中硒含量特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 1045–1048.  
YU Guang-hui, WEN Yan-mao, ZHANG Lei, et al. Analysis of selenium contents in vegetable in Guangzhou City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 1045–1048.
- [18] Dhillon S K, Surjit K D. Accumulation and distribution of selenium in some vegetable crops grown in selenate-Se treated clay loam soil[J]. *Front Agric China*, 2009, 3(4): 366–373.
- [19] 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.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 432–437.  
BAO Shi-dan. Analysis methods for soil agro-chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 432–437.
- [21] 何江华, 柳 勇, 王少毅, 等. 蔬菜对重金属富集能力的研究——以广州蔬菜生产基地为例[J]. *重庆环境科学*, 2003, 25(12): 4–8.  
HE Jiang-hua, LIU Yong, WANG Shao-yi, et al. A study on the enrichment ability of some popular vegetables for heavy metals in Guangzhou vegetable production base[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2003, 25(12): 4–8.
- [22] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14: 277–282.
- [23] 李登超, 朱祝军, 徐志豪, 等. 硒对小白菜生长和养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 353–358.  
LI Deng-chao, ZHU Zhu-jun, XU Zhi-hao, et al. Effects of selenium on the growth and nutrient absorption of pak choi[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3): 353–358.
- [24] 李向阳, 刘立军, 胡一鸿. 叶面喷施硒对水稻幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(20): 9414–9415.  
LI Xiang-yang, LIU Li-jun, HU Yi-hong. Effects of foliage spraying Se on seedling growth and anti-oxidant enzymes of rice[J]. *Anhui Agri Sci*, 2009, 37(20): 9414–9415.
- [25] 蒋光月, 崔德杰. 重金属 Cr 对小白菜种子萌发及生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25: 76–79.  
JIANG Guang-yue, CUI De-jie. Effects of chromium on chinese cabbage seeds germination and growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25: 76–79.
- [26] 王丽霞. 硒元素的植物生理作用及生理机制研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(1): 31–32, 47.  
WANG Li-xia. Research progress on physiological function and mechanism of selenium for plants[J]. *Anhui Agri Sci*, 2010, 38(1): 31–32, 47.
- [27] 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征的影响[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 pak-choi[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(5): 974–980.
- [28] 尚庆茂, 陈淑芳, 张志刚. 硒对高温胁迫下辣椒叶片抗氧化酶活性的调节作用[J]. *园艺学报*, 2005, 32(1): 35–38.  
SHANG Qing-mao, CHEN Shu-fang, ZHANG Zhi-gang. Regulation of selenium on antioxidative enzymes activity in pepper leaves under high temperature stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2005, 32(1): 35–38.
- [29] 赵决建. 外源硒对紫云英硒含量和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 334–336.  
ZHAO Jue-jian. Effect of applying Se on Se content and yield of milk vetch[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2004, 10(3): 334–336.
- [30] Fleming G A. Selenium in Irish soil and plants[J]. *Soil Science*, 1962, 94: 28–35.
- [31] de Souza M P. Rate-limiting steps in selenium assimilation and volatilization by Indian mustard[J]. *Plant Physiol*, 1998, 117: 1487–1494.
- [32] Shardendu U, Salhani N, Boulyga S F, et al. Phytoremediation of selenium by two helophyte species in subsurface flow constructed wetland[J]. *Chemosphere*, 2003, 50: 967–973.
- [33] Chaney R L, Malik M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8: 279–284.
- [34] Fang W X, Wu P W. Elevated selenium and other mineral element concentrations in soil and plant tissue in bone sites in Haoping area, Ziyang County, China[J]. *Plant and Soil*, 2004, 261: 135–146.