

青海碱性土壤区天然富硒大蒜硒积累规律

张亚峰^{1,2}, 姚 振^{1,2}, 马 强^{1,2}, 沈 骁^{1,2}, 王 帅^{1,2}, 贺连珍¹, 代 璐^{1,2}, 韩伟明^{1,2}

(1. 青海省第五地质勘查院 生态环境与农业资源研究分院, 青海 西宁 810099;

2. 青海省富硒资源利用工程技术研究中心, 青海 西宁 810099)

摘 要:通过监测青藏高原东部大蒜主产区大蒜、蒜薹、蒜苗及根系土壤中Se、Sr、Mg、Cu、Zn、Pb、Cr、Hg、Ni等指标的含量,研究大蒜不同部位对硒的积累特征,以揭示天然富硒大蒜的营养品质。结果表明,基于富硒大蒜行业标准判定,研究区大蒜富硒率为97%,蒜薹富硒率为19%,蒜苗富硒率为13%;大蒜Se含量与根系土壤Se含量显著正相关,地上部位(蒜薹、蒜苗)与根系土壤Se含量的相关性明显弱于地下部位(大蒜)与根系土壤Se含量的相关性;大蒜Se的富集系数为13%,蒜薹Se的富集系数为6.7%,蒜苗Se的富集系数为5.7%。大蒜的富硒能力强于蒜薹和蒜苗,且研究区强于国内其他区域,印证了碱性富硒土壤的生物有效性高的特征。大蒜根部Se向蒜薹的转运能力高于向蒜苗的转运能力,蒜薹较蒜苗具有较高积累Se的能力。大蒜Se与Cu、Zn和Cr元素呈显著正相关,能发生协同吸收效应。基于无机态Cu、Zn、Cr经土壤转化吸收进入农产品多以有机态存在,对人体有害的铬(VI)处于低值;同时研究区土壤和农产品Cu、Zn、Cr总量均不超标,故研究区产出的富硒大蒜健康、安全。

关键词:碱性土壤;天然富硒大蒜;硒积累;富集系数;转运系数

中图分类号:S633.4

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2024)01-0101-06

Selenium Accumulation of Natural Selenium-Rich Garlic in Alkaline Soil Area of Qinghai Province

ZHANG Yafeng^{1,2}, YAO Zhen^{1,2}, MA Qiang^{1,2}, SHEN Xiao^{1,2}, WANG Shuai^{1,2},
HE Lianzhen¹, DAI Lu^{1,2}, HAN Weiming^{1,2}

(1. Research Branch of Ecological Environment and Agricultural Resources, the Fifth Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810099, China; 2. Research Center of Selenium Resource Utilization Engineering in Qinghai Province, Xining 810099, China)

Abstract: In this study, by monitoring the contents of the indexes including Se, Sr, Mg, Cu, Zn, Pb, Cr, Hg, and Ni in garlic, garlic stems, garlic seedlings, and root soil in the main garlic producing areas of the eastern Tibetan Plateau, the accumulation characteristics of selenium in different parts of garlic were studied, and the nutritional quality of natural selenium-rich garlic was revealed. The results showed that by judgment based on the industry standard of selenium rich garlic, the selenium enrichment rate of garlic, garlic stems and garlic seedling was 97%, 19%, and 13%, respectively. The Se content of garlic was significantly and positively correlated with the Se content in root soil. The correlation between the Se content of the aboveground parts (garlic stems and garlic seedlings) and the Se content in root soil was significantly weaker than that between the underground part (garlic) and root soil. The enrichment coefficient of selenium in garlic, garlic stems and garlic seedling was 13%, 6.7%, and 5.7%, respectively. The selenium enrichment ability of garlic was stronger than that of garlic stems and garlic seedlings and the ability in the study area was stronger than that in other domestic areas, which proved characteristics of high bioavailability in alkaline selenium rich soil. The transport capacity of selenium from garlic roots to garlic stems was higher than that to garlic seedlings, indicating that garlic stems had a higher ability to accumulate selenium than garlic seedlings. The content of selenium in garlic was significantly positively correlated with Cu, Zn, and Cr, synergistic absorption effects could occur. Cu, Zn, and Cr were mostly organic when they were transformed and absorbed into agricultural products by soil based on the inorganic state. Chromium (VI) which is harmful to human was at a low level. At the same time, the total amount of Cu, Zn, and Cr in soil and agricultural products in the study area was not over the standard, therefore, the selenium-enriched garlic produced in the study area was healthy and safe.

Key words: alkaline soil; natural selenium-enriched garlic; selenium accumulation; enrichment coefficient; transfer factor

收稿日期: 2023-02-27

基金项目: 中国地质调查局中央财政资金项目(1212011140139); 青海省地质勘查基金项目(10); 青海省2021年昆仑英才高端创新创业人才计划项目

作者简介: 张亚峰(1986-), 女, 山西交城人, 高级工程师, 主要从事富硒农业及产业研究工作。

通信作者: 姚 振(1985-), 男, 湖南湘阴人, 高级工程师, 硕士, 主要从事生态环境研究工作。

硒(Se)是人体必需的微量元素,具有增强机体免疫力、清除体内自由基、抗衰老、加强心肌机能、增强生殖能力、减轻重金属毒副作用和预防癌症等功能^[1]。而大蒜对硒具有较强的生物富集作用,并能将无机硒以吸收量 78% 左右的能力转化为有机硒,且分离出的含硒蛋白具有提高谷胱甘肽过氧化酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性,降低过氧化物酶活性的健康效应,并证实硒代半胱氨酸和烯丙基硒代硫化物比半胱氨酸和烯丙基硫化物具有更高的防癌活性,充分表明了富硒大蒜的健康价值^[2]。同时,大蒜属药食两用植物,本身含有 100 余种含硫挥发物、硫化亚磺酸酯类、氨基酸、肽类、苷类及酶类等药用和保健成分。蒜氨酸作为含硫化合物,发挥消炎抗菌、预防癌症和心血管疾病等功能;富含的 Cu、Zn-超氧化物歧化酶(SOD)发挥清除超氧自由基,抗辐射、抗肿瘤及延缓机体衰老等功能;富含的维生素发挥调节代谢等功能^[3]。另外,有研究表明,大蒜还具有较强聚锗(Ge)的本能,亦能进一步增强大蒜的抗癌能力^[4]。基于以上 3 点,研究天然富硒大蒜的硒积累特征,掌握土壤—大蒜系统中硒的转化规律,以期定位富硒大蒜培育的有利土地地区位,指导富硒功能产品的开发。

以往研究表明,大蒜是蔬菜中富硒能力最强的作物^[5]。关于富硒大蒜中硒的积累研究多集中在外源添加硒或天然和外源共同作用条件下培育的富硒大蒜方面,有关天然富硒土地培育富硒大蒜的研究较少,发布的富硒大蒜硒监测数据也有限。青藏高原东部属我国大蒜主产区,尤其乐都紫皮大蒜作为地理标志产品享有较高的知名度。主产地平安、乐都一带又属天然碱性土壤富硒区,具有总 Se 含

量稳定、有效 Se 含量高、重金属含量低等优势^[6-8]。本试验以青藏高原东部碱性土壤区天然富硒大蒜为研究对象,2020 年开展了大蒜、根系土的 Se 与其他有益、有害元素的协同监测,评价其富 Se 水平和营养品质,以期深入挖掘碱性土壤区天然富硒大蒜的价值潜力,为高效培育天然富硒大蒜和提升经济价值提供技术数据,也为优化食物补硒途径及科学开发碱性天然富硒土地提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区地处青藏高原北缘湟水谷地,是全国大蒜主产区和西北天然富硒区,属高原大陆性气候,平均海拔 2 300~3 000 m,年均气温 5~6 ℃,年均降水量 350~500 mm。富硒土壤延湟水河展布在两岸冲洪积阶地,土壤 Se 来源于咸水湖相沉积的新生界西宁组红色泥岩,土壤 Se 含量在 167~654 μg/kg,土壤 pH 值中位数为 8.5,呈碱性。土壤类型主要为栗钙土和灰钙土。

1.2 试验材料

主栽品种乐都紫皮大蒜是青海省优良地方品种,种植在河谷地带,总面积有 3 000 余 hm²。每年 3 月春播,6 月收获,生育期超过 100 d,鳞片 2 层,鳞芽 4~6 瓣,平均产量为 25 500 kg/hm²。

1.3 样品采集与测定

样品采集按照《土地质量地球化学评价规范 DZ/T 0295—2016》要求,在海东市乐都、平安两区富硒区和低硒区分别采集大蒜和根系土协同样本。同时在乐都雨润大蒜核心产区采集与大蒜样本配套的蒜苗和蒜薹样本。采样位置见图 1。

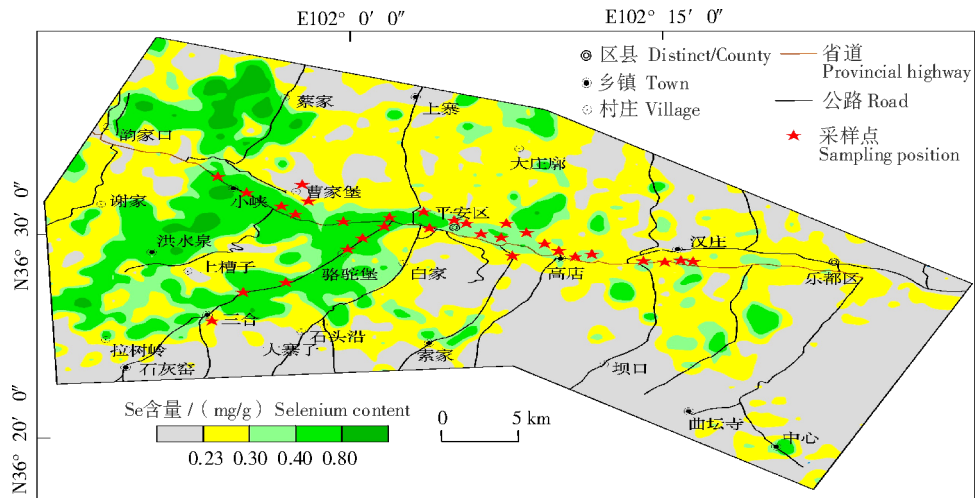


图 1 采样位置示意
Fig.1 Schematic diagram of sampling position

大蒜—蒜薹—蒜苗配套样本采集采取同一地块采集的原则,蒜苗和蒜薹于5月下旬同点采集,大蒜于6月初采集。采取主点与副点组合方法,即在预采集样点位置选择1个主点,在同一地块内选择3~4个副点共同采样,主副点样本混合确定为1件样品。根系土为被采集大蒜样本的根际土壤,同样为主副点混合,用四分法留取约500 g风干。研究共采集大蒜样本60件、蒜薹31件、蒜苗31件、根系土60件。

土壤样过0.85 mm尼龙筛,取筛下物烘干后采用离子电极法测定pH;采用原子荧光法测定Se、Hg;采用X射线荧光光谱法测定Cr、Cu、Zn、Sr、Mg、Ni、Pb含量。大蒜、蒜薹和蒜苗样先经清水淘洗,后用去离子水淘洗,室温晾干经专用机具加工至约0.42 mm粒度,烘干后采用原子荧光法测定Se;采用等离子体质谱法测定Hg、Cr、Ni、Cu、Pb含量;采用等离子体光谱法测定Zn、Sr、Mg含量。各指标测定的原始报出率为100%,原始一次性合格率为100%,5%样本的重复性检验原始一次性合格率为100%。经评价,数据质量满足分析评价要求。

1.4 数据分析

采用Excel软件对数据进行常规统计分析,采用SPSS软件进行描述性统计、方差检验和相关分析。

生物富集系数(Biological concentration factor, BCF)可表示大蒜及各部位的富集、积累和吸收能力与程度的定量关系,可反映大蒜及不同部位从土壤中吸收特定元素的能力^[9]。

$$BCF_i = C_{i-Garlic} / C_{i-Soil} \times 100\%$$
 (1)

式中, BCF_i 为作物*i*元素的富集系数, $C_{i-Garlic}$ 指作物*i*元素的含量, C_{i-Soil} 为作物所对应根系土的*i*元素含量。单位均为μg/kg。

生物转运系数(Biological transshipment factor, BTF)可表示大蒜由不同部位转运能力与程度的定

量关系,可反映大蒜从地下部位运移吸收特定元素的能力^[10]。

$$BTF_i = C_{i-Above} / C_{i-Root} \times 100\%$$
 (2)

式中, BTF_i 为作物对*i*元素的转运系数, $C_{i-Above}$ 指蒜苗、蒜薹中*i*元素的含量, C_{i-Root} 指大蒜中*i*元素的含量。单位均为μg/kg。

2 结果与分析

2.1 大蒜富Se程度评价

从表1可以看出,大蒜Se含量处于29.9~120.0 μg/kg,均值为43.6 μg/kg;蒜苗Se含量处于7.2~39.4 μg/kg,均值为18.4 μg/kg;蒜薹Se含量处于8.0~45.2 μg/kg,均值为21.7 μg/kg;根系土Se含量处于167~654 μg/kg,均值为342 μg/kg。对照农业部富硒大蒜行业标准^[11],Se含量为30~300 μg/kg被认定为富硒大蒜,研究区97%的大蒜富硒。在土壤Se≥230 μg/kg地块中的大蒜Se处于30.6~120 μg/kg,达100%富硒。这一点也印证了碱性富硒土壤有效Se含量高的事实,即在土壤总Se含量低于谭见安^[12]推荐的富硒土壤(400 μg/kg)限定值的情况下,大蒜也能100%富硒。参照大蒜标准判定,研究区蒜薹富硒率为19%,蒜苗富硒率为13%。同时,大蒜各部位Se含量与根系土Se含量的相关分析结果表明,大蒜Se含量与根系土Se含量呈极显著正相关($R=0.651, P<0.01$),蒜苗Se含量与根系土Se含量呈显著相关($R=0.395, P<0.05$),蒜薹Se含量与根系土Se含量相关性不显著($R=0.258$),大蒜、蒜薹和蒜苗3种样品间Se含量呈极显著正相关($P<0.01$)。地上部位(蒜薹、蒜苗)和地下部位(大蒜)Se含量分别与根系土Se含量的相关性差异验证了生长周期对作物Se的吸收影响。

表1 大蒜、蒜薹、蒜苗、根系土的Se相关参数
Tab.1 Se related parameters between garlic, garlic stems, garlic seedlings and soil

指标 Index	Se含量/(μg/kg)		Selenium content		富硒率/% Selenium en- richment rate	BCF/%			BTF/%		
	Min.	Max.	Mean	CV		Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean
大蒜 Garlic	29.9	120.0	43.6	0.5	97	8.0	27.5	13.0			
蒜苗 Garlic seedling	7.2	39.4	18.4	0.4	13	1.9	13.0	5.7	17.8	80.9	43.6
蒜薹 Garlic stems	8.0	45.2	21.7	0.4	19	2.4	14.9	6.7	24.9	109.8	51.8
根系土 Soil	167	654	342	0.3							

2.2 大蒜富Se能力评价

通过计算,分别获取了大蒜不同部位Se的富

集系数和转运系数,结果如表1所示,大蒜Se的富集系数处于8.0%~27.5%,均值为13.0%;蒜苗Se

的富集系数处于 1.9%~13.0%，均值为 5.7%；蒜薹 Se 的富集系数处于 2.4%~14.9%，均值为 6.7%。总体来看，富集能力大小呈现大蒜>蒜薹>蒜苗。进一步根据马强等^[7]对青海东部作物 Se 的统计分析，富集系数高于 20% 划分为强富 Se 潜力作物，富集系数处于 10%~20% 划分为中等富 Se 潜力作物，富集系数小于 10% 划分为弱富 Se 潜力作物。可见，大蒜属中等富 Se 潜力作物，蒜薹和蒜苗属弱富 Se 作物。收集全国其他区域大蒜 Se 富集系数资料，如陕西汉阴地区大蒜 Se 富集系数为 5.1%~9.6%^[13]，整体上低于青海大蒜富 Se 水平。反映了青海大蒜的富 Se 能力和潜力，这与土壤 Se 的有效性有关联。

2.3 大蒜转运 Se 能力评价

转运系数是反映地上部分对地下部分的运输和富集能力的指标，为进一步表征蒜苗和蒜薹对 Se 的吸收差异，揭示大蒜对 Se 的运转能力和富集机制，假定用大蒜 Se 测定值代表蒜薹、蒜苗采集时的根部 Se。估算得出，蒜苗 Se 转运系数处于 17.8%~80.9%，均值为 43.6%；蒜薹 Se 转运系数处于 24.9%~109.8%，均值为 51.8%。蒜薹有 6% 的样本转运系数大于 1，蒜苗 100% 的样本转运系数小于 1，且蒜薹转运系数均值大于蒜苗，说明蒜薹在抽薹期具有比蒜苗更强转运 Se 的能力，大蒜地上部分的 Se 有向花茎聚集的趋势。已有试验表明，外源硒酸盐比亚硒酸盐具有更好的转运效果^[14-15]。由此推测，研究区碱性土壤区硒酸盐占比

较高，其作物转运 Se 的能力也越强，这与碱性土壤区有效 Se 高的效应相一致。土壤中无机硒由根部转化成有机硒进入大蒜植株体内，蒜苗和蒜薹在特定的生长期吸收转运了根部的有机 Se，且蒜薹的转运能力强于蒜苗。这一结论也为发展高原富硒蒜薹产业提供了技术思路 and 支撑。

2.4 大蒜 Se 与其他元素的吸收关联分析

Se 在经土壤向作物、作物向动物和人体等介质转化过程中，从量上存在相互制约关系^[16-19]。而土壤作为作物 Se 获取的直接来源，其有利的理化条件是关键。研究区属我国西北典型的碱性土壤，具有比酸性土壤更活跃的易溶硒酸盐，利于作物吸收的有效 Se 高，富 Se 潜能较大^[20]。再者，研究区属于旱咸水湖沉积型富硒土壤，具有重金属低、供给源稳定，Se 含量适中等特点，同时 Sr、Mg、Ca 等盐类物质丰富，具备多种有益元素叠加富集的优势^[21]。Se 还具有与重金属发生拮抗的作用，通过减轻氧化应激、直接抑制重金属的吸收、与重金属结合形成难溶性复合物等作用而阻断其转运等方式缓解重金属对作物的毒害作用^[22-24]。因此，基于以上 3 点论述，研究大蒜-土壤系统 Se 与其他有益、有害元素间的影响关系，以期富硒大蒜高品质开发提供依据。

表 2 列出了 Se 与 Sr、Mg、Cu、Zn、Cr、Ni、Hg、Pb 等元素在大蒜-土壤系统中的富集系数相关关系矩阵。

表 2 大蒜 Se 与其他元素的富集系数相关关系矩阵
Tab.2 Correlation matrix of enrichment coefficient of Se and other elements in garlic

指标	Index	BCF _{Se}	BCF _{Sr}	BCF _{Mg}	BCF _{Cu}	BCF _{Zn}	BCF _{Cr}	BCF _{Ni}	BCF _{Hg}	BCF _{Pb}
BCF _{Se}		1								
BCF _{Sr}		0.257	1							
BCF _{Mg}		0.210	0.280	1						
BCF _{Cu}		0.499**	0.196	0.278	1					
BCF _{Zn}		0.514**	0.497**	0.237	0.732**	1				
BCF _{Cr}		0.547**	0.126	0.460**	0.530**	0.490**	1			
BCF _{Ni}		0.208	0.507**	0.480**	0.587**	0.537**	0.486**	1		
BCF _{Hg}		0.378*	0.374*	0.236	0.351	0.446*	0.314	0.295	1	
BCF _{Pb}		0.049	0.157	0.394*	0.351	0.358*	0.300	0.452*	-0.019	1

注：**. 在 0.01 级别(双尾)相关性极显著；*. 在 0.05 级别(双尾)相关性显著。
Notes: ** meant at the 0.01 level(two tailed), the correlation was extremely significant; * meant at the 0.05 level(two tailed), the correlation was significant.

从表 2 可以看出，大蒜中富 Se 系数与富 Cu、富 Zn、富 Cr 系数在 $P<0.01$ 水平上呈极显著正相关关系；与富 Hg 系数在 $P<0.05$ 水平上呈显著正相关关

系。同时，富 Sr 系数与富 Zn、富 Ni 系数在 $P<0.01$ 水平上呈极显著正相关关系；与富 Hg 系数在 $P<0.05$ 水平上呈显著正相关关系。富 Mg 系数与富 Cr、富

Ni系数在 $P<0.01$ 水平上呈极显著正相关关系;与富Pb系数在 $P<0.05$ 水平上呈显著正相关关系。富Cu系数与富Zn、富Cr、富Ni系数在 $P<0.01$ 水平上呈极显著正相关关系。富Zn系数与富Cr、富Ni系数在 $P<0.01$ 水平上呈极显著正相关关系;与富Pb、富Hg系数在 $P<0.05$ 水平上呈显著正相关关系。富Cr系数与富Ni系数在 $P<0.01$ 水平上呈极显著正相关关系。富Ni系数与富Pb系数在 $P<0.05$ 水平上呈显著正相关关系。以此揭示,富Se大蒜有富Cu、Zn、Cr的潜力,与Ni、Pb可能存在拮抗反应。而研究表明,Cr是人体必需的微量元素之一,作为胰岛素的增敏剂参与影响糖、脂肪和蛋白质的代谢,是胰岛素的一种协同激素。又基于土壤中Cr经农作物转化吸收进入农产品中,多以有机铬形式存在^[25-27],且研究区土壤和农产品Cr等均不超标,在一定范围内Cr可作为人体补充微量元素的有益成分。因此,研究区富Se大蒜有叠加富Cu、Zn、Cr等微量元素的优势。

3 结论与讨论

青藏高原东部是大蒜主产区,同时也是天然富硒区。以基于当地土壤特性的富硒标准,推荐土壤 $\text{Se}\geq 230\text{ }\mu\text{g/kg}$ 可认定为富硒土壤,该土壤产出的大蒜富硒率为100%,蒜薹富硒率19%,蒜苗富硒率13%。大蒜Se含量与根系土Se含量显著正相关。大蒜Se富集系数为13%,蒜薹Se富集系数为6.7%,蒜苗Se富集系数为5.7%,富Se能力由根部向花茎至茎叶依次减弱。依据青海东部作物Se富集系数分级建议,可将大蒜划分为中度富Se类作物,蒜薹和蒜苗划分为弱富Se类作物。大蒜相比国内其他地区具有较高的富Se能力。大蒜中Se向蒜薹的传输转运能力高于向蒜苗的转运能力。基于大蒜-土壤系统中Se的富集转运能力比较,蒜薹较蒜苗具有较高累积Se的能力。大蒜在富Se的同时,与Cu、Zn、Cr等微量元素呈正相关,能发生协同吸收效应;与Ni、Pb等元素不相关,可发生复合性协同拮抗反应。

综上,研究区大蒜具有较高的富Se能力,同时能协同吸收土壤中的微量元素Cu、Zn和Cr,集合了大蒜富含有机硫化物的抗菌抗癌、Se抗氧化抗癌抗衰老、Cu促血液神经和免疫系统的功能发挥、Zn参与体内多种激素合成激发代谢及Cr增加体内胰岛素的敏感活力等五大健康功效,可成为培育多功能食品的目标产品。另外,研究区大蒜硒富集特

性可为碱性富硒土壤区的硒资源高效利用提供较好的借鉴,对高原大蒜富硒产业构建和服务乡村振兴战略具有拓展意义。针对碱性土壤区富硒大蒜的有机Se形态以及Se与S是否存在迭代作用等还需要进一步研究,研究区产出的富Se或含Cu、Zn和Cr的大蒜、蒜薹与国内酸性富硒区的比对,以及Cr的无机价态占比和对人体的健康效应分析,都将成为后续产品开发中需要解决的重点。有关大蒜的深加工及保健产品研发也是研究成果衍生的重要方向。

参考文献:

- [1] 齐玉薇,史长义. 硒的生态环境与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2005, 22(2): 63-66.
QI Y W, SHI C Y. Se ecological environment and human body health[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2005, 22(2): 63-66.
- [2] 杨文婕,杨晓光,夏弈明. 大蒜和富硒大蒜的防癌抗癌活性化合物[J]. 中华预防医学杂志, 1997, 31(5): 304-306.
YANG W J, YANG X G, XIA Y M. Anticancer and anticancer active compounds of garlic and selenium-enriched garlic[J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 1997, 31(5): 304-306.
- [3] 毛德倩,杨大进,杨文婕. 富硒大蒜对蒜氨酸TLC特征图谱和含量的影响[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(9): 2416-2419.
MAO D Q, YANG D J, YANG W J. Influence of selenium on the chemical characteristic and level of the alliin in garlic[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(9): 2416-2419.
- [4] 苏美琼,杨柏崇,成密红,等. 大蒜的功效及综合利用研究进展[J]. 西北农业学报, 2003, 12(4): 151-156.
SU M Q, YANG B C, CHENG M H, et al. Advance in researches of the efficacy and synthetic utilization of garlic[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2003, 12(4): 151-156.
- [5] 段咏新,傅庭治. 大蒜对硒的吸收及硒对大蒜生长的影响[J]. 广东微量元素科学, 1997, 4(11): 52-55.
DUAN Y X, FU T Z. The absorption of Se by garlic and the effect of Se on the growth of garlic[J]. Trace Elements Science, 1997, 4(11): 52-55.
- [6] 张亚峰,苗国文,马强,等. 青海东部碱性土壤中硒的形态特征[J]. 物探与化探, 2019, 43(5): 1138-1144.
ZHANG Y F, MIAO G W, MA Q, et al. Distribution characteristics of Se speciation of alkaline soil in eastern Qinghai[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 1138-1144.
- [7] 马强,张亚峰,黄强,等. 青海省富硒土壤标准探讨[J]. 物探与化探, 2022, 46(3): 772-780.
MA Q, ZHANG Y F, HUANG Q, et al. Exploring the standards of Se-rich soil in Qinghai Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 772-780.
- [8] 张亚峰,苗国文,马强,等. 青海省海东市平安区土壤Se的地球化学特征[J]. 地球与环境, 2019, 47(1): 74-80.
ZHANG Y F, MIAO G W, MA Q, et al. Geochemical characteristics of Se in soil of the Ping'an district, Haidong city, Qinghai Province[J]. Earth and Environment, 2019, 47(1): 74-80.
- [9] 王国兰,王玥,李旭,等. 千河下游土壤-小麦系统重金属富集

- 特征及风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(4): 80-86.
- WANG G L, WANG Y, LI X, et al. Enrichment characteristics and risk assessment of heavy metals in the soil-wheat system in the lower reaches of the Qianhe River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(4): 80-86.
- [10] 崔长珍, 王鹏, 屈香香, 等. 不同品种绿豆对硒胁迫的响应特性分析[J]. 山西农业科学, 2021, 49(9): 1045-1049.
- CUI C Z, WANG P, QU X X, et al. Analysis on response characteristics of different mung bean varieties to selenium stress[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(9): 1045-1049.
- [11] 中华人民共和国农业部. 富硒大蒜: NY/T 3115—2017[S]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Selenium-rich garlic: NY/T 3115-2017[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.
- [12] 谭见安. 中华人民共和国地方病与环境图集[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- TAN J A. The atlas of endemic diseases and their environments in the People's Republic of China[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [13] 于振. 陕西汉阴富硒地区主要农作物硒富集能力及其农产品中硒赋存形态和分布规律研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.
- YU Z. Studies on main crops capacity of enrichment selenium and selenium distribution, existing form in agricultural products in Se-enriched regions of Hanyin Shaanxi[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2013.
- [14] 王琪, 王雅琦, 万亚男, 等. 不同形态叶面硒肥对水稻吸收和转运硒的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1101-1107.
- WANG Q, WANG Y Q, WAN Y N, et al. Effects of different forms of foliar selenium fertilizers on Se accumulation and distribution in rice[J]. Soils, 2022, 54(6): 1101-1107.
- [15] 王晓虎, 张建珍, 侯非凡, 等. 土施硒肥位置对谷子生理特性及硒积累的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 29-37.
- WANG X H, ZHANG J Z, HOU F F, et al. Effects of the position of Se fertilization position in soil on physiological characteristics and Se accumulation of foxtail millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2023, 43(2): 29-37.
- [16] 杜志鹏, 向丹, 苏德纯. 不同Cd积累能力大白菜吸收转运Cd的差异性[J]. 生态环境学报, 2018, 27(11): 2150-2155.
- DU Z P, XIANG D, SU D C. Difference in absorption and transform of Cd by *Brassica pekinensis* L. with different Cd accumulation ability[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(11): 2150-2155.
- [17] 姜超强, 沈嘉, 徐经年, 等. 不同富硒土壤对烤烟生长及硒吸收转运的影响[J]. 西北植物学报, 2014, 34(11): 2303-2308.
- JIANG C Q, SHEN J, XU J N, et al. Effects of Se-enriched soils on the plant growth, selenium uptake and transport in flue-cured tobacco[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(11): 2303-2308.
- [18] 王凯, 包立, 栗丽, 等. 土壤外源补硒对油菜硒吸收转运累积的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(13): 79-84.
- WANG K, BAO L, LI L, et al. Effects of exogenous selenium supplementation on absorption and accumulation of selenium in rape[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(13): 79-84.
- [19] 尹梦娇, 赵立松, 梁月秀, 等. 硒酸钠对小麦幼苗生长及微量元素积累的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(6): 935-941.
- YIN M J, ZHAO L S, LIANG Y X, et al. Effects of sodium selenate on seedling growth and trace element accumulation of wheat[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(6): 935-941.
- [20] 潘丽萍, 刘永贤, 黄雁飞, 等. 土壤—植物体系中硒与重金属镉的相互作用[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 480-485.
- PAN L P, LIU Y X, HUANG Y F, et al. Interaction between selenium and cadmium in soil-plant system[J]. Current Biotechnology, 2017, 7(5): 480-485.
- [21] 姬丙艳, 许光. 青海东部生态地球化学成果及经济效益示范[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2020.
- JI B Y, XU G. Demonstration of ecological geochemistry achievements and economic benefits in eastern Qinghai[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2020.
- [22] 兰敏, 尹美强, 温银元, 等. 纳米硒对谷子生物量和微量元素含量的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(4): 515-519, 555.
- LAN M, YIN M Q, WEN Y Y, et al. Effect of nano-selenium on the biomass and trace elements content of millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(4): 515-519, 555.
- [23] 包荣坤, 朱发厅, 喻世晏, 等. 硒对重金属拮抗作用与富硒产品研究进展[J]. 中国畜禽种业, 2018, 14(10): 53-55.
- BAO R K, ZHU F T, YU S Y, et al. Research progress on antagonism of selenium to heavy metals and selenium-enriched products[J]. The Chinese Livestock and Poultry Breeding, 2018, 14(10): 53-55.
- [24] 吴之琳, 童心昭, 尹雪斌, 等. 硒提高植物拮抗重金属毒性的研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2014, 39(2): 22-27, 65.
- WU Z L, TONG X Z, YIN X B, et al. Research progress of selenium improving plant antagonism to heavy metal toxicity[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2014, 39(2): 22-27, 65.
- [25] 王晓波, 李建国, 赵春香, 等. 广州市售食品总铬和六价铬的含量分析[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(22): 86-89.
- WANG X B, LI J G, ZHAO C X, et al. Determination of total chromium and chromium (VI) content of foods in Guangzhou[J]. Food Research and Development, 2014, 35(22): 86-89.
- [26] 王晓波, 李建国, 刘冬英, 等. 广州市市售大米中铬污染水平及健康风险评价[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(1): 75-78.
- WANG X B, LI J G, LIU D Y, et al. Evaluation on chromium contamination in rice to human health in Guangzhou City[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2015, 27(1): 75-78.
- [27] 李冰茹, 杜远芳, 王北洪, 等. 食品中总铬和铬形态分析的前处理技术概述[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(9): 2056-2062.
- LI B R, DU Y F, WANG B H, et al. Research progress on the pretreatment techniques in the analysis of total chromium and speciation chromium in food[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(9): 2056-2062.