

天然富硒土壤上三种蔬菜对硒的吸收与转化差异

张青¹, 王煌平¹, 孔庆波¹, 章赞德², 粟方亮¹, 罗涛^{3*}

(1 福建省农业科学院土壤肥料研究所/福建省地力培育工程技术研究中心, 福州 350013; 2 福建省大田县农田建设与土壤技术推广站, 福建大田 366100; 3 福建省农业科学院农业生态研究所, 福州 350013)

摘要:【目的】研究对硒(Se)不同敏感性蔬菜对天然富硒土($Se \geq 0.4 \text{ mg/kg}$)中硒的吸收和转化差异, 为富硒土壤生产富硒蔬菜提供理论与技术指导。【方法】以大蒜、芥菜和菠菜三种蔬菜为试验材料, 在全硒含量为0.29、0.58、0.98、2.07 mg/kg的四种土壤上进行了盆栽试验(依次标记为 $Se_{0.29}$ 、 $Se_{0.58}$ 、 $Se_{0.98}$ 、 $Se_{2.07}$), 并测定四种土壤中不同形态硒的含量。芥菜和菠菜于生长40 d、53 d、68 d和82 d后取样, 测定蔬菜可食部分硒含量; 于生长97 d后收获, 分为根部和地上部。大蒜于生长42 d、68 d、82 d、120 d后取样, 测定地上部硒含量; 于生长166 d后收获, 分为根部、鳞茎和叶。测定供试蔬菜总硒含量、有机硒含量, 计算不同硒含量土壤上蔬菜对硒的吸收和转化系数。

【结果】三种蔬菜中芥菜的生长对土壤硒最为敏感, 芥菜可食部位生物量鲜重以 $Se_{0.29}$ 处理最高, 菠菜和大蒜均以 $Se_{0.58}$ 处理最高, 与 $Se_{2.07}$ 处理均达显著差异。三种蔬菜地上部硒含量在整个生育期总体呈现增加的趋势, 不同生育期均表现为大蒜>芥菜>菠菜。收获期三种蔬菜各部位的硒含量随着土壤硒含量(0.29~2.07 mg/kg)的增加而增加, 表现为 $Se_{2.07} > Se_{0.98} > Se_{0.58} > Se_{0.29}$, $Se_{2.07}$ 处理的菠菜地上部和地下部硒含量分别是其 $Se_{0.29}$ 处理的8.63倍和7.10倍, 芥菜是12.25倍和23.29倍, $Se_{2.07}$ 处理大蒜鳞茎和叶部硒含量是 $Se_{0.29}$ 处理的39.92倍和4.90倍; 可食部位硒含量为大蒜(7.25~289 $\mu\text{g/kg}$)>芥菜(1.22~14.9 $\mu\text{g/kg}$)>菠菜(0.73~6.30 $\mu\text{g/kg}$), 均表现为地下部>地上部, $Se_{2.07}$ 处理菠菜根部硒含量是茎叶的4.80倍, 芥菜是12.06倍, 大蒜是8.22倍。在富硒土壤 $Se_{0.98}$ 和 $Se_{2.07}$ 处理条件下, 大蒜和芥菜能从土壤中富集硒, 吸收系数是菠菜的3.06~8.47倍和1.58~5.8倍, 均达到了富硒蔬菜标准($\geq 0.01 \text{ mg/kg}$)。三种蔬菜可食部位有机硒含量占总硒比例为73.5%~84.7%, 并随土壤硒含量的增加而增加, 其中 $Se_{2.07}$ 与 $Se_{0.29}$ 处理差异显著; 蔬菜硒含量不但与土壤总硒含量相关, 而且与有效态硒含量呈显著正相关。【结论】蔬菜种类和土壤硒含量均影响蔬菜硒的吸收、转化和富集。三种蔬菜对土壤硒的敏感性以芥菜最强。蔬菜硒含量和可食用部位有机硒的转化率均随着土壤硒含量的增加而增加, 与土壤总硒含量和有效态硒含量呈显著正相关。富硒能力为大蒜>芥菜>菠菜, 在天然富硒土壤上生长的大蒜和芥菜硒含量易达到富硒蔬菜标准, 而菠菜未显示出富硒能力。因此, 虽然土壤硒含量高影响了大蒜和芥菜的生长, 但大蒜和芥菜具有较强的将硒转移到可食部位的能力, 可作为富硒蔬菜生产。

关键词: 蔬菜; 硒; 富硒土壤; 吸收; 转化; 有机硒

Difference of selenium uptake and transport of three vegetables in natural selenium-enriched soils

ZHANG Qing¹, WANG Huang-ping¹, KONG Qing-bo¹, ZHANG Zan-de², LI Fang-liang¹, LUO Tao^{3*}

(1 Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences/Land Cultivation Engineering Technology Research Center, Fuzhou 350013, China; 2 Datian Crop Land Construction and Soil and Fertilizer Station, Datian 366100, China; 3 Agricultural Ecology Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract: 【Objectives】The absorption and transformation of Se-sensitive vegetables in natural Se-rich soils were studied, in order to provide theoretical and technical guidance for the production of Se-enriched

收稿日期: 2018-10-11 接受日期: 2019-04-12

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2018J01057); 福建省农业科学院科技创新团队项目(STIT2017-2-10); 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B01-05)。

联系方式: 张青 Tel: 0591-87572920, E-mail: zhangqing202@163.com

* 通信作者 罗涛 Tel: 0591-87953373, E-mail: luotaofz@188.com

vegetables. **【 Methods 】** A pot experiment was conducted using garlic, mustard and spinach as tested vegetables. The treatments were four soils containing different total Se contents, which were used as the treatments marked as $S_{0.29}$, $S_{0.58}$, $S_{0.98}$ and $S_{2.07}$ in turn. Mustard and spinach samples were collected at the 40th, 53th, 68th and 82th day after transplanting, and harvested at the 97th day; garlic samples were collected at the 42th, 68th, 82th and 120th day, and harvested at the 165th day since transplanting. The plant samples were weighed, and the total and organic Se contents were analyzed as required. The uptake and translocation rate of Se in the vegetables were calculated. The contents of different Se fractions in the four soils were measured. **【 Results 】** Mustard was the most sensitive to soil Se among the three vegetables. The fresh biomass of edible parts of mustard was the highest in $Se_{0.29}$, and those of spinach and garlic were the highest in $Se_{0.58}$ treatment, which was significantly different from that of $Se_{2.07}$ treatment. Se content in shoots of three vegetables showed an increasing trend in the whole growth period, and all followed by the order of garlic > mustard > spinach in different growth periods. The Se contents in all parts of vegetables were increased with the increase of soil Se contents, from 0.29 mg/kg to 2.07 mg/kg. The Se contents in shoot and root treated with $Se_{2.07}$ were 8.63 and 7.10 times of those treated with $Se_{0.29}$ in spinach, 12.25 and 23.29 times in mustard, while 39.92 and 4.90 times in garlic bulb and leaf. The Se contents in vegetable edible parts were in order of garlic (7.25–289.42 $\mu\text{g}/\text{kg}$) > mustard (1.22–14.94 $\mu\text{g}/\text{kg}$) > spinach (0.73–6.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$). The Se contents in underground parts were all higher than those in aboveground parts. The Se content in root was 4.8, 12.6 and 8.22 times higher than that in stem and leaf in $Se_{2.07}$ treatment in the growth of spinach, mustard and garlic, respectively. The garlic and mustard could enrich Se from Se rich soils, and the absorption coefficients were 3.06–8.47 times and 1.58–5.8 times of that in spinach, respectively. Garlic and mustard grown in $Se_{0.98}$ and $Se_{2.07}$ soils reached the Se-rich standard for vegetable except for spinach in this study. The proportion of organic Se content in edible parts of these vegetables accounted for 73.5%–84.7%, which was increased with the increased Se content in soils. The organic Se proportion in $Se_{2.07}$ treatment was significantly higher than that in $Se_{0.29}$ treatment. Thus, the vegetable Se contents were not only related to the total soil Se contents, but also positively linked with the available Se contents in soils. **【 Conclusions 】** Vegetable type and soil selenium content all affect the absorption, transformation and enrichment of selenium in vegetables. Three kinds of vegetables are sensitive to selenium content in soil, and mustard is the most sensitive. The selenium content and the conversion rate of organic selenium in edible parts increase with the increase of soil selenium content and show a significant positive correlation with the total selenium content and available selenium content in soil. The selenium enriching ability is garlic > mustard > spinach, the selenium content in garlic and mustard grow on the naturally selenium rich soil easily reaches the selenium rich vegetable standard, but spinach does not show the selenium rich ability. Therefore, although high soil selenium content affects the growth of garlic and mustard, garlic and mustard have a strong ability to transfer selenium to edible parts and can be used as selenium-rich vegetables.

Key words: vegetable; selenium; Se-enriched soil; absorption; conversion; organic Se

硒 (Se) 是人和动物必需的微量营养元素之一, 对人体健康起着非常重要的作用^[1-2], 国际硒学会推荐人体对硒的需求量标准是 60 $\mu\text{g}/\text{d}$, 中国营养学会的推荐标准是 50 $\mu\text{g}/\text{d}$ ^[3], 而 Taylor 等^[4]通过对我国 13 个省市的调查发现, 目前我国成人每日的摄硒量仅为 26.63 μg , 远低于营养学会的推荐标准, 缺硒现象普遍存在, 而且较为严重。福建省国土资源厅调查表明, 福建省富硒土地占全省土地面积的 1/4, 其城市郊区蔬菜硒含量状况为葱蒜类硒含量 10.64

$\mu\text{g}/\text{kg}$, 芥菜类硒含量 10.63 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 绿叶类硒含量 9.08 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[5]。也有研究表明, 福建省蔬菜中硒含量均小于 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[6], 如果按每日蔬菜的平均摄入量为 255 g 计算^[7], 福建省居民从蔬菜中摄入的硒每日约为 2.6 μg , 仅占中国营养学会推荐标准的 5.2%。因此, 如何利用当地的富硒资源, 合理提高蔬菜中硒含量对人类硒营养健康具有重要意义。

蔬菜是人们日常饮食中必不可少的食物之一, 可提高人体所必需的维生素、矿物质和膳食纤维,

蔬菜种类繁多, 不同蔬菜对硒的吸收、积累和转运的能力不同, 处于同一土壤环境和自然条件下的同种蔬菜中硒的含量也存在差异。Fleming^[2]研究发现, 十字花科、百合科和豆科作物对 Se 的耐受程度比菊科、禾本科植物强; 魏廷珍等^[8]研究表明, 不同蔬菜对 Se 的吸收能力依次为大蒜 > 马铃薯 > 萝卜 > 胡萝卜 > 甜菜; 不同种类蔬菜可食部分富硒能力依次为葱蒜类 > 白菜类 > 绿叶菜类 > 豆类 > 瓜类 > 薯芋类 > 茄果类^[9]。蔬菜的不同部位对硒的吸收能力也不同^[10], 一般为可食部位的含硒量低于非可食部位的含硒量, 为根 > 叶 > 茎 > 果实(籽粒)^[11], 万洪福^[12]的研究发现大麦、番茄和甜菜的可食部位的硒含量要比非可食部位低, 这与 Wan 等^[13]的研究结果一致。对同种蔬菜的富硒能力的研究结果也各不相同, 可能是因为不同研究所选的品种和土壤性质不同, 不能直接进行比较。因此, 本试验选用 3 种蔬菜在 4 种不同硒含量的土壤中进行种植, 比较不同蔬菜在同种土壤上的硒含量和同种蔬菜在不同硒含量土壤上的硒含量情况。

蔬菜对土壤中硒的吸收除了与硒的总含量有关外, 还与硒在土壤中的存在形态有关, 土壤中总硒含量高的, 生长的作物硒含量并不一定高。以往的许多研究是通过外源喷施或土施硒来达到生产富硒产品的目的, 但这种方法存在成本增加, 施用量不当可能对植物造成危害、对环境造成污染的问题。本文采用在硒含量不同的天然土壤上, 种植对硒敏感程度不同的三种蔬菜, 研究不同蔬菜在不同硒含量土壤上对硒的吸收、转化和硒不同形态与蔬菜硒含量的关系, 以期为在不同硒含量的天然土壤上种植合适蔬菜提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自福建省大田县, 硒含量分别为

0.29、0.58、0.98 和 2.07 mg/kg, 分别用 Se_{0.29}、Se_{0.58}、Se_{0.98}、Se_{2.07} 表示, 土壤类型为红壤。取 0—20 cm 土壤, 自然风干, 研磨后过 2 cm 筛备用, 其基本理化性质见表 1。供试蔬菜为台友丹麦菠菜 (*Spinacia oleracea* Linn)、盖山宽杆芥菜 (*Ipomoea aquatica*) 和山东大蒜 (*Allium sativum* L.)。

1.2 试验设计

试验于 2017 年 9 月 3 日在福建省农业科学院土壤肥料研究所网室内进行。共设 12 个处理, 即在 Se_{0.29}、Se_{0.58}、Se_{0.98} 和 Se_{2.07} 四种土壤上分别种植芥菜、大蒜和菠菜, 每个处理 6 次重复。试验所用盆钵为聚乙烯盆(直径 25 cm、高 16.5 cm), 每盆装土 4 kg, 共 72 盆, 随机排列。各处理肥料用量均为尿素 0.67 g/kg 土、过磷酸钙 0.60 g/kg 土、氯化钾 0.50 g/kg 土。大蒜、芥菜和菠菜播种量分别为每盆 6 粒、20 粒和 20 粒。肥料中 70% 尿素、全部磷、钾肥与土壤充分混匀做基肥, 另 30% 尿素做追肥施用。3 种蔬菜整个生育期均用纯净水浇灌, 进行常规管理, 芥菜和菠菜在生长 40 d、53 d、68 d 和 82 d 取样, 测定蔬菜可食部分硒含量, 生长 97 d 收获, 收获后分别采集芥菜和菠菜地下部和地上部, 大蒜分别在生长 42 d、68 d、82 d、120 d 后取样, 测定植株硒含量, 生长 165 d 后收获根、鳞茎和叶, 收获的植株用纯净水洗净、晾干称重后, 于 105℃ 杀青 30 min, 75℃ 烘干至恒重, 称重磨碎后备用, 同时收获后的土样经风干磨碎后备用。

1.3 测定指标与方法

土壤中硒的形态参照瞿建国等^[14]推荐的逐级连续化学浸提技术进行; 土壤硒测定参考行业标准方法^[15]; 土壤有效硒的测定采用 0.5 mol/L NaH₂PO₄ 溶液浸提; 植株硒测定参考国家标准^[16]方法; 植株无机硒的测定为称取 2.5 g 样品于 50 mL 具塞试管中, 加入 6 mol/L 的 HCl 溶液 20 mL, 充分混匀后置于 70℃ 的

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soils

处理 Treatment	全硒 Total Se (mg/kg)	pH	CEC (cmol/kg)	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	碱解氮 Alk.-hydr. N (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)	速效磷 Avail. P (mg/kg)
Se _{0.29}	0.29	5.25	10.41	25.25	1.44	0.59	12.60	128.59	195.50	45.49
Se _{0.58}	0.58	5.21	17.59	27.96	1.99	2.88	9.49	109.19	193.88	96.03
Se _{0.98}	0.98	5.01	9.41	13.97	0.78	0.24	9.43	62.00	109.89	37.14
Se _{2.07}	2.07	4.96	14.42	24.63	1.56	1.43	6.09	155.89	183.57	57.96

恒温水浴中振荡浸提 2 h, 冷却至室温后用 6 mol/L HCl 溶液定容至 25 mL, 再经脱脂棉过滤。取滤液 12.5 mL 于 25 mL 具塞刻度试管中, 并置于沸水浴中加热 20 min, 冷却至室温后分别加入 2.5 mL 铁氰化钾溶液、正辛醇 3 滴, 加水定容, 混匀后待测, 测定方法同总硒, 植株有机硒含量为总硒含量与无机硒含量的差值。土壤理化性质采用常规农化分析方法^[7]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS19.0 软件进行数据分析, 用 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验。

蔬菜对硒的转化率 = 有机硒含量/总硒含量 × 100%;

蔬菜对硒的吸收系数 = 蔬菜根部硒含量/土壤硒含量;

蔬菜对硒的转移系数 = 蔬菜地上部(可食部位)硒含量/地下部位(根)硒含量。

2 结果与分析

2.1 不同硒含量土壤对三种蔬菜生物量的影响

由表 2 可以看出, 三种蔬菜的生长对土壤硒含量均很敏感。芥菜对硒最为敏感, 四个土壤的根系鲜重呈现 $Se_{0.29} > Se_{0.58} > Se_{0.98}$, 且三个土壤处理之间差异显著。 $Se_{2.07}$ 的根系鲜重与 $Se_{0.58}$ 、 $Se_{0.98}$ 差异未达

到显著水平, 但也显著低于 $Se_{0.29}$ 。芥菜的植株鲜重 $Se_{0.29}$ 和 $Se_{0.58}$ 之间差异不显著, 二者均显著高于 $Se_{0.98}$ 和 $Se_{2.07}$ 。菠菜对硒也敏感, 土壤硒含量低于 1 mg/kg 的 $Se_{0.29}$ 、 $Se_{0.58}$ 和 $Se_{0.98}$ 植株鲜重没有显著差异, 但均显著高于 $Se_{2.07}$ 。而菠菜根系鲜重含硒低的三个土壤也显著高于含硒高的 $Se_{2.07}$ 。大蒜鳞茎鲜重 $Se_{0.29}$ 和 $Se_{0.58}$ 处理显著高于 $Se_{0.98}$ 和 $Se_{2.07}$ 处理, 根长和株高均以 $Se_{0.58}$ 处理最高, 与其他处理差异显著。

2.2 不同硒含量土壤对三种蔬菜不同生长期地上部硒含量的影响

由图 1 可知, 三种蔬菜地上部硒含量在整个生育期呈现先增加后降低, 最后再增加的趋势。可能是因为蔬菜生育中期进入生长旺盛时期, 生物量增长较快, 蔬菜地上部硒含量出现稀释效应, 蔬菜整个生育期整体上表现为增加的趋势。因此, 适当增加蔬菜生长时间可以提高地上部硒含量。

同种蔬菜菜体中硒含量随着土壤硒含量的升高而增加, 表现为 $Se_{2.07}(1.28 \sim 31.98 \mu\text{g}/\text{kg}) > Se_{0.98}(0.84 \sim 18.12 \mu\text{g}/\text{kg}) > Se_{0.58}(0.67 \sim 7.73 \mu\text{g}/\text{kg}) > Se_{0.29}(0.28 \sim 7.04 \mu\text{g}/\text{kg})$ 。同时, 不同蔬菜硒含量在相同硒含量土壤中也不相同, 基本表现为大蒜 $(2.64 \sim 31.98 \mu\text{g}/\text{kg}) >$ 芥菜 $(0.31 \sim 14.94 \mu\text{g}/\text{kg}) >$ 菠菜 $(0.28 \sim 7.14 \mu\text{g}/\text{kg})$ 。由此可知, 植物中的硒含量与土壤中硒含量呈正相关, 不同蔬菜对硒的吸收能力不

表 2 不同硒含量土壤对收获期蔬菜生物量的影响

Table 2 Effects of different soil Se concentrations on the vegetables biomass at harvest stage

蔬菜 Vegetable	处理 Treatment	根长 (cm) Root length	株高 (cm) Height	根系鲜重 (g/plant, FW) Root weight	植株鲜重 (g/plant, FW) Shoot weight	鳞茎鲜重 (g/plant, FW) Bulb weight
菠菜 Spinach	$Se_{0.29}$	10.00 ± 1.32 b	24.17 ± 2.02 ab	6.11 ± 0.62 ab	145.12 ± 3.54 a	
	$Se_{0.58}$	10.67 ± 1.53 b	27.00 ± 3.61 a	6.88 ± 0.91 a	156.79 ± 5.84 a	
	$Se_{0.98}$	12.13 ± 1.03 b	20.67 ± 1.15 bc	6.98 ± 0.47 a	147.89 ± 1.89 a	
	$Se_{2.07}$	15.33 ± 1.53 a	18.67 ± 3.06 c	5.68 ± 0.71 b	126.99 ± 7.63 b	
芥菜 Mustard	$Se_{0.29}$	9.50 ± 1.73a b	25.50 ± 2.18 a	15.59 ± 3.22 a	225.35 ± 10.90 a	
	$Se_{0.58}$	10.00 ± 1.00 a	23.60 ± 2.33 a	10.23 ± 4.15 b	212.18 ± 12.65 a	
	$Se_{0.98}$	7.40 ± 0.10 b	19.67 ± 3.06 a	8.76 ± 0.76 c	186.05 ± 8.22 b	
	$Se_{2.07}$	7.30 ± 1.50 b	22.33 ± 1.52 a	9.14 ± 1.92 bc	175.98 ± 6.94 b	
大蒜 Garlic	$Se_{0.29}$	12.71 ± 1.15 b	28.66 ± 0.59 c	26.01 ± 1.52 ab	94.06 ± 4.19 a	133.62 ± 3.95 a
	$Se_{0.58}$	16.96 ± 1.05 a	35.88 ± 1.04 a	28.02 ± 2.53 a	93.57 ± 3.44 a	142.48 ± 3.96 a
	$Se_{0.98}$	10.13 ± 0.81 c	33.60 ± 1.01 b	22.66 ± 2.06 b	64.00 ± 5.49 b	113.21 ± 3.96 b
	$Se_{2.07}$	10.33 ± 1.15 c	28.50 ± 0.50 c	14.59 ± 1.67 c	54.90 ± 5.69 c	106.23 ± 9.50 b

注 (Note): 数据后不同小写字母代表不同处理之间在 0.05 水平下差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different at the 0.05 level.

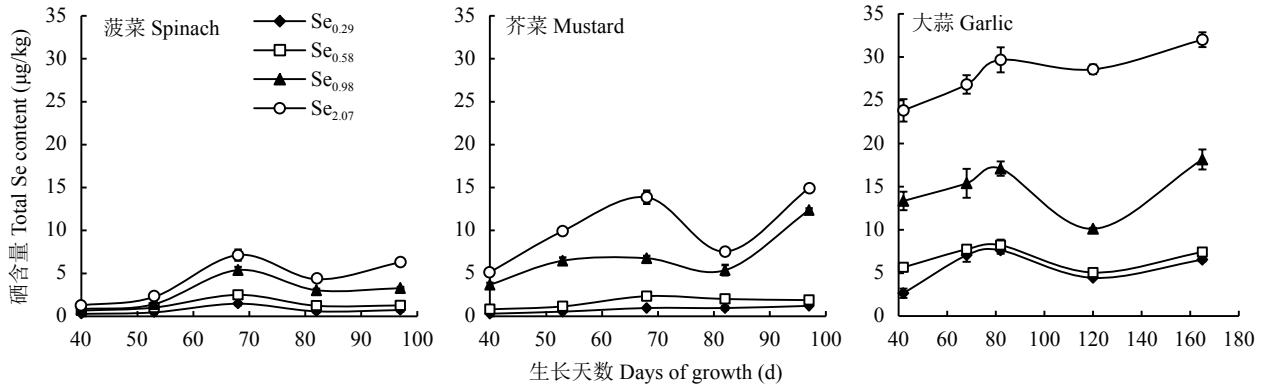


图 1 不同硒含量土壤上蔬菜生长期地上部硒含量变化

Fig. 1 Change of selenium content in shoots during vegetables growing season in soils with different Se concentrations

同, 在生产过程中根据需求和土壤硒含量选择不同富硒能力的蔬菜种植。

2.3 不同硒含量土壤对三种蔬菜不同部位硒含量和吸收量的影响

由图 2 可见, 蔬菜鲜样地上部和地下部硒含量均随着土壤硒含量的增加显著增加, 可食部分含硒量 $Se_{2.07}$ 显著高于 $Se_{0.98}$, 这两个处理又显著高于 $Se_{0.29}$ 和 $Se_{0.58}$, 而后两个处理间差异不显著。菠菜和芥菜根部含量四个土壤处理间的高低变化与地上部相同, 但均显著高于可食部分。大蒜根部硒含量显著高于叶部, 但是低于鳞茎。在四种硒含量土壤中, 三种蔬菜地上部和根部硒含量均表现为大蒜 > 芥菜 > 菠菜。收获期三种蔬菜可食部位硒吸收量表现为大蒜 (1.04~30.75 µg) > 芥菜 (0.81~1.88 µg) > 菠菜 (0.14~0.80 µg)(图 3), 并且随着土壤硒含量的增加蔬菜硒的吸收量也随之增加, $Se_{0.29}$ 、 $Se_{0.58}$ 、 $Se_{0.98}$ 和 $Se_{2.07}$ 四种硒含量的土壤上大蒜可食部位硒吸收量分别为 1.04、1.35、20.81 和 30.75 µg/pot, 芥菜

为 0.81、1.01、1.68 和 1.88 µg/pot, 菠菜为 0.14、0.29、0.49 和 0.80 µg/pot。其中, $Se_{0.98}$ 和 $Se_{2.07}$ 的芥菜可食部位以及大蒜鳞茎和叶部含硒量均达到了富硒标准 (0.01 mg/kg)^[18], 而菠菜可食部位在 4 种土壤均未达到富硒标准。

2.4 三种蔬菜可食部位有机硒、无机硒含量及有机硒比例

蔬菜吸收的硒, 可以通过自身的生化作用转化为有机态硒, 有机硒含量越高, 利用越安全, 利用率也越高。试验结果表明 (表 3), 蔬菜中总硒、无机硒和有机硒含量均随土壤硒含量的增加而增加, 有机硒含量的增加幅度高于无机硒。菠菜有机硒在全硒中的比例在 73.5%~84.7% 之间, $Se_{2.07}$ 菠菜的有机硒比例显著高于 $Se_{0.29}$, 但与 $Se_{0.58}$ 、 $Se_{0.98}$ 差异不显著, $Se_{0.58}$ 、 $Se_{0.98}$ 与 $Se_{0.29}$ 差异也不显著。芥菜有机硒占比在 76.7%~86.6% 之间, 大蒜在 78.3%~88.5% 之间。菠菜和大蒜 $Se_{2.07}$ 、 $Se_{0.98}$ 处理有机硒占比差异不显著, 但大蒜显著高于 $Se_{0.58}$ 和 $Se_{0.29}$ 。相同

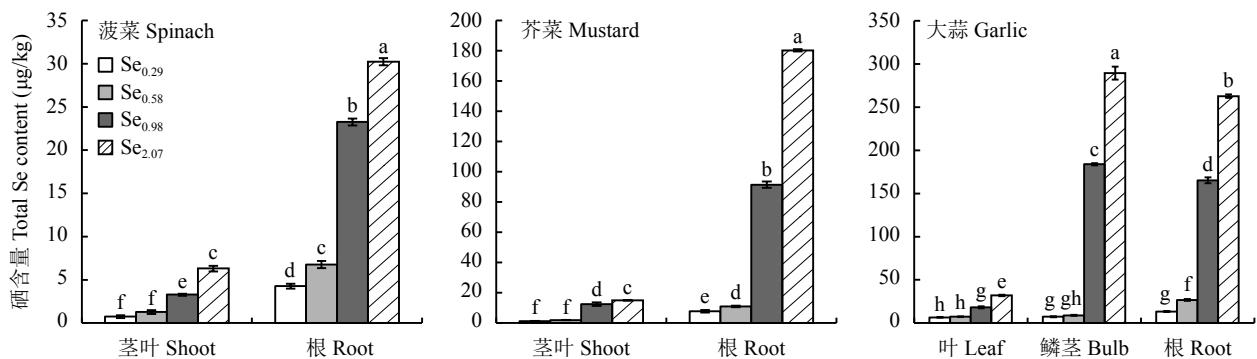


图 2 不同硒含量土壤中蔬菜不同部位的硒含量

Fig. 2 Se content in different parts of vegetables in soils with different Se concentrations

[注 (Note): 柱上不同小写字母代表不同处理之间在 0.05 水平下差异显著
Different letters above the bars indicate significantly different at the 0.05 level.]

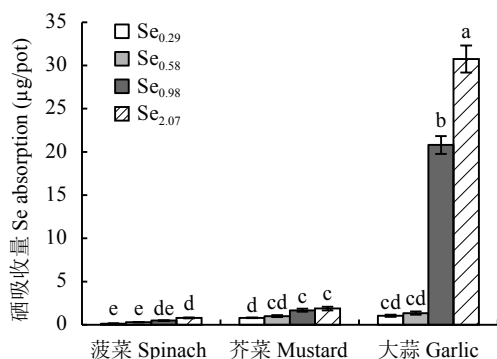


图3 不同硒含量土壤中三种蔬菜硒的吸收量

Fig. 3 Se absorption of three vegetables in soils with different Se concentrations

[注 (Note): 柱上不同小写字母代表不同处理间在 0.05 水平下差异显著 Different letters above the bars indicate significantly different at the 0.05 level.]

硒含量土壤中三种蔬菜的有机硒比例没有显著差异, 表明蔬菜有机硒的比例与土壤含硒量有关, 而与蔬菜种类关系不大。

2.5 蔬菜对土壤硒的吸收和转移

表4表明, 三种蔬菜根系对土壤硒的吸收系数不同。菠菜和大蒜吸收系数 $Se_{0.98}$ 处理显著高于其他处理, 而芥菜 $Se_{0.98}$ 、 $Se_{2.07}$ 显著高于 $Se_{0.29}$ 、 $Se_{0.58}$ 土壤。可见, $Se_{0.98}$ 是供试蔬菜可以接受的土壤硒含量上限。 $Se_{0.29}$ 、 $Se_{0.58}$ 、 $Se_{0.98}$ 和 $Se_{2.07}$ 处理大蒜吸收系数

分别是芥菜的 1.70、2.42、1.82 倍和 1.46 倍, 是菠菜的 3.07、3.83、7.04 倍和 8.47 倍。可见, 大蒜是容易富集硒的作物。

三种蔬菜可食部位对根部硒的转移系数不同。菠菜的转移系数以 $Se_{2.07}$ 、 $Se_{0.58}$ 显著高于 $Se_{0.98}$ 处理, 芥菜以 $Se_{0.58}$ 、 $Se_{0.29}$ 、 $Se_{0.98}$ 显著高于 $Se_{2.07}$ 处理, 大蒜以 $Se_{0.98}$ 、 $Se_{2.07}$ 显著高于 $Se_{0.29}$ 、 $Se_{0.58}$ 处理, 三种蔬菜转移系数大小顺序为大蒜 > 菠菜 > 芥菜。可见, 大蒜不但容易从土壤中吸收硒, 而且从根部向可食部位转移硒的能力也比较强, 可作为富硒蔬菜种植。

2.6 土壤中不同形态硒与蔬菜硒含量相关性

由表5可看出, 土壤有效硒含量、土壤各形态硒含量均与蔬菜硒含量呈正相关, 菠菜、芥菜和大蒜中硒含量与土壤有效硒含量均呈显著正相关, 其中, 菠菜和大蒜中硒含量也与土壤总硒含量呈显著或极显著的正相关, 而芥菜中硒含量与土壤总硒含量未达显著水平, 可见, 土壤有效硒含量与蔬菜硒含量的相关程度高于土壤总硒含量。可溶态和可交换态都是易被作物吸收的形态, 可交换态硒含量与三种蔬菜硒含量均呈显著或极显著正相关。由此可见, 土壤各形态硒含量主要受土壤总硒含量的影响, 同时土壤有效硒和总硒含量与蔬菜硒含量呈显著或极显著正相关, 土壤有效硒和土壤总硒含量对蔬菜硒的影响较大。

表3 蔬菜可食部位有机硒含量及其在全硒中的占比

Table 3 Organic Se concentration and its proportion in total Se of edible vegetable parts

蔬菜 Vegetable	土壤 Soil	总硒含量 (µg/kg) Total Se	无机硒含量 (µg/kg) Inorganic Se	有机硒含量 (µg/kg) Organic Se	有机占比 (%) Organic Se proportion
菠菜 Spinach	$Se_{0.29}$	0.73 ± 0.17 d	0.19 ± 0.04 c	0.54 ± 0.13 d	73.54 ± 1.38 b
	$Se_{0.58}$	1.27 ± 0.23 c	0.29 ± 0.05 c	0.98 ± 0.18 c	77.25 ± 0.73 ab
	$Se_{0.98}$	3.28 ± 0.12 b	0.64 ± 0.07 b	2.64 ± 0.15 b	80.46 ± 2.35 ab
	$Se_{2.07}$	6.30 ± 0.33 a	0.97 ± 0.07 a	5.33 ± 0.27 a	84.67 ± 0.37 a
芥菜 Mustard	$Se_{0.29}$	1.22 ± 0.07 c	0.29 ± 0.04 b	0.94 ± 0.04 c	76.69 ± 1.43 b
	$Se_{0.58}$	1.89 ± 0.11 c	0.40 ± 0.06 b	1.49 ± 0.06 c	78.69 ± 1.70 b
	$Se_{0.98}$	12.38 ± 1.2 b	2.08 ± 0.19 a	10.30 ± 1.02 b	83.15 ± 0.43 a
	$Se_{2.07}$	14.94 ± 0.18 a	1.01 ± 0.14 a	12.93 ± 0.05 a	86.55 ± 0.80 a
大蒜 Garlic	$Se_{0.29}$	7.25 ± 0.60 c	1.58 ± 0.12 c	5.68 ± 0.50 c	78.27 ± 0.96 b
	$Se_{0.58}$	8.88 ± 0.55 c	1.84 ± 0.16 c	7.04 ± 0.40 c	79.30 ± 0.61 b
	$Se_{0.98}$	183.85 ± 1.27 b	24.41 ± 0.60 b	159.44 ± 0.72 b	86.72 ± 0.24 a
	$Se_{2.07}$	289.42 ± 7.47 a	33.31 ± 2.36 a	256.11 ± 5.14 a	88.50 ± 0.53 a

注 (Note): 数据后不同小写字母代表不同处理间在 0.05 水平下差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different at the 0.05 level.

表 4 蔬菜对土壤硒的吸收和转移系数

Table 4 Se absorption and transfer coefficients of vegetables in soils with different Se concentrations

处理 Treatment	吸收系数 Absorption coefficient			转移系数 Transfer coefficient		
	菠菜 Spinach	芥菜 Mustard	大蒜 Garlic	菠菜 Spinach	芥菜 Mustard	大蒜 Garlic
Se _{0.29}	0.015 b	0.027 b	0.046 c	0.17 ab	0.16 a	0.55 b
Se _{0.58}	0.012 c	0.019 b	0.046 c	0.19 a	0.17 a	0.33 c
Se _{0.98}	0.024 a	0.093 a	0.169 a	0.14 b	0.14 a	1.11 a
Se _{2.07}	0.015 b	0.087 a	0.127 b	0.21 a	0.08 b	1.10 a

注 (Note): 吸收系数 (Absorption coefficient) = 根部硒含量 (Se content in root)/土壤硒含量 (Se content in soil); 转移系数 (Transfer coefficient) = 蔬菜可食部位硒含量 (Edible part Se content/根部硒含量 (Root Se content)); 数据后不同小写字母代表不同处理间在 0.05 水平下差异显著 Values followed by different letters in a column are significantly different at the 0.05 level.

表 5 土壤不同形态硒与蔬菜可食部分硒含量的相关性

Table 5 Correlation between the Se content in different forms and the Se content in edible parts of vegetables

蔬菜硒含量 Se content of vegetables	土壤有效硒 Soil available Se	土壤有效硒					总硒量 Total Se
		F1	F2	F3	F4	F5	
菠菜 Spinach	0.94*	0.94*	0.96*	0.92*	1.00**	0.96*	0.99**
芥菜 Mustard	0.99*	0.77	0.99**	0.87	0.91*	0.80	0.89
大蒜 Garlic	0.97*	0.86	0.98*	0.88	0.96*	0.88	0.95*

注 (Note): F1—可溶态硒 Soluble Se; F2—可交换态及碳酸盐结合态硒 Exchangeable and carbonate binding Se; F3—铁-锰氧化物结合态硒 Fe-Mn oxide bonding Se; F4—有机物-硫化物结合及元素态硒 Organic-sulfide binding and elemental Se; F5—残渣态硒 Residue Se. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

3 讨论

3.1 不同硒含量土壤对蔬菜产量的影响

硒对植物的生长有双重作用, 适量的硒不仅能够提高作物的产量, 而且可以有效改善作物的营养品质, 但是硒浓度过高则对植物产生毒害作用^[19-23]。夏永香等^[24]的研究表明, 叶面喷施适量的硒 (喷 2 次 10 mg/L) 能促进大蒜的生长, 而喷硒浓度和次数增加 (3 次, 15 mg/L) 则明显抑制了大蒜的生长; 姜超强等^[25]研究表明当土壤硒浓度过高 (≥ 1.5 mg/kg) 时对水稻产量构成不良影响。本研究所选用的 4 种土壤, 除了硒含量不同外, 肥力状况也稍有不同, 所以蔬菜产量的差异一方面与硒含量不同有关, 另一方面也与土壤的基础养分有关。从 Se_{0.98} 和 Se_{2.07} 这两个土壤的养分状况来看, Se_{2.07} 的土壤肥力水平高于 Se_{0.98} 的土壤, 但是菠菜、芥菜和大蒜的产量都是 Se_{0.98} 的处理高于 Se_{2.07}, 这可能是由于 Se_{2.07} 的土壤中硒含量过高, 对蔬菜的生长造成了一定的影响, 具体原因有待进一步研究。

3.2 不同类型蔬菜对硒吸收的差异

在农作物中, 十字花科植物累积硒的能力最

强, 其次是黑麦草, 而后是豆科植物, 谷类是最低的, 而谷类中小麦对硒的积聚最多^[26]。在蔬菜中, 大蒜的含硒量最高, 可以达到 300 mg/kg^[27]。并且在蔬菜中, 非可食部位的含硒量要高于可食部位^[28], 这与本研究的结论一致, 在 Se_{0.98} 和 Se_{2.07} 的土壤上芥菜和大蒜都达到富硒标准, 而菠菜均未达到, 三种蔬菜对硒的吸收能力顺序为大蒜 > 芥菜 > 菠菜, 而且非可食部位 > 可食部位。大蒜对硒富集能力最强, 其吸收系数最高, 在 0.046~0.169 之间, 其次为芥菜, 在 0.019~0.093 之间, 菠菜最低, 在 0.012~0.024 之间, 据此可以根据所属科目筛选出富硒能力较强的蔬菜。开发富硒蔬菜资源就要从富硒植物的筛选和土壤硒调控 2 个方面加以考虑, 筛选出适合当地种植的富硒蔬菜品种, 然后调控土壤有效硒含量, 制定合理的施肥方案, 为开发利用富硒植物资源提供重要科学依据。

3.3 不同硒含量土壤对蔬菜硒含量的影响

由于不同植物种类对 Se 的吸收、积累和运转能力不同, 处于同一土壤环境和自然条件下的不同植物硒的含量也存在着差异。许多研究表明, 植物体内的硒含量随土壤中硒含量的增高而增加^[29-31], 本试

验也得到同样的结果, 即, 三种蔬菜地上、地下部硒含量均随土壤硒浓度的升高而增加, 芥菜和大蒜在 $Se_{0.98}$ 和 $Se_{2.07}$ 的土壤上均达到富硒标准, 而菠菜在四种土壤上均未达到标准, 原因是大蒜为藜科植物、芥菜为十字花科植物, 具有较强的吸收并挥发硒的能力^[2], 说明大蒜和芥菜能充分吸收土壤中的硒, 在土壤硒达到一定含量时, 能生产富硒大蒜和芥菜, 取代叶面喷硒或土壤施用硒肥, 可满足人体硒营养的要求。在天然富硒土壤上种植蔬菜, 一方面能够产出营养价值高的天然富硒蔬菜, 充分体现纯天然、绿色生态的优越性; 另一方面能够节省外源添加硒肥的成本, 同时也避免了外源硒可能导致的土壤和水体污染。

大蒜和芥菜在 $Se_{0.98}$ 和 $Se_{2.07}$ 土壤上可食部位硒含量达到富硒标准, 而水稻在 $Se \geq 1.5 \text{ mg/kg}$ 土壤上生产的大米 (0.319 mg/kg) 超过了硒的限量标准 (0.3 mg/kg)^[25], 则有可能是因为水稻比蔬菜容易富集硒, 需要在同一种富硒土壤上同时种植水稻和蔬菜进行验证。由于本研究中天然富硒土壤硒含量范围较小 ($0.29 \sim 2.07 \text{ mg/kg}$), 因此, 土壤中比本研究更高的硒含量是否会使菠菜富硒或大蒜和芥菜硒超标, 则有待进一步研究。

3.4 蔬菜对土壤硒的吸收和转移

根系吸收系数反映了土壤中该物质的生物有效性, 吸收系数越大, 说明土壤中硒越易被蔬菜吸收利用, 硒的生物有效性越大^[32-33]。菠菜根系硒含量在 $0.004 \sim 0.030 \text{ mg/kg}$, 芥菜根系硒含量在 $0.008 \sim 0.180 \text{ mg/kg}$, 大蒜根部硒含量在 $0.013 \sim 0.263 \text{ mg/kg}$, 均显著低于土壤中硒含量。大蒜的吸收系数在 $0.046 \sim 0.169$, 芥菜吸收系数在 $0.019 \sim 0.093$, 菠菜吸收系数在 $0.012 \sim 0.024$, 三种蔬菜吸收系数均小于 1, 说明三种蔬菜根系不容易富集硒。段曼莉等^[34]研究表明, 外源喷施硒酸钠, 芥菜吸收系数为 $87.48 \sim 215.94$, 菠菜吸收系数为 $9.73 \sim 38.70$, 远大于本试验中芥菜和菠菜的吸收系数, 这可能是因为本试验是自然富硒土壤, 硒的有效性较低, 不容易被根系吸收, 而段曼莉等的试验为喷施硒酸钠, 容易被蔬菜吸收。芥菜吸收系数大于菠菜吸收系数, 与本试验结果一致。三种蔬菜吸收系数均为 $Se_{0.98}$ 时最大, 土壤硒含量继续增加时, 吸收系数反而降低, 说明土壤硒达到一定含量时, 继续升高, 根系对土壤硒的利用率会有所降低。

转移系数为蔬菜地上部 (可食部位) 硒含量与地

下部位 (根) 硒含量的比值, 反映作物由根部向可食部位转运硒的能力。大蒜转移系数在 $0.33 \sim 1.11$ 之间, 菠菜在 $0.14 \sim 0.21$ 之间, 芥菜在 $0.08 \sim 0.17$ 之间, 大蒜的转移系数和吸收系数都为最高, 因此大蒜可食部位硒含量高于芥菜和菠菜。

天然植物中硒主要以硒酸盐和有机硒存在, 有机硒主要以硒代蛋氨酸形式存在于蛋白质中, 基于有机硒的毒性要远远小于无机硒, 因此最安全的补硒途径是摄入足量的有机硒, 是人体安全有效的补硒形态^[35-36]。三种蔬菜有机硒的转化率均随着土壤硒含量的升高而增加, 与刘庆等^[29]的研究结果一致。菠菜有机硒转化率在 $73.5\% \sim 84.7\%$ 之间, 芥菜转化率为 $76.7\% \sim 86.6\%$ 之间, 大蒜转化率为 $78.3\% \sim 88.5\%$ 之间, 3 种蔬菜的转化率为大蒜稍高于芥菜和菠菜, 但差异不大, 说明不同蔬菜之间有机硒的转化率差别不大。刘庆等^[29]研究表明玉米中有机硒转化率为 $86.9\% \sim 90.8\%$, 宁婵娟等^[37]研究表明, 喷施 3 次 100 mg/L 硒时, 苹果有机硒的转化率为 87.7% 。莜麦有机硒转化率为 $71.2\% \sim 82.5\%$ ^[31], 胡婷等^[38]研究表明, 浇灌不同质量浓度的 Na_2SeO_3 溶液茄子、辣椒和西红柿中有机硒转化率分别为 80.0% 、 79.6% 和 90.0% 。可见, 无论是蔬菜、稻谷还是水果, 自然富硒还是外源施硒, 有机硒的转化率均在 70% 以上, 自然富硒和外源喷硒对有机硒转化率影响不大。因此, 结合我国三分之二以上地区缺硒的实际情况, 可以适量的进行外源施加硒肥, 再根据不同蔬菜品种吸收硒能力的差异, 选择高效安全的补硒途径尤为重要。

4 结论

菠菜、芥菜和大蒜各部位的硒含量随着土壤硒含量 ($0.29 \sim 2.07 \text{ mg/kg}$) 的增加而增加, 表现为 $Se_{2.07} > Se_{0.98} > Se_{0.58} > Se_{0.29}$; 菠菜和芥菜各部位硒含量分布情况为地下部 > 地上部, $Se_{0.29}$ 和 $Se_{0.58}$ 的大蒜各部位硒含量分布情况为根部 > 鳞茎 > 叶部, $Se_{0.98}$ 和 $Se_{2.07}$ 的大蒜各部位硒含量分布则为鳞茎 > 根部 > 叶部, 同时 3 种蔬菜可食部位硒含量表现为大蒜 > 芥菜 > 菠菜。在富硒土壤条件下, 大蒜和芥菜能从土壤中富集硒, 吸收系数和转移系数大于菠菜, $Se_{0.98}$ 和 $Se_{2.07}$ 土壤上生长的大蒜和芥菜达到了富硒蔬菜标准, 而生长的菠菜未达到富硒标准。因此, 在自然富硒的土壤上种植富硒蔬菜时, 不但要考虑土壤硒含量, 而且要考虑蔬菜种类。

参 考 文 献:

- [1] Rayman M P. Food-chain selenium and human health: Emphasis on intake[J]. *British Journal of Nutrition*, 2008, 100(2): 254–268.
- [2] Fleming G A. Selenium in Irish soil and plants[J]. *Soil Science*, 1962, 94: 28–35.
- [3] 张现伟, 郑家奎, 张涛, 等. 富硒水稻的研究意义与进展[J]. *杂交水稻*, 2009, 24(2): 5–9.
Zhang X W, Zheng J K, Zhang T, *et al.* Research progress of selenium-enriched rice[J]. *Hybrid Rice*, 2009, 24(2): 5–9.
- [4] Taylor J B, Marchello M J, Finley J W, *et al.* Nutritive value and display-life attributes of selenium-enriched beef-muscle foods[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2008, 21(2): 183–186.
- [5] 温国灿. 福建省城市郊区蔬菜硒含量状况及硒污染评价[J]. *福建农业科技*, 2014, 10: 22–25.
Wen G C. Evaluation on selenium content in vegetables of city suburb and selenium pollution in Fujian Province[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2014, 10: 22–25.
- [6] 陈剑侠. 福建省农产品硒含量调查分析[J]. *现代农业科技*, 2017, 11: 238–240.
Chen J X. Investigation and analysis of selenium content in agricultural products in Fujian Province[J]. *Modern Agricultural Technology*, 2017, 11: 238–240.
- [7] 何宇纳, 赵丽云, 于冬梅, 等. 2010—2012年中国成年居民蔬菜和水果摄入状况[J]. *中华预防医学杂志*, 2016, 50(3): 221–224.
He Y N, Zhao L Y, Yu D M, *et al.* Consumption of fruits and vegetables in Chinese adults from 2010 to 2012[J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2016, 50(3): 221–224.
- [8] 魏廷珍, 王晋民, 刘超, 等. 青海平安富硒区不同蔬菜对硒的吸收及转化能力研究[J]. *河南农业科学*, 2014, 43(5): 134–137.
Wei T Z, Wang J M, Liu C, *et al.* Study on absorption and transformation of selenium in different vegetables in Ping'an selenium-rich region of Qinghai Province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(5): 134–137.
- [9] 黄凯丰, 时政, 冯健瑛. 富硒蔬菜的研究现状[J]. *长江蔬菜*, 2011, (10): 14–17.
Huang K F, Shi Z, Feng J Y. Research status of selenium-enriched vegetable[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2011, (10): 14–17.
- [10] 万佐玺, 易咏梅, 杨兰芳, 等. 土壤施硒对魔芋含硒量与吸硒特性的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2005, 24(4): 359–363.
Wan Z X, Yi Y M, Yang L F, *et al.* Effects of applying selenium in soil on selenium content and the character of selenium uptake in *Amorphophallus konjac*[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2005, 24(4): 359–363.
- [11] 杜前进, 张永发, 唐树梅, 等. 水稻不同品种在海南富硒土壤中硒的吸收和分配机理[J]. *中国土壤与肥料*, 2009, (6): 37–40.
Du Q J, Zhang Y F, Tang S M, *et al.* The absorption and distribution mechanisms of selenium from Hainan selenium-rich soil by different rice varieties[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009, (6): 37–40.
- [12] 万洪富. 大麦等四种作物对土壤中硒的吸收和累积[J]. *土壤*, 1989, 21(5): 268–271.
Wan H F. The absorption and accumulation of selenium in soil by four crops such as barley[J]. *Soils*, 1989, 21(5): 268–271.
- [13] Wan H, Mikklsen R, Page A. Selenium uptake by some agricultural crops from central California soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1988, 17(2): 269–272.
- [14] 瞿建国, 徐伯兴, 龚书椿. 连续浸提技术测定土壤和沉积物中硒的形态[J]. *环境化学*, 1997, 16(3): 277–283.
Qu J G, Xu B X, Gong S C. Sequential extraction techniques for determination of selenium speciation in soils and sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 1997, 16(3): 277–283.
- [15] NY/T 1104–2006. 土壤中全硒的测定[S].
NY/T 1104–2006. Determination of selenium in soils[S].
- [16] GB/T 5009.93–2017. 食品中硒的测定[S].
GB/T5009.93–2017. Determination of selenium in foods[S].
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Bao S D. Soil agro-chemistry analysis (Third edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [18] 中国食品工业协会花卉食品专业委员会. HB001/T–2013. 天然富硒食品硒含量分类标准(试行)[S].
China Food Industry Association Flower Food Professional Committee. HB001/T–2013. Classification standard of selenium content in naturally rich food (trial)[S].
- [19] 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.
Wang J M, Zhao Z Z, Li G R. Effects of selenium application on the selenium content, yield and qualities of carrot[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(2): 240–244.
- [20] 田秀英, 王正银. 硒对苦荞产量、营养与保健品质的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(7): 1266–1272.
Tian X Y, Wang Z Y. Effect of selenium application on yield and qualities for nutrition and health care in Tartary buckwheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(7): 1266–1272.
- [21] Yao X Q, Chu J Z, Wang G Y. Effects of selenium on wheat seedlings under drought stress[J]. *Biological Trace Element Research*, 2009, 130: 283–290.
- [22] Hasanuzzaman M, Hossain M A, Fujita M. Selenium in higher plants: Physiological role, antioxidant metabolism and abiotic stress tolerance[J]. *Journal of Plant Sciences*, 2010, 4(5): 354–375.
- [23] Ramos S J, Faquin V, Guilherme L R G, *et al.* Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2010, 56: 584–588.
- [24] 夏永香, 刘世琦, 李贺, 陈祥伟. 硒对大蒜生理特性、含硒量及品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 733–741.
Xia Y X, Liu S Q, Li H, Chen X W. Effects of selenium on physiological characteristics, selenium content and quality of garlic[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 733–741.
- [25] 姜超强, 沈嘉, 祖朝龙. 水稻对天然富硒土壤硒的吸收及转运[J]. *应用生态学报*, 2005, 26(3): 809–816.
Jiang C Q, Shen J, Zu C L. Selenium uptake and transport of rice under different Se-enriched natural soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 26(3): 809–816.
- [26] 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.

- Xu W. Bio-availability of selenium and its absorption for plants[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2009, 15(23): 46–47.
- [27] 中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所. 食物成分表[M]. 北京:人民卫生出版社, 1992.
Institute of Nutrition and Food Hygiene, Chinese Academy of Preventive Medicine. Food ingredients list[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1992.
- [28] 唐玉霞, 王慧敏, 刘巧玲, 孟春香. 土壤和植物硒素研究综述[J]. *河北农业科学*, 2008, 12(5): 43–45.
Tang Y X, Wang H M, Liu Q L, Meng C X. Summary of selenium in soil and plant[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2008, 12(5): 43–45.
- [29] 刘庆, 田侠, 史衍玺. 外源硒矿粉对玉米硒累积及矿质元素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 403–409.
Liu Q, Tian X, Shi Y X. Effects of exogenous Se mineral powder on the accumulation of Se and the absorption of mineral elements in maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(2): 403–409.
- [30] 胡华锋, 刘太宇, 郭孝, 等. 基施硒肥对不同生育期紫花苜蓿吸收、转化及利用硒的影响[J]. *草地学报*, 2015, 23(1): 101–106.
Hu H F, Liu T Y, Guo X, *et al.* Effects of Se as basal fertilizer on the selenium absorption, conversion and utilization of alfalfa at different growth stages[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(1): 101–106.
- [31] 郭孝, 李明, 介晓磊, 等. 基施硒肥对莜麦产量和微量元素含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1235–1242.
Guo X, Li M, Jie X L, *et al.* Effects of basal Se fertilizers on yield and contents of trace elements of naked oat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1235–1242.
- [32] Carbonell-Barrachina A A, Burló-Carbonella F, Mataix-Beneyto J. Arsenic uptake, distribution, and accumulation in bean plants: Effect of arsenite and salinity on plant growth and yield[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20(10): 1419–1430.
- [33] 胡钟胜, 章钢娅, 王广志, 等. 修复剂对烟草吸收污染土壤中砷的改良[J]. *土壤*, 2006, 38(2): 200–205.
Hu Z S, Zhang G Y, Wang G Z, *et al.* Effect of remediators on As uptake by tobacco in contaminated soil[J]. *Soils*, 2006, 38(2): 200–205.
- [34] 段曼莉, 胡斌, 梁东丽, 等. 4种蔬菜对硒酸盐的吸收、富集与转运特征的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3): 422–428.
Duan M L, Hu B, Liang D L, *et al.* Absorption, bioaccumulation and translocation of selenium in four different vegetables by applying selenate[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 422–428.
- [35] 赵春梅, 曹启民, 唐群锋, 李晓波. 植物富硒规律的研究进展[J]. *热带农业科学*, 2010, 30(7): 82–86.
Zhao C M, Cao Q M, Tang Q F, Li X B. Research advances on selenium accumulation in plants[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2010, 30(7): 82–86.
- [36] Zheng J, Kosmus W. Retention study of inorganic and organic selenium compounds on a silica-based reversed phase column with mixed ion-pairing reagents[J]. *Chromatographia*, 2000, 51(5/6): 338–344.
- [37] 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, total selenium and organic selenium contents in 'Red Fuji' apple trees[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(5): 1109–1117.
- [38] 胡婷, 李文芳, 向昌国, 张汝娇. 硒对常见蔬菜种子萌发的影响及在植株中的分布[J]. *食品科学*, 2015, 36(7): 45–49.
Hu T, Li W F, Xiang C G, Zhang R J. Influence of sodium selenite on seed germination and selenium distribution of common vegetables[J]. *Food Science*, 2015, 36(7): 45–49.