

安梦鱼, 张青, 章赞德, 等. 不同用量腐植酸对土壤有效硒含量和硒的形态以及大蒜硒吸收的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(2): 128-133.
AN Meng-yu, ZHANG Qing, ZHANG Zan-de, et al. Effects of Different Amounts of Humic Acid on the Content of Soil Available Selenium, the Forms of Selenium and the Selenium Absorption in Garlic[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(2): 128-133.

不同用量腐植酸对土壤有效硒含量和硒的形态以及大蒜硒吸收的影响

安梦鱼^{1,2}, 张青², 章赞德³, 王煌平², 栗方亮^{2,4}, 罗涛^{2*}

(1.福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002; 2.福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建 福州 350013; 3.大田县农田建设与土肥技术推广站, 福建 大田 366100; 4.中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要:采用室内土培和网室盆栽的方法,研究了不同用量的腐植酸对土壤有效硒含量和硒形态以及大蒜硒吸收规律的影响。结果表明:土壤有效硒含量随着腐植酸用量的提高而增加,20%OM处理的土壤有效硒含量($43.3\sim 50.6\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>10%OM($37.6\sim 48.8\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>5%OM($36.0\sim 44.1\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>CK($33.0\sim 41.5\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。可溶态硒与土壤有机质含量的关联度最大(关联系数为0.821),其次为有机硫化物结合态硒(关联系数为0.693),铁锰氧化物结合态硒关联度最低(关联系数为0.482)。随着腐植酸用量的增加,土壤有机质含量得到相应提高,土壤中有机质的含量与可溶态硒、可交换态及碳酸盐结合态硒和有机硫化物结合态硒呈显著正相关,其相关系数分别为0.963、0.962和0.906,而与其他形态的硒相关性不明显。大蒜各部位干重的硒含量为根($0.167\sim 0.653\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>茎($0.114\sim 0.326\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>叶($0.056\sim 0.086\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),且4个处理大蒜鳞茎鲜重的硒含量为0.018~0.110 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均达到了富硒食品标准(HB001/T—2013)。

关键词:腐植酸;有效硒;硒形态;大蒜

中图分类号:S145.9

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2017)02-0128-06

doi: 10.13254/j.jare.2016.0219

Effects of Different Amounts of Humic Acid on the Content of Soil Available Selenium, the Forms of Selenium and the Selenium Absorption in Garlic

AN Meng-yu^{1,2}, ZHANG Qing², ZHANG Zan-de³, WANG Huang-ping², LI Fang-liang^{2,4}, LUO Tao^{2*}

(1.College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2.Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Science, Fuzhou 350013, China; 3.The Station of Farmland Construction, Soil and Fertilizer Technology of Datian County in Fujian Province, Datian 366100, China; 4.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Selenium(Se) is a necessary trace element for human health. The land area deficient in Se is up to 70% in China. And also, in some Se-enriched areas, Se-rich agricultural products can't be produced, because the bioavailability of Se in soil is very low. In this paper, soil with higher Se content was collected from a Se-rich area in Fujian Province. The soil culture test and pot experiment were carried out, to study effects of different amounts of humic acid on the content of soil available Se, the distribution of soil Se forms, and its absorption characteristics in garlic. The results showed that, the soil available Se was improved significantly with the increase of humic acid amount($P<0.01$). Contents of soil available Se were followed by 20% OM($43.3\sim 50.6\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>10% OM($37.6\sim 48.8\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>5% OM($37.6\sim 48.8\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)>CK($33.0\sim 41.5\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). The organic matter content was also increased with the increase of humic acid amounts. The significant positive correlations between contents of organic matter and different forms of Se in soils were found. The correlation coefficients were 0.963, 0.962

收稿日期:2016-09-13

基金项目:福建省省属公益项目(2015R1022-9, 2014R1022-10);国家科技支撑计划项目(2015BAD05B01, 2012BAD14B15-06);土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所)开放基金(Y412201437)

作者简介:安梦鱼(1993—),女,山西长治人,在读硕士,研究方向为植物营养学。E-mail:1348890707@qq.com

*通信作者:罗涛 E-mail: luotaofjz@188.com

and 0.906 in the water-soluble Se, exchangeable and bound to carbonates Se, and the bound to organic matter and sulfide Se, respectively. The highest correlation was found between the organic matter and water-soluble Se, with the correlation coefficient of 0.821 with grey correlation analysis method, following by bound to organic matter and sulfide Se (the correlation coefficient was 0.693), and the minimum value was existed in the bound to Fe-Mn oxides (0.482). Se contents in dry weight of different parts of garlic showed the order of root (0.167~0.653 mg·kg⁻¹)>stem (0.114~0.326 mg·kg⁻¹)>leaf (0.056~0.086 mg·kg⁻¹). The fresh Se contents were reached the Se-rich food standards (HB 001/T-2013) in all treats, from 0.018 mg·kg⁻¹ to 0.110 mg·kg⁻¹.

Keywords: humic acid; available selenium; forms of selenium; garlic

硒元素对于人体极为重要,它是人体的必需元素之一,硒元素摄取不足量会对人体造成伤害^[1-2]。有研究表明人们易患克山病和大骨节病的地区环境硒含量较低,且患病者血液中的硒含量偏低^[3]。对于哺乳动物,硒的缺乏会引起比如肌肉萎缩、心血管病、骨头和免疫系统的疾病^[4]。在全世界 40 多个缺硒国家中,我国缺硒地区达到了 70%^[5]。同时,我国也有典型的富硒区,但是有研究表明这些富硒区生产的作物并不都富硒,如陕西秦巴山区的双安乡土壤全硒量为 14.419 mg·kg⁻¹,但甘薯硒含量仅为 0.072 mg·kg⁻¹(甘薯富硒标准为 0.1 mg·kg⁻¹)^[6]。因此,如何生产出富硒的农产品成了近年学者研究的一个热点。

在富硒地区,土壤的全硒含量是比较高的,但是可以为作物吸收的有效态硒(水溶态和可交换态)的含量却是有限的^[7]。因此,有效态硒的含量对作物富硒与否起着重要的作用。土壤中硒形态与土壤 pH 值、氧化还原电位(Eh)、有机质含量、全硒量、质地、阳离子交换量及离子竞争等有关。有研究表明,土壤中有有机质含量对硒元素有双重影响^[8],富里酸含量高时,土壤硒元素的有效性增加;胡敏酸比例较大时,硒的有效性降低^[9]。同时,也有大量研究表明,在土壤中同时施加有机肥和硒肥时,会使得作物的硒含量增加^[10-13]。但是在南方富硒红壤(>0.4 mg·kg⁻¹)中,通过施用腐植酸来调节土壤有效态硒含量,从而改变作物硒吸收的研究仍比较少,腐植酸施用是增加还是减少作物硒吸收量至今仍不清楚。基于此,本文研究了不同用量腐植酸对土壤有效态硒含量和硒形态变化的影响,并分析了大蒜硒吸收的规律,以期富硒土壤生产富硒蔬菜提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试富硒土壤取自福建省大田县武陵乡(东经 117°42'、北纬 25°37'),当地年平均气温 16.83 ℃,属山地气候,土壤类型为红壤。供试腐植酸购于京津沽园艺,土壤和腐植酸理化性质见表 1。供试蔬菜为百合科大蒜(*Allium sativum* L.)。

1.2 试验设计

试验分为土培和盆栽试验,均设 4 个处理,分别为:(1)对照(CK,不添加腐植酸);(2)添加干土重 5% 的腐植酸(5%OM);(3)添加干土重 10% 的腐植酸(10%OM);(4)添加干土重 20% 的腐植酸(20%OM)。土培试验在福建省农业科学院土壤肥料研究所实验室进行,盆栽试验在福建省农业科学院土壤肥料研究所网室进行,土培试验保持土壤水分田间持水量的 80%,盆栽试验的土壤水分含量按照大蒜的生长正常管理,每个处理设置 4 个重复。土培试验开始于 2015 年 12 月 23 日,分别于 45、60、75、90、105、135、165 d 取样,每次取样 20 g,自然风干后,磨细,待测。盆栽试验所用的培养钵为聚乙烯盆(直径 26 cm,高 10 cm)。试验开始于 2015 年 12 月 29 日,施用基肥为尿素 0.61 g·kg⁻¹ 土,过磷酸钙 0.37 g·kg⁻¹ 土,硫酸钾 0.50 g·kg⁻¹ 土,相应用量的腐植酸与土壤混匀,每盆播种大蒜 9 粒,播种的大小基本一致,均匀插播,去离子水灌溉,正常管理,105 d 后大蒜成熟,进行取样,整株取出,收获的大蒜分根、鳞茎、叶分别用去离子水洗净,晾干,之后装入干净纸袋,105 ℃杀青 0.5 h,75 ℃烘至恒重,磨细备用。

表 1 供试土壤和腐植酸的基础理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil and humic acid tested

样品	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	有效硒/μg·kg ⁻¹
土壤	16.35	1.67	1.56	5.65	149.400	155.135	154.584	35.411
腐植酸	714.00	5.65	0.20	1.05	235.174	12.385	13.182	ND

注:ND 表示未检出

1.3 测定指标及方法

土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法-外加热法进行,全氮的测定采用凯氏定氮法,全磷、速效磷的测定采用钼锑抗比色法,全钾、速效钾的测定采用火焰光度法,碱解氮的测定采用碱解扩散法^[14]。硒的测定:土壤硒的测定参考农业行业标准土壤中全硒的测定(NY/T 1104—2006),植株硒的测定参考食品安全国家标准食品中硒的测定(GB 5009.93—2010),分别采用 10 mL 3:2 的 HNO₃-HClO₄ 混酸和 13 mL 12:1 HNO₃-HClO₄ 混酸电热板加热,土壤硒消化至样品变为灰白色并冒大量白烟后加 10 mL 1:1 的 HCl 100 ℃ 还原 10 min,植株硒消化至清亮无色并冒大量白烟,剩余约 2 mL 溶液后用 5 mL 1:1 的 HCl 还原至样品呈清亮无色并冒大量白烟。土壤有效硒的提取采用 0.5 mol·L⁻¹ 的 NaH₂PO₄^[15]。硒形态的浸提采用连续浸提方法^[16],提取的硒的形态分为可溶态、可交换态及碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机硫化物结合态和残渣态。植株硒含量,以及土壤全硒、有效硒、各形态硒含量统一用海光 LC-AFS 9700 原子荧光光谱仪测定。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2007、Spss 17.0 等软件作单因素方差分析(LSD 法)以及相关性分析,灰色关联分析用 DPS 数据处理系统(v12.5)进行分析。

2 结果与分析

2.1 施用腐植酸对土壤有效硒含量以及硒形态的影响

2.1.1 施用腐植酸对土壤有效硒含量的影响

由图 1 可以看出,随腐植酸用量的增加土壤有效硒的含量也随之提高,在整个培养过程中,20%OM 的处理有效硒含量(43.3~50.6 μg·kg⁻¹)>10%OM(37.6~48.8 μg·kg⁻¹)>5%OM(36.0~44.1 μg·kg⁻¹)>CK(33.0~41.5 μg·kg⁻¹)。由表 2 看出,添加 20%OM 处理的有效硒含量,在整个培养阶段均显著高于 CK 处理($P<0.05$),在 60、75、90、105 d,显著高于添加 5%OM 处

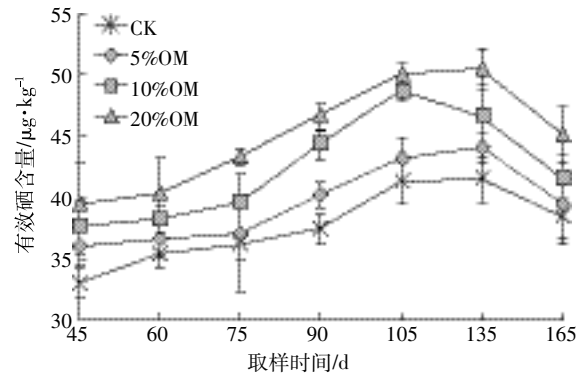


图 1 不同时期土壤有效硒含量

Figure 1 The contents of available selenium in different periods

理,在 90 d 时,显著高于 10%OM 处理,可见 20%OM 处理对提高土壤有效硒含量的效果最好。10%OM 处理的有效硒含量,在 45、90、105 d 显著高于 CK 处理,在 90、105 d 还显著高于 5%OM 处理,可见 10%OM 处理对提高土壤有效硒含量的效果次之。5%OM 处理的有效硒含量在培养 90 d 时显著高于 CK 处理。

在 45~135 d 的培养期间内,每个处理的有效硒含量都随着时间的增加而提高,在 135~165 d 的培养时间内,土壤有效硒含量有所下降,是否添加腐植酸对土壤有效硒的活化有一定限度,还是土壤有效硒含量会随着培养时间再延长而下降,有待进一步研究。在培养 165 d 时,CK、5%OM、10%OM、20%OM 处理的土壤有机质含量分别为 24.81、36.90、76.66 g·kg⁻¹ 和 119.98 g·kg⁻¹,而有效硒含量分别为 38.4、39.5、41.5 μg·kg⁻¹ 和 45.1 μg·kg⁻¹。相关分析表明,在 165 d 取样时,测得土壤有效硒含量与土壤有机质含量呈极显著正相关,相关系数为 0.994($P<0.01$)。可见,添加腐植酸能使土壤有效硒含量提高,可能与腐植酸增加了土壤有机质含量有关。

2.1.2 施用腐植酸对土壤硒形态的影响

由图 2 可以看出,在各处理中可溶态硒所占的比例最低,在 0.642%~2.364%之间;可交换态及碳酸盐结合态硒和铁锰氧化物结合态硒含量居中,其占有的

表 2 不同处理的土壤有效硒在不同时间点的含量(μg·kg⁻¹)

Table 2 The contents of available selenium with different amounts of humic acid in different periods(μg·kg⁻¹)

处理	45 d	60 d	75 d	90 d	105 d	135 d	165 d
CK	33.0±1.2 b	35.4±0.7 b	36.0±1.2 b	37.5±0.7 d	41.2±1.7 b	41.5±1.9 b	38.4±0.9 b
5%OM	36.0±1.6 ab	36.6±0.8 b	37.2±4.9 b	40.2±0.6 c	43.1±1.7 b	44.1±1.2 ab	39.5±1.9 ab
10%OM	37.6±2.2 a	38.3±0.6 ab	39.6±2.4 ab	44.3±0.7 b	48.8±0.7 a	46.6±2.8 ab	41.5±1.2 ab
20%OM	39.3±3.4 a	40.3±1.7 a	43.3±0.7 a	46.7±0.6 a	50.1±1.0 a	50.6±1.7 a	45.1±1.3 a

注:表中同列不同字母表示不同处理间差异达显著水平($P<0.05$)

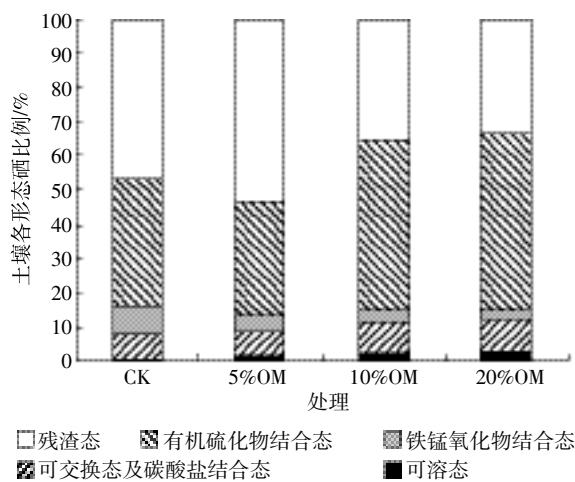


图 2 培养 165 d 各形态硒所占的比例

Figure 2 The percentage of selenium forms in soil at 165 d

比例分别为 6.922%~9.355%和 3.135%~8.453%;有机硫化物结合态硒和残渣态硒的相对含量最高,所占比例分别为 33.844%~51.123%和 34.023%~53.254%。随腐植酸用量的增加,可溶态硒、可交换态及碳酸盐结合态硒、有机硫化物结合态硒含量也随之增加,呈显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为 0.963、0.962 和 0.906,其中 20%OM、10%OM、5%OM 与 CK 相比,可溶态硒含量分别为 CK 的 3.69、2.95 倍和 1.98 倍,有机硫化物结合态硒含量分别为 CK 的 1.379、1.334 倍和 0.913 倍。铁锰氧化物结合态硒和残渣态硒的含量与腐植酸用量的相关性不显著,但表现出随着腐植酸用量的增加有所减少的趋势,20%OM 处理的铁锰氧化物结合态硒含量、残渣态硒含量比 CK 处理分别下降了 62.9%和 27.5%,而可交换态及碳酸盐结合态硒的含量随着腐植酸用量的增加变化不大,维持在 0.110~0.148 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右。

将培养至 165 d 时的 4 个处理的 5 种土壤形态硒含量作为子序列,将不同处理的有机质含量作为母序列(数据见表 2),通过均值化变化方法,将原始数据转化为可比较的数据系列,并取 $\Delta_{\min}=0$,分辨系数 $p=0.5$,用 DPS 数据处理系统进行灰色关联分析。结果表明(表 3),可溶态硒与有机质的关联度 r_{0i} 最大,为 0.821,其次为有机硫化物结合态硒,关联度达 0.693,再次分别是可交换态及碳酸盐结合态硒、残渣态硒和铁锰氧化物结合态硒,关联度分别为 0.658、0.500 和 0.482,说明土壤有机质的增加,对土壤可溶态硒和有机硫化物结合态硒的影响最大,即通过添加腐植酸,可提高土壤有机质含量,从而达到提高土壤有效态硒含量的作用。

2.2 施用腐植酸对大蒜硒累积、迁移的影响

从图 3 来看,每个处理大蒜不同部位的硒含量均表现为根>茎>叶。CK 处理的根部硒含量是茎和叶的 1.47 倍和 2.98 倍;5%OM 处理的根部硒含量分别是茎和叶的 1.30 倍和 3.08 倍;10%OM 处理的根部硒含量分别是茎和叶的 1.29 倍和 3.36 倍;20%OM 处理的根部硒含量分别是茎和叶的 1.96 倍和 7.47 倍。此外,4 个处理大蒜鳞茎鲜重的硒含量为 0.018~0.110 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均达到了富硒食品标准(天然富硒食品硒含量分类标准 HB001/T—2013)。

随着腐植酸用量的增加,大蒜相同部位的硒含量会增加,均表现出硒含量 20%OM>10%OM>5%OM>CK。其中,5%OM、10%OM 和 20%OM 的处理大蒜根的硒含量分别是 CK 的 1.04、1.50 倍和 3.82 倍;相应处理大蒜茎的硒含量分别是 CK 的 1.17、1.70、2.86 倍;叶的硒含量分别是 CK 的 1.02、1.33、1.53 倍。其中 20%OM 处理的大蒜根和茎的硒含量,显著高于

表 3 灰色关联分析表

Table 3 The grey correlation analysis table

项目	处理	可溶态	可交换态及碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机硫化物结合态	残渣态	有机质
均值化变换结果	CK	0.416	0.863	1.686	0.865	1.102	0.384
	5%OM	0.822	0.870	0.929	0.789	1.252	0.571
	10%OM	1.227	1.102	0.759	1.153	0.846	1.187
	20%OM	1.534	1.166	0.625	1.192	0.800	1.858
有机质与其他因子的绝对差值	CK	0.032	0.479	1.302	0.481	0.718	
	5%OM	0.251	0.298	0.358	0.218	0.680	
	10%OM	0.040	0.085	0.428	0.034	0.341	
	20%OM	0.323	0.692	1.232	0.665	1.058	
最大差值 $\Delta_{\max}=1.301\ 83$							
关联系数							
G(1,1)=0.821		G(1,2)=0.658		G(1,3)=0.482	G(1,4)=0.693	G(1,5)=0.500	

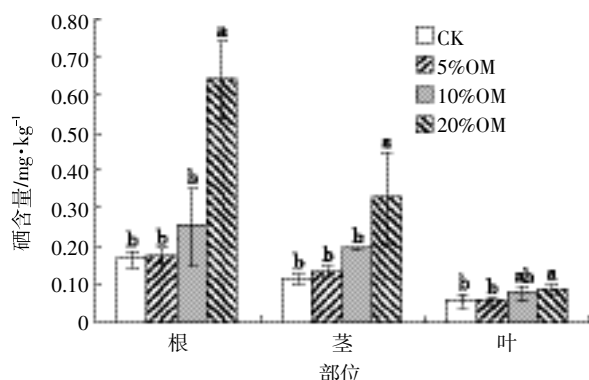


图3 大蒜各部位干重的硒的吸收规律

Figure 3 Characteristics of selenium uptake in different parts of garlic dry weight

CK、5%OM 和 10%OM ($P<0.05$), 且该处理大蒜叶的硒含量也显著高于 CK、5%OM ($P<0.05$)。可见, 在土壤中添加腐植酸能提高大蒜的硒含量。

3 讨论

有研究表明, 在土壤有效硒含量的诸多影响因子中, 有机质含量对土壤有效硒的影响较大, 由于有机质对硒元素的吸附作用受到有机质的组成以及质和量的影响^[17], 表现出双重影响, 一方面可以提高可溶性硒的含量, 而另一方面又会吸附固定硒, 使得土壤中有效态的硒含量减少^[8]。其中与富里酸结合的硒有效性高, 易被植物所吸收; 与胡敏酸结合的硒有效性低, 不易被植物吸收^[9]。本试验表明增加腐植酸能提高土壤有效硒含量, 可能与腐植酸中的富里酸含有多种活性官能团, 如 $-COOH$ 、醇 $-OH$ 、 $-NH_2$ 、酚 $-OH$ 等^[18-19]有关, 这些官能团能与硒元素络合, 形成生物活性高的硒化合物, 从而提高土壤硒的有效性。可见, 在富硒土壤中施入腐植酸, 是土壤硒被活化的途径之一, 这种方法较好地利用了富硒土壤的优势, 既减少了因外源添加硒带来的污染, 又形成毒性低活性高的硒化合物, 使得作物硒含量有所提高, 值得在富硒地区推广应用而生产富硒且安全的农产品。

大量研究表明在浸提的硒的形态中, 可溶态硒的含量最低, 残渣态硒的含量最高^[20-21], 本试验结果与之基本一致。本试验在土壤中添加腐植酸使得土壤硒形态的分布发生一定的变化, 有研究表明, 有机质的含量与有机结合态硒、可交换态硒呈正相关, 与铁锰氧化物结合态硒的含量呈负相关^[22], 与本试验所得结论一致。本试验中残渣态硒的含量随有机质含量呈负相

关, 与之前的研究^[23-24]有所不同。有可能是因为有机质对土壤结构的影响而使得土壤硒的形态分布发生了一些变化, 其现象有待进一步研究。

4 结论

随腐植酸用量的增加, 土壤有效硒含量也随之增加, 在整个培养过程中, 20%OM 的处理有效硒含量 ($43.3\sim 50.6\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) $> 10\%$ OM ($37.6\sim 48.8\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) $> 5\%$ OM ($36.0\sim 44.1\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) $> \text{CK}$ ($33.0\sim 41.5\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 在整个培养期间, 各个处理有效硒含量的变化均呈现先增加后减少的趋势。

不同处理土壤中有有机硫化物结合态硒和残渣态硒占总硒的比例最高, 其次是铁锰氧化物结合态硒和可交换态及碳酸盐结合态硒, 可溶态硒含量最低。随着腐植酸用量的增加, 土壤有机质也随之增加, 有机质的含量与可溶态硒、可交换态及碳酸盐结合态硒和有机硫化物结合态硒呈现显著正相关, 与铁锰氧化物结合态硒和残渣态硒呈现负相关。以土壤有机质含量作为母序列进行的灰色关联分析也表明可溶态硒与有机质的关联度最大, 其次为有机硫化物结合态硒, 再次分别是可交换态及碳酸盐结合态硒、残渣态硒和铁锰氧化物结合态硒。

大蒜各部位的硒含量均为根 $>$ 茎 $>$ 叶, 且随腐植酸用量增加, 大蒜根、茎、叶硒含量也随之增加, 表现为根含硒量增加的倍数最大, 其次是茎, 最小的是叶。

参考文献:

- [1] 施和平. 植物中的硒及其生理作用[J]. 植物学通报, 1995, 12(增刊): 31-36.
SHI He-ping. Selenium and its physiological roles in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1995, 12(suppl): 31-36. (in Chinese)
- [2] Hamilton S J. Review of selenium toxicity in the aquatic food chain[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 326(1): 1-31.
- [3] 曾 静, 罗海吉. 微量元素硒的研究进展[J]. 微量元素与健康研究, 2003, 20(2): 52-56.
ZENG Jing, LUO Hai-ji. The advanced research of trace selenium[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2003, 20(2): 52-56. (in Chinese)
- [4] Longchamp M, Angeli N, Castrec-Rouelle M. Selenium uptake in *Zea mays* supplied with selenate or selenite under hydroponic conditions[J]. *Plant and Soil*, 2013, 362(1-2): 107-117.
- [5] 王金达, 于君宝, 张学林. 黄土高原土壤中硒等元素的地球化学特征[J]. 地理科学, 2000, 20(5): 469-473.
WANG Jin-da, YU Jun-bao, ZHANG Xue-lin. Geochemical features of elements of selenium etc. in soil of loess plateau[J]. *Science Geographica Sinica*, 2000, 20(5): 469-473. (in Chinese)

- [6] 张百忍,解松峰. 陕西秦巴山区不同农田农作物硒含量变化规律分析[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(10): 128-134.
ZHANG Bai-ren, XIE Song-feng. Analysis of selenium concentrations in different crops and croplands in Qinba mountain areas, Shanxi Province[J]. *Journal of Northeast Agriculture University*, 2011, 42(10): 128-134. (in Chinese)
- [7] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 土壤-植物系统中硒的浸提形态研究进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 2395-2397.
ZHAO Shao-hua, YU Wan-tai, ZHANG Lu, et al. Study progress on the extraction species of selenium from soil-plant system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2): 2395-2397. (in Chinese)
- [8] 朱建明, 梁小兵, 凌宏文, 等. 环境中硒存在形式的研究现状[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 75-81.
ZHU Jian-ming, LIANG Xiao-bing, LING Hong-wen, et al. Advanced in studying occurrence modes of selenium in environment[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(1): 75-81. (in Chinese)
- [9] 陈雪龙, 王晓龙, 齐艳萍. 大庆龙凤湿地土壤理化性质与硒元素分布关系研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 159-162.
CHEN Xue-long, WANG Xiao-long, QI Yan-ping. Correlation between soil properties and distribution of selenium in soil in Longfeng wetland of Daqing[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(4): 159-162. (in Chinese)
- [10] 殷金岩, 耿增超, 李致颖, 等. 硒肥对马铃薯硒素吸收、转化及产量、品质的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 823-829.
YIN Jin-yan, GENG Zeng-chao, LI Zhi-ying, et al. Effects of three fertilizers on uptake, transformation, yield and quality of potatoes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 823-829. (in Chinese)
- [11] 刘 颢, 胡华锋, 田春丽, 等. 富啡酸和锌硒配施对紫花苜蓿草产量和品质的影响[J]. 中国草地学报, 2013, 35(6): 29-33.
LIU Yan, HU Hua-feng, TIAN Chun-li, et al. Effect of fulvic acid, zinc and selenium combined application on alfalfa yield and quality[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, 35(6): 29-33. (in Chinese)
- [12] 贺前锋, 李鹏祥, 易凤姣, 等. 叶面喷施硒肥对水稻植株中镉、硒含量分布的影响[J]. 湖南农业科学, 2016(1): 37-39.
HE Qian-feng, LI Peng-xiang, YI Feng-jiao, et al. Effects of selenium fertilizer foliage application on distribution of cadmium and selenium in rice[J]. *Hunan Agriculture Sciences*, 2016(1): 37-39. (in Chinese)
- [13] 孔娟娟, 周守标, 奚功芳. 2种施硒方式对黄山贡菊生长、生理特性及硒积累的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 310-316.
KONG Juan-juan, ZHOU Shou-biao, XI Gong-fang. Effects of two ways of applying selenium in soil on the growth, biological characteristics and selenium accumulation of *dendranthema morifolium*[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 310-316. (in Chinese)
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000, 12: 30-33.
BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000, 12: 30-33. (in Chinese)
- [15] 温国灿, 黄 艳, 郭永玲, 等. 酸性土壤有效硒提取条件优化的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1996-2000.
WEN Guo-can, HUANG Yan, GUO Yong-ling, et al. Optional conditions of extraction method for available selenium in acid soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5): 1996-2000. (in Chinese)
- [16] 瞿建国, 徐伯兴. 连续浸提技术测定土壤和沉淀物中硒的形态[J]. 环境科学, 1997, 16(3): 277-283.
QU Jian-guo, XU Bo-xing. Sequential extraction techniques for determination of selenium speciation in soils and sediments[J]. *Environment Chemistry*, 1997, 16(3): 277-283. (in Chinese)
- [17] Coppin F, Chabroulet C, Martin-Grain A, et al. Methodological approach to assess the effect of soil ageing on selenium behaviour: First results concerning mobility and solid fractionation of selenium[J]. *Biol Fertil of Soils*, 2006(42): 379-386.
- [18] 邹光中, 任海清. 腐植酸与硒的吸附模型研究[J]. 稀有金属, 2003, 27(3): 413-415.
ZOU Guang-zhong, REN Hai-qing. Study on model of adsorption for Se on humic acid[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2003, 27(3): 413-415. (in Chinese)
- [19] 杨忠才, 陈 亮. 富里酸硒的合成及应用[J]. 微量元素与健康研究, 2004, 21(1): 32-33.
YANG Zhong-cai, CHEN Liang. The synthesis and application of fulvic acid selenium[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2004, 21(1): 32-33. (in Chinese)
- [20] Sharmasarkar S, Vance G F. Fractional partitioning for assessing solid-phase speciation and transformations of soil selenium[J]. *Soil Science*, 1995, 160(1): 43-55.
- [21] 王松山, 梁东丽, 魏 威, 等. 基于路径分析的土壤性质与硒形态的关系[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 823-830.
WANG Song-shan, LIANG Dong-li, WEI Wei, et al. Relationship between soil physico-chemical properties and selenium species based on path analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 823-830. (in Chinese)
- [22] 吴少尉, 池 泉, 陈文武, 等. 土壤中硒的形态连续浸提方法的研究[J]. 土壤, 2004, 36(1): 92-95.
WU Shao-wei, CHI Quan, CHEN Wen-wu, et al. Sequential extraction—a new procedure for selenium of different forms in soil[J]. *Soils*, 2004, 36(1): 92-95. (in Chinese)
- [23] 周 越, 吴文良, 孟凡乔, 等. 土壤中硒含量、形态及有效性分析[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(6): 527-532.
ZHOU Yue, WU Wen-liang, MENG Fan-qiao, et al. Review on the content, specification of selenium and its available in soils[J]. *Journal of Agriculture Resource and Environment*, 2014, 31(6): 527-532. (in Chinese)
- [24] Kamei-Ishikawa N, Tagami K, Uchida S. Sorption kinetics of selenium on humic acid[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2007, 274(3): 555-561.